

## پیش‌بینی هوشمند ناپایداری گذرا پس از وقوع اغتشاش با استفاده از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده

ستوده افشاری<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مصطفی سرلک<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی شاپور - دزفول - ایران - s.afshari@jsu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی شاپور - دزفول - ایران - sarlak@jsu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله حل مسئله پیش‌بینی ناپایداری گذرا پس از یک اغتشاش با استفاده از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده مدنظر است. در طرح ارائه‌شده، ابتدا با استفاده از اندازه‌های فازورهای ولتاژ دریافتی از سوی واحدهای اندازه‌گیری فازور، لحظه وقوع اغتشاش تشخیص داده می‌شود. در مرحله دوم، مبتنی بر داده‌های ارسال‌شده پس از وقوع اغتشاش شامل اندازه‌های فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس، تصمیم اولیه در خصوص وضعیت پایداری گذرا توسط سه طبقه‌بندی‌کننده از قبل آموزش داده‌شده ماشین بردار پشتیبان به‌صورت مجزا صورت می‌پذیرد. در پایان، سه تصمیم اولیه با استفاده از روش بیز، ترکیب و تصمیم‌نهایی در خصوص وضعیت پایداری گذرا اعلام می‌گردد. طرح مذکور بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی قادر به پیش‌بینی ناپایداری گذرا در مدت زمان کمتر از سه سیکل پس از وقوع اغتشاش و با دقت قابل‌قبول در شرایط حضور و عدم حضور نویز در داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازور است.

**واژه‌های کلیدی:** واحدهای اندازه‌گیری فازور، سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده، ناپایداری گذرا، ماشین بردار پشتیبان، ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌ها، روش بیز.

## Intelligent Post-Disturbance Transient Instability Prediction using Wide Area Measurement System

S. Afshari<sup>1</sup>, MSc Student; M. Sarlak<sup>2</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi Shapur University of Technology, Dezful, Iran, Email: s.afshari@jsu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi Shapur University of Technology, Dezful, Iran, Email: sarlak@jsu.ac.ir

**Abstract:** In this paper, the solution of the post-disturbance transient instability prediction problem using the wide area system is considered. In the proposed scheme, at first, the disturbance initiation is detected based on the magnitudes of voltage phasors received from phasor measurement units (PMUs). In the second step, a primary assessment of the transient stability is made according to the post-disturbance magnitudes of voltage phasors, frequency, and differential frequency and by three trained support vector machines (SVMs) classifiers, separately. Finally, the outputs of the classifiers are combined employing the Naive Bayes (NB) algorithm to make the final decision. The proposed algorithm was implemented on the IEEE New England 39-bus system. According to the results obtained, proposed algorithm can predict the transient instability as early as three cycles after the disturbance initiation using noise-free and noisy PMU data.

**Keywords:** Phasor measurement units, wide area measurement system, transient instability, support vector machine, combination of classifiers, bayes method.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

نام نویسنده مسئول: مصطفی سرلک

نشانی نویسنده مسئول: ایران - دزفول - بلوار سرداران شهید - دانشگاه صنعتی جندی شاپور - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

## ۱- مقدمه

وجود فشارهای اقتصادی و زیست‌محیطی و افزایش تقاضای بار و مشکل نصب خطوط انتقال جدید موجب شده است تا سیستم‌های بزرگ قدرت نزدیک به حداکثر محدوده مجاز بهره‌برداری خود عمل کنند. چنین امری سبب شده است تا احتمال ناپایداری زاویه‌ای به‌دنبال یک اختلال بزرگ مانند خطا، خروج واحد ژنراتوری بزرگ، جدا شدن باری بزرگ از شبکه و ... که تحت عنوان ناپایداری گذرا شناخته می‌شود، افزایش یابد؛ بنابراین به‌منظور جلوگیری از خاموشی‌های گسترده به کمک انجام اقدامات اصلاحی پس از وقوع اغتشاش، پیش‌بینی زودهنگام شرایط ناپایداری پس از اغتشاش ضروری است [۱].

از اولین اقدامات انجام‌گرفته در سیستم‌های قدرت، استقرار سیستم‌های حفاظت ویژه<sup>۱</sup> بوده است [۵-۱]. برای طراحی چنین سیستم‌هایی، ابتدا حوادث از قبل پیش‌بینی و سپس مبتنی بر هر حادثه، اقدامات اصلاحی<sup>۲</sup> مرتبط با هر یک تدوین می‌شوند. در شرایط زمان واقعی شبکه، در صورت وقوع هر یک از حوادث از قبل پیش‌بینی‌شده، اقدامات اصلاحی از قبل تعریف‌شده انجام می‌پذیرد. به‌بیان‌دیگر، چنین سیستم‌هایی مبتنی بر نوع حادثه هستند. اگرچه، علی‌رغم سرعت پاسخ بالا، طراحی این سیستم‌ها پیچیده و پرهزینه هستند [۴]. به‌عنوان انتخابی دیگر، سیستم‌های پیش، حفاظت و کنترل ناحیه گسترده مطرح هستند که مبتنی بر دریافت پاسخ سیستم قدرت پس از وقوع اغتشاش، عمل و اقدامات اصلاحی را انجام می‌دهند. برای پیاده‌سازی چنین سیستم‌هایی، پیش‌بینی شرایط ناپایداری گذرا پس از وقوع اغتشاش بایستی انجام پذیرد تا در صورت ناپایداری گذرا، در فرصت زمانی پیش‌رو، اقدامات اصلاحی مانند از مدار خارج نمودن ژنراتور، بارزدایی و تشکیل نواحی جزیره‌ای کنترل‌شده را انجام دهند [۱، ۳].

به‌طورکلی تمامی روش‌های پیش‌بینی وضعیت پایداری گذرا را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: روش‌های مستقیم، روش‌های حوزه زمان و روش‌های یادگیری ماشین.

در حوزه روش‌های مستقیم، روش‌های شاخص انرژی [۶] و ناحیه برابر [۷-۸] را می‌توان نام برد. ارزیابی روش شاخص انرژی مبتنی بر مقایسه انرژی جنبشی و پتانسیل شبکه در برابر وجود یک اغتشاش خاص در شبکه است. البته در عمل، تخمین سطوح انرژی جنبشی و پتانسیل شبکه تحت اغتشاش‌های خاص دشوار است [۲]. معیار سطح برابر از جمله روش‌های تحلیلی است. این روش برای مطالعه پایداری گذرا شبکه تک‌ماشینه سیستم استفاده شده است [۷-۸]. برای سیستم‌های قدرت در مقیاس بزرگ با تعداد زیاد ژنراتور و خطوط انتقال، روش‌های تحلیلی مانند معیار سطوح برابر به نتایج کارآمد منجر نمی‌شوند [۲]. در واقع روش‌های مستقیم سریع هستند اما دقیق نیستند.

روش‌های حوزه زمان مبتنی بر شبیه‌سازی دینامیکی سیستم قدرت برای بررسی پایداری و امنیت آن هستند. در این روش‌ها، مجموعه‌ای از معادلات جبری دیفرانسیل سیستم قدرت با استفاده از یک الگوریتم مناسب مورد توجه است. هرچند روش‌های حوزه زمان در مقایسه با روش‌های مستقیم دقیق‌تر هستند اما پیاده‌سازی آن‌ها به‌صورت زمان واقعی دشوار است. به‌علاوه این‌که نیازمند اطلاعات توپولوژی شبکه و پارامترهای شبکه در قبل و بعد خطا می‌باشند [۲].

در دو دهه اخیر استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی وضعیت پایداری گذرا توجه محققین را بیش‌ازپیش به خود جلب کرده است. روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> [۹-۱۱]، سیستم‌های فازی<sup>۴</sup> [۱۲]، درخت‌های تصمیم<sup>۵</sup> [۱۴-۱۳] و ماشین بردار پشتیبان<sup>۶</sup> [۱۲، ۱۵] جز این گروه محسوب می‌شوند. باوجود چنین الگوریتم‌هایی، انجام برنامه‌های کاربردی پیشرفته شبکه هوشمند، از جمله پیش‌بینی زمان واقعی سیستم‌های دینامیکی را که قبل از آن ممکن نبود قادر می‌سازد. در مقایسه با روش‌های پیشین، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در پیش‌بینی پایداری گذرای سیستم قدرت بسیار سریع، نیازمند اطلاعات کمتر و با قابلیت تعمیم بهتری هستند. مبتنی بر اطلاعات نویسندگان این مقاله، حداکثر زمان پاسخ‌گویی روش‌های ارائه‌شده تاکنون [۲، ۵، ۱۶-۲۵]، بین ۴ سیکل تا ۳ ثانیه پس از وقوع خطا متغیر می‌باشد. اگرچه، ناپایداری گذرا می‌تواند بسیار سریع و در کمتر از ۴ سیکل نیز رخ دهد [۴]؛ بنابراین، جهت فعال‌سازی به‌موقع اقدامات اصلاحی جهت جلوگیری از ناپایداری گذرا، نیاز به الگوریتمی با زمان پاسخ سریع‌تر وجود دارد. هم‌چنین، آمار دقت گزارش‌شده برای هر یک از الگوریتم‌های هوشمند پیشنهادشده در مراجع [۹، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۲۱]، نشان از دقت قابل‌قبول هریک از آن‌ها برای داده‌های تست تولیدشده از سیستم مورد آزمایش است. لیکن، قابل‌ذکر است که در همه این مقالات [۲، ۴، ۵، ۱۰، ۱۲، ۱۶-۲۵] تأثیر حضور نویز در داده‌های دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری، قطع بعضی از کانال‌های مخابراتی برای ارسال داده‌ها از بعضی از واحدهای اندازه‌گیری فازور، تصادفی‌بودن پارامترهایی همچون میزان بار، خط انتقال و مکان وقوع خطا و مدت زمان حضور خطا و تغییر توپولوژی شبکه به‌طور هم‌زمان در فرآیند تولید داده در نظر گرفته نشده است.

