



# Finding the Optimal Size and Placement for the Sources of Distributed Generation (DG) of and Capacitors in the Distribution Networks by Microgrid Segmentation with a Passive Defense Approach

M. Zadehbagheri \*, A. R. Abbasi , M. J. Kiani 

\*Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

(Received: 12/07/2022, Revised: 17/08/2022, Accepted: 04/12/2022, Published: 22/06/2023)

DOR : : 20.1001.1.20086849.1402.14.2.1.3

## ABSTRACT

*Passive defense is an issue that has received more attention in recent years. The concept of passive defense is that sometimes human societies face natural and unnatural problems. If there are appropriate plans for these events, the problems that arise in the communities as a result of these events are much fewer. There is no doubt that due to the existence of some centers in the cities, some places are of high importance. And it has been tried that these points are self-sufficient under any conditions, and as a result, these points can be protected against electric power outages. In this article, we divide the national electricity network into 8 micro-grids. Each of these micro-grids is allocated scattered production sources including active and reactive power, and then in such a way that these 8 micro-grids can be, continuously, and also act as an island, so that if something happens to any of these networks during incidents and they are disconnected from the main network for any reason, these networks can work as an island and respond to the needs of the loads of each part. In the following, the location and size of scattered production sources and capacitor banks are discussed using the whale optimization algorithm. By using this method, the network needs can be answered locally, and for this reason, high power losses and voltage drop can be avoided. To investigate the role of optimization in the first scenario, the number of units of distributed generation resources is 47 units and the maximum number of capacitor banks is 38 units. As a result of the optimal placement of these power generation units in the right places, the losses, which were equal to 227 kW before the optimization, have significantly decreased after the optimization and have decreased to 122 kW.*

**Keywords:** Distributed Generation Resources, Standard 69 Bus Network, Passive Defense, Optimization, Capacitor Bank, Microgrid

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

 Authors



\*Corresponding Author Email: Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir



نشریه علمی پدافند غیرعامل



سال چهاردهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، (پیاپی ۵۴): صص ۱۴-۱

علمی- پژوهشی

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۸۰۳۰

## یافتن مکان و اندازه بهینه منابع تولید پراکنده و خازن در شبکه‌های

## توزیع انرژی الکتریکی با تقسیم‌بندی ریز شبکه‌ای با رویکرد پدافند

### غیرعامل

محمود زاده باقری<sup>۱\*</sup>، علی‌رضا عباسی<sup>۲</sup>، محمدجواد کیانی<sup>۳</sup>

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.2.1.3

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

### چکیده

پدافند غیرعامل مسئله‌ای است که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است و دارای این مفهوم که در برخی زمان‌ها جوامع بشری با مشکلات طبیعی و غیر طبیعی مواجه می‌شوند. در صورتی که برای این حوادث از قبل برنامه‌های مناسبی در نظر گرفته شده باشد مشکلاتی که در جوامع در اثر این حوادث به وجود می‌آید بسیار کمتر بوده و شکی نیست که با توجه به وجود برخی مراکز در شهرها برخی نقاط از اهمیت بالایی برخوردار بوده و سعی شده که این نقاط تحت هر شرایطی خودکفا بوده و در نتیجه بتوان از تمامیت این نقاط در مقابل قطعی انرژی الکتریکی محافظت کرد. در این مقاله، شبکه سراسری برق را به ۸ ریز شبکه تقسیم بندی می‌کنیم و به هر کدام از این ریز شبکه‌ها منابع تولید پراکنده شامل توان اکتیو و راکتیو تخصیص داده شده است و سپس به‌گونه‌ای با این ۸ ریز شبکه که می‌توانند به‌صورت پیوسته و نیز جزیره‌ای کار کنند رفتار شود که در صورتی که اتفاقی برای هر کدام از این شبکه‌ها در زمان حوادث رخ دهد و به هر دلیلی از شبکه اصلی قطع شوند این شبکه‌ها بتوانند به‌صورت جزیره‌ای کار کرده و پاسخگوی نیاز بارهای هر قسمت باشند. در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی وال یا نهندگ به جایابی مکان و اندازه منابع تولید پراکنده و نیز بانک‌های خازنی پرداخته می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان نیاز شبکه را به‌صورت محلی پاسخ داده و به همین دلیل از تلفات زیاد توان و در نتیجه افت ولتاژ جلوگیری کرد. برای بررسی نقش بهینه‌سازی در سناریو اول تعداد واحدهای منابع تولید پراکنده برابر ۴۷ واحد و حداکثر تعداد بانک خازنی برابر با ۳۸ واحد در نظر گرفته شده است. در اثر جایگذاری بهینه این واحدهای تولید توان در جاهای مناسب تلفاتی که قبل از بهینه‌سازی برابر با ۲۲۷ کیلووات بوده بعد از بهینه‌سازی کاهش قابل توجهی داشته و به ۱۲۲ کیلووات کاهش یافته است.

**کلید واژه‌ها:** منابع تولید پراکنده، شبکه ۶۹ باسه استاندارد، پدافند غیرعامل، بهینه‌سازی، بانک خازنی، ریز شبکه

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده فنی مهندسی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران - (ma.zadehbagheri@iau.ac.ir) - نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه فسا، فارس، ایران

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده فنی مهندسی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## ۱ - مقدمه

امروزه با وابستگی شدید به انرژی الکتریکی، نقش حیاتی این انرژی در زندگی بر کسی پوشیده نیست. با رشد روزافزون مصرف، احداث سیستم‌های جدید و توسعه ظرفیت سیستم‌های موجود یک نیاز اساسی محسوب می‌شود. این در حالی است که با پیشرفت تکنولوژی و تغییرات اخیر در منطق راهبری حاکم بر سیستم‌های قدرت، ضمن ایجاد گزینه‌های جدید در تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم، بهره‌گیری از روش‌های مرسوم در طراحی سیستم را با مشکل مواجه ساخته و تصمیم‌گیری در این خصوص را سخت کرده است. بنابراین تدوین روش‌های جدید طراحی بخش‌های مختلف سیستم قدرت، یکی از نیازمندی‌های قابل توجه به شمار می‌آید استفاده از ریزشبه‌ها در سیستم قدرت مرسوم امروزی یک موضوع جذابی برای محققین می‌باشد چراکه به هنگام قطع شدن سیستم قدرت اصلی در اثر حملات در مواقع جنگ، ریزشبه‌ها قادر هستند تا بارهای خود را تأمین نمایند که در این صورت قابلیت اطمینان سیستم و ریزشبه افزایش میابد و در نتیجه در صورت رخ دادن حملات نظامی سیستم کماکان می‌تواند به کار خود بی‌وقفه ادامه دهد. در این پژوهش از الگوریتم هوشمندی که دارای مشخصه همگرایی بسیار مناسبی است و بر مبنای حرکت موجودات برای غذا است و با نام الگوریتم وال از آن یاد می‌شود استفاده خواهد شد. در ادامه، پس از بررسی این الگوریتم هوشمند به تبدیل یک شبکه توزیع به چند ریزشبه پرداخته می‌شود تا در صورت قطع احتمالی شبکه توزیع در اثر حملات پدافندی، ریزشبه‌ها بتوانند بارهای خود را تأمین کنند. در سالیان اخیر استفاده از منابع تولید پراکنده به شدت رشد کرده است و در گوشه گوشه دنیا در قسمت‌های مختلف شبکه از این رویکرد تولید انرژی استفاده می‌شود. دلایل اصلی افزایش استفاده از این منابع عبارتند از آزاد سازی بازارهای برق، محدودیت در ساخت خطوط انتقال و توزیع جدید و نگرانی‌های زیست محیطی، پیشرفت‌های تکنولوژیکی در ژنراتورهای کوچک، الکترونیک قدرت و دستگاه‌های ذخیره انرژی برای پشتیبانی گذرا، باعث افزایش نفوذ DG به نیروگاه‌های برق شده است [۳]. در حال حاضر، تکنولوژی‌های متعددی که برای کاربرد DG استفاده می‌شود که از تکنولوژی‌های سنتی و غیر سنتی استفاده می‌کنند. فن‌آوری‌های سابق غیر قابل تجدیدپذیر مانند موتورهای احتراق داخلی، چرخه‌های ترکیبی، توربین‌های احتراق و میکرو توربین‌ها است. از طرفی فن‌آوری‌های تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک، باد، زمین گرمایی، اقیانوس و سلول سوختی است. مزایای اصلی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، از بین بردن انتشارات مضر و منابع مصرف کننده سوخت‌های

فسیلی است. با این حال، معایب اصلی راندمان نسبی کم، هزینه‌های بالا و گاهی در دسترس نبودن از خصوصیات این منابع است. روز به روز DG‌های مورد استفاده در سیستم توزیع در سراسر دنیا رو به افزایش است. از طرفی باید تمامی این منابع به صورت مناسب و بهینه جایابی شوند. جاهایی که به روش مطلوب به این منابع تخصیص داده می‌شود باعث افزایش قابلیت اطمینان، کاهش خسارات سیستم و مسطح کردن پروفایل ولتاژ و بار می‌شود. بنابراین جایابی این منابع از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش تلاش خواهد شد که به صورت بهینه استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری هوشمند به یافتن مکان بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع پرداخته می‌شود. با توجه به اهمیت و مزایای مطرح شده از بازآرایی شبکه‌های توزیع، مطالعات مختلفی بر روی روش‌های بازآرایی بهینه صورت پذیرفته است. در این بخش سعی بر آن است با مروری بر مطالعات صورت گرفته در این زمینه، ابعاد تحقیقاتی و فرآیند پیشرفت مطالعات مورد بررسی قرار گیرد. الگوریتم ارائه شده در [۴]، کار خود را از یک آرایش شعاعی شبکه شروع می‌نماید. بدین ترتیب که یکی از کلیدهای در حالت معمولی باز حلقه ایجاد شده را انتخاب نموده و باز می‌نماید. بدین ترتیب شبکه مجدداً ساختار شعاعی خود را بازمی‌یابد. در حلقه ایجاد شده در اثر بستن یک کلید N.O با استفاده از روش‌های تجربی و اکتشافی و یک سری فرمول‌های تقریبی میزان تلفات در اثر باز نمودن هر یک از کلیدهای حلقه N.C محاسبه می‌شود و کلیدی که بیشترین کاهش تلفات را در برداشته باشد به عنوان کلید مناسب انتخاب می‌شود و این عمل برای تمامی کلیدهای N.O شبکه انجام می‌گردد و بدین ترتیب ضمن حفظ آرایش شعاعی شبکه و تغذیه بارها، تلفات توان در شبکه کاهش داده می‌شود. قبل از انجام تعویضی شاخه می‌بایست حلقه مربوطه را از نظر تلفات برآورد کنیم. تابع هدف در نظر گرفته شده برای این روش تنها شامل تلفات هست اما اثر قیودی چون حد مجاز ولتاژ شین‌ها و جریان خطوط بر تابع هدف و پاسخ نهایی اعمال شده است. ضمن اینکه این روش هر دو نوع یکنواخت و گسسته بار را مدل می‌کند. ولی الگوریتم روش سیوانلار که در مرجع [۵] مطرح شده با الگوریتم مرجع [۶] فرق دارد و این فرق بدین گونه است که وقتی یک کلید N.O را بسته و کلید N.C متناظر را باز می‌کنیم کلید N.C باز شده به عنوان کلید N.O فرض می‌شود و با شبکه جدید حاصل شده مانند شبکه اولیه برخورد می‌شود. مجدداً مناسب‌ترین کلید N.O انتخاب و بسته می‌شود و متناظر با آن یک کلید N.C باز می‌شود و این کار آن قدر ادامه می‌یابد تا دیگر با بستن کلیدهای N.O کلید N.C ای پیدا نشود که باز کردن آن باعث کاهش تلفات گردد. با توجه به دو الگوریتم

ریزشبکه است به طوری که هر کدام از ریزشبه ها داری حداقل یک منبع تولید پراکنده باشند. حال با این شرایط، در صورت قطعی برق، بارهای محلی با استفاده از منبع تولید پراکنده موجود تغذیه میشوند. در نتیجه یافتن مکان و مقدار منابع تولید پراکنده برای هر ریزشبه حایز اهمیت می باشد.

