



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 11, No. 4, 2021  
Research Paper

## Conceptual Design of Multi-Microgrid Structure in Active Distribution Networks

Fereshteh Moghateli<sup>1</sup>, Seyed Abbas Taher<sup>2</sup>, Ali Karimi<sup>3</sup>, Mohammad Shahidehpour<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>2</sup> Dept. of Electrical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>3</sup> Dept. of Electrical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>4</sup> Electrical and Computer Engineering Department, Illinois Institute of Technology, Chicago, IL, U.S.A

### Abstract:

One of the major issues in the planning stage for distribution networks is the optimal design of microgrids (MGs). One of the important goals in the design of MGs is supplying the load with the highest reliability and the lowest cost. Construction of MGs in the distribution systems may have many benefits such as local control strategy in order to minimize the interaction between different MGs, prevent the fault propagation and finally, increase the reliability of the system for consumers and distribution companies. Therefore, in this paper, with the aim of improving reliability and cost, three different approaches to constructing multi-microgrid (MMG) systems in the active distribution network (ADN) are proposed and compared. In this way, by determining the location and capacity of energy storage systems (ESSs) as well as clustering of ADN based on the mentioned objectives and proposed optimization algorithms, in different scenarios, using the Monte Carlo (MC) algorithm and the Forward-backward load flow, the objective function is calculated. Then, with the repetition and various suggestions made by the optimization algorithm, the optimal value of the objective function is obtained and the results of the designed approaches are compared. To simulate and demonstrate the effectiveness of the proposed method, the 119-bus test distribution system is used.

**Keywords:** multi-microgrid systems, energy storage systems, reliability, Active distribution network, siting and sizing.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.119439.1285>

## طراحی مفهومی ساختار ریزشبه‌های چندگانه در شبکه‌های توزیع فعال

فرشته مقاتلی<sup>۱</sup>، سید عباس طاهر<sup>۲\*</sup>، علی کریمی<sup>۳</sup>، محمد شاهیده‌پور<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

f.moghateli@gmail.com

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

sataher@kashanu.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

a.karimi@kashanu.ac.ir

۴- استاد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه ایلی‌نویز - ایلی‌نویز - آمریکا

ms@iit.edu

**چکیده:** یکی از مسائل مهم در مرحله برنامه‌ریزی برای شبکه‌های توزیع، طراحی بهینه ریزشبه‌ها است. از جمله اهداف مهم در طراحی ریزشبه‌ها، تأمین بار با بیشترین قابلیت اطمینان و کمترین هزینه است. ساخت ریزشبه‌ها در سیستم توزیع، مزایای زیادی مانند راهبرد کنترل محلی به‌منظور به حداقل رساندن تقابل بین ریزشبه‌ها، جلوگیری از پیشروی خطا و در نهایت افزایش قابلیت اطمینان برای مصرف‌کنندگان و شرکت‌های توزیع دارد؛ بنابراین، در این مقاله با هدف بهبود قابلیت اطمینان و هزینه، سه رویکرد متفاوت برای ایجاد سیستم‌های چندریزشبه‌ای در شبکه توزیع فعال پیشنهاد و مقایسه شده است؛ بدین صورت که با تعیین مکان و ظرفیت سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و همچنین محدوده ریزشبه‌ها مبتنی بر اهداف ذکر شده و براساس الگوریتم‌های پیشنهادی بهینه‌سازی، در سناریوهای مختلف با استفاده از الگوریتم مونت‌کارلو و اعمال پخش‌بار پیشرو - پسرو، تابع هدف محاسبه می‌شود. سپس، با تکرار و پیشنهاد‌های مختلف صورت‌گرفته با الگوریتم بهینه‌سازی، مقدار بهینه تابع هدف به دست می‌آید و نتایج رویکردهای طراحی شده با هم مقایسه می‌شوند. برای شبیه‌سازی و بررسی کارایی روش پیشنهادی از سیستم توزیع ۱۱۹ شینه استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم چند ریزشبه‌ای، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، قابلیت اطمینان، مکان‌یابی و اندازه‌یابی.

### ۱- مقدمه

است. این موضوع چالش‌های جدیدی را در طراحی و

بهره‌برداری شبکه‌های توزیع ایجاد کرده است [۱].

در شبکه‌های توزیع فعال (ADN)، برخی از بخش‌های

سیستم را می‌توان به صورت ریزشبه‌هایی (MGs) تعریف

کرد که به یکدیگر متصل می‌شوند و در حالت متصل/مجزا

به/از شبکه عمل می‌کنند [۲].

DGهای تجدیدپذیر در ریزشبه‌ها، نسبت به سایر

DGها، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. به علت

ماهیت تصادفی این منابع، با افزایش سطح نفوذ آنها بر

تمامی شبکه تأثیر می‌گذارند [۳].

ادغام منابع تولید پراکنده<sup>۱</sup> (DG) در سیستم‌های توزیع

سستی، ماهیت آنها را از حالت غیرفعال به فعال تغییر داده

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷

نام نویسنده مسئول: سید عباس طاهر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - دانشگاه کاشان -

دانشکده برق و کامپیوتر

توزیع حل شده است. در [۱۱]، رویکردی برای تقسیم‌بندی یک شبکه توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های اعتمادشده ارائه شده است. در [۱۲]، به منظور رسیدن به یک طراحی، فرآیند خوشه‌بندی سه هدف به حداکثر رساندن خودکفایتی ریزشبکه‌های طراحی‌شده، به حداکثر رساندن احتمال موفقیت در ریزشبکه جزیره و ترکیبی از این دو هدف را در نظر می‌گیرد. روش متفاوت مبتنی بر تحلیل ویژگی‌های ساختاری به منظور تقسیم‌بندی شبکه توزیع به چندین ریزشبکه در [۱۳] پیشنهاد شده است. در [۸] الگوریتم طراحی MMG براساس کمینه‌سازی نبود تعادل بین تولید و بار در جزیره‌ها انجام شده است. در [۱۴]، روش طراحی بهینه شبکه‌های توزیع ولتاژ پایین براساس MGهای متعدد با استفاده از برخی معیارهای مهم مانند تعادل توان و توزیع مکانی بارها ارائه شده است. در [۹] روش جدیدی برای طراحی یک زیرساخت ارتباطی و کنترل ارائه شده است. روش پیشنهادی، با در نظر گرفتن کیفیت توان، تقسیم‌بندی سیستم توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌ها را تسهیل می‌بخشد. مرجع [۱۵] با تعریف یک شاخص احتمالی، روش‌هایی را برای تقسیم‌بندی سیستم توزیع به چندین MG ارائه داده است که در آنها شاخص‌های قابلیت اطمینان و کفایت بهینه شده‌اند. تقسیم‌بندی یک شبکه توزیع فعال به یک سیستم MMG با لحاظ اهداف قابلیت اطمینان، خودکفایتی و قابلیت کنترل ولتاژ و جریان در [۱۶] انجام شده است. یک روش بهینه‌سازی قوی برای طراحی بهینه ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن یک توپولوژی با قابلیت تجدید آرایش در [۱۷] پیشنهاد شده است.

در بیشتر تحقیقات قبلی، مانند مراجع [۱۷-۱۴]، توابع هدف با ضرایب وزنی به صورت مسئله تک‌هدفه در نظر گرفته شده‌اند و تعارض بین اهداف موجود در مسائل دنیای واقعی نادیده گرفته شده است. در اینجا سعی شده است با جزئیات بیشتری به مسئله طراحی با اهداف قابلیت اطمینان و هزینه تلفات و خرید توان از شبکه بالادست پرداخته شود و پاسخ‌های پارتو به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی تحلیل و مقایسه شوند.

برای دستیابی به این مهم، سه رویکرد تعریف شده است: در رویکرد اول مکان‌یابی ESSها با هدف

اهدافی چون به تعویق انداختن ارتقای سیستم، کاهش تلفات توان و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، محرکی برای شرکت‌های برق به منظور اتصال منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی<sup>۲</sup> (ESSs) شده‌اند؛ به همین دلیل مسئله اختصاص بهینه ESSها مطرح می‌شود. تقسیم‌بندی سیستم‌های توزیع به چندین ریزشبکه<sup>۳</sup> (MMG)، به یک راه‌حل پذیرفتنی برای ایجاد یک سیستم با قابلیت اطمینان بیشتر تبدیل شده است [۵]، [۴].