در این مقاله، طرحی هوشمند مبتنی بر داده‌های دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری فازور<sup>۷</sup> شامل اندازه فازور ولتاژ مؤلفه اصلی، فرکانس و مشتق فرکانس ارائه شده است. در این طرح، خروجی تصمیم سه طبقه‌بندی‌کننده پایه برای پیش‌بینی زمان واقعی پایداری گذرا پس از وقوع یک اغتشاش با یکدیگر بر اساس روش بیز [۲۶] ترکیب می‌شوند. زمان پاسخ‌گویی این طرح برابر با سه سیکل از لحظه برطرف‌شدن حادثه رخ داده است. هم‌چنین، در این طرح، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای آموزش هر یک از طبقه‌بندی‌کننده‌ها استفاده شده است. نتایج پیاده‌سازی بر روی سیستم ۳۹ باسه

بعضی از کانال‌های مخابراتی برای ارسال داده‌ها از بعضی از واحدهای اندازه‌گیری فازور و تغییر توپولوژی شبکه قدرت مورد مطالعه، بر پایه استفاده از اطلاعات دریافتی از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده شامل اندازه فازور ولتاژ، فرکانس اصلی سیستم و مشتق فرکانس اصلی سیستم و به‌کارگیری تئوری ترکیب طبقه‌بندی کننده‌های هوشمند با روش بیز، طرحی پیشنهاد شده است که قادر به پیش‌بینی شرایط ناپایداری گذرا در سه سیکل است.

## ۲-۴ سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده

پیچیدگی سیستم‌های قدرت مدرن و گسترده بودن آن‌ها بر یک منطقه جغرافیایی بزرگ، آن‌ها را ملزم به داشتن یک نظارت ویژه می‌کند؛ که این نظارت مؤثر نیازمند اندازه‌گیری در مکان‌های مختلف است. در این خصوص، هم‌زمانی اندازه‌گیری‌ها در مکان‌های مختلف همواره یک چالش بوده است. پیدایش تکنولوژی سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه - گسترده بر اساس اندازه‌گیری فازور هم‌زمان یک راه‌حل مناسب برای حل این مشکل است. مهم‌ترین بخش سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده، واحدهای اندازه‌گیری فازور هستند که در مکان‌های مختلف در یک شبکه قدرت نصب و نسبت به یک مرجع زمانی مشترک هماهنگ هستند. با توجه به استاندارد IEEE، فازور ولتاژ، فازور جریان، فرکانس و مشتق فرکانس توسط واحد اندازه‌گیری فازور اندازه‌گیری و برای مرکز کنترل ارسال می‌شوند [۱۸]. با توجه به استاندارد IEEE فرکانس نمونه‌برداری واحدهای اندازه‌گیری فازور برای شبکه ۵۰/۶۰ هرتز بین ۱۰ هرتز تا ۱۰۰/۱۲۰ هرتز قابل تغییر است [۲۸]. در شکل (۱) نحوه عملکرد سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده برای شبکه نمونه ۹ باس IEEE مشاهده می‌شود. در این شبکه، واحدهای اندازه‌گیری فازور در باس‌های ۱، ۲ و ۳ نصب هستند. واحدهای اندازه‌گیری فازور ابتدا داده اندازه‌گیری شده برای مراکز تمرکز داده محلی و سپس این اطلاعات برای مرکز تمرکز داده مادر برای بهره‌برداری ارسال می‌شوند. برای هم‌زمانی واحدهای اندازه‌گیری فازور، سیستم تعیین موقعیت جهانی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲-۴-۲ ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها با روش بیز

اگرچه بعضی از طبقه‌بندی کننده‌ها در برخی موارد نسبت به مابقی طبقه‌بندی کننده‌ها نتایج بهتری تولید می‌کنند ولی هیچ‌یک از آن‌ها به‌طور مطلق بر سایرین برتری نداشته و در بسیاری موارد نمی‌تواند تمام داده‌ها را بدون هیچ خطایی طبقه‌بندی نماید. استفاده از ترکیب نتایج چند طبقه‌بندی کننده یکی از روش‌های افزایش کارایی سیستم‌های بازشناسی الگو است [۲۹]. برای آن‌که ترکیب نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها مفید واقع شود، باید طبقه‌بندی کننده‌های پایه ضمن برخورداری از کارایی قابل قبول، با یکدیگر متفاوت بوده و قاعده ترکیب مناسبی برای تلفیق نتایج آن‌ها به‌کار گرفته شود. قاعده ترکیب

استاندارد نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی دارای عملکرد قابل قبولی در شرایط مختلف عدم حضور نویز در داده‌ها، حضور نویز در داده‌ها، قطع بعضی از کانال‌های مخابراتی برای ارسال داده‌ها از بعضی از واحدهای اندازه‌گیری فازور و شرایط تغییر توپولوژی شبکه است. به‌طور مشخص، مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از:

- استفاده از ترکیب چند طبقه‌بندی کننده برای اولین بار در حوزه روش‌های هوشمند پیش‌بینی شرایط ناپایداری گذرا مبتنی بر اطلاعات دریافتی از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده پس از وقوع اغتشاش. چنین متدولوژی منجر به مقاوم‌شدن تصمیم‌گیری نهایی در شرایط حضور نویز در داده‌ها، قطع بعضی از کانال‌های مخابراتی برای ارسال داده‌ها از بعضی از واحدهای اندازه‌گیری فازور و تغییرات در توپولوژی شبکه می‌شود. نتایج ارائه‌شده در مقاله، مؤید چنین ویژگی در تصمیم‌گیری طرح هوشمند ترکیبی پیشنهادی در مقایسه الگوریتم پیشنهادی در مرجع [۱۶] است.

- کاهش مدت زمان پاسخ‌گویی به سه سیکل در مقایسه با کارهای صورت‌گرفته تاکنون [۲، ۵، ۲۵-۱۶] که دارای زمان پاسخ‌گویی برابر ۴ سیکل تا ۳ ثانیه هستند.

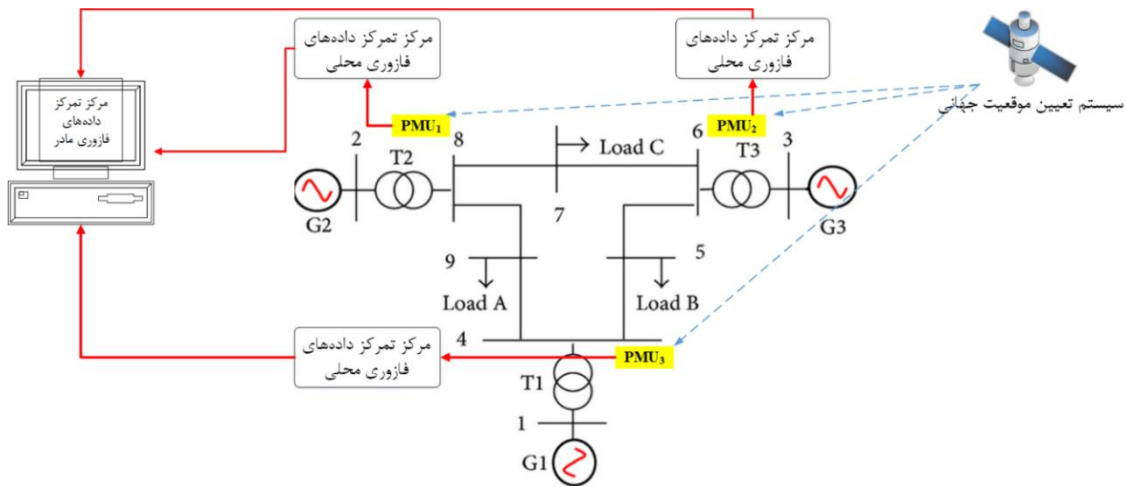
این مقاله از ۶ بخش تشکیل شده است. در بخش دوم در خصوص مفاهیم اولیه شامل سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده و تئوری ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها با روش بیز بحث شده است. در بخش سوم چگونگی طراحی ساختار پیشنهادی تعیین وضعیت ناپایداری گذرا ارائه گردیده و در بخش چهارم، نحوه شبیه‌سازی و تولید داده‌های آموزش و تست تشریح گردیده است. در بخش پنجم، نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه نمونه بیان شده‌اند. در انتها، در بخش ششم، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲- پیش‌بینی ناپایداری گذرا بر پایه سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده و ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها

همان‌طور که قبلاً بدان اشاره شد، سرعت پاسخ‌گویی تکنیک‌های هوشمند موجود [۲، ۵، ۲۵-۱۶]، برای پیش‌بینی شرایط ناپایداری گذرا مابین ۴ سیکل تا ۳ ثانیه است. اگرچه، شرایط ناپایداری گذرا می‌تواند در کمتر از ۴ سیکل نیز رخ دهد [۴]. هم‌چنین، بر پایه تحقیقات میدانی [۲۷]، داده‌های دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری فازور آغشته به نویز هستند و امکان قطع بعضی از کانال‌های مخابراتی برای ارسال داده‌ها از بعضی از واحدهای اندازه‌گیری فازور نیز وجود دارد. به‌علاوه، پارامترهایی همچون خط محل وقوع خطا، میزان بار شبکه طی وقوع حادثه و مدت زمان حضور خطا، کاملاً تصادفی هستند. به این موارد تغییر توپولوژی شبکه را نیز بایستی اضافه نمود. بر پایه اطلاعات نویسندگان این مقاله، چنین عواملی به‌طور هم‌زمان قبلاً برای تشکیل داده‌های آموزشی و آزمایشی در نظر گرفته نشده است.

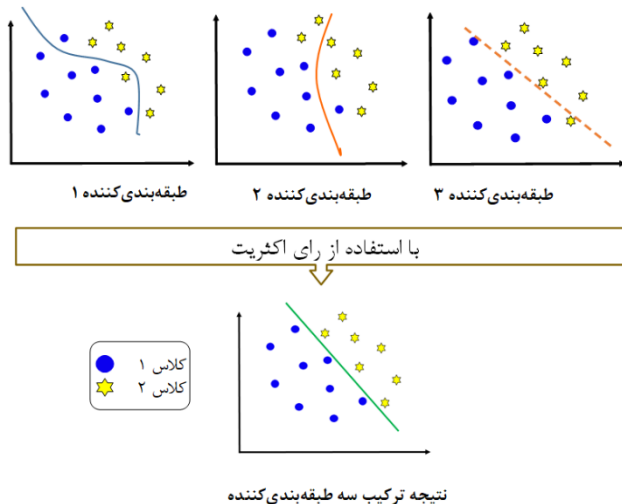
در این پژوهش، جهت بهبود سرعت پاسخ‌گویی و عملکرد الگوریتم پیش‌بینی ناپایداری گذرا در شرایط حضور و عدم حضور نویز، قطع

باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که طبقه‌بندی کننده‌ها نقاط ضعف یکدیگر را بپوشانند. روش‌های مختلفی برای ترکیب نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها وجود دارد که در این مقاله از روش بیز استفاده شده است [۲۶، ۳۰].



