

## یک روش جدید بارزدایی فرکانسی بهینه بلادرنگ با استفاده از شاخص‌های سطح امنیت

### سیستم قدرت و شبکه‌های عصبی مصنوعی

مجید معظمی<sup>۱</sup>، امین خدابخشیان<sup>۲</sup>، رحمت‌الله هوشمند<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

m\_moazzami@eng.ui.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

aminkh@eng.ui.ac.ir

۳- استاد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir

**چکیده:** سیستم‌های قدرت مدرن امروزی در سطح امنیت پایین‌تری به علت تجدید ساختار و مشکل افزایش ظرفیت‌های انتقال بهره‌برداری می‌شوند. وقوع خاموشی‌های گسترده در سال‌های اخیر بیانگر افزایش قابل توجه آسیب‌پذیری سیستم‌های قدرت در برابر اغتشاشات است. یکی از آخرین اقدامات کنترلی برای کنترل شبکه و حفظ پایداری، بارزدایی است. در این مقاله، یک روش بارزدایی فرکانسی بهینه بلادرنگ با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده است. این ساختار شامل دو بخش مطالعات آفلاین و استفاده بهنگام است. در بخش مطالعات آفلاین، با توجه به مقدار اندیس‌های آسیب‌پذیری و حاشیه امنیت کل سیستم قدرت، حداقل فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس مرکز اینرسی معادل  $(dfc/dt)$  در سناریوهای اغتشاش مختلف N-K، پایگاه داده ورودی شبکه عصبی ایجاد و شرایط امنیت سیستم در هر اغتشاش تشخیص داده می‌شود. در هر سناریو مقدار بارزدایی اکتیو و راکتیو لازم برای حفظ پایداری سیستم قدرت با استفاده از حل یک مسأله بهینه‌سازی آفلاین با استفاده از روش هوشمند هیبرید CPCE<sup>۱</sup> تعیین می‌شود. مقادیر بارزدایی اکتیو و راکتیو در هر پله برای هر سناریو به عنوان اطلاعات خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شوند. برای بهینه‌سازی آموزش شبکه عصبی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. شبکه عصبی آموزش دیده به صورت بهنگام با توجه به اطلاعات بلادرنگ شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت که از سیستم WAMS<sup>۲</sup> و PMU<sup>۳</sup> دریافت می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از نرم افزار MATLAB و DigSILENT بر روی شبکه تست ۱۱۸ باس IEEE نشان از عملکرد مؤثر روش پیشنهادی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** ارزیابی بلادرنگ پایداری، بارزدایی فرکانسی، سطح امنیت، شبکه‌های عصبی.

### ۱- مقدمه

ضامن حفظ یکپارچگی و جلوگیری از منلاشی شدن سیستم قدرت است. لذا باید فرکانس، ولتاژ و به‌طور کلی‌تر کلیه متغیرهای اساسی شبکه، در مدت زمان معینی پس از وقوع شرایط اضطراری به وضع قابل قبول خود بازگردند.

کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه یکی از موارد بسیار مهم و

بارزدایی یکی از آخرین، سریعترین، مؤثرترین و فراگیرترین اقدامات اصلاحی و کنترلی برای حفظ پایداری در سیستم‌های قدرت است. بر اساس معیار WECC<sup>۴</sup>، هر سیستم قدرت باید مجهز به یک سیستم بارزدایی مناسب

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۲۸

نام نویسنده مسئول: مجید معظمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان -

دانشکده برق

برای حفظ پایداری شبکه در برابر از دست دادن ۳۳٪ از کل تولید و یا شرایط اضافه بار ۵۰٪ باشد [۱].

به طور کلی، روش‌های بارزدایی فرکانسی به دو دسته اصلی بارزدایی استاتیکی و بارزدایی دینامیکی تقسیم می‌شوند. طرح بارزدایی استاتیکی دارای تنظیمات فرکانس ثابت، میزان کل بار حذفی ثابت و مقدار ثابت برای مراحل مختلف بارزدایی است. این طرح بارزدایی با توجه به تغییرات شرایط بارگذاری سیستم عملکردی ثابت داشته و بنابراین، قابلیت انعطاف لازم برای عملکرد مناسب با دامنه اغتشاشات را ندارد. این طرح می‌تواند در اغتشاشات شدید به علت کاهش شدید فرکانس و حذف یک مقدار بار ثابت با تأخیر زمانی موجود باعث وقوع ناپایداری شود. همچنین احتمال وقوع اضافه فرکانس در سیستم در صورت وقوع اغتشاش در شرایط بارگذاری سبک نیز وجود دارد.

برای حل مشکلات یاد شده در ساختار بارزدایی استاتیکی و عملکرد نامناسب این طرح در اغتشاشات مختلف با توجه به مشکلات یاد شده، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای اصلاح روش‌های بارزدایی فرکانسی استاتیکی انجام شده است. یکی از مهمترین راهکارهای رفع مشکلات برنامه بارزدایی استاتیکی، استفاده از برنامه بارزدایی دینامیکی است [۲-۴].

در روش بارزدایی استاتیکی، بارزدایی بر اساس جدا کردن مقدار ثابت از پیش تعیین شده بارهای مشخص در هر مرحله صورت می‌گیرد؛ در حالی که در روش بارزدایی دینامیکی اندازه اغتشاش و ویژگی‌های فرکانس و ولتاژ سیستم قدرت مد نظر است. معمولاً استفاده از نرخ کاهش فرکانس ( $df/dt$ ) یکی از معیارهای اصلی در انجام بارزدایی دینامیکی تطبیقی است. مطالعات انجام شده در مرجع [۵] نشان داده است که استفاده از سیستم بارزدایی فرکانسی مبتنی بر  $df/dt$  روش مناسبی در مقابله با حوادث ناخواسته بوده است. به طور کلی، روش‌های بارزدایی فرکانسی تطبیقی مبتنی بر نرخ کاهش فرکانس به سه دسته تطبیقی بودن فرکانس آستانه بارزدایی با توجه به نرخ تغییرات فرکانس سیستم ناشی از اغتشاش  $f-df/dt$ ، تطبیقی بودن تأخیر زمانی بین مراحل بارزدایی با توجه به شدت اغتشاش  $T_D-df/dt$  و تطبیقی بودن میزان بار حذفی در هر پله

بارزدایی با توجه به شدت اغتشاش  $L_D-df/dt$  تقسیم می‌شود [۶]. پیاده‌سازی دو روش  $f-df/dt$  و  $T_D-df/dt$  در یک سیستم قدرت واقعی مشکل و در مواردی غیر عملی است، در حالی که روش سوم ضمن تأثیر درخور توجه در حفظ پایداری، با توجه به قابلیت موجود در رله‌های شبکه انتقال به‌طور کامل قابل پیاده‌سازی است.

در [۷] نشان داده شده است که نرخ کاهش فرکانس اولیه در نقاط مختلف شبکه به دنبال از دست دادن تولید و یا افزایش بار، وابسته به فاصله الکتریکی از محل اغتشاش است. این بدان معنی است که نقاط دورتر از محل حادثه  $df/dt$  کمتری خواهند داشت، اما این امر الزاماً به معنی فرکانس گذرای کمتر در این باس‌ها نیست.

در [۸] امکان استفاده از نرخ تغییرات درجه دوم فرکانس؛ یعنی  $d^2f/dt^2$  به جای استفاده از  $df/dt$  پیشنهاد شده است. در این مرجع ادعا شده است که میزان تأثیرپذیری  $d^2f/dt^2$  از پارامترهای مختلف شبکه کمتر از  $df/dt$  است. علی‌رغم مزایای یاد شده برای این روش در مرجع [۸]، به نظر می‌رسد پیاده‌سازی عملی این روش با مشکلات زیادی همراه باشد.

به طور کلی، در تمامی روش‌های بارزدایی دینامیکی مبتنی بر  $df/dt$ ، عملاً اندازه‌گیری نرخ کاهش فرکانس کار ساده‌ای نیست. بنابراین، برای حل این مشکلات و البته استفاده از مزایای بارزدایی دینامیکی در روش‌های مبتنی بر  $df/dt$ ، باید از روش تخمین ارائه شده در مرجع [۹] استفاده کرد تا بتوان با جمع‌آوری اطلاعات از باس‌های مختلف در نقاط مختلف شبکه و تعیین تغییرات فرکانس مرکزی شبکه، بر مشکل نوسان فرکانس غلبه کرد. لازم است توجه شود که بارزدایی‌های دینامیکی مبتنی بر  $df/dt$  اساساً بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی  $df/dt$  در باس‌های شبکه به صورت مستقل امکان‌پذیر ناست.

با توجه به موارد بیان شده، استفاده از مزایای بارزدایی تطبیقی مبتنی بر  $df/dt$  نیازمند استفاده از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده (WAMS) است تا بتوان این روش را به صورت مرکزی<sup>۵</sup> پیاده‌سازی کرد.

در مراجع [۵-۹] اصلاح سرعت و دقت عملکرد روش بارزدایی فرکانسی و پایداری گذرا مد نظر بوده است و این

روش‌ها بر روی بهینه‌سازی و حداقل کردن مقدار بارزدایی متمرکز نشده‌اند [۹-۵]. استفاده از سیستم‌های کنترل فرکانس هوشمند، یکی از بهترین روشهایی است که قادر است با سرعت بالا، بارزدایی بهینه‌تری را انجام دهد. از مهمترین روشهای هوشمندی که می‌توان از آنها برای بهینه‌سازی زمانی و بهترین بارزدایی کمک گرفت، می‌توان به سیستم‌های خبره، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) [۴-۳] و [۱۰-۱۱]، منطق فازی [۱۲]، الگوریتم ژنتیک [۱۴-۱۳] و الگوریتم PSO [۱۵] اشاره کرد. از روشهای هوشمند فوق، روش شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی تطبیقی و سرعت بالا، از مؤثرترین روشهاست [۳]. سرعت فوق‌العاده بالای شبکه‌های عصبی، حتی امکان بارزدایی بهینه در زمان‌های گذرا را هم فراهم آورده است [۳].

در مرجع [۱۶] از شبکه عصبی به عنوان یک روش سریع و دقیق برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سیستم قدرت در خلال فرآیند بارزدایی توسط رله کاهش فرکانس استفاده شده است. در مرجع [۱۷] نیز یک روش بارزدایی فرکانسی ترکیبی به کمک روش مونت کارلو و شبکه‌های عصبی ارائه شده است.

در مراجع [۴-۳ و ۱۰-۱۱ و ۱۷] خروجی شبکه عصبی مقدار کل بارزدایی لازم برای حفظ پایداری سیستم قدرت را تعیین می‌کند. در عمل این سیگنال در سیستم قدرت قابل استفاده نیست، زیرا در هر سیستم بارزدایی واقعی لازم است میزان بار حذفی در هر مرحله بارزدایی مشخص باشد.

در این مقاله، یک روش بارزدایی فرکانسی بهینه بلادرنگ با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده است. هدف از ارائه این ساختار، معرفی یک روش سریع و بهینه بر اساس استفاده همزمان از شاخص‌های امنیت استاتیکی و دینامیکی سیستم قدرت برای بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت است. بر خلاف روشهای یاد شده مبتنی بر شبکه عصبی، روش مزبور قادر است ضمن تعیین سطح امنیت سیستم، میزان بهینه بار اکتیو و راکتیو حذفی در هر مرحله بارزدایی را به صورت همزمان محاسبه کند. بدین منظور، در روش پیشنهادی به طور همزمان از شاخص‌های استاتیکی و دینامیکی سیستم قدرت استفاده شده است.

## ۲- روش بارزدایی بلادرنگ پیشنهادی

به طور کلی، روش پیشنهادی از سه بخش اصلی تشکیل یافته است که عبارتند از:

۱- بخش جمع‌آوری اطلاعات سیستم قدرت و مطالعات آفلاین؛

۲- بخش تشخیص بلادرنگ شرایط اضطراری و تعیین بارزدایی بهینه برای جلوگیری از خاموشی سراسری؛

۳- بخش به روز رسانی پایگاه‌های داده در بازه زمانی مشخص و قابل تنظیم با توجه به اطلاعات عملکرد بلادرنگ سیستم قدرت.

فرم کلی ساختار پیشنهادی در مطالعات آفلاین در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۲) نحوه تشخیص بلادرنگ سطح امنیت با توجه به اطلاعات دریافتی از

سیستم‌های حفاظتی است. در ادامه، یک مدل مناسب با توجه به زمان در دسترس برای مطالعات پایداری برای همه المان‌های سیستم قدرت انتخاب می‌شود. سپس برای ساختن پایگاه داده لازم به مطالعه آفلاین اغتشاشات در سیستم قدرت با توجه به معیار امنیتی N-K پرداخته می‌شود. در هر حالت، پس از تعیین اندیس‌های اندیس آسیب‌پذیری کل سیستم قدرت (SVI)<sup>۱</sup>، اندیس حاشیه امنیت کل سیستم قدرت (SMI)<sup>۱۱</sup>، نرخ کاهش فرکانس مرکزی معادل (dfc/dt)<sup>۱۲</sup> و فرکانس مینیمم معادل سیستم قدرت (fmin)، پایگاه‌های داده تشکیل شده و شبکه عصبی آموزش می‌بیند.

