

# فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، ششم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶، (پیاپی ۳۰): صص ۱۲-۱

## طراحی سامانه اندازه‌گیری فراگیر در سامانه قدرت جهت حفظ رویت‌پذیری شبکه در شرایط بحرانی

سعادت بهرامی<sup>۱</sup>، رضا غفارپور<sup>۲\*</sup>، رسول میرمطهری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۸

### چکیده

افزایش امنیت شبکه برق یکی از مهم‌ترین اهداف پدافند غیرعامل در صنعت برق است. از سوی دیگر، احتمال خراب‌کاری و حملات تروریستی به منظور صدمه‌زدن به ساختار برق کشور وجود دارد. زیرساخت اندازه‌گیری فراگیر که مبتنی بر ادوات اندازه‌گیری فازوری است، راه‌حل مناسبی برای کنترل و پایش شبکه برق کشور است. با استفاده از این زیرساخت، می‌توان در شرایط اضطراری، عملیات کنترل شبکه برق را به‌نحو بسیار مطلوب انجام داد. در این مقاله، روش جدیدی به منظور یافتن مکان بهینه ادوات اندازه‌گیری فازوری و طراحی زیرساخت ارتباطی مناسب ارائه شده است. در این مطالعه، تابع هدف هزینه با قید حفظ رویت‌پذیری سامانه، در نظر گرفته شده است. از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات باینری برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. همچنین، از روش بلمن فورد برای طراحی زیرساخت ارتباطی استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های استاندارد ۳۰ و ۳۹ شینه IEEE و همچنین شبکه برق ایران آزمایش شده است. به این منظور، سناریوهای محتمل تروریستی در شبیه‌سازی لحاظ شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با طراحی WAMS مناسب با در نظر داشتن قید پدافند غیرعامل، می‌توان رویت‌پذیری شبکه برق را در صورت رخداد حمله تروریستی حفظ کرد.

**کلیدواژه‌ها:** سامانه اندازه‌گیری فراگیر، ادوات اندازه‌گیری فازوری، رویت‌پذیری، الگوریتم اجتماع ذرات باینری، پدافند غیرعامل

۱- کارشناس برق منطقه‌ای خوزستان

۲- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، (E-mail: rghaffarpour@ihu.ac.ir) نویسنده مسئول

۳- پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین(ع)

## ۱- مقدمه

ژنتیک [۱۲-۱۳]، روش اجتماع ذرات باینری<sup>۵</sup> [۱۴-۱۵]، بهینه‌سازی مورچگان [۱۶]، روش بهینه‌سازی دسته ذرات ایمن [۱۷] می‌توان اشاره کرد. در استفاده از این روش‌ها در مقایسه با روش‌های قطعی معمولی، زمان لازم برای حل مسأله بهینه‌سازی به میزان زیادی افزایش می‌یابد.

در برخی از مطالعات انجام شده در زمینه جایابی PMUها، مسئله با در نظر گرفتن عدم قطعیت در خطوط و عدم قطعیت در عملکرد صحیح PMUها [۲۱-۱۷] و یا بهینه‌سازی چندهدفه PMUها [۲۲] بررسی شده است. در مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری با در نظر گرفتن اثر خروج خطوط، فرمول‌بندی شده است [۲۱]. در اثر خروج هم‌زمان خطوط و واحد اندازه‌گیری فازوری در نظر گرفته شده است [۲۰-۱۹]. در مسأله جایابی PMUها در صورت خروج یک خط انتقال به منظور مشاهده‌پذیری شبکه فرمول‌بندی شده است [۲۳]. در این مقاله، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات باینری و الگوریتم بلمن‌فورد، روشی برای تعیین مکان بهینه ادوات اندازه‌گیری فازوری و طراحی زیرساخت ارتباطی سامانه به منظور افزایش امنیت شبکه برق در برابر حملات تروریستی ارائه شده است. تابع هدف، روش پیشنهادی کمینه‌شدن هزینه طراحی سامانه است به طوری که رویت‌پذیری سامانه حفظ و مقاومت آن در برابر حملات تروریستی افزایش یابد. روش پیشنهادی برای سناریوهای مختلف شامل حالت عادی سامانه و همچنین در حالت‌های مختلف اقدامات خراب‌کاری که منجر به ازدست‌رفتن یک خط انتقال و دو خط انتقال به صورت هم‌زمان شود، مورد آزمایش قرار گرفته است. در بخش دوم، تابع هدف مسئله پیشنهادی ارائه شده است. فلوجارت روش پیشنهادی و الگوریتم‌های PSO و بلمن‌فورد در بخش سوم بررسی شده است. در بخش چهارم، راه‌کارهایی جهت رفع تهدید ارائه شده است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی سامانه‌های قدرت مختلف در بخش پنجم ارائه شده است.

## ۲- بیان مسئله و تابع هدف

سامانه WAMS، دارای چهار مؤلفه اصلی است که عبارت‌اند از:

۱- واحد اندازه‌گیری فازوری (PMU)

۲- واحد جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری فازوری<sup>۶</sup> (PDC)

۳- به‌کارگیری و استفاده از داده‌های فازوری

۴- شبکه ارتباطی

مفهوم پدافند غیرعامل در شبکه‌های برق را می‌توان در بررسی و اعمال روش‌های مختلف ممکن جهت افزایش قابلیت اطمینان و کاهش احتمال خاموشی در برابر حوادث مختلف فنی و یا خرابکاری‌ها تعریف کرد [۱]. سامانه اندازه‌گیری فراگیر (WAMS)<sup>۱</sup> که مبتنی بر جایگزینی واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU)<sup>۲</sup> در سامانه قدرت است، پیشنهاد نوینی برای بهره‌برداری مطمئن و قابل اعتماد سامانه‌های قدرت محسوب می‌گردد. در این ساختار، تمامی پارامترهای شبکه به صورت هم‌زمان از طریق سامانه ماهواره‌ای و GPS یا فیبر نوری، از طریق PMUها اندازه‌گیری و به مرکز کنترل داده‌ها ارسال می‌شوند. البته ارسال اطلاعات از طریق GPS و سامانه ماهواره‌ای ارزان‌تر است؛ اما، احتمال آسیب در برابر حملات سایبری در ارسال اطلاعات از طریق امواج نسبت به فیبر نوری بیشتر است. زیرساخت‌های این سامانه تا سال ۲۰۰۳ در کشورهایی مانند چین، آمریکا، برزیل و اتحادیه اروپا نصب گردیده و در آمریکا به میزان بسیار زیادی محقق شده است. در ایران نیز خرید تعدادی از این تجهیزات انجام شده ولی به دلیل نبود زیرساخت‌های لازم، امکان بهره‌برداری همه‌منظوره متناسب با اهداف پدافند غیرعامل تاکنون فراهم نشده است [۱].

از مهم‌ترین اهداف نصب PMU در سامانه قدرت می‌توان به مشاهده‌پذیری و تخمین حالت سامانه [۲]، پیدا کردن محل وقوع خطا در خطوط انتقال [۳]، بررسی زمان واقعی پایداری گذرای سامانه قدرت [۴]، حفاظت در سطح وسیع، رله‌گذاری تطبیقی، پایش حرارتی خطوط انتقال و پایداری ولتاژ [۵-۶] اشاره کرد. روش‌های ارائه شده برای حل مسئله جایابی PMUها را می‌توان به دو دسته روش‌های قطعی معمولی<sup>۳</sup> و روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری<sup>۴</sup> تقسیم کرد. در روش‌های قطعی معمولی، مسئله جایابی PMUها در قالب یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح بیان می‌شود [۷-۹].