شکل ۱: سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده برای شبکه نمونه ۹ باسه IEEE

سپس کلاس با بیشترین احتمال محاسبه شده در رابطه (۱) به‌عنوان برچسب کلاس برای ورودی  $X \in R^d$  در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲: نحوه عملکرد سیستم ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌های مختلف

نحوه پیاده‌سازی روش ترکیب بیز به این صورت است که برای هر طبقه‌بندی کننده  $D_i, i = 1, 2, \dots, L$ ، یک ماتریس درهم‌ریختگی با ابعاد  $C \times C$  (تعداد کلاس) به نام  $CM^i$  است که با اعمال  $D_i$  به مجموعه داده‌های آموزشی محاسبه می‌شود.  $(k, j)$  امین ورودی این ماتریس،  $CM^i_{k,j}$  تعداد عناصر مجموعه داده است که برچسب کلاس واقعی آن‌ها  $\omega_k$  است که توسط طبقه‌بندی کننده  $D_i$  در کلاس  $j$  قرار گرفتند.  $N_k$  تعداد کل عناصر از مجموعه آموزشی است که در کلاس  $\omega_k$  قرار دارند و با توجه به این که  $CM^i_{k,S_i} / N_k$  به‌عنوان احتمال  $P(S_i | \omega_k)$  برآورد می‌شود و  $N_k / N$  به‌عنوان احتمال اولیه برای کلاس

برای بیان بهتر این مطلب مثالی در قالب شکل (۲) نشان داده شده است که هدف آن تمییز میان دو کلاس الف و ب می‌باشد. برای این منظور از ۳ طبقه‌بندی کننده استفاده شده است. اگرچه هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها مواردی را به اشتباه طبقه‌بندی کرده‌اند، اما آن موارد در دو طبقه‌بندی کننده دیگر به‌درستی تمییز داده شده است و هنگامی که نتایج سه طبقه‌بندی کننده پایه با یکدیگر ترکیب می‌شوند، یک طبقه‌بندی با دقت ۱۰۰٪ شکل می‌گیرد. به عبارت دیگر، از ترکیب چند طبقه‌بندی کننده با دقت متوسط یک طبقه‌بندی کننده با دقت بالا حاصل می‌گردد.

در ترکیب به کمک روش بیز فرض می‌شود که خروجی هر طبقه‌بندی کننده مستقل از دیگر طبقه‌بندی کننده‌ها است. در صورت وجود  $L$  طبقه‌بندی کننده، برای تعیین برچسب کلاس بردار خصوصیت با  $d$ -خصوصیت  $X \in R^d$  از میان  $C$  کلاس  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_C$ ، رابطه زیر برای هر کلاس  $\omega_k$  (کلاس  $k$ ام) محاسبه می‌شود [۲۶]:

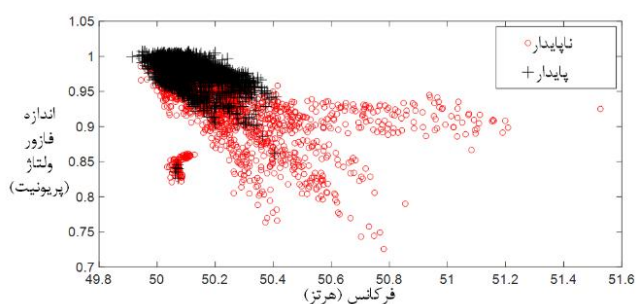
$$\mu_k(X) = P(\omega_k) P(s_1, s_2, \dots, s_L | \omega_k) \quad (1)$$

که در آن  $P(\omega_k)$  احتمال اولیه و  $P(s_1, s_2, \dots, s_L | \omega_k)$  احتمال شرطی این که خروجی هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها برابر با کلاس  $k$  باشد که به‌صورت زیر و بر اساس ضرب خروجی هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها به‌ازای کلاس  $k$  محاسبه می‌شود [۲۶]:

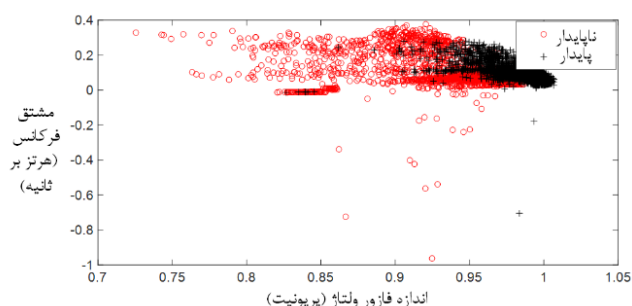
$$P(s_1, s_2, \dots, s_L | \omega_k) = \prod_{i=1}^L P(s_i | \omega_k) \quad (2)$$

فرکانس-ولتاژ و نمودار ۳) مشتق فرکانس-فرکانس به‌دست‌آمده است که به‌ترتیب در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. در هر سه این شکل‌ها، داده‌های اندازه‌ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس دریافتی از سوی یکی از واحدهای اندازه‌گیری فازور و در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش مدنظر قرار گرفته است.

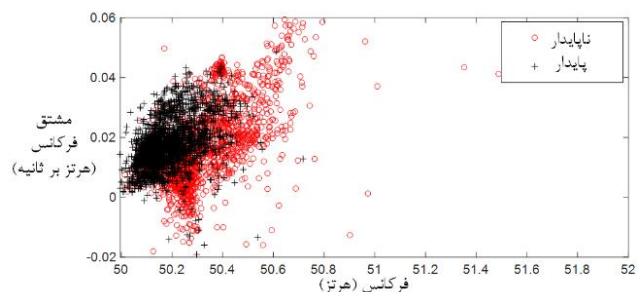
مبتنی بر این اشکال، پروضح است که پارامترهای اندازه‌گیری‌شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش قابلیت تمایز خوبی مابین موارد پایدار و ناپایدار دارند. شایان‌ذکر است که توانایی تفکیک داده‌های دریافتی از سوی واحدهای اندازه‌گیری فازور در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش نسبت به سایر داده‌ها در سیکل‌های دیگر در زیر بخش ۵-۱ مورد بحث، تحلیل و اثبات قرار گرفته است.



شکل ۳: موارد پایدار و ناپایدار بر روی صفحه اندازه فازور ولتاژ\_ فرکانس



شکل ۴: موارد پایدار و ناپایدار بر روی صفحه مشتق فرکانس\_ اندازه فازور ولتاژ



شکل ۵: موارد پایدار و ناپایدار بر روی صفحه مشتق فرکانس\_ فرکانس

### ۴-۳ انتخاب طبقه‌بندی‌کننده پایه

یکی از روش‌هایی که در حال حاضر به‌صورت گسترده برای مسئله دسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش ماشین‌های بردار پشتیبان

$\omega_k$ ، تخمین زده می‌شود. رابطه (۱) برای استفاده در مقایسه مابین کلاس‌های مختلف به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد [۲۶]:

$$\mu_k(X) = \frac{1}{N_k - 1} \prod_{i=1}^L cm_{k,s_i}^i \quad (3)$$

### ۳ طراحی الگوریتم پیشنهادی برای پیش‌بینی ناپایداری گذرا

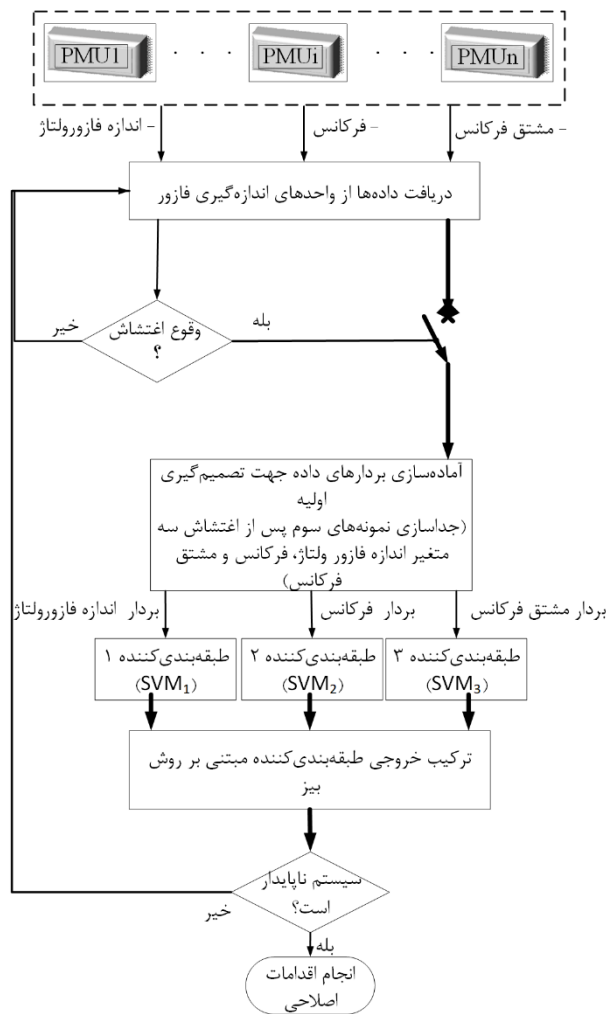
#### ۳-۱ انتخاب ویژگی

در مقالات و گزارش‌های مختلف برای تشکیل بردار ویژگی جهت کاربردهای پیش‌بینی شرایط ناپایداری گذرا به کمک سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده به دو صورت کلی پرداخته می‌شود: (۱) تشکیل بردار ویژگی مستقیماً بر مبنای پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور شامل اندازه و زاویه فاز فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس و (۲) تشکیل بردار ویژگی مبتنی بر استخراج خصوصیات پنهان پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور. در دسته اول، از میان پارامترهای مذکور به‌غیر از پارامتر زاویه فاز فازور ولتاژ که کمیتی نسبی است و لازم است تا نسبت به مرجعی سنجیده شود، مابقی پارامترها به‌محض دریافت در مرکز کنترل بدون هیچ پردازش اضافی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از این منظر بار محاسباتی و تأخیر زمانی به سیستم پیش‌بین ناپایداری گذرا تحمیل نمی‌کنند [۴]. در دسته دوم از بردارهای ویژگی، با تحلیل پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور با کمک ابزارهای مختلف در حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس از قبیل تبدیل فوریه [۱۸-۱۷، ۲۰] و توابع متعامد تجربی [۳۱]، ویژگی‌های جدیدی در حقیقت استخراج می‌شوند. در بسیاری از این تحلیل‌ها، لازم است تا انتگرال‌های پیچیده محاسبه شوند و از این‌رو، دارای بار محاسباتی و بالطبع سیستم پیش‌بین شرایط ناپایداری گذرا را با تأخیر زمانی اضافی روبرو می‌سازند. با توجه به این توضیحات، نویسندگان این مقاله از پارامترهای اندازه‌ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس در طرح پیشنهادی پیش‌بین شرایط ناپایداری گذرا به‌طور مستقیم استفاده نموده‌اند.