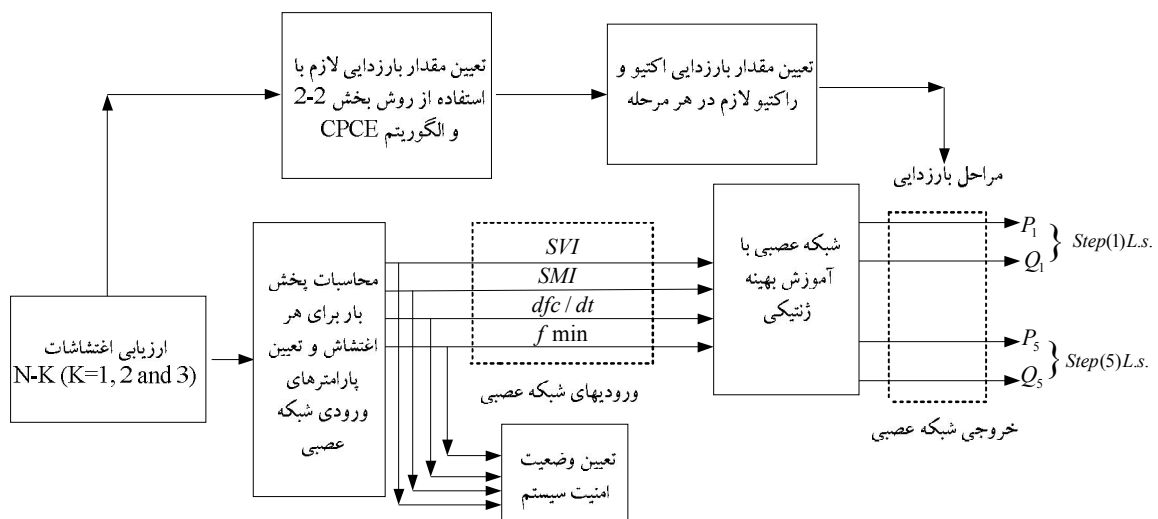
در بخش دوم با بروز اغتشاش در سیستم قدرت و دریافت بلادرنگ اطلاعات با استفاده از سیستم SCADA و یا WAMS، شاخص‌های SVI، SMI، dfc/dt و fmin محاسبه می‌شوند و با توجه به اندازه آنها و آموزش‌های آفلاین، وضعیت امنیت سیستم با توجه به جدولی که در بخش شبیه‌سازی ارائه می‌شود، تعیین و اعمال اصلاحی لازم انجام می‌شود.

در بخش سوم با توجه به اطلاعات بلادرنگ دریافت شده از سیستم SCADA و یا WAMS، در بازه‌های زمانی مشخص و قابل تنظیم بر اساس نیازهای سیستم، اطلاعات پایگاه داده به روز می‌شود. در ادامه، جزئیات روند محاسبات اندیس‌ها و مدل برنامه‌ریزی بارزدایی توضیح داده خواهد شد.

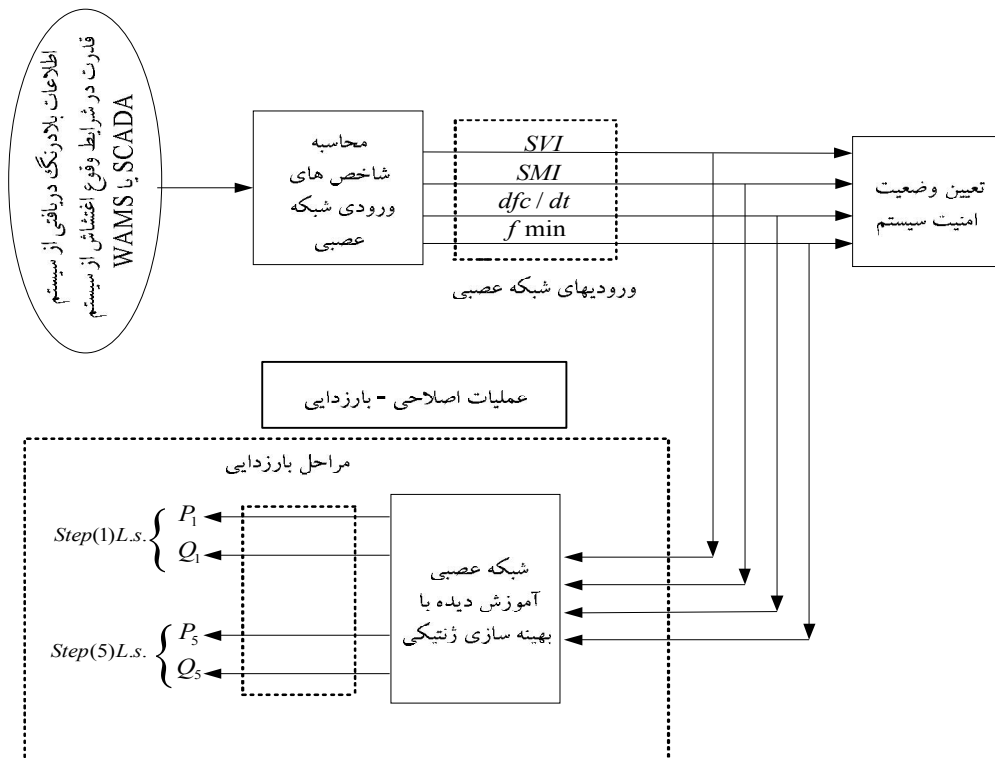
سیستم SCADA و یا سیستم WAMS و تعیین اعمال اصلاحی برای جلوگیری از خاموشی سراسری نشان داده شده است.

اطلاعات پایگاه‌های داده با توجه به اطلاعات بلادرنگ و یا نزدیک به بلادرنگ دریافتی از سیستم SCADA و یا سیستم WAMS در بازه‌های زمانی مشخص بسته به نیاز سیستم و دقت مورد نیاز، به روز می‌شود. با وقوع اغتشاش در سیستم، سطح امنیت سیستم تعیین و اعمال اصلاحی لازم انجام خواهد شد. این ساختار قادر است مدیریت مناسب و سریعی در تشخیص سریع سطح امنیت سیستم در شرایط اضطراری اعمال کرده و اعمال اصلاحی مناسب برای مدیریت بحران را تعیین کند. بنابراین، روش پیشنهادی قادر است مشکلات زمانبر بودن محاسبات اعمال اصلاحی (در اینجا بارزدایی) را حل کند و با تعیین سریع وضعیت امنیت استاتیکی، عملکردی نزدیک به بلادرنگ برای تعیین مقادیر بارزدایی برای حفظ پایداری سیستم قدرت داشته باشد. در صورت انجام مطالعات آفلاین دقیق و کافی برای سیستم، روش پیشنهادی پتانسیل بالایی در مهار خاموشی سراسری و مدیریت شرایط اضطراری در سیستم قدرت دارد. با توجه به توضیحات کلی داده شده، روند نمای پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.

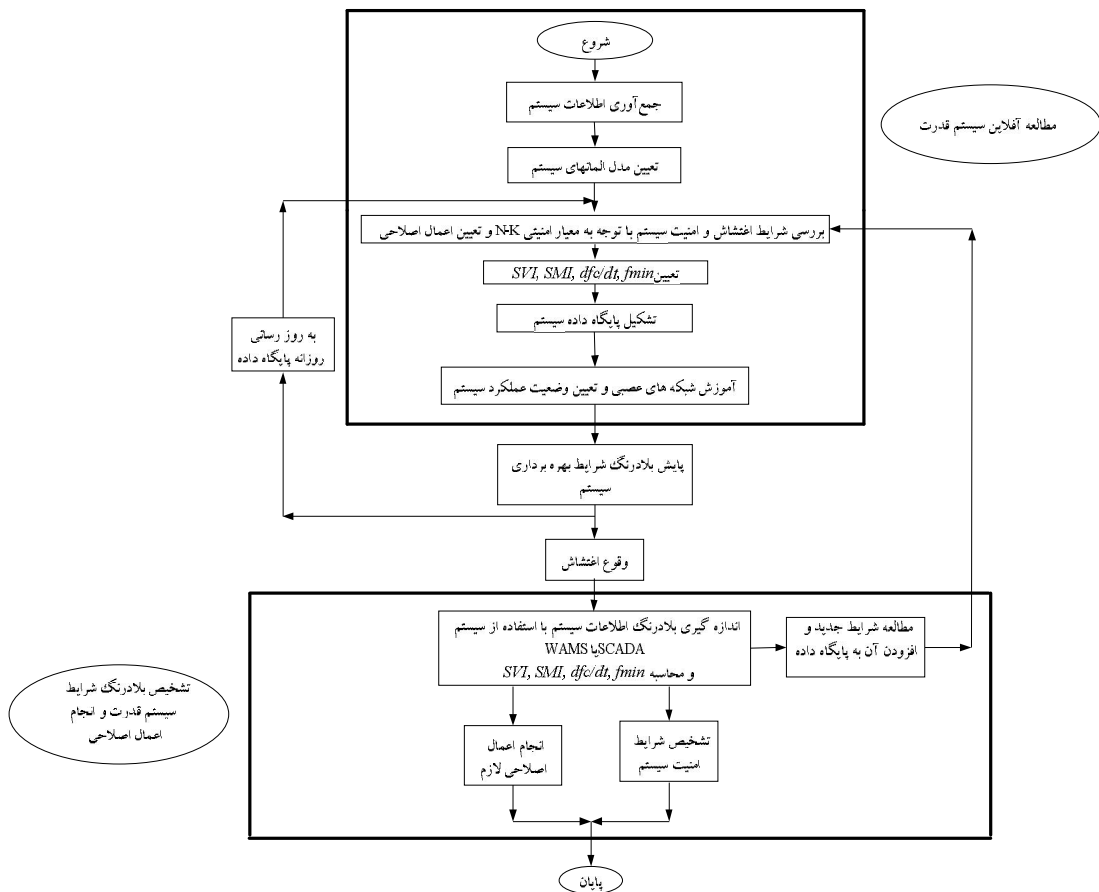
در بخش اول ابتدا به جمع‌آوری کلیه اطلاعات لازم برای مطالعات سیستم قدرت پرداخته می‌شود. این اطلاعات شامل کلیه اطلاعات مربوط به ژنراتورها، خطوط، بارها و



شکل (۱): ساختار روش پیشنهادی در مطالعات آفلاین



شکل (۲): ساختار روش پیشنهادی برای عملکرد بلادرنگ تشخیص سطح امنیت و بارزدایی



شکل (۳): روند نمای روش پیشنهادی

## ۲-۱-۱- اندیس آسیب‌پذیری و حاشیه امنیت

### سیستم قدرت

در ادامه، به معرفی اندیس آسیب‌پذیری و حاشیه امنیت برای سیستمی با  $m$  ژنراتور و  $n$  باس و  $p$  خط و  $q$  بار می‌پردازیم [۱۸].

## ۲-۱-۱-۱- اندیس آسیب‌پذیری و اندیس حاشیه امنیت

### برای ژنراتورها

برای ژنراتورها چهار اندیس آسیب‌پذیری معرفی می‌شود. اندیس آسیب‌پذیری توان اکتیو، اندیس آسیب‌پذیری توان راکتیو، اندیس آسیب‌پذیری خروج ژنراتور و اندیس آسیب‌پذیری کل ژنراتورهای سیستم که برابر مجموع سه اندیس قبلی برای همه ژنراتورهای سیستم است.