از آن‌جاکه در این روش‌ها، تعریف مناسب قیود تابع هدف نقش به‌سزایی در حل مسئله دارد، لذا فرمول‌بندی ارائه شده در مراجع [۷-۹] قادر به دست‌یابی به پاسخ بهینه این مسأله بهینه‌سازی برای هر شبکه‌ای نیست. از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری ارائه شده می‌توان به جستجوی باینری [۱۰]، جستجوی تابو [۱۱]، الگوریتم

1-Wide Area Measurement System (WAMS)

2-Phasor Measurement Unit (PMU)

3-Conventional Deterministic Techniques

4-Meta-Heuristic Optimization Methods

5-Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)

6-Phasor Data Collector (PDC)

متغیرهای حالات سامانه را در کلیه نقاط شبکه اندازه‌گیری کند و این اطلاعات را به یک مرکز کنترل ارسال کند. در این مقاله، مکان‌یابی ادوات اندازه‌گیری فازوری و طراحی WAMS با در نظر گرفتن پدافند غیرعامل انجام شده است. به این منظور، اقدامات مختلف تروریستی باید در طراحی WAMS در نظر گرفته شوند.

اکثر توابع هدف در نظر گرفته شده در مطالعات قبلی در زمینه طراحی WAMS و جایابی PMU صرفاً مبتنی بر رویت‌پذیری شبکه برق بوده‌اند. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله، هزینه کل ساخت WAMS است به گونه‌ای که کل سامانه رویت‌پذیر باشد. معمولاً فازور ولتاژ شین‌های شبکه به عنوان متغیرهای شبکه در نظر گرفته می‌شود و قابلیت محاسبه فازور ولتاژ همه شین‌های شبکه نیز به عنوان رویت‌پذیری کامل شبکه تعریف می‌شود. سامانه WAMS برای تبادل حجم زیاد اطلاعات مهیاشده توسط PMUها به مراکز کنترل، نیاز به یک زیرساخت ارتباطی مطمئن و قابل اعتماد بالا دارد. از آنجا که مسئله جایابی مورد مطالعه یک مسئله بهینه‌سازی است، لذا در این پژوهش از روش بهینه‌سازی باینری PSO برای حل آن استفاده شده است. بدین منظور، برای جایابی بهینه PMUها و طراحی زیرساخت ارتباطی آن، به‌طور جداگانه، از الگوریتم PSO استفاده شده و سپس هزینه مجموع محاسبه گردیده است. برای این منظور تابع هدف زیر برای جایابی PMUها در نظر گرفته شده است:

$$\begin{cases} \text{Min} \sum_{i=1}^m C_{pi} PMU_i \\ \text{st} \text{ OBS}(\hat{PMU}) > 1 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن،  $\hat{PMU}$  بردار مکان‌یابی PMUها است.  $C_{pi}$  هزینه نصب PMU و OBS تابع رویت‌پذیری شبکه است و تابع شایستگی آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

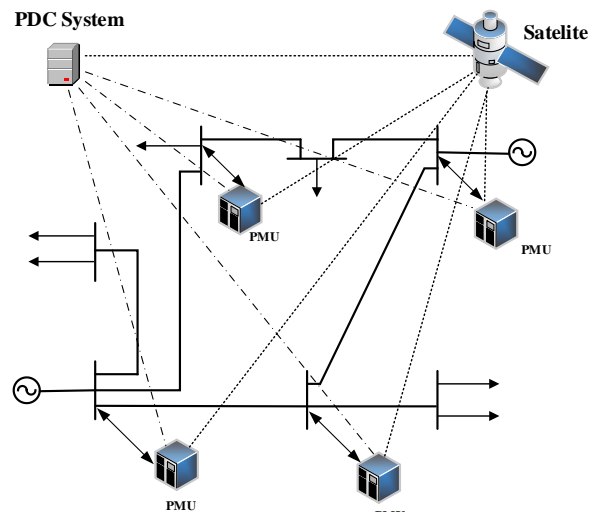
$$\text{Fitness} = \frac{N_{PMU, Total}}{n} + \text{Penalty} \quad (2)$$

که در آن،  $N_{PMU, Total}$  و  $n$  به ترتیب تعداد کل PMUها و تعداد کل شین‌های سامانه می‌باشند. هم‌چنین تابع پناستی برابر تعداد صفرها در بردار رویت‌پذیری است. در واقع تابع هدف تلفیقی از میزان مشاهده‌پذیری سامانه و تعداد نصب واحدهای PMU به نسبت کل شین‌های شبکه می‌باشد. برای طراحی سامانه ارتباطی نیز تابع هدف به صورت رابطه (۳) است.

این مؤلفه‌ها را می‌توان در سه بخش کلی تعریف نمود [۲]:

- (الف) بخش اندازه‌گیری، جمع‌آوری و دستیابی به اطلاعات.
- (ب) بخش تبادل و تحویل داده‌ها توسط یک زیرساخت ارتباطی.
- (ج) تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از سامانه مدیریت انرژی.

بخش‌های مختلف سامانه WAMS در شکل (۱) نشان داده شده است. در بخش اول که بخش دستیابی به اطلاعات است، سامانه WAMS، با شبکه قدرت در پست‌ها و خطوط انتقال سروکار دارد. به عبارت دیگر، بخشی است که وسایل اندازه‌گیری مانند PMUها، واحد اندازه‌گیری از دور<sup>۱</sup>، رله حفاظتی دیجیتال، ثبت‌کننده خطای دیجیتال و غیره در آنجا نصب می‌شوند و مسئول آماده‌کردن اطلاعات خام شبکه هستند [۱۱].



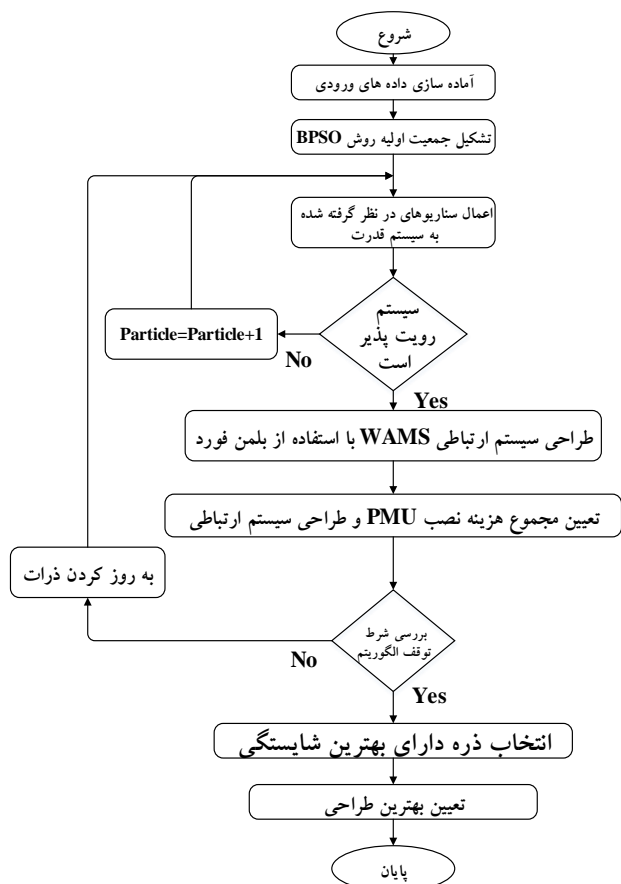
شکل ۱- بخش‌های مختلف سامانه WAMS<sup>۲</sup>