بهره‌برداری از ریزشبکه‌های چندگانه با هماهنگی با سیستم توزیع، نفوذ بالای منابع انرژی توزیع‌شده محلی را امکان‌پذیر می‌سازد. این روش قابلیت اطمینان و تاب‌آوری منبع تغذیه را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد. همچنین، به دلیل ادغام توان بدون هزینه از پانل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی، هزینه کلی انرژی کاهش می‌یابد. در واقع بیشترین استفاده از منابع انرژی توزیع‌شده از طریق MGهای چندگانه حاصل می‌شود. همچنین، با توجه به نوسانات بالای توان، ممکن است سیستم‌های ریزشبکه برای تأمین مصرف‌کنندگان عمده با شکست مواجه شوند؛ بنابراین، با تقسیم مصرف‌کنندگان به واحدهای کوچک‌تر، هر واحد بار، با یک MG تغذیه می‌شود [۶].

برای پیاده‌سازی سیستم‌های MMG در یک مقیاس بزرگ، مهم است طراحی و بهره‌برداری این سیستم‌ها از دیدگاه قابلیت اطمینان و هزینه، کارآمد باشند [۷]. واضح است به منظور دستیابی به قابلیت اطمینان بیشتر، متعاقباً نیاز به هزینه بیشتری است. اگرچه برقراری تعادل نسبی بین قابلیت اطمینان و هزینه، نیاز ضروری است، در مطالعات اندکی این موضوع بررسی شده است؛ بنابراین، برای پرکردن این شکاف، لحاظ کردن هر دو جنبه قابلیت اطمینان و هزینه در طراحی ریزشبکه‌ها چشم‌پوشی ناشدنی است.

مقالات زیادی در ارتباط با MGها و مزایای آنها وجود دارد [۹]، [۸]؛ با این حال نکته مهم، نحوه طراحی سیستم‌های MMG است؛ به گونه‌ای که هم شرکت‌های توزیع و هم مشترکان ذی‌نفع شوند. در [۱۰]، یک مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن اهدافی مانند خودکفایتی، بهره‌وری، پروفیل ولتاژ، قابلیت اطمینان و هزینه پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخگویی بار، به منظور ایجاد چندین ریزشبکه در شبکه

رویکردهای طراحی شده در اینجا در بستر یک ADN پیاده‌سازی شده‌اند. DGها در این شبکه، از نوع بادی و خورشیدی هستند و مکان آنها از پیش تعیین شده است. یکی از موضوع‌های مهم در مسائل بهینه‌سازی، مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها است. در این مقاله، عدم قطعیت‌های مدنظر عبارت‌اند از: منابع انرژی تجدیدپذیر، میزان بار و قیمت برق شبکه بالادست. برای مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها از توابع چگالی احتمال استفاده شده است.

## ۲-۱- مدل‌سازی ماژول فتوولتائیک

توان خروجی هر ماژول فتوولتائیک<sup>۱</sup> (PV) با رابطه (۱) توصیف می‌شود.

$$P_{pv} = P_{STC} \times \frac{S}{S_{STC}} \times [1 + k_{MPT} (T_c - T_a)] \quad (1)$$

که  $P_{STC}$  و  $S_{STC}$  به ترتیب توان اکتیو ماژول و شدت تابش در شرایط آزمون استاندارد (برابر با ۱ کیلووات بر متر مربع) هستند.  $T_c$  دمای سلول PV (برابر با ۲۵ درجه)،  $k_{MPT}$  ضریب دمایی حداکثر توان (برابر با ۰/۰۱۷) و  $S$  و  $T_a$  به ترتیب شدت تابش و دمای محیط (برابر با ۳۰ درجه) هستند. تابع چگالی احتمال بتا مطابق با رابطه (۲) مدل می‌شود. در این رابطه منظور از  $x$ ،  $\{S, T_a\}$  است.

$$f_s(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \times \Gamma(\beta)} \times (x)^{\alpha-1} \times (1-x)^{\beta-1} \quad (2)$$

که  $\Gamma$  تابع گاما است و  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب با مقادیر میانگین  $\mu_s$  و انحراف معیار  $\sigma_s$  با روابط (۳) و (۴) تعیین می‌شوند [۱۸].

$$\beta = (1 - \mu_s) \times \left( \frac{\mu_s (1 + \mu_s)}{(\sigma_s)^2} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\mu_s \times \beta}{(1 - \mu_s)} \quad (4)$$

## ۲-۲- مدل‌سازی توربین باد

به منظور مدل‌سازی سرعت باد در هر ساعت، از تابع چگالی احتمال ویلی به صورت رابطه (۵) استفاده شده است که حالت خاصی از تابع چگالی احتمال ویبال است [۱۹].

کمینه‌سازی هزینه تلفات و هزینه خرید توان از بالادست انجام شده است. سپس این شبکه با هدف بهبود قابلیت اطمینان به چندین ریزشبکه تقسیم شده است. در رویکرد دوم، مکان‌یابی ESSها و تقسیم‌بندی شبکه به طور همزمان به منظور بهبود قابلیت اطمینان انجام می‌شود. در رویکرد سوم، مکان‌یابی ESSها و تقسیم‌بندی شبکه به طور همزمان با دو هدف بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه انجام شده است. سپس نتایج به دست آمده در هر رویکرد با هم مقایسه شده‌اند.

در رویکردهای پیشنهادی، برای بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب از الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> (GA) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب - نسخه ۲<sup>۵</sup> (NSGA-II) استفاده شده است.

به طور خلاصه نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر بیان می‌شوند:

- مدل‌سازی همزمان عدم قطعیت‌های منابع انرژی تجدیدپذیر، بار و قیمت انرژی الکتریکی؛
- پیشنهاد چند رویکرد به منظور طراحی سیستم چندریز شبکه‌ای با در نظر گرفتن اهدافی چون قابلیت اطمینان و هزینه تلفات و خرید توان از شبکه بالادست (در بیشتر مقالات، اهداف به صورت ترکیبی در نظر گرفته شده‌اند؛ در صورتی که در این مقاله به چارچوب چندهدفه توجه شده است)؛
- رویکرد همزمان مکان‌یابی ذخیره‌سازها و مرزبندی ریزشبکه‌ها در مسئله چندهدفه و تحلیل پاسخ‌های بهینه پارتو.

این مقاله در شش بخش گردآوری شده است. در بخش دوم، اجزای شبکه توزیع شامل منابع انرژی تجدیدپذیر، بار، قیمت و ESSها مدل‌سازی شده‌اند. در بخش سوم، طراحی سیستم MMG و جایابی ESSها ارائه شده‌اند. روش حل مسئله بهینه‌سازی در بخش چهارم تشریح شده است. در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی، بیان و نتایج مقاله در بخش ششم آورده شده‌اند.

## ۲- مدل‌سازی اجزای سیستم

طراحی مفهومی ساختار ریز شبکه‌های چندگانه در شبکه‌های توزیع فعال

که  $W_{ESS,h}$  و  $W_{ESS,h-1}$  به ترتیب ذخیره انرژی در زمان  $h$  و  $h-1$ ،  $\eta_{charge}$  و  $\eta_{discharge}$  به ترتیب بازدهی شارژ و دشارژ و  $P_{charge}$  و  $P_{discharge}$  به ترتیب نرخ مجاز شارژ و دشارژ ESS هستند.

### ۳- طراحی سیستم چند ریز شبکه‌ای و جایابی ذخیره‌سازها

تقسیم‌بندی سیستم‌های توزیع به منظور ایجاد MGها، مزایای زیادی دارد؛ برخی از آنها عبارت‌اند از: راهبرد کنترل محلی برای داشتن تقابل کمتر بین MGها، جبران توان راکتیو محلی و در نهایت، بهبود قابلیت اطمینان.