### ۲-۱-۱-۱-۱- اندیس آسیب‌پذیری توان اکتیو ژنراتورها

$$VI_{Pg,i} = \frac{W_{Pg,i}}{2N} \left( \frac{P_{gi}}{P_{gi,max}} \right)^{2N} \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $P_{gi}$  توان اکتیو تولیدی ژنراتور و  $P_{gi,max}$  حداکثر توان اکتیو قابل تولید ژنراتور، ضریب  $N$  برابر ۱ و  $W_{Pg,i}$  ضریب وزنی است که با توجه به اهمیت ژنراتورها تعیین می‌شود. در این مقاله، این ضریب برای کلیه ژنراتورها برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱-۱-۱-۲- اندیس آسیب‌پذیری توان راکتیو ژنراتورها

این اندیس مانند توان اکتیو نسبت توان راکتیو تولیدی ژنراتور به حداکثر توان راکتیو قابل تولید ژنراتور است. مانند قبل، این اندیس نیز دارای ضریب وزنی است که به اندازه و اهمیت ژنراتور مربوطه در سیستم بستگی دارد.

$$VI_{Qg,i} = \frac{W_{Qg,i}}{2N} \left( \frac{Q_{gi}}{Q_{gi,max}} \right)^{2N} \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $Q_{gi}$  توان راکتیو تولیدی ژنراتور و  $Q_{gi,max}$

حداکثر توان راکتیو قابل تولید ژنراتور، ضریب  $N$  برابر ۱ و  $W_{Qg,i}$  ضریب وزنی است که با توجه به اهمیت ژنراتورها در تولید توان راکتیو تعیین می‌شود. در این مقاله، این ضریب برای کلیه ژنراتورها برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱-۱-۳- اندیس آسیب‌پذیری خروج ژنراتور

این اندیس با توجه به احتمال خروج ژنراتور تعیین می‌شود. هرچه این اندیس بزرگتر باشد، احتمال خروج ژنراتور و آسیب‌پذیری سیستم به علت خروج آن بیشتر است.

$$VI_{gen\_loss,i} = W_{gen\_loss,i} K_{gen\_loss,i} \quad (3)$$

مقدار  $K_{gen\_loss,i}$  در مرجع [۱۸] برای ژنراتورهای بزرگ  $0.05$  و برای ژنراتورهای کوچکتر  $0.03$  بیان شده است. هر چه عمر ژنراتور بیشتر باشد، احتمال خروج آن بیشتر بوده و  $K_{gen\_loss,i}$  بزرگتر خواهد بود. ضریب وزنی  $W_{gen\_loss,i}$  با توجه به اهمیت و تاثیر خروج ژنراتور بر روی عملکرد سیستم تعیین می‌شود. هر چه ژنراتور در سیستم مهم‌تر باشد، این ضریب بزرگتر است. در این مقاله ضریب  $K_{gen\_loss,i}$  برای کلیه ژنراتورها برابر  $0.03$  و ضریب وزنی  $W_{gen\_loss,i}$  برای همه ژنراتورها برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱-۱-۴- اندیس آسیب‌پذیری کل ژنراتورهای سیستم

این اندیس برابر مجموع اندیس‌های توان اکتیو و اندیس‌های توان راکتیو و اندیس‌های خروج تمام ژنراتورهای سیستم است.

$$VI_{gen} = \sum_{i=1}^m (VI_{Pg,i} + VI_{Qg,i} + VI_{gen\_loss,i}) \quad (4)$$

### ۲-۱-۱-۵- اندیس‌های حاشیه امنیت ژنراتور

این اندیس‌ها نشان‌دهنده قابلیت اطمینان ژنراتور است. این اندیس برای ژنراتورها دو مورد است: اندیس حاشیه امنیت توان اکتیو و اندیس حاشیه امنیت تولیدی ژنراتور. هرچه این اندیس‌ها به یک نزدیکتر باشد، حاشیه

## ۲-۱-۲-۱- اندیس آسیب‌پذیری ولتاژ باس‌های سیستم

$$VI_{V,i} = \frac{W_{V,i}}{2N} \left( \frac{V_i - V_i^{sche}}{\Delta V_{i,lim}} \right)^{2N} \quad (۸)$$

در این رابطه،  $V_i$  ولتاژ باس بعد از انجام پخش بار،  $V_i^{sche}$  مقدار ولتاژ برنامه‌ریزی شده برای باس مربوطه،  $\Delta V_{i,lim}$  محدوده تغییرات ولتاژ مجاز باس است که در واقع اختلاف حد بالا و پایین ولتاژ باس‌هاست. در این مطالعه  $N$  یک فرض شده است [۱۸]. در این مقاله، حداقل مقدار مجاز ولتاژ باس‌ها  $0/95$  و حداکثر آن  $1/05$  پریونیت و ضریب وزنی  $W_{V,i}$  برای همه باس‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲-۱-۲- اندیس آسیب‌پذیری بارپذیری باس‌های

## سیستم

این اندیس به درصد بارپذیری باس مربوطه بستگی دارد. هر چه بارپذیری باس بیشتر باشد، آسیب‌پذیری بیشتر است.

$$VI_{Loadab,i} = \frac{W_{Loadab,i}}{2N} (r_{Loadab,i})^{2N} \quad (۹)$$

در این رابطه، ضریب  $N$  برابر ۱،  $r_{Loadab,i}$  بارپذیری باس  $i$ م برابر با  $Z_{th,i}/Z_{L0,i}$  است که  $Z_{th,i}$  امپدانس تونن دیده شده از باس  $i$ م و  $Z_{L0,i}$  امپدانس معادل بار باس  $i$ م در حالت پایدار است. این اندیس نیز دارای ضریب وزنی است که با توجه به اهمیت باس تعیین می‌شود. در این مقاله ضریب وزنی  $W_{Loadab,i}$  برای کلیه باس‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲-۱-۲- اندیس آسیب‌پذیری خروج باس

اندیس آسیب‌پذیری خروج باس به احتمال خروج باس از سیستم بستگی دارد. بزرگ بودن این اندیس برای یک باس نشان دهنده احتمال خروج باس از سیستم و ایزوله شدن آن از بقیه سیستم است. احتمال خروج یک باس به وضعیت خطوط متصل به آن و اندازه و زاویه ولتاژ آن باس بستگی دارد.

امنیت ژنراتور بیشتر است و با اطمینان بیشتری می‌تواند توان اکتیو و راکتیو تولید کند.

## ۲-۱-۱-۲- اندیس حاشیه امنیت توان اکتیو ژنراتور

$$MI_{Pg,i} = 1 - \frac{P_{gi}}{P_{gi,max}} \quad (۵)$$

در این رابطه،  $P_{gi}$  توان اکتیو تولیدی ژنراتور و  $P_{gi,max}$  حداکثر توان اکتیو قابل تولید ژنراتور است.

## ۲-۱-۱-۲- اندیس حاشیه امنیت توان راکتیو ژنراتور

$$MI_{Qg,i} = 1 - \frac{Q_{gi}}{Q_{gi,max}} \quad (۶)$$

در این رابطه،  $Q_{gi}$  توان راکتیو تولیدی ژنراتور و  $Q_{gi,max}$  حداکثر توان راکتیو قابل تولید ژنراتور است.

## ۲-۱-۱-۲- اندیس حاشیه امنیت کل ژنراتورهای سیستم

این اندیس برابر مجموع اندیس‌های حاشیه امنیت توان اکتیو و توان راکتیو تمام ژنراتورهای سیستم است.

$$MI_{gen} = \sum_{i=1}^m (MI_{Pg,i} + MI_{Qg,i}) \quad (۷)$$

## ۲-۱-۲- اندیس آسیب‌پذیری و اندیس حاشیه امنیت

## برای باس‌ها

اندیس آسیب‌پذیری برای باس‌های سیستم چهار مورد است: اندیس آسیب‌پذیری ولتاژ باس، اندیس آسیب‌پذیری بارپذیری باس، اندیس آسیب‌پذیری خروج باس (ایزوله شدن باس) و اندیس آسیب‌پذیری کل باس‌های سیستم که برابر مجموع سه اندیس قبلی برای باس‌های سیستم است. مانند ژنراتورها، باس‌ها نیز دارای ضریب وزنی هستند که بر اساس اهمیت باس مربوطه مقاداردهی می‌شود. هرچه باس مهمتر باشد، ضریب وزنی آن بیشتر است.

### ۲-۱-۲-۶- اندیس حاشیه بارپذیری

این اندیس با استفاده از رابطه (۱۳) بیان می‌شود:

$$MI_{Loadab,i} = 1 - r_{Loadab,i} \quad (13)$$

این شاخص نشان دهنده چگونگی تغییر امنیت باس با توجه به افزایش بار در باس مورد بررسی است.

### ۲-۱-۲-۷- اندیس حاشیه امنیت کل باس‌ها

این اندیس برابر مجموع اندیس‌های حاشیه امنیت ولتاژ و اندیس حاشیه بارپذیری باس‌های سیستم است.

$$MI_{bus} = \sum_{i=1}^n (MI_{V,i} + MI_{Loadab,i}) \quad (14)$$

### ۲-۱-۳- اندیس آسیب‌پذیری و اندیس حاشیه امنیت

#### برای شاخه‌ها

اندیس آسیب‌پذیری برای شاخه‌ها شامل شش مورد است. اندیس آسیب‌پذیری توان اکتیو انتقالی، اندیس آسیب‌پذیری توان راکتیو انتقالی، اندیس آسیب‌پذیری شارژ خازنی خطوط، اندیس آسیب‌پذیری زاویه خطوط، اندیس آسیب‌پذیری خروج خطوط، اندیس آسیب‌پذیری کل خطوط که مجموع اندیس‌های آسیب‌پذیری بیان شده است. تمام اندیس‌های آسیب‌پذیری دارای ضریب وزنی هستند که با توجه به مشخصات خط و اهمیت آن در سیستم تعیین می‌شود. خطوطی که به ژنراتورهای بزرگ یا بارهای اصلی سیستم متصل هستند، به دلیل اهمیتی که در سیستم دارند دارای ضریب وزنی بیشتری هستند.

### ۲-۱-۳-۱- اندیس آسیب‌پذیری توان اکتیو انتقالی

$$VI_{Pf,i} = \frac{W_{Pf,i}}{2N} \left( \frac{P_{fi}}{S_{i,max}} \right)^{2N} \quad (15)$$

در این رابطه ضریب  $N$  برابر ۱،  $P_{fi}$  توان اکتیو انتقال یافته از خط  $A_m$  و  $S_{i,max}$  حداکثر توان ظاهری است که خط  $A_m$  می‌تواند عبور دهد. این توان به مشخصات خط و ویژگی‌های محیط بستگی دارد. با توجه به اهمیت خطوط سیستم در انتقال توان اکتیو، ضریب وزنی  $W_{Pf,i}$  تعیین می‌شود. در این مقاله مقدار  $W_{Pf,i}$  برای کلیه خطوط برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

$$VI_{Load\_loss,i} = W_{Load\_loss,i} K_{Load\_loss,i} \quad (10)$$

در این رابطه،  $K_{Load,loss}$  بر اساس احتمال خروج باس تعیین می‌شود. اگر باسی دارای بار راکتیو زیاد یا به خطوطی با قابلیت اطمینان پایین متصل باشد، این ضریب بزرگتر است. در این مقاله مقدار ضریب  $K_{Load,loss}$  بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ بر اساس موارد یاد شده در نظر گرفته شده است. در رابطه (۱۰)،  $W_{Load\_loss}$  ضریب وزنی این اندیس است که با توجه به اهمیت باس مورد نظر در سیستم تعیین می‌شود. در این مقاله مقدار ضریب وزنی  $W_{Load\_loss}$  برای کلیه باس‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱-۴- اندیس آسیب‌پذیری کل باس‌ها

اندیس آسیب‌پذیری کل باس‌های سیستم برابر مجموع اندیس‌های آسیب‌پذیری ولتاژ، بارپذیری و خروج خط است.

$$VI_{bus} = \sum_{i=1}^n (VI_{V,i} + VI_{Loadab,i} + VI_{Load\_loss,i}) \quad (11)$$

اندیس‌های حاشیه امنیت باس‌ها معیاری برای قابلیت اطمینان باس مربوطه است. هرچه این اندیس‌ها بزرگتر باشد قابلیت اطمینان بیشتر و احتمال ناپایداری ولتاژ و حتی فروپاشی ولتاژ کمتر است. اندیس‌های حاشیه امنیت باس‌ها دو مورد بوده، شامل اندیس حاشیه امنیت ولتاژ و اندیس حاشیه بارپذیری هستند.

### ۲-۱-۴-۵- اندیس حاشیه امنیت ولتاژ

$$MI_{V,i} = 1 - \left| \frac{V_i - V_i^{sche}}{\Delta V_{i,lim}} \right| \quad (12)$$

در این رابطه،  $V_i$  ولتاژ باس بعد از انجام پخش بار،  $V_i^{sche}$  مقدار ولتاژ برنامه‌ریزی شده برای باس مربوطه،  $\Delta V_{i,lim}$  محدوده ولتاژ باس است که در واقع اختلاف حد بالا و پایین ولتاژ باس‌هاست.