در خصوص اندازه‌ولتاژ دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری فازور، آنچه نویسندگان این مقاله را ترغیب به استفاده از آن به‌عنوان یکی از ویژگی‌ها نمود، نتیجه تحلیلی گرفته‌شده در مقاله [۲۳] بود که بیان می‌دارد: (۱) خط سیر اندازه‌ولتاژ باس پس از وقوع اغتشاش برای حالات پایداری رفتاری نسبتاً مسطح دارد و (۲) خط سیر اندازه‌ولتاژ باس پس از وقوع اغتشاش برای حالات ناپایداری به‌صورت تدریجی افزایش و کاهش پیدا می‌کند.

به‌منظور نشان‌دادن قابلیت تفکیک‌پذیری شرایط پایدار و ناپایدار مبتنی بر پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور، موارد پایدار و ناپایدار در شبکه ۳۹ باسه مورد مطالعه بر روی سه فضای دوبعدی شامل نمودار (۱) ولتاژ-فرکانس، نمودار (۲) مشتق

خروجی‌های طبقه‌بندی‌کننده‌های مختلف (که به ترتیب با  $SVM_1$ ،  $SVM_2$  و  $SVM_3$  معرفی می‌شوند) مشاهده گردید که موارد خطای تصمیم‌گیری هریک از طبقه‌بندی‌کننده‌ها با سایرین متفاوت است. از این رو و با توجه به تئوری ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌ها در بخش قبلی، قاعده بیز برای ترکیب خروجی‌های طبقه‌بندی‌کننده‌ها به کار گرفته شد.



شکل ۶: مراحل طرح پیشنهادی پیش‌بینی ناپایداری گذرا

مبتنی بر مراحل سه‌گانه بالا و طرح نشان داده‌شده در شکل (۶)، ابتدا توسط الگوریتم ارائه‌شده در مرحله (۱)، زمان وقوع اغتشاش اعلام و در مرحله (۲) داده‌های اندازه‌گیری فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش به ترتیب به سه طبقه‌بندی‌کننده  $SVM_1$ ،  $SVM_2$  و  $SVM_3$  برای آماده‌سازی تصمیم اولیه در خصوص وضعیت ناپایداری گذرای شبکه قدرت وارد می‌شوند. پس از آن برای تعیین نهایی وضعیت ناپایداری گذرای شبکه قدرت پس از وقوع اغتشاش، خروجی‌های طبقه‌بندی‌کننده‌های مذکور با توجه به قاعده بیز در مرحله (۳) ترکیب می‌شوند.

است. ایده اساسی این روش، استخراج ابر صفحاتی است که قادر به جدا نمودن کلاس‌ها از هم هستند. نزدیک‌ترین داده‌ها به ابر صفحه را بردار پشتیبان می‌نامند [۳۲]. در این مقاله از این نوع طبقه‌بندی به‌عنوان طبقه‌بندی‌کننده پایه با تابع کرنل RBF استفاده شده است. هم‌چنین، در رابطه با آموزش مدلی هوشمند مبتنی بر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، در این پژوهش، مقادیر بهینه برای ضریب پنالتی و پارامتر تابع کرنل با استفاده از روش ژنتیک به‌دست آمده‌اند [۳۳].

### ۴۳ طراحی ساختار

ساختار پیشنهادی پیش‌بینی ناپایداری گذرا در شکل (۶) مشاهده می‌شود. برای طراحی این ساختار مراحل زیر انجام پذیرفته است:

مرحله (۱) تعیین زمان وقوع اغتشاش. در این مقاله برای تعیین لحظه وقوع اغتشاش، از روش پیشنهادی [۳۴] استفاده شده است. هنگامی که خطا رخ می‌دهد، اندازه ولتاژ باس‌های اطراف نقطه اغتشاش کاهش می‌یابد. از این مسئله می‌توان برای تشخیص خطا استفاده کرد. اگر اندازه ولتاژ یکی از باس‌های تحت نظارت برای مدت ۴ سیکل، کمتر از مقدار آستانه ۰/۷ پریونیت شوند، آنگاه خطا رخ داده است و در لحظه‌ای که کلیدهای مربوطه برای رفع خطا قطع می‌شوند، ولتاژ مذکور به سرعت با شیب ۰/۴٪ شروع به جبران مقدار کاسته‌شده می‌کند. در مرجع [۳۴]، برای تعیین حدود آستانه مذکور، از روش سعی و خطا و انجام شبیه‌سازی‌های متعدد با توجه به شرایط مختلف بهره‌برداری و شرایط وقوع خطا استفاده شده است. در پژوهش حاضر نیز، این حدود آستانه با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد و برای شرایط مختلف بهره‌برداری و وقوع خطا در شبکه ۳۹ باسه مورد تأیید قرار گرفتند. ذکر این نکته ضروری است که طبق گفته مرجع [۳۴]، اگر در شبکه مورد مطالعه از تجهیزاتی همچون ادوات FACTS استفاده شود، این حدود آستانه نیازمند انجام مطالعات بیشتری با در نظر گرفتن چنین ادواتی است.

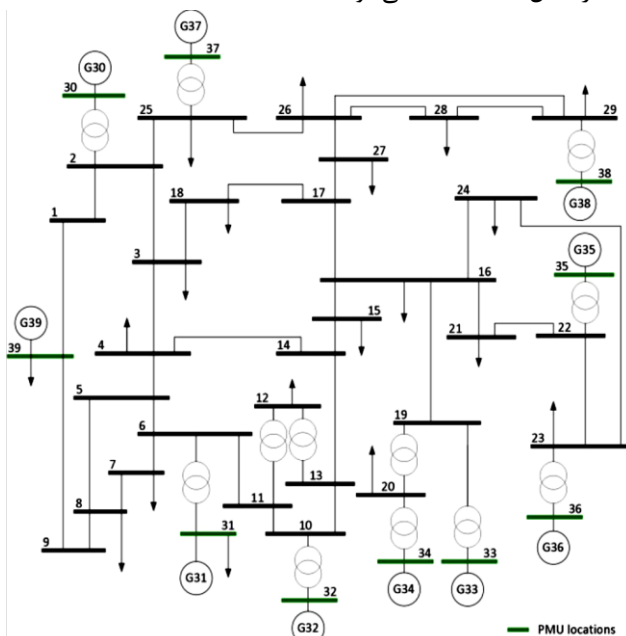
مرحله (۲) آموزش طبقه‌بندی‌کننده‌های پایه. در این مرحله، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان [۳۲] در نظر گرفته شده است. مبتنی بر این الگوریتم یادگیری، سه طبقه‌بندی‌کننده  $SVM_1$ ،  $SVM_2$  و  $SVM_3$  آموزش داده شده‌اند.  $SVM_1$  مبتنی بر داده اندازه‌گیری فازور ولتاژ در واحدهای اندازه‌گیری فازور و در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش آموزش داده شده است،  $SVM_2$  مبتنی بر داده فرکانس در واحدهای اندازه‌گیری فازور و در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش آموزش داده شده است و  $SVM_3$  مبتنی بر داده مشتق فرکانس در واحدهای اندازه‌گیری فازور و در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش آموزش داده شده است. در هر سه طبقه‌بندی‌کننده، ورودی طبقه‌بندی‌کننده برداری با طول  $N$  است که برابر با تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازور استفاده‌شده در شبکه مورد مطالعه است (در این مقاله در همه باس‌های ژنراتوری واحد اندازه‌گیری فازور قرار دارد، بنابراین  $N$  برابر با ۱۰ است).

مرحله (۳) ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌های پایه. در این پژوهش با توجه به شبکه قدرت مورد مطالعه و پس از بررسی نتایج مختلف و

## ۴- شبیه‌سازی

### ۴-۱ شبکه نمونه

در این مقاله برای بررسی طرح پیشنهادی، از شبکه ۳۹ باسه IEEE که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، استفاده شده است.



شکل ۷: شبکه ۳۹ باسه IEEE

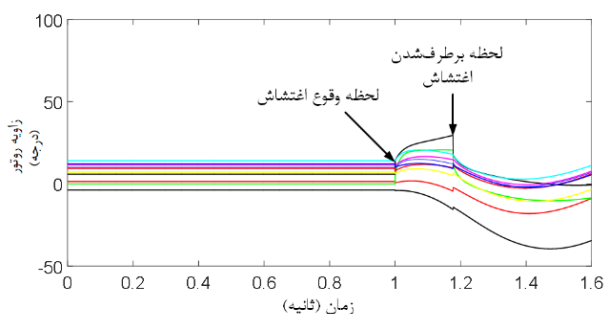
شبکه مذکور در نرم‌افزار DiGSILENT و با در نظر گرفتن مدل دینامیکی ژنراتور، گاورنر و سیستم تحریک شبیه‌سازی شده است. این شبکه شامل ۳۹ باس، ۱۰ واحد ژنراتور و ۴۶ خط انتقال می‌باشد. واحدهای اندازه‌گیری فازور بر روی باس‌های ژنراتوری (باس‌های ۳۰ تا ۳۹) در نظر گرفته شده‌اند. برچسب کلاس (پایدار یا ناپایداری) هر مورد شبیه‌سازی بر اساس شاخص پایداری گذرای مبتنی بر زاویه روتور ژنراتور و مبتنی بر رابطه (۴) مشخص می‌شود [۴].

$$\eta = \frac{360 - |\Delta\delta|_{\max}}{360 + |\Delta\delta|_{\max}} \quad (4)$$

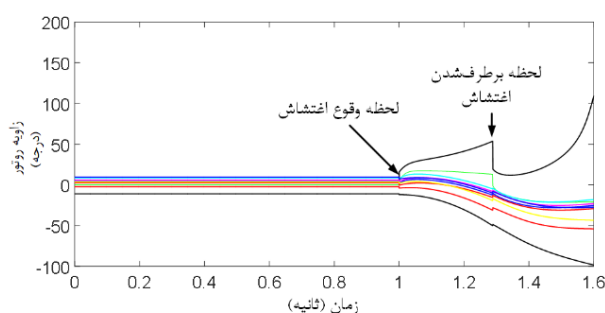
که  $|\Delta\delta|_{\max}$  نشان‌دهنده قدر مطلق حداکثر زاویه انحراف بین دو ژنراتور در طول دوره پس از خطا می‌باشد. زمانی که شاخص پایداری گذرای سیستم  $\eta > 0$ ، سیستم پایدار و در غیر این صورت ناپایدار است. از این شاخص پس از تولید داده‌ها با نرم‌افزار DiGSILENT استفاده می‌شود. در شکل (۸)، تغییرات زوایای روتور ژنراتورهای شبکه ۳۹ باسه مورد مطالعه برای حالتی که پس از وقوع اغتشاش (وقوع خطای سه فاز) شبکه پایدار باقی‌مانده است، نشان داده شده است. هم‌چنین، در شکل (۹)، تغییرات زوایای روتور ژنراتورهای شبکه ۳۹ باسه مورد مطالعه برای حالتی که پس از وقوع اغتشاش (وقوع خطای سه فاز) شبکه ناپایدار شده است، مشاهده می‌شوند.

