

## ارائه طرح جزیره سازی شبکه برق تهران برای پیشگیری از خاموشی گسترده ناشی از بمباران گرافیتی

حمید زمانی<sup>۱</sup>، حبیب‌اله اعلمی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج ۲- دانشیار، دانشگاه ایوانکی

(دریافت: ۹۵/۰۸/۰۸، پذیرش: ۹۵/۱۱/۳۰)

### چکیده

بمب گرافیتی سلاحی است غیر مخرب که به منظور انهدام منابع توان الکتریکی و خاموشی شبکه برق به کار می‌رود. شکست‌های پیاپی و خاموشی‌ها، مهم‌ترین خطر برای امنیت سامانه قدرت محسوب می‌شوند. اگر فرایند شکست‌های زنجیره‌ای با قطع خطوط بیشتری همراه شود، سامانه قدرت از هم پاشیده خواهد شد. در این مقاله، روش نوینی برای جزیره سازی شبکه برق شهر تهران برای مقابله با حملات گرافیتی و خروج پست‌ها پیشنهاد می‌شود. بر مبنای روش پیشنهادی، پس از رهاسازی بمب گرافیتی بر روی پست برق، دستور خروج آن پست و سپس جزیره سازی شبکه صادر می‌شود. روش جدید ارائه شده، گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری را بر اساس شاخص همبستگی زاویه ژنراتورها تشخیص و خوشه‌بندی می‌کند. این روش قابلیت تعیین گروه‌های هم‌نوا در شبکه‌های قدرت بزرگ با هر تعداد ژنراتور را دارد. این روش از داده‌های آنلاین دستگاه‌های PMU بهره می‌برد که با اندازه‌گیری شاخص هم‌نوایی ژنراتورها به هم، مستقل از مدل سامانه قدرت عمل می‌کند که از مزایای این روش است. نتایج شبیه‌سازی این الگوریتم در نرم‌افزارهای متلب و DIGSILENT بر روی شبکه برق تهران نشان از مؤثر بودن روش پیشنهادی و عملکرد مناسب آن در قبال پایداری گذرا و پایداری ولتاژ که از مشکلات بحث جزیره سازی است دارد.

**کلیدواژه‌ها:** بمب گرافیتی، پایداری گذرا، پدافند غیرعامل، جزیره‌سازی کنترل‌شده، ژنراتورهای هم‌نوا

## Presentation of Tehran Power System Islanding Plan to Avoiding Blackout due to Graphite Bombardment

H. Zamani, H. A. Aalami\*

University of Eyvanekey

(Received: 29/10/2016; Accepted: 18/02/2017)

### Abstract

Graphite bomb is a non-destructive weapon that is used for disturbing electrical power supply and blackouts. Cascading failures and blackouts are the most significant threats for power system security. A power system will be collapsed if the process of cascading failures proceeds by further line tripping. In this paper, a new method for Tehran power system islanding is proposed to encountering graphite attack and substation outage. Based on the proposed method, after the graphite bombs is released on electric substations, substation outage and islanding power system commands is occurred. Thus, a new approach for identifying coherent groups of generators in power systems based on the correlation coefficients between rotor angle oscillations of generators is presented. The method uses a newly proposed clustering index based on the correlation coefficients of generators oscillations which is able to classify any number of generators into coherent groups. The proposed approach uses real time data of generators oscillations via PMUs, so it is able to easily take into account the effect of system detailed modeling. Simulation results, obtained using MATLAB and DIGSILENT software on the Tehran power system show that the proposed algorithm is efficient and have a well performance regarding voltage and transient stability when solving the controlled islanding problem.

**Keywords:** Coherent Generators, Controlled Islanding, Graphite Bombs, Passive Defence, Transient Stability

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

## ۱. مقدمه

ژنراتورهای سنکرون واقع در جزیره مواجه شده که باعث ناپایداری و فروپاشی ولتاژی و فرکانسی آن جزیره و خاموشی بخش عظیمی از سامانه قدرت خواهد شد [۲].



شکل ۱. نحوه عملکرد بمب گرافیتی مدل CBU-94/BLU-114/B

در طی عملیات طوفان صحرا در جنگ خلیج فارس در سال ۱۹۹۱ میلادی، الیف گرافیتی در کلاهدک جنگی موشک‌های کروزر تام هوک (KIT-2) علیه تأسیسات برق عراق از دریا شلیک می‌شد، به کار رفت. در این مرحله، ۸۵ درصد ظرفیت برق عراق را از کار انداخت. اهداف مورد نظر در این حمله بیشتر پست‌های توزیع و سوئیچینگ برق بود تا خود نیروگاه‌های برق. عراق برای مقابله با این سلاح مجبور شد، قبل از اصابت موشک‌های مزبور، سامانه‌های تولید و انتقال برق خود را غیر فعال کند. بعد از جنگ خلیج فارس، نیروی هوایی آمریکا تصمیم گرفت که نوعی از این سلاح را که بتواند از هواپیما پرتاب شود، بسازد. عملکرد این نوع بمب به گونه‌ای است که پس از انفجار بمب مادر (بمب خوشه‌ای مانند (CBU\_97))، بمب‌های کوچک‌تر (LU-114) با استفاده از چتر سرعت خود را کم می‌کنند، سپس در ارتفاع معینی منفجر شده و الیف کربن در هوا پراکنده می‌شود. مطابق بررسی باقیمانده‌های این بمب‌ها، تخمین زده می‌شود هر بمب دارای ۱۴۷ حلقه الیف کربنی باشد. این بمب‌ها همچنین در جنگ سال ۲۰۰۳ عراق نیز به وفور مورد استفاده قرار گرفت [۳].

در جنگ ناتو علیه یوگسلاوی سابق نیز نیروهای متحدین از بمب‌های گرافیتی BLU-114/B موسوم به بمب‌های نرم علیه تأسیسات برق صرب‌ها استفاده نمودند. به دنبال این حمله ابتدا ۷۰ درصد برق کشور یوگسلاوی و در حملات بعد ۱۰۰ درصد برق قطع شد. این حملات در نهایت موجب شکست این کشور از نیروهای ناتو گردید. در توطئه آزادسازی گروگان‌های سفارت آمریکا در تهران قرار بود از این بمب استفاده شود. هدف در این حمله پست توزیع تغذیه‌کننده سفارت بود [۱].

روش مقابله با بمب‌های گرافیتی: استفاده از چترهای باز

تأمین امنیت به عنوان یکی از اساسی‌ترین نیازهای انسانی، می‌تواند علاوه بر تأمین نیازهای اصلی، زمینه‌ساز تأمین سایر نیازها نیز باشد. کاستن از آسیب‌پذیری نیروی انسانی، تأسیسات و تجهیزات حیاتی کشور در حملات خصمانه و مخرب دشمن و استمرار فعالیت‌ها در شرایط بحرانی ناشی از جنگ، از جمله موارد ضروری در برنامه‌ریزی‌های مربوط به سکونتگاه‌های انسانی است که از آن عموماً تحت عنوان پدافند غیرعامل یاد می‌شود. پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که مستلزم به‌کارگیری جنگ‌افزار و تسلیحات نبوده و با اجرای آن می‌تواند از وارد شدن خسارت مالی به تجهیزات و تأسیسات حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیرنظامی و تلفات انسانی جلوگیری نموده و یا میزان خسارات و تلفات ناشی از حملات و بمباران هوایی موشکی دشمن را به حداقل ممکن کاهش داد. در بحث پدافند غیرعامل، نیروگاه‌ها و شبکه‌های انتقال برق جزء مراکز حساس طبقه‌بندی شده‌اند که در صورت انهدام یا اختلال در کل یا قسمتی از آن‌ها، موجب بروز بحران، آسیب و صدمات قابل توجه در نظام سیاسی، هدایت، کنترل و فرماندهی، تولیدی و اقتصادی، پشتیبانی، ارتباطی و مواصلاتی، دفاعی با سطح تأثیرگذاری منطقه‌ای می‌شود [۱].