در این رابطه ضریب  $N$  برابر  $1$ ،  $La_i$  اختلاف زاویه باس‌های متصل به خط  $i$  و  $La_{i,max}$  حداکثر اختلاف این زاویه است که مربوط به شرایط انتقال توان ماکزیمم آن خط است. این اندیس نیز دارای ضریب وزنی  $W_{line\_ang,i}$  است که با توجه به اهمیت خط تعیین می‌شود. در این مقاله مقدار  $W_{line\_ang,i}$  برای کلیه خطوط برابر  $1$  در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۱-۳-۵- اندیس آسیب‌پذیری خروج خط

بزرگ بودن این اندیس برای یک خط نشان‌دهنده احتمال خروج زیاد آن است. بنابراین، با توجه به تاثیر خروج خطوط بر عملکرد سیستم و از آنجا که این اتفاق مقدمه‌ای بر ناپایداری سراسری در سیستم است، این اندیس دارای اهمیت زیادی است.

$$VI_{line\_loss,i} = W_{line\_loss,i} K_{line\_loss,i} \quad (19)$$

در این رابطه،  $K_{line,loss}$  بر اساس احتمال خروج خط تعیین می‌شود. هرچه احتمال خروج خط بیشتر باشد، این ضریب بزرگتر خواهد بود. برای خطوط فرسوده این ضریب بزرگتر است. در این مقاله مقدار ضریب  $K_{line,loss}$  برای خطوط با توجه به نکات یاد شده بین  $0.02$  تا  $0.05$  در نظر گرفته شده است. در رابطه (۱۹)  $W_{line\_loss}$  ضریب وزنی این اندیس است که با توجه به اهمیت خط مورد نظر در سیستم تعیین می‌شود. در این مقاله مقدار ضریب وزنی  $W_{line\_loss}$  برای کلیه خطوط برابر  $1$  در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۱-۳-۶- اندیس آسیب‌پذیری کل خطوط

اندیس آسیب‌پذیری کل خطوط سیستم برابر مجموع اندیس‌های آسیب‌پذیری خطوط است.

$$VI_{line} = \sum_{i=1}^p (VI_{Pf,i} + VI_{Qf,i} + VI_{Qc,i} + VI_{line\_ang,i} + VI_{line\_loss,i}) \quad (20)$$

#### ۲-۱-۳-۲- اندیس آسیب‌پذیری توان راکتیو انتقالی

اندیس آسیب‌پذیری توان راکتیو انتقالی به نسبت توان راکتیو انتقالی به کل توان ظاهری قابل تحمل خط بستگی دارد.

$$VI_{Qf,i} = \frac{W_{Qf,i}}{2N} \left( \frac{Q_{fi}}{S_{i,max}} \right)^{2N} \quad (16)$$

در این رابطه ضریب  $N$  برابر  $1$ ،  $Q_{fi}$  توان اکتیو انتقال یافته از خط  $i$  و  $S_{i,max}$  حداکثر توان ظاهری است. با توجه به اهمیت خطوط سیستم در انتقال توان راکتیو، ضریب وزنی  $W_{Qfi}$  تعیین می‌شود. خطوط مهمتر دارای ضریب وزنی بیشتری هستند. در این مقاله مقدار  $W_{Qfi}$  برای کلیه خطوط برابر  $1$  در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۱-۳-۳- اندیس آسیب‌پذیری شارژ خازنی خطوط

اندیس آسیب‌پذیری شارژ خازنی خط، نسبت شارژ خازنی خط به کل توان راکتیو تولیدی ژنراتورهاست.

$$VI_{Qc,i} = \frac{W_{Qc,i}}{2N} \left( \frac{Q_{ci}}{Q_{\Sigma}} \right)^{2N} \quad (17)$$

در این رابطه ضریب  $N$  برابر  $1$ ،  $Q_{ci}$  شارژ خازنی خط و  $Q_{\Sigma}$  مجموع توان راکتیو تولیدی سیستم است. این اندیس نیز دارای ضریب وزنی  $W_{Qc,i}$  است که با توجه به اهمیت خط تعیین می‌شود. در این مقاله، مقدار  $W_{Qc,i}$  برای کلیه خطوط برابر  $1$  در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۱-۳-۴- اندیس آسیب‌پذیری زاویه خطوط

اندیس آسیب‌پذیری زاویه خط، نسبت اختلاف زاویه باس‌های متصل به خط به حداکثر اختلاف زاویه باس‌ها است.

$$VI_{line\_ang,i} = \frac{W_{line\_ang,i}}{2N} \left( \frac{L_{ai}}{L_{ai,max}} \right)^{2N} \quad (18)$$

$$MI_{line} = \sum_{i=1}^p (MI_{Sf,i} + MI_{Line-ang,i}) \quad (23)$$

با توجه به اندیس‌های محاسبه شده، اندیس آسیب‌پذیری کل سیستم (SVI) و اندیس حاشیه امنیت کل سیستم (SMI) برابر مجموع اندیس‌های به دست آمده برای اجزای مختلف سیستم است. با توجه به این اندیس‌ها می‌توان در مورد وضعیت کلی سیستم اظهار نظر کرد.

#### ۲-۱-۴- اندیس آسیب‌پذیری و اندیس حاشیه امنیت کل سیستم

$$SVI = W_{gen}VI_{gen} + W_{bus}VI_{bus} + W_{line}VI_{line} \quad (24)$$

$$SMI = W_{gen}MI_{gen} + W_{bus}MI_{bus} + W_{line}MI_{line} \quad (25)$$

اندیس‌های آسیب‌پذیری و حاشیه امنیت بیان شده به طور جامع شرایط سیستم را بررسی کرده و با توجه به وضعیت هر قسمت سیستم، عددی به آن نسبت می‌دهند که نشان‌دهنده وضعیت آن در سیستم است.

پس از بررسی و شناخت اندیس‌های آسیب‌پذیری و حاشیه امنیت به بررسی مدل برنامه‌ریزی بارزدایی می‌پردازیم. این مدل به صورت زیر بیان می‌شود:

#### ۲-۲- مدل برنامه‌ریزی بارزدایی

به طور کلی، مدل بهینه‌سازی بارزدایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Min \left[ \sum_{i=1}^{nb} |P_{di} - P_{di}^*|^2 + \sum_{i=1}^{nb} |Q_{di} - Q_{di}^*|^2 \right] \quad (26)$$

در معادله فوق  $nb$  تعداد باس‌های دارای بار سیستم،  $P_{di}, Q_{di}$  مقدار توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی در شین  $i$ ام،  $P_{di}^*, Q_{di}^*$  مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو شین  $i$ ام بعد از بارزدایی هستند. در مدل فوق هدف مینیمم کردن مقدار بارزدایی با در نظر گرفتن شرایط بهره‌برداری از سیستم قدرت است.

قیود مسأله بهینه‌سازی فوق به صورت زیر بیان می‌شود. این قیود مربوط به شرایط بهره‌برداری از سیستم و بارزدایی

اندیس حاشیه امنیت خطوط معیاری برای قابلیت اطمینان خطوط است. هرچه این اندیس برای یک خط بزرگتر باشد، قابلیت اطمینان آن خط بیشتر است. در مورد خطوط، دو اندیس حاشیه امنیت وجود دارد که شامل اندیس حاشیه امنیت توان ظاهری و اندیس حاشیه امنیت زاویه خطوط است.

#### ۲-۱-۳-۷- اندیس حاشیه امنیت توان ظاهری

اندیس حاشیه امنیت توان ظاهری خطوط با توجه به توان ظاهری عبوری از خط و حداکثر توان ظاهری که می‌تواند از خط عبور کند، تعیین می‌شود.

$$MI_{Sf,i} = 1 - \frac{Sf_i}{Sf_{i,max}} \quad (21)$$

در این رابطه،  $Sf_i$  توان ظاهری عبوری از خط  $i$ ام است و  $Sf_{i,max}$  حداکثر توان ظاهری خط است.

#### ۲-۱-۳-۸- اندیس حاشیه امنیت زاویه خط

اندیس حاشیه امنیت زاویه خطوط به اختلاف زاویه باس‌های متصل به خطوط بستگی دارد. از آنجا که زاویه ولتاژ باس‌ها در جهت انتقال توان اکتیو بسیار اهمیت دارد، لذا این اندیس دارای اهمیت زیادی است. هرچه این اندیس بزرگتر باشد، قابلیت اطمینان خط بیشتر است.

$$MI_{Line-ang,i} = 1 - \frac{L_{ai}}{L_{ai,max}} \quad (22)$$

در این رابطه،  $L_{ai}$  اختلاف زاویه باس‌های متصل به خط  $i$ ام و  $L_{ai,max}$  حداکثر اختلاف زاویه مجاز باس‌های متصل به خط  $i$ ام بوده که مربوط به شرایط انتقال توان ماکزیمم آن خط است.

#### ۲-۱-۳-۹- اندیس حاشیه امنیت کل خطوط

اندیس حاشیه امنیت کل خطوط سیستم برابر مجموع اندیس‌های حاشیه امنیت خطوط است.

است.

گرفته شده‌اند [۱۹].

معمولاً تلاش می‌شود ضریب توان بارها قبل و بعد از بارزدایی ثابت بماند [۱۵]. اگر  $\Delta P_i = P_{di} - P_{di}^*$  و  $\frac{\Delta Q_i}{\Delta P_i} = \tan \varphi_i$  باشد، آنگاه  $\Delta Q_i = Q_{di} - Q_{di}^*$  خواهد بود. بنابراین، قید ثابت بودن ضریب توان به صورت زیر خواهد بود:

$$\tan \varphi_i = \frac{Q_i}{P_i} = \frac{\Delta Q_i}{\Delta P_i} \quad (۳۳)$$

در شرایط بهره‌برداری حالت ماندگار فرکانس سیستم در سیستم قدرت ۶۰ هرتز باید در بازه مجاز زیر بهره‌برداری شود [۲۰]:

$$59.7 \text{ Hz} \leq f \leq 60.3 \text{ Hz}, \text{ For } 60 \text{ Hz Power System} \quad (۳۴)$$

نحوه محاسبه فرکانس در ادامه در بخش ۲-۳ بیان خواهد شد.

## ۲-۳- تخمین نرخ کاهش فرکانس و رفتار

### فرکانسی سیستم در روش پیشنهادی

در هر سیستم قدرت، اینرسی کل موجود در شبکه، نقش بسیار اساسی در میزان کاهش فرکانس سیستم دارد. هر چه این مقدار بیشتر باشد، افت فرکانسی سیستم و نرخ کاهش  $df/dt$  کمتر خواهد بود. برای محاسبه دامنه اغتشاش در سیستم قدرت و تعیین  $df/dt$  از الگوریتم تطبیقی ارائه شده در مرجع [۹] استفاده شده است. در این الگوریتم از مفهوم فرکانس مرکزی معادل (EIC)<sup>۱۳</sup> که با  $fc$  نشان داده می‌شود، استفاده می‌شود. در این روش فرکانس ژنراتور  $i$  ام ( $f_i$ ) و نرخ کاهش آن ( $df_i/dt$ ) اندازه‌گیری شده و برای محاسبه مقدار بارزدایی لازم، به مرکز کنترل SCADA یا WAMS ارسال می‌شود. در این حالت، میزان دامنه اغتشاش در شبکه بر اساس رابطه (۳۵) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \Delta P_i = \sum_{i=1}^N P_{mi} - P_{ei} = \frac{2 \sum_{i=1}^N H_i d \left( \sum_{i=1}^N H_i f_i \right) / \left( \sum_{i=1}^N H_i \right)}{f_n} = \xi \frac{df_c}{dt} \quad (۳۵)$$

که  $P_{ei}$  و  $P_{mi}$  توان مکانیکی توربین و توان الکتریکی

S.t.

$$P_{gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (۲۷)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0$$

معادلات فوق معادلات پخش بار سیستم هستند.

$P_{gi}, Q_{gi}$  توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی در شین  $i$  ام هستند.

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad (۲۸)$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max}$$

قیود فوق مربوط به حدود بهره‌برداری توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتورهاست.

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (۲۹)$$

نامعادله (۲۹) بیانگر محدوده مجاز بهره‌برداری ولتاژ شینه‌هاست.

$$tap_{i \min} \leq tap_i \leq tap_{i \max} \quad (۳۰)$$

شرایط فوق محدوده مجاز تپ چنجرهای سیستم قدرت را بیان می‌کند.

قیود بهره‌برداری بارها و مدل آنها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{Li \min} \leq P_{di} \leq P_{Li \max} \quad (۳۱)$$

$$Q_{Li \min} \leq Q_{di} \leq Q_{Li \max}$$

که  $P_{di}, Q_{di}$  به صورت زیر هستند:

$$P_{di} = P_{di}^* \left[ \alpha_1 + \alpha_2 \left[ \frac{V_i}{V_i^*} \right]^{N_1} + \alpha_3 \left[ \frac{V_i}{V_i^*} \right]^{N_2} \right] \quad (۳۲)$$

$$Q_{di} = Q_{di}^* \left[ \alpha_4 + \alpha_5 \left[ \frac{V_i}{V_i^*} \right]^{N_3} + \alpha_6 \left[ \frac{V_i}{V_i^*} \right]^{N_4} \right]$$

در معادله فوق  $N_i$  و  $\alpha_i$  مقادیر ثابتی هستند. در این مطالعه  $N_i = 1$  و

$\alpha_1 = \alpha_4 = 0.3, \alpha_2 = \alpha_5 = 0.25, \alpha_3 = \alpha_6 = 0.45$  در نظر

فرکانس  $df_c/dt$  بر اساس رابطه (۳۶) محاسبه می‌شود. همچنین، مقدار  $f_{min}$  با استفاده از روابط (۳۷) و (۳۸) قابل محاسبه است.

مسئله بهینه‌سازی بارزدایی معادله (۲۶) با در نظر گرفتن قیود یاد شده یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده در مقیاس وسیع است. خصوصاً اگر ابعاد سیستم قدرت تحت مطالعه بزرگ باشد، این مسئله بهینه‌سازی با استفاده از روش بهینه‌سازی هوشمند CPCE حل می‌شود. این روش که در ادامه جزئیات آن بیان می‌شود، دارای توانایی جستجوی محلی بالایی در مسائل با ابعاد وسیع نسبت به سایر روش‌های هوشمند بوده و قادر است مقادیر بهینه فراگیر مسئله را با سرعت بالایی تعیین کند [۲۱].

در این مطالعه، در شبکه ۱۱۸ باس IEEE همه باس‌های دارای بار، دارای اولویت یکسانی برای حذف بار هستند.

برای حل و بررسی هر سناریوی اغتشاش باید مسئله بهینه‌سازی بارزدایی با استفاده از روش CPCE حل شود. با تشکیل پایگاه داده مطالعات آفلاین اغتشاشات، شبکه عصبی به صورت آفلاین آموزش داده می‌شود و روند آموزش آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود.