در بخش دوم، سامانه WAMS نیاز به یک زیرساخت ارتباطی<sup>۲</sup> دارد تا اطلاعات مانیتور شده توسط PMUها را به یک یا چند PDC، و از PDCها به مراکز کنترل انتقال دهد. تأخیر و کیفیت داده‌هایی که از PMUها منتقل می‌شود، بستگی به قابلیت و ساختار زیرساخت ارتباطی دارد [۸]. در بخش سوم، اطلاعات سامانه اندازه‌گیری که توسط سامانه ارتباطی مخابره شده‌اند، جمع‌آوری و برای تحلیل‌های کاربردی، بهینه‌سازی و کنترلی آماده می‌شوند. این کار توسط بسته‌های نرم‌افزاری انجام می‌شود. این بخش به‌عنوان سامانه مدیریت انرژی (EMS) شناخته می‌شود.

هدف از طراحی WAMS بدون در نظر گرفتن پدافند غیرعامل در تحقیقات صنعت برق، طراحی یک زیرساخت ارتباطی است که بتواند

1- Remote Terminal Unit  
2- Communication Infrastructure

است تعیین می گردد.



شکل ۲- الگوریتم روش پیشنهادی

### ۳-۱- روش معمولی PSO

الگوریتم PSO رفتار گروهی از ذره‌ها که مقادیر اولیه آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شود را مدل می‌کند. این ذره‌ها، برای یافتن جواب‌های جدید، فضای مسئله را جستجو می‌کنند. موقعیت و سرعت هر ذره  $i$  در تکرار  $k$ ام در فضای جستجو، به ترتیب با  $X_k^i$  و  $V_k^i$  توصیف می‌شود. هر ذره بهترین موقعیت محلی خود را ثبت می‌کند. سپس سرعت ذره  $i$  ام در تکرار  $k+1$ ام از رابطه (۵) به‌روز می‌شود.  $P_{lbest}^i$  و  $P_{global}^i$  به ترتیب بهترین موقعیت ذره  $i$ ام و بهترین موقعیت کل ذرات تاکنون می‌باشد.

$$V_{k+1}^i = \omega \cdot V_k^i + C_1 \cdot R_1 \cdot (P_{lbest}^i - X_k^i) + C_2 \cdot R_2 \cdot (P_{global}^i - X_k^i) \quad (5)$$

به طوری که،  $C_1$  و  $C_2$  دو تابع تصادفی هستند که یک عدد تصادفی بین صفر و یک می‌سازند. همچنین،  $\omega$  ضریب وزنی اینرسی و

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m C_{oi} \cdot OPGW_i \quad s.t: \quad (3)$$

$\{OPGW \text{ Links}, PMU\}$  is connected graph

که در آن،  $OPGW_{Length}$  نوعی فیبر نوری است که نشان‌دهنده طول نامین لینک شبکه ارتباطی است و  $C_{oi}$  هزینه نصب یک کیلومتر از آن است. تابع شایستگی آن نیز به صورت زیر است:

$$\text{Fitness} = \frac{OPGW_{Length}}{D_{Total}} + \text{Penalty} \quad (4)$$

که در آن،  $OPGW_{Length}$  و  $D_{Total}$  به ترتیب نشان‌دهنده طول کل فیبر نوری و طول کل خطوط انتقال هستند.

### ۳- روش پیشنهادی

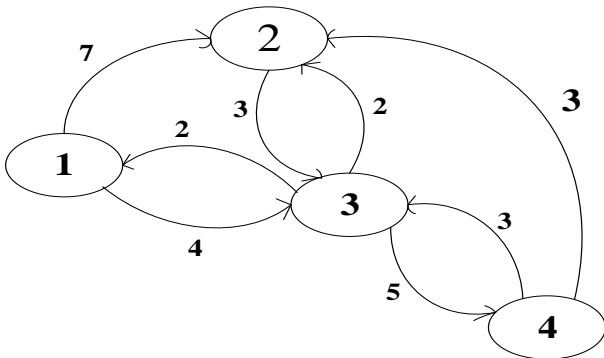
روش پیشنهادی شامل دو بخش تعیین مکان بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری و طراحی زیرساخت ارتباطی WAMS است. به این منظور، از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات باینری و روش بلمن فورد استفاده شده است. از آن‌جا که هدف الگوریتم بهینه‌سازی کمینه‌کردن هزینه کل طراحی است، تابع شایستگی در الگوریتم بهینه‌سازی به صورت هزینه و با قید رویت‌پذیری شبکه، در نظر گرفته شده است. روش بهینه‌سازی پیشنهادی مبتنی بر تکرار است، لذا در هر تکرار، جواب‌های مختلف برای مسئله آزمایش شده و با استفاده از تابع شایستگی، بهترین جواب تعیین می‌شود. الگوریتم روش پیشنهادی به صورت شکل (۲) است.

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، اولین گام در روش پیشنهادی، آماده‌سازی داده‌های ورودی الگوریتم شامل پیکربندی سامانه، پارامترهای روش بهینه‌سازی PSO (تعداد ذرات، تعداد تکرارها، ضرایب وزنی و اینرسی) و هزینه‌های نصب PMU و زیرساخت ارتباطی (فیبر نوری و ...) است. از آن‌جا که هر ذره در روش PSO حاوی اطلاعات مربوط به مکان نصب PMUها است، در گام دوم به‌ازای هر ذره، مکان نصب PMUها مشخص شده و رویت‌پذیری سامانه بررسی می‌گردد. در صورتی که سامانه رویت‌پذیر باشد، با استفاده از الگوریتم بلمن فورد، زیرساخت سامانه ارتباطی WAMS طراحی می‌گردد. پس از طراحی WAMS، هزینه کل سامانه شامل هزینه نصب PMUها و هزینه زیرساخت ارتباطی تعیین می‌شود. این فرایند برای تمام ذرات، انجام می‌شود. شرط توقف الگوریتم، رسیدن تعداد تکرار الگوریتم به میزان مشخصی است. در نهایت، بهترین ذره که نشان‌دهنده بهترین طراحی سامانه WAMS

سامانه برابر مجموع یک‌های موجود در هر ذره است.

