

## تقویت پدافند غیرعامل شبکه های برق با پیش بینی میرایی، نوع و محل نوسانات سامانه قدرت

محمد حسین ولایتی<sup>۱</sup>، رضا غفارپور<sup>۲\*</sup>

۱- مربی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان و عضو باشگاه پژوهشگران جوان ۲- مربی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۳/۰۶/۰۳، پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۴)

### چکیده

مبحث پدافند غیر عامل در صنعت برق را می توان از جنبه های گوناگون شامل اجرایی، مطالعاتی و بهره برداری، مورد بررسی قرار داد. برنامه ریزی و بهره برداری صحیح از سامانه های قدرت، به عنوان یک عامل پدافندی، تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله پایداری زاویه ای اغتشاش کوچک ژنراتورها می باشد. این نوع از پایداری ها معمولاً در دو حالت نوسانی شامل نوسانات درون ناحیه ای و بین ناحیه ای مورد بررسی قرار می گیرند. از آنجا که بررسی این اتفاقات با استفاده از روش های مرسوم مطالعات پایداری سخت و پیچیده است، در این مقاله میرایی مد بحرانی سامانه با استفاده از شبکه عصبی مورد پیش بینی قرار گرفته و در ادامه شاخصی مبتنی بر ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها به منظور تعیین نوع و محل نوسانات سامانه قدرت در مد بحرانی معرفی شده و سپس با استفاده از شبکه عصبی پیش بینی شده است. روش پیشنهادی، اطلاعات بهره برداری سامانه قدرت در شرایط عادی و اضطراری را با دقت و سرعت بالایی در اختیار بهره برداران شبکه برای بهره برداری مناسب از آن قرار می دهد.

**کلید واژه ها:** مقدار ویژه بحرانی، نوسان بین ناحیه ای، نوسان محلی، ضریب مشارکت ژنراتور، شاخص  $P\delta$ ، شبکه عصبی.

## Enhancing Passive Defence of Power System Networks Using Prediction Damping, Type and Location of Power System's Oscillations

M. H. Velayati, R. Ghaffarpour\*

Imam Hossein University

(Received: 25/8/2014; Accepted: 04/05/2015)

### Abstract

Proper planning and operation of power system as a defence issue, is affected by several factors such as small signal rotor angle stability of generators. This type of stabilities are usually studied in two oscillatory modes including local and inter-area oscillations. Since the study of these events by using conventional methods of stability is difficult, in this paper, index-based participation factor of generators in the dominant mode is introduced and then type and location of the oscillations of power system are predicted by the neural network. In addition, the damping of the critical mode is predicted using neural network. Moreover, capability of the proposed method is evaluated by considering the effect of static load models and noisy data. The proposed method gives appropriate information of power system to the network operators in the normal and emergency conditions with high accuracy and speed.

**Keywords:** Critical Eigenvalue, Inter-Area Oscillations, Local Oscillations, Participation Factor of Generator,  $P\delta$  Index, Neural Network.

\*Corresponding Author E-mail: Rghaffarpour@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

شرایطی، رفتارهای کنترلی که توسط اپراتور شبکه برای حفظ پایداری شبکه برق باید اعمال شود تا نوسانات میرا شود، اهمیت بالایی پیدا می‌کند. بر این اساس، راه‌کارهای متفاوتی به منظور تعیین بهترین رفتار کنترلی در جهت بهبود پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک، ارائه شده است [۴، ۱۰-۸].

تحلیل رفتار نوسانی سامانه قدرت معمولاً با استفاده از روش‌های سنتی مانند شبیه‌سازی حوزه زمان و تحلیل مدال ژاکوبین جبری دینامیکی سامانه قدرت، صورت می‌گیرد. با این حال، از آنجا که مطالعات پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک معمولاً در بازه زمانی کوتاه مدت رخ داده و زمان مطالعه آن در حدود ۱۰ تا ۲۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود؛ به دلیل زمانبری و پیچیدگی روش‌های مذکور و نیز نیازمندی به مدل‌سازی دقیق سامانه قدرت در هر شرایط بهره‌برداری، این روش‌ها کارآمدی چندانی در تعیین وضعیت بهنگام سامانه‌های قدرت ندارند. به همین دلیل امروزه استفاده از شبکه عصبی به عنوان یک ابزار دارای سرعت و دقت بالا در تعیین وضعیت بهره‌برداری سامانه قدرت از دیدگاه انواع پایداری‌های سامانه قدرت مانند پایداری ولتاژ [۱۱] و پایداری گذرا [۱۲] و نیز پیش‌بینی بار مصرفی [۱۳] گسترش فراوانی پیدا کرده است. در حقیقت، شبکه‌های عصبی به عنوان یک ابزار هوشمند، راهکاری برای تعیین وضعیت فعلی و حتی آتی در علوم مختلف مطرح شده‌اند. به عنوان مثال، می‌توان به استفاده از شبکه عصبی در شناسایی تصویر مجرمین در علوم نظامی اشاره نمود.

هدف از این مقاله، بررسی قابلیت شبکه عصبی در تعیین پایداری نوسانی سامانه قدرت به عنوان یک ابزار پدافندی در جهت تأمین شرایط بهره‌برداری بهینه از شبکه برق می‌باشد. بر این اساس، با معرفی یک شاخص جدید که بر اساس اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مد بحرانی تعیین می‌شود، نوع نوسانات سامانه قدرت و چگونگی مشارکت ژنراتورها در این نوسانات، تعیین خواهد شد. در ادامه، به منظور افزایش سرعت و دقت در تعیین موارد یاد شده، روشی جدید مبتنی بر ترکیب شبکه عصبی و روش انتخاب مؤلفه<sup>۵</sup>، ارائه خواهد شد. همچنین، از آنجا که میرایی نوسانات در سامانه‌های قدرت اهمیت بالایی دارد، روشی مبتنی بر شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی میزان میرایی نوسانات مد بحرانی در شرایط بهره‌برداری مختلف ارائه خواهد شد. کاربرد روش پیشنهادی، در تعیین بهترین راهکارهای کنترلی در سامانه‌های قدرت مانند تعیین بهترین مکان اتصال پایدارساز سامانه قدرت به منظور تقویت میرایی سامانه قدرت بوده که در نتیجه آن اهداف پدافند غیر عامل در صنعت برق به ویژه در حوزه بهره‌برداری شبکه، پوشش داده خواهد شد. بر این اساس، ساختار مقاله به شرح ذیل است:

در بخش دوم، ارتباط میان پدافند غیر عامل و توسعه و بهره‌برداری از شبکه‌های برق بیان خواهد شد. در بخش سوم، پایداری زاویه‌ای سیگنال

امروزه، با توجه به وقوع حوادث طبیعی، جنگ، انجام عملیات سایبری، جنگ‌های مغناطیسی، نفوذ و خرابکاری که جزء مهم‌ترین تهدیدات صنعت برق می‌باشند، به کارگیری فناوری‌های جدید به منظور بهره‌برداری و استفاده صحیح و بهینه از انرژی الکتریکی در حوزه تولید، انتقال و توزیع اجتناب ناپذیر می‌باشد. از این رو یکی از مهمترین راهکارهای مواجهه با این تهدیدات، به کارگیری مفهوم پدافند غیرعامل یا دفاع در برابر تهاجم بدون استفاده از سلاح در برنامه‌ریزی، توسعه و بهره‌برداری شبکه‌های برق به عنوان پشتوانه اقتدار ملی می‌باشد. در این راستا، انجام مطالعات پایداری سامانه‌های قدرت به ویژه پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک که به طور مستقیم تحت تأثیر عملکرد ژنراتورهای شبکه برق می‌باشد، اهمیت بالایی پیدا کرده است. در حقیقت، این نوع از پایداری‌ها، علاوه بر اینکه به طور مستقیم در فرآیند بهره‌برداری از شبکه‌های برق مؤثر می‌باشند، در برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق نیز بسیار مؤثر می‌باشند.

پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک که در این مقاله مورد مطالعه قرار خواهد گرفت، اشاره به قابلیت سامانه قدرت در حفظ هم‌زمانی<sup>۱</sup> ژنراتورها به ازای بروز یک اغتشاش کوچک مانند تغییرات تدریجی و آرام بار، دارد [۳-۱]. مسائل مرتبط با پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک که تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند از دست رفتن ژنراتورها، تغییر وضعیت بارگذاری سامانه، بروز انواع خطا و ... می‌باشند [۴]، معمولاً به صورت نوساناتی با فرکانس ۲-۱ هرتز (نوسانات درون ناحیه‌ای (محلی<sup>۲</sup>)) و یا فرکانس کمتر از ۱ هرتز (نوسانات بین ناحیه‌ای<sup>۳</sup>) رخ می‌دهند [۱، ۳، ۵ و ۶].

به منظور تحلیل رفتار نوسانی سامانه قدرت بر اساس نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای، دستیابی به مقدار ویژه بحرانی ژاکوبین جبری دینامیکی سامانه قدرت و ضریب مشارکت<sup>۴</sup> غالب ژنراتورها در این مد، ضروری می‌باشد. با این حال، با توجه به بروز رفتارهای غیرخطی در سامانه قدرت و تغییر وضعیت بهره‌برداری آن در شرایط عادی و اضطراری، مقدار ویژه بحرانی و در نتیجه نوع نوسان رخ داده در سامانه قدرت، تغییر می‌کند. به عنوان نمونه، افزایش امیدانس خط انتقال سبب می‌شود که مد نوسانی درون ناحیه‌ای به مد نوسانی بین ناحیه‌ای تغییر وضعیت دهد [۳ و ۶]. در صورت عدم میرایی این گونه نوسانات، ممکن است شبکه قدرت به صورت جزیره‌هایی مجزا از هم درآمده و در نتیجه پایداری شبکه دچار اختلال شود [۷]. چنین رخدادی ممکن است سبب بروز خاموشی‌های گسترده در شبکه برق شده که در نتیجه آن، مشکلات امنیتی از جهات گوناگون ایجاد خواهد شد. بر این اساس، شبکه برق ملی همواره به عنوان یک فرا زیرساخت شناخته می‌شود. در چنین

<sup>1</sup> Synchronism

<sup>2</sup> Local Oscillation

<sup>3</sup> Inter-Area Oscillation

<sup>4</sup> Participation Factor

<sup>5</sup> Feature Selection

پیچشی شود [۳]. از این میان، نوسانات بین ناحیه‌ای، درون ناحیه‌ای و نوسان مد کنترلی، مستقیماً ناشی از کمبود گشتاورهای میراکننده و سنکرون کننده می‌باشند [۳]. همچنین، نوسانات پیچشی، تحت تأثیر عملکرد متقابل میان رتور ژنراتور و توربین می‌باشد [۳ و ۱۴]. دسته‌بندی نوسان‌های مذکور، در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود که نوسانات محلی میان ژنراتورهای موجود در یک ناحیه رخ می‌دهد.