## ۴-۲ تولید داده‌های مربوط به شرایط پایداری و ناپایداری گذرا

به‌منظور تولید داده‌های لازم جهت بررسی طرح پیشنهادی، ابتدا شبکه تحت خطای سه فاز قرار می‌گیرد و پس از مدتی، خطا با قطع شدن کلیدها برطرف می‌شود. مبتنی بر این‌که خطا در چه مکانی و در چه شرایطی از اندازه بار کل شبکه رخ دهد و کلیدها در چه زمانی قطع می‌شوند، ۳۹۰۰ مورد شبیه‌سازی شده است. برای نزدیک کردن شرایط شبیه‌سازی به واقعیت، در هر موردی، محل وقوع خطا به‌طور تصادفی از ۰ تا ۱۰۰ درصد طول خط، بار کل شبکه از ۰.۸ تا ۱.۲۰ مقدار پایه و زمان قطع کلیدها از ۰.۱ تا ۰.۳ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. در هر موردی، اطلاعات از واحدهای اندازه‌گیری فازور نصب‌شده دریافت شده‌اند.



شکل ۸: تغییرات زوایای روتور ژنراتورهای شبکه مورد مطالعه برای حالت پایدار



شکل ۹: تغییرات زوایای روتور ژنراتورهای شبکه مورد مطالعه برای حالت ناپایدار

همان‌طور که در بخش ۳-۳ بدان اشاره گردید، پس از اعلام برطرف‌شدن اغتشاش، نمونه سوم اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس از هر واحد اندازه‌گیری به‌ازای هر سیکل [۲۸] ذخیره می‌گردد؛ بنابراین برای هر مورد ۳ بردار با طول ۱۰ (به ازای هر واحد اندازه‌گیری ۱ نمونه) تشکیل می‌گردد. به‌منظور تعیین وضعیت واقعی پایداری گذرای شبکه در هر مورد، شبیه‌سازی‌ها تا مدت زمان ۱۰ ثانیه ادامه پیدا نموده‌اند. هم‌چنین، پس از تشکیل سیستم ۳۹ باسه در نرم‌افزار DiGSILENT برنامه‌ای به زبان DPL نوشته شد تا با استفاده از آن تغییرات تصادفی فوق‌الذکر اعمال شوند و در مجموع ۳۹۰۰ مورد در شبکه شبیه‌سازی شود. این برنامه به‌گونه‌ای نوشته شده است که ابتدا یک خط از شبکه را بخواند و محل خطا روی آن خط را به‌طور تصادفی بین ۰ تا ۱۰۰٪ خط انتخاب کند و زمان عمل کردن کلیدها را بین



نویسندگان این مقاله، چنین عواملی به‌طور هم‌زمان قبلاً برای تشکیل داده‌های آموزشی و آزمایشی در نظر گرفته نشده است. در این پژوهش، جهت بهبود سرعت پاسخ‌گویی و عملکرد الگوریتم پیش‌بینی ناپایداری گذرا در شرایط حضور و عدم حضور نویز، خرابی کانال‌های مخابراتی و تغییر توپولوژی شبکه قدرت مورد مطالعه، بر پایه استفاده از اطلاعات دریافتی از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده شامل اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس و به‌کارگیری تئوری ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌های هوشمند با روش بیز، طرحی پیشنهاد شده است که قادر به پیش‌بینی شرایط ناپایداری گذرا طی سه سیکل است. به‌منظور بررسی عملکرد طرح پیشنهادی برای پیش‌بینی وضعیت پایداری گذرا پس از وقوع اغتشاش، موارد داده تولیدشده به دو دسته آموزش (۸۰ درصد کل داده‌ها) و تست (۲۰ درصد کل داده‌ها) تقسیم گردید. در جدول (۱)، نتایج آورده شده‌اند. نتایج مشاهده‌شده در جدول (۱) نشان‌دهنده برتری طرح پیشنهادی در مقایسه با نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم مرجع [۱۶] از منظر امنیت، قابلیت اتکا و دقت کل است. شایان‌ذکر است که در پژوهش حاضر، از کامپیوتری با مشخصات پردازنده ۵ هسته‌ای با کلاک ۳ گیگاهرتز و ۴ گیگابایت حافظه سریع استفاده شده است. مدت زمان اجرای الگوریتم برای هر مورد جدید در نرم‌افزار مطلب، جهت پیش‌بینی شرایط پایداری گذرا تقریباً برابر با ۰/۰۴ میلی‌ثانیه است. این زمان نشان‌دهنده سرعت اجرای الگوریتم در شرایط آماده بودن ورودی برای تصمیم‌گیری است.

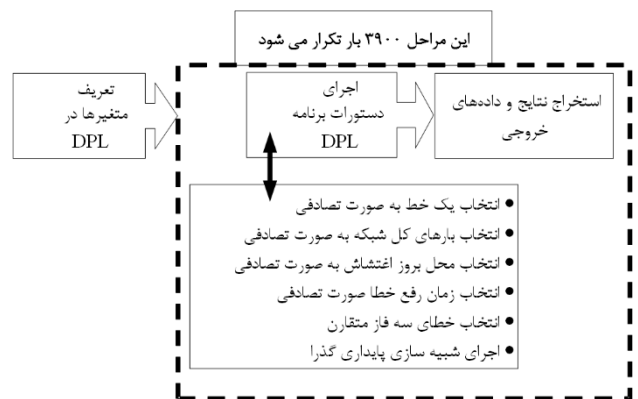
جدول ۱: عملکرد طرح ترکیبی پیشنهادی

پارامتر کرنل	ضریب پنالتی	دقت کل (%)	قابلیت اتکا (%)	امنیت (%)	طبقه‌بندی کننده
-	-	۹۶/۶۶	۹۵/۴۷	۹۸/۲۱	طرح ترکیبی پیشنهادی
۱/۰۲۲	۱۵/۰۱۷	۹۱/۶۶	۹۱/۱۸	۹۲/۲۹	مرجع [۱۶]

#### ۵-۴ تأثیر نحوه انتخاب نوع داده‌های دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری فازور

در این بخش، در این خصوص که چرا از داده‌های سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش برای پیش‌بینی ناپایداری گذرا در طرح پیشنهادی استفاده شده است، بحث شده است. برای این منظور، نتایج حاصل از انتخاب‌های مختلف برای نحوه آماده‌سازی رشته ورودی از داده‌های دریافتی از سوی واحدهای اندازه‌گیری فازور جهت تزریق به طرح پیشنهادی آورده شده‌اند. این نتایج به‌ترتیب برای سه طبقه‌بندی‌کننده  $SVM_1$ ،  $SVM_2$  و  $SVM_3$  به‌ترتیب در جداول (۲)، (۳) و (۴) آورده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، طبقه‌بندی‌کننده‌های مبتنی بر نمونه سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش برای هر سه پارامتر اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس بهترین عملکرد را نسبت سایر

۰/۱ تا ۰/۳ پس از بروز خطا در نظر بگیرد و همچنین بارهای اکتیو و راکتیو کل شبکه مقدراری تصادفی برابر با ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ مقدار نامی‌شان به خود بگیرند. همچنین خطا از نوع اتصال کوتاه ۳ فاز به زمین در نظر گرفته شده است که در ثانیه ۱ اتفاق می‌افتد. به‌منظور بیانی روشن‌تر، مراحل انجام آن در شکل (۱۰) مشاهده می‌شوند. به‌ازای محل در نظر گرفته‌شده برای واحدهای اندازه‌گیری فازور در سیستم مورد مطالعه، اطلاعات موردنیاز با فرکانس ۵۰ هرتز نمونه‌برداری می‌شود که این اطلاعات شامل اندازه ولتاژ، زاویه ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس می‌باشد. همان‌طور که قبلاً بدان اشاره گردید (زیر بخش ۴-۱)، فرض شده است این واحدها بر روی باس‌های ۳۰ تا ۳۹ شبکه قرار دارند. بخش اجرای دستورات برنامه و نتایج خروجی به تعداد ۳۹۰۰ بار تکرار می‌شود و در نتیجه ۳۹۰۰ فایل متنی برای داده‌های اندازه ولتاژ، زاویه ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس به‌طور جداگانه استخراج می‌شود که این فایل‌ها نتایج نمونه‌برداری از سیستم از ثانیه ۰ تا ۱۰ را شامل می‌شود. از میان ۳۹۰۰ مورد شبیه‌سازی‌شده، ۱۶۸۶ مورد آن‌ها پایدار و ۲۲۱۴ مورد آن‌ها ناپایدار می‌باشند که ۸۰٪ آن‌ها برای آموزش طبقه‌بندی‌کننده‌ها استفاده می‌شوند و سیستم با ۲۰٪ باقی‌مانده مورد آزمایش قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰: مراحل تولید داده‌های تصادفی در نرم‌افزار DigSILENT

#### ۵-نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً بدان اشاره شد (بخش ۱)، سرعت پاسخ‌گویی تکنیک‌های هوشمند موجود [۲، ۵، ۱۶-۲۵] برای پیش‌بینی شرایط ناپایداری گذرا مابین ۴ سیکل تا ۳ ثانیه است. اگرچه، شرایط ناپایداری گذرا می‌تواند در کمتر این زمان نیز رخ دهد [۴]. همچنین، بر پایه تحقیقات میدانی [۲۷]، داده‌های دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری فازور آغشته به نویز هستند. به‌علاوه، پارامترهایی همچون خط محل وقوع خطا، خرابی کانال‌های مخابراتی ارسال داده، میزان بار شبکه طی وقوع حادثه و مدت زمان حضور خطا، کاملاً تصادفی هستند. به‌موارد تغییر، توپولوژی شبکه را نیز بایستی اضافه نمود. بر پایه اطلاعات



است.