### ۳-۴- الگوریتم بلمن فورد

در این مقاله، به منظور بهینه‌سازی و طراحی شبکه ارتباطی از الگوریتم بلمن فورد [۲۹] استفاده شده‌است. الگوریتم بلمن فورد یکی از روش‌های حل مسائل طراحی شبکه در گراف‌های جهت‌دار با یال‌های وزن دار است. در این الگوریتم، کمینه مسیر از یک گره به عنوان گره شروع به تمامی گره‌های گراف پیدا می‌شود. ممکن است وزن یال‌ها منفی نیز باشد. در این حالت، الگوریتم ابتدا مشخص می‌کند که آیا حلقه با وزن منفی در گراف وجود دارد یا نه. در صورت وجود حلقه با وزن منفی، مسئله پاسخ ندارد و در غیر این صورت، کمینه مسیر به همراه وزن آن‌ها از گره شروع به تمامی گره‌های گراف مشخص می‌نماید [۲۵]. برای بیان چگونگی عملکرد این الگوریتم از یک گراف نمونه که در شکل (۴) نشان داده شده‌است، استفاده می‌نماییم. این شکل، یک گراف جهت‌دار وزن دار است که جهت و وزن آن‌ها به ترتیب با بردار و عدد مشخص شده‌است. این شکل دارای ۴ گره و ۳ کانتر است. از آنجایی که وزن بال‌ها همگی مثبت می‌باشد، حلقه با وزن منفی در این گراف موجود نیست. حال می‌خواهیم در این گراف کمینه مسیر از گره شماره ۱ به عنوان گره شروع، به تمامی گره‌های دیگر گراف را مشخص نماییم. ابتدا باید ماتریس فاصله را برای این گراف تشکیل دهیم.



شکل ۴- گراف جهت‌دار وزنی

این ماتریس، فاصله بین هر گره گراف را با دیگر گره‌ها مشخص می‌نماید. این ماتریس در معادله (۱۰) نشان داده شده‌است. در این جا منظور از فاصله بی‌نهایت این است که بین آن دو گره، مسیر مستقیم وجود ندارد. در این جا از متغیر  $D_i$  برای نشان دادن کمینه مسیر از گره شماره  $i$ ام، استفاده می‌شود. این الگوریتم در چند مرحله اجرا می‌گردد که هر مرحله شامل یک گره جدید و یک مقدار جدید برای  $D_i$  است.

ضرایب آموزش هستند. لازم به ذکر است که ضریب  $\omega$  به صورت خطی از ۰/۹ تا ۰/۴ کاهش می‌یابد،  $\omega$  را می‌توان از طریق رابطه (۶) تعیین کرد.

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \quad (6)$$

که در آن،  $k_{\max}$  بیشترین تکرار است. در پایان هر تکرار، موقعیت جدید هر ذره، با جمع موقعیت قبلی و سرعت جدید، به دست می‌آید:

$$X_{k+1}^i = X_k^i + V_{k+1}^i \quad (7)$$

### ۳-۲- مدل باینری روش PSO

روش بهینه‌سازی باینری PSO (BPSO) در [۲۴] معرفی شده‌است. نسخه باینری PSO، برای حل مسائلی به کار می‌رود که جواب آن‌ها به صورت گسسته است. موقعیت ذره‌ها در مدل باینری با دو مقدار صفر یا یک در هر بعد مشخص می‌شود. جهت به‌هنگام نمودن سرعت هر ذره از رابطه (۵)، بدون تغییر استفاده می‌شود و البته با این تفاوت که سرعت به صورت احتمال تعریف شده و باید به بازه (۰ و ۱) تبدیل شود. برای تابع تبدیل لجستیک از رابطه (۸) به این منظور استفاده شده‌است.

$$S(V_{k+1}^i) = \text{sig mode}(V_{k+1}^i) = \frac{1}{1 + \exp(V_{k+1}^i)} \quad (8)$$

همچنین معادله (۹) به جای معادله (۷) برای به‌هنگام کردن موقعیت ذره‌ها تعریف شده‌است که در (۹)،  $\text{rand}$  یک عدد تصادفی بین صفر و یک است.

$$\begin{aligned} \text{if } \text{rand} < S(V_{k+1}^i) \text{ then } : X_{k+1}^i = 1 ; \\ \text{else } : X_{k+1}^i = 0 ; \end{aligned} \quad (9)$$

### ۳-۳- ساختار ذره در روش پیشنهادی

ساختار هر ذره در روش BPSO به صورت شکل (۳) است. در صورتی که بخواهیم واحدهای PMU را در یک سامانه  $N$  شینه، مکان‌یابی کنیم، تعداد بعد هر ذره در روش BPSO برابر با  $N$  است.

$$\boxed{B_1} \quad - \quad \boxed{B_i} \quad - \quad \boxed{B_N}$$

شکل ۳- ابعاد هر ذره در روش PSO

در شکل (۳)،  $B_i$  می‌تواند یک یا صفر باشد و نشان‌دهنده نصب یا عدم نصب PMU در شین  $i$ ام است. تعداد کل PMU نصب‌شده در

قبل یکسان است. این بدان معنی است که کمینه مسیره‌های ممکن یافت نشده‌است و مقادیر  $D_1$ ها دیگر کاهش نمی‌یابند، لذا الگوریتم پایان می‌یابد. نتایج به‌طور خلاصه در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- نتایج الگوریتم بلمن‌فورد در هر مرحله آن

k	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
۱	۰	۷	۴	$\infty$
۲	۰	۶	۴	۹
۳	۰	۶	۴	۹

سطر آخر نمایان‌گر کمینه مسیر از گره شماره ۱ به دیگر گره‌ها است. در بدترین حالت، تعداد تکرار برابر  $N-2$  خواهد بود. از آنجایی که در طراحی سامانه ارتباطی به دنبال این هستیم که یک مکان بهینه برای PDC بیابیم به گونه‌ای که به تمامی PMUهای شبکه با کمترین هزینه ارتباطی متصل باشد. الگوریتم بلمن‌فورد با توجه به ویژگی‌هایی که ذکر شد می‌تواند برای این امر مفید باشد.

#### ۴- شبیه‌سازی

برای تأیید کارایی روش پیشنهادی، از این روش برای جایابی PMU و طراحی زیرساخت ارتباطی در شبکه‌های ۳۰ و ۳۹ شینه IEEE و شبکه سراسری ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت ایران استفاده شده است. جزئیات اطلاعات و دیگرام تک‌خطی شبکه‌های ۳۰ و ۳۹ شینه IEEE در [۲۶] موجود است. در شکل‌های (۵، ۶ و ۷) به ترتیب شبکه‌های ایران، ۳۰ شینه و ۳۹ شینه IEEE نشان داده شده است. برای طراحی شبکه ارتباطی نیاز به طول خطوط است که این اطلاعات در [۲۷] موجود است. در این مقاله، قیمت در نظر گرفته شده برای هر PMU برابر ۴۰۰۰۰ دلار و برای هر کیلومتر فیبر نوری ۴۰۰۰ دلار و برای هر سوئیچ و روتر ۴۰۰۰ دلار است.

#### ۴-۱- شبیه‌سازی حملات تروریستی

برای شبیه‌سازی حملات تروریستی در شبکه برق، سه سناریو در نظر گرفته شده است. این سه سناریو شامل موارد زیر است:

- ۱- حمله تروریستی که منجر به قطع شدن یک خط انتقال شود (همه خطوط سامانه به‌عنوان کاندید در نظر گرفته می‌شوند).
- ۲- حمله تروریستی که منجر به قطع شدن دو خط از یک شین شود (این حمله برای شین‌هایی در نظر گرفته می‌شود که بیش از دو خط انتقال به آن‌ها متصل است).
- ۳- حمله تروریستی که منجر به از دست رفتن یک PMU شود.