این در حالی است که نوسانات بین ناحیه‌ای، بین ژنراتورهایی که در نواحی مختلف قرار دارند، رخ می‌دهد. یکی از ابزارهایی که به طور مرسوم در تحلیل رفتار نوسانی، تعیین مقادیر ویژه، میزان میرایی این مقادیر و ضریب مشارکت ژنراتورها در این مقادیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، تحلیل مدال ژاکوبین جبری دینامیکی سامانه قدرت است. در رابطه (۱)، ژاکوبین جبری دینامیکی کاهش یافته<sup>۱</sup> سامانه قدرت ( $J_r$ ) بیان شده است [۱۳].

$$\Delta \dot{x} = [J_1 - J_2 J_3^{-1} J_4] \Delta x = J_r \Delta x \quad (1)$$

عناصر تشکیل دهنده این ژاکوبین، مجموعه‌ای از متغیرهای حالت سامانه (مانند سرعت ژنراتورها، شار تحریک ژنراتورها در راستای محورهای  $d$  و  $q$ ، زاویه رتور ژنراتورها و ...)، متغیرهای جبری، پارامترهای قابل کنترل (مانند ولتاژ مرجع SVCها و نیز تپ و تنظیمات مربوط به AVRها) و پارامترهای غیر قابل کنترل (مانند توان‌های اکتیو و راکتیو بارها) می‌باشند [۱۵]. با استفاده از این ژاکوبین، مقادیر ویژه، بردارهای ویژه راست و چپ و ضرایب مشارکت ژنراتورهای سامانه قابل دسترسی خواهد بود.

با در نظر گرفتن رابطه (۱)، سه مورد از مهم‌ترین کاربردهای ژاکوبین  $J_r$  در مطالعات پایداری سیگنال کوچک، به شرح ذیل می‌باشد:

الف- با توجه به این ژاکوبین، ضریب میرایی مقدار ویژه بحرانی که پارامتری مهم در تعیین میزان میرایی نوسانات سامانه قدرت است، قابل دستیابی می‌باشد. بر اساس [۱۵] چنانچه میرایی مد بحرانی سامانه مثبت باشد، در این صورت نوسانات سامانه میرا شونده بوده و پایداری سامانه حفظ خواهد شد. این حالت متناظر با قرار گرفتن تمامی مقادیر ویژه ژاکوبین جبری دینامیکی سامانه قدرت در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط می‌باشد. در نقطه مقابل، چنانچه ضریب میرایی مد بحرانی سامانه منفی باشد، در این صورت حداقل یک جفت مقدار ویژه مختلط سامانه در سمت راست محور موهومی صفحه اعداد مختلط قرار گرفته و در نتیجه نوسانات سامانه نامیرا خواهد بود. با فرض  $\alpha_i$  و  $\beta_i$  به عنوان قسمت حقیقی و موهومی نامین مقدار ویژه  $(\lambda_i = -\alpha_i \pm j\beta_i)$ ، ضریب میرایی این مد بر اساس رابطه (۲)، محاسبه می‌شود.

$$\xi_i = \frac{-\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}}, \quad -1 \leq \xi_i \leq 1 \quad (2)$$

کوچک و ابزارهای تشخیص آن به اختصار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. الگوریتم پیشنهادی به منظور پیش‌بینی میزان میرایی و نوع نوسانات بین ناحیه‌ای و درون ناحیه‌ای و چگونگی اجرای روش انتخاب مؤلفه پیشنهادی در بخش چهارم بیان خواهد شد. در بخش پنجم، نتایج عددی ناشی از بررسی ارتباط میان میرایی، فرکانس مد بحرانی، ضرایب مشارکت ژنراتورها و نوسانات بین ناحیه‌ای و درون ناحیه‌ای و نیز قابلیت شبکه عصبی در پیش‌بینی موارد مذکور، بیان خواهد شد.

## ۲. پدافند غیرعامل در صنعت برق

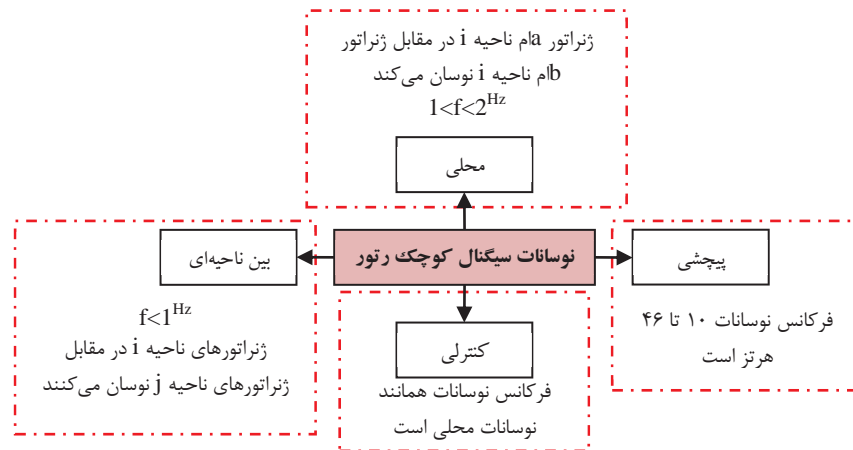
با توجه به وجود تهدیدهای نوین که زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی کشور به ویژه در حوزه صنعت برق را با مشکل مواجه می‌کند، مدیریت بهینه‌سازی شبکه، تأمین و توزیع نیروی برق مطمئن و پایدار، تأمین برق و روشنایی معابر و مراکز حساس و حیاتی در اولویت قرار گرفته است. در نتیجه، ضرورت تقویت پدافند غیرعامل یا دفاع در برابر تهاجم بدون استفاده از سلاح، بیش از پیش احساس می‌شود. مبحث پدافند غیرعامل در صنعت برق را می‌توان از جنبه‌های گوناگون شامل اجرایی، مطالعاتی و بهره‌برداری، مورد بررسی قرار داد. استفاده از مولدهای کوچک و توسعه آن‌ها، ایمن‌سازی نیروگاه‌ها و دیسپاچینگ‌های منطقه‌ای، مکان‌یابی نیروگاه‌ها و پست‌های جدید، از جمله راهکارهای اجرایی در حوزه پدافند غیرعامل می‌باشند که می‌توانند به منظور افزایش پایداری شبکه و کاهش آسیب‌پذیری تأسیسات برق‌رسانی مورد استفاده قرار گیرند. از سویی دیگر، شناسایی و طبقه‌بندی تأسیسات و فرآیندهای حیاتی، حساس و آسیب‌پذیر شبکه برق، تدوین و اجرای برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت و انجام پژوهش‌های مورد نیاز به منظور دست‌یابی به راه‌کارهای جدید کم هزینه، مؤثر و عملیاتی در عرصه پدافند غیرعامل، از جمله استراتژی‌های مدیریت بحران و پدافند غیرعامل در وزارت نیرو می‌باشند که می‌توانند در حوزه مطالعاتی و بهره‌برداری قرار بگیرند.

با توجه به موارد بیان شده، انجام مطالعات گوناگون در صنعت برق از قبیل مطالعات پایداری، اتصال کوتاه، طرح‌های توسعه نیروگاه‌ها، شبکه‌های انتقال و توزیع نیرو، توسعه پست‌ها و ... پیش زمینه‌ای برای طرح‌های اجرایی بوده و زمینه‌ساز بهره‌برداری پایدار از شبکه‌های برق خواهد بود. بر این اساس، با توجه به تأثیر رخدادهای نوسانی بر عملکرد ژنراتورها، پایداری شبکه‌های برق و بروز خاموش‌ها؛ در این مقاله، پایداری سامانه قدرت از دید سیگنال کوچک مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۳. پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک

از بین رفتن تعادل میان گشتاور الکترومغناطیسی خروجی ژنراتور و گشتاور الکترومکانیکی ورودی به ژنراتور در ازای بروز یک اغتشاش در سامانه قدرت، می‌تواند سبب بروز نوسانات مختلفی از قبیل نوسانات بین ناحیه‌ای، درون ناحیه‌ای، نوسانات مد کنترلی و

<sup>۱</sup> Reduced Dynamic Algebraic Jacobian



شکل ۱. انواع نوسانات سامانه قدرت از دیدگاه مطالعات زاویه‌ای سیگنال کوچک رتور

شکل، تعیین مقدار ویژه بحرانی سامانه و فرکانس آن مشخص کننده اینکه نوسانات میان کدام ژنراتورهای سامانه رخ می‌دهد، نمی‌باشد. علاوه بر این، با استفاده از این نتیجه، نمی‌توان نوسان محلی را از مد کنترلی تفکیک کرد. بنابراین، برای رفع این موارد باید از روشی کامل‌تر مانند گام دوم نشان داده شده در شکل (۲) استفاده کرد. با این حال، استفاده از روش‌های نشان داده شده در شکل (۲)، علاوه بر کاهش قدرت مانور اپراتورها به منظور مواجهه با اغتشاش‌های رخ داده در شبکه برق، به دلیل پیچیده‌گی و زمان‌بر بودن می‌تواند سبب از دست رفتن پایداری سامانه قدرت قبل از اجرای یک رفتار کنترلی مناسب شود. بنابراین، لزوم ارائه یک روش سریع و دقیق که بتواند اهداف پدافندی در شبکه‌های برق را تضمین و تأمین کند، ضروری است. در بخش بعد، رویه‌ای جدید بدین منظور ارائه و معرفی خواهد شد.