انتخاب‌های دیگر داشته است. از این‌رو، در مقاله حاضر، طرح پیشنهادی مبتنی بر نمونه دریافتی در سیکل سوم پس از وقوع اغتشاش ارائه

جدول ۲: عملکرد SVM<sub>1</sub> برای ورودی‌های مختلف اندازه فازور ولتاژ

پارامتر کرنل	ضریب پنالتی	دقت کل (%)	قابلیت اتکا (%)	امنیت (%)	رشته ورودی انتخاب‌شده
۰/۹۸۲۵	۱۶/۳۷۲	۹۵/۷۶	۹۵/۴۷	۹۶/۱۴	اولین نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۰۲۵	۱۴/۸۱۴	۹۵/۸۹	۹۵/۲۴	۹۶/۷۳	دومین نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۰۸۱	۱۵/۵۹	۹۶/۰۲	۹۵/۴۷	۹۶/۷۳	سومین نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۱۷۲	۱۴/۹۳	۹۴/۸۶	۹۴/۵۷	۹۵/۲۵	یک نمونه پیش و سه نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۱۴۳	۱۵/۴۵۸	۹۴/۶۰	۹۴/۳۴	۹۴/۹۵	دو نمونه پیش و دو نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۲۲۲	۱۱/۷۲۷	۹۳/۳۲	۹۲/۵۳	۹۴/۳۶	سه نمونه پیش و یک نمونه پس از اغتشاش

جدول ۳: عملکرد SVM<sub>2</sub> برای ورودی‌های مختلف فرکانس

پارامتر کرنل	ضریب پنالتی	دقت کل (%)	قابلیت اتکا (%)	امنیت (%)	رشته ورودی انتخاب‌شده
۰/۷۹۰۸	۱۵/۵۰۶	۹۳/۰۶	۹۱/۴۰	۹۵/۲۵	اولین نمونه پس از اغتشاش
۰/۹۲۳۷	۱۵/۱۵۱	۹۲/۸۱	۹۱/۸۵	۹۴/۰۶	دومین نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۰۶۶	۱۴/۲۵۲	۹۶/۲۷	۹۵/۷۰	۹۷/۰۳	سومین نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۲۲۳	۱۰/۹۵۵	۹۲/۴۲	۹۰/۴۹	۹۴/۹۵	یک نمونه پیش و سه نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۱۱۶	۱۲/۴۶۳	۸۹/۸۵	۸۷/۱۰	۹۳/۴۷	دو نمونه پیش و دو نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۲۳۰	۱۵/۱۵۶	۸۹/۶۰	۸۸/۲۳	۹۱/۳۹	سه نمونه پیش و یک نمونه پس از اغتشاش

جدول ۴: عملکرد SVM<sub>3</sub> برای ورودی‌های مختلف مشتق فرکانس

پارامتر کرنل	ضریب پنالتی	دقت کل (%)	قابلیت اتکا (%)	امنیت (%)	رشته ورودی انتخاب‌شده
۰/۴۸۵	۱۶/۱۷۲	۹۱/۲۷	۹۰/۷۲	۹۱/۹۸	اولین نمونه پس از اغتشاش
۰/۳۶۰۵	۱۴/۷۱۸	۸۹/۰۸	۹۰/۰۴	۸۷/۸۳	دومین نمونه پس از اغتشاش
۰/۸۸۰۱	۱۶/۱۰۶	۹۴/۲۲	۹۲/۵۳	۹۶/۴۳	سومین نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۲۲۱	۱۲/۸۳۷	۷۷/۷۹	۷۴/۲۰	۸۲/۴۷	یک نمونه پیش و سه نمونه پس از اغتشاش
۱/۰۱۸۱	۱۵/۲۹۴	۸۲/۲۸	۸۳/۲۵	۸۱/۰۰	دو نمونه پیش و دو نمونه پس از اغتشاش
۰/۹۹۲۲	۱۰/۲۰۸	۷۵/۶۰	۸۰/۵۴	۶۹/۱۳	سه نمونه پیش و یک نمونه پس از اغتشاش

#### ۴-۵ تأثیر نویز

بدون نویز اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس و  $\Delta \varepsilon f$  و  $\Delta \varepsilon V$  به ترتیب مقادیر خطای اندازه‌گیری اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس می‌باشند. مبتنی بر گزارش اندازه‌گیری‌های تجربی و بلندمدت انجام‌شده که در مرجع [۲۷] ارائه شده است، میزان خطای اندازه‌گیری موجود در داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازور دارای مقدار میانگینی برابر با ۰/۶ درصد است. این میزان خطا معادل با نسبت سیگنال به نویز ۴۵ دسی‌بل می‌باشد. از این‌رو، برای تولید داده‌های نویزی در این مقاله با توجه به روابط:

در شرایط واقعی، داده‌های اندازه‌گیری شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور حاوی مقداری نویز هستند. به عبارت دیگر، داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در این مقاله شامل اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس را می‌توان با روابط زیر توصیف نمود:

$$V' = V + \Delta \varepsilon V \quad (۵)$$

$$f' = f + \Delta \varepsilon f \quad (۶)$$

$$df' = df + \Delta \varepsilon df \quad (۷)$$

که  $V'$ ،  $f'$  و  $df'$  به ترتیب مقادیر واقعی اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس،  $V$ ،  $f$  و  $df$  به ترتیب مقادیر ایده‌آل و

$$\left| \frac{V' - V}{V} \right| < 0.6\% \quad (۸)$$

$$\left| \frac{f' - f}{f} \right| < 0.6\% \quad (۹)$$

$$(10) \quad \left| \frac{df' - df}{df} \right| < 0.6\%$$

طرح پیش‌بین که از قبل و بر مبنای توپولوژی پایه آماده شده بود، اعمال شدند. نتایج برای داده‌های هر یک از سناریوها ۱ و ۲ ذکر شده در بالا، به‌طور جداگانه در جداول (۶) و (۷) آورده شده‌اند. این نتایج دقت و عملکرد قابل‌قبول طرح پیشنهادی در این مقاله در شرایط تغییرات توپولوژی کوچک را تأیید می‌نمایند.

مقادیر  $\Delta \varepsilon_f$ ،  $\Delta \varepsilon_V$  و  $\Delta \varepsilon_{df}$  به‌صورت تصادفی تولید و به مقادیر اندازه فازور ولتاژ، فرکانس و مشتق فرکانس در مجموعه داده‌های تست اضافه شد. بررسی‌ها به این صورت انجام گرفته است که داده‌های نویزی به طرح پیش‌بین ناپایداری گذرا که با داده‌های بدون نویز آموزش داده شده است، جهت تعیین وضعیت پایداری گذرا اعمال شده‌اند. نتایج عملکرد طرح پیشنهادی در جدول (۵) مشاهده می‌شوند. این نتایج حاکی از عملکرد قابل‌قبول طرح ترکیبی پیشنهادی در حضور داده‌های نویزی است.

جدول ۶: عملکرد طرح ترکیبی پیشنهادی برای تغییر توپولوژی (خارج بودن خط انتقال مابین باس‌های ۵ و ۸)

سناریو حذف خط ۵-۸	امنیت (%)	قابلیت اتکا (%)	دقت کل (%)
طرح پیشنهادی	۹۳/۸۳	۹۶/۴۱	۹۵/۲۵
مرجع [۱۶]	۸۵/۴۶	۹۱/۳۹	۸۸/۷۳

جدول ۵: عملکرد طرح ترکیبی پیشنهادی در حضور نویز

طبقه‌بندی کننده	امنیت (%)	قابلیت اتکا (%)	دقت کل (%)
طرح ترکیبی پیشنهادی	۹۵/۸۵	۹۱/۸۶	۹۳/۵۸
مرجع [۱۶]	۸۶/۹۴	۸۵/۵۲	۸۶/۱۴

جدول ۷: عملکرد طرح ترکیبی پیشنهادی برای تغییر توپولوژی (خارج بودن خط انتقال مابین باس‌های ۲۲ و ۲۳)

سناریو حذف ۲۲-۲۳	امنیت (%)	قابلیت اتکا (%)	دقت کل (%)
طرح پیشنهادی	۹۱/۷۰	۹۷/۲۳	۹۴/۸۶
مرجع [۱۶]	۸۵/۲۵	۹۲/۷۳	۸۹/۵۲

#### ۴-۵ تأثیر تغییر توپولوژی

در مرحله طراحی طبقه‌بندی‌کننده پیش‌بین ناپایداری گذرا، شبکه قدرت مورد مطالعه با توپولوژی پایه و بدون تغییرات نسبت به آن در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه وجود تغییرات کوچک در توپولوژی پایه شبکه قدرت (مثلاً ناشی از خروج یک خط انتقال) برای رعایت الزامات نگهداری و بهره‌برداری، امری مرسوم و معمول است. به‌بیان دیگر، تغییرات کوچک توپولوژی شبکه قدرت کاملاً محتمل و اجتناب‌ناپذیر هستند. این تغییرات در توپولوژی پایه سبب تغییر اندازه و فاز ولتاژهای باس‌های مختلف شبکه قدرت و در نتیجه آن تغییر در فلوئی توان‌های اکتیو و راکتیو جاری بر روی خطوط انتقال مختلف می‌شوند. به بیان واضح‌تر، مشخصه‌ای متفاوت از شبکه قدرت با توپولوژی پایه ایجاد می‌شود که در مرحله طراحی در نظر گرفته نشده است. تعداد این تغییرات توپولوژی در شبکه قدرت با توجه به بزرگی آن، می‌تواند بسیار زیاد باشد و مسئله اینجاست که در نظر گرفتن همه آن‌ها در مرحله طراحی امکان‌پذیر نیست. چنین شرایطی برای شبکه ۳۹ باسه مورد مطالعه در این مقاله با توجه به تعداد باس و خطوط آن نیز صدق می‌کند. از این رو، دقت طرح پیش‌بین ناپایداری گذرا در برابر شرایط جدید ناشی از تغییرات کوچک توپولوژی باید قابل‌قبول باشد.

#### ۴-۵-۱ زمان پاسخ‌گویی

یکی از مشخصه‌های مهم الگوریتم‌های پیش‌بینی‌کننده شرایط ناپایداری گذرا مبتنی بر اطلاعات پس از وقوع اغتشاش، زمان پاسخ‌گویی (سرعت) آن‌ها می‌باشد. نحوه اندازه‌گیری این مشخصه در مرجع [۴] به این صورت تبیین شده است: «سرعت الگوریتم ارزیابی پایداری گذرا پس از وقوع اغتشاش که بر اساس زمان پاسخ‌گویی آن اندازه‌گیری می‌شود، عبارت است از مدت زمان لازم (پس از رفع خطا) که الگوریتم هوشمند کار دسته‌بندی شرایط پایداری گذرا را انجام می‌دهد. این مدت زمان همان طول پنجره داده پس از وقوع اغتشاش (پس از رفع خطا) برای پیش‌بینی است.»