مهم‌ترین ویژگی عنصر گرافیت، قوی‌ترین رسانای جریان برق است. به نظر می‌رسد در بمب گرافیتی از این خاصیت استفاده شده است؛ بدین صورت که مطابق شکل (۱) پس از انفجار، گرافیت که بیشتر از جنس کربن است، با مواد حلال کربن ترکیب شده و به صورت بخار درمی‌آید. این بخار سنگین بوده و سریعاً بر سطح زمین می‌نشیند؛ بنابراین استفاده از این بمب در نیروگاه‌های برق باعث آلودگی سطح تجهیزات نیروگاه شده و باعث اتصالی و از کار افتادن نیروگاه می‌شود. بعد از خروج نیروگاه یا پست برق از شبکه، ناپایداری در شبکه قدرت شروع شده و المان‌های دیگر سامانه خارج می‌شود. حوادث پی‌درپی که به دنبال یک حادثه اولیه ایجاد می‌شوند از مشخصه‌های رفتاری سامانه‌های قدرت در فرآیند شکل‌گیری خاموشی‌ها می‌باشند. حوادث پی‌درپی که شامل خروج‌های متوالی و پی‌درپی خطوط، ترانسفورماتورها و ژنراتورها است به واسطه محدودیت‌ها و ضعف عناصر شبکه و همچنین عملکرد سامانه حفاظتی ایجاد می‌شوند و به تدریج باعث تضعیف ساختار شبکه می‌گردند. تجزیه و چند تکه شدن ساختار شبکه و شکل‌گیری جزایر به شکل کنترل نشده از پیامدهای حوادث پی‌درپی است. جزایری که در روند طبیعی و خودبه‌خودی شکل می‌گیرند ممکن است دارای عدم توازن و تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو تولید و مصرف باشند که در این صورت با مشکلات جدی فرکانسی، ولتاژی و توان-زاویه

می‌توان ادعا کرد که برای جلوگیری از تجزیه سامانه قدرت به صورت کنترل نشده و کاهش خطر خاموشی، جزیره سازی کنترل شده به عنوان یک عمل پیشگیرانه در نظر گرفته می‌شود [۴].

راهبرد جزیره سازی کنترل شده سامانه قدرت، شامل سه مسئله اصلی است [۵]:

مسئله زمانی که شامل تعیین زمان مناسب اعمال راهبرد تجزیه سامانه است، مسئله مکانی که شامل شناسایی جزایر ممکن و مناسب است و مسئله چگونگی که شامل پیاده‌سازی سناریوی جزایر شناسایی شده به صورتی مناسب که هیچگونه پی آمد استاتیکی و دینامیکی در هیچ کدام از جزایر به وجود نیاید، است.

در این مقاله با فرض اینکه قدم اول یعنی شناسایی و تشخیص زمان مناسب جهت جزیره سازی شبکه انجام و تصمیم برای جزیره سازی گرفته شده است، الگوریتمی برای حل مسئله دوم یعنی تشخیص جزایر مناسب و پایدار، ارائه گردیده است.

در سامانه‌های قدرت، برخی از اختلالات ممکن است موجب بروز نوسانات بین ژنراتورها شوند. این موضوع منجر به از دست رفتن سنکرونیزم بین ژنراتورها شده و گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری تشکیل می‌شود. از دیگر عوامل که می‌تواند موجب خاموشی و یا به عبارت دقیق‌تر فروپاشی سامانه قدرت شود، نوسانات ژنراتوری است. با جزیره‌ای کردن شبکه قدرت به صورت صحیح می‌توان ژنراتورهای غیر هم‌نوی شبکه را از همدیگر جدا نموده و از خروج از سنکرون ژنراتورها جلوگیری نمود. بنابراین مهم‌ترین و یا حداقل اولین مسئله در جزیره سازی سامانه قدرت شناسایی هم‌نوی ژنراتورها است.

در سامانه‌های قدرت واقعی می‌توان ادعا کرد که تعداد گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری که تابعی از ساختار شبکه است، تعیین کننده تعداد جزایر در فرآیند جزیره سازی است.

در حالت کلی دو ماشین را همسو یا هم‌نوا گویند در صورتی که پس از وقوع یک اغتشاش دارای رفتار دینامیکی مشابهی باشند. برای تعیین ماشین‌های همسو روش‌های زیادی وجود دارد که به طور کلی مطالعات انجام گرفته در این زمینه را می‌توان به دو قسمت عمده شامل مطالعات انجام گرفته در حوزه زمان و مطالعات انجام گرفته در حوزه فرکانس تقسیم کرد [۶ و ۷].

در این مقاله برای گروه‌بندی ژنراتورها از نظریه هم‌نوی آرام<sup>۱</sup> استفاده شده است که در حوزه روش‌های مبتنی بر زمان قرار

شونده بر روی نیروگاه‌ها و پست‌های برق، استفاده از سقف‌های پلاستیکی برای کلیه تجهیزات برق‌دار، ایزولاسیون بدنه کلیه تجهیزات برقی و... از راه‌های سخت‌افزاری جلوگیری از تأثیرات بمب‌گرافیتی است که به کارگیری این روش‌ها با توجه به وسعت شبکه برق ایران و روباز بودن کلیه نیروگاه‌ها، پست‌ها و خطوط انتقال فشارقوی و ضعیف عملی به نظر نمی‌رسد. در نتیجه نیاز به یک روش نرم‌افزاری است که پس از حمله بمب‌گرافیتی به تأسیسات برق کشور، از فروپاشی شبکه برق ایران جلوگیری شود. پس از اصابت بمب‌گرافیتی به تأسیسات برق اتصال کوتاه شدید الکتریکی رخ می‌دهد که موجب نوسانات ژنراتوری در شبکه شده و ژنراتورهای شبکه را دچار ناهمگامی (ناهم‌نوی) می‌کند که ادامه این نوسانات موجب قطع شدن اتصالات ضعیف دینامیکی بین ژنراتورها شده و جزایر الکتریکی ناخواسته و ناپایدار تشکیل می‌شود که این جزایر قادر به بهره‌برداری پایدار نبوده و همه آن‌ها دچار خاموشی می‌شوند. الگوریتم این مقاله جهت جزیره سازی شبکه قدرت پس از تشخیص حمله ارائه شده است. بدین صورت که پس از رهاسازی بمب بر روی پست برق یا نیروگاه هدف، توسط سامانه راداری محل اصابت بمب تشخیص داده می‌شود. بین رهاسازی بمب تا اصابت آن به تأسیسات حدود ۳۰ ثانیه فرصت است. سپس واحد مورد هدف از سرویس خارج می‌شود. خروج این واحد نوسانات گذرا در شبکه به وجود می‌آورد. سپس برای میرا کردن این نوسانات گذرا راهی به جز جزیره سازی شبکه قدرت وجود ندارد. دستور جزیره سازی طبق الگوریتم داده می‌شود و بقیه شبکه از فروپاشی نجات داده می‌شود [۱ و ۳].

روش جدید ارائه شده در این مقاله، گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری را بر اساس شاخص همبستگی زاویه ژنراتورها تشخیص و خوشه‌بندی می‌کند. این روش قابلیت تعیین گروه‌های هم‌نوا در شبکه‌های قدرت بزرگ را دارد. این روش از داده‌های آنالیز مخبره شده توسط دستگاه‌های PMU بهره می‌برد که با اندازه‌گیری شاخص هم‌نوی ژنراتورها به هم، مستقل از مدل سامانه قدرت عمل می‌کند. از مزایای این الگوریتم سرعت بالا، عدم نیاز به تعیین مدل دقیق و کامل شبکه قدرت و قابلیت اجرا در شبکه‌های بزرگ قدرت است.

## ۲. الگوریتم جزیره‌سازی شبکه قدرت

تقسیم و تجزیه شبکه قدرت و یا همان جزیره سازی کنترل شده عبارت است از تجزیه سامانه قدرت به ریز شبکه‌های پایدار دینامیکی و استاتیکی به صورت ارادی با تعیین خط‌های انتقال مناسب و درنهایت باز نمودن آن خطوط. پس از تجزیه سامانه قدرت، چند جزیره کل سامانه را تشکیل می‌دهند و هر یک از جزیره‌ها در یک حالت پایدار بهره‌برداری می‌شوند. در مجموع

<sup>۱</sup> Slow Coherency

می‌گیرد. طبق این روش، گروه‌های ژنراتوری همسو تقریباً مستقل از اندازه اغتشاش رخ داده در شبکه هستند.

تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای جزیره سازی شبکه‌های قدرت ارائه شده‌اند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. با در نظر گرفتن گروه‌های هم‌نوای ژنراتوری یک روش دو مرحله‌ای برای جستجوی راهبردهای جداسازی ممکن بر اساس روش OBDD<sup>۱</sup> ارائه شده است [۸]. بدین معنی که با استفاده از توابع بولی از میان تمام راهبردهای موجود، راهبرد که دو شرط تعادل توان و هم‌نوایی ژنراتورها را رعایت می‌نمایند، تعیین و به عنوان راهبردهای ممکن نام‌گذاری می‌شوند. سپس با استفاده از محاسبات پخش بار، توان خطوط در هر یک از راهبردهای ممکن بررسی و راهبرد مناسب از میان راهبردهای ممکن انتخاب می‌شود. در دیگر مقالات ارائه شده روش گذشته با استفاده از ساده‌سازی شبکه قدرت برای سامانه‌های بزرگ ارتقا داده شده است [۹]. در ادامه این الگوریتم‌های مبتنی بر OBDD ارتقاء یافته قیود بیشتری برای یافتن یک راهبرد مناسب جزیره سازی در نظر گرفته می‌شود [۶]، یعنی علاوه بر PBC، RLC و SSC که در مراجع قبلی استفاده می‌شد، قیودهای دیگری مانند TVC نیز بررسی شده است که سعی در برقراری پایداری گذرا جزایر پس از تشکیل دارد. یکی دیگر از الگوریتم‌ها، با استفاده از روش کات ست کمینه<sup>۲</sup> در نظریه گراف‌ها و در نظر گرفتن گروه‌های هم‌نوای ژنراتوری روشی برای شناسایی راهبردهای جداسازی مناسب، ارائه شده است [۱۰]. این روش مبتنی بر دو الگوریتم جستجوی اولیه گسترده (BFS)<sup>۳</sup> و جستجوی اولیه دقیق (DFS)<sup>۴</sup> در نظریه گراف‌ها است. روش دیگر، یک روش دو مرحله‌ای با استفاده از دسته‌بندی طیفی<sup>۵</sup> (SCCI) نظریه گراف‌ها و با در نظر گرفتن گروه‌های هم‌نوای ژنراتوری برای یافتن راهبرد جداسازی مناسب ارائه شده است [۱۱]. از دیگر کارهای ارائه شده روشی برای یافتن یک راهبرد مناسب جزیره سازی ارائه شده است که همانند روش‌ها شرح داده شده، دربر گیرنده قیود مربوط به پایداری استاتیکی جزایر تشکیل شده است [۱۲]. از الگوریتم‌های هوشمند در حل این مسئله استفاده شده است و مثلاً برای یافتن تعدادی از جواب‌های مسئله جداسازی شبکه قدرت یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO)<sup>۶</sup> ارائه شده است [۱۳]. از آنجا که بارهای شبکه دارای درجه اهمیت متفاوتی هستند و برخی از

آن‌ها حیاتی می‌باشند (مانند بار مربوط به یک بیمارستان و یا یک ارگان نظامی)، برای هر یک از بارهای شبکه یک ضریب اهمیت تعریف می‌شود. در مقالات ارائه شده، تمرکز اصلی بر روی قید تعادل تولید و بار در جزیره، هم‌نوایی ژنراتورها، کمینه کردن توان خطوط قطع شده و همچنین سرعت الگوریتم‌های پیشنهادی بوده است و موضوعات مهمی چون پایداری ولتاژ و پایداری گذرا کمتر دیده شده است؛ بنابراین روش‌های ارائه شده، کارآمد نیست چون نمی‌تواند پایداری جزایر را پس از جزیره سازی تضمین نماید [۱۴]. در بحث جزیره سازی قیود فراوانی وجود دارد. قیودی مانند هم‌نوایی ژنراتورها، تعادل بار، محدودیت انتقال توان در خطوط هر جزیره، محدودیت توان راکتیو در هر جزیره و... که در نظر گرفتن همه آن‌ها مسئله را بسیار پیچیده می‌کند و در تمامی مقالات ارائه شده از در نظر گرفتن توأمان همه قیود چشم‌پوشی شده است و صرفاً چند قید را در نظر گرفته‌اند. از بین تمامی این قیود، قید هم‌نوایی ژنراتورها به دلیل آنکه شاخصی جهت پیش‌بینی ناپایداری گذرا در شبکه، یک قید بسیار حیاتی برای شبکه است که عدم در نظر گرفتن آن عملاً باعث تشکیل جزیره‌هایی می‌شود که فاقد پایداری هستند یعنی، جزیره‌های تشکیل شده به حالت وضعیت پایدار نمی‌رسند. اما قیود عدم تعادل بار و محدودیت توان در درجه دوم اهمیت قرار دارند زیرا مشکل جدی برای شبکه ایجاد نمی‌کنند و می‌توان با قطع بار توسط دیسپاچینگ محلی هر جزیره به پایداری رسید.

در این مقاله سعی شده است تمرکز روی الگوریتم جدید پیشنهادی در بحث هم‌نوایی ژنراتورها باشد.

**نظریه هم‌نوایی:** در حالت کلی دو ماشین را همسو گویند در صورتی که پس از وقوع یک اغتشاش دارای رفتار دینامیکی مشابهی باشند. برای تعیین ماشین‌های همسو روش‌های زیادی وجود دارد که به طور کلی مطالعات انجام گرفته در این زمینه را می‌توان به دو قسمت عمده تقسیم کرد. به دنبال اغتشاشات بزرگ، گروه‌های ژنراتورها تمایل دارند که با همدیگر نوسان کنند. از این رو توجه ما بر روی نوسانات بین ناحیه‌ای، گروه‌هایی از ماشین‌ها است. این نوسانات از نظر فرکانس از نوسانات بین ماشین‌هایی که از نظر الکتریکی به همدیگر نزدیک هستند، پایین‌تر است. در نتیجه بر اساس مقایسه زمانی این دو پدیده جدایی وجود دارد که در حوزه مطالعات انجام گرفته در حوزه زمان جای دارد. یک سامانه قدرت را می‌توان به صورت یک مجموعه از معادلات دیفرانسیل غیر خطی و معادلات جبری بیان کرد. در زمان وقوع اغتشاشات کوچک روش تحلیل پایداری سیگنال کوچک را می‌توان برای بررسی رفتار شبکه به کار برد. در این نوع سامانه‌ها رفتار دینامیکی هر کدام از متغیرهای حالت

<sup>1</sup> Ordered Binary Decision Diagram

<sup>2</sup> Minimum Cutset

<sup>3</sup> Breadth First Search

<sup>4</sup> Depth First Search

<sup>5</sup> Spectral Clustering

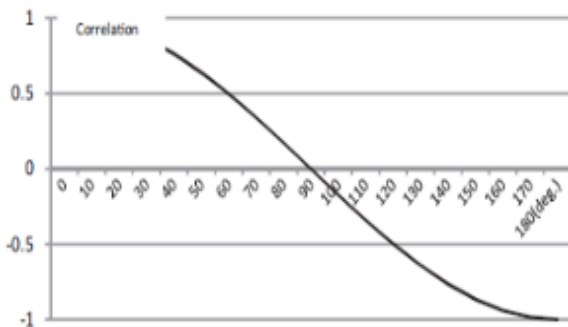
<sup>6</sup> Particle Swarm Optimization

تفصیلی انتخاب شده و همبستگی آن‌ها نسبت به هم محاسبه می‌شود. در بحث هم‌نوایی، ژنراتورهای هم‌گروه دارای ضریب همبستگی نزدیک به یک نسبت به هم خواهند بود [۱۹ و ۲۰].

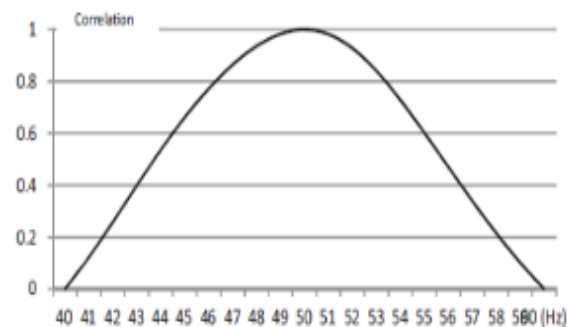
معیار همبستگی (Correlation) نمایانگر میزان وابستگی خطی بین دو متغیر است. ضریب همبستگی، شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. ضریب همبستگی برای یک پنجره زمانی به طول  $n$  نمونه از منحنی‌های هر مؤلفه تفصیلی باشند. در رابطه (۱)  $x_i$  و  $x_j$  معرف نمونه‌هایی از سیگنال  $i$  و  $j$  می‌باشند [۲۱].

$$CR_{ij} = \frac{n \sum (x_i x_j) - (\sum x_i)(\sum x_j)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum x_j^2 - (\sum x_j)^2]}} \quad (1)$$

ضریب همبستگی دو سیگنال سینوسی هم‌فرکانس در یک دوره تناوب نسبت به هم به ازای اختلاف فازهای متفاوت بین آن‌ها در بازه  $[-1, 1]$  تغییر خواهد نمود که دو سیگنال هم‌فاز دارای ضریب همبستگی یک و دو سیگنال با اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه دارای ضریب همبستگی -۱ می‌باشند. در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب تأثیر تفاوت فاز و فرکانس در ضریب همبستگی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. تأثیر تفاوت فاز دو موج در ضریب همبستگی آن‌ها



شکل ۳. تأثیر تفاوت فرکانس دو موج در ضریب همبستگی آن‌ها

سامانه عملاً یک ترکیب خطی از رفتار دینامیکی مدهای خطی سامانه است. المان‌های موجود در بردارهای ویژه سمت راست اندازه مشارکت مدها در یک متغیر حالت خاص را نشان می‌دهند. این مفهوم در درک الگوریتم‌های گروه‌بندی بر اساس نظریه همسویی آرام دارای اهمیت است که در حوزه مطالعات انجام گرفته در حوزه فرکانس قرار می‌گیرد [۱۵].