#### ۴. رویه پیشنهادی برای پیش‌بینی نوسانات درون ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای و میرایی مد بحرانی

اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها با توجه به نوع مد بحرانی سامانه، تغییر می‌کند [۳]. آگاهی از این تغییرات برای شناسایی ژنراتورهای مؤثر در مد بحرانی و نوسانات سامانه، اهمیت بالایی دارد. در این صورت، اپراتور شبکه فرآیندهای کنترلی را به صورت بهینه و صرفاً بر روی ژنراتورهای مؤثر اجرا خواهد کرد. یکی از جنبه‌های مشترک میان پدافند غیرعامل و بهره‌برداری شبکه‌های برق، سرعت عمل در تعیین وضعیت بهره‌برداری شبکه برق توسط اپراتورهای شبکه می‌باشد. بنابراین، با توجه به زمان‌بر بودن روش‌های مرسوم و نیاز به وجود اطلاعات دینامیکی و استاتیکی کاملی از سامانه قدرت، در این بخش، الگوریتمی به منظور افزایش دقت و سرعت محاسبات و نیز تعیین هم‌زمان نوع نوسانات، ضریب مشارکت تمامی ژنراتورهای سامانه و میزان میرایی نوسانات در مد بحرانی، ارائه خواهد شد.

ب- فرکانس مقدار ویژه بحرانی به دست آمده از ژاکوبین  $J_r$  و ضرایب مشارکت ژنراتورها در این مقدار ویژه، نقشی تعیین کننده در تحلیل نوسانات درون ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای سامانه قدرت و تفکیک آن‌ها از یکدیگر دارند.

ج- ضریب مشارکت ژنراتورها می‌تواند در تعیین ژنراتورهایی که توان اکتیو و راکتیو تولیدی آن‌ها باید تغییر کند تا پایداری ولتاژ [۱۶] و یا پایداری سیگنال کوچک [۱۷] سامانه قدرت بهبود یابد، مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین، از این شاخص به منظور تعیین بهترین مکان نصب پایدارساز سامانه قدرت، در مطالعات مختلف استفاده شده است [۱۸ و ۱۹]. در رابطه (۳)، چگونگی محاسبه ضریب مشارکت  $k$  امین متغیر حالت در  $\lambda$  امین مقدار ویژه نشان داده شده است [۳].

$$P_{ki} = V_{ki} W_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad (3)$$

در رابطه فوق؛

$\lambda_i$ :  $\lambda_i$  امین مقدار ویژه ژاکوبین  $J_r$

$V_{ki}$ : عنصر  $k$  امین سطر و  $i$  امین ستون بردار ویژه راست،

$W_{ki}$ : عنصر  $i$  امین سطر و  $k$  امین ستون بردار ویژه چپ

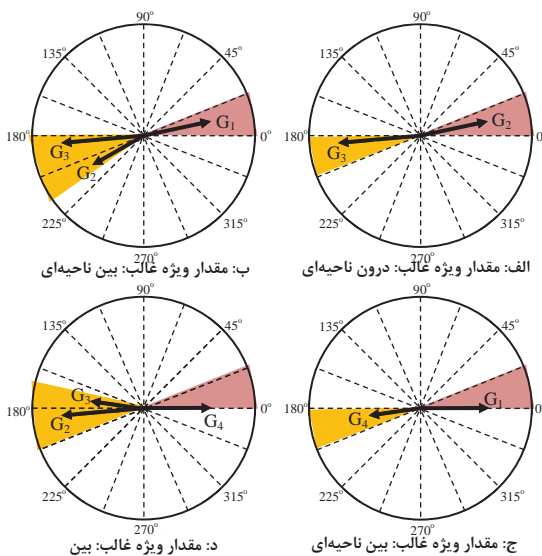
$a_{kk}$ :  $k$  امین عنصر قرار گرفته در قطر ماتریس ژاکوبین  $J_r$

در شکل (۲)، چگونگی تعیین نوع و محل نوسانات سامانه قدرت، فرکانس مد بحرانی و ضرایب مشارکت غالب ژنراتورها در مد بحرانی با استفاده از تحلیل مدال، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در ابتدای مطالعات شبیه‌سازی حوزه زمان صورت گرفته و پس از تشکیل ژاکوبین جبری دینامیکی سامانه قدرت، با انجام تحلیل مدال، مقدار ویژه بحرانی سامانه تعیین می‌شود. پس از انجام این مراحل، به منظور تعیین نوع و محل نوسانات سیگنال کوچک سامانه قدرت، دو گام صورت می‌گیرد. در گام اول، با توجه به رابطه (۲)، میرایی مد بحرانی و با توجه به فرکانس مد بحرانی، نوع نوسانات این مد تعیین می‌گردد. علیرغم این، با توجه به گام اول این

مقایسه با ژنراتورهای  $G_1$  و  $G_4$ ، بیشترین تأثیر را در این مد نوسانی دارند. بنابراین، این رفتار ضرایب مشارکت ژنراتورهای سامانه نشان دهنده یک مد نوسانی محلی در سامانه می‌باشد. همچنین، در شرایطی که مد بحرانی سامانه یک نوسان بین ناحیه‌ای میان ژنراتور ناحیه ۱ ( $G_1$ ) در مقابل ژنراتورهای ناحیه ۲ ( $G_2$  و  $G_3$ ) باشد، رفتار ضرایب مشارکت ژنراتورهای سامانه مانند شکل (۳-ب) است.

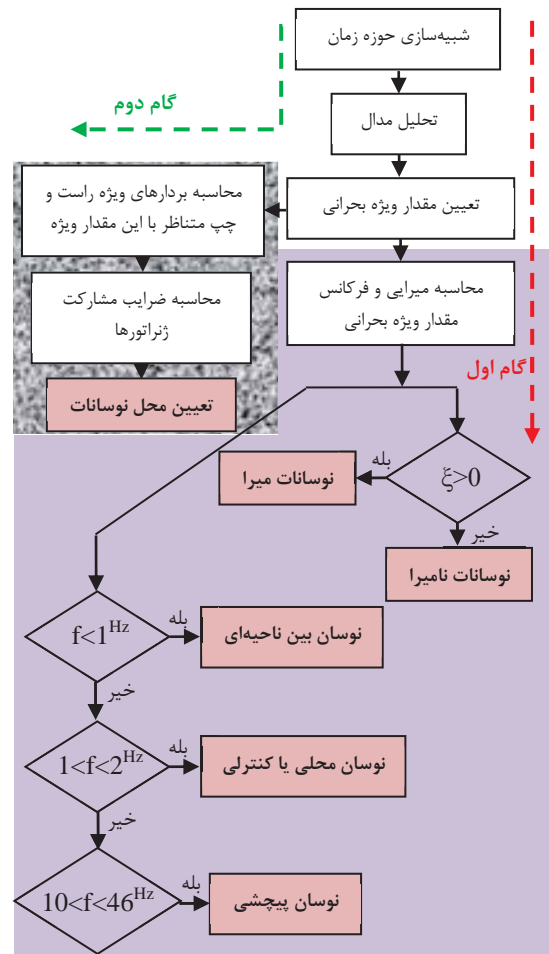
با توجه به این شکل، ضریب مشارکت ژنراتور  $G_1$  در ربع اول و ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  در ربع سوم قرار گرفته که نشان دهنده نوسان این ژنراتورها در مقابل یکدیگر می‌باشد.

از سویی دیگر ژنراتور  $G_4$  هیچگونه مشارکتی در این مد نوسانی نداشته و در نتیجه این مد نوسانی یک مد بین ناحیه‌ای میان ژنراتورهای نواحی ۱ و ۲، می‌باشد. در حقیقت، زمانی که نوسانات بین دو ناحیه مشخص رخ می‌دهد، تنها ژنراتورهای آن نواحی در نوسان رخ داده و مد بحرانی متناظر با آن نوسان مشارکت داشته و ژنراتورهای نواحی دیگر، تأثیر قابل توجهی در آن نوسان نداشته و یا اصلاً هیچگونه مشارکتی ندارند. این نتایج نشان می‌دهند که ضریب مشارکت ژنراتورها ابزار مناسبی جهت تعیین نوع نوسانات سامانه قدرت می‌باشند. همچنین، علاوه بر رفتار نشان داده شده در شکل (۳)، اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها، به ترتیب در بازه (۰ تا ۱) پریونیت و (۰ تا ۳۶۰) درجه تغییر می‌کند [۳].



شکل ۳. نحوه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سامانه سه ناحیه‌ای در مد بحرانی

با توجه به موارد بیان شده، در این مقاله، مطالعات پایداری سیگنال کوچک به منظور تعیین نوسانات سامانه قدرت، به صورت یک فرآیند کلاس‌بندی<sup>۱</sup> مدل شده و شبکه عصبی به عنوان جایگزینی برای روش‌های مرسوم این مطالعات، معرفی خواهد شد. در جدول (۱)، دسته‌بندی پیشنهادی برای اندازه مشارکت ( $P$ ) و زاویه مشارکت ( $\delta$ ) متغیر حالت غالب



شکل ۲. روش مرسوم به منظور بررسی نوسانات سیگنال کوچک سامانه قدرت و میرایی نوسانات بر اساس مد بحرانی

به منظور تشریح الگوریتم پیشنهادی، فرض کنید در یک سامانه آزمون ۳ ناحیه‌ای، ژنراتور  $G_1$  در ناحیه ۱، ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  در ناحیه ۲ و ژنراتور  $G_4$  در ناحیه ۳ قرار گرفته‌اند. در این صورت، مد بحرانی سامانه در سه حالت رفتار نوسانی بین ناحیه‌ای خواهد داشت. این حالات شامل: - نوسان ژنراتور ناحیه ۱ ( $G_1$ ) در مقابل ژنراتورهای ناحیه ۲ ( $G_2$  و  $G_3$ )، - نوسان ژنراتور ناحیه ۳ ( $G_4$ ) در مقابل ژنراتورهای ناحیه ۲ ( $G_2$  و  $G_3$ ) و - نوسان ژنراتور ناحیه ۱ ( $G_1$ ) در مقابل ژنراتور ناحیه ۳ ( $G_4$ ) می‌باشد. همچنین، مد بحرانی سامانه می‌تواند یک مد نوسانی محلی باشد که تنها بین ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  که در ناحیه ۲ قرار دارند، رخ دهد. در شکل (۳)، نحوه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها بر اساس شرایط بهره‌برداری سامانه آزمون مذکور با توجه به ۴ حالت نوسانی بیان شده، نشان داده شده است. به عنوان مثال، در شرایطی که مد بحرانی سامانه یک نوسان محلی میان ژنراتور ناحیه ۲ ( $G_2$  و  $G_3$ ) باشد، در این صورت ضرایب مشارکت ژنراتورهای سامانه رفتاری مانند شکل (۳-الف) خواهد داشت. در این حالت، یا تنها ژنراتورهای ناحیه ۲ در مد بحرانی سامانه مشارکت داشته و ژنراتورهای دیگر هیچگونه مشارکتی در این مد نوسانی ندارند و یا اینکه، ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  در