حال شبکه عصبی آموزش دیده می‌تواند به صورت بلادرنگ بر اساس اطلاعات حاصل از سیستم پایش استفاده شود. با وقوع اغتشاش مطابق شکل (۲)، کلیه اطلاعات لازم برای محاسبات توسط سیستم پایش به مرکز SCADA و یا WAMS ارسال می‌شود و مقادیر پارامترهای ورودی شبکه عصبی محاسبه می‌شود. با اعمال این اطلاعات به شبکه عصبی، شبکه عصبی قادر است مقدار بارزدایی لازم در هر حله را به صورت بلادرنگ تعیین کند. باید توجه داشت که کاهش نرخ فرکانس معادل مرکزی  $(df_c/dt)$  در صورت وجود رزرو گردشی در شبکه محدود می‌شود. مقدار بارزدایی با توجه به دامنه اغتشاش و میزان رزرو موجود در شبکه تعیین می‌شود. بدین منظور، مقدار تخمین دامنه اغتشاش با توجه به میزان رزرو، ملاک تعیین عدم تعادل بار

ژنراتور  $i$  ام بر حسب پریونیت است.  $f_c$  و  $f_i$  در معادله

$$(35) \quad f_c = \frac{\sum_{i=1}^N H_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^N H_i}$$

$$\text{و } \xi = \frac{2}{f_n} \cdot \sum_{i=1}^N H_i \text{ محاسبه می‌شوند.}$$

در روابط فوق  $H_i$  ثابت اینرسی ماشین  $i$  ام بر حسب ثانیه،  $f_n$  فرکانس نامی سیستم بر حسب Hz،  $\Delta P$  دامنه اغتشاش بر حسب پریونیت،  $\Delta P_i$  میزان عدم تعادل بار و تولید در ژنراتور  $i$  ام بر حسب پریونیت،  $f_i$  فرکانس ژنراتور  $i$  ام و  $N$  تعداد ژنراتورهای سیستم قدرت است. بنابراین مقدار نرخ کاهش EIC  $(df_c/dt)$  بر حسب Hz/Sec به صورت زیر به دست می‌آید:

$$(36) \quad \frac{df_c}{dt} = - \frac{f_n}{2 \sum_{i=1}^N H_i} \cdot \Delta P$$

فرکانس مینیمم سیستم بلافاصله پس از بروز اغتشاش در سیستم قدرت با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$(37) \quad \begin{cases} \Delta f^{PU} = -R_{eq} \cdot \Delta P \\ f_{min}^{PU} = 1 - \Delta f^{PU} \\ f_{min}^{actual} = f_{min} = (1 - \Delta f^{PU}) * f_{base} \end{cases}$$

$$(38) \quad R_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}}$$

در روابط فوق  $\Delta f^{PU}$  مقدار کاهش فرکانس بر حسب پریونیت،  $R_i (i=1,2,\dots,N)$  ثابت افت سرعت گاورنر توربین  $i$  ام بر حسب پریونیت،  $R_{eq}$  ضریب رگولاسیون معادل گاورنرهای سیستم قدرت،  $f_{min}^{PU}$  و  $f_{min}^{actual}$  به ترتیب حداقل فرکانس پریونیتی و واقعی سیستم ناشی از اغتشاش و  $f_{base}$  فرکانس مبنای سیستم تحت مطالعه است.

در مطالعات آفلاین اغتشاشات، دامنه نرخ کاهش

دو فضا مبادله می‌شود. جزئیات روش CPCE به صورت زیر است.

### ۳-۱- ساختار و جزئیات الگوریتم CPCE

در این الگوریتم از  $N$  ذره برای جستجو در فضای  $D$  بعدی مسأله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این ذرات به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شوند. این دو قسمت نیز با استفاده از معادله (۳۹) مجدداً به  $N_{11}$ ،  $N_{12}$ ،  $N_{21}$  و  $N_{22}$  ذره تقسیم می‌شوند.

$$\begin{cases} N = (N_{11} + N_{12}) + (N_{21} + N_{22}) \\ N_{11} + N_{12} = N_{21} + N_{22} \\ BR_1 = \frac{N_{11}}{N_{12}} \\ BR_2 = \frac{N_{21}}{N_{22}} \end{cases} \quad (39)$$

ذرات  $N_{11}$  و  $N_{21}$  به ترتیب برای جستجو در فضاهای باور ۱ ( $B_1$ ) و باور ۲ ( $B_2$ ) استفاده می‌شوند. همچنین، ذرات  $N_{12}$  و  $N_{22}$  برای جستجو در فضاهای جمعیتی ۱ ( $P_1$ ) و ۲ ( $P_2$ ) استفاده می‌شوند. نسبت‌های بین تعداد ذرات در زیر فضاهای  $B_1$ ،  $B_2$ ،  $P_1$  و  $P_2$  با استفاده از ضرایب  $BR_1$  و  $BR_2$  تعیین می‌شوند. این ضرایب عموماً در رنج  $0/5-0/4$  است. هر فضا شامل یک توده ذره  $^{21}$  است. برای به روزرسانی هر ذره در هر تکرار از معادلات (۴۰) و (۴۱) به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (40)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (41)$$

در معادله (۴۰) و (۴۱)  $v_{id}^k$  و  $x_{id}^k$  به ترتیب سرعت و مکان ذره  $i$ th،  $w$  ضریب وزنی اینرسی،  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب شتاب و  $r_1$  و  $r_2$  دو عدد تصادفی در بازه (۰ و ۱) است. همچنین  $p_{id}^k$  نشان دهنده موقعیت بهترین برانزنگی یافته

و تولید است. در کلیه محاسبات به علت وجود محدودیت‌های تولید، ۹۰ درصد مقدار رزرو در نظر گرفته شده است.

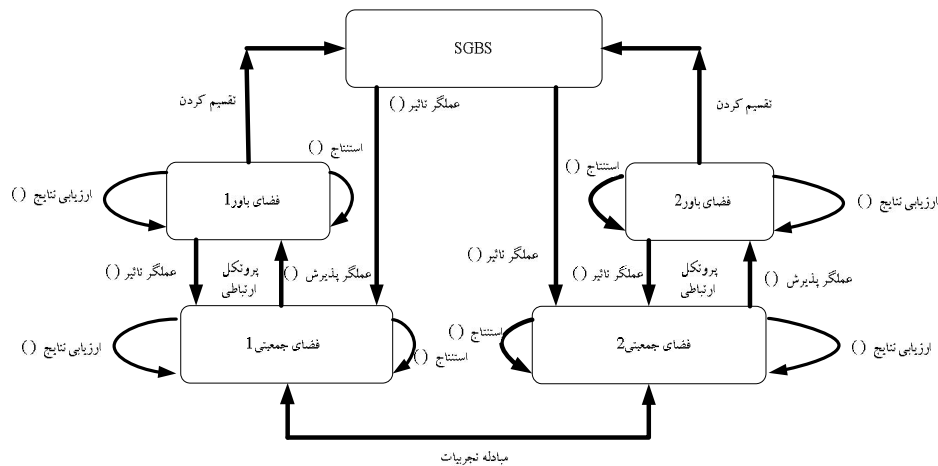
برای بهبود عملکرد شبکه عصبی، در صورت وقوع هر اغتشاش پس از تصمیم‌گیری در مورد بارزدایی و حفظ پایداری سیستم قدرت، اغتشاش مورد نظر با توجه به روند ارائه شده بررسی می‌شود و اطلاعات آن به پایگاه داده شبکه عصبی افزوده و آموزش شبکه عصبی به روز می‌شود.

### ۳- الگوریتم بهینه‌سازی هیبرید CPCE

الگوریتم CPCE یک الگوریتم بهینه‌سازی فرابتکاری<sup>۱۴</sup> هیبریدی است که در سال ۲۰۱۲ مبتنی بر ترکیب مزایای الگوریتم‌های بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)، الگوریتم فرهنگی (CA)<sup>۱۵</sup> و الگوریتم تکاملی (CEA)<sup>۱۶</sup> معرفی شده است [۲۱]. این الگوریتم با استفاده از مزایای ترکیبی روش‌های یاد شده قادر است به جواب‌های بهینه‌تری خصوصاً برای مسائلی که دارای ابعاد بزرگتری هستند، برسد [۲۱]. شکل (۴) ساختار اصلی این الگوریتم را نشان می‌دهد. در این ساختار یک مکانیزم تکاملی جدید بین دو الگوریتم فرهنگی ساخته می‌شود. سپس بهینه‌سازی‌های توده ذرات (PSO) در چهارچوب الگوریتم فرهنگی در دو زیر فضای (فضاهای باور<sup>۱۷</sup> ۱ و ۲) و (فضاهای جمعیتی<sup>۱۸</sup> ۱ و ۲) معرفی می‌شود.

یک مجموعه اختصاصی که فضای باور اشتراک فراگیر (SGBS)<sup>۱۹</sup> نامیده می‌شود، در مکانیزم تکاملی برای هماهنگی دانش و تجربه‌های جمعیتی استفاده می‌شود. در هر تکرار الگوریتم، همه ذرات زیر فضاهای باور ۱ و ۲ در SGBS گردآوری می‌شوند. سپس، بهترین ذره موجود در SGBS حفظ و بقیه ذرات توسط ذرات جدیدی با مقدار اولیه جدید جایگزین می‌شوند. در ادامه، عملگرهای تاثیر<sup>۲۰</sup> برای دو زیر فضای جمعیتی ۱ و ۲ در SGBS استفاده می‌شود. اکنون تجربیات دو فضای جمعیتی در هر نسل بین





شکل (۴): نمایش بلوکی الگوریتم CPCE

Neurosolution استفاده شده است.

#### ۴- سیستم قدرت ۱۱۸ باس IEEE

سیستم قدرت استاندارد ۱۱۸ باس IEEE به عنوان اولین سیستم تست در این مقاله انتخاب شده است. این سیستم دارای ۵۴ ژنراتور، ۱۸۶ خط انتقال، ۱۴ خازن و ۹ ترانس تپ چندردار است. دیاگرام تک خطی این سیستم در شکل (۶) نشان داده شده است.

با توجه به تغییرات فصول، مقدار پیک بار این سیستم در ساعت ۲۱ رخ داده و مقدار آن به ۷۳۰۹ MW می‌رسد [۲۲]. ماکزیم تولید توان اکتیو در ساعت ۲۱ در این سیستم برابر ۷۳۳۸ مگاوات است. ژنراتور G1 در شین شماره ۱ به عنوان ژنراتور مرجع است و  $S_{base} = 100 \text{ MVA}$  است. سایر اطلاعات لازم در مورد این سیستم در مرجع [۲۳] قابل دسترسی است. برای شبیه‌سازی دینامیکی سیستم مذکور از نرم‌افزار DigSILENT Power Factory 14.0.520 استفاده شده است. در این شبیه‌سازی خطوط با مدل  $\pi$  نامی، ژنراتورها با مدل مرتبه ۸ (مدل مرتبه ۶ الکتریکی و مدل مرتبه ۲ مکانیکی) [۲۴] مدل‌سازی می‌شود. برای مدل‌سازی سیستم‌های توربین و گاورنر از مدل استاندارد IEEE-G1 و برای مدل‌سازی سیستم تحریک ژنراتورها از مدل استاندارد IEEE-DC1A استفاده می‌شود. در مدل استاندارد IEEE-G1 بویلر، بازگر مکن‌ها، توربین و گاورنر مدل‌سازی می‌شوند [۲۴]. همچنین، برای مدل‌سازی بارها از مدل چند جمله‌ای رابطه (۳۲) استفاده می‌شود [۱۹].