## ۲- پدافند غیرعامل در سیستم های توزیع

صنعت برق یکی از حیاتی تری زیرساخت های هر کشور است. هرگونه اختلال در این صنعت علاوه بر اینکه به اقتصاد کشورها لطمه می زند، سلامت روانی جامعه را نیز به شرایط بحرانی سوق خواهد داد. بنابراین کاهش آسیب پذیری این صنعت در برابر بلایای طبیعی و غیرطبیعی بسیار حائز اهمیت است. در این راستا پدافند غیرعامل نقش مهم و حیاتی ایفا می کند. و عدم توجه به این مقوله می تواند هزینه های سنگینی در زمان جنگ و صلح بر سرمایه های ملی تحمیل نماید و ضایعات جبران ناپذیری به بار آورد. در این میان سیستم های توزیع نیروی برق به عنوان آخرین زیرسیستم در سیستم قدرت که وظیفه نهایی این سیستم یعنی همان توزیع انرژی به مشترکین را ایفا می کنند، دارای اهمیت و جایگاه بسیار مهمی هستند. از این رو در نظر گرفتن ضوابط و معیارهای پدافند غیرعامل در مباحث مربوط به مطالعات طراحی، توسعه و بهره برداری این سیستمها امری ضروری است [۱]. اهداف پدافند غیرعامل در شبکه های انرژی برق را می توان به شرح ذیل بیان داشت: حفاظت از دارایی های توزیع در هر سه بخش فشار متوسط، پست ها و فشار ضعیف - افزایش قابلیت اطمینان برق رسانی به ویژه برای بارهای حساس و مهم - افزایش کیفیت توان به ویژه برای مصارف حساس. با توجه به اهداف و مطالب بیان شده در زمینه پدافند غیرعامل، اهمیت شبکه های توزیع از نگاه پدافند غیرعامل به منظور حفظ تداوم انرژی برق بارهای حساس در مواقع بحران و عملکرد خرابکارانه گروه های متخاصم و تروریست انکارناپذیر می باشد [۲].

## ۳- روش انجام کار

در این مقاله یک شبکه ۶۹ باسه استاندارد ۱۱ کیلو ولت با توان نامی ۶ MVA برای این تحقیق در نظر گرفته شده است. در این تحقیق با رویکرد پدافند غیر عامل به بررسی حل مسئله پرداخته خواهد شد. در این بخش ابتدا پس از ارائه الگوریتم بهینه سازی پخش بار و تابع هزینه مورد نیاز برای شبیه سازی این مقاله فرموله می شود و در ادامه با ارائه مقدمه ای در مورد پدافند غیر عامل در این پژوهش به سراغ تقسیم بندی شبکه خواهیم رفت که در این پژوهش یک شبکه ۶۹ باسه در نظر گرفته شده است که

متفاوت فوق می بینیم که الگوریتم مرجع [۷] حتماً به اتمام می رسد ولی ممکن است نقطه بهینه را محاسبه ننماید و برعکس الگوریتم مرجع [۸] ممکن است همگرا نشده و به اتمام نرسد ولی در صورت همگرا شدن نسبت به الگوریتم مرجع [۹] بهینه تر خواهد بود. بر اساس روش ارائه شده در [۱۰] ابتدا کلیه کلیدهای N.O شبکه بسته می شوند. با انجام این کار شبکه شعاعی به یک شبکه غربالی تبدیل می شود. سپس کلیدهای شبکه یکی یکی باز می شوند تا مجدداً شبکه به حالت شعاعی بازگردد. در فرآیند باز کردن کلیدهایی انتخاب می شوند که تلفات اهمی خطوط شبکه منتهی را کاهش دهند. در این روش تابع هدف بازآرایی، تلفات شبکه می باشد ضمن این که محدودیت های ولتاژ و جریان نیز به عنوان قید در نظر گرفته شده اند. همچنین در این روش زاویه ولتاژ نیز در محاسبات دخالت داده شده است. در [۱۱] مسئله بازآرایی شبکه توزیع به صورت یک مسئله حمل و نقل با هزینه های مربعی فرموله شده است. لذا تابع غیرخطی تلفات به صورت هزینه حمل و نقل خطی تقریب زده می شود و برای این عمل تلفات توان ( $RJ^2$ ) را به طور تقریبی می توان به صورت هزینه حمل و نقل جریان  $J$  در نظر گرفت. در روش ارائه شده در [۱۲] نیز مانند روش گلاسوکائین ابتدا همه کلیدها را باز می کنند. سپس در هر مرحله کلیدی که کمترین افزایش در تابع هدف ایجاد کند، بسته می شود. تابع هدف به صورت نسبت افزایش تلفات به بار اضافه شده به سیستم می باشد. در این روش از ضریبی به نام ضریب شایستگی استفاده شده است. پخش بار استفاده شده در این روش شعاعی بوده و تابع هدف آن ها تنها شامل تلفات می باشد. قیود و محدودیت های اعمال شده شامل قیود ولتاژ شین ها جریان خطوط و همچنین قفل کلیدی باشد. منظور از قفل کلید این است که آرایش هایی که منجر به برق دار شدن محل خطا می شود انتخاب نمی شوند. مرجع [۱۳] یک روش تجربی و فازی برای بازآرایی سیستم توزیع که در آن هیچ کلید کنترل از راه دوری موجود نمی باشد ارائه کرده است. این روش به طور هم زمان چندین مورد را بهینه سازی می کند. کاری که در این مقاله از دیگر کارهای انجام شده در این زمینه متفاوت است پرداختن به اندازه و مکان یابی منابع تولید پراکنده با رویکرد پدافند غیر عامل است. نو آوری این مقاله جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن پدافند غیر عامل می باشد. در مواقع حمله نظامی ممکن است خط یا دکلی از کار بیافتد و در نتیجه آن بارهای زیادی از شبکه جدا شوند. حال اگر جایابی منابع تولید پراکنده در یک شبکه توزیع را طوری انجام دهیم که قطع شدن یک خط باعث خارج شدن بارها نشود توانسته ایم با این خطر مقابله کنیم. نوآوری پژوهش، تبدیل یک شبکه توزیع به چند

$$OF = \min \left\{ W_1 * \left( \sum_{i=1}^3 |P_{LossMGi}| + \sum_{i=4}^6 |P_{LossMGi}| + \sum_{i=7}^8 |P_{LossMGi}| \right) + \{W_2 * PassiveDeffence\} \right. \\ \left. \left( \sum_{i=1}^3 |Q_{LossMGi}| + \sum_{i=4}^6 |Q_{LossMGi}| + \sum_{i=7}^8 |Q_{LossMGi}| \right) \right\}$$

Constraint:

$$V_i^{\min} < V_i < V_i^{\max}$$

$$P_{ij} < P_{ij}^{\max}$$

(۱)

همانطور که ذکر شده است در این قسمت تابع هدف در حقیقت تابع هزینه بوده و تابع سودآوری نیست از این رو مطلوب مسئله کم کردن مقدار آن است. مطلوب این تحقیق کم کردن این تابع تا اندازه ممکن است. در این تابع هزینه همانطور که دیده می‌شود  $W_1$  مربوط به سه ناحیه حیاتی، حساس و مهم مشخص شده به منظور تقسیمات پدافند غیر عامل بوده و در این قسمت از ریزشکبه‌های در نظر گرفته شده در شکل (۱) سه ریز شبکه اول به‌عنوان ناحیه حیاتی در نظر گرفته شده است و سه ریز شبکه دوم به‌عنوان ناحیه حساس و دو ریز شبکه آخر به‌عنوان ناحیه مهم در نظر گرفته شده است. در توضیح ضرایب این تابع می‌توان گفت که  $W_1$  و  $W_2$  دو ضریب جریمه بوده که باعث می‌شوند با استفاده از این دو ضریب بتوان جریمه را کم و زیاد کرده تا در صورت نیاز تلفات را کم کرده و یا به تقسیمات پدافندی درجه اهمیت بالاتری تخصیص داد. در زیر پارامترهای مهم تابع هزینه تشریح خواهند شد:

$P_{MGi}$ : توان اکتیو ریزشکبه  $i$  ام.  $Q_{MGi}$ : توان راکتیو ریزشکبه  $i$  ام.

$W_1$ : پنالتی فرضی به منظور اهمیت دادن به پارامترهای تابع هزینه.

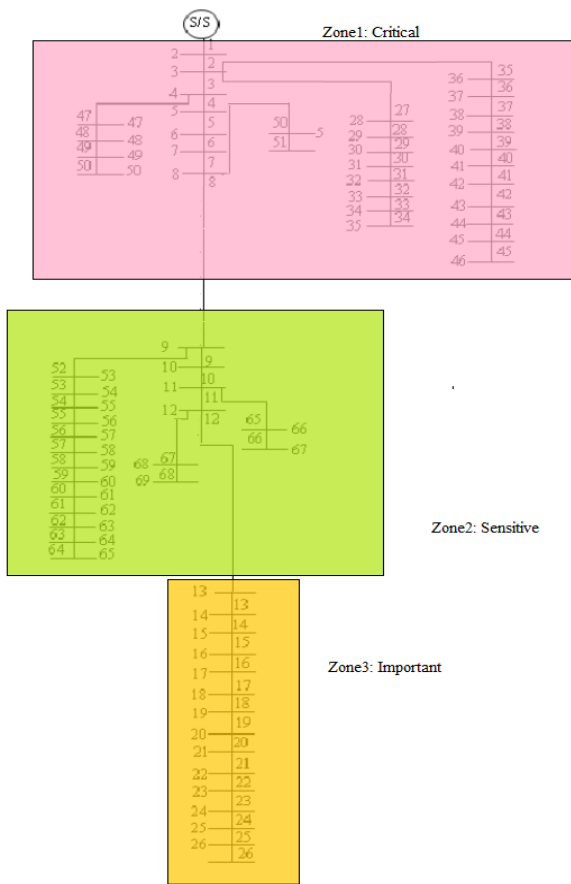
Passive Deffence: عبارت مربوط به پدافند غیرعامل که باید بیشینه شود و چون تابع از جنس هزینه است در مخرج کسر قرار می‌گیرد.