<sup>1</sup> Classification



#### ۴-۲. تشریح الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین نوع و محل نوسانات سامانه و نیز میرایی مد بحرانی سامانه در شکل (۴)، نشان داده شده است. به منظور تعیین نوع و محل نوسانات سامانه از الگوریتم نشان داده شده در شکل (۴-الف) استفاده می‌شود. با توجه به الگوریتم پیشنهادی در شکل (۴-الف)، برای هر یک از ژنراتورهای موجود در سامانه، شبکه عصبی جداگانه‌ای تعریف می‌شود. بر این اساس، برای هر ژنراتور یک تحلیلگر تعریف می‌گردد. به عنوان نمونه، تحلیلگر  $g$  مربوط به ژنراتور  $g$  می‌باشد. هر تحلیلگر، شامل مؤلفه‌ها و داده‌های آموزش اولیه، مقدار هدف ("شاخص  $P\delta$ "), روش انتخاب مؤلفه و شبکه عصبی می‌باشد. همچنین الگوریتم نشان داده شده در شکل (۴-ب)، استفاده از شبکه عصبی به منظور تعیین میزان میرایی ( $\xi$ ) مد بحرانی سامانه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، یک شبکه عصبی مجزا (شکل (۴-ب)) به منظور تعیین مقدار میرایی مد بحرانی سامانه تعریف می‌شود.

با توجه به شکل (۴)، الگوریتم پیشنهادی به منظور پیش‌بینی "شاخص  $P\delta$ " هر ژنراتور و نیز میرایی مد بحرانی سامانه، از بخش‌هایی شامل؛ تولید داده‌های آموزش و آزمون، روش انتخاب مؤلفه و آموزش و آزمون شبکه عصبی تشکیل شده است. داده‌های آموزش، مقادیر "شاخص  $P\delta$ " و نیز میرایی مد بحرانی سامانه برای آموزش شبکه عصبی با استفاده از روش نشان داده شده در شکل (۲)، ایجاد می‌شوند.

#### ۴-۳. روش انتخاب مؤلفه

استفاده از تمامی مؤلفه‌ها، سبب افزایش مدت زمان آموزش شبکه عصبی شده و همچنین در سامانه‌های بزرگ، سبب افزایش خطای پیش‌بینی شبکه عصبی می‌شود [۱۱]. بنابراین، برای رفع این مشکل، از روش انتخاب مؤلفه دو مرحله‌ای تحت عنوان  $MICor^1$  که تنها بر روی داده‌های آموزش شبکه عصبی (ماتریس  $X$  نشان داده شده در شکل (۴)) اعمال می‌شود، استفاده خواهد شد [۲۰].

در شکل (۵)، روندنمای روش انتخاب مؤلفه دو مرحله‌ای  $MICor$  نشان داده شده است. با توجه مرحله اول نشان داده شده در این شکل، ابتدا در هر نقطه کار، همبستگی میان هر مؤلفه با مقدار هدف محاسبه می‌شود ( $MI(x_{ia}, Z_i)$ ). بدیهی است که در اینجا مقدار هدف ( $Z_i$ ) همان "شاخص  $P\delta$ " در شکل (۴-الف) و  $\xi$  در شکل (۴-ب) می‌باشد. در این حالت، مؤلفه‌هایی که همبستگی بیشتر از مقدار تعریف شده ( $MII$ ) با مقدار هدف داشته باشند، انتخاب شده و به گام بعد منتقل می‌شوند. در این مقاله، مؤلفه‌های اولیه ماتریس  $X$ ، دامنه ( $V$ ) و زاویه ولتاژ ( $\theta_V$ ) تمام باس‌ها و توان اکتیو ( $P_G$ ) و راکتیو تولیدی ( $Q_G$ ) تمام ژنراتورها در نظر گرفته شده و در حالت کلی دارای فرمی بصورت رابطه (۶) است:

$$X = [V, \theta_V, P_G, Q_G]_{tr \times n} \quad (6)$$

ژنراتور، بیان شده است. با توجه به این جدول، اندازه مشارکت و زاویه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتور در مد بحرانی ژنراتورها به ترتیب در ۶ و ۴ کلاس دسته‌بندی شده‌اند. به عنوان مثال، اگر اندازه مشارکت متغیر حالت غالب یک ژنراتور در بازه  $0/2 \leq P < 0/1$  باشد، در این صورت اندازه مشارکت ژنراتور در کلاس ۱ قرار می‌گیرد. همچنین، اگر زاویه مشارکت متغیر حالت غالب یک ژنراتور در ربع دوم قرار گرفته باشد ( $90 < \delta \leq 180$ )، در این صورت، زاویه مشارکت ژنراتور در کلاس ۲ قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱. شاخص $P\delta$

پس از کلاس‌بندی اندازه و زاویه ضریب مشارکت تمامی ژنراتورها در هر نقطه کار سامانه، به منظور تسریع و بالا بردن قابلیت شبکه عصبی در پیش‌بینی ضریب مشارکت ژنراتورها و نوع نوسان رخ داده در سامانه قدرت، "شاخص  $P\delta$ " که ترکیب از اندازه و زاویه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتور است، تعریف می‌شود. با در نظر گرفتن تمام ترکیب‌های بیان شده در جدول (۱)، در مجموع ۲۴ کلاس خواهیم داشت. به عنوان مثال، با توجه به دسته‌بندی پیشنهاد شده در جدول (۱)، اگر در یک نقطه کار سامانه، اندازه و زاویه مشارکت  $g$  امین ژنراتور سامانه به ترتیب در کلاس‌های ۳ و  $0/6 < P < 0/4$  و  $3 < \delta \leq 270$  قرار بگیرد، مقدار "شاخص  $P\delta$ " برای این ژنراتور، ۳۳ خواهد بود. رابطه (۴)، ارتباط میان  $\xi$  نقطه کار سامانه ( $\xi_i$ ) و "شاخص  $P\delta$ " تمامی ژنراتورهای سامانه را تشریح می‌کند:

$$x_i \rightarrow \{(P\delta)_{G1}, (P\delta)_{G2}, \dots, (P\delta)_{Gg}\}_i \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $(P\delta)_{Gji}$  شاخص ضریب مشارکت  $i$  امین ژنراتور ( $1 \leq j \leq g$ ) در  $i$  امین نقطه کار می‌باشند. همچنین،  $g$  تعداد ژنراتورهای سامانه است. با توجه به رابطه (۴)، به ازای مد بحرانی و متغیر حالت غالب ژنراتورها در هر نقطه کار، یک "شاخص  $P\delta$ " برای هر ژنراتور تعریف می‌شود. بنابراین، در الگوریتم پیشنهادی، شبکه عصبی مقدار این شاخص را برای تمامی ژنراتورهای سامانه پیش‌بینی کرده و بر اساس خروجی آن، نوع نوسان سامانه قدرت و میزان مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مد بحرانی تعیین می‌شود. همچنین، به ازای هر نقطه کار سامانه، میزان میرایی مد بحرانی نیز قابل دسترسی است که رابطه (۵)، ارتباط میان این موارد را بیان می‌کند:

$$x_i \rightarrow \{\xi_i\} \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $\xi_i$  میزان میرایی مد بحرانی سامانه در  $i$  امین نقطه کار است.

**جدول ۱.** دسته‌بندی پیشنهادی برای اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتور

اندازه مشارکت	کلاس	زاویه مشارکت	کلاس
$0 \leq P \leq 0.1$	۰		
$0.1 < P \leq 0.2$	۱	۱	$0 < \delta \leq 90$
$0.2 < P \leq 0.4$	۲	۲	$90 < \delta \leq 180$
$0.4 < P \leq 0.6$	۳	۳	$180 < \delta \leq 270$
$0.6 < P \leq 0.8$	۴	۴	$270 < \delta \leq 360$
$0.8 < P$	۵		

<sup>1</sup> Mutual Information-Correlation

#### ۴-۴. آموزش شبکه عصبی

در این مقاله از شبکه عصبی PNN به منظور پیش‌بینی "شاخص Pδ" (مطابق با شکل (۴-الف)) و شبکه عصبی MLP به منظور پیش‌بینی مقدار میرایی مد بحرانی سامانه (مطابق با شکل (۴-ب)) استفاده می‌شود [۲۱].

فرآیند آموزش شبکه عصبی به صورت غیر به‌هنگام صورت می‌گیرد. بدین منظور پس از تعیین نوع اغتشاش رخ داده در سامانه و شبیه‌سازی حوزه زمان، به ازای نقطه کار جدید به دست آمده، تحلیل مدال انجام شده و اندازه و زاویه مشارکت متغیرهای حالت غالب تمامی ژنراتورهای سامانه در مد بحرانی تعیین خواهد شد (مطابق با الگوریتم شکل (۲)). بنابراین، ماتریس ورودی به شبکه عصبی به منظور آموزش آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y \rightarrow Z_g \quad (A)$$

در رابطه فوق، Y ماتریس آموزش با اندازه  $t_r \times m$  می‌باشد. همچنین، Zg ماتریس "شاخص Pδ" برای gامین ژنراتور با ابعاد  $t_r \times 1$  و ماتریس ξ با ابعاد  $t_r \times 1$  است.