## ۲. توصیف روش پیشنهادی

ژنراتورهایی در یک گروه هم‌نوایی قرار می‌گیرند که شکل موج منحنی زاویه روتور آن‌ها مشابه همدیگر باشند، هر چند این امر در واقعیت اتفاق نمی‌افتد و این منحنی‌ها می‌توانند به یکدیگر نزدیک باشند ولیکن هیچ‌گاه دقیقاً مشابه یکدیگر نمی‌باشند. تعداد گروه‌ها و همچنین آرایش آن‌ها، به نقطه کار و ساختار شبکه وابسته است. هر گونه تغییر در نقطه کار و ساختار شبکه می‌تواند یک گروه هم‌نوا را به گروه‌های کوچک‌تر و یا چند گروه کوچک را به گروه بزرگ‌تر تبدیل کند. به دلیل ماهیت متغیر گروه‌های هم‌نوا، استفاده از اطلاعات آنالین برای تشخیص گروه‌های هم‌نوا، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. واحد اندازه‌گیری فازور (PMU)<sup>۱</sup> یک تجهیز مناسب برای به‌دست آوردن اطلاعات آنالین شبکه است [۱۶].

در این پژوهش، برای شناسایی گروه‌های هم‌نوایی ژنراتوری روش جدیدی مبتنی بر شاخص وابستگی خطی زاویه روتور ژنراتورها ارائه شده است. ویژگی این روش عدم استفاده از مدل ریاضی شبکه و استفاده صرف از کمیات اندازه‌گیری اطلاعات شبکه است. مستقل بودن این روش از مدل سامانه قدرت و نوع خطای رخ داده در شبکه، سبب افزایش سرعت الگوریتم نسبت به نمونه‌های مشابه شده است. در این روش سیگنال نوسانات زاویه روتور ژنراتورها در بازه زمانی مورد مطالعه توسط دستگاه‌های PMU به طور سنکرون و هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شوند. سپس با استفاده از شاخص معرفی شده، وابستگی هر ژنراتور به دیگر ژنراتورها تعیین شده و گروه‌های هم‌نوایی تعیین می‌گردند [۱۷ و ۱۸].

**شاخص هم‌نوایی ژنراتورها:** با مقایسه وضعیت سیگنال‌های تفصیلی ژنراتورها نسبت به یکدیگر، گروه‌های هم‌نوایی ژنراتوری متناظر با فرکانس مؤلفه تفصیلی آن مرحله را شناسایی می‌شود. برای انجام این مقایسه از ضریب همبستگی بین دو سیگنال استفاده شده است. در این روش سیگنال‌های متناظر با زاویه روتور ژنراتورها به صورت دو به دو در سطح مورد نظر مؤلفه

<sup>۱</sup> Phasor Measurement Unit

**گام سوم:** در این مرحله از پنجره زمانی گام دوم ضرایب همبستگی بین هر جفت ژنراتور محاسبه می‌گردد.

**گام چهارم:** سپس تمامی ضرایب همبستگی هر جفت از بیشینه به کمینه مرتب می‌شود.

**گام پنجم:** از لیست گام چهارم، ژنراتورهای متناظر با بیشینه ضرایب همبستگی انتخاب می‌شوند و مطابق مراحل زیر دسته‌بندی می‌شوند.

**مرحله اول:** اگر جفت ژنراتور انتخاب شده در لیست گروه‌هایی که قبلاً تشکیل شده‌اند هستند این جفت ژنراتور به همان گروه تعلق می‌گیرند و در غیر این صورت به مرحله دوم می‌رویم.

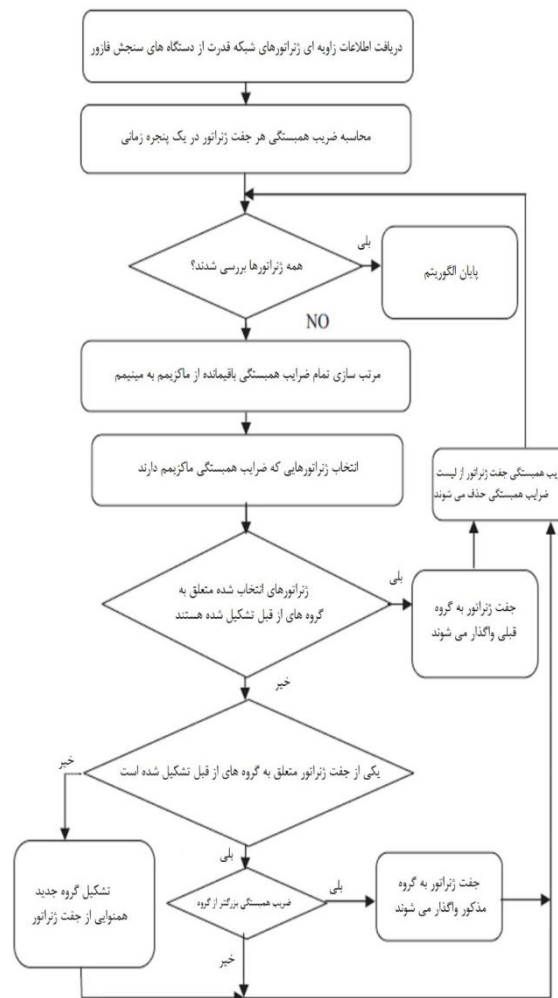
**مرحله دوم:** اگر یکی از ژنراتور متعلق به گروه‌های قبلی باشد، میانگین ضرایب همبستگی آن گروه محاسبه می‌شود و اگر ضریب این جفت ژنراتور از میانگین آن گروه بیشتر باشد این ژنراتور نا هم گروه نیز به آن گروه اضافه می‌گردد و اگر از میانگین آن گروه کمتر باشد این ضریب از لیست ضرایب همبستگی حذف شده و الگوریتم تکرار می‌گردد. در غیر این صورت به مرحله سوم می‌رویم.

**مرحله سوم:** اگر جفت ژنراتور در هیچ گروه قبلی نبود گروه جدیدی تشکیل می‌شود.

**گام ششم:** ضریب همبستگی متناظر با جفت ژنراتور مرحله قبل از لیست ضرایب حذف می‌شوند.

**گام هفتم:** اگر ضرایب همبستگی هر جفت ژنراتور در نظر گرفته شده باشند گروه‌بندی ژنراتورها تمام شده و نتایج نهایی ارائه می‌شود.

**روند اجرای الگوریتم پیشنهادی:** در شکل (۴) روند اجرای الگوریتم به شرح زیر است:



شکل ۴. روند اجرای الگوریتم تعیین ژنراتورهای هم‌نوا

**گام اول:** زاویه ژنراتورهای شبکه به صورت لحظه‌ای توسط فازورهای شبکه قدرت (PMU)ها سنجش می‌شوند. این اطلاعات با فرکانس نمونه‌برداری زیاد توسط شبکه مخابراتی به مرکز دیسپاچینگ ارسال می‌شود. به عبارت دیگر زیر ساعت لازم برای انجام مانورهای آنلاین در شبکه قدرت تجهیز آن به سامانه‌های سنجش لحظه‌ای و شبکه مخابراتی پر سرعت است.