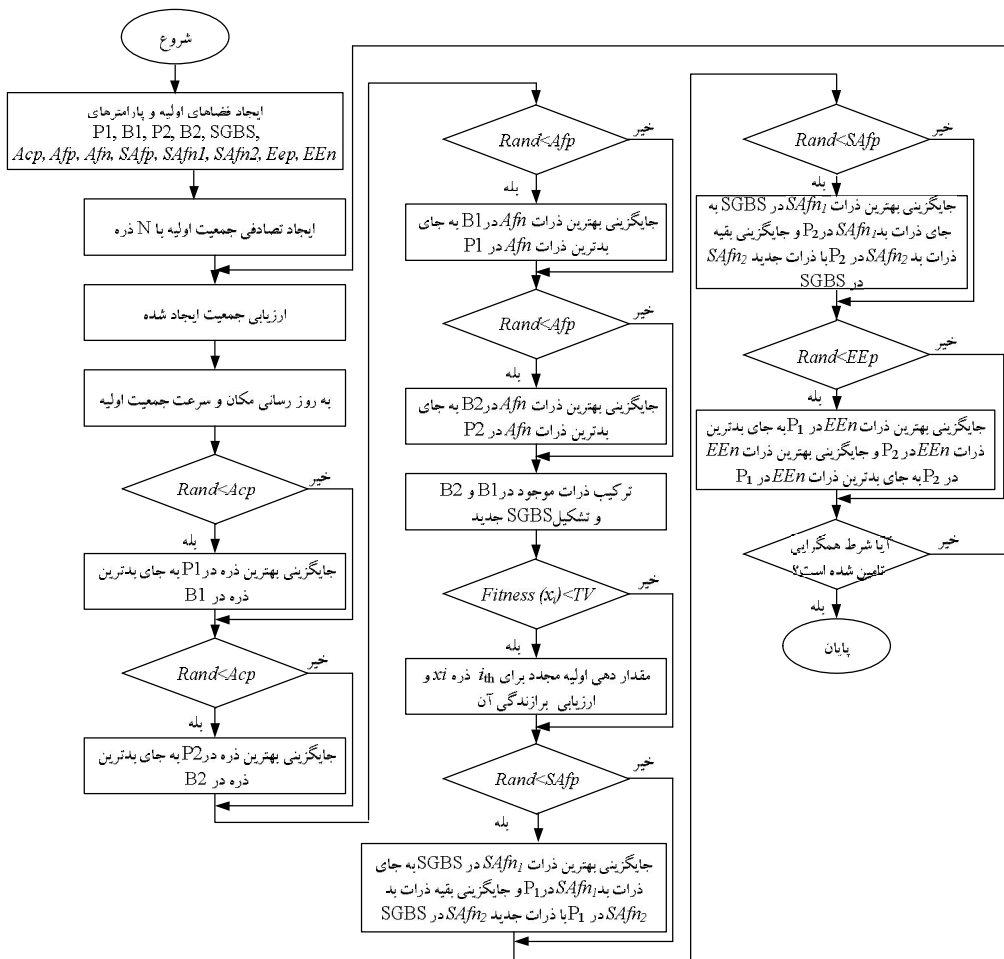
#### ۳-۲-۳- عملیات تاثیر از SGBS بر P1 و P2

عملیات تاثیر از SGBS بر  $P_1$  و  $P_2$  در هر نسل بر اساس مقدار احتمال  $Safp$  انجام می‌شود. فرض کنید  $Safn_1$  و  $Safn_2$  مقادیر میانگین برای دو عدد صحیح غیر منفی باشند. برای SGBS و  $P_1$  ( $P_2$ ) اگر  $rand \leq Safp$ ، ذرات بد  $Safn_1$  در  $P_1$  ( $P_2$ ) با بهترین ذرات  $Safn_1$  در SGBS جایگزین می‌شوند. همچنین، بقیه ذرات بد  $Safn_2$  در  $P_1$  ( $P_2$ ) با ذرات جدید  $Safn_2$  در SGBS جایگزین می‌شوند.

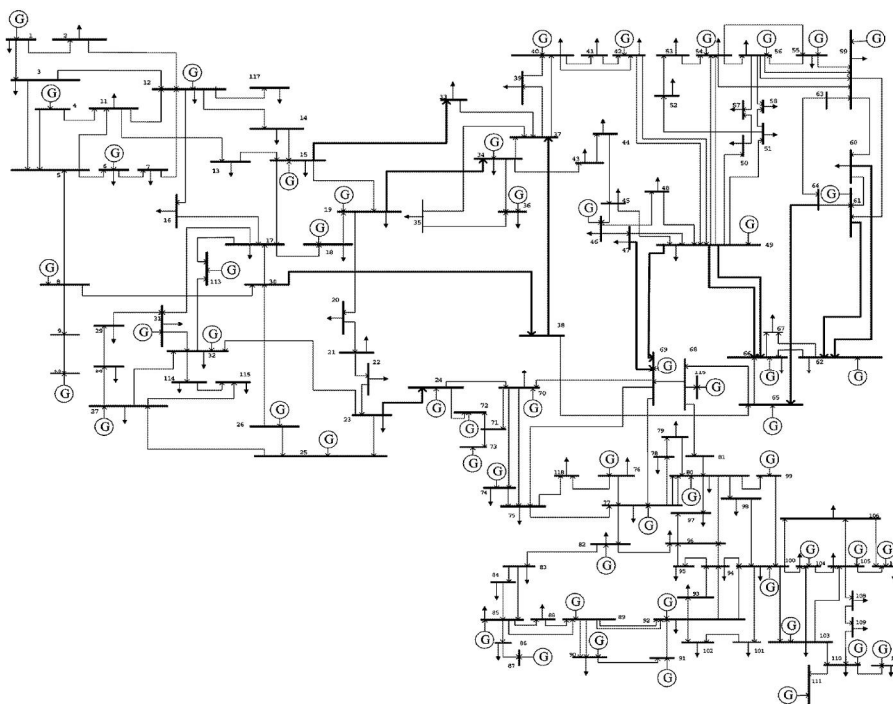
#### ۳-۳-۲-۳- عملیات مبادله تجربیات بین P1 و P2

بعد از عملیات تاثیر از SGBS بر  $P_1$  و  $P_2$ ، تجربیات بین  $P_1$  و  $P_2$  در هر نسل مبادله می‌شود. فرض کنید که احتمال انجام عملیات مبادله تجربیات  $Eep$  باشد. همچنین  $EEn$  تعداد ذراتی هستند که به این عملیات می‌پیوندند. حال برای  $P_1$  و  $P_2$ ، اگر  $rand \leq Eep$ ، بدترین ذرات  $EEn$  در  $P_1$  ( $P_2$ ) با بهترین ذرات  $EEn$  در  $P_2$  ( $P_1$ ) جایگزین می‌شوند. این مکانیزم تکاملی دو جمعیت الگوریتم فرهنگی را با هم مرتبط می‌سازد. اطلاعات مفید و تجربیات بین ذرات موجود برای راهنمایی سایر ذرات جهت رسیدن به حل بهینه بهتر مبادله می‌شود. بدین منظور، ذرات تصادفی جدیدی نیز در جمعیت قرار داده می‌شوند. روند نمای روش بهینه‌سازی CPCE در شکل (۵) نشان داده شده است.

در این مقاله، برای مطالعات آفلاین از نرم‌افزار DigSILENT Power Factory 14.0.520 و MATLAB و برای کلیه مطالعات شبکه عصبی از نرم‌افزار



شکل (۵): روند نمای روش بهینه‌سازی CPCE



شکل (۶): دیاگرام تک خطی سیستم قدرت ۱۱۸ باسه IEEE



بدین منظور، چندین سناریوی تنظیم سیستم بارزدایی برای شبکه ۱۱۸ باس IEEE در نرم‌افزار DigSILENT بررسی شده است. بر اساس این مطالعات، سناریوی پنج مرحله‌ای ارائه شده در جدول (۲) بهترین نتایج را برای حفظ پایداری سیستم ایجاد کرده است.

جدول (۲): تنظیمات پارامترهای بارزدایی پیشنهادی

تاخیر رله (Sec)	فرکانس عملکرد (HZ)	مرحله بارزدایی
۰/۲	۵۹/۲	۱
۰/۲	۵۹	۲
۰/۲	۵۸/۸	۳
۰/۲	۵۸/۴	۴
۰/۲	۵۸	۵

شایان ذکر است که مقدار کل حذف بار لازم برای هر سناریو توسط حل مسئله بهینه‌سازی (۲۶) به دست می‌آید. سپس در صورت فعال شده هر پنج مرحله بارزدایی، ۱۲/۵، ۱۲/۵، ۳۱/۲۵، ۳۱/۲۵ درصد از این مقدار بارزدایی در هر پله بارزدایی حذف می‌شود. در مطالعات تشکیل پایگاه داده، ممکن است شدت اغتشاش به گونه‌ای باشد که یک یا چند پله بارزدایی را فعال کند. در این حالت، اگر بعد از حذف بار در مراحل فعال شده، هنوز به بارزدایی نیاز باشد و با توجه به شدت اغتشاش، فرکانس آستانه بارزدایی بعدی رله فعال نشود، مقدار بار باقیمانده در پله بارزدایی فعال شده قبلی حذف خواهد شد.

#### ۵-۱-۱-۵- مشخصات شبکه عصبی مورد استفاده

#### ۵-۱-۱-۵- ایجاد پایگاه داده

برای ایجاد پایگاه داده لازم، بر اساس روش ارائه شده، ۲۸۸ سناریوی اغتشاش شامل خروج ترکیبی خطوط و ژنراتورها با معیار  $N-K$  برای  $(K=1, 2, 3)$  بررسی شده‌اند. پروفیل بارگذاری ساعتی سیستم ۱۱۸ باس IEEE در شکل (۷) نشان داده شده است. اغتشاشات مورد بررسی، ۹ سناریوی بارگذاری ساعتی از شکل (۷) شامل ساعت‌های ۱۵-۲۳ که سیستم دارای بار بیشتری است را پوشش می‌دهد. با تعیین مقدار بارزدایی در هر سناریو مطابق روش

#### ۵- پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای شبکه

#### ۱۱۸ باس IEEE

در این مقاله برای سنجش نحوه عملکرد روش پیشنهادی برای تعیین سطح امنیت و بارزدایی از شبکه تست ۱۱۸ باس IEEE استفاده می‌شود. در صورت بروز هرگونه اغتشاش و نیاز به بارزدایی، با توجه به اینکه در ۹۰ باس از ۱۱۸ باس شبکه ۱۱۸ باس IEEE بار وجود دارد، ۱۸۰ متغیر برای مسئله بهینه‌سازی معادله (۲۶) وجود دارد که شامل توان‌های اکتیو و راکتیو در باس‌های دارای بار است. با در نظر گرفتن شرط ثابت بودن ضریب توان در معادله (۳۳) و در دسترس بودن مقادیر ضریب توان، می‌توان کلیه توان‌های راکتیو باس  $i$  ام را بر حسب توان‌های اکتیو همان باس و ضریب توان نوشت. بنابراین، مسئله بهینه‌سازی معادله (۲۶) عملاً ۹۰ متغیر دارد که همان توان‌های اکتیو باس‌های دارای بار است. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم CPCE حالت‌های تنظیم مختلفی در نظر و شبیه‌سازی شده است. بهترین تنظیمات پارامترهای مورد استفاده برای حل مسئله بهینه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است.

#### جدول (۱): تنظیمات پارامترهای الگوریتم PSO و CPCE

#### الف: پارامترهای الگوریتم CPCE

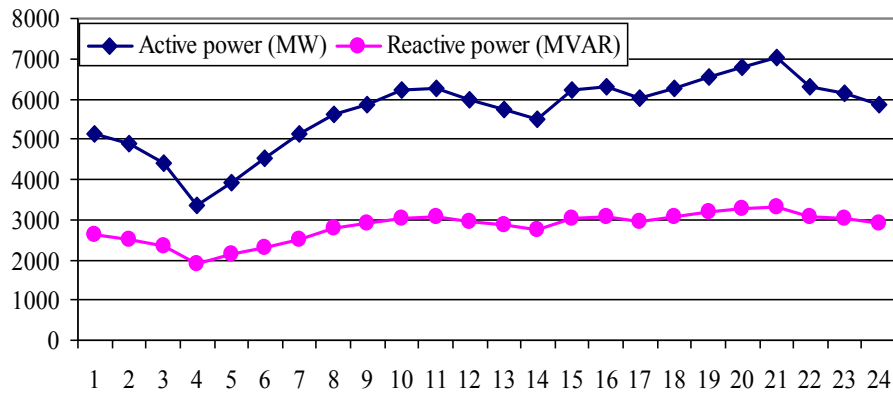
سایز جمعیت اولیه	$P_1$	$B_1$	$P_2$	$B_2$	$Af_p$	$Af_n$
۸۰	۲۰	۱۰	۲۰	۱۰	۰/۴	۳
Acp	SAf <sub>p</sub>	SAf <sub>n1</sub>	SAf <sub>n2</sub>	EE <sub>p</sub>	EE <sub>n</sub>	-
۰/۴	۰/۱	۱	۱	۰/۱	۱	-

#### ب: پارامترهای الگوریتم PSO

سایز جمعیت اولیه	c1	c2	c	w
۸۰	۲	۳	۱	کاهش خطی از ۰/۹ تا ۰/۴

برای انتخاب و تنظیم پارامترهای سیستم بارزدایی مانند تعداد مراحل بارزدایی، فرکانس‌های بارزدایی و مقدار تاخیر در هر مرحله، روند کاملاً شناخته شده‌ای وجود ندارد. برای تنظیم پارامترهای سیستم بارزدایی فرکانسی لازم است شبکه تحت مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی زمانی بررسی شود.

پیشنهادی اطلاعات ورودی و خروجی پایگاه داده برای هر سناریوی اغتشاش به‌دست می‌آید.



شکل (۷): پروفیل بار ساعتی شبکه ۱۱۸ باس IEEE در یک روز

جدول (۳): مشخصات پارامترهای مورد استفاده در آموزش

ژنتیکی شبکه عصبی در سناریوی بارزدایی پیشنهادی برای

شبکه ۱۱۸ باس IEEE

حداکثر تعداد تکرارها (Epoch)	۱۰۰۰
اندازه جمعیت اولیه شبکه‌های عصبی	۶
ماکزیمم تکرار جمعیت مورد استفاده	۱۰۰
اپراتور انتخاب	چرخ رولت
اپراتور Crossover	ابتکاری <sup>۳۳</sup>
احتمال Crossover	۰/۷
اپراتور جهش	یکنواخت <sup>۲۵</sup>
احتمال جهش	۰/۰۱

جدول (۴) نتایج مقدار متوسط و نهایی برازندگی ایجاد شده در آموزش ژنتیکی شبکه عصبی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، در تکرار ۲۸ شرایط آستانه خطای تنظیم شده تامین شده و شبکه عصبی همگرا می‌شود. زمان لازم برای آموزش شبکه عصبی ۲۶۴ ثانیه بوده است.