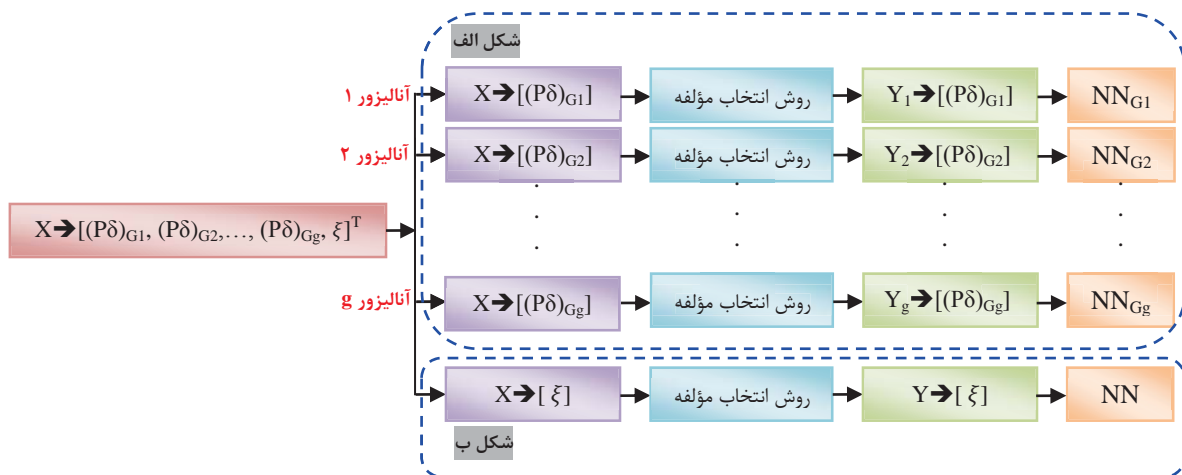
در رابطه فوق،  $t_r$  تعداد نمونه‌های ایجاد شده برای آموزش شبکه عصبی و n تعداد مؤلفه‌های کاندید اولیه می‌باشند.

در مرحله دوم، همبستگی میان مؤلفه‌های بهینه به دست آمده از گام اول بررسی شده  $(Cor(x_{ia}, x_{ib}))$  و چنانچه همبستگی میان هر دو مؤلفه کمتر از مقدار تعریف شده (C2) باشد، هر دو مؤلفه به عنوان مؤلفه‌های بهینه انتخاب می‌شوند.

در نهایت، پس از اجرای روش دو مرحله‌ای بیان شده، ماتریس ورودی به شبکه عصبی که شامل مؤلفه‌های بهینه  $(Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\})$  می‌باشد، به شبکه عصبی اعمال می‌شود. با توجه به شکل (۴-الف)، داده ورودی به روش انتخاب مؤلفه تحلیلگر gام به صورت  $X \rightarrow [(P\delta)_{Gg}]$  و با توجه به شکل (۴-ب)، داده ورودی به روش انتخاب مؤلفه به صورت  $X \rightarrow [\xi]$  می‌باشد. در نهایت پس از اعمال روش انتخاب مؤلفه در هر تحلیلگر، مؤلفه‌های بهینه تحلیلگر gام مطابق با رابطه (۷) به دست می‌آیند.

$$Y_{gm} \subset X_n \quad (V)$$

در رابطه (۷)، m تعداد مؤلفه‌های انتخاب شده از روش انتخاب مؤلفه و n تعداد مؤلفه‌های اولیه ماتریس X می‌باشند ( $m < n$ ).



شکل ۴. ارتباط میان مؤلفه‌های کاندید اولیه و ضریب مشارکت هر ژنراتور (شکل الف) و ارتباط میان مؤلفه‌های کاندید اولیه و میرایی مد بحرانی (شکل ب)، به منظور تعیین نوع، محل و میرایی نوسانات سامانه قدرت

#### ۵. نتایج عددی

روش ارائه شده به منظور پیش‌بینی میرایی مد بحرانی، و ضرایب مشارکت ژنراتورها در این مد، بر روی سامانه آزمون ۳۹ باسه IEEE که به طور مرسوم در مطالعات پایداری سامانه‌های قدرت استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱ و ۱۵]. شکل (۶)، دیاگرام تک‌خطی سامانه آزمون مذکور را نشان می‌دهد. سامانه مذکور، شامل چهار ناحیه با اطلاعات ذیل می‌باشد:

ناحیه ۱: شامل ژنراتورهای A1-G39؛

ناحیه ۲: شامل ژنراتورهای A2-G30، A2-G37 و A2-G38؛

#### ۴-۵. آزمون شبکه عصبی

به منظور آزمون هر شبکه عصبی در هر تحلیلگر، نتایج به دست آمده از روش‌های انتخاب مؤلفه اجرا شده برای هر تحلیلگر بر روی نمونه‌های آزمون اجرا می‌شود. بنابراین، مؤلفه‌های داده آزمون همانند مؤلفه‌های داده‌های آموزش ورودی به شبکه عصبی می‌باشد. همچنین، با توجه به اینکه مؤلفه‌های انتخاب شده برای هر شبکه عصبی متفاوت از دیگری است، در نتیجه نمونه‌های آزمون هر شبکه عصبی مؤلفه‌هایی متفاوت از دیگری خواهند داشت. در نهایت این نمونه‌ها به شبکه عصبی اعمال شده و قابلیت شبکه عصبی بر اساس آن‌ها، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

ناحیه ۳: شامل ژنراتورهای A3-G32 و A3-G31؛

ناحیه ۴: شامل ژنراتورهای A4-G33، A4-G34، A4-G35 و A4-G36؛

قابلیت "شاخص Pδ" پیشنهادی و نحوه استفاده از آن در مطالعات نوسانات سیگنال کوچک سامانه قدرت می‌باشد. در شکل (۷)، پروفایل ولتاژ تمامی ترمینال‌های سامانه آزمون ۳۹ باسه به ازای دو حالت بهره‌برداری مختلف نشان داده شده است. متناسب با این شرایط بهره‌برداری، مقادیر حقیقی اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مد بحرانی و نیز مقدار "شاخص Pδ" به دست آمده برای این ضرایب مشارکت، در جدول (۲) بیان شده است. به عنوان مثال، در وضع بهره‌برداری ۱، اندازه و زاویه ضریب مشارکت ژنراتور G30 در مد بحرانی به ترتیب ۰/۵۲ پریونیت و ۱۰/۴۶- درجه می‌باشد. با در نظر گرفتن دسته‌بندی پیشنهادی در جدول (۱)، مقدار "شاخص Pδ" برای ژنراتور G30 در این نقطه کار سامانه، ۳۴ می‌باشد. همچنین، با توجه به مقادیر "شاخص Pδ" ژنراتورها در دو حالت بهره‌برداری مورد بررسی، در شکل (۸) نمایش این ضرایب در صفحه اعداد مختلط نشان داده شده است. در این شکل، تنها شاخص‌هایی که اندازه ضریب مشارکت آن‌ها قابل توجه می‌باشد، نشان داده شده است. با توجه به نتایج بیان شده در جدول (۲) و شکل (۸)، ملاحظه می‌شود که؛

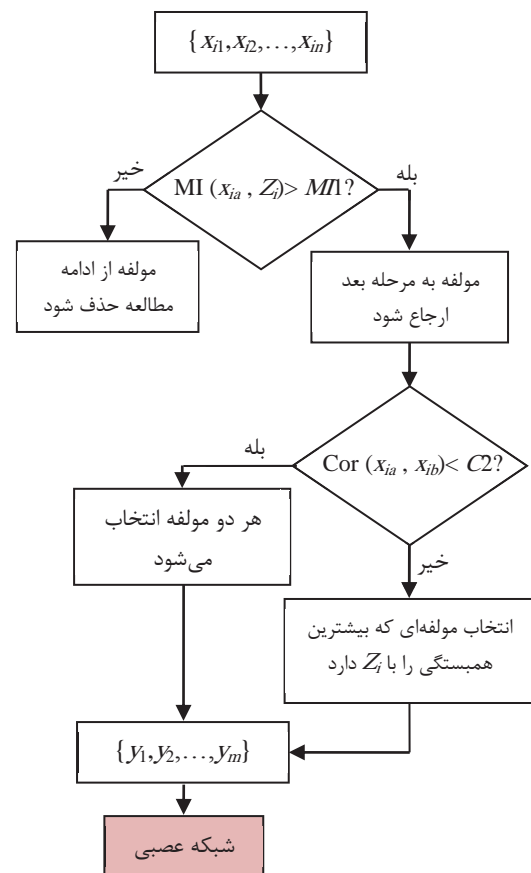
- به ازای شرایط بهره‌برداری مختلف، اندازه و زاویه ضریب مشارکت ژنراتورهای مؤثر در مد بحرانی سامانه، تغییر می‌کند. این موضوع به خوبی نشان‌دهنده رفتار غیر خطی سامانه قدرت در شرایط بهره‌برداری مختلف است.

- "شاخص Pδ"، به خوبی وضعیت ژنراتورها را در قبال شرایط نوسانی سامانه نشان داده و در نتیجه می‌تواند جایگزین مناسبی برای اندازه و زاویه ضریب مشارکت ژنراتورها باشد.

- با توجه به میزان "شاخص Pδ" برای ژنراتورهای مختلف و نیز نمایش ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مد بحرانی در صفحه اعداد مختلط، تنها ژنراتورهای G30، G37 و G38 از ناحیه ۲ و ژنراتور G39 از ناحیه ۱ در مد بحرانی سامانه، مشارکت مؤثر دارند. در نتیجه، با توجه به موقعیت آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که این مد، یک مد بین ناحیه‌ای میان ژنراتورهای ناحیه ۱ و ۲ بوده و هرگونه اقدام کنترلی توسط اپراتورهای شبکه برق باید بر روی این ژنراتورها صورت بگیرد.

- بررسی رفتار فرکانسی مقدار ویژه بحرانی سامانه در این دو حالت بهره‌برداری، به خوبی نشان‌دهنده صحت نتایج به دست آمده از "شاخص Pδ" می‌باشد. مد بحرانی سامانه در این دو حالت بهره‌برداری به ترتیب  $0.89 \pm j3/8$  و  $0.1 \pm j3/77$  است. بر این اساس، فرکانس مد بحرانی در این دو حالت بهره‌برداری به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۶ هرتز است. بنابراین، با توجه به مقدار فرکانس این دو مد، می‌توان نتیجه گرفت که این مدها منجر به بروز نوسان بین ناحیه‌ای در سامانه شده‌اند.