این پارامتر به نواحی سه‌گانه و به صورت ریزتر به ریزشکبه‌های ۸ گانه این پژوهش اولویت در تخصیص منابع می‌دهد. در حقیقت زیر تابع پدافند غیر عامل جهت کم کردن هزینه است و علت آن است که از دست رفتن توان برای ریزشکبه‌های مختلف در این پژوهش با توجه به اهمیتی که دارند هزینه‌های مختلفی بر متولیان تامین توان تحمیل می‌کند و به جهت اینکه ممکن است در چند ریز شبکه که قبلاً هم اشاره شد به‌عنوان ریزشکبه‌های پدافند غیر عامل در نظر گرفته شده است مراکز استراتژیک و یا بیمارستان و از این قسم مراکز وجود داشته باشد این ریزشکبه‌ها هزینه‌های سنگینی بر هزینه کل اضافه می‌کنند. بنابراین زیر تابع پدافند غیر عامل در تابع هزینه در جهت کم کردن هزینه است. تابع هدف از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول مربوط به کاهش تلفات و در نتیجه بهبود پروفیل ولتاژ است. زمانی که

با تقسیم بندی این شبکه به ۸ ریز شبکه سعی می‌شود تا با قرار دادن منابع اکتیو و راکتیو به اندازه کافی و حداقل یکی در هر ریز شبکه به ریز شبکه‌های ۸ گانه قابلیت جزیره‌ای عمل کردن داده شود. دو ریز شبکه ۴ و ۵ بیشتر از سایر شبکه‌ها در این شبکه کلی حائز اهمیت هستند که در این تحقیق این دو ریز شبکه مد نظر قرار گرفته‌اند. استفاده از ریزشکبه‌ها در سیستم قدرت مرسوم امروزی یک موضوع جذابی برای محققین می‌باشد چراکه به هنگام قطع شدن سیستم قدرت اصلی در اثر حملات در مواقع جنگ، ریزشکبه‌ها قادر هستند تا بارهای خود را تأمین نمایند که در این صورت قابلیت اطمینان سیستم و ریزشکبه افزایش می‌یابد و در نتیجه در صورت رخ دادن حملات نظامی سیستم کماکان می‌تواند به کار خود بی‌وقفه ادامه دهد. در پژوهشی که در این مقاله صورت گرفته است از الگوریتم هوشمندی که دارای مشخصه همگرایی بسیار مناسبی است و بر مبنای حرکت موجودات برای غذا است و با نام الگوریتم وال از آن یاد می‌شود استفاده خواهد شد. در این بخش پس از بررسی این الگوریتم هوشمند به تبدیل یک شبکه توزیع به چند ریزشکبه پرداخته می‌شود تا در صورت قطع احتمالی شبکه توزیع در اثر حملات پدافندی، ریزشکبه‌ها بتوانند بارهای خود را تأمین کنند.

### ۳-۱- تابع هدف و قیود مسئله

تابع هزینه همانطور که از نامش پیداست با توجه به اینکه از جنس هزینه بوده و در هر کاری هدف کم کردن هزینه است این تابع نیز باید تا جایی که می‌تواند کم شود. رفرنس اصلی این تابع [۱۴] است و در این مقاله به خوبی مشخصات شبکه تفسیر شده است. ریزشکبه‌ها تقسیم بندی شده است و هدف پدافند غیر عامل با توجه به نوآوری مورد نظر این پژوهش به مقاله اضافه شده است. تابع هزینه مورد نظر که فرمولاسیون آن به‌صورت معادله ۱ است به صورتی است که در صورت وقوع بروز خطا برای یک یا چند ریز شبکه انتخاب شده در صورت بروز هر گونه حمله نظامی بتواند در صورت بروز قطعی برق منابع تولید پراکنده که برای شبکه در نظر گرفته شده است بتوانند پاسخگوی نیاز آن قسمت از شبکه بوده و در نتیجه تغذیه آن منطقه بی‌وقفه صورت پذیرد. در زیر تابع هدف مورد نظر نمایش داده شده است. بعد از بهینه‌سازی به هر کدام از ریزشکبه‌های منبع توان اکتیو تخصیص داده می‌شود تا به صورت کامل نیاز سیستم به پدافند غیر عامل برطرف شده و در نتیجه بتوان انتظار داشت تا در صورت بروز خطا ریز شبکه‌ها به صورت مستقل به کار خود ادامه دهند این توان اکتیو است که بعد از بهینه‌سازی دیده می‌شود [۱۴، ۱۵].

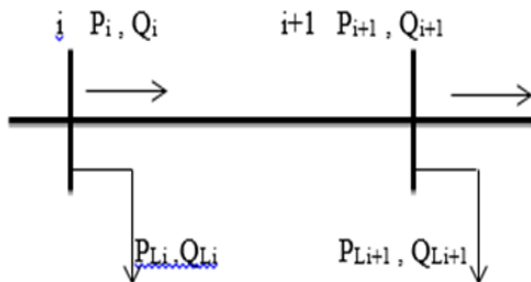


شکل (۲): دیاگرام شبکه با مشخص کردن سه ناحیه به عنوان ناحیه بندی پدافند غیر عامل

شبکه توزیع مطابق مرجع [۱۶] به هشت ریز شبکه تقسیم شده است که در شکل (۱) نمایش داده شده است. در شکل (۲) دیاگرام شبکه با مشخص کردن سه ناحیه به عنوان ناحیه بندی پدافند غیر عامل با زنگ های قرمز و سبز و نارنجی مشخص شده است.

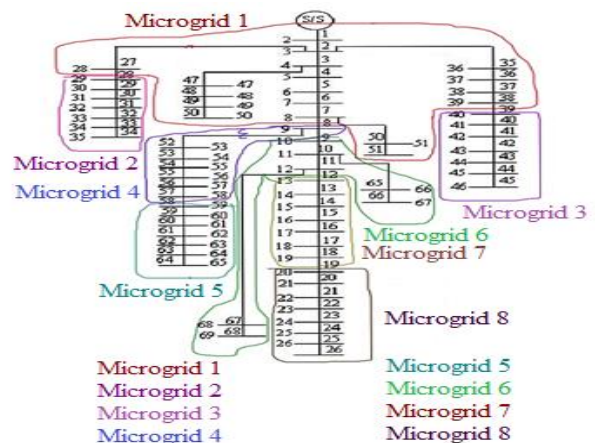
### ۲-۳- فرمولاسیون پخش بار

برای دیاگرام تک خطی شکل (۳) فرمولاسیون پخش بار به صورت زیر است:



شکل (۳): دیاگرام تک خطی مورد استفاده در پخش بار این مقاله

حمله ای در شبکه رخ دهد و باعث قطع شدن قسمتی از شبکه شود اولین چیزی که از این حمله اثر می پذیرد پروفیل ولتاژ است که به شدت افت می کند. قسمت دوم این تابع هزینه مربوط به پدافند غیر عامل است. در این قسمت با کاری که در کد نویسی انجام می شود باعث خواهد شد که اهمیت منبع گذاری در دو قسمت حساس شبکه بیشتر باشد و اولویت منبع گذاری در این دو قسمت رعایت شود. این بدان معنی است که ابتدا دو قسمتی که از نظر پدافند غیر عامل حساسیت زیادی دارند منابع توان اکتیو جایابی شده و در ادامه مابقی شبکه نیز برای بهبود پروفیل ولتاژ شامل منابعی شوند. این ریز شبکه به سه قسمت اساسی تقسیم شده و این سه قسمت عبارتند از ناحیه یک که به نام ناحیه حیاتی شناخته می شود، ناحیه ۲ که به نام ناحیه حساس شناخته می شود، ناحیه ۳ که به نام ناحیه مهم شناخته می شود و اولویت بندی این نواحی بر اساس نامی است که برای آنها انتخاب شده است. قسمت اول که برای تابع هدف کاهش تلفات خطوط است به طوری که مکان و مقدار منبع تولید پراکنده به گونه ای تعیین شود که تلفات هر ریز شبکه کاهش یابد. در اثر کاهش تلفات در قسمت اول که عبارت است از کم کردن جریان اکتیو کشیده شده از پست اصلی در اثر کمتر کشیده شدن جریان اکتیو است که در نتیجه تلفات توان اکتیو کاهش یافته و در نتیجه اندازه توان تلفاتی را کاهش می دهیم. در نتیجه این کاهش جریان ولتاژی که در اثر عبور جریان از خطوط افت خواهد کرد کمتر شده و در نتیجه پروفیل ولتاژ اصلاح خواهد شد. از این رو در این تابع هزینه که به صورت نمادین در نظر گرفته شده است پروفیل ولتاژ در قسمت کاهش تلفات در نظر گرفته شده است و به صورت بسیار مناسبی نیز اصلاح خواهد شد. در نمودارهای مقایسه ای که در بخش بعدی نمایش داده خواهد شد به خوبی پروفیل ولتاژ قبل و بعد از اقدامات جبرانسازی در شبکه مقایسه و نمایش داده خواهد شد.