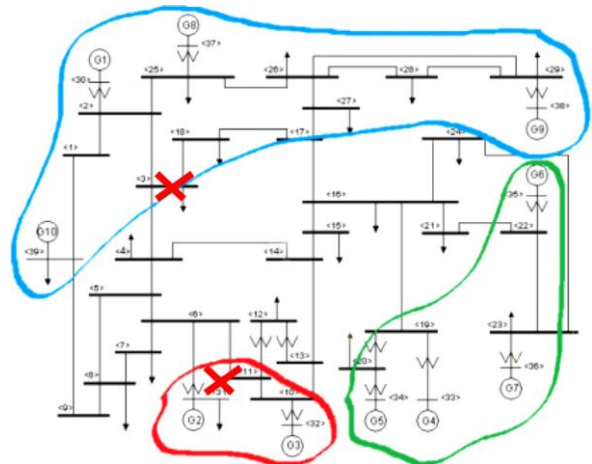
**گام دوم:** یک پنجره زمانی ثابت از تمام سیگنال‌های زاویه روتور ژنراتورهای شبکه برداشته می‌شود. این پنجره زمانی بعد از رخداد حادثه انتخاب می‌شود. پس از حمله بمب گرافیتی به یک پست شبکه برق تهران هدف تعیین ژنراتورهای هم‌نوا شبکه است در نتیجه این پنجره زمانی پس از خروج آن پست از شبکه از تمام سیگنال‌های روتور شبکه انتخاب می‌گردد.

#### ۴. شبیه‌سازی الگوریتم

الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار متلب تهیه و نتایج نهایی آن نیز در نرم‌افزار صنعتی DiGSILENT بررسی شده است. برای درک بهتر روند الگوریتم و مشاهده ماتریس ضرایب همبستگی ژنراتورها ابتدا از یک شبکه کوچک که شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE به عنوان شبکه آزمون استفاده شده و سپس این الگوریتم روی شبکه تهران اجرا شده که به دلیل وجود تعداد بالای ژنراتور و پیچیدگی شبکه آوردن تمام نتایج در این مقاله میسر نبود.

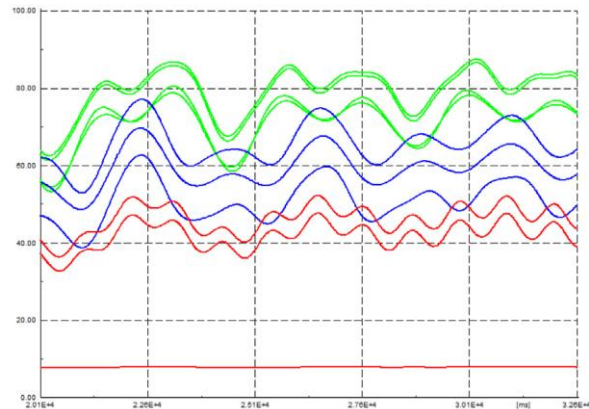
برای مثال، در شبکه ۳۹ شینه IEEE یک رخداد خطا مطابق شکل (۵) روی داده است، نوسانات ژنراتورها در شکل (۶) و ضرایب همبستگی هر جفت ژنراتور در جدول (۱) ارائه شده است.

**اجرای الگوریتم روی شبکه قدرت تهران:** در ادامه، مراحل مختلف سامانه در هنگام حمله مشخص شده و در مورد هر کدام توضیح داده می‌شود. فرض بر آن است که حمله انجام شده است. سامانه تشخیص حمله گرافیتی به عنوان اولین بخش از سامانه پدافند غیرعامل نوین، وظیفه تشخیص این حمله را بر عهده دارد. بعد از تشخیص حمله، فاصله زمانی این تشخیص تا برخورد بمب، پارامتر مهمی در طراحی قسمت حفاظتی سامانه این زمان هر چه بیشتر باشد قدرت مانور بیشتری برای انجام طرح‌های حفاظتی وجود دارد [۲۲].



شکل ۵. رخداد خطا در شبکه ۳۹ شینه IEEE

بعد از تشخیص وقوع حمله، سیگنال مربوط به سامانه حفاظت ارسال می‌شود. اولین و ضروری‌ترین کار در هنگام حمله، کم کردن تأثیر آن بر شبکه است. بنابراین اولین کار، جلوگیری از اتصال کوتاه در پست و خطوط متصل به آن است؛ بنابراین، بی‌برقی پست و خطوط متصل به آن مهم‌ترین اقدام بعد از وقوع حمله است. با توجه به اینکه سامانه بی‌برق است، عملاً سامانه قدرت اتصال کوتاهی را احساس نمی‌کند. یکی از نکات مهم در این قسمت، قطع بودن خطوط از سمت پست‌های مقابل است. صورتی که خط فقط از یک طرف قطع شود، به دلیل برق‌دار بودن از سمت مقابل احتمال اتصال کوتاه در اثر تماس گرافیت با آن وجود دارد. بنابراین با استفاده از سامانه‌های مخابراتی دستور قطع برای پست‌های مقابل نیز باید هم‌زمان با ارسال دستور قطع به کلیدهای محلی ارسال شود. به عبارت بهتر، با این مجموعه اقدامات، از وقوع هر گونه اتصال کوتاه در سامانه قدرت جلوگیری می‌شود.



شکل ۶. یک پنجره زمانی (بر حسب میلی‌ثانیه) از نوسانات زاویه (بر حسب درجه) ژنراتورهای شبکه ۳۹ شینه پس از اعمال خطا

قطع کل پست، یک ضربه قابل توجه به سامانه قدرت است. در زمان بهره‌برداری از سامانه قدرت، از مقیاس  $n-1$  استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، هر سامانه در هنگام بهره‌برداری قادر به تحمل خروج یک المان شامل خط، ترانس و نیروگاه است. حال در هنگام خروج پست، چندین تجهیز هم‌زمان از شبکه خارج می‌شوند. این خروج هم‌زمان ممکن است باعث ناپایداری کل شبکه شود. بنابراین طراحی یک روش حفاظت شامل مجموعه اقدامات اصلاحی، برای جلوگیری از ناپایداری کل شبکه ضروری به نظر می‌رسد. نکته قابل توجه در این روش، حفظ پایداری با کمترین هزینه ممکن است.

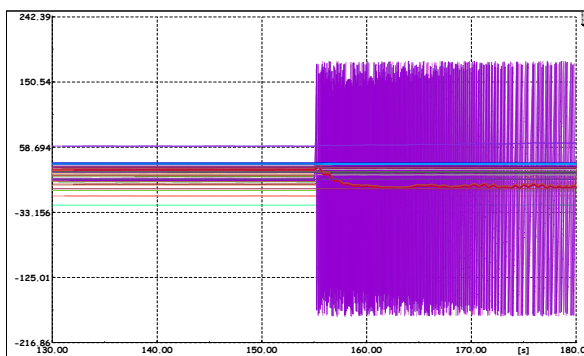
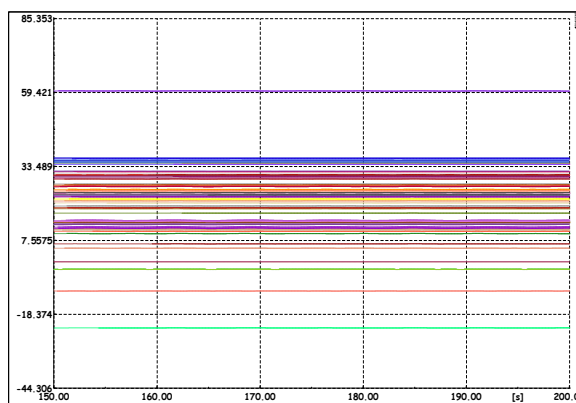
همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، فرض شده است که شبکه سراسری به سامانه‌های اعلان حمله بمب گرافیتی مجهز شده باشند و پس از رهایی بمب بر روی پست‌ها، جهت جلوگیری از اتصال کوتاه پست، تمامی تجهیزات پست از سرویس خارج شوند تا تنش کمتری به شبکه وارد شوند. اکنون تأثیر خروج پست از گل (شکل (۷)) را روی شبکه بررسی می‌شود. جهت مقایسه،

مطابق جدول (۱)، همان‌گونه که مشاهده می‌شود گروه‌بندی بر اساس ضرایب همبستگی بیشینه تعیین می‌شود و گروه‌بندی ژنراتورها انجام می‌شود. برای مثال ژنراتورهای G2 و G3 ضریب همبستگی هم ۰/۹۷ است در حالی که ضریب این دو ژنراتور به بقیه ماشین‌ها منفی و یا ضرایب بیشینه نیست که تأیید کارکرد الگوریتم معرفی شده است. گروه‌های مختلف ژنراتوری به رنگ‌های مختلف در جدول (۱) مشخص شده‌اند.