همچنین، ژنراتورها دارای مدل GENROU (مرتبه ۶) بوده و دارای سامانه تحریک مدل IEEE1 (مرتبه ۵) می‌باشند. بارهای سامانه به صورت توان ثابت مدل شده‌اند. اطلاعات دینامیکی و استاتیکی سامانه آزمون ۳۹ باسه IEEE، از مرجع [۲۲] قابل دستیابی است. همچنین، نمونه‌های مورد نیاز به منظور آموزش و آزمون شبکه عصبی با استفاده از نرم‌افزار DigSILENT13.2 تولید شده است. از آنجا که در سامانه ۳۹ باسه IEEE، ۳۹ باس و ۱۰ ژنراتور وجود دارد، بنابراین بر اساس رابطه (۶)، تعداد مؤلفه‌های اولیه ۹۸ می‌باشد  $98 = 39V + 390V + 10PG + 10Q$ .

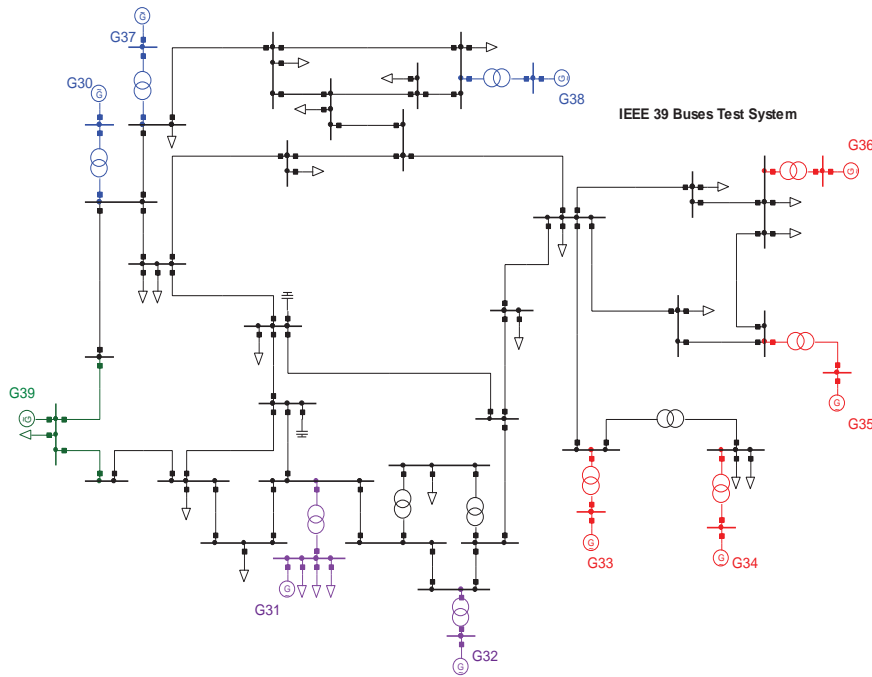


شکل ۵. روندنمای روش انتخاب مؤلفه MIMI

## ۵-۱. چگونگی تعیین شاخص Pδ و نوسانات سامانه قدرت با استفاده از روش تحلیلی

در این بخش، با استفاده از روش مرسوم مطالعات پایداری سیگنال کوچک شامل شبیه‌سازی حوزه زمان و تحلیل مدال (نشان داده شده در شکل (۲))، نحوه تعیین "شاخص Pδ" و نوسانات سامانه قدرت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف از نتایج این بخش، نشان دادن





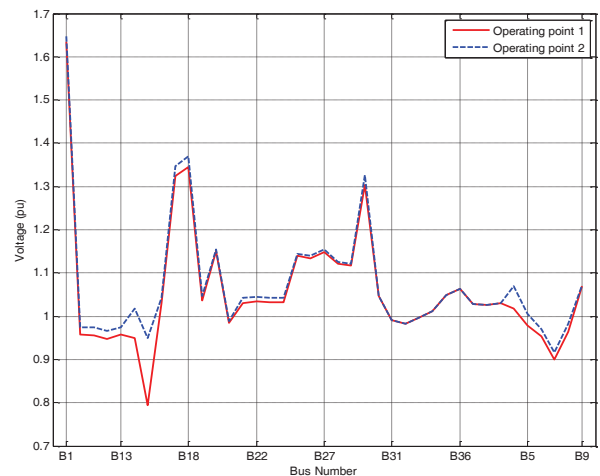
شکل ۶. سامانه آزمون ۳۹ باسه چهار ناحیه‌ای

این میان، ۳۲۰ نمونه برای آموزش شبکه عصبی و ۱۰ نمونه به منظور اعتبارسنجی<sup>۱</sup> اولیه شبکه عصبی در نظر گرفته شده است. همچنین، به منظور بررسی عملکرد شبکه عصبی آموزش دیده، در هر آزمایش، ۳۰ نمونه آزمون ایجاد شده و مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که نمونه‌های آزمون در فرآیند آموزش شبکه عصبی دخیل نبوده و به عبارتی بهتر، این نمونه‌ها در این فرآیند، مشاهده‌ناپذیر<sup>۲</sup> می‌باشند.

همچنین، برای تعیین "شاخص Pδ"، ۱۰ شبکه عصبی از نوع PNN (متناظر با تعداد ژنراتورهای موجود در سامانه آزمون ۳۹ باسه IEEE)، در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، برای تعیین میزان میرایی سامانه مد بحرانی، یک شبکه عصبی از نوع MLP در نظر گرفته شده است.

#### ۵-۲-۱. آزمایش اول - شرایط پایه سامانه آزمون

در مطالعات این بخش، مدل تمامی بارهای سامانه توان ثابت در نظر گرفته شده است. در جدول (۳)، نتایج پیش‌بینی "شاخص Pδ" و میرایی سامانه در مد بحرانی بیان شده است. در این جدول، PNN-G<sub>32</sub> و PNN-G<sub>37</sub> به ترتیب دارای خطای آزمون ۶۶/۰۶٪ و ۳۳/۰۳٪ می‌باشند. به عبارتی دیگر، از مجموع ۳۰ نمونه آزمون، PNN-G<sub>32</sub> و PNN-G<sub>37</sub> به ترتیب ۲ و ۱ نمونه را به اشتباه پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، خطای آزمون بقیه شبکه‌های عصبی صفر می‌باشد که بیانگر دقت بالای آن‌ها در پیش‌بینی "شاخص Pδ" می‌باشد. در نتیجه، با توجه به شاخص‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی، اپراتور شبکه با استفاده از نمایش آن‌ها در صفحه اعداد مختلط، به راحتی می‌تواند ژنراتورهای مؤثر در نوسان سامانه قدرت و نیز نوع نوسان را شناسایی کند. علاوه بر این، شبکه عصبی MLP که به منظور پیش‌بینی میزان میرایی مد بحرانی مورد استفاده قرار گرفته است، تمامی ۳۰ نمونه آزمون را به درستی پیش‌بینی کرده است.



شکل ۷. پروفایل ولتاژ ولتاژ ترمینال‌های سامانه آزمون ۳۹ باسه به ازای دو وضعیت بهره‌برداری متفاوت

- با توجه به مقادیر ویژه بحرانی بیان شده برای وضعیت‌های بهره‌برداری ۱ و ۲، میرایی مد بحرانی سامانه بر اساس رابطه (۲)، به ترتیب ۰/۰۲۳۴ و ۰/۰۲۶۵ است. بنابراین، نوسانات سامانه میراشونده بوده و تمامی مقادیر ویژه ژاکوبین جبری دینامیکی سامانه قدرت در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط قرار گرفته‌اند.

#### ۵-۲. بررسی قابلیت شبکه عصبی در تعیین شاخص Pδ و میرایی نوسانات

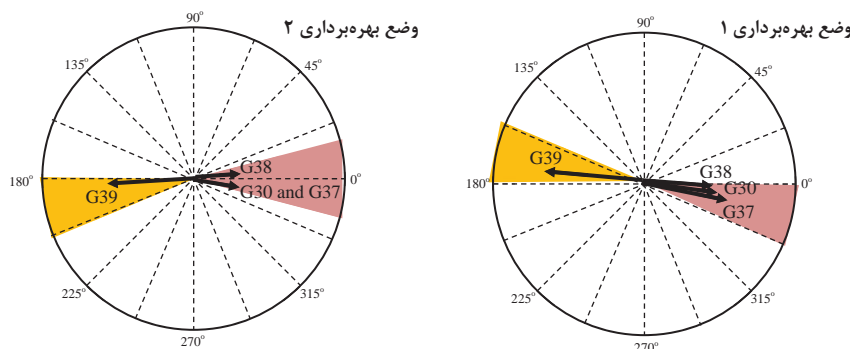
در این بخش، قابلیت شبکه عصبی به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های مرسوم مطالعات نوسانات سامانه قدرت، جهت تعیین "شاخص Pδ"، نوع و میزان میرایی نوسانات سامانه قدرت در مد بحرانی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین‌منظور، ۳۳۰ نمونه آموزش تولید شده است که از

<sup>1</sup> Validation

<sup>2</sup> Unseen

جدول ۲. مقادیر واقعی ضریب مشارکت ژنراتورهای سامانه ۳۹ باسه IEEE و شاخص Pδ متناظر با آن‌ها در مد بحرانی