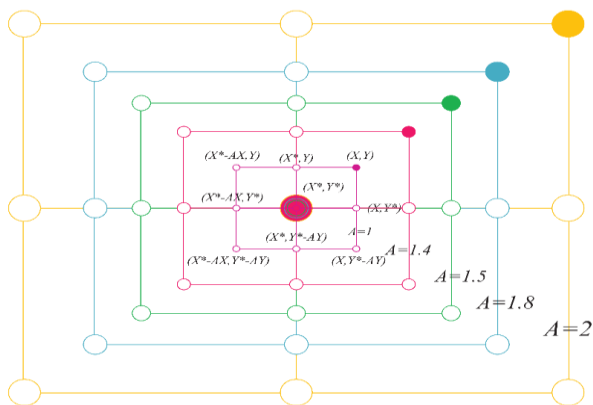


شکل (۱): تقسیم بندی ریز شبکه های سیستم توزیع شده مورد بررسی

الهام گرفته شده است. این مقاله الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری جدیدی (به نام الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ، (WOA) را توصیف می‌کند که رفتار شکار نهنگ‌های گوژ پشت را تقلید می‌کند. برای دانش افزایی نویسندگان این مقاله در منابع بهینه‌سازی، هیچ مطالعه‌ای قبلاً روی این موضوع انجام نگرفته است. تفاوت اصلی بین کار فعلی و مقالات منتشر شده اخیر توسط نویسندگان (به ویژه GWO) رفتار شکار شبیه‌سازی شده با عامل جستجوی تصادفی یا بهترین عامل جستجو برای تعقیب شکار و همچنین استفاده از یک مارپیچ برای شبیه‌سازی مکانیسم حمله حیابی نهنگ گوژ پشت می‌باشد. کارایی الگوریتم WOA در این مقاله با حل ۲۹ مسئله‌ی بهینه‌سازی ریاضیاتی و ۶ مسئله‌ی بهینه‌سازی ساختاری ارزیابی شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که WOA رقابت تنگاتنگی را با روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته دارد [۱۸]. نهنگ گوژ پشت طعمه را به روش دام حیابی و روش تصادفی جستجو می‌کند. مدل ریاضی جستجو به شرح زیر است. در حقیقت، نهنگ‌های گوژ پشت بر اساس موقعیت یکدیگر جستجو را به صورت تصادفی انجام می‌دهند. بنابراین،  $\vec{A}$  را با مقادیر تصادفی بزرگتر از ۱ یا کمتر از -۱ به کار می‌بریم تا عامل جستجو را وادار به دور شدن از یک نهنگ مرجع کنیم. در مقایسه با مرحله بهره‌برداری، برای به روز رسانی موقعیت یک عامل جستجو در مرحله‌ی اکتشافی، به جای یافتن بهترین عامل جستجو تا کنون، از یک عامل جستجوی انتخاب شده به صورت تصادفی استفاده می‌کنیم. این مکانیزم و  $|A| > 1$  بر اکتشاف تأکید دارد و به الگوریتم WOA اجازه می‌دهد یک جستجوی سراسری را انجام دهد. مدل ریاضی آن به شرح زیر است:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (9)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{X} \cdot \vec{D}$$



شکل (۴): مکانیسم پیاده‌سازی شده در الگوریتم وال  $X^*$  انتخاب تصادفی عامل جستجو کننده می‌باشد [۱۹].

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} - R_{i,i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (2)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} - X_{i,i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (3)$$

که در این معادلات  $P_i, Q_i$  توان اکتیو و توان راکتیو هستند که از طریق باس شماره  $i_{th}$  برای باس داریم  $P_{Li}, Q_{Li}$  توان اکتیو و راکتیوی هستند که به باس  $i_{th}$  داریم  $X_{i,i+1}, R_{i,i+1}$  عبارتند از مقاومت و راکتانس باس‌های  $i+1, m$  دامنه ولتاژ موجود بر روی باس شماره  $i+1$  عبارت است از:

$$|V_{i+1}|^2 = |V_i|^2 - 2(R_{i,i+1}P_i + X_{i,i+1}Q_i) + (R_{i,i+1}^2 + X_{i,i+1}^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (4)$$

تلفات توان بین باس شماره  $i+1, m$  عبارت است از:

$$P_{Loss}(i, i+1) = R_{i,i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (5)$$

مجموع تلفات فیدر از مجموع تلفات تک تک خطوط به دست می‌آید: [۲۱].

$$P_{T,loss} = \sum_{i=1}^n P_{Loss}(i, i+1) \quad (6)$$

اگر ظرفیت خازنی استاندارد  $Q_0^C$  نامیده شود ظرفیت خازنی خط عبارت است از ضرب یک عدد صحیح در ظرفیت این خازن:

$$Q_{max}^C = LQ_0^C \quad (7)$$

در معادلات بالا  $L$  یک عدد صحیح است.

و نیز شرایط زیر برای جلوگیری از ایجاد ولتاژ مازاد اعمال می‌شود (قیود مورد استفاده):

$$Q_C^i < \sum_{j=i}^n Q_{Lj} \quad (8)$$

### ۳-۳- الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA)

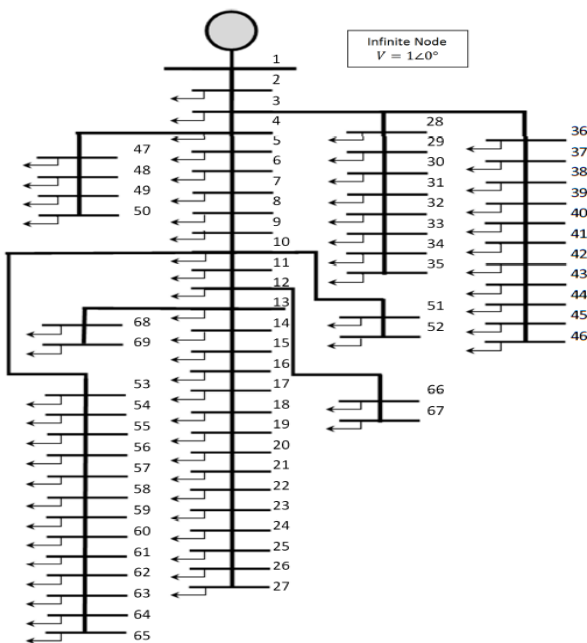
الگوریتم جدیدی از مجموعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری که از طبیعت الهام گرفته، به نام الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA)، ارائه می‌شود. این الگوریتم با الهام از یک نمونه واقعی در طبیعت رفتار اجتماعی نهنگ‌های کوژ پشت را شبیه‌سازی می‌کند. این الگوریتم، یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر ازدحام را با الهام از رفتار شکار نهنگ گوژ پشت ارائه می‌دهد. روش ارائه شده (با نام WOA، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ) شامل سه عملگر برای شبیه‌سازی جستجوی طعمه، محاصره‌ی طعمه و رفتار تغذیه‌ای دام حیابی نهنگ‌های گوژ پشت می‌شود. الگوریتم مورد نظر در مقاله مرجع [۱۶، ۱۷] از استراتژی شکار دام حیابی

این شد تا میزان ابتکارها و تعداد پارامترهای داخلی را به حداقل برسانیم، بنابراین نسخه پایه ای از الگوریتم WOA پیاده سازی شد. اما، پیوندزدن این طرح با طرح های جستجوی تکاملی ممکن است موضوع مطالعات آینده باشد [۱۹ و ۲۰].

#### ۴- شبیه سازی و نتایج

##### ۴-۱- مشخصات شبکه موجود

در این مقاله شبکه توزیع مورد مطالعه یک شبکه ۶۹ باسه بوده و ساختار آن به صورت شعاعی است. دیاگرام شبکه توزیع در شکل (۶) و مشخصات آن در مرجع [۸] نشان داده شده است. در این شبکه مینیمم ولتاژ ۱-۰۹۹۱۹، پرینیت مربوط به گره ۶۵ می باشد و ماکزیمم جریان برابر ۰،۴۹۰۳۱، پرینیت مربوط به شاخه یک می باشد. شکل های (۱۳) و (۱۴) در ضمیمه شبیه سازی های انجام شده با استفاده از نرم افزار متلب را نشان می دهد. مطالعه پخش بار با میزان دقت ۹-۱۰ و حداکثر تکرار ۳۰۰ انجام شده است. در این شبکه که قرار است ساختار پدافند غیرعامل پیاده سازی شود ابتدا به هشت ریز شبکه مجزا تقسیم بندی شده و در ادامه با توجه به نیاز شبکه و تقسیم بندی مورد نظر برای این مقاله شبکه به صورت شکل (۱) مشخص شده است. در این بخش به پیاده سازی این شبکه پرداخته می شود.



شکل (۶): سیستم توزیع ۶۹ باسه مورد نظر برای این مقاله [۱۴].

در ادامه این مقاله هدف آن است که این شبکه توزیع به هشت ریز شبکه تقسیم بندی شود که شین های هر ریز شبکه با توجه به مقاله مرجع [۱۴] انتخاب شده است. هدف نهایی با توجه به ساختار تابع هزینه با توجه به پدافند غیرعامل ارائه شده در

```

Initialize the whales population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Calculate the fitness of each search agent
 $X^*$  = the best search agent
while ( $t <$  maximum number of iterations)
  for each search agent
    Update  $a, A, C, l$ , and  $p$ 
    if1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|A| < 1$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.1)
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        Select a random search agent ( $X_{rand}$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.8)
      end if2
    else if1 ( $p \geq 0.5$ )
      Update the position of the current search by the Eq. (2.5)
    end if1
  end for
  Check if any search agent goes beyond the search space and amend it
  Calculate the fitness of each search agent
  Update  $X^*$  if there is a better solution
   $t = t + 1$ 
end while
return  $X^*$ 

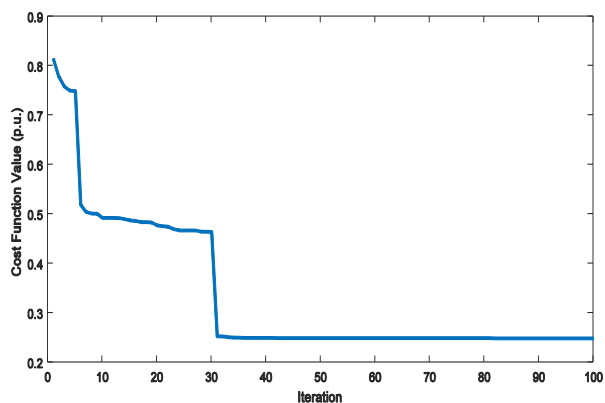
```

شکل (۵): شبه کد الگوریتم بهینه سازی وال [۱۹].