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 7 & 4 & \infty \\ \infty & 0 & 3 & \infty \\ 2 & 2 & 0 & 5 \\ \infty & 3 & 3 & 3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

این مراحل تا جایی که  $D_1$ ها دیگر به مقدار کمتری نرسد، ادامه می‌یابد. متغیر  $k$  نشان‌دهنده تعداد این مراحل است. در مرحله اول،  $k=1$ ، همه  $D_1$  برابر فاصله مستقیم از گره شماره ۱ هستند. به عبارتی:

$$k=1: D_1=0, D_2=7, D_3=4, D_4=\infty \quad (11)$$

در مرحله دوم، ابتدا فاصله گره شماره ۱ از دیگر گره‌ها با عبور از یک گره واسط مشخص می‌شود. به طور مثال، فاصله گره شماره ۱ از گره شماره ۲ با عبور از گره شماره ۳ برابر  $2+4=6$  است. هم‌چنین فاصله آن دو گره با عبور از گره شماره ۴ برابر  $\infty$  است. سپس این فواصل با فاصله مستقیم گره شماره ۱ با آن گره‌ها مقایسه می‌شود تا مشخص گردد که کدام حالت مسیر کمتری را نتیجه می‌دهد. در حالت ریاضی می‌توان آن را به صورت حاصل جمع المان‌های سطر اول با دیگر ستون‌های ماتریس فاصله بیان کرد و کمینه آن‌ها را به عنوان فاصله گره شماره ۱ از آن گره‌ها در این مرحله در نظر گرفت. به‌طور مثال برای گره شماره ۲ داریم:

$$k=2: D_2 = \min\{7, 0+7, \underline{4+2}, \infty+3\} = 6 \quad (12)$$

که زیر کمینه فاصله خط کشیده شده‌است. برای دیگر گره‌ها نیز به همین صورت عمل می‌شود. لذا داریم:

$$D_3 = \min\{4, \underline{0+4}, 7+3, \infty+3\} = 4 \quad (13)$$

$$D_4 = \min\{\infty, 0+\infty, 7+\infty, \underline{4+5}\} = 9 \quad (14)$$

البته در این مرحله نیز  $D_1=0$  است. این مقادیر به‌دست آمده را در ماتریس فاصله جایگزین سطر اول می‌نماییم. در مرحله سوم فاصله گره شماره ۱ از دیگر گره‌ها با عبور از دو گره واسط به‌دست می‌آید. در این مرحله نیز همانند روال مرحله قبل  $D_1$ های جدید را به‌دست می‌آوریم اما از ماتریس فاصله جدید به‌دست آمده در مرحله قبل استفاده می‌نماییم. در این صورت داریم:

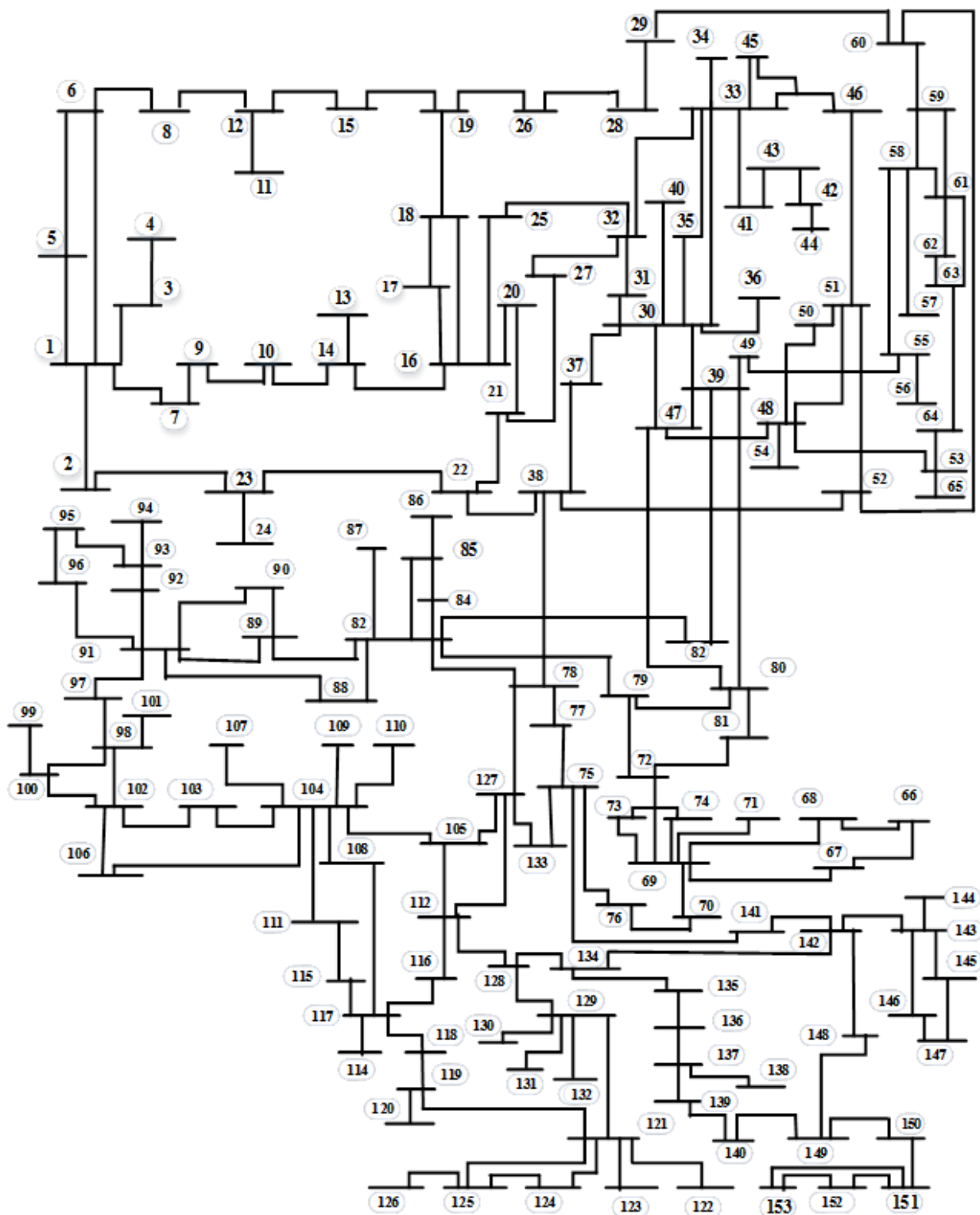
$$k=3: D_1=0$$

$$D_2 = \min\{6, 0+6, \underline{4+2}, 9+3\} = 6 \quad (15)$$

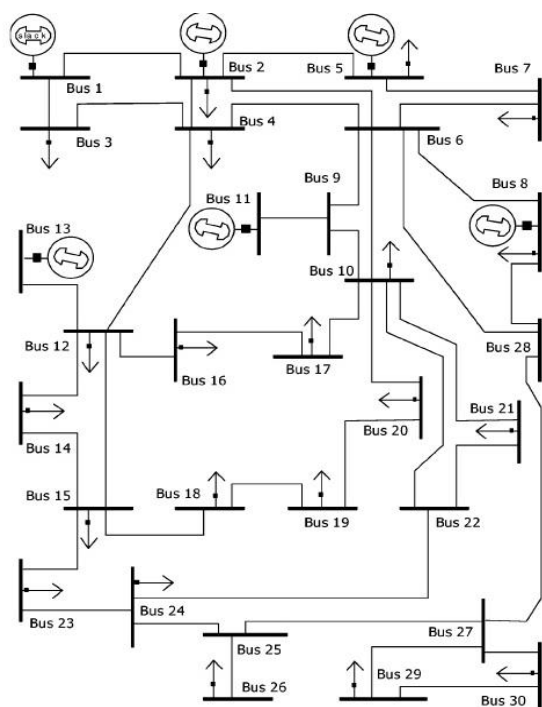
$$D_3 = \min\{4, \underline{0+4}, 6+3, 9+3\} = 4$$