G <sub>30</sub>		G <sub>31</sub>		G <sub>32</sub>		G <sub>33</sub>		G <sub>34</sub>		مقدار واقعی ضریب مشارکت	وضع بهره‌برداری ۱
اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه		
۰/۵۲	-۱۰/۴۶	۰/۱۰	۱۷۲/۵۹	۰/۱۱	۱۷۲/۶۹	۰/۱۷	۱۶۷/۶۱	۰/۱۹	۱۵۹/۹۶		
۳۴		۰/۲		۱۲		۱۲		۱۲		Pδ شاخص	
۰/۵۰	-۰/۰۵	۰/۰۹	-۱۷۷/۷۴	۰/۱۱	-۱۷۷/۶۱	۰/۱۸	۱۷۹/۴۰	۰/۲۰	۱۷۱/۳۷		وضع بهره‌برداری ۲
۳۴		۰/۳		۱۳		۱۲		۱۲		Pδ شاخص	
G <sub>35</sub>		G <sub>36</sub>		G <sub>37</sub>		G <sub>38</sub>		G <sub>39</sub>		مقدار واقعی ضریب مشارکت	وضع بهره‌برداری ۱
اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه		
۰/۲۲	۱۶۵/۲۲	۰/۱۷	۱۶۷/۴۳	۰/۶۲	-۱۳/۹۲	۰/۴۹	-۸/۲۶	۰/۷۲	۱۷۱/۴۰		
۲۲		۱۲		۴۴		۳۴		۴۲		Pδ شاخص	
۰/۲۲	۱۷۶/۸۵	۰/۱۷	۱۷۹/۲۶	۰/۶۰	-۳/۵۵	۰/۴۹	۲/۰۴	۰/۶۶	-۱۷۹/۸۷		وضع بهره‌برداری ۲
۲۲		۱۲		۳۴		۳۱		۴۳		Pδ شاخص	



شکل ۸. ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای مؤثر در مد بحرانی در صفحه اعداد مختلط در دو حالت بهره‌برداری مختلف

## ۵-۲-۲. آزمایش دوم - تأثیر مدل بارهای استاتیکی

در مطالعات این بخش، مدل بارهای سامانه آزمون ۳۹ باسه به صورت بارهای ترکیبی استاتیکی شامل توان ثابت (P)، جریان ثابت (I) و امپدانس ثابت (Z) در نظر گرفته شده است. جزئیات این مدل بارها در [۲۳] بیان شده است. در جدول (۴)، جزئیات این تقسیم‌بندی نشان داده شده است. به عنوان مثال، بار ۳، ۵۰٪ توان ثابت و ۵۰٪ جریان ثابت و بار ۴، ۱۰۰٪ توان ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین، نتایج پیش‌بینی "شاخص Pδ" و فرکانس سامانه در مد بحرانی، در جدول (۵) بیان شده است. با توجه به نتایج این بخش و مقایسه آن با نتایج جدول (۳)، خطای آزمون PNN-G<sub>32</sub> همانند حالت قبل، ۶/۶۶٪ است در حالی که خطای آزمون PNN-G<sub>37</sub> افزایش یافته و به میزان ۶/۶۶٪ می‌باشد. همچنین، شبکه عصبی MLP، ۲ نمونه از ۳۰ نمونه آزمون را به اشتباه پیش‌بینی کرده که معادل ۶/۶۶٪ خطا است.

در حقیقت، علت افزایش در خطای پیش‌بینی می‌تواند ناشی از پیچیده شدن داده‌های سامانه به علت تغییر مدل بار سامانه باشد.

علی‌رغم این، شبکه عصبی با دقت قابل قبولی "شاخص Pδ" و میرایی سامانه در مد بحرانی را مورد پیش‌بینی قرار داده است.

## ۵-۲-۳. آزمایش سوم - تأثیر نویز

از آنجا که یکی از مواردی که در جنگ‌های سایبری در شبکه‌های برق رخ می‌دهد، نویزدار کردن جریان برق می‌باشد، در این بخش، ۳۰ نمونه آزمون استفاده شده در آزمایش اول را با استفاده از نویز سفید، نویزدار کرده و قابلیت شبکه عصبی در قبال این شرایط مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نویزی با دامنه ۰ تا ۱٪ به صورت تصادفی به برخی از مؤلفه‌های آزمون اعمال شده و بر اساس آن عملکرد شبکه‌های عصبی PNN و MLP مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۶)، نتایج پیش‌بینی "شاخص Pδ" و میرایی سامانه در مد بحرانی بیان شده است. بدیهی است که با اضافه شدن نویز به داده‌های آزمون، دقت شبکه عصبی نیز کمتر از آزمایش‌های قبل شود. با این حال، نتایج بیان شده در جدول (۶) نشان دهنده قابلیت بالا و خطای پایین شبکه عصبی PNN در پیش‌بینی "شاخص Pδ"

نظر گرفتن فرکانس مد بحرانی سامانه در این نمونه، ملاحظه می‌شود که این نوسان، نوسان بین ناحیه و میان ژنراتورهای A1-G39، A2-G30، A2-G37، A2-G38 می‌باشد. با این حال، با توجه نتایج بیان شده، در نمونه ۱، PNN-G32 و PNN-G37، مقدار "شاخص Pδ" را به اشتباه پیش‌بینی کرده‌اند. به عنوان مثال، در نمونه ۱ که متناظر با یک حالت بهره‌برداری از شبکه آزمون مورد مطالعه است، ژنراتور G32 در حالت واقعی مشارکت پایینی در مد بحرانی و نوسان سامانه دارد (شاخص Pδ برای این ژنراتور در مد بحرانی سامانه ۱۴ است)، اما مقدار "شاخص Pδ" برای این ژنراتور به اشتباه ۴۳ تشخیص داده شده است. تعیین و یا تشخیص اشتباه مقدار "شاخص Pδ" سبب می‌شود که اپراتور شبکه در اجرای رفتارهای کنترلی دچار اشتباه شده و در نتیجه به جای اعمال یک رفتار میراکننده به نحوی که نوسانات میرا شود، دامنه نامیرایی نیز افزایش پیدا کند. بدیهی است که در شرایطی که از روش‌های سنتی استفاده می‌شود، میزان خطا در تعیین این شاخص بیشتر خواهد بود. در حالی که روش پیشنهادی که مبتنی بر شبکه عصبی است، با کمترین میزان خطا این شاخص را تعیین کرده و در نتیجه سبب بهبود عملکرد اپراتورهای شبکه و وضعیت بهره‌برداری از شبکه می‌شود.

می‌باشد. با این حال در این حالت، خطای آزمون PNN-G30، PNN-G32، PNN-G37 و PNN-G38 به ترتیب ۳۳٪، ۶۶٪، ۱۰٪ و ۳۳٪ است. همچنین، شبکه عصبی MLP، ۲ نمونه از ۱۰ نمونه اعتبارسنجی (معادل ۲۰٪) و نیز ۵ نمونه از ۳۰ نمونه آزمون (معادل ۱۶٪) را به اشتباه پیش‌بینی کرده است.

#### ۴-۲-۵. بررسی تحلیلی نتایج

به منظور تحلیل نتایج به دست آمده، مقادیر پیش‌بینی شده "شاخص Pδ" برای ۵ نمونه از ۳۰ نمونه آزمون مورد استفاده در آزمایش شماره ۱، در جدول (۷) بیان شده است. در این جدول، به ازای هر نقطه کار سامانه، مقادیر "شاخص Pδ" تمامی ژنراتورهای موجود در سامانه آزمون ۳۹ باسه IEEE، بیان شده است. به عنوان مثال، مقادیر واقعی "شاخص Pδ" به ازای نمونه ۱ (سمپل ۱)، برای ژنراتورهای A1-G39، A2-G30، A2-G37، A2-G38، A4-G33، A4-G34، A3-G31، A3-G32 و A4-G36 به ترتیب، ۴۲، ۴۲، ۱۳، ۱۳، ۱۲، ۲۳، ۱۱ و ۱۴ می‌باشد. همچنین، فرکانس مد بحرانی در این نمونه، ۰/۳۶ هرتز می‌باشد که بیانگر یک نوسان بین ناحیه‌ای است. با ترسیم این شاخص در صفحه اعداد مختلط و با در

جدول ۳. خطای اعتبارسنجی و آزمون پیش‌بینی شاخص Pδ و فرکانس مد بحرانی سامانه آزمون ۳۹ باسه - آزمایش اول

شاخص Pδ										میرایی مد بحرانی	
T.E%	V.E %	T.E %	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %
PNN-G34		PNN-G33		PNN-G32		PNN-G31		PNN-G30		.	.
.	.	.	.	۶/۶۶	.	.	.	.	.		
PNN-G39		PNN-G38		PNN-G37		PNN-G36		PNN-G35			
.	.	.	.	۳/۳۳	.	.	.	.	.		

جدول ۴. ترکیب بارهای سامانه آزمون ۳۹ باسه IEEE بر حسب درصد

نوع بار (%)			باس	نوع بار (%)			باس
Z	I	P		Z	I	P	
۵۰	۵۰	.	۲۳	.	۵۰	۵۰	۳
.	.	۱۰۰	۲۴	.	.	۱۰۰	۴
.	.	۱۰۰	۲۵	۱۰۰	.	.	۷
۱۰۰	.	.	۲۶	.	.	۱۰۰	۸
.	.	۱۰۰	۲۷	.	۱۰۰	.	۱۲
.	.	۱۰۰	۲۸	.	.	۱۰۰	۱۵
.	.	۱۰۰	۲۹	۱۰۰	.	.	۱۶
۳۳/۳۳	۳۳/۳۳	۳۳/۳۳	۳۱	.	۱۰۰	.	۱۸
.	.	۱۰۰	۳۹	۵۰	.	۵۰	۲۰
	---		--	.	.	۱۰۰	۲۱

جدول ۵. خطای اعتبارسنجی و آزمون پیش‌بینی شاخص Pδ و فرکانس مد بحرانی سامانه آزمون ۳۹ باسه - آزمایش دوم

شاخص Pδ										میرایی مد بحرانی	
T.E%	V.E %	T.E %	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %
PNN-G34		PNN-G33		PNN-G32		PNN-G31		PNN-G30		۶/۶۶	.
.	.	.	.	۶/۶۶	.	.	.	.	.		
PNN-G39		PNN-G38		PNN-G37		PNN-G36		PNN-G35			
.	.	.	.	۶/۶۶	10	.	.	.	.		