بهره‌برداری MGها در دو وضعیت متصل/ مجزا به/ از شبکه انجام می‌شود؛ بنابراین، وجود ESSها هنگام طراحی MGها به منظور ذخیره‌سازی مازاد انرژی در ساعات غیر پیک و آزادسازی آن در ساعات پیک، ضروری است. هدف از این مقاله، طراحی بهینه یک سیستم MMG مبتنی بر هزینه و قابلیت اطمینان است؛ بدین منظور سه رویکرد به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

- رویکرد اول: اختصاص بهینه ESSها در یک ADN با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری و سپس تقسیم‌بندی شبکه به چندین MG با هدف بهبود قابلیت اطمینان.

- رویکرد دوم: اختصاص بهینه ESSها و طراحی MGها به طور همزمان با هدف بهبود قابلیت اطمینان.

- رویکرد سوم: اختصاص بهینه ESSها و طراحی MGها به طور همزمان با هدف بهبود قابلیت اطمینان و هزینه.

#### ۳-۱- رویکرد اول

ESSها موجب کاهش چالش‌های قابلیت اطمینان ناشی از منابع تجدیدپذیر می‌شوند؛ بنابراین، ارزیابی کمی از مقدار ESS برای دستیابی به هدف قابل اطمینان بدیهی است. در این رویکرد، ابتدا تخصیص بهینه ESSها با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری انجام می‌شود. سپس شبکه با هدف بهبود قابلیت اطمینان به چندین MG تقسیم می‌شود؛ بنابراین، رویکرد اول در دو مرحله پیاده‌سازی می‌شود که تابع هدف هر مرحله در ادامه آورده شده است.

$$f(v) = \left(\frac{2v}{\lambda^2}\right) \times \exp\left[-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^2\right]; \quad \lambda > 0 \quad (5)$$

$\lambda$  پارامتر مقیاس است که مقدار تقریبی آن ۱/۱۲۸ برابر سرعت میانگین است و  $v$  سرعت باد است. توان خروجی توربین‌های باد به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} \leq v \leq v_{rated} \\ P_{rated} & v_{rated} \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (6)$$

که  $v_{rated}$  سرعت نامی باد،  $v_{ci}$  سرعت آستانه تولید نیروگاه بادی،  $v_{co}$  سرعت قطع تولید نیروگاه بادی،  $P_{rated}$  توان اکتیو نامی توربین باد و  $k_1$  و  $k_2$  به دلیل تصادفی بودن سرعت باد، اعداد تصادفی و در بازه [۰ ۱] هستند [۲۰].

$$k_1 = \frac{P_{rated}}{v_{rated} - v_{ci}}; \quad k_2 = -k_1 \times v_{ci}$$

#### ۳-۲- قیمت انرژی و تقاضای بار

ماهیت غیرقطعی بار و قیمت بازار، با استفاده از تابع چگالی احتمال نرمال به صورت رابطه (۷) توصیف می‌شود.

$$f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\left[\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad x = \{P_L, C\} \quad (7)$$

که  $P_L$  توان اکتیو بار و  $C$  قیمت انرژی الکتریکی است. مشابه قبل، مقادیر میانگین  $\mu$  و انحراف معیار  $\sigma$  از اطلاعات گذشته هر یک از این متغیرها به دست می‌آید [۲۱].

#### ۴-۲- سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

در مدل‌سازی ESSها، محدودیت در نرخ شارژ و دشارژ اهمیت ویژه‌ای دارد. برای مدل‌سازی این محدودیت از رابطه (۸) در هر بازه زمانی  $\Delta h$  استفاده می‌شود [۲۲]:

$$W_{ESS,h} = W_{ESS,h-1} + \eta_{charge} P_{charge} \Delta h - \frac{1}{\eta_{discharge}} P_{discharge} \Delta h \quad (8)$$

$$SAIDI = \left( \sum_{i=1}^{Nlc} N_i \times U_i \right) / \sum_{i=1}^{Nlc} N_i \quad (11)$$

$$CAIDI = \left( \sum_{i=1}^{Nlc} N_i \times U_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{Nlc} N_i \times \lambda_i \right) \quad (12)$$

چنانچه شبکه توزیع فاقد DG باشد، شاخص‌های قابلیت اطمینان با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۲) محاسبه می‌شود. برای یک سیستم MMG با منابع DG، در صورت رخداد خطا در هر MG، آن بخش از سایر بخش‌های شبکه جدا می‌شود. حال اگر در مدت زمان قطعی، DG کافی برای تأمین بار در ریزشبکه‌های پایین دست وجود داشته باشد، این خطا سبب قطع سرویس دهی برای این بخش‌ها نخواهد شد؛ بنابراین، هر سه شاخص یادشده، برای یک MG، به صورت روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه شده‌اند [۱۵]:

$$SAIFI_{\mu G} = SAIFI_{\mu G} |_{self} + (1 - \rho_{\mu G}) \times \sum SAIFI_{\mu G Up} \quad (13)$$

$$SAIDI_{\mu G} = SAIDI_{\mu G} |_{self} + (1 - \rho_{\mu G}) \times \sum SAIDI_{\mu G Up} \quad (14)$$

$$CAIDI_{\mu G} = CAIDI_{\mu G} |_{self} + (1 - \rho_{\mu G}) \times \sum CAIDI_{\mu G Up} \quad (15)$$

که زیرنویس *self* نشان‌دهنده شاخص قابلیت اطمینان برای MG بدون لحاظ کردن سایر بخش‌های سیستم و زیرنویس *Up* به معنی شاخص قابلیت اطمینان برای ریزشبکه‌های بالادست است. همچنین  $\rho_{\mu G}$  احتمالی است که بخشی از زمان در یک سال را نشان می‌دهد که در آن تولید MG از مصرف آن بیشتر است و با استفاده از حالت‌های تولید - بار و احتمال هر حالت محاسبه می‌شود. پس از محاسبه شاخص‌های یادشده، برای هر MG، شاخص‌های قابلیت اطمینان برای کل سیستم، به صورت جمع وزنی شاخص‌ها مبتنی بر تعداد مشتریان در هر MG با استفاده از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$R_{index} = \frac{\sum_{\mu G=1}^{N_{\mu G}} N_{cu, \mu G} \times R_{index \mu G}}{\sum_{\mu G=1}^{N_{\mu G}} N_{cu, \mu G}} \quad (16)$$

که  $N_{cu, \mu G}$  تعداد مشتریان در هر MG،  $N_{\mu G}$  تعداد MGها و  $R_{index}$  به ترتیب هر یک از شاخص‌های SAIFI، SAIDI و CAIDI در هر MG و در کل شبکه‌اند.

### مرحله اول: فرمول‌بندی مسئله هزینه

یکی از فاکتورهای کلیدی در مسئله طراحی، تلفات است. کمینه‌سازی تلفات، سبب کاهش افت ولتاژ، بهبود پروفیل ولتاژ و دیگر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی می‌شود [۲۳]. در این مرحله، به‌منظور کمینه‌سازی هزینه سالیانه تلفات و خرید توان از بالادست، تابع هدف هزینه به صورت رابطه (۹) در نظر گرفته می‌شود. در اینجا فرض شده است هزینه‌های مربوط به ESSها به عهده مشتریان بوده و در تابع هدف لحاظ نشده است.

$$F_C = 365 \times \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{MC=1}^{N_{MC}} \frac{1}{N_{MC}} \left( P_{Loss, Total, h, MC} + P_{Up-G, h, MC} \right) \times T_h C_{h, MC} \quad (9)$$

که  $N_h$  و  $h$  به ترتیب شاخص و مجموعه تعداد ساعات،  $N_{MC}$  و  $MC$  به ترتیب شاخص و مجموعه برای تعداد سناریوهای الگوریتم مونت کارلو،  $T_h$  بازه زمانی (در این مقاله، یک ساعت)،  $P_{Up-G, h, MC}$  توان اکتیو دریافتی از شبکه بالادست،  $P_{Loss, Total, h, MC}$  تلفات توان اکتیو شبکه و  $C_{h, MC}$  هزینه توان دریافتی از شبکه بالادست در ساعت  $h$  و سناریوی  $MC$  هستند. به‌منظور سادگی و بدون از دست رفتن کلیت مسئله، یک روز متوسط، نماینده همه روزهای سال در نظر گرفته شده است.