همان‌طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود، زمان پاسخ‌گویی روش‌های مختلف ارائه‌شده بین ۴ سیکل تا ۳ ثانیه پس از وقوع خطا متغیر می‌باشد. اگرچه، ناپایداری گذرا می‌تواند بسیار سریع و در کمتر از ۴ سیکل رخ دهد [۴]؛ بنابراین، جهت فعال‌سازی به‌موقع اقدامات اصلاحی جهت جلوگیری از ناپایداری گذرا، نیاز به الگوریتمی با زمان پاسخ سریع‌تر وجود دارد. مشاهده می‌گردد که الگوریتم پیشنهادی در این مقاله از سرعت زمان پاسخ‌گویی (۳ سیکل) بهتری نسبت به سایر مراجع جدول (۸) برخوردار است.

جدول ۸: زمان پاسخ‌گویی طرح پیشنهادی

مراجع	زمان پاسخ‌گویی
[۱۷]	۲ تا ۳ ثانیه
[۱۸]	۱ یا ۲ ثانیه
[۵]	۶۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌ثانیه
[۱۹]	۳۰۰ میلی‌ثانیه
[۲]	۲۵۰ میلی‌ثانیه
[۲۰]	۱۵۰ یا ۳۰۰ میلی‌ثانیه
[۲۱]	۱۲ سیکل
[۲۲]	۸ سیکل
[۲۴، ۲۳]	۶ سیکل
[۲۵]	۵ سیکل

در این مقاله برای بررسی مقاوم بودن عملکرد طرح پیش‌بین ناپایداری گذرای پیشنهادی در شرایط تغییرات کوچک توپولوژی، دو سناریوی مستقل در شبکه مورد مطالعه مدنظر قرار گرفته است: (۱) خارج نمودن خط انتقال مابین باس‌های ۵ و ۸ از شبکه مورد مطالعه و (۲) خارج نمودن خط انتقال مابین باس‌های ۲۲ و ۲۳. در هر کدام از این سناریوها، شبکه مورد مطالعه تحت شرایط مختلف خط انتقال و محل وقوع خطا در آن، اندازه بارهای شبکه و زمان رفع خطا شبیه‌سازی شد. نتیجه شبیه‌سازی‌ها تولید تعداد ۵۰۶ داده مختلف برای هر یک از دو سناریو فوق‌الذکر به‌صورت جداگانه بود. این داده‌ها برای پیش‌بینی شرایط پایداری گذرا اعم از «پایدار» و «ناپایدار» به

۴ سیکل	[۱۶]
۳ سیکل	طرح ترکیبی پیشنهادی

کانال‌های مخابراتی مختلف در صورت استفاده در شبکه اندازه‌گیری ناحیه گسترده نشان داده شده است [۳۵].

#### جدول ۱۰ تأخیر زمانی کانال‌های مخابراتی در شبکه اندازه‌گیری ناحیه گسترده [۳۵]

تأخیر زمانی (میلی‌ثانیه)	کانال مخابراتی
۱۵۰-۱۰۰	فیبر نوری
۱۵۰-۱۰۰	ماکروویو
۳۵۰-۱۵۰	خطوط انتقال قدرت
۳۰۰-۲۰۰	خطوط تلفنی
۷۰۰-۵۰۰	ماهواره‌ای

مبتنی بر تأخیرها در این جدول، کانال‌های مخابراتی فیبر نوری و مایکروویو دارای حداقل زمان تأخیر برابر با ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌ثانیه و کانال مخابراتی ماهواره‌ای دارای حداکثر تأخیر برابر با ۷۰۰-۵۰۰ میلی‌ثانیه است. قابل‌ذکر است که تأخیرهای درونی واحدهای اندازه‌گیری فازور نیز در درون این اعداد توسط [۳۵] دیده شده است. بر این اساس، برای کاربرد پیش‌بینی شرایط پایداری گذرا که سرعت در آن اهمیت دارد، زیرساخت‌های مخابراتی فیبر نوری و مایکروویو از برتری کاملی نسبت به مابقی تکنولوژی‌های مخابراتی دیگر برخوردار هستند.

#### ۴-۵ تأثیر خرابی داده‌ها

با وجود مطالعات و طراحی‌های دقیق تقریباً در تمامی کاربردهای صنعتی اندازه‌گیری ناحیه گسترده امکان از دست رفتن اطلاعات به دلیل خرابی کانال‌های مخابراتی وجود دارد. داده‌های از دست‌رفته می‌توانند دقت تشخیص و تصمیم‌گیری را کاهش دهند. بر این اساس، برخی از مطالعات در مورد جلوگیری و کنترل کردن داده‌های از دست‌رفته و به حداقل رساندن مشکلات ناشی از داده‌های از دست‌رفته انجام شده است [۳۴]. از آن جمله، هنگامی که اطلاعات ورودی‌های یک یا چند واحد اندازه‌گیری فازور به دلیل قطع کانال‌های ارتباطی و یا خرابی برخی از واحدهای اندازه‌گیری فازور از دست می‌رود، برای حداقل نمودن خطای تصمیم‌گیری تا زمانی که تمام جریان ارسال داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازور به حالت عادی بازگردد از داده‌های قبلی کانال‌های قطع شده استفاده می‌شود. در این مقاله، ابتدا، با فرض این‌که در یک ششم از سناریوهای تولید داده‌های تست، سه کانال مخابراتی، در یک سوم از این سناریوها دو کانال مخابراتی و یک دوم مابقی سناریوها تنها یک کانال مخابراتی به صورت تصادفی خراب باشند و برای کانال‌هایی که داده‌ها خراب هستند از نمونه قبلی یعنی نمونه دوم پس از اغتشاش به‌جای نمونه سوم استفاده شود، مجموعه داده تست تشکیل گردید. سپس، این مجموعه داده تست به الگوریتم پیشنهادی که با داده‌های کامل (بدون از دست‌رفتن هیچ داده‌ای)، طراحی شده بود، اعمال گردید. نتایج در جدول (۱۱) مشاهده می‌شوند. با توجه به این نتایج، دقت کل الگوریتم در شرایط بدون خرابی داده که برابر با ۹۶/۶۶ درصد بود به ۹۳/۳۲ درصد کاهش پیدا کرده است. اگرچه، عدم کاهش شدید نشان از مقاوم بودن الگوریتم

#### ۵-۵ تأثیر نوع روش برای ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر نوع روش برای ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌های مختلف، الگوریتم‌های ترکیب شامل الگوریتم ترکیب چندگانه [۲۹] و الگوریتم حداکثر رأی وزندهی شده [۲۹] بر روی داده‌های تست با حضور نویز مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج در جدول (۹) مشاهده می‌گردد. اگرچه، روش ترکیب چندگانه دارای شاخص امنیت بهتری نسبت به روش بیز است، لیکن، قابلیت اتکا و دقت کل آن از روش پیشنهادی کمتر است.

#### جدول ۹: عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حضور نویز و با روش‌های مختلف ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌ها

روش ترکیب	امنیت (%)	قابلیت اتکا (%)	دقت کل (%)
بیز (روش پیشنهادی)	۹۵/۸۵	۹۱/۸۶	۹۳/۵۸
ترکیب چندگانه	۹۶/۱۴	۸۹/۶	۹۲/۴۳
حداکثر رأی وزندهی شده	۹۳/۷۷	۹۰/۰۵	۹۱/۶۶

#### ۵-۶ تأخیر در ارسال اندازه‌گیرها از واحدهای اندازه‌گیری فازور

ازجمله زیرساخت‌های لازم برای استفاده از مفهوم فازورهای سنکرون در شبکه‌های قدرت، وجود کانال‌های مخابراتی برای انتقال اطلاعات فازوری از واحدهای اندازه‌گیری فازور در پهنه شبکه قدرت به مرکز کنترل جهت استفاده در نرم‌افزارهای کاربردی مختلف حفاظت و کنترل شبکه قدرت از جمله نرم‌افزار پیش‌بین ناپایداری گذرا است. دو نکته کلیدی در رابطه با کانال‌های مخابراتی جهت کاربردهای اندازه‌گیری ناحیه گسترده است: (۱) ظرفیت و پهنای باند انتقال داده کانال‌های مخابراتی و (۲) تأخیر زمانی کانال‌های مذکور در انتقال داده‌ها از واحدهای اندازه‌گیری فازور به مرکز کنترل. در مورد اول، با توجه به حجم نسبتاً کم داده‌های فازوری برای انتقال از واحد اندازه‌گیری فازور به مرکز کنترل در هر بار انتقال، زیرساخت‌های حتی سنتی مخابراتی نیز مشکلی ندارند. در مقابل، در مورد دوم، تأخیر ذکر شده می‌تواند در بعضی کاربردها اثر گذرا و البته در بعضی اثر گذرا نباشد. ازجمله کاربردهایی که تأخیر زمانی کانال مخابراتی اثر گذرا نیست، می‌توان به تحلیل وقوع حادثه‌ای در شبکه قدرت پس از رخ داده اغتشاشی اشاره نمود. در چنین کاربردی، اساساً تأخیر مهم نیست؛ اما در کاربردهای زمان واقعی حفاظت و کنترل شبکه قدرت، چنین تأخیری مهم و از درجه اهمیت برخوردار است. در کاربرد پیش‌بینی ناپایداری گذرا، این تأخیر سبب می‌شود تا زمان لازم برای پیش‌بینی شرایط شبکه قدرت پس از وقوع اغتشاش، علاوه بر زمان ذاتی خود الگوریتم پیش‌بین ناپایداری گذرا، زمان تأخیر کانال‌های مخابراتی در انتقال داده‌ها از واحدهای اندازه‌گیری فازور نیز به آن اضافه گردد. اگرچه بر دقت تأثیرگذار نیست. در جدول (۱۰)، میزان تأخیر

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی بر پایه اطلاعات اندازه‌گیری ناحیه گسترده برای پیش‌بینی ناپایداری گذرا پس از وقوع اغتشاشی در سیستم قدرت ارائه گردید. در این الگوریتم، ابتدا با استفاده از اندازه فازورهای ولتاژ دریافتی از سوی واحدهای اندازه‌گیری فازور، لحظه وقوع اغتشاش تشخیص، سپس، با ترکیب خروجی‌های سه طبقه‌بندی‌کننده ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر روش بیز، تصمیم نهایی در خصوص وضعیت پایداری گذرا اعلام می‌گردد. این سه طبقه‌بندی‌کننده شامل طبقه‌بندی‌کننده مبتنی بر اندازه فازور ولتاژ، طبقه‌بندی‌کننده مبتنی بر فرکانس و طبقه‌بندی‌کننده مبتنی بر مشتق فرکانس می‌شوند. طرح مذکور بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی شد که نتایج نشان‌دهنده دقت و سرعت بالای طرح و برتری آن از منظر دقت در شرایط حضور و عدم حضور نویز، تغییر توپولوژی و سرعت نسبت به مقالات پیشین است.