که در آن  $X_{rand}$  یک بردار موقعیت تصادفی (یک نهنگ تصادفی) است که از جمعیت فعلی انتخاب شده است. برخی از موقعیت های ممکن پیرامون یک راه حل خاص با  $|A| > 1$  در شکل (۴) نشان داده شده است. الگوریتم WOA با مجموعه ای از راه حل های تصادفی آغاز می شود. در هر تکرار، عوامل جستجو، موقعیت خود را با توجه به عامل جستجوی تصادفی یا بهترین راه حل که تاکنون به دست آمده است به روز می کنند. پارامتر  $a$  از ۲ به ۰ کاهش می یابد تا به ترتیب اکتشاف و بهره برداری را فراهم کند. برای به روز رسانی موقعیت عامل های جستجو، عامل جستجوی تصادفی زمانی انتخاب می شود که  $|A| > 1$  باشد، در حالی که بهترین راه حل زمانی انتخاب شده است که  $|A| < 1$  باشد. بسته به مقدار  $p$  WOA قادر به حرکت به صورت مارپیچی یا دایره ای است. در نهایت، الگوریتم WOA با فراهم کردن شرط خاتمه پایان می یابد. شبه کد الگوریتم WOA در شکل (۵) ارائه شده است. از دیدگاه نظری، WOA می تواند یک بهینه ساز سراسری محسوب شود؛ زیرا قابلیت اکتشاف / بهره برداری را دارد. علاوه بر این مکانیسم ابر مکعب ارائه شده، یک فضای جستجو را در همسایگی بهترین راه حل تعریف می کند و به عامل های دیگر جستجو اجازه می دهد تا بهترین رکورد فعلی درون آن حوزه را به کار گیرند. تغییر پذیری بردار جستجوی  $A$  به الگوریتم WOA اجازه می دهد تا به سادگی بین اکتشاف و بهره برداری تغییر حالت دهد: با کاهش  $A$ ، برخی از تکرارها به اکتشاف اختصاص یافته اند ( $|A| \geq 1$ ) و بقیه به بهره برداری اختصاص داده شده اند ( $|A| < 1$ ). جالب توجه است که WOA تنها شامل دو پارامتر اصلی داخلی است که باید تنظیم شود ( $A$  و  $C$ ). اگر چه ممکن است جهش و دیگر عملیات تکاملی در فرمول WOA گنجانده شود تا رفتار نهنگ های گوز پشت کاملاً بازسازی شود، تصمیم بر



۴۷ واحد و حداکثر تعداد بانک خازنی برابر با ۳۸ واحد در نظر گرفته شده است. با توجه به این تعداد بهینه‌سازی انجام شده و نتایج این بهینه‌سازی در شکل (۷) ارائه شده است. در این سناریو مفهوم نمودار همگرایی این است که بعد از تعداد تکرار مشخصی این روش به جواب رسیده و در نتیجه با همگرا شدن به یک جواب ویژه مشخص می‌شود که الگوریتم وال به مقدار بهینه‌خود رسیده است. در این نمودار همانطور که مشخص است در تلاش اول تا ۳۰ که منحنی شکستگی دارد الگوریتم در حال گشتن به دنبال مقدار بهینه برای تابع هزینه شبکه است و از این رو الگوریتم در حال جستجو بوده است که شکستگی در منحنی مشاهده می‌شود. در ادامه دیده می‌شود که رفته رفته الگوریتم آموزش بیشتری دیده است و از حالت تصادفی بودن دور شده است و به حالت قطعیت بیشتر رسیده است و منحنی به سمت یکنواخت شدن و همگرا شدن کشیده شده است که نتیجه خط صافی است از تکرار ۳۰ به بعد.



شکل (۷): نمودار همگرایی الگوریتم PSO مورد استفاده در بهینه‌سازی

به این قسمت، قسمت همگرایی تابع هزینه گفته می‌شود بدان معنی که الگوریتم در این قسمت از ابتدا به جواب بهینه رسیده است و از تکرار ۳۰ به بعد مشخص است که مکان بهینه برای منابع تولید پراکنده و نیز بانک‌های خازنی در کجای شبکه و بر روی کدام باس‌های هر یک از ریزشبهه‌ها باید باشد. با این آرایش است که مقدار تابع هزینه به کمترین مقدار خود رسیده و از این رو می‌توان به این نمودار اعتماد کرد و اشاره کرد که الگوریتم از تکرار ۳۰ به بعد مقدار یکسانی برای تابع هزینه پیدا کرده است و منحنی از تکرار ۳۰ به بعد همگرا شده است. در مواقع حمله نظامی ممکن است خط یا دکلی از کار بیفتد و در نتیجه آن بارهای زیادی از شبکه جدا شوند. حال اگر جایابی منابع تولید پراکنده در یک شبکه توزیع را طوری انجام دهیم که قطع شدن یک خط باعث خارج شدن بارها نشود توانسته ایم با این خطر مقابله کنیم. شبکه توزیع دارای چند ریزشبهه است به طوری که هر کدام از ریزشبهه‌ها دارای حداقل یک منبع تولید پراکنده

بخش‌های قبلی این است که در صورت امکان حداقل برای هر ریزشبهه یک منبع توان اکتیو انتخاب شود. در واقع به صورت اکید بر جزءهای تاثیر گذار تابع هزینه تاکید شده و در ادامه از این تابع هزینه برای بهینه‌سازی استفاده شود. همانطور که در این تابع (معادله ۱) دیده می‌شود قسمت اول این تابع که از دو بخش بهینه‌سازی توان اکتیو و راکتیو تشکیل شده است و همین مسئله باعث شده است که در جایابی منابع توان اکتیو و راکتیو اثر گذار باشد. اکنون در ادامه قرار است که با توجه به اهمیت بخش‌های مشخص شده برای ساختار پدافند غیر عامل پیاده‌سازی شده در این تحقیق برای هر یک از ریزشبهه‌ها، یک منبع تولید توان راکتیو (بانک خازنی) و یک منبع تولید پراکنده تعیین شود. تابع هدف از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول مربوط به خودکفا کردن هر ریزشبهه در تامین توان اکتیو و راکتیو خودش است. در نتیجه تابع هدف کاهش اختلاف بین توان تولیدی و توان مصرفی اکتیو و راکتیو است. تا اینکه در صورت قطع شدن ریزشبهه از شبکه توزیع، ریزشبهه کار خود را ادامه دهد به صورتی که تا جای ممکن بار خود را تامین کنند. قسمت دوم تابع هدف کاهش تلفات خطوط است به طوری که مکان و مقدار منبع تولید پراکنده و بانک خازنی طوری تعیین شود که تلفات هر ریزشبهه کاهش یابد. شبکه توزیع مطابق مرجع [۱۴] به هشت ریزشبهه تقسیم شده است که در شکل (۱) و جدول (۳) در پیوست نمایش داده شده است. در این مقاله به منظور نمایش نتایج به صورت مناسب چند سناریو طراحی شده است تا با نمایش نتایج این سناریوها هدف مورد نظر برای جایابی منابع به صورت مشخص برآورده شود. نکته‌ای که در این قسمت لازم است ذکر شود توان کل شبکه است که این شبکه به صورت کامل ۳ مگاوات توان مصرفی دارد که برای جایابی منابع تولید پراکنده توجه به این نکته لازم است که تمامی این توان با استفاده از منابع تولید پراکنده تامین نخواهد شد بلکه تنها بخشی از این توان توسط منابع تامین می‌شود. نکته قابل تامل در این شبیه‌سازی جلوگیری از ایجاد یک نیروگاه تولید پراکنده برای هر کدام از سه قسمت نامبرده در شبکه است. توضیح لازم در مورد جمله پیشین این است که ایجاد یک منبع متمرکز در یک نقطه از شبکه خطر حمله به آن را بالا برده و از این رو در این شبکه سعی شده است که بر روی باسهای مختلف تعداد متفاوتی از این منابع تولید توان پراکنده قرار داده شود. هر کدام از منابع تولید پراکنده که بر روی باس‌های مختلف در نظر گرفته می‌شوند توانی برابر با ۲۵ کیلووات به شبکه تزریق می‌کنند.

#### ۴-۲- سناریو اول

در این سناریو حداکثر تعداد واحدهای منابع تولید پراکنده برابر

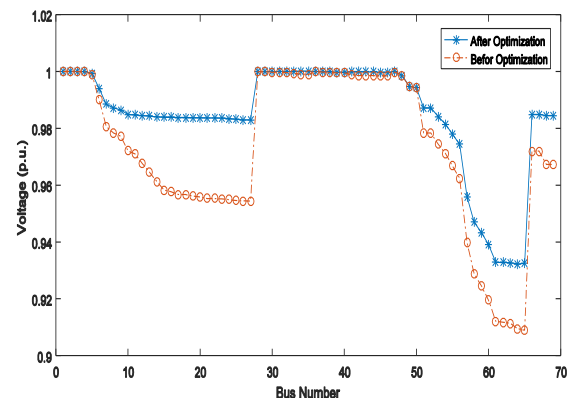
امپدانس خطوط ضرب می شود و ولتاژ افت را به وجود می آورد کاهش یافته و از این رو است که مقدار افت ولتاژی که بر روی امپدانس معادل طول خطوط به وجود می آید کاهش یافته و از این رو است که ولتاژ شبکه بر حسب پریونیت افزایش یافته و به یک نزدیک تر می شود. در این بررسی از شبیه سازی مقاله قبل از بهینه سازی کمینه ولتاژ دارای مقدار  $0.9730$  پریونیت و بعد از بهینه سازی دارای مقدار  $0.9845$  پریونیت است. هنگامی که ریزشکه به صورت شبکه توزیع باشد و به شبکه اصلی وصل باشد کل بارها تامین خواهد شد ولی هنگامی که ریزشکه ها به صورت مستقل عمل می کنند مقداری از بارها باید از شبکه جدا شوند. یا به اصطلاح load shedding اتفاق بیافتد. دلیل این بار ریزی به تعداد منابع تولید پراکنده و بانک خازنی بر میگردد که در تامین بار محدودیت ایجاد کرده است. تعداد و مکان منابع تولید پراکنده برای ریزشکه ها به شرح زیر است:

جدول (۱): تعداد و مکان منابع تولید پراکنده برای ریزشکه ها

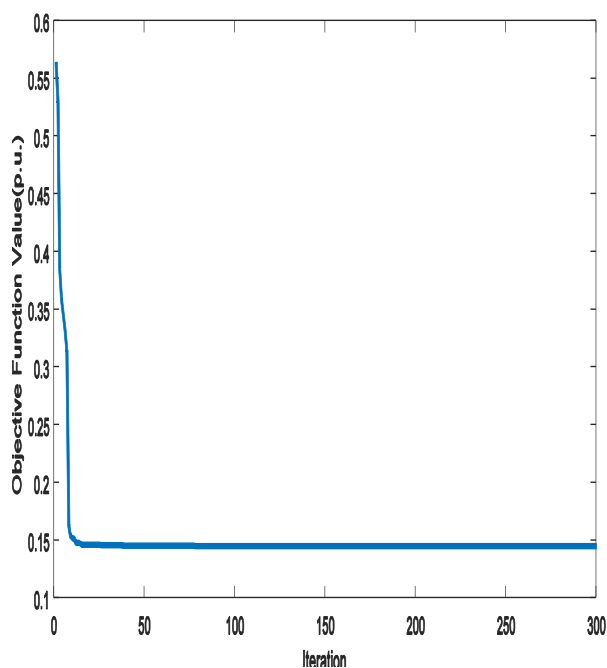
تعداد بانک خازنی	شماره باس توان راکتیو	تعداد منابع تولید پراکنده	شماره باس توان اکتیو
۸	۵۱	۸	۹
۱	۳۰	۲	۳۴
۲	۴۲	۴	۴۵
۲	۵۴	۳	۵۸
۸	۶۵	۸	۶۴
۸	۶	۸	۱۲
۴	۱۶	۷	۱۷
۵	۲۴	۷	۲۱

قابل ذکر است که تلفات قبل از بهینه سازی برابر با ۲۲۷ کیلووات و پس از بهینه سازی به ۱۲۲ کیلووات کاهش یافته است. از آنجایی که تلفات با جریان رابطه مستقیم داشته از این رو با کاهش تلفات توان کشیده شده از منبع نیز کاهش یافته و جریانی که از خطوط عبور کرده تا به محل تلفات برسد نیز کاهش یافته است. با کم تر شدن جریان کشیده شده حرارت در خطوط کاهش یافته و یکی از مهمترین اتفاقاتی که در این شبکه رخ می دهد کاهش تلفات به واسطه کاهش جریان کشیده شده از منبع و در نتیجه کاهش جریانی که از خطوط می گذرد خواهد بود. در توزیع این منابع میان ریزشکه های موجود نکته قابل توجهی وجود دارد و آنکه از مقایسه بین شکل (۱) و شکل (۲) دیده می شود که دقیقاً مطابق با اهمیت این نواحی منابع تولید پراکنده در این ریزشکه ها توزیع شده اند.