### مرحله دوم: فرمول‌بندی مسئله قابلیت اطمینان

از دیدگاه قابلیت اطمینان، MGها در سیستم توزیع به صورت بخش مدلسازی می‌شوند؛ بنابراین، کل سیستم به صورت چندین بخش مدلسازی می‌شود که بر تعداد اجزای هر بخش، نرخ خروج و متوسط زمان تعمیر تأثیر می‌گذارد؛ از این رو طراحی بهینه MGها با حل مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شود. در اینجا به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان، سه شاخص SAIFI، SAIDI و CAIDI در نظر گرفته شده‌اند. این شاخص‌ها با استفاده از نرخ خروج ( $\lambda_i$ ) و مدت زمان قطعی ( $U_i$ ) سالیانه در هر مرکز بار  $i$  مطابق با روابط (۱۰) تا (۱۲) محاسبه می‌شوند. در این روابط،  $N_i$  تعداد مشتریان متصل به مرکز بار  $i$  و  $N_{lc}$  تعداد مراکز بار است.

$$SAIFI = \left( \sum_{i=1}^{Nlc} N_i \times \lambda_i \right) / \sum_{i=1}^{Nlc} N_i \quad (10)$$

$$P_{UP\_G,h,MC} = \sum_{l=1}^{N_l} P_{loss_{l,h,MC}} + \sum_{i=1}^{N_i} P_{L_{i,h,MC}} - \sum_{d=1}^{N_{DG}} P_{DG_{d,h,MC}} \pm \sum_{e=1}^{N_{ESS}} P_{ESS_{e,h,MC}} \quad (18)$$

$$P_{loss_{l,h,MC}} = |V_{i,h,MC}| |V_{j,h,MC}| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_{i,h,MC} - \delta_{j,h,MC})$$

که  $N_l$  و  $l$  به ترتیب شاخص و مجموعه برای تعداد شاخه‌ها،  $i$  و  $j$  شاخص تعداد شین‌ها،  $N_i$  مجموعه تعداد شین‌ها،  $d$  و  $N_{DG}$  به ترتیب شاخص و مجموعه برای تعداد DGها،  $e$  و  $N_{ESS}$  به ترتیب شاخص و مجموعه برای تعداد ESSها،  $P_{DG_{d,h,MC}}$ ،  $P_{loss_{l,h,MC}}$ ،  $P_{ESS_{e,h,MC}}$  به ترتیب تلفات اکتیو خط  $l$  ام، توان اکتیو  $d$  امین DG و  $e$  امین ESS، در ساعت  $h$  و سناریوی  $MC$  هستند. دامنه ولتاژ شین‌ها و  $Y_{ij}$  ادیتمانس خط است.  $\theta_{ij}$  زاویه فاز بین شین  $i$  و  $j$  است. همچنین  $\delta_{i,h,MC}$  زاویه فاز ولتاژ شین  $i$  در ساعت  $h$  و سناریوی  $MC$  است.

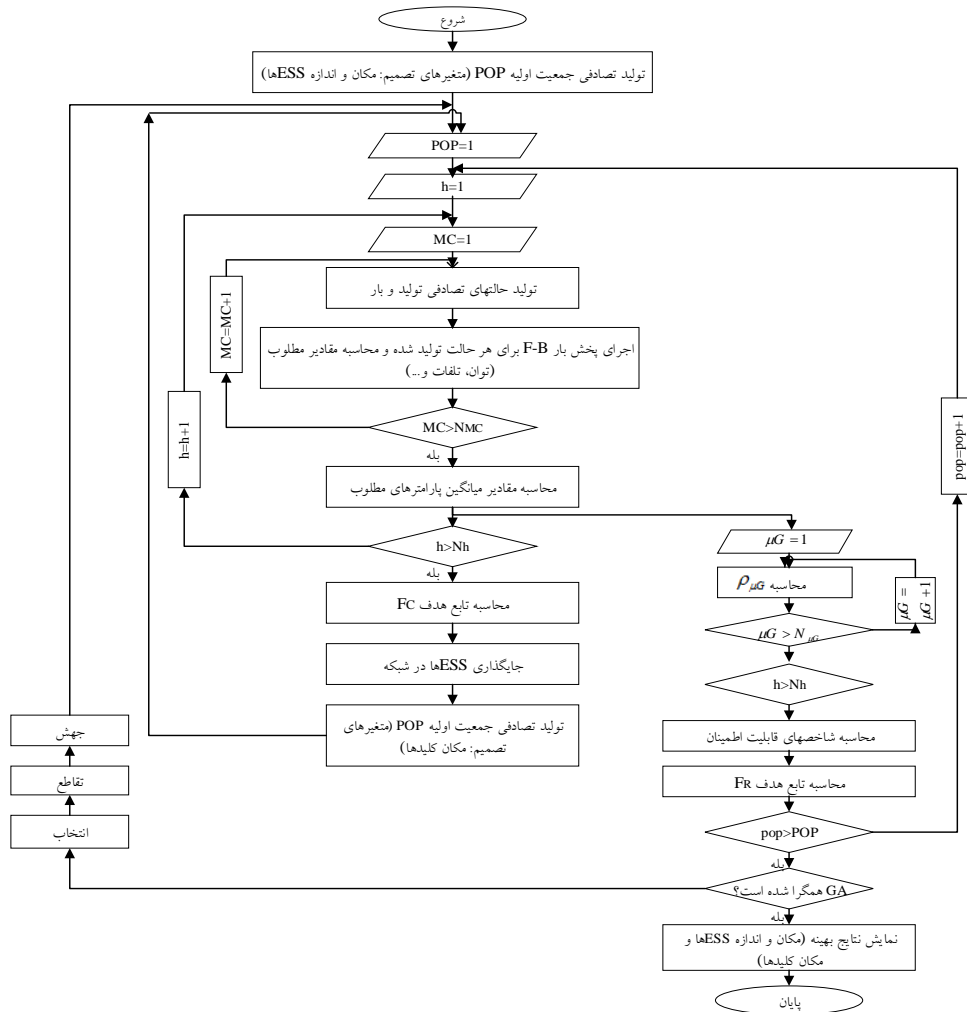
مقدار بهینه هر شاخص، زمانی به دست می‌آید که تنها آن شاخص در تابع هدف لحاظ شود. برای کمینه‌سازی هر سه شاخص به‌طور همزمان، از ضریب وزنی  $R$  برای هر شاخص استفاده می‌شود؛ بنابراین، تابع هدف قابلیت اطمینان (شاخص کلی قابلیت اطمینان) با رابطه (۱۷) بیان می‌شود [۱۵].  $N_{index}$  و  $R_{index, opt}$  به ترتیب تعداد و مقدار بهینه شاخص‌های قابلیت اطمینان‌اند.

$$F_R = \sum_{i=1}^{N_{index}} R_i \times \frac{|R_{index} - R_{index, opt}|}{R_{index, opt}} \quad (17)$$

در اینجا ضرایب وزنی برابر با یک فرض شده‌اند.

### قیود مرحله اول:

- رابطه پخش بار با در نظر گرفتن ESSها:



شکل (۱): روندنمای رویکرد اول

هوش محاسباتی در مهندسی برق،

- حدود ولتاژ شین‌ها:

$$V_{\min} \leq V_{i,h,MC} \leq V_{\max} \quad i \neq 1 \quad (19)$$

که  $V_{\max}$  و  $V_{\min}$  به ترتیب کمینه و بیشینه دامنه ولتاژ شین‌ها هستند.

- حدود انرژی ذخیره‌شده در ESS

$$W_{ESS,\min} \leq W_{ESS_e,h} \leq W_{ESS,\max} \quad (20)$$

که  $W_{ESS,\min}$  و  $W_{ESS,\max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه انرژی ذخیره‌شده در ESS هستند و  $W_{ESS_e,h}$  انرژی ذخیره‌شده در  $e$  امین ESS در ساعت  $h$  است.  
- نرخ شیب توان اکتیو ESS:

$$P_{charge_{e,h,MC}} \leq P_{charge,\max} ; \quad (21)$$

$$P_{discharge_{e,h,MC}} \leq P_{discharge,\max}$$

که  $P_{charge,\max}$  و  $P_{discharge,\max}$  به ترتیب بیشینه نرخ شارژ و دشارژ ESS هستند.  $P_{charge_{e,h,MC}}$  و  $P_{discharge_{e,h,MC}}$  نیز به ترتیب نرخ شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز  $e$  ام در ساعت  $h$  و سناریوی  $MC$  هستند.