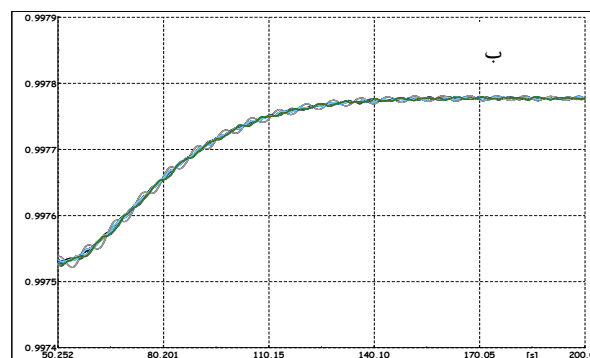
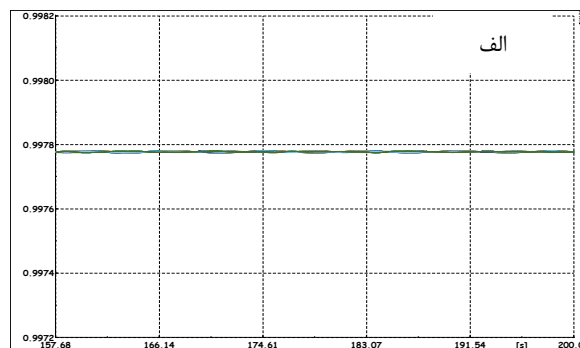
**جدول ۱.** ضرایب همبستگی ژنراتورها ناشی از اعمال خطا در

شبکه ۳۹ شینه IEEE

unit	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G1
G2	1	0.97	-0.04	-0.1	-0.04	-0.03	0.48	0.27	0.49	0.5
G3	0.97	1	-0.06	-0.12	-0.06	-0.06	0.45	0.25	0.49	0.48
G4	-0.04	-0.06	1	0.99	0.99	0.99	-0.57	-0.55	-0.69	-0.51
G5	-0.1	-0.12	0.99	1	0.97	0.97	-0.59	-0.54	-0.69	-0.55
G6	-0.04	-0.06	0.99	0.97	1	1	-0.57	-0.57	-0.69	-0.49
G7	-0.03	-0.06	0.99	0.97	1	1	-0.57	-0.57	-0.68	-0.49
G8	0.48	0.45	-0.57	-0.59	-0.57	-0.57	1	0.95	0.86	0.98
G9	0.27	0.25	-0.55	-0.54	-0.57	-0.57	0.95	1	0.75	0.9
G10	0.49	0.49	-0.69	-0.69	-0.69	-0.68	0.86	0.75	1	0.82
G1	0.5	0.48	-0.51	-0.55	-0.49	-0.49	0.98	0.9	0.82	1

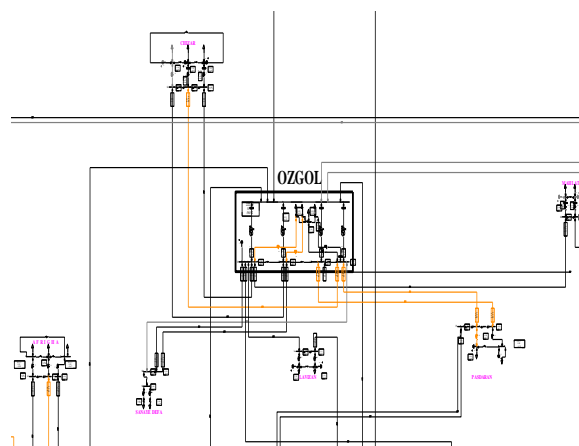


شکل ۸. الف) زاویه ژنراتورها قبل از خروج پست از گُل، ب) زاویه ژنراتورها پس از خروج پست از گُل (بر حسب درجه).



شکل ۹. الف) شتاب زاویه ژنراتورها قبل از خروج پست از گُل، ب) شتاب زاویه ژنراتورها پس از خروج پست از گُل (بر حسب پرینیت).

تغییرات پارامترهای سامانه قبل و بعد از خروج پست در شکل‌های (۸-۱۱) آورده شده است.

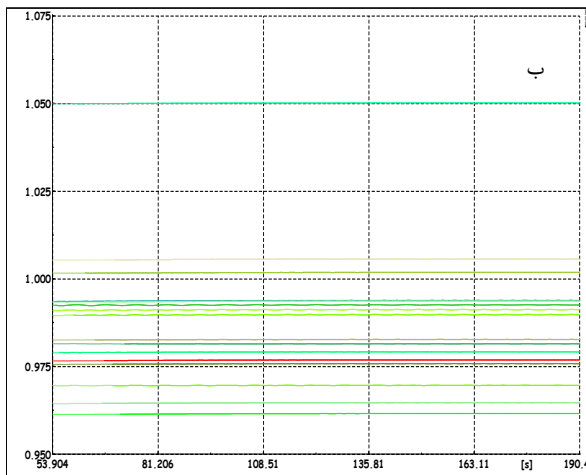
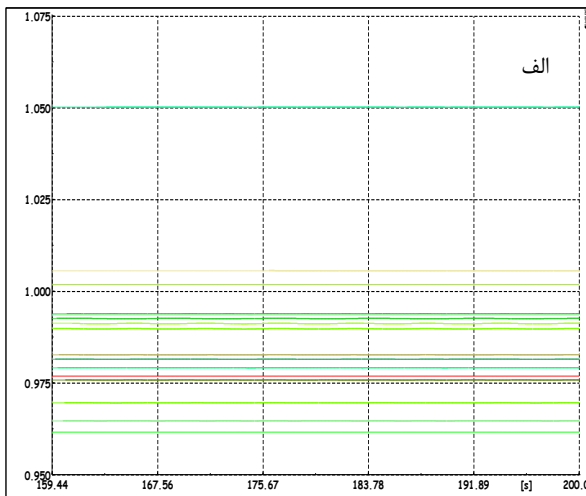


شکل ۷. بخشی از شبکه قدرت تهران بزرگ (پست از گُل) شبیه‌سازی شده در محیط DigSILENT

**خروج پست از گُل:** این پست که در شمال شرق تهران واقع شده است بارهای مهمی را تأمین می‌کند. سطح ولتاژ این پست ۲۳۰ کیلوولت به ۶۳ کیلوولت است. حدود ۱۴۰ ثانیه طول می‌کشد که پارامترهای شبکه به طور کامل همگرا شود. فرض شده است که پس از تشخیص حمله بمب گرافیتی، در ثانیه ۱۵۰/۲ تجهیزات پست به طور کامل از سرویس خارج می‌شوند. همان‌گونه که در شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود، برخی از واحدهای ژنراتوری حول زاویه صفر نوسانی شده و ناپایدار شده‌اند (واحدهای نیروگاه GHOM). این اتفاق که با عنوان نا هم‌نوبایی ژنراتور شناخته می‌شود و نشان دهنده اتصال ضعیف دینامیکی ژنراتورها است، باعث می‌شود ژنراتوری که با بقیه ژنراتورهای شبکه دچار نا هم‌نوبایی است از بقیه شبکه جدا شود و تشکیل جزیره ناخواسته و بدون برنامه‌ریزی دهد. این جزیره‌ها چون توازن بین تولید و بار ندارند (بدون برنامه تشکیل شده‌اند) در نهایت دچار فروپاشی می‌شوند.

فروپاشی این جزیره‌ها موجب ایجاد اتفاقات آشناری در شبکه می‌شود. به طوری که عدم توازن بین تولید و بار که ناشی از خروج این جزیره است در بقیه شبکه نیز موجب بروز ناپایداری می‌شود و این اتفاقات در نهایت موجب خاموشی سراسری کل شبکه می‌گردد. پیشنهاد می‌شود طرح جزیره سازی شبکه قدرت تهران فراهم شود که از فروپاشی شبکه در هنگام رخدادهای این چنینی جلوگیری شود.