می باشند. حال با این شرایط، در صورت قطعی برق، بارهای محلی با استفاده از منبع تولید پراکنده موجود تغذیه می شوند. در نتیجه یافتن مکان و مقدار منابع تولید پراکنده برای هر ریزشکه حایز اهمیت میباشد. تابع هزینه همانطور که از نامش پیداست با توجه به اینکه از جنس هزینه بوده و در هر کاری هدف کم کردن هزینه است این تابع نیز باید تا جایی که می تواند کم شود. ریزشکه ها تقسیم بندی شده است و هدف پدافند عامل با توجه به نوآوری مورد نظر این پژوهش به مقاله اضافه شده است. تابع هزینه مورد نظر که فرمولاسیون آن به صورت زیر است به صورتی است که در صورت وقوع بروز خطا برای یک یا چند ریزشکه انتخاب شده در صورت بروز هر گونه حمله نظامی بتواند در صورت بروز قطعی برق منابع تولید پراکنده که برای شبکه در گرفته شده است بتوانند پاسخگوی نیاز آن قسمت از شبکه بوده و در نتیجه تغذیه آن منطقه بی وقفه صورت پذیرد. در زیر تابع هدف مورد نظر نمایش داده شده است. بعد از بهینه سازی به هر کدام از ریزشکه های منبع توان اکتیو تخصیص داده می شود تا به صورت کامل نیاز سیستم به پدافند غیر عامل برطرف شده و در نتیجه بتوان انتظار داشت تا در صورت بروز خطا ریزشکه ها به صورت مستقل به کار خود ادامه دهند این توان اکتیو است که بعد از بهینه سازی دیده می شود.



شکل (۸): نمودار پروفیل ولتاژ شبکه ۶۹ باسه مورد بررسی در این مقاله در دو حالت قبل از بهینه سازی و بعد از بهینه سازی میانگین و کمینه ولتاژ در نظر گرفته شده اند که به ترتیب کمینه ولتاژ قبل از بهینه سازی  $0.909$  پریونیت و کمینه ولتاژ بعد از بهینه سازی  $0.9325$  پریونیت شده است که نشانگر افزایش مقدار ولتاژ است. افزایش ولتاژ به چه معنی است؟ با توجه به اینکه در این نمودارها (پروفیل ولتاژ) اعداد بر حسب پریونیت اعلام شده است از این رو انتظار می رود که قبل از بهینه سازی اعداد پایین تر از مقدار بعد از بهینه سازی باشند و از این رو است که لفظ افزایش ولتاژ به کار برده می شود. معنی افزایش ولتاژ در شبکه توزیع یعنی کاهش تلفات چرا که با کاهش جریان مقدار جریانی که در

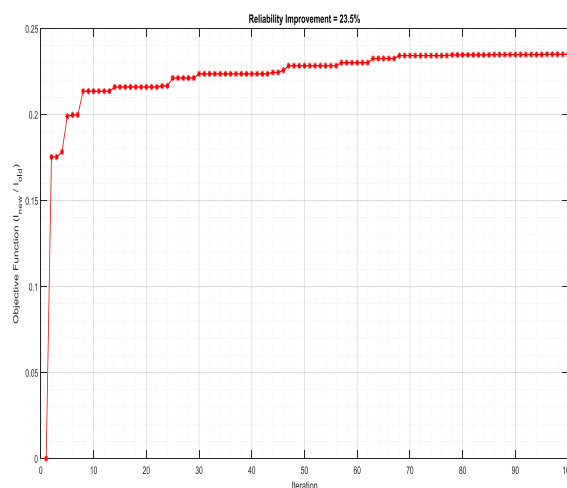


شکل (۱۰): نمودار همگرایی سناریو دوم

همانطور که در شکل (۱۰) نمایش داده شده است بعد از حدود ۱۰ تکرار الگوریتم وال جواب بهینه را یافته و از این رو است که نمودار همگرایی این الگوریتم از تکرار حدود ۱۰ به بعد مقدار برابری برای تابع هزینه یافته است و بنابراین معنی این نمودار همگرا شدن آن است. همانطور که از محورهای این شکل مشخص است دیده می‌شود که محور افقی تعداد تکراری است که برای الگوریتم در نظر گرفته شده است و این تعداد ۳۰۰ مرتبه بوده است. همچنین در این شکل مشخص نمی‌شود که تعداد ذراتی که در این جستجو شرکت کرده‌اند چه تعداد بوده است اما در الگوریتم این تعداد ذرات ۱۰۰ در نظر گرفته شده است که به منظور فهمیدن تعداد جستجویی که در این شبکه بره منظور یافتن نقاط صحیح منابع تولید پراکنده و نیز بانک خازنی انجام شده است از ضرب این دو عدد به دست می‌آید. از این رو در این سناریو تعداد جستجو مناسب بوده است و از این نظر نقطه‌ای که برای این منابع و نیز بانک‌های خازنی در نظر گرفته شده است به احتمال بسیار بالایی نقاط بهینه بوده است. تابع هدفی که برای این پژوهش در نظر گرفته شده است از نوع هزینه بوده است. از طرف دیگر می‌توان از روی شکل منحنی به نوع تابع هزینه پی برد چراکه منحنی که تابع هدف آن کاهشی باشد از نوع هزینه تعریف شده است و منحنی که تابع هدف آن از نوع افزایشی باشد از نوع سود آوری تعریف شده است.

#### ۴-۲-۱- بررسی بهبود قابلیت اطمینان در سناریو اول

در این قسمت به منظور بررسی بهبود قابلیت اطمینان شبکه به ارائه معیاری از قابلیت اطمینان که مربوط به مقدار انرژی مورد انتظار مشترکین است که تحویل نشده است. از این رو ابتدا به مشخص کردن تابع هزینه ای که برای این کار استفاده شده است پرداخته می‌شود. در توضیح نحوه مشخص کردن قابلیت اطمینان با توجه به مقاله ای که در [۱۴] آورده شده است دیده می‌شود که با کاهش جریان شبکه بعد از بهینه سازی نسبت به قبل از بهینه سازی قابلیت اطمینان شبکه افزایش یافته و این مهم با کاهش EENS اتفاق می‌افتد. دلیل این توضیح این است که با کاهش جریان عبوری از شبکه توزیع حرارت در خطوط کاهش یافته و علاوه بر کاهش تلفات امکان رخ دادن خطا در شبکه نیز کمتر می‌شود. از این رو در این پژوهش از متدی که در این مقاله برای این کار معرفی شده است استفاده می‌شود.



شکل (۹): نتیجه بهبود قابلیت اطمینان در سناریو اول

با توجه به شکل (۹) دیده می‌شود که قابلیت اطمینان در این سناریو بهبود پیدا کرده است و مقدار بهبود قابلیت اطمینان در این سناریو به ۲۳٫۶٪ رسیده است که بسیار مهم است.

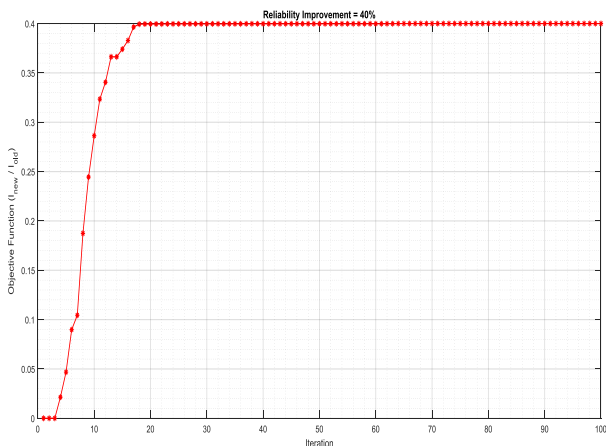
#### ۴-۳- سناریو دوم

در این سناریو این بار تعداد منابع تولید پراکنده برابر ۸۰ و تعداد بانک خازنی را برابر ۷۰ در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن این تعداد منابع باید الگوریتم به دنبال بهترین نقاط برای جایابی این منابع گشته و پس از یافتن نقاط بهینه برای جایابی این منابع به هر ریز شبکه میزانی از توان که نیاز دارد را تخصیص دهد. نمودار ولتاژ و نمودار همگرایی در این سناریو به صورت زیر است:

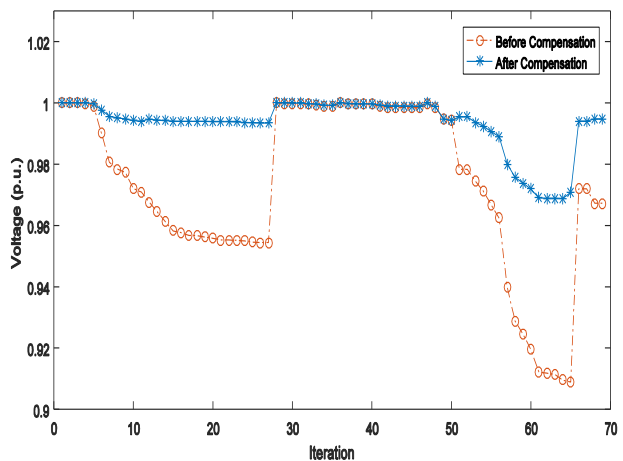
همانطور که در جدول (۱) و جدول (۲) دیده می شود در هر سناریو در ستون دوم شماره باسی که منبع توان اکتیو بر روی آن قرار می گیرد نمایش داده شده است. در ستون سوم تعداد منابع تولید پراکنده ای که بر روی باس های مختلف در دو سناریو قرار میگیرد آمده است و در ستون چهارم نیز شماره باسی که حداقل یک منبع توان راکتیو بر روی آن قرار میگیرد نمایش داده شده است و این قیود در برنامه نوشته شده برای شبیه سازی به صورت دقیق لحاظ شده اند. برای مثال قبل از بهینه سازی در میکروگرید شماره یک ۸ عدد منبع تولید پراکنده بر روی میکروگرید شماره ۸ قرار گرفته است و و نیز بر روی باس شماره ۵۱ منبع توان راکتیو قرار گرفته است. و بعد از بهینه سازی نیز بر روی باس شماره ۸ از میکروگرید شماره یک تعداد ۱۲ عدد منبع تولید پراکنده اکتیو و نیز بر روی باس شماره ۵۱ که در میکروگرید شماره یک قرار دارد نیز حداقل یک عدد منبع توان راکتیو قرار گرفته است. و سایر ستون های جدول نیز به همین ترتیب قابل تحلیل و بررسی هستند.