- لزوم تغییر انرژی ذخیره‌شده در ESSها در طول دوره بهره‌برداری به منظور حصول اطمینان از استفاده از ESSها در طول این دوره:

$$\sum_{h \in N_h, h \neq 1} |W_{ESS_e,h} - W_{ESS_e,1}| > 0 \quad (22)$$

که  $W_{ESS_e,1}$  انرژی ذخیره‌شده در  $e$  امین ESS در ساعت یک است.

- وجود هردوی ESS و DG در هر MG.

### ۳-۲- رویکرد دوم

در این رویکرد، اختصاص بهینه ESSها و تعیین محدوده MGها به‌طور همزمان با هدف بهبود قابلیت اطمینان انجام می‌شود. قیود این رویکرد مشابه رویکرد قبل‌اند.

### ۳-۳- رویکرد سوم

به دلیل بدیهی بودن لحاظ هزینه در طراحی MGها، در رویکرد سوم، تغییر شاخص‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن هزینه بررسی می‌شود؛ از این رو تابع هدف رویکرد

سوم  $OF$ ، هر دو تابع هدف مرحله اول و دوم را شامل و به صورت رابطه (۲۳) نمایش داده می‌شود.

$$\min OF = [F_C, F_R] \quad (23)$$

قیود مربوط به این رویکرد مشابه رویکردهای قبلی‌اند.

### ۴- روش حل مسئله بهینه‌سازی

هر یک از رویکردهای یادشده، مسئله بهینه‌سازی است که رویکردهای اول و دوم تک‌هدفه و رویکرد سوم دو هدفه‌اند. در اینجا بهینه‌سازی تک‌هدفه و دوهدفه به ترتیب با GA و NSGA-II پیاده‌سازی شده‌اند.

#### ۴-۱- حل مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه با GA

همان‌طور که ذکر شد در اینجا به منظور حل مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه از GA استفاده شده است [۲۴]. در رویکرد اول که متغیرهای تصمیم مکان و اندازه ESSها هستند، هر کروموزوم در GA دارای ۷ ژن است. هر یک از ژن‌ها به صورت باینری هستند. ۵ ژن اول هر کروموزوم شماره شینی است که ESS در آن قرار می‌گیرند و ۲ ژن آخر اندازه ESS مدنظر را تعیین می‌کنند. پس از پیشنهاد مکان و اندازه ESSها توسط GA با هدف کمینه‌سازی هزینه و با استفاده از پخش بار پیشرو - پسرو (F-B) به محاسبه ولتاژها و جریان‌های شبکه، با بررسی و اعمال قیود مسئله بهینه‌سازی پرداخته می‌شود. سپس براساس نتایج به دست آمده از پخش بار، تلفات شبکه و توان مبادله شده با شبکه بالادست، تعیین و تابع هدف  $F_C$  محاسبه می‌شود. با تکرار این روند، GA به سمت جواب بهینه پیش می‌رود و بهترین مکان و اندازه را برای ESSها مشخص می‌کند.

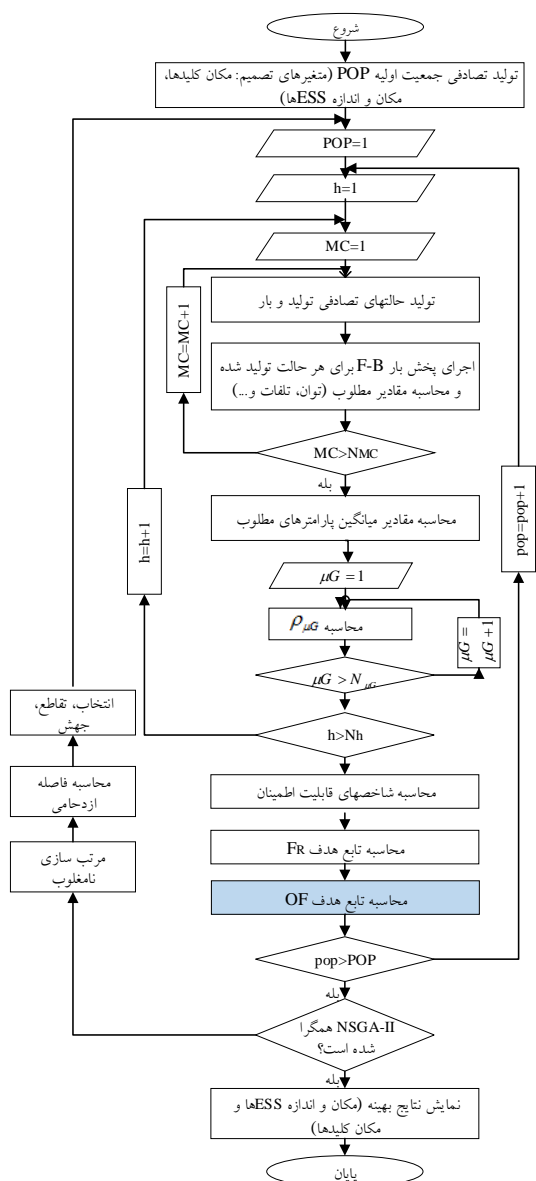
پس از اختصاص ESSها در شبکه، اکنون با هدف بهبود قابلیت اطمینان، تقسیم‌بندی شبکه به چند MG انجام می‌شود. در این مرحله، کروموزومی با تعداد ژن‌هایی برابر با تعداد خطوط شبکه به صورت رابطه (۲۴) تعریف می‌شود:

$$S = [S_1, \dots, S_b] \quad (24)$$

که  $S_b$  تعداد خطوط شبکه است. روندنمای رویکرد اول در شکل (۱) نشان داده شده است. در رویکرد دوم، متغیرهای تصمیم، مکان و اندازه ESSها و همچنین مکان کلیدها



مقادیر پارامترهای تقاطع و جهش به ترتیب ۰/۲ و ۰/۸ فرض شده‌اند.



شکل (۲): روندنمای رویکرد دوم و سوم. بلوک آبی رنگ مربوط به رویکرد سوم است.

### ۵-۱- نتایج شبیه‌سازی رویکرد اول

همان‌طور که ذکر شد در رویکرد اول، ابتدا با هدف کمینه‌کردن هزینه تلفات و توان، مکان و اندازه ESSها تعیین می‌شود، سپس با هدف بهبود قابلیت اطمینان، ADN به چندین MG تقسیم می‌شود. مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان برای شبکه مدنظر، قبل و بعد از نصب DGها در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده شد

هستند. درواقع مکان‌یابی ESSها و تعیین محدوده MGها به‌طور همزمان با هدف بهبود قابلیت اطمینان انجام می‌شود.

### ۴-۲- حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با NSGA-II

وجود چندین هدف در یک مسئله بهینه‌سازی، به جای یک جواب بهینه، چندین جواب بهینه را نتیجه می‌دهد. به سبب اینکه مفهوم یک راه‌حل بهینه در بهینه‌سازی چندهدفه، متفاوت از بهینه‌سازی تک‌هدفه است، مفهوم غلبه پارتو برای ارزیابی جواب‌ها استفاده می‌شود؛ بنابراین، مطابق با اولویت تصمیم‌گیرنده یکی از این جواب‌ها انتخاب می‌شود. جواب‌های پارتو توازنی بین اهداف مختلف برقرار می‌کنند. در اینجا به منظور حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه از NSGA-II استفاده شده است [۲۵]. متغیرهای تصمیم در رویکرد سوم مشابه رویکرد دوم است. درواقع در رویکرد سوم، هر دو هدف قابلیت اطمینان و هزینه به‌طور همزمان لحاظ می‌شوند. روندنمای رویکردهای دوم و سوم در شکل (۲) آورده شده که در آن بلوک آبی رنگ مربوط به رویکرد سوم است.