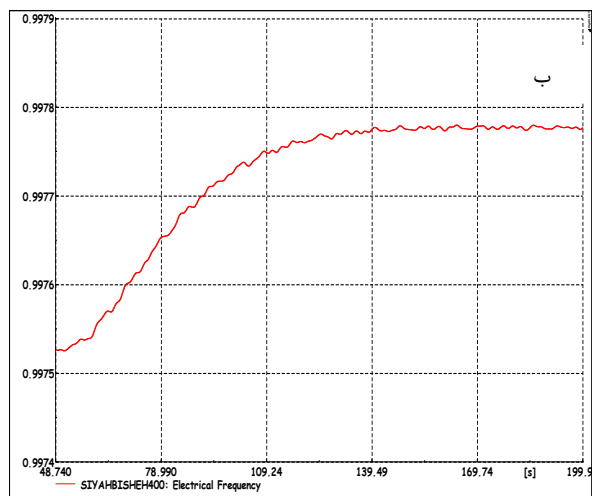
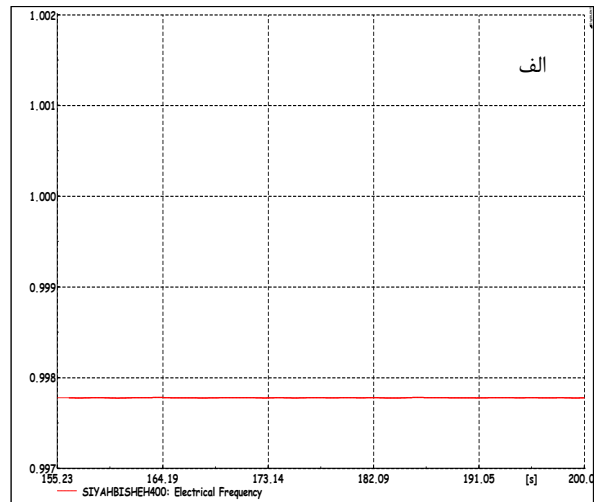




شکل ۹. الف) اندازه ولتاژ شین‌های شبکه قبل از خروج پست از گل، ب) اندازه ولتاژ شین‌های شبکه پس از خروج پست از گل (بر حسب پریونیت).

در شبکه تهران بزرگ ۹۷ ژنراتور فعال وجود دارد. بنا به فرمول (۱)، رابطه همبستگی هر جفت ژنراتور در این شبکه یک ماتریس با ابعاد ۹۷ در ۹۷ می‌شود که هر درایه ماتریس بیانگر شباهت زاویه روتور هر ژنراتور به دیگری است. سپس درایه‌های ماتریس به ترتیب اندازه از بزرگ به کوچک مرتب می‌شوند. در این تحقیق شبیه‌سازی شبکه برق تهران و محاسبه زاویه روتور ژنراتورها در برنامه DIgSILENT انجام شده است و الگوریتم محاسبه ضرایب همبستگی هر جفت ژنراتور و مرتب کردن ضرایب همبستگی در برنامه متلب شبیه‌سازی شده است. در نهایت گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری مطابق با جدول زیر تعیین می‌شوند. ژنراتورهای شبکه قدرت تهران به ۸ گروه هم‌نوی ژنراتوری تقسیم می‌شوند که در ادامه آمده است. اسامی ژنراتورها مطابق فایل شبیه‌سازی فایل DIgSILENT که توسط شرکت مدیریت شبکه برق ایران تهیه شده، است. زاویه روتور ژنراتورها پس از جزیره‌سازی شبکه برق تهران مطابق الگوریتم پیشنهادی است

همچنان که در نمودارهای شکل‌های (۹- الف و ب) مشاهده می‌شود، شتاب برخی واحدهای نیروگاهی (واحدهای نیروگاه GHOM) با سایر شبکه نا هم‌نوا و در نهایت نامیرا و نوسانی است و همان‌طور که در مقاله توضیح داده شده این اتفاق ممکن است موجب فروپاشی کلی شبکه و خاموشی سراسری شود که مستلزم به‌کارگیری طرح‌های جزیره‌سازی شبکه سراسری است.



شکل ۱۰. الف) فرکانس شبکه قبل از خروج پست از گل (بر حسب پریونیت)، ب) فرکانس شبکه پس از خروج پست از گل (بر حسب پریونیت)

شکل‌های (۱۰- الف و ب) نشان می‌دهند که فرکانس شبکه پس از خروج پست از گل به حدود ۴۹/۹۷۵ رسیده و میرا می‌شود که از نظر فرکانسی ناپایداری محسوب نمی‌شود و اگر ناپایداری زاویه‌ای رخ ندهد، با بار زدایی از شبکه، فرکانس سامانه به حالت نرمال (۵۰ هرتز) بازمی‌گردد. شکل‌های (۱۱- الف و ب) نشان می‌دهند که ولتاژ شبکه قبل و بعد از خروج پست از گل تغییر محسوس نکرده و بنابراین شبکه از منظر پایداری ولتاژ نیز مشکلی ندارد.

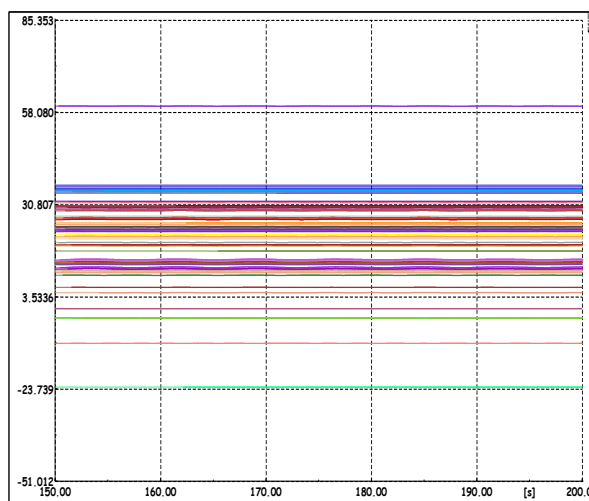
(شکل ۱۲). مقایسه شکل (۱۲) و شکل (۸) نشان می‌دهد که زاویه روتور ژنراتورها در محدوده مجاز باقی‌مانده و حاکی از پایداری شبکه است. شکل (۸) نشان داد که در صورت بمباران گرافیتی شبکه برق تهران و خروج یک پست (پست ازگل)، زاویه روتور برخی از ژنراتورهای شبکه نوسان کرده و باعث ناپایداری شبکه می‌گردند. اما شکل (۱۲) نشان می‌دهد که در صورت اجرای روش پیشنهادی، زاویه روتور ژنراتورها پس از خروج پست ازگل، میرا شده و هیچ واحد نیروگاهی نوسانی وجود ندارد که این امر باعث پایداری شبکه و بهره‌برداری طبیعی پس از حمله به پست می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده تأثیر به‌سزایی روش پیشنهادی برای جلوگیری از فروپاشی شبکه برق تهران بزرگ در مواجهه با حملات بمباران گرافیتی است.

گروه ۴		گروه ۳	
نام نیروگاه	شماره	نام نیروگاه	شماره
sym_GHOM22_1_1	۵۶	sym_DAMAV4_1	۳۹
sym_GHOM22_2_1	۵۷	sym_DAMAV4_10_1	۴۰
sym_GHOM22_3_1	۵۸	sym_DAMAV4_11_1	۴۱
sym_GHOM22_4_1	۵۹	sym_DAMAV4_12_1	۴۲
sym_GHOM22_5_1	۶۰	sym_DAMAV4_13_1	۴۳
sym_GHOM22_6_1	۶۱	sym_DAMAV4_14_1	۴۴
sym_DAMAV4_5_1	۵۱	sym_DAMAV4_15_1	۴۵
sym_DAMAV4_6_1	۵۲	sym_DAMAV4_16_1	۴۶
sym_DAMAV4_7_1	۵۳	sym_DAMAV4_17_1	۴۷
sym_DAMAV4_8_1	۵۴	sym_DAMAV4_1_1	۴۸
sym_DAMAV4_9_1	۵۵	sym_DAMAV4_3_1	۴۹
		sym_DAMAV4_4_1	۵۰

گروه ۶		گروه ۵	
نام نیروگاه	شماره	نام نیروگاه	شماره
REYG_G01	۱۵	AMIRKABIR0	۱
REYG_G02	۱۶	AMIRKABIR2	۲
REYG_G03	۱۷	DG-Kan	۴
REYG_G06	۱۸	DG-Kashani	۵
REYG_G31	۳۱	DG-Manavi	۶
		DG-Nazarabad	۷

گروه ۸		گروه ۷	
نام نیروگاه	شماره	نام نیروگاه	شماره
KALANG2	۱۲	sym_RAJAB4_2_1	۸۶
SS1	۳۵	sym_RAJAB4_3_1	۸۷
SS2	۳۶	sym_RAJAB4_4_1	۸۸