$$D_4 = \min\{9, 6+\infty, \underline{4+5}, 9+0\} = 9$$

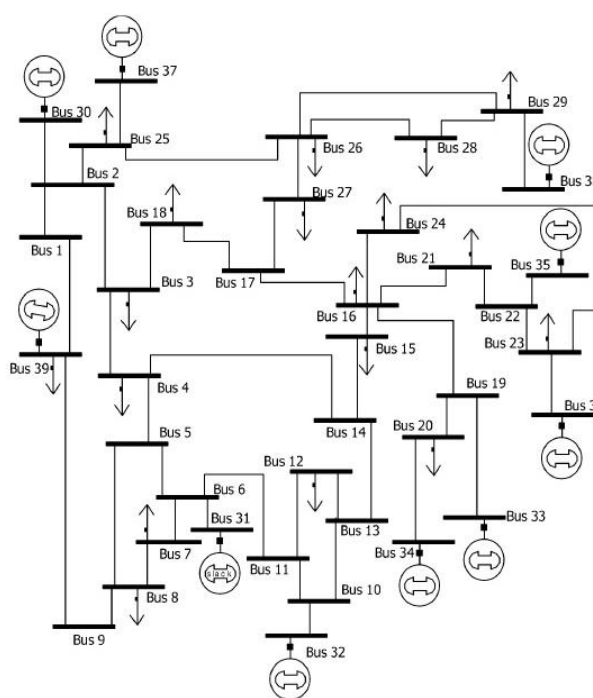
در این مرحله، مقادیر به دست آمده برای  $D_1$ ها با مقادیر مرحله



شکل ۵- شبکه ۱۵۳ شینه ایران [۱۳]



شکل ۷- سامانه ۳۹ شینه IEEE [۲۶]



شکل ۶- سامانه ۳۰ شینه IEEE [۲۶]

جدول ۲- طراحی WAMS در حالت عادی شبکه

هزینه (میلیون دلار)	مکان نصب PDC	تعداد CI Node	درصد شبکه ارتباطی	مکان‌های نصب PMU	تعداد PMU	سامانه مورد مطالعه
۱/۹۸۲	۶	۱۵	۱۵/۲۸	۳۶،۷،۹،۱۰،۱۲،۱۹،۲۴،۲۵،۲۷	۱۰	IEEE شینه ۳۰
۲/۴۵۸	۲	۲۲	۴۱/۱۸	۲،۶،۹،۱۰،۱۳،۱۴،۱۷،۲۲،۲۳،۲۵،۲۹،۳۳،۳۴	۱۳	IEEE شینه ۳۹
۸/۵۸۴	۱۲۷	۴۸	۴۲/۹۲	۱،۳،۹،۱۲،۱۴،۱۸،۲۱،۲۳،۲۸،۳۰،۳۲،۳۳،۴۲،۴۸ ۵۲،۵۳،۵۵،۵۸،۶۲،۶۸،۶۹،۷۵،۸۰،۸۳،۸۶،۹۱،۹۳ ۱۰۰،۱۰۱،۱۰۴،۱۱۷،۱۲۰،۱۲۱،۱۲۶،۱۲۷،۱۲۹ ۱۳۵،۱۳۷،۱۴۳،۱۴۷،۱۴۹،۱۵۳	۴۲	۱۵۳ شینه ایران

باید این طراحی به گونه‌ای باشد که به هنگام وقوع یک پیشامد در شبکه، هم‌چنان امکان دسترسی به اطلاعات سراسر شبکه به‌طور پیوسته وجود داشته‌باشد. از این‌رو، در روش پیشنهادی، طراحی WAMS با در نظر گرفتن وقوع پیشامدهایی هم‌چون از دست رفتن یکی از خطوط شبکه ارائه گردیده‌است.

در جدول (۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی با در نظر گرفتن خروج یک خط انتقال نشان داده شده‌است. با مشاهده نتایج به دست آمده از جدول (۲) مشخص می‌شود که برای طراحی WAMS با استفاده از روش پیشنهادی نیاز است که تقریباً بیش از نیمی از شین‌های شبکه به PMU مجهز گردند تا شبکه به هنگام خروج یک PMU هم‌چنان به‌طور کامل رویت پذیر باشد. هم‌چنین

#### ۲-۴ طراحی WAMS در حالت عملکرد عادی شبکه

برای این حالت، نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی در طراحی WAMS در جدول (۲) نشان داده شده است. محل نصب PMUها، PDC، تعداد CI Nodeها و هم‌چنین نسبت طول فیبر نوری سامانه ارتباطی به طول کل خطوط انتقال به صورت درصد در این جدول نشان داده شده‌است.

#### ۳-۴ طراحی WAMS در حالت خروج تکی خط انتقال

از آنجایی که عوامل اغتشاش نظیر حوادث طبیعی، شرایط نامساعد جوی، خطاهای انسانی، خرابی تجهیزات و اقدامات خراب کارانه همیشه در شبکه‌های قدرت وجود دارند، برای طراحی امن WAMS،



شین‌هایی بیش از دو خط انتقال به آن‌ها متصل است، سناریو حذف دو خط انتقال به‌صورت هم‌زمان برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود و الگوریتم شکل (۱) برای جایابی PMU در سامانه پیاده‌سازی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۴) آمده است. همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود، هزینه صرف‌شده برای شبکه برق ایران نسبت به سناریو خروج تکی خط انتقال، فقط ۲ میلیون دلار بیشتر شده‌است. این مساله نشان می‌دهد که ایمن‌سازی شبکه برق کشور برای مقابله با خروج هم‌زمان دو خط انتقال، به نسبت هزینه صرف شده، نسبت به ایمن‌سازی شبکه در مقابل خروج تکی خط انتقال، به‌صرفه‌تر است.

مشاهده می‌شود که برای حفظ رویت‌پذیری شبکه برق ایران در شرایط حادثه، باید حدود ۱۰ میلیون دلار هزینه بیشتری نسبت به حالت عادی صرف شود.