#### ۴-۳-۱- بررسی بهبود قابلیت اطمینان در سناریو دوم

با توجه به مقاله مرجعی که در این پژوهش به منظور استفاده در قسمت قابلیت اطمینان استفاده شده است دیده می شود که بهبود قابلیت اطمینان از طریق کاهش جریان عبور از خطوط رخ می دهد و به همین دلیل با ارزیابی نسبت جریان قبل از بهینه سازی و نیز بعد از بهینه سازی روند بهبود این معیار نیز مشخص می شود. در این سناریو با توجه به افزایش تعداد بانک های خازنی و نیز منابع تولید پراکنده که در شبکه جایابی شده اند انتظار می شود که نظر به اینکه در این شبکه پاسخگویی به تقاضا برای بار ساده تر شده است از این رو قابلیت اطمینان باید افزایش یابد. به همین خاطر در ادامه نمودار بهبود قابلیت اطمینان آورده می شود تا نتیجه این سناریو نیز مشخص شود.



شکل (۱۲): بهبود قابلیت اطمینان در سناریو دوم

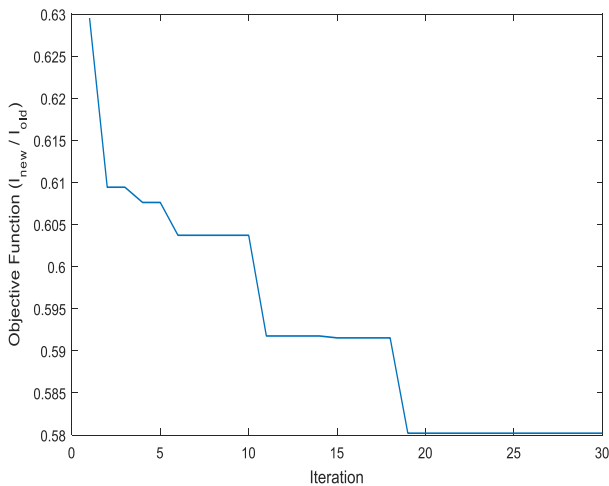


شکل (۱۱): نمودار پروفیل ولتاژ شبکه ۶۹ باسه مورد بررسی (سناریو دوم)

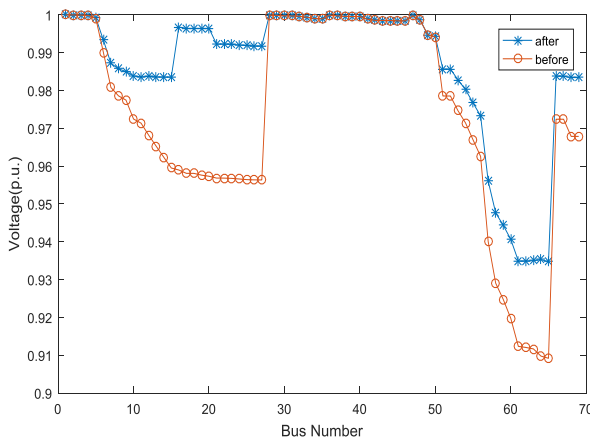
در این سناریو تلفات از ۲۲۷ کیلو وات به ۳۴ کیلو وات کاهش یافته است. علت این اتفاق اضافه شدن منابع توان تولید پراکنده در نقاطی از شبکه است که نیاز به توان داشته است. این مفهوم از آنجا بر می آید که با قرار گرفتن منابع تولید پراکنده در نقاطی از شبکه که درخواست توان از منبع اصلی زیاد است نیاز شبکه به جریان به صورت محلی پاسخ داده می شود و از این رو جریانی که از منبع اصلی باید کشیده شود و در قسمت زیادی از شبکه به راه بیفتد و در امپدانس خطوط شبکه جریان بیشتری ضرب شود و در نتیجه افت ولتاژ بیشتری محاسبه شود با قرار گرفتن منابع تولید پراکنده در شبکه این مقدار درخواست جریان کمتر شده است و از این رو تلفات کمتری شده و در نتیجه افت ولتاژ کمتر شده است و در نهایت پروفیل ولتاژ به یک نزدیک تر شده است. تعداد منابع تولید پراکنده و بانکهای خازنی هر یک از ریز شبکه ها در جدول زیر آمده است:

جدول (۲): تعداد منابع تولید پراکنده و بانکهای خازنی هر یک از ریز شبکه ها

تعداد بانک خازنی	شماره باس توان راکتیو	تعداد منابع تولید پراکنده	شماره باس توان اکتیو
۱۷	۵۱	۱۲	۸
۱	۳۱	۱۱	۳۴
۲	۴۳	۹	۴۵
۲	۵۵	۱۰	۵۸
۳۰	۶۵	۱۰	۶۱
۹	۶۸	۱۴	۱۲
۴	۱۶	۷	۱۷
۵	۲۷	۷	۲۲



شکل (۱۳): نمودار همگرایی



شکل (۱۴): نمودار ولتاژ باس‌ها

جدول (۳): نتایج حاصل از حالت بررسی شده

افزایش قابلیت اطمینان	اتصال شاخه اول به	اتصال شاخه دوم به	کمینه ولتاژ
۷۲/۳۵	باس شماره ۲	باس شماره ۵	۰,۹۳۵

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن قیدهای پدافند غیر عامل بوده است. با توجه به اینکه در برخی از نواحی شبکه ممکن است اهداف استراتژیک قرار داده شده باشد از این رو نیاز است که در این نقاط منابعی به صورت محلی قرار داده شود که علاوه بر کاهش تلفات شبکه بتواند به صورت محلی پاسخگوی بار این قسمت‌ها باشد. نشانه اینکه این منابع می‌توانند پاسخگوی بار شبکه باشند دو عامل است. یکی دانستن مقدار توانی که ریزشکده هدف نیاز دارد و طراحی منبعی به اندازه همان نیاز برای آن قسمت از ریزشکده. دوم اینکه با قرار دادن منابع تولید پراکنده برای شبکه بتوان تلفات شبکه را کم کرده و پروفایل ولتاژ شبکه را به مقدار یک پریونیت نزدیک کرد. لازم به

### ۴-۴- سناریو سوم: تلفیق قید هزینه قابلیت

#### اطمینان ENS در ساختار مسئله پیشنهادی

در این بخش، برای تلفیق قید هزینه قابلیت اطمینان ENS از کمیت جریمه PF به عنوان جریمه مربوط به تجاوز از حد مجاز شاخص هزینه قابلیت اطمینان (RCI) استفاده می‌شود که با افزودن آن به هزینه کل، تابع هدف تکمیل یافته زیر حاصل خواهد شد:

$$OF_{\text{Comp1}} = OF + PF \times RCI \quad (10)$$

مقدار RCI از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$RCI = \begin{cases} (Cost_{\text{Reliability}} - Cost_{\text{Reliability}}^{\max})^2 & , Cost_{\text{Reliability}} > Cost_{\text{Reliability}}^{\max} \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

که

$$Cost_{\text{Reliability}} = C_{\text{ENS}} \times (\sum_{i=1}^3 ENS_i + \sum_{i=4}^6 ENS_i + \sum_{i=7}^8 ENS_i) \quad (12)$$

$$Cost_{\text{Reliability}}^{\max} = 0.15 \times OF \quad (13)$$

بطوریکه،

$ENS_i$ : مقدار انرژی تأمین نشده مشترکین در ریزشکده  $i$ ام،  $Cost_{\text{Reliability}}$ : هزینه قابلیت اطمینان شبکه.

$Cost_{\text{Reliability}}^{\max}$ : ماکزیمم هزینه قابلیت اطمینان تحمیلی به شبکه که ۱۵ درصد هزینه کل می‌باشد.

همانطور که از تابع هدف تکمیل یافته مشخص است در هر تکرار مقدار هزینه قابلیت اطمینان تحمیلی چک شده، در صورتی که این هزینه  $(Cost_{\text{Reliability}})$  بیش از ۱۵ درصد هزینه کل (OF) باشد، الگوریتم به دنبال جواب دیگری (جواب بهینه) می‌گردد. جهت بررسی این سناریو مجدداً در دو عدد از ریزشکده‌هایی که در قسمت‌های قبل مشخص شده، خطا در نظر گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این حالت قابلیت اطمینان تا ۷۲/۳۵ درصد بهبود یافته است. در این حالت نیز شاخه اول به باس شماره ۲ و شاخه دوم به باس شماره ۵ وصل شده است. از طرفی کمینه ولتاژ نیز به مقدار ۰/۹۳۵ پریونیت است. مکان منبع تولید پراکنده اول بر روی باس شماره ۶۴ و مکان منبع تولید پراکنده دوم بر روی باس شماره ۱۲ است.