گروه ۲		گروه ۱	
نام نیروگاه	شماره	نام نیروگاه	شماره
DG-ERAMSHAHR	۳	FIROOZIG1	۸
LATYANG1	۱۳	FIROOZIG2	۹
LATYANG2	۱۴	FIROOZIG3	۱۰
REYG_G07	۱۹	FIROOZIG4	۱۱
REYG_G08	۲۰	sym_MONTG2_1_1	۶۳
REYG_G09	۲۱	sym_MONTG2_2_1	۶۴
REYG_G10	۲۲	sym_MONTG2_3_1	۶۵
REYG_G12	۲۴	sym_MONTG2_4_1	۶۶
REYG_G15	۲۵	sym_MONTG2_5_1	۶۷
REYG_G17	۲۷	sym_MONTG2_6_1	۶۸
REYG_G19	۲۸	sym_MONTG2_7_1	۶۹
REYG_G25	۲۹	sym_MONTG2_8_1	۷۰
REYG_G27	۳۰	sym_MONTG2_9_1	۷۱
REYG_G32	۳۲	sym_MONTZ2_1_1	۷۲
REYG_G33	۳۳	sym_MONTZ2_2_1	۷۳
REYG_G34	۳۴	sym_MONTZ2_3_1	۷۴
sym_LAVAR2_1_1	۶۲	sym_MONTZ2_4_1	۷۵
sym_N-PRN2_1_1	۷۶	sym_RAJAG4_1_1	۸۹
sym_N-PRN2_2_1	۷۷	sym_RAJAG4_2_1	۹۰
sym_N-PRN2_3_1	۷۸	sym_RAJAG4_3_1	۹۱
sym_N-PRN2_4_1	۷۹	sym_RAJAG4_4_1	۹۲
sym_N-PRN2_5_1	۸۰	sym_RAJAG4_5_1	۹۳
sym_N-PRN2_6_1	۸۱	sym_RAJAG4_6_1	۹۴
sym_N-RUD4_1_1	۸۲	sym_RAJAG4_7_1	۹۵
sym_N-RUD4_2_1	۸۳	sym_RAJAG4_8_1	۹۶
sym_N-RUD4_3_1	۸۴	sym_RAJAG4_9_1	۹۷



شکل ۱۲. زاویه روتور ژنراتورها پس از اعمال الگوریتم جزیره‌سازی (برحسب درجه)

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روش پدافندی جدیدی در لایه سامانه قدرت برای مقابله با بمب‌گرافیتی و پاسخ پست نمونه‌ای از سامانه قدرت شبکه تهران به حملات گرافیتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، حادثه خروج پست ازگل در شبکه تهران شبیه‌سازی شده است. انواع حوادث محتمل پس از بمباران شامل افت ولتاژ، افت فرکانس، اضافه فرکانس، اضافه ولتاژ، تغییرات هم‌زمان ولتاژ فرکانس و همچنین ناپایداری زاویه می‌باشند. در نتیجه شبکه قدرت ناپایدار شده و به سمت فروپاشی کامل و خاموشی سراسری می‌رود. در این مرحله، استراتژی جزیره‌سازی کنترل شده طبق روش پیشنهادی روی شبکه اجرا می‌شود که با ایزوله کردن ژنراتورهای نا هم‌نوی شبکه و ایجاد زیر بخش‌های سنکرون، ناپایداری گذرای شبکه میرا می‌گردد و از خاموشی سراسری جلوگیری می‌شود. روش جدید ارائه شده در این مقاله، گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری را بر اساس شاخص همبستگی زاویه ژنراتورها تشخیص و خوشه‌بندی می‌کند. این روش قابلیت تعیین گروه‌های هم‌نوا در شبکه‌های قدرت بزرگ را دارد. این روش از داده‌های آنلاین مخابره شده توسط دستگاه‌های PMU نصب شده بر روی ژنراتورها بهره می‌برد که با اندازه‌گیری شاخص هم‌نوی ژنراتورها به هم، مستقل از مدل سامانه قدرت عمل می‌کند. از مزایای این الگوریتم سرعت بالا، عدم نیاز به تعیین مدل دقیق و کامل شبکه قدرت و قابلیت اجرا در شبکه‌های بزرگ قدرت است.

## ۶. مراجع

- Phasor Measurements"; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 1544-1554.
- [7] Sun, K.; Zheng, D. Z.; Lu, Q. "Searching for Feasible Splitting Strategies of Controlled System Islanding"; Generation, IEE Proc. Transmission and Distribution 2006, 153, 89-98.
- [8] Qiao, Y.; Shen, C.; Wu, J.; Lu, Q. "The Integrated Simulation Platform for Islanding Control of Large-Scale Power Systems: Theory, Implementation and Test Results"; Society General Meeting, Power Eng. 2006,
- [9] Zhao, Q.; Sun, K.; Zheng, D. Z.; Ma, J.; Lu, Q. "A Study of System Splitting Strategies for Island Operation of Power System: A Two-Phase Method Based on OBDDs"; IEEE Trans. Power Syst. 2003, 18, 1556-1565.
- [10] Sun, K.; Zheng, D. Z.; Lu, Q. "Splitting Strategies for Islanding Operation of Large-Scale Power Systems Using OBDD-Based Methods"; IEEE Trans. Power Syst. 2003, 18, 912-923.
- [11] Wang, X.; Vittal, V. "System islanding using Minimal Cutsets with Minimum Net Flow"; Power Syst. Conf. and Exposition 2004, 379-384.
- [12] Sun, K.; Zheng, D. Z.; Lu, Q. "A Simulation Study of OBDD-Based Proper Splitting Strategies for Power Systems under Consideration of Transient Stability"; IEEE Trans. Power Syst. 2005, 20, 389-399.
- [13] Aghamohammadi, M. R.; Shahmohammadi, A. "Intentional Islanding Using a New Algorithm Based on ANT Search Mechanism"; Int. J. Electrical Power & Energy Syst. 2012, 35, 138-147.
- [14] Liu, W.; Liu, L.; Cartes, D. "Angle Modulated Particle Swarm Optimization Based Defensive Islanding of Large Scale Power Systems"; Power Eng. Society Conf. and Exposition in Africa, 2007.
- [15] Lei, D.; Gonzalez-Longatt, F. M.; Wall, P.; Terzija, V. "Two-Step Spectral Clustering Controlled Islanding Algorithm"; IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28, 75-84.
- [16] Lamba, S.; Nath, R. "Coherency Identification by the Method of Weak Coupling"; Int. J. Electrical Power & Energy Syst. 1985, 7, 233-242.
- [17] Chow, J. H. "Time-Scale Modeling of Dynamic Networks with Applications to Power Systems"; Berlin-Heidelberg-New York, Springer, 1982.
- [18] Sung-Kwan, J.; Chen-Ching, L.; Jones, L. E.; Jong-Woong, C. "Coherency and Aggregation Techniques Incorporating Rotor and Voltage Dynamics"; IEEE Trans. Power Syst. 2004, 19, 1068-1075.
- [19] Nazari, H.; Kazemi, A.; Saadabadi, A. A. "Application of Genetic Algorithm to Choose the Best Scenario for Energy Demand Forecasting of Residential and Commercial Sectors in Iran"; Iranian J. Energy 2015, 18, 84-92, (In Persian).
- [20] Wang, X. "Slow Coherency Grouping Based Islanding Using Minimal Cutsets and Generator Coherency Index Tracing Using The Continuation Method"; Ph.D. Dissertation, Iowa State Univ., Ames, 2005.
- [21] Aalami, H. A.; Aghazadeh, M.; Dashti, R. "A Fast Algorithm for Detecting Loss of Synchronism of Generator during Electromagnetic Bombing"; J. Advanced Defence Sci. & Tech. 2015, 3, 255-263 (In Persian).
- [22] Athay, T.; Podmore, R.; Virmani, S. "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability"; IEEE Trans. Power Apparatus and Syst. 1979, 98, 573-584.
- [1] Aalami, H. A.; Ramezani, H. "Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions"; J. Passive Defence Sci. & Tech. 2012, 3, 231-241 (In Persian).
- [2] Aalami, H. A. "Quick and Accurate Fault Location in Power Distribution Systems in the Presence of DG Units in Military Areas"; J. Passive Defence Sci. & Tech. 2015, 6, 9-18 (In Persian).
- [3] Ghafarpourpour, R. "Power System Substations Categorizing Based on Their Response to Graphite Bomb Attacks"; J. Passive Defence Sci. & Tech. 2015, 6, 35-47 (In Persian).
- [4] Kia, M.; Aalami, H. A. "A New Approach for Optimal Location of Power Dispatching Centers Based on Passive Defence Criteria Using EAHP"; J. Advanced Defence Sci. & Tech. 2014, 5, 19-29 (In Persian).
- [5] Karbasi, A.; Turkaman, N.; Saber Fatahi, L. "Power System Security: New Issues for Large Systems"; Iranian J. Energy 2005, 5, 36-50 (In Persian).
- [6] Sun, K.; Hur, K.; Zhang, P. "A New Unified Scheme for Controlled Power System Separation Using Synchronized