### ۵- بررسی نتایج شبیه‌سازی

روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار متلب روی یک سیستم توزیع ۱۱۹ شینه پیاده‌سازی شده است [۲۷]. این سیستم آزمایشی، یک سیستم توزیع شعاعی ۱۱ کیلوولت با بار پیک ۲۲/۷۰۹۷ مگاوات است. دوره بهره‌برداری یک سال است که در یک روز فشرده شده است. ظرفیت ESSها ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلووات است. زمان شارژ و دشارژ ESSها هشت ساعت فرض شده است [۱۹]. شبکه اصلی فاقد DG است؛ بنابراین، در این مقاله، مکان DGها در یک روش تصادفی از پیش تعیین شده و ظرفیت آنها با توجه به [۲۷] فرض شده است. کل ظرفیت DGها ۱۴/۴ مگاوات است که شامل ۱۰ واحد توربین بادی و ۲۲ واحد PV است. توان نامی هر DG ۴۵۰ کیلووات است. اطلاعات قابلیت اطمینان این شبکه نیز با استفاده از مرجع یادشده الگوبرداری شده است. در این مقاله الگوریتم‌های GA و NSGA-II به ترتیب برای ۴۰۰ و ۶۰۰ تکرار اجرا شده‌اند و

اطمینان بهبود یافته است؛ این هزینه، صرف افزایش خرید توان از شبکه بالادست شده است. نتایج شاخص‌های قابلیت اطمینان پس از بهینه‌کردن شاخص کلی قابلیت اطمینان در جدول (۷) آورده شده‌اند. نمودار همگرایی تابع هدف در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول (۲): مکان بهینه ESSها و کلیدها - رویکرد اول

۷-۵، ۲-۱۰، ۱۳-۱۴، ۱۵-۱۶، ۱۱-۱۸، ۴-	
مکان بهینه	۲۸، ۲۹-۳۲، ۳۳-۳۸، ۴۱-۴۲،
کلیدها (خط)	۴۹-۵۰، ۲۸-۵۵، ۵۹-۶۰، ۱-۶۳، ۶۶-۶۷،
	۷۸-۷۹، ۹۲-۹۳، ۱۰۲-۱۰۳، ۱۰۹-۱۱۰
مکان بهینه	۲، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۶، ۲۹، ۳۲، ۳۵، ۴۱،
ذخیره‌سازها	۴۴، ۵۰، ۵۹، ۶۲، ۶۸، ۸۰، ۹۲، ۹۵، ۱۰۴،
(شین)	۱۱۰
ظرفیت بهینه	۱۵۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰،
ذخیره‌سازها	۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰،
(کیلووات)	۲۰۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۱۵۰

جدول (۳): بهره‌برداری ADN پس از تعیین محدوده MGها -

رویکرد اول

$P_{Loss\ Total}$ (MWh)	$P_{UN}$ (MWh)	$F_R$	$F_C$ ( $10^9$ \$)
۳/۰۷۸	۸۸/۹۳۰	۱۶۳/۵۶۹۴	۱۷/۰۲۹

جدول (۴): شاخص‌های قابلیت اطمینان در MGها - رویکرد

اول

شماره MGها	SAIFI	SAIDI	CAIDI
۱	۰/۲۸۹۴	۲۱/۹۶۴۵	۷۵/۸۹۵۳
۲	۰/۲۶۱۰	۲۳/۹۴۳۹	۹۱/۷۲۱۸
۳	۰/۳۶۹۲	۲۶/۷۲۲۸	۷۲/۲۴۱۸
۴	۰/۲۲۹۷	۱۵/۴۴۴۰	۶۷/۲۲۸۷
۵	۰/۴۸۷۵	۳۳/۱۸۲۹	۶۸/۰۶۸۶
۶	۰/۷۱۱۹	۴۱/۴۹۳۰	۶/۴۲۷۸
۷	۰/۳۱۷۶	۲۵/۴۳۸۶	۸۰/۰۹۶۸
۸	۰/۴۸۱۳	۳۵/۰۸۱۸	۷۲/۸۸۸۰
۹	۰/۴۶۳۴	۳۱/۰۷۰۰	۶۷/۰۴۵۸
۱۰	۰/۵۵۶۷	۳۵/۲۲۴۳	۴۷/۱۷۵۳
۱۱	۰/۸۴۹۹	۴۰/۰۹۲۸	۴۷/۱۷۵۳
۱۲	۰/۹۱۴۵	۵۵/۴۲۷۵	۶۰/۶۹۵۳
۱۳	۰/۵۴۸۸	۳۲/۴۲۷۵	۵۹/۰۹۰۷

مقادیر شاخص‌ها با وجود DGها بهبود یافته‌اند. نتایج مربوط به مکان و ظرفیت بهینه ESSها برای رویکرد مدنظر و همچنین مکان بهینه کلیدها در جدول (۲) آورده شده‌اند. MGهای ایجادشده متناظر با مکان کلیدها و ESSها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. هزینه سالیانه تلفات و خرید توان از شبکه بالادست، قابلیت اطمینان و سایر کمیت‌ها در جدول (۳) آورده شده است. مطابق با این نتایج، به‌ازای ۸۸/۹۳ مگاوات ساعت انرژی دریافتی از شبکه بالادست و ۳/۰۷۸ مگاوات ساعت تلفات سالیانه، به هزینه‌ای معادل ۱۷/۰۲۹ میلیارد دلار نیاز است. شاخص‌های قابلیت اطمینان برای هر MG، در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۱) شاخص‌های قابلیت اطمینان قبل و بعد از نصب DG

شاخص	SAIFI	SAIDI	CAIDI
شبکه بدون وجود DG	۱/۷۸۲۲	۱۹/۸۱۶۹	۱۱/۱۱۹۳
شبکه با وجود DG	۰/۹۸۰۳	۱۶/۲۴۳۴	۱۶/۵۶۹۸

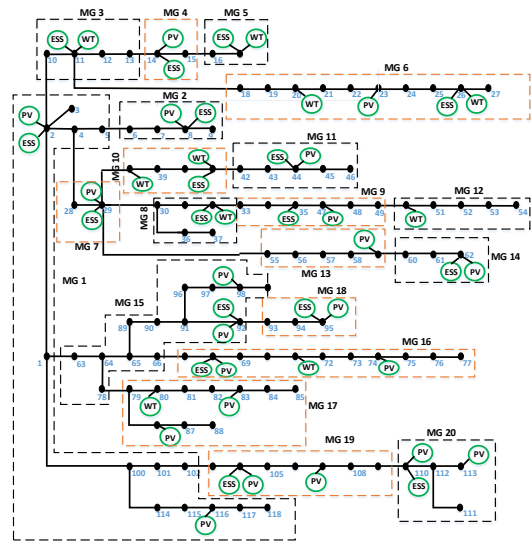
## ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی رویکرد دوم

در این رویکرد با هدف بهینه‌سازی قابلیت اطمینان، تخصیص بهینه ESSها و همچنین تقسیم‌بندی ADN به‌طور هم‌زمان صورت می‌گیرد. پیشنهاد بهینه GA برای مکان و ظرفیت ESSها و همچنین مکان کلیدها به‌صورت جدول (۵) است. اعداد پررنگ در این جدول، شین‌های مشترک برای نصب ESS در رویکردهای دوم و اول را نشان می‌دهند. با مقایسه این جدول و جدول (۲) مشاهده می‌شود مکان بهینه ESSها در هر دو رویکرد در بسیاری از شین‌ها مشترک است. در واقع این شین‌ها، شین‌های بحرانی‌اند؛ بدین منظور که در هر رویکرد باید روی آنها ESS نصب شود. واضح است این امر بدین معنی نیست که ظرفیت ESSهای متناظر با این شین‌ها نیز در هر دو رویکرد یکسان‌اند. محدوده ریزش‌ها در این رویکرد در شکل (۴) مشخص شده است. مطابق با جدول (۶)، نتایج بهره‌برداری ADN در این رویکرد نشان می‌دهند به‌ازای دریافت ۹۲/۳۹۸ مگاوات ساعت انرژی از شبکه بالادست و ۲/۹۷۳ مگاوات ساعت تلفات در سال، به ۱۷/۶۰۴ میلیارد دلار هزینه نیاز است. همان‌طور که انتظار می‌رفت در این رویکرد نسبت به رویکرد اول، هزینه بیشتر شده و قابلیت