- [5] A. Gopi, "Distributed generation for line loss reduction in radial distribution system," In Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM), 2012 International Conference on, IEEE, pp. 29-32, December 2017.
- [6] M. A. Kashem, A. D. Le, M. Negnevitsky, and G. Ledwich, "Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems," In Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, pp. 8-pp IEEE, June 2016.
- [7] M. Palizvan and R. Dashti, "Enhancing Security of Power Transmission Systems Against Destructive Attacks in the Field of the Passive Defense " Passive Defense Quarterly, vol. 9, no. 3, pp. 11-19, 2018. (In persian)
- [8] M. Kowsalya, "Optimal Distributed Generation and capacitor placement in power distribution networks for power loss minimization," In Advances in Electrical Engineering (ICAEE), International Conference on, IEEE.2014. pp. 1-6, January 2014.
- [9] J. P. Lopes, N. Hatzigaryriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, "Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities," Electric power systems research, vol. 77(9), pp. 1189-1203, (2017).
- [10] C. Mondal, "Distributed Generation Allocation for Power Loss Minimization and Voltage Improvement of Radial Distribution Systems Using Different ution Systems Using Different ution Systems Using Different Techniques," Techniques, 2017.
- [11] S. E. Souza, "Specialized genetic algorithm of Chu-Beasley applied to the Distribution System Reconfiguration problem considering several demand scenarios," in PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, IEEE, 2015.
- [12] D. F. Teshome and K. L. Lian, "An improved distribution system reconfiguration using hybrid GA with PSO," 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015, pp. 77-82, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165386.
- [13] C. Wang and M. H.Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," IEEE Transactions on Power systems, vol. 19(4), pp. 2068-2076, 2016.
- [14] S. A. Arefifar, I. Yasser Abdel-Rady Mohamed, and Tarek HM El-Fouly, "Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems,," IEEE transactions on smart grid 3.3, pp. 1491-1502, 2012.
- [15] Eid, Ahmad, and Salah Kamel, "Optimal Allocation of Multiple Distributed Generations in radial Distribution Systems Using Levy Flight Distribution Algorithm." 2021 IEEE International Conference on Automation Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA). IEEE, 2021.
- [16] Sambaiah, Kola Sampangi and T. Jayabarathi, "Optimal reconfiguration and renewable distributed generation allocation in electric distribution systems." International Journal of Ambient Energy 42.9, pp. 1018-1031, 2021.
- [17] Mujeeb, Asad, and Wang Peng, "Long Run Incremental Cost (LRIC) Distribution Network Pricing in UK, advising China's Distribution Network," arXiv preprint arXiv:2205.09946 2022.
- [18] Khan, Riaz, et al. "Energy Sustainability-Survey on Technology and Control of Microgrid, Smart Grid and Virtual Power Plant." IEEE Access 9 (2021): 104663-104694.
- [19] Chakraborty, Sanjoy, et al. "A novel enhanced whale optimization algorithm (WOA) for global optimization." Computers & Industrial Engineering 153 (2021): 107086.
- [20] K. H. Kim, Y. J. Lee, S. B. Rhee, S. K. Lee, and S. K. You, "Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems. In Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, vol. 3, pp. 1148-1153, 2016.
- [21] B. Jedi, R. Ghafarpour, and A. M. Ranjbar, "Improving passive defense indicators using optimal planning Renewable energy sources in smart electricity distribution networks," Journal of the Iranian Electrical and Electronics Engineering Association - 15th year - 1st issue - Spring 2017. (In persian)

ذکر است که سیستم مورد مطالعه، متعادل است که در آن، بارها و خطوط انتقال متعادل هستند (امپدانس هر سه فاز برابر است) و ژنراتورها ولتاژ سه فاز متعادل تولید می کنند (دامنه ولتاژ سه فاز، برابر و اختلاف فاز آن ها ۱۲۰ درجه است). در این پژوهش با توجه به اینکه وجود اهداف استراتژیک فرضی بوده است و نمی توان توان مشخص را برای این اهداف در نظر گرفت از این رو از راه دوم برای موفق بودن این روش استفاده شده است. بدین معنی که اگر منابع تولید پراکنده توانایی کاهش افت ولتاژ شبکه را داشته باشند پس توانایی پاسخگویی نیاز شبکه را نیز خواهند داشت. در این مقاله برای بررسی نقش بهینه سازی دو سناریو مختلف در نظر گرفته شده است که در سناریو اول تعداد واحدهای منابع تولید پراکنده برابر ۴۷ واحد و حداکثر تعداد بانک خازنی برابر با ۳۸ واحد در نظر گرفته شده است. در اثر جایگذاری درست این واحدهای تولید توان در جاهای مناسب تلفاتی که قبل از بهینه سازی برابر با ۲۲۷ کیلووات بوده است بعد از بهینه سازی کاهش قابل توجهی داشته است و به ۱۲۲ کیلووات کاهش یافته است. که این خود به خوبی نقش بهینه سازی صورت پذیرفته را نمایش می دهد. از سوی دیگر در سناریو دوم تعداد منابع تولید پراکنده را برابر ۸۰ و تعداد بانک خازنی را برابر ۷۰ در نظر گرفته ایم. در ابتدا دیده می شود که نمودار همگرایی این سناریو به صورت قابل توجهی حتی با حالت قبلی تفاوت پیدا کرده است و بهینه سازی صورت پذیرفته با این تعداد منابع به کاهش تلفات بسیار بیشتری انجامیده است. در این حالت که این خود به خوبی بیان گر نقش بهینه سازی در تعیین مکان مناسب منابع تولید پراکنده و تعداد این منابع و در نهایت کاهش تلفات است. برای بهبود کار انجام شده در این مقاله موارد زیر پیشنهاد می شود: مکانی که در آن شبکه توزیع به ریزشبهه تبدیل می شود میتواند مورد مطالعه قرار گیرد تا نوع و قابلیت تولید توان منابع تولید پراکنده تعیین شود- در این مقاله شبکه توزیع ۶۹ باسه به ۸ ریزشبهه تبدیل شده است. تعداد ریزشبهه ها را میتوان کمتر/بیشتر نمود و مطالعه ای بر روی اثر آن بر تأمین بار شبکه توزیع انجام داد و برای دقیق تر شدن محاسبات می توان تغییرات بار را در شبانه روز را در نظر گرفت.

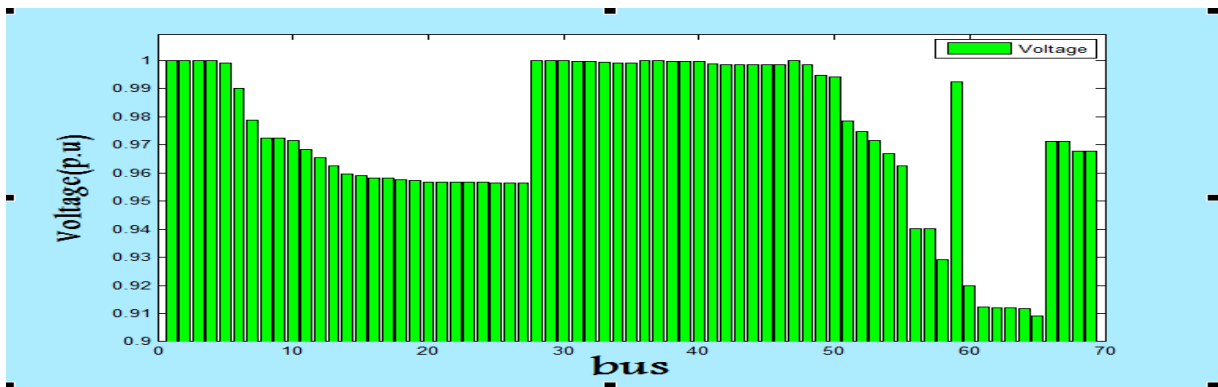
## ۶- مراجع

- [1] R. Dashti, , "Passive defense in electrical energy distribution systems", Passive Defense Quarterly, fourth year, no. 3, pp. 1-11, 2013. (In persian)
- [2] R. Ghafarpour, "Passive defense in the planning of electric power distribution systems", Tehran, Imam Hossein University, 2017. ( In persian)
- [3] X. Chen, et al., "Reinforcement learning for selective key applications in power systems: Recent advances and future challenges," IEEE Transactions on Smart Grid 2022.
- [4] A. Asrari, "Optimal distribution network reconfiguration using dynamic fuzzy based genetic algorithm. in Innovations in Technology Conference (InnoTek)," 2014 IEEE, 2014.

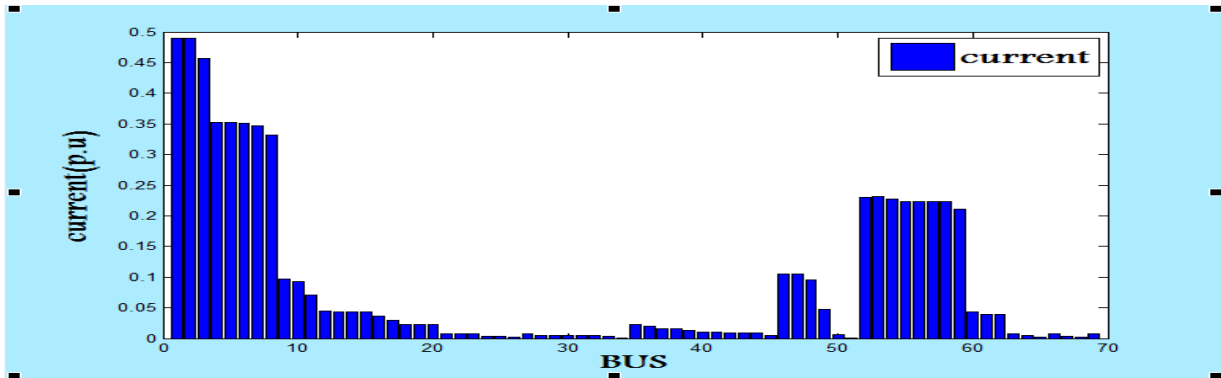
**پیوست**

جدول (۳): ناحیه بندی شبکه ۶۹ باسه استاندارد به منظور تقسیم بندی پدافند غیر عامل

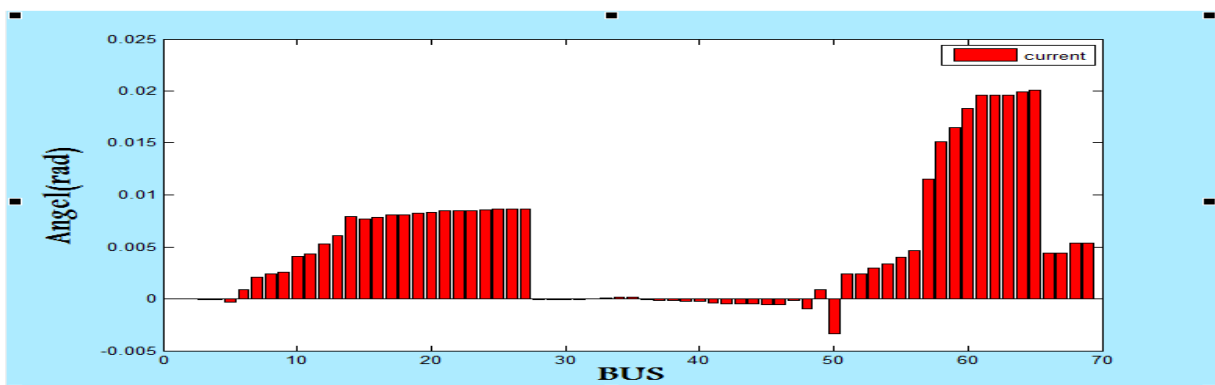
میکروگریدها	باس ها	ناحیه ها	
سه ریز شبکه اول (۳ و ۱ و ۲)	۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰	حیاتی	۱
سه ریز شبکه دوم (۴ و ۵ و ۶)	۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰	حساس	۲
دو ریز شبکه آخر (۸ و ۷)	۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶	مهم	۳



شکل (۱۵): دامنه ولتاژ گره های سیستم توزیع ۶۹ باسه



شکل (۱۶): دامنه جریان شاخه های سیستم ۶۹ باسه



شکل (۱۷): زاویه سیستم ۶۹ باسه