جدول ۶. خطای اعتبارسنجی و آزمون پیش‌بینی شاخص Pδ و فرکانس مد بحرانی سامانه آزمون ۳۹ باسه - آزمایش سوم

شاخص Pδ										میرایی مد بحرانی	
T.E%	V.E %	T.E %	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %	T.E%	V.E %
PNN-G <sub>34</sub>		PNN-G <sub>33</sub>		PNN-G <sub>32</sub>		PNN-G <sub>31</sub>		PNN-G <sub>30</sub>		۱۶/۶۷	۲۰
۰	۰	۰	۰	۶/۶۶	۰	۰	۰	۰	۰		
PNN-G <sub>39</sub>		PNN-G <sub>38</sub>		PNN-G <sub>37</sub>		PNN-G <sub>36</sub>		PNN-G <sub>35</sub>			
۰	۰	۰/۳۳	۰	۱۰	۶/۶۶	۰	۰	۰	۰		
		۳۳									

جدول ۷. مقادیر پیش‌بینی شده "شاخص Pδ" به ازای ۵ نمونه از ۳۰ نمونه آزمون در آزمایش شماره ۱

G <sub>39</sub>	G <sub>38</sub>	G <sub>37</sub>	G <sub>36</sub>	G <sub>35</sub>	G <sub>34</sub>	G <sub>33</sub>	G <sub>32</sub>	G <sub>31</sub>	G <sub>30</sub>	نمونه
۴۴	۳۲	۱۳ (۴۲)	۲۳	۱۲	۱۳	۱۳	۴۳ (۱۴)	۱۱	۳۲	۱
۵۱	۳۲	۴۲	۲۳	۲۲	۱۳	۱۳	۳۱	۴۱	۴۲	۲
۲۱	۳۲	۴۲	۲۳	۲۳	۲۳	۱۳	۳۱	۴۱	۴۳	۳
۲۱	۱۳	۲۳	۴۳	۳۳	۴۳	۴۲	۲۱	۱۳	۲۱	۴
۱۴	۳۳	۳۳	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۲۴	۲۱	۵۱	۵

## ۶. نتیجه‌گیری

شبکه عصبی به منظور تعیین میزان میرایی مد بحرانی که اصلی‌ترین نقش را در پایداری نوسانی سامانه قدرت دارد، معرفی شد. همچنین، به منظور بررسی قابلیت روش ارائه شده، آنالیزهای مختلفی شامل بررسی تأثیر مدل بار سامانه و نیز وجود نویز در سامانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دهنده قابلیت بالا و دقت مناسب شبکه عصبی در پیش‌بینی نوسانات سامانه قدرت است. این قابلیت به ویژه در محیط‌هایی مانند مراکز دیسپاچینگ شبکه‌های برق که نیاز به تعیین به هنگام رفتارهای دینامیکی پیچیده سامانه قدرت دارند، اهمیت پیدا می‌کند.

در حقیقت روش ارائه شده، اطلاعات بهره‌برداری شبکه را با دقت و سرعت بالایی ارائه کرده و می‌تواند سبب بهبود عملکرد اپراتورهای شبکه برق در مواجهه با حملات و رخداد‌های مختلف شده و در نتیجه به عنوان ابزاری مناسب برای بهبود رفتارهای پدافندی در شبکه‌های برق مورد استفاده قرار بگیرد.

## ۷. مراجع

- [1] Kundur, P.; Paserba, J.; Ajarapu, V.; Anderson, G.; Bose, A.; Canizares, C. "Definition and Classification of Power System Stability"; IEEE Trans. Power Syst. 2004, 19, 1387-1401.
- [2] Kundur, P., Wang, L. "Small Signal Stability Analysis: Experiences, Achievements, and Challenges"; Int. Conf. on Power System Technology, Power Con. 2002, 1, 6-12.
- [3] Kundur, P. "Power System Stability and Control"; New York: McGraw-Hill, the EPRI Power System Engineering Series, 1994.
- [4] Farahani M.; Ganjefar, S. "Intelligent Control of a Static Synchronous Series Compensator via a Self-Tuning Proportional-Integral-Derivative Controller Based on the Lyapunov Method to Mitigate Inter-Area Oscillations"; Electric Power Components and Systems 2013, 41, 716-728.
- [5] Qing, W.; Shiyang, M. "Study on Relationship between Inter-Area Oscillation Damping and Operating Conditions in Power Systems"; Int. Conf. on Power Syst. Tech. 2010, 1-6.

مطالعات پایداری سامانه‌های قدرت به ویژه پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک رتور، به عنوان ابزاری مهم در بهره‌برداری و برنامه‌ریزی صحیح و بهینه شبکه‌های برق می‌باشند. از سویی دیگر، با توجه به وجود تهدیدات مختلف در صنعت برق به عنوان یک صنعت مادر، اهمیت بهره‌برداری و برنامه‌ریزی صحیح شبکه‌های برق دو چندان شده و به عنوان یک رفتار پدافندی مورد توجه بیش از پیش قرار گرفته است. به همین منظور، در این مقاله، ابزاری مبتنی بر شبکه عصبی به منظور تعیین وضعیت بهره‌برداری سامانه قدرت از حیث پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک ارائه شد. روش ارائه شده سبب بهبود دقت و سرعت بهره‌برداران شبکه شده و در نهایت اهداف پدافند غیرعامل در زمینه بهره‌برداری صحیح از شبکه‌های برق را نتیجه خواهد داد. بر این اساس، در ابتدا مسئله پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک سامانه قدرت با استفاده از روش‌های مرسوم مطالعات پایداری شامل شبیه‌سازی حوزه زمان و تحلیل مدال بررسی شده و بر اساس آن رفتار متقابل ضرایب مشارکت ژنراتورهای سامانه و نوسانات درون ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای در مد بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. با این حال، از آنجا که استفاده از روش‌های مرسوم، زمان‌بر و پیچیده بوده و برای استفاده در محیط‌هایی مانند مراکز دیسپاچینگ شبکه برق مناسب نمی‌باشد، روشی مبتنی بر شبکه عصبی به منظور تعیین نوع و محل نوسانات سامانه قدرت ارائه گردید. بدین منظور، شاخصی جدید مبتنی بر اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سامانه در مد بحرانی معرفی شد.

ویژگی مهم شاخص مذکور در این است که علاوه بر تعیین ضریب مشارکت ژنراتورها در مد بحرانی، قابلیت تعیین محل نوسانات سامانه قدرت را نیز دارا می‌باشد. علاوه بر این، به منظور بررسی میرایی نوسانات سامانه قدرت در شرایط بهره‌برداری مختلف، روش مبتنی بر

- [15] Amjady, N.; Velayati, M. H. "Evaluation of Hopf Bifurcation Considering the Effect of Load Models and Excitation System Parameters"; *Int. Rev. Elect. Eng.* 2011, 6, 2419-2427.
- [16] Menezes, T.; DaSilva, L. C. P.; Affonso, C.; DaCosta, V. F. "MVAR Management on the Pre-Dispatch Problem for Improving Voltage Stability Margin"; *IEE Proc., Generation, Transmission and Distribution* 2004, 152, 665-672.
- [17] Castrillón, N. J.; Colomé, D. G. "Small Signal Stability Sensitivity to Generation Dispatch through Participation Factors"; *Latin America Conf. and Exposition Transmission and Distribution: (T&D-LA), Sixth IEEE/PES*, 2012, 1-6.
- [18] Mithulananthan, N.; Canizares, C. A.; Reeve, J.; Rogers, G. J. "Comparison of PSS, SVC and STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillations"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2003, 18, 786-792.
- [19] Ishimaru, M.; Yokoyama, R.; Netob, O. M.; Lee, K. Y. "Allocation and Design of Power System Stabilizers for Mitigating Low-Frequency Oscillations in the Eastern Interconnected Power System in Japan"; *Electrical Power and Energy Systems* 2004, 26, 607-618.
- [20] Amjady, N.; Keynia, F.; Zareipour, H. "Wind Power Prediction by a New Forecast Engine Composed of Modified Hybrid Neural Networks and Enhanced Particle Swarm Optimization"; *IEEE Trans. Sustainable Energy* 2011, 2, 265-276.
- [21] MATLAB Neural Network Toolbox, The Mathworks, Available: <http://www.mathworks.com/>, 2014.
- [22] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>, 2014.
- [23] Amjady, N.; Velayati, M. H. "Evaluation of the Maximum Loadability Point of Power Systems Considering the Effect of Static Load Models"; *Int. J. Energy Conver. Manag.* 2009, 50, 3202-3210.
- [6] So, P. L.; Macdonald, D. C. "Analysis and Control of Inter-Area Oscillations for System Security Enhancement"; *Power System Control and Management* 1996, 65-70.
- [7] Panda, S.; Padhy, N. P.; Patel, R. N. "Power-System Stability Improvement by PSO Optimized SSSC-Based Damping Controller"; *Electric Power Components and Systems* 2008, 36, 468-490.
- [8] Castro, M. S.; Ayres, H. M.; DaCosta, V. F.; DaSilva, L. C. P. "Impacts of the SSSC Control Modes on Small-Signal and Transient Stability of a Power System"; *Electric Power Systems Research* 2007, 77, 1-9.
- [9] Thakur, D.; Mithulananthan, N. "Influence of Constant Speed Wind Turbine Generator on Power System Oscillation"; *Electric Power Components and Systems* 2009, 37, 478-494.
- [10] Shayeghi, H.; Shayanfar, H. A.; Jalilzadeh, S.; Safari, A. "A PSO Based Unified Power flow Controller for Damping of Power System Oscillations"; *Energy Conversion and Management* 2009, 50, 2583-2592.
- [11] Amjady, N.; Velayati, M. H. "Dynamic Voltage Stability Prediction of Power Systems by a New Feature Selection Technique and Probabilistic Neural Network"; *European Transactions on Electrical Power* 2010, 21, 312-328.
- [12] Gomez, F. R.; Rajapakse, A. D.; Annakkage, U. D.; Fernando, I. T. "Support Vector Machine-Based Algorithm for Post-Fault Transient Stability Status Prediction Using Synchronized Measurements"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2011, 26, 1474-1483.
- [13] Paparoditis, E.; Sapatinas, T. "Short-Term Load Forecasting: The Similar Shape Functional Time-Series Predictor"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, 28, 3818-3825.
- [14] Milanovic, J. V.; Fu, C. P. N.; Radosavljevic, R.; Lazarevic, Z. "Sensitivity of Torsional Modes and Torques to Uncertainty in Shaft Mechanical Parameters"; *Electric Power Components and Systems* 2001, 29, 867-881.