جدول (۷): شاخص‌های قابلیت اطمینان در MGها -

رویکرد دوم			
شماره MGها	SAIFI	SAIDI	CAIDI
۱	۰/۱۰۵۳	۱۱/۳۵۳۶	۱۰۷/۸۲۱۵
۲	۰/۱۲۱۱	۱۳/۹۳۹۰	۱۱۵/۱۰۳۲
۳	۰/۱۸۲۳	۱۵/۹۰۹۵	۸۷/۲۷۱۰
۴	۰/۲۷۲۲	۱۷/۷۳۳۵	۶۵/۱۳۷۰
۵	۰/۳۵۱۵	۲۵/۳۵۳۴	۷۲/۱۳۷۲
۶	۰/۷۱۵۲	۳۴/۵۱۱۴	۴۸/۲۵۴۲
۷	۰/۳۱۲۰	۲۵/۱۶۴۸	۸۰/۶۵۶۴
۸	۰/۴۷۱۶	۳۳/۹۹۲۶	۷۲/۰۷۹۳
۹	۰/۴۵۳۴	۳۰/۳۷۸۹	۶۷/۰۰۲۴
۱۰	۰/۸۲۰۵	۴۰/۷۵۵۶	۴۹/۶۷۱۷
۱۱	۰/۹۱۵۸	۵۵/۶۰۳۵	۶۰/۷۱۷۴
۱۲	۰/۷۴۲۲	۳۴/۸۵۲۰	۴۶/۹۵۷۷
۱۳	۰/۳۸۰۷	۲۳/۲۶۰۵	۶۱/۰۹۵۳
۱۴	۰/۹۲۷۴	۳۸/۷۵۳۷	۴۱/۷۸۷۵
۱۵	۱/۲۷۴۰	۵۲/۱۰۱۵	۴۰/۸۹۶۳
۱۶	۰/۶۹۸۸	۳۵/۶۹۷۸	۵۱/۰۸۶۱
۱۷	۰/۵۱۳۶	۳۰/۰۸۳۱	۵۸/۵۷۳۰
۱۸	۰/۲۹۱۴	۲۱/۷۴۵۵	۷۴/۶۲۴۲
۱۹	۰/۵۵۶۵	۳۲/۸۶۳۶	۵۹/۰۵۴۰
۲۰	۰/۷۷۸۵	۴۲/۲۶۵۹	۵۴/۲۹۱۴

شماره MGها	SAIFI	SAIDI	CAIDI
۱۴	۰/۴۱۰۰	۲۱/۲۷۳۲	۵۱/۸۸۴۱
۱۵	۰/۷۴۲۰	۴۲/۰۳۸۲	۵۶/۶۵۵۲
۱۶	۱/۵۷۸۵	۶۸/۰۰۰۲	۴۳/۰۷۸۶
۱۷	۰/۹۹۳۵	۵۴/۶۶۴۳	۵۵/۰۱۹۵
۱۸	۰/۵۷۶۹	۲۸/۱۶۸۱	۴۸/۸۲۶۳
۱۹	۰/۶۴۰۰	۳۶/۵۴۳	۵۷/۰۹۴۲
۲۰	۰/۸۲۵۳	۴۳/۶۲۷۵	۵۲/۸۶۴۸



شکل (۳): محدوده ریز شبکه‌ها در رویکرد اول

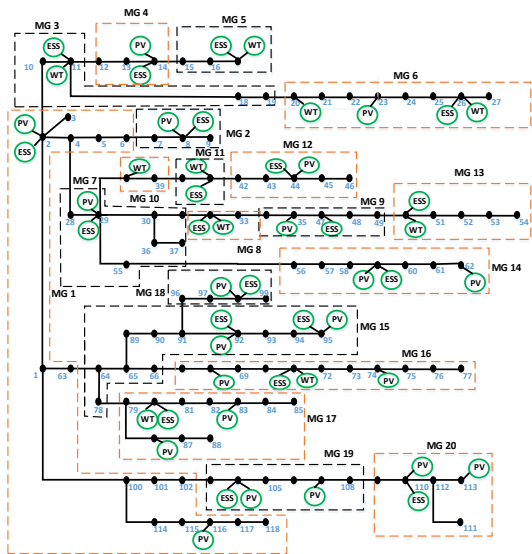
جدول (۵): مکان بهینه ESSها و کلیدها - رویکرد دوم

۶-۷، ۲-۱۰، ۱۱-۱۲، ۱۴-۱۵، ۱۶-۲۰	مکان بهینه
۴-۲۸، ۳۱-۳۲، ۳۳-۳۴، ۲۹-۳۸، ۳۹-۴۰، ۴۱-۴۲، ۴۹-۵۰، ۵۵-۵۶، ۶۳-۶۴، ۶۶-۷۷	کلیدها (خط)
۱۰۹	مکان بهینه
۲، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۰، ۲۹، ۳۲، ۳۸، ۴۱	ذخیره‌سازها (شین)
۴۴، ۴۷، ۵۰، ۵۹، ۷۱، ۸۰، ۹۲، ۹۸، ۱۰۴	ظرفیت بهینه
۱۱۰	ذخیره‌سازها (کیلووات)
۱۰۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۱۰۰	
۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰	
۲۰۰، ۱۵۰، ۲۵۰، ۱۵۰	

جدول (۶): بهره‌برداری ADN پس از تعیین محدوده

MGها - رویکرد دوم

$P_{Loss\ Total}$ (MWh)	$P_{UN}$ (MWh)	$F_R$	$F_C$ ( $10^9$ \$)
۲/۹۷۳	۹۲/۳۹۸	۱۴۲/۱۲۵۷	۱۷/۶۰۴

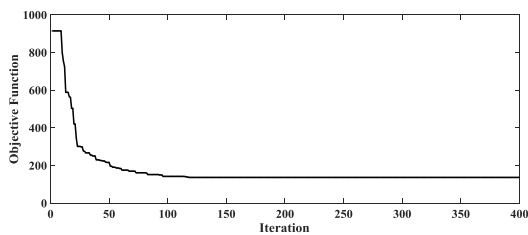


شکل (۴): محدوده ریز شبکه‌ها در رویکرد دوم

### ۵-۳- مقایسه رویکردهای اول و دوم

با مقایسه جدول‌های (۳) و (۶) به‌وضوح مشاهده می‌شود در صورتی که مکان‌یابی ESSها همزمان با تعیین محدوده ریزش‌بکه‌ها انجام شود، شاخص کلی قابلیت اطمینان  $F_R$  بهبود می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ۳/۴ درصد در هزینه، شاخص کلی قابلیت اطمینان ۱۵/۱ درصد بهبود می‌یابد. این امر بدیهی است؛ زیرا به‌طور طبیعی بهبود قابلیت اطمینان به افزایش هزینه منجر می‌شود. اگرچه این نکته درخور ذکر است طبق نتایج، افزایش قابلیت اطمینان بیش از ۴ برابر افزایش هزینه است؛ بنابراین، براساس نتایج به‌دست‌آمده تأثیر طراحی همزمان MGها و جایابی ESSها در بهبود قابلیت اطمینان شبکه مشاهده می‌شود؛ از این رو اگر هدف صرفاً بهبود قابلیت اطمینان باشد، رویکرد دوم بهتر از رویکرد اول خواهد بود. همچنین افزایش هزینه، صرف خرید توان از شبکه بالادست شده است؛ بنابراین، مقدار تلفات نسبت به رویکرد اول کاهش یافته است.

می‌شود؛ برای مثال، با مقایسه جواب‌های پارتو اول و سوم جدول (۸)، با افزایش ۸/۱۴ درصدی در هزینه، شاخص کلی قابلیت اطمینان به میزان ۲۴/۵۱ درصد بهبود می‌یابد. MGهای ایجادشده متناظر با مکان کلیدها و ذخیره‌سازها برای جواب پارتو ۲، در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. شکل (۷) نمودار همگرایی هر دو تابع هدف را نشان می‌دهد. نمودار جبهه پارتو برای این رویکرد نیز در شکل (۸) آورده شده است.