جدول (۴): مقادیر متوسط و نهایی آموزش ژنتیکی شبکه

عصبی

عصبی	متوسط برازندگی	بهترین برازندگی	خلاصه بهینه‌سازی
	۲۸	۲۸	تکرار
	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۸۲	حداقل MSE
	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۸۲	نهایی MSE

### ۵-۱-۲- آموزش شبکه عصبی

با توجه به روش پیشنهادی ارائه شده و شکل (۱)، شبکه عصبی دارای چهار ورودی و ده خروجی است. برای رسیدن به آموزش دلخواه برای شبکه عصبی، شبکه‌های عصبی متعددی آموزش داده شده‌اند.

بهترین شبکه عصبی دارای دو لایه مخفی است. در این ساختار ۹۰ درصد اطلاعات پایگاه داده برای آموزش، ۵ درصد برای Cross Validation و ۵ درصد برای تست شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند. مدل شبکه عصبی مورد استفاده پیشرو توسعه‌یافته<sup>۳۳</sup> و الگوریتم آموزش شبکه ELM است. از تابع تبدیل تانژانت هیپربولیک برای نرون‌های لایه‌های میانی و خروجی استفاده شده است. در این ساختار، حداکثر تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ تکرار و آستانه خطا برای همگرایی آموزش شبکه عصبی ۰/۰۰۱ است. برای به روز کردن مقدار خطا از روش batch استفاده شده است. روند آموزش شبکه عصبی با تنظیمات ساختاری فوق، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطابق با اصول بیان شده در مرجع [۱۱] بهینه شده است. مشخصات پارامترهای آموزش ژنتیکی مورد استفاده در جدول (۳) نشان داده شده است.

## ۵-۱-۳- نتایج شبیه‌سازی

برای شبکه ۱۱۸ باس IEEE با توجه به دامنه اغتشاشات، آستانه‌های جدول (۵) برای شاخص‌های کمی مورد بررسی جهت تشخیص امنیت سیستم در نظر گرفته شده است. این مقادیر بر اساس مرجع [۲۵] و شناخت ایجاد شده بر اساس آنالیز اغتشاشات (N-K (K=1, 2, 3) از سیستم ۱۱۸ باس IEEE به دست آمده است. شایان ذکر است که شاخص‌های تغییرات ولتاژ و بارگذاری خطوط که در مرجع [۲۵] استفاده شده‌اند، شاخص‌هایی استاندارد و کلی بوده، برای هر سیستم قدرتی قابل استفاده‌اند، ولی شاخص‌های دیگر وابسته به سیستم تحت مطالعه‌اند. در این مقاله برای سیستم ۱۱۸ باس IEEE علاوه بر شاخص‌های تغییرات بارگذاری خطوط و تغییرات ولتاژ، از تغییرات SMI، SVI فرکانس مینیمم و  $dfc/dt$  نیز استفاده شده است. در همه موارد، آستانه ملاک‌های فوق با توجه به رفتار سیستم و تغییر پارامترهایی نظیر درصد افت ولتاژ و اضافه بار خطوط تنظیم شده است.

در ادامه، شبکه عصبی آموزش دیده برای عملکرد بلادرنگ بر روی شبکه ۱۱۸ باس IEEE برای پنج سناریوی اغتشاش مختلف در بارگذاری‌های مختلف که در جدول (۶) نشان داده شده است، تست می‌شود.

سناریوهای مورد بررسی مربوط به ساعت‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ است که سیستم بیشترین بارگذاری خود را دارد. بدین منظور، اطلاعات ورودی این اغتشاشات تعیین و وضعیت امنیت شبکه مشخص می‌شود. سپس این اطلاعات مطابق شکل (۲) به شبکه عصبی آموزش دیده اعمال می‌شود. نتایج بارزدایی لازم برای هر حالت در جداول (۷) و (۸) ارائه و نتایج روش پیشنهادی با روش مرجع [۴] مقایسه شده است. در این جداول مقادیر توان اکتیو و راکتیو به ترتیب بر حسب MW و MVAR است.

نتایج جدول (۸) نشان می‌دهد که در چهار سناریو از پنج سناریوی مورد بررسی، با حفظ محدودیت‌های

بهره‌برداری شبکه، مقدار بارزدایی در روش پیشنهادی نسبت به روش مرجع [۴] کاهش داشته است. این میزان کاهش بارزدایی برای سناریوهای ۱ و ۵ قابل توجه است. شایان ذکر است که هیچ گونه اطلاعاتی برای چهار سناریوی مورد بررسی ۲-۵ در پایگاه داده شبکه عصبی آموزش دیده وجود نداشته است. در عین حال، نتایج به دست آمده نشان از عملکرد صحیح و بهینه روش پیشنهادی دارد و نشان می‌دهد روش پیشنهادی در صورت در نظر گرفتن طیف قابل قبولی از سناریوهای اغتشاش محتمل و آموزش مناسب، قابلیت تطبیق با شرایط جدید را دارد.

میزان تغییرات اندیس‌های آسیب‌پذیری و حاشیه امنیت کل سیستم و وضعیت امنیت سیستم در هر سناریو در جدول (۹) نشان داده شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که کلیه اغتشاشات تست شده باعث ایجاد شرایط ناامن در سیستم می‌شود. در اغتشاشات ۲ و ۳، علی‌رغم شدت بالای اغتشاش، به علت وجود ظرفیت رزرو مناسب در سیستم، شبکه در شرایط هشدار به سر می‌برد. این در حالی است که در سناریوی ۴، با آنکه شدت اغتشاش کمتر از سناریوهای ۲ و ۳ بوده است، به علت عدم رزرو گردشی کافی در سیستم قدرت، سیستم شرایط فوق بحرانی را تجربه می‌کند. این نکته اهمیت سطح مناسب رزرو گردشی را هم در مورد امنیت شبکه و هم در مورد تغییرات شدید بارزدایی نشان می‌دهد.

نتایج به دست آمده برای روش پیشنهادی بعد از بارزدایی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است امنیت سیستم را مجدداً برقرار کند و از آسیب‌پذیری آن بکاهد. بدیهی است که در روش مرجع [۴] به علت حذف بار بیشتر اندیس‌های آسیب‌پذیری و حاشیه امنیت بهبود بیشتری داشته‌اند. در عوض، افزایش نارضایتی مشترکان به علت افزایش بارزدایی در این حالت را خواهیم داشت. این در حالی است که روش پیشنهادی ضمن تامین قیود بهره‌برداری، بارزدایی بهینه‌تر و عدم نارضایتی مشترکین

۱۰۰ یک روش جدید بارزدایی فرکانسی بهینه بلادرنگ با استفاده از شاخص‌های سطح امنیت سیستم قدرت و شبکه‌های عصبی مصنوعی

مگابایت، حدود ۶ ثانیه بوده است. واضح است که در مراکز دیسپاچینگ با توجه به استفاده از کامپیوترهای قدرتمند و سریع، این زمان باز هم کاهش می‌یابد. این نکته نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است وضعیت امنیت سیستم و مقدار بارزدایی لازم برای حفظ پایداری را به صورت بلادرنگ مشخص کند. در ادامه، برای نشان دادن مؤثر بودن روش پیشنهادی، به شبیه‌سازی زمانی سناریوی ۵ برای بررسی رفتار دینامیکی سیستم می‌پردازیم. برای شبیه‌سازی زمانی سیستم فرض می‌شود خطا در ثانیه ۱۰ رخ می‌دهد و زمان شبیه‌سازی ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

کمتری داشته است. همچنین، میزان تفاوت اندیس‌های حاشیه امنیت و آسیب‌پذیری در روش پیشنهادی نسبت به مرجع [۴] خیلی قابل توجه نیست. در کنار همه این موارد در مرجع [۴] صرفاً کل بارزدایی لازم به دست می‌آید، ولی در روش پیشنهادی بار حذفی اکتیو و راکتیو لازم در هر پله بارزدایی برای هر سناریوی اغتشاش به صورت همزمان به دست می‌آید. زمان لازم برای تعیین وضعیت امنیت و مقدار بارزدایی در هر سناریو پس از دریافت اطلاعات اغتشاش، با استفاده از یک کامپیوتر شخصی پنتیوم IV با مشخصات CPU ۱/۵۷ گیگا هرتز و RAM برابر با ۲

جدول (۵): بررسی حالت‌های سطح امنیت سیستم با توجه به شاخص‌های کمی برای سیستم ۱۱۸ باس IEEE

وضعیت سیستم قدرت	اندیس‌های تشخیص سطح امنیت				درصد اضافه بار خطوط	درصد افت ولتاژ	سطح امنیت
	SVI	SMI	dfc/dt	fcmin			
امن	... < ۱۲۵	.. > ۴۵۹	... < ۰/۶	.. > ۵۹/۵	... < ۱۰۰	... < ۴/۵	حالت نرمال
ناامن	.. > ۱۲۵	... < ۴۵۹	.. > ۰/۶	... < ۵۹/۵	۱۰۰-۱۵۰	۴/۵ < ... < ۶	حالت هشدار
					۱۵۰-۲۰۰	۶ < ... < ۷/۵	حالت بحرانی
					... > ۲۰۰	... > ۷/۵	حالت فوق بحرانی

جدول (۶): نتایج سناریوهای اغتشاش مورد بررسی در بارگذاری‌های مختلف برای شبکه ۱۱۸ باس IEEE

ردیف	ساعت	شرح خطا: خروج واحدها و خطوط	توان تولیدی خارج شده از شبکه (MW)	کل تولید P <sub>G</sub> (MW)	کل بار P <sub>L</sub> (MW)	مقدار رزرو (MW)	dfc/dt (Hz/sec)	f min (Hz)
۱	۲۰ ساعت	خروج G39 و G36	۶۰۰	۶۹۹۵/۴۶۴۸	۶۷۹۹/۲۵۷۲	۲۷۶/۵۴	-۱/۲۶	۵۸/۸۸
۲	۱۹ ساعت	خروج G40 و G29 و G11	۸۵۰	۶۷۵۳/۳۵۲	۶۵۶۰/۵۱۵۲	۵۱۸/۶۵	-۱/۷۸	۵۸/۴۲
۳	۲۰ ساعت	خروج G29 و G28	۷۲۰	۶۹۹۵/۴۶۴۸	۶۷۹۹/۲۵۷۲	۲۷۶/۵۴	-۱/۵۱	۵۸/۶۶
۴	۲۱ ساعت	خروج BR104 و BR97 و G28	۴۲۰	۷۲۰۲/۰۷	۶۹۴۰/۴۸	۷۰	-۱/۲۳	۵۹/۰۴۵
۵	۲۱ ساعت	خروج G11 و G28	۷۷۰	۷۲۰۲/۰۷	۶۹۴۰/۴۸	۷۰	-۱/۶۲	۵۸/۴۷

جدول (۷): نتایج بارزدایی روش‌های مرجع [۴] و پیشنهادی برای سناریوهای اغتشاش جدول (۶)

شماره سناریو	روش بارزدایی	مرحله ۱		مرحله ۲		مرحله ۳		مرحله ۴		مرحله ۵	
		P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
۱	مرجع [۴]	۱۳۶	۵۳	۱۳۹/۱۴	۵۴/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	پیشنهادی	۱۲۲/۳۶	۴۲/۹	۱۰۴/۳۳	۴۷/۷۷	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱
۲	مرجع [۴]	۱۳۱/۲	۵۷/۷	۱۲۵/۵۲	۵۵/۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	پیشنهادی	۱۲۲/۶۹	۵۱/۱۲	۱۰۹/۵۳	۴۸/۷۳	۰/۰۱	۰	-۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۲
۳	مرجع [۴]	۱۳۶	۵۱/۷	۱۳۳/۲۶	۵۰/۶۲	۱۳۰/۹۸	۴۹/۷۸	۰	۰	۰	۰
	پیشنهادی	۱۳۷/۲۲	۵۷/۱۴	۱۳۴/۱۸	۵۵/۸۹	۱۳۳/۳۲	۵۶/۹۵	-۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۵
۴	مرجع [۴]	۱۳۸/۸	۵۵/۶	۱۳۶	۵۴/۴	۸۸/۶	۳۵/۶۲	۰	۰	۰	۰
	پیشنهادی	۱۳۳/۲۲	۵۳/۷	۱۲۶/۹۵	۵۱/۶۶	۸۳/۷۷	۳۲/۵۷	۰/۰۸	۰/۰۳	-۰/۰۲	۰
۵	مرجع [۴]	۱۳۹/۴	۵۹/۲۲	۱۳۶/۶۲	۵۵/۷۴	۴۰۰/۶۸	۱۵۲/۴۸	۰	۰	۰	۰
	پیشنهادی	۱۲۸/۲	۵۲/۵۶	۱۳۰/۱۴	۵۴	۳۸۳/۸۹	۱۴۷/۲۶	۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۱

جدول (۸): نتایج بارزدایی روش‌های مرجع [۴] و پیشنهادی برای سناریوهای اغتشاش جدول (۶)

شماره سناریو	کل مقدار بارزدایی				فرکانس حالت ماندگار بعد از بارزدایی (Hz)		تغییرات بارزدایی	
	روش مرجع [۴]		روش پیشنهادی		روش مرجع [۴]	روش پیشنهادی	$\Delta P_{L.S.}$	$\Delta Q_{L.S.}$
	P	Q	P	Q				
۱	۲۷۵/۱۴	۱۰۷/۳۰	۲۲۶/۶۹	۹۰/۶۷	۵۹/۹۱	۵۹/۸۲	-۴۸/۴۵	-۱۶/۶۳
۲	۲۵۶/۷۲	۱۱۲/۹۶	۲۳۲/۲۲	۹۹/۸۵	۵۹/۸۶۱	۵۹/۸۱۵	-۲۴/۵	-۱۳/۱۱
۳	۴۰۰/۲۴	۱۵۲/۱	۴۰۴/۷۲	۱۶۹/۹۸	۵۹/۹۲	۵۹/۹۲۸	+۴/۴۸	+۱۷/۸۸
۴	۳۶۳/۴	۱۴۵/۶۲	۳۴۳/۹۴	۱۳۷/۹۳	۵۹/۸۳۷	۵۹/۸	-۱۹/۴۶	-۷/۶۹
۵	۶۷۶/۷	۲۶۷/۴۴	۶۴۲/۲۳	۲۵۳/۸۲	۵۹/۹۰۷	۵۹/۸۴۳	-۳۴/۴۷	-۱۳/۶۲

توجه: علامت (-) در  $\Delta P_{L.S.}$  و  $\Delta Q_{L.S.}$  برای کاهش بارزدایی در روش پیشنهادی بوده است.