#### ۴-۴- طراحی WAMS در حالت خروج هم‌زمان دو خط انتقال

از روش پیشنهادی برای مکان‌یابی PMUها و طراحی زیرساخت ارتباطی با در نظر گرفتن سناریو حادثه تروریستی که منجر به از دست‌رفتن هم‌زمان دو خط انتقال در سامانه باشد، استفاده شده‌است. بدین منظور، فرض می‌شود که دو خط انتقال که به‌صورت هم‌زمان قطع می‌شوند، متعلق به یک شین هستند. لذا، برای تمامی

جدول ۳- طراحی WAMS در حالت خروج تکی خط انتقال

هزینه کل WAMS (میلیون دلار)	مکان PDC	تعداد CI Nodeها	درصد شبکه ارتباطی	محل نصب PMU	تعداد PMU	سامانه مورد مطالعه
۲/۰۴۴۸	۶	۲۳	۳۳/۶۱	۲،۳،۶،۷،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۵،۱۷،۱۹،۲۴،۲۶،۳۰	۱۴	شین ۳۰ IEEE
۵،۰۱۴	۱۶	۳۳	۷۰/۷۲	۱،۳،۵،۷،۹،۱۱،۱۳،۱۵،۱۷،۲۰،۲۱،۲۴،۲۶،۲۸،۳۰،۳۱،۳۲،۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷،۳۸	۲۳	شین ۳۹ IEEE
۱۸/۴۱۷	۴۸	۱۱۴	۷۵/۷۸	۱،۲،۴،۵،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۳،۱۵،۱۶،۱۷،۱۹،۲۱،۲۴،۲۸،۳۰،۳۲،۳۳،۳۴،۳۶،۳۸،۳۹،۴۰،۴۳،۴۴،۴۶،۴۹،۵۰،۵۴،۵۶،۵۷،۵۸،۶۰،۶۲،۶۴،۶۵،۶۶،۶۹،۷۱،۷۲،۷۳،۷۵،۷۶،۷۷،۸۱،۸۳،۸۴،۸۶،۸۷،۹۰،۹۱،۹۳،۹۴،۹۵،۹۸،۹۹،۱۰۱،۱۰۲،۱۰۴،۱۰۷،۱۰۹،۱۱۰،۱۱۱،۱۱۲،۱۱۳،۱۱۴،۱۱۷،۱۱۸،۱۲۰،۱۲۲،۱۲۳،۱۲۴،۱۲۶،۱۳۰،۱۳۱،۱۳۲،۱۳۳،۱۳۴،۱۳۶،۱۳۸،۱۳۹،۱۴۲،۱۴۴،۱۴۵،۱۴۶،۱۴۹،۱۵۱،۱۵۳	۸۹	شین ۱۵۳ ایران

جدول ۴- طراحی WAMS در حالت خروج هم‌زمان دو خط انتقال بر اثر حادثه تروریستی

هزینه کل WAMS (میلیون دلار)	مکان PDC	تعداد CI Nodeها	درصد شبکه ارتباطی	محل نصب PMU	تعداد PMU	سامانه مورد مطالعه
۳/۰۳۲	۶	۲۵	۴۰/۱۵	۱،۲،۶،۷،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۵،۱۷،۱۹،۲۲،۲۴،۲۵،۲۶،۲۸،۳۰	۱۷	شین ۳۰ IEEE
۵/۶۷۰	۱۶	۳۷	۷۷/۵۱	۱،۲،۴،۵،۷،۹،۱۱،۱۲،۱۳،۱۵،۱۶،۱۸،۲۰،۲۱،۲۳،۲۴،۲۶،۲۷،۲۸،۳۰،۳۱،۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷،۳۸،۳۹	۲۹	شین ۳۹ IEEE
۲۰/۷۵۴	۱۱۴	۱۲۰	۸۱/۵۶	۲،۳،۵،۶،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۳،۱۵،۱۶،۱۷،۱۹،۲۱،۲۲،۲۴،۲۸،۳۰،۳۲،۳۳،۳۴،۳۶،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱،۴۴،۴۶،۴۸،۵۱،۵۴،۵۵،۵۶،۵۷،۵۹،۶۰،۶۲،۶۳،۶۴،۶۵،۶۶،۶۹،۷۱،۷۳،۷۵،۷۶،۷۸،۷۹،۸۱،۸۳،۸۵،۸۶،۸۷،۹۰،۹۱،۹۲،۹۴،۹۵،۹۷،۹۹،۱۰۰،۱۰۱،۱۰۳،۱۰۵،۱۰۶،۱۰۷،۱۰۸،۱۲۱،۱۲۲،۱۲۳،۱۰۹،۱۱۰،۱۱۳،۱۱۴،۱۱۵،۱۱۶،۱۱۸،۱۲۰،۱۲۴،۱۲۶،۱۲۸،۱۳۰،۱۳۱،۱۳۲،۱۳۳،۱۳۵،۱۳۷،۱۳۸،۱۴۰،۱۴۲،۱۴۴،۱۴۵،۱۴۶،۱۴۹،۱۵۱،۱۵۳	۹۶	شین ۱۵۳ ایران

#### ۴-۵- طراحی WAMS در حالت خروج یک PMU

شبکه به PMU مجهز گردند تا شبکه به هنگام خروج یک PMU هم چنان به طور کامل رؤیت پذیر باشد. واضح است که این امر باعث می شود که طول شبکه ارتباطی مورد نیاز و تعداد CI Node ها نیز افزایش یابد. در نتیجه هزینه کلی WAMS نسبت به حالت عملکرد عادی شبکه به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت.

در جدول (۴) نتایج حاصل از شبیه سازی روش پیشنهادی با در نظر گرفتن خروج یک PMU نشان داده شده است. با مشاهده نتایج به دست آمده از جدول (۵) مشخص می شود که برای طراحی WAMS با استفاده از روش پیشنهادی نیاز است که تعداد زیادی از شین های

جدول ۵- طراحی WAMS در حالت خروج یک PMU

سامانه مورد مطالعه	تعداد PMU	محل نصب PMU	درصد شبکه ارتباطی	تعداد CI Node ها	مکان PDC	هزینه کل WAMS (میلیون دلار)
۳۰ شینه IEEE	۱۵	۱،۲،۳،۶،۷،۱۰،۱۲،۱۳،۱۵،۱۶،۱۹،۲۰،۲۴،۲۷،۲۹	۳۴/۸۰	۱۹	۶	۲/۱۱۸۸
۳۹ شینه IEEE	۲۸	۱،۲،۳،۶،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۳،۱۴،۱۶،۱۷،۱۹،۲۰،۲۲،۲۳،۲۵،۲۶،۲۹،۳۰،۳۱،۳۲،۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷،۳۸	۷۱/۱۲	۳۵	۱۶	۵/۴۱۲
۱۵۳ شینه ایران	۵۴	۱،۳،۴،۶،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۶،۱۸،۱۹،۲۱،۲۲،۲۳،۲۴،۲۸،۲۹،۳۰،۳۲،۳۳،۳۴،۳۶،۳۸،۴۲،۴۸،۵۵،۵۸،۶۳،۶۵،۶۶،۶۹،۷۵،۸۰،۸۳،۸۶،۹۱،۹۳،۹۸،۱۰۰،۱۰۴،۱۱۷،۱۱۹،۱۲۱،۱۲۵،۱۲۷،۱۲۹،۱۳۴،۱۳۷،۱۴۴،۱۴۷،۱۴۹،۱۵۳	۵۱/۲۶	۶۳	۱۱۴	۱۰/۰۲۳

روش بلمن فورد و روش بهینه سازی باینری PSO استفاده شده است.

#### ۵- ارائه راهکار جهت رفع تهدید

برای تأیید کارایی روش پیشنهادی، این روش بر روی شبکه های استاندارد ۳۰ و ۳۹ شینه IEEE و شبکه برق ایران مورد آزمایش قرار گرفته است. بدین منظور، عملکرد عادی سامانه و سه سناریو تروریستی در نظر گرفته شده است. این سه سناریو شامل اقدامات خراب کارانه ای است که منجر به از دست رفتن یک خط انتقال، خروج یک PMU از سامانه WAMS و از دست رفتن دو خط انتقال می شود. نتایج شبیه سازی نشان داد که در صورتی که حادثه تروریستی دارای بعد وسیع تری باشد، هزینه مورد نیاز برای برپایی سامانه WAMS بیشتر است. هم چنین، می توان با تخصیص هزینه بیشتر، حفاظت سامانه را در برابر سناریوهای مختلف و پیچیده تر تروریستی افزایش داد.