## مراجع

- [1] F. Hashiesh, H. E. Mostafa, A.-R. Khatib, I. Helal and M. M. Mansour, "An intelligent wide area synchrophasor based system for predicting and mitigating transient instabilities," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 645-652, 2012.
- [2] T. Guo and J. V. Milanovic, "Probabilistic framework for assessing the accuracy of data mining tool for online prediction of transient stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 377-385, 2014.
- [3] J. Hazra, R. K. Reddi, K. Das, D. P. Seetharam and A. K. Sinha, "Power grid transient stability prediction using wide area synchrophasor measurements," *IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1-8, 2012.
- [4] R. Zhang, Y. Xu, Z. Y. Dong and K. P. Wong, "Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 3, pp. 296-305, 2015.
- [5] D. R. Gurusinghe and A. D. Rajapakse, "Post-disturbance transient stability status prediction using synchrophasor measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3656-3664, 2016.
- [6] A. Pai, *Energy function analysis for power system stability*, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [7] M. Pavella, D. Ernst and D. Ruiz-Vega, *Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [8] P. Kundur, N. J. Balu and M. G. Lauby, *Power system stability and control*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [9] L. Wehenkel, T. Van Cutsem and M. Ribbens-Pavella, "An artificial intelligence framework for online transient stability assessment of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 789-800, 1989.
- [10] F. Hashiesh, H. E. Mostafa, I. Helal and M. M. Mansour, "A wide area synchrophasor based ANN transient stability predictor for the Egyptian Power System," *Innovative Smart Grid Technologies Conference*, pp. 1-7, 2010.

پیشنهادی در شرایط خرابی داده است. برای جبران این کاهش می‌توان در داده‌های یادگیری از داده‌های با ویژگی خرابی تصادفی بعضی از کانال‌های ارتباطی استفاده نمود. بر این اساس، از نیمی از داده‌های تست باوجود خرابی تصادفی داده‌ها در مرحله آموزش به‌کار گرفته شدند. دقت کل بر روی داده‌های تست بدون خرابی داده و با خرابی داده برابر با دقت قابل‌قبول ۹۵/۱۵ درصد شد.

جدول ۱۱: عملکرد طرح ترکیبی پیشنهادی در شرایط خرابی داده‌ها

طبقه‌بندی کننده	امنیت (%)	قابلیت اتکا (%)	دقت کل (%)
طرح ترکیبی پیشنهادی	۹۶/۱۴	۹۱/۱۷	۹۳/۳۲

## ۵- ۸- تأثیر محل نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور

یکی از مراحل مهم در پیاده‌سازی سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده، تعیین محل (جایابی) واحدهای اندازه‌گیری فازور است. این جایابی بایستی به‌گونه‌ای صورت پذیرد که رؤیت‌پذیری سیستم قدرت محقق گردد. تکنیک‌های زیادی برای جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در مقالات و گزارش‌های علمی از جمله [۳۱، ۳۷-۳۶] ارائه شده است. جهت بررسی تأثیر محل نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور بر دقت الگوریتم پیشنهادی، نتیجه جایابی ۱۰ عدد واحد اندازه‌گیری فازور با روش «انتخاب ترتیبی پیش‌رو» در مرجع [۳۶] مدنظر قرار گرفت و الگوریتم پیشنهادی ترکیبی با پیش‌فرض جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازور در باس‌های با شماره ۱، ۳، ۴، ۸، ۱۰، ۱۴، ۲۵، ۳۳، ۳۴ و ۳۵ اجرا گردید. نتایج دقت الگوریتم در جدول (۱۲) در کنار نتایج دقت در صورت نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در باس‌های ژنراتوری مشاهده می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده تأیید می‌نمایند که در صورت حفظ رؤیت‌پذیری سیستم قدرت ۳۹ باسه با تعداد ۱۰ واحد اندازه‌گیری فازور، محل نصب این تجهیزات تأثیر فراوانی بر دقت الگوریتم ندارد.

جدول ۱۲: تأثیر محل نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور بر عملکرد طرح

عملکرد طرح ترکیبی پیشنهادی			محل نصب
دقت کل (%)	قابلیت اتکا (%)	امنیت (%)	
۹۶/۶۶	۹۵/۴۷	۹۸/۲۱	باس‌های ژنراتوری
۹۶/۳۹	۹۵/۵۵	۹۷/۱۵	باس‌های با شماره ۱، ۳، ۴، ۸، ۱۰، ۱۴، ۲۵، ۳۳، ۳۴ و ۳۵

- prediction using post-disturbance voltage trajectories," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 947-956, 2010.
- [24] N. Amjady and S. F. Majedi, "Transient stability prediction by a hybrid intelligent system," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 1275-1283, 2007.
- [25] N. Amjady and S. Banihashemi, "Transient stability prediction of power systems by a new synchronism status index and hybrid classifier," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 4, no. 4, pp. 509-518, 2010.
- [26] L. I. Kuncheva, *Combining pattern classifiers: methods and algorithms*, John Wiley & Sons, 2004.
- [27] M. Brown, M. Biswal, S. Brahma, S. J. Ranade and H. Cao, "Characterizing and quantifying noise in PMU data," *Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2016.
- [28] K. E. Martin, "Synchrophasor standards development-IEEE C37.118 & IEC 61850," *44th Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1-8, 2011.
- [29] S. Tulyakov, S. Jaeger, V. Govindaraju and D. Doermann, "Review of classifier combination methods," *Machine Learning in Document Analysis and Recognition*, pp. 361-386, 2008.
- [30] S. Li, J. Liu, Y. Zhu and X. Zhang, "A new supervised clustering algorithm for data set with mixed attributes," *International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing*, vol. 2, pp. 844-849, 2007.
- [۳۱] سهیل مرادی، رضا محمدی چبنلو، نوید تقیزادگان کلانتری، «مکانیابی بهینه واحدهای اندازه‌گیر فازوری برای مکانیابی خطا در شبکه قدرت با در نظر گرفتن باسهای تزریق صفر و خروج تکی خطوط»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۲۷۷-۲۶۷، ۱۳۹۵.
- [32] I. Steinwart and A. Christmann, *Support vector machines*, Springer, 2008.
- [33] C. L. Hoang and C. J. Wang, "A GA-based feature selection and parameters optimization for support vectormachines," *Expert Syst. Apl.*, vol. 31, pp. 231-240, 2006.
- [34] F. Gomez, "Prediction and control of transient instability using wide area phasor measurements," PhD thesis, University of Manitoba, 2011.
- [35] B. Naduvathuparambil, M. C. Valenti and A. Feliachi, "Communication delays in wide area measurement systems", *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 118-122, 2002.
- [36] J. J. Qiao Yu, D. J. Hill, A. S. Lam, J. Gu and V. O. K. Li, "Intelligent Time-Adaptive Transient Stability Assessment System", *IEEE Transactions on Power Systems*, To be published, 2017.
- [37] J. C. Cepeda, J. L. Rueda, D.G. Colomé and I. Erlich, "Data-mining-based approach for predicting the power system post-contingency dynamic vulnerability status", *Int. Trans. Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 10, pp. 2515-2546, 2014.
- [۱۱] سهیل مرادی، رضا محمدی چبنلو، نوید تقیزادگان کلانتری، «ارزیابی برون خط پایداری گذرا به وسیله تعیین دقیق CCT با استفاده از شبکه عصبی با ورودی‌های مبتنی بر توابع انرژی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۸۵-۲۷۷، ۱۳۹۵.
- [12] A. Gavoyiannis, D. Vogiatzis, D. Georgiadis and N. Hatziaargyriou, "Combined support vector classifiers using fuzzy clustering for dynamic security assessment," *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1281-1286, 2001.
- [13] T. Amraee and S. Ranjbar, "Transient instability prediction using decision tree technique," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3028-3037, 2013.
- [14] L. Wehenkel, M. Pavella, E. Euxibie and B. Heilbronn, "Decision tree based transient stability method a case study," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 459-469, 1994.
- [15] L. S. Moulin, A. A. Da Silva, M. El-Sharkawi and R. J. Marks, "Support vector machines for transient stability analysis of large-scale power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 818-825, 2004.
- [16] F. R. Gomez, A. D. Rajapakse, U. D. Annakkage and I. T. Fernando, "Support vector machine-based algorithm for post-fault transient stability status prediction using synchronized measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1474-1483, 2011.
- [17] I. Kamwa, R. Grondin and L. Loud, "Time-varying contingency screening for dynamic security assessment using intelligent-systems techniques," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 526-536, 2001.
- [18] I. Kamwa, S. Samantaray and G. Joos, "Development of rule-based classifiers for rapid stability assessment of wide-area post-disturbance records," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 258-270, 2009.
- [19] J. C. Cepeda, J. L. Rueda, D. G. Colomé and D. E. Echeverría, "Real-time transient stability assessment based on centre-of-inertia estimation from phasor measurement unit records," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 8, pp. 1363-1376, 2014.
- [20] I. Kamwa, S. Samantaray and G. Joos, "Catastrophe predictors from ensemble decision-tree learning of wide-area severity indices," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 144-158, 2010.
- [21] M. Li, A. Pal, A. G. Phadke and J. S. Thorp, "Transient stability prediction based on apparent impedance trajectory recorded by PMUs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 498-504, 2014.
- [22] S. Rovnyak, S. Kretsinger, J. Thorp and D. Brown, "Decision trees for real-time transient stability prediction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1417-1426, 1994.
- [23] A. D. Rajapakse, F. Gomez, K. Nanayakkara, P. A. Crossley and V. V. Terzija, "Rotor angle instability

- 
- <sup>1</sup> Special protection system (SPS)
  - <sup>2</sup> Remedial actions
  - <sup>3</sup> Neural networks (NNs)
  - <sup>4</sup> Fuzzy systems
  - <sup>5</sup> Decision tree
  - <sup>6</sup> Support vector machine (SVM)
  - <sup>7</sup> Phasor measurement unit (PMU)
  - <sup>8</sup> Radial basis function (RBF)