علامت (+) در  $\Delta P_{L.S.}$  و  $\Delta Q_{L.S.}$  برای افزایش بارزدایی در روش پیشنهادی بوده است.

جدول (۹): تغییرات SVI و SMI در شرایط مختلف برای سناریوهای تست شده جدول (۶)

A: روش مرجع [۴] - B: روش پیشنهادی

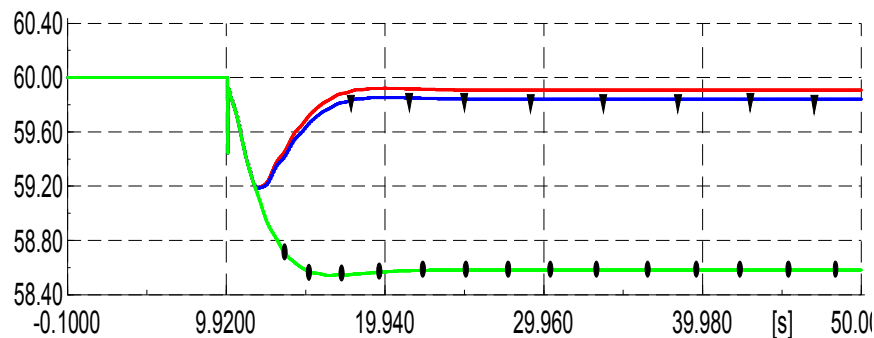
ردیف	شرایط نرمال				وضعیت سیستم	شرایط وقوع اغتشاش		شرایط سیستم بعد از بارزدایی	
	VI		MI			VI	MI	VI	MI
	B	A	B	A					
۱	۱۱۴/۹۲	۴۶۶/۱۴	۱۴۴/۸۶	۴۴۱/۴	نامن - فوق بحرانی	۱۳۱/۸۵	۴۵۲/۲۵	۱۲۴/۳۲	۴۵۰/۳۲
۲	۱۱۴/۹۲	۴۶۶/۱۴	۲۱۳/۰۵	۴۲۶/۵۹	نامن - هشدار	۱۳۱/۸۵	۴۵۲/۲۵	۱۱۷/۲۵	۴۵۹/۳۶
۳	۱۱۴/۹۲	۴۶۶/۱۴	۱۳۱/۸۵	۴۵۲/۲۵	نامن - هشدار	۱۳۱/۸۵	۴۵۲/۲۵	۱۱۵/۴۶	۴۶۴/۲
۴	۱۱۴/۹۲	۴۶۶/۱۴	۱۴۵/۳۹	۴۳۵/۹۲	نامن - فوق بحرانی	۱۳۱/۸۵	۴۵۲/۲۵	۱۱۷/۰۹	۴۵۷/۴۵
۵	۱۱۴/۹۲	۴۶۶/۱۴	۱۳۵/۴۳	۴۵۱/۵۹	نامن - بحرانی	۱۳۱/۸۵	۴۵۲/۲۵	۱۱۷/۵۵	۴۵۷/۴۷

#### ۵-۱-۴- شبیه‌سازی زمانی سناریو ۵، خروج

#### ژنراتورهای G11 و G29

در این سناریو، سیستم قدرت G28 با ۴۲۰ مگاوات و G11 با ۳۵۰ مگاوات تولید توان اکتیو را از دست می‌دهد. فرکانس سیستم برای حالت‌های مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. سیگنال فرکانس برای هر سه حالت مربوط به خط ۲۸-۶۶ در نزدیکی باس ۶۶ است. همان‌گونه که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، فرکانس حالت ماندگار سیستم برای روش مرجع [۴] و روش پیشنهادی به ترتیب برابر ۵۹/۹۰۷ و ۵۹/۸۴۳ هرتز است. مینیمم فرکانس سیستم در

صورت عدم بارزدایی به ۵۸/۴۷ هرتز می‌رسد. همان‌گونه که در جدول (۸) دیده می‌شود، کل مقدار بارزدایی برای روش مرجع [۴] و روش پیشنهادی به ترتیب برابر ۶۷۶/۷ مگاوات، ۲۶۷/۴۴ مگاوار و ۶۴۲/۲۳ مگاوات و ۲۵۳/۸۲ مگاوار بوده است. این نتایج نشان از کاهش ۳۴/۴۷ مگاواتی و ۱۳/۶۲ مگاوازی بارزدایی در روش پیشنهادی ضمن تامین قیود بهره‌برداری حالت ماندگار و دینامیکی نسبت به روش مرجع [۴] دارد.



شکل (۸): تغییرات فرکانس سیستم در سناریوهای مختلف بارزدایی در اغتشاش ۵ - بدون نشانگر: روش ارائه شده در مرجع [۴]، با نشانگر مثلث: روش پیشنهادی، با نشانگر دایره: بدون بارزدایی

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش بارزدایی فرکانسی بهینه بلادرنگ با استفاده از شاخص‌های سطح امنیت سیستم و شبکه‌های عصبی ارائه شد. روش مزبور یک روش سریع و بهینه بوده، دارای قابلیت تطبیق بالایی در شرایط بهره‌برداری مختلف سیستم قدرت است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه ۱۱۸ باس IEEE نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است ضمن تامین قیود امنیت، بهره‌برداری و دینامیکی شبکه، بارزدایی بهینه‌تری را نسبت به روش مرجع [۴] داشته باشد. این امر باعث کاهش هزینه‌های بارزدایی و نارضایتی مشتریان می‌شود. با توجه به سرعت بالای روش پیشنهادی، این روش قادر است مشکلات موجود در روش‌های بارزدایی سنتی را حل کند و پایداری سیستم قدرت را بهبود دهد.

#### مراجع:

- [1] Sigrist, L., Egado, I., Sánchez-Úbeda, E. F., Rouco, L., "Representative Operating and Contingency Scenarios for the Design of UFLS Schemes", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 2, pp. 913-906, 2010.
- [2] Anderson, P. M., Mirheydar, M., "An Adaptive Method for Setting Underfrequency Load Shedding Relays", IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, No. 2, pp. 145-151, 1992.
- [3] Hsu, C. T., Kang, M. S., Chen C. S., "Design of adaptive load shedding by artificial neural networks", IEE Proceeding of Generation, Transmission, Distribution, Vol. 152, No. 3, pp. 415-421, 2005.
- [4] Hooshmand, R., Moazzami, M., "Optimal Design of Adaptive Under Frequency Load Shedding Using Artificial Neural Networks

- 10-12 April 2006.
- [17] Mitchell, M. A., Lopes, J. A. P., Fidalgo, J. N., Mcalley, J. D., "Using a Neural Network to Predict the Dynamic Frequency Response of a Power System to an Under Frequency Load Shedding Scenario", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 346-351, 2000.
- [17] Thalassinakis, E. J., Dialynas, E. N., Agoris, D., "Method Combining Ann's and Monte Carlo Simulation for the Selection of the Load Shedding Protection Strategies in Autonomous Power System", IEEE Transaction on Power System, Vol. 21, No. 4, pp. 1574-1582, 2006.
- [18] Song, H., Kezunovic, M., "A new analysis method for early detection and prevention of cascading events", Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 8, pp. 1132-1142, 2007.
- [19] AL-Hasawi, W. M., Elnaggar, K. M., "Optimum Steady-State Load-shedding Scheme Using Genetic Based Algorithm", 11th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON, pp. 605-609, 2002.
- [20] North American Electrical Reliability Council. Frequency-ACE data analysis study: august 14, 2003 blackout investigation report, March 4, 2004, Online available at [http://www.nerc.com/docs/docs/blackout/FAIT\\_Blackout\\_Investigation.pdf](http://www.nerc.com/docs/docs/blackout/FAIT_Blackout_Investigation.pdf).
- [21] Khodabakhshian, A., Hemmati, R., Moazzami, M., "Multi-band power system stabilizer design by using CPCE algorithm for multi-machine power system", Electric Power Systems Research, Vol. 101, pp. 36-48, 2013.
- [22] Wang, J., Shahidehpour, M., Li, Z., "Security-Constrained Unit Commitment with Volatile Wind Power Generation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1319-1327, 2008.
- [23] [http://motor.ece.iit.edu/data/118bus\\_abreu.xls](http://motor.ece.iit.edu/data/118bus_abreu.xls).
- [24] User's Guide of DIgSILENT power factory 14.0.520 software, DIgSILENT Company, Germany.
- [25] Shanti Swarup, K., Britto Corthis, P., "ANN approach assesses system security", IEEE Computer Applications in power, pp. 32-38, 2002.
- In Isolated Power System", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 220-228, 2012.
- [5] Tomsic, T., Verbic, G. Gobina, F., "Revision of the Under Frequency Load - Shedding Scheme of the Slovenia Power System", Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 5-6, pp. 494-500, 2007.
- [6] Seyedi, H., Sanaye-Pasand, M., "Design of New Load Shedding Special Protection Schemes for a Double Area Power System", American Journal of Applied Sciences, Vol. 6, No. 2, pp. 317-327, 2009.
- [7] Parniani, M., Nasri, A., "SCADA Based Under Frequency Load Shedding Integrated with Rate of Frequency Decline", IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, 2006.
- [8] Rudez, U., Mihalic, R., "A novel approach to underfrequency load shedding", Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 2, pp. 636-643, 2011.
- [9] Terzija, V. V., "Adaptive Under Frequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 21, No. 3, pp. 1260-1266, 2006.
- [10] Kottick, D., "Neural Network for Predicting the Operation of an Under Frequency Load Shedding System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, pp. 1350-1358, 1996.
- [11] Moazzami, M., Khodabakhshian, A., "A New Optimal Adaptive Under Frequency Load Shedding Using Artificial Neural Networks", 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE 2010), pp. 824-829, 2010.
- [12] Sallam, A. A., Khafaga, A. M., "Fuzzy Expert System Using Load Shedding for Voltage Instability Control", IEEE Large Engineering Conference on Power Engineering, pp. 125-132, 2002.
- [13] Hong, Y. Y., Wei, S. F., "Multiobjective Underfrequency Load Shedding in an Autonomous System Using Hierarchical Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1355-1362, 2010.
- [14] Hong, Y. Y., Chen, P. H., "Genetic-Based Underfrequency Load Shedding in a Stand-Alone Power System Considering Fuzzy Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 1, pp. 87-95, 2012.
- [15] Amraee, T., Mozafari, B., Ranjbar, A. M., "An Improved Model for Optimal Under Voltage Load Shedding: Particle Swarm Approach", IEEE Power India Conference,

<sup>1</sup> Culture-PSO-Co evolutionary (CPCE) Algorithm

<sup>2</sup> Wide Area Monitoring System

<sup>3</sup> Phasor Measurement Unit

- <sup>4</sup> Western Electricity Coordinating Council
- <sup>5</sup> Centralized
- <sup>6</sup> Artificial Neural Network
- <sup>7</sup> Particle Swarm Optimization
- <sup>8</sup> Levenberg-Marquardt Back Propagation
- <sup>9</sup> Off-Line
- <sup>10</sup> System Vulnerability Index
- <sup>11</sup> Security Margin Index
- <sup>12</sup> Redction Rate of Equivalent Inertial Center Frequency
- <sup>13</sup> Equivalent Inertial Center (EIC) Frequency
- <sup>14</sup> Meta-Heuristic
- <sup>15</sup> Cultural Algorithm
- <sup>16</sup> Co-evolutionary Algorithm
- <sup>17</sup> Belief Spaces
- <sup>18</sup> Population Spaces
- <sup>19</sup> Shared Global Belief Space
- <sup>20</sup> Affect Operators
- <sup>21</sup> Particle Swarm
- <sup>22</sup> Accept Operations
- <sup>23</sup> Generalized Feed Forward
- <sup>24</sup> Heuristic
- <sup>25</sup> Uniform