بر اساس مطالعه انجام شده در این مقاله، می توان دریافت که با توجه به اهمیت صنعت برق به عنوان یک صنعت زیرساختی، تامین برق مطمئن و با کیفیت امری ضروری است. لذا، برای کاهش و به حداقل رساندن تهدیدات در حوزه پدافند غیرعامل و ایمن سازی صنعت برق کشور، لازم است که سرمایه گذاری مناسبی صورت پذیرد.

هم چنین، لازم است با انجام یک مطالعه جامع و دقیق بر روی شبکه برق کشور، نقاط ضعف شبکه را از منظر پایداری و قابلیت اعتماد مورد بررسی قرار داد. هم چنین، توسعه شبکه برق کشور باید به گونه ای باشد که چالش ها و نقاط ضعف سامانه را بهبود بخشد. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش می توان اذعان داشت که هر چه بخواهیم قابلیت اعتماد شبکه را بالا ببریم، باید هزینه بیشتری صرف کنیم. لذا، می توان بحث استفاده از واحدهای تولید پراکنده برای نقاطی که تامین برق آن ها بسیار حیاتی است را مورد بررسی قرار داد. یکی دیگر از مسائلی که حائز اهمیت است، توانمندسازی پرسنل بهره برداری و بالابردن آگاهی آنان نسبت به مسائل پدافند غیرعامل در صنعت برق است.

#### ۷- منابع

1. Gh. Eisazadeh, A. Saeidi, A. Nazarkhah, A. Jahani, "Increasing Military Grid Security using Passive Defense," Geopoletic congress of Iran, 2013 (In Persian).
2. E. Abiri, F. Rashidi, T. Niknam, and M. R. Salehi, "Optimal PMU placement method for complete topological observability of power system under various contingencies," Electric Power and Energy Systems, vol. 61, Issue 1, pp. 585-593, 2014.
3. K. P. Chin, W. Liu, C. S. Yu, and J. A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," IEEE Transaction of Power Delivery, vol. 21, Issue 1, pp. 1128-1136, 2006.
4. C. W. Liu and J. Thorp, "Application of synchronized Phasor Measurements to Realtime Transient Stability Prediction," Proc.

#### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی برای جایابی PMU و طراحی WAMS در شبکه برق ایران جهت حفظ رویت پذیری سامانه در زمانی که حادثه تروریستی اتفاق افتاده است، ارائه شده است. در روش پیشنهادی از

16. B. Wang, D. Liu, and L. Xiong, "An improved ant colony system in optimizing power system PMU placement problem," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-3, 2009.
17. F. Aminifar, C. Khodaei, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 24, pp. 1014-1020, 2009.
18. N. H. Abbasy and H. M. Ismail, "A unified approach for the optimal PMU location for system state estimation," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 24, pp. 806-813, 2009.
19. F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Contingency-Constrained PMU placement in power networks," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 25, Issue 1, pp. 516-523, 2010.
20. C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, and N. R. Watson, "An optimal PMU placement method against measurement loss and branch outage," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 101-107, 2007.
21. S. Chakrabarti and E. Kyriakides, "Optimal placement of phasor measurement units for observability," *IEEE Transaction Power Systems*, vol. 23, pp. 1433-1440, 2012.
22. J. B. London, S. A. Piereti, S. Benedito, and N. G. Bretas, "Redundancy and analysis of conventional and PMU measurements," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 24, pp. 1629-1630, 2009.
23. A. Enshae, R. Hooshmand, and F. H. Fesharaki, "A new method for optimal placement of phasor measurement units to maintain full network observability under various contingencies," *Electric Power Systems*, vol. 89, pp. 1-10, 2012.
24. J. R. Kennedy and C. Eberhart, "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," *IEEE Int. Con. on Systems, Man, and Cybernetics, Computational Cybernetics and Simulation*, Vol. 5, PP. 4104-4108, 1997.
25. T. H. Cormen, C. E. Lieserson, R. L. Rivest, and C. Stein, "Introduction to Algorithm," 2nd Edition, MIT Press, Cambridge, 2001.
26. "System test cases Archive," <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>, 2015.
27. H. B. Puttgen, "Computational cycle time evaluation for steady state power flow calculations," *School of Electrical Engineering Institute of Technology, Georgia*, 1985.
5. T. T. Nguyen and V. L. Nguyen, "Application of wide-area network of phasor measurements for secondary voltage control in power systems with FACTS controllers," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005.
6. A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *IEEE Computer Application Power*, vol. 1, Issue 1, pp. 10-15, 1993.
7. N. H. Abbasy and H. M. Ismail, "A unified approach for the optimal PMU location for power system state estimation," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 24, Issue 1, pp. 806-813, 2009.
8. B. Gou, "Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 23, Issue 1, pp. 1099-1104, 2008.
9. F. A. Aminifar, Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Contingency constrained PMU placement in power networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, Issue 1, pp. 516-523, 2010.
10. S. Chakrabarti and E. Kyriakides, "Optimal placement of phasor measurement units for power system observability," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 23, Issue 1, pp. 1433-1440, 2008.
11. J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *International Journal of Electrical Power*, vol. 28, pp. 223- 231, 2006.
12. F. J. Marin, F. Garcia-Lagos, G. Joya, and F. Sandoval, "Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks," *Electronics Letters*, vol. 39, pp. 1403-1405, 2003.
13. B. Mohamadi, H. Mokhtari, M. Parniani, and M. Salehi, "Optimal Placement of PMUs for Iran's Grid Observability," *Electric International Conference*, vol. 23, 2008 (In Persian).
14. M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and A. R. Shirani, "Optimal placement of phasor measurement units: Particle swarm optimization approach," *International Conf. on Intelligent Systems applications to Power Systems*, pp. 1-6, 2007.
15. M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and B. Mozafari, "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm," *International Journal of Electric Powewr*, vol. 33, pp. 28-34, 2011.

---

# Design of Wide Area Measurement System to Maintain Network Observability in Critical Condition

S. Bahrami, R. Ghaffarpour\*, R. Mirmotahari

## Abstract

The increase in the power grid security is one of the most important goals of the passive defense. On the other hand, there is the possibility of the sabotage actions and terrorist attacks which can harm the electric grid infrastructure. The infrastructure of the wide Area Measurement System (WAMS), which is based on the Phasor Measurement Units (PMU), is a proper method to control and monitor the power network. The control of the power Network can be done properly by using the infrastructure. In this paper, a new method is presented to find the optimal place of the phasor measurement units and design the communication network infrastructure. The total cost of the WAMS is considered as the objective function. The Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) algorithm is used to solve the optimization problems. Also, the bellman ford algorithm is used to design the communication infrastructure. The standard 30 and 39 bus IEEE and Iran (153 Bus) systems are tested with the proposed method. For this purpose, terrorist attacks scenarios are considered in the simulation. The simulation results show that using a proper design of the WAMS and considering the passive defense in a terrorist attack can protect the visibility of the system.

**Key Words:** *Wide Area Measurement System, Phasor Measurement Unit, Observability, Binary Particle Swarm*