شکل (۵): نمودار همگرایی در رویکرد دوم

جدول (۸): بهره‌برداری ADN پس از تعیین محدوده MGها - چند نمونه از جواب‌های پارتو در رویکرد سوم

جواب				پارتو
$P_{Loss\ Total}$ (MWh)	$P_{UN}$ (MWh)	$F_R$	$F_C$ ( $10^9$ \$)	
۲/۶۷۰	۸۰/۳۶۸	۲۰۰/۲۰۳۴	۱۴/۸۶۱	۱
۲/۷۴۱	۸۱/۰۷۶	۱۷۳	۱۵/۵۵۵	۲
۲/۸۷۹	۸۶/۳۰۰	۱۶۰/۷۸۶۳	۱۶/۰۷۱	۳

### ۵-۵- مقایسه رویکردهای دوم و سوم

مقایسه جدول‌های (۵) و (۷) نشان می‌دهد شاخص کلی قابلیت اطمینان در رویکرد دوم، از مقدار این شاخص در کلیه جواب‌های رویکرد سوم کمتر است. این امر بدیهی است؛ زیرا در رویکرد دوم، هدف بهبود قابلیت اطمینان به تنهایی است؛ از این رو انتظار می‌رود هزینه نیز در رویکرد دوم بیشتر از رویکرد سوم باشد که این موضوع به‌وضوح در جدول‌های (۶) و (۸) مشاهده می‌شود؛ بنابراین، با در نظر گرفتن تابع هزینه به‌منزله یکی از اهداف سیستم در کنار قابلیت اطمینان، جواب‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر از نظر اقتصادی به‌عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شوند. همچنین، به دلیل کاهش هزینه، مقدار تلفات نیز در کلیه جواب‌های پارتو در رویکرد سوم کمتر از رویکرد دوم است و این امر نیز دلیلی

### ۵-۴- نتایج شبیه‌سازی رویکرد سوم

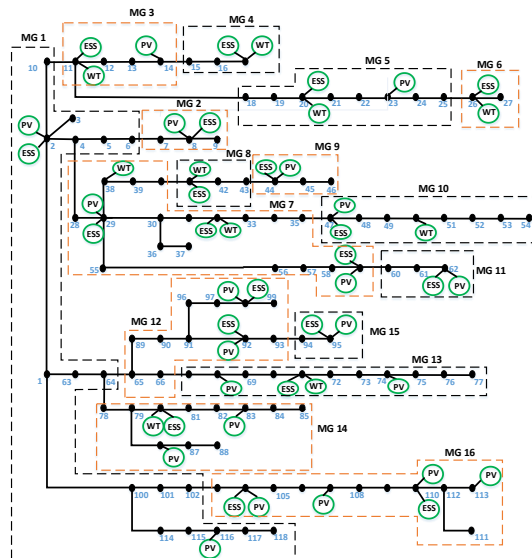
در این رویکرد با دو هدف بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و هزینه تلفات و خرید توان از شبکه بالادست، تخصیص بهینه ESSها و تقسیم‌بندی ADN به‌طور همزمان صورت می‌گیرد. با توجه به بهینه‌شدن این رویکرد دو تابع هدف به‌طور همزمان، چندین جواب به دست می‌آید. میزان هزینه، قابلیت اطمینان، توان دریافتی از شبکه بالادست و تلفات برای سه نمونه از این جواب‌های پارتو در جدول (۸) نشان داده شده است. مطابق با این جدول، نخستین جواب پارتو، کمترین میزان هزینه و قابلیت اطمینان را نتیجه می‌دهد؛ برعکس در سومین جواب پارتو، حداکثر هزینه و قابلیت اطمینان به دست آمده است. اگر قابلیت اطمینان نسبت به هزینه در اولویت بالاتری قرار داشته باشد، جواب پارتو ۳ نیاز طراح را فراهم می‌کند؛ اما اگر هدف بهبود نسبی هزینه و قابلیت اطمینان به‌طور همزمان باشد، دومین جواب پارتو، بهترین انتخاب است. مزیت حل مسئله بهینه‌سازی به‌صورت چندهدفه این است که براساس اولویت تصمیم‌گیرنده، هر یک از جواب‌های پارتو به‌عنوان جواب بهینه انتخاب

در یک شبکه توزیع فعال، چند رویکرد، ایجاد و مقایسه شده‌اند. در رویکرد اول، با هدف کاهش هزینه سالیانه تلفات و خرید توان از شبکه بالادست، مکان‌یابی و اندازه‌یابی ESSها در یک شبکه توزیع فعال انجام شده است. سپس این شبکه با هدف بهبود قابلیت اطمینان به چندین ریزشبکه تقسیم شده است. در رویکرد دوم، مکان‌یابی و اندازه‌یابی ESSها و تعیین محدوده ریزشبکه‌ها به‌طور همزمان با هدف بهبود قابلیت اطمینان در شبکه توزیع فعال انجام شده است و در رویکرد سوم، مکان‌یابی و اندازه‌یابی ESSها و تعیین محدوده ریزشبکه‌ها به‌طور همزمان با دو هدف بهبود قابلیت اطمینان و هزینه در شبکه توزیع فعال انجام شده است.

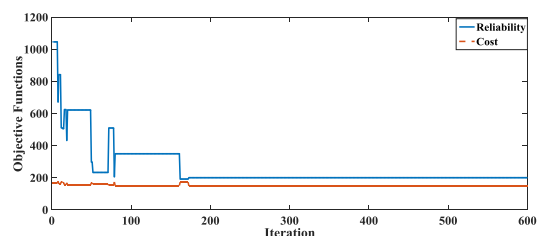
نتایج، لزوم پیاده‌سازی همزمان مکان‌یابی بهینه ESSها همراه با تعیین محدوده ریزشبکه‌ها را نشان می‌دهند؛ بنابراین، اگر هدف صرفاً بهبود قابلیت اطمینان بوده و هزینه در اولویت قرار نداشته باشد، رویکرد دوم نسبت به هزینه اول بهتر است؛ اما اگر هر دو هدف قابلیت اطمینان و هزینه برای تصمیم‌گیرنده اهمیت داشته باشد، با پیاده‌سازی رویکرد سوم، چندین جواب پارتو ایجاد خواهد شد که در برخی از آنها هزینه و در برخی دیگر، قابلیت اطمینان دارای مقدار مطلوب است؛ بنابراین، مطابق با الویت تصمیم‌گیرنده، یکی از این جواب‌ها انتخاب می‌شوند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، تحلیل جواب‌های پارتو برای دستیابی به طراحی بهتر ریزشبکه‌ها دارای اهمیت است؛ در صورتی که در بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته، مسئله با استفاده از ضرایب وزنی به‌صورت تک‌هدفه دیده شده‌اند. حال آنکه مطابق با آنچه در اینجا دیده می‌شود، اهمیت لحاظ کردن تعارض بین اهداف چشم‌پوشی ناشدنی است؛ بنابراین، با توجه به اینکه رویکرد سوم، تعداد انتخاب بیشتری برای طراح سیستم فراهم می‌سازد و معمولاً در نظر گرفتن چند هدف به‌طور همزمان در عمل منطقی‌تر به نظر می‌رسد، رویکرد سوم از هر دو رویکرد اول و دوم بهتر است.

مسائلی مانند طراحی جامع‌تر ریزشبکه‌ها و نحوه ارتباط آنها هنگام رخداد خطا به‌منظور تأمین حداکثر بار از جمله مسائلی‌اند که نویسندگان در کارهای آینده پیاده می‌کنند.

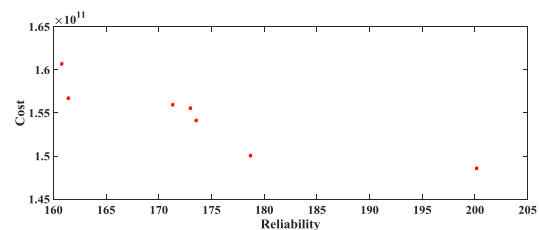
بر مزیت رویکرد سوم نسبت به دوم است. در واقع زمانی که هر دو هدف قابلیت اطمینان و هزینه دارای اهمیت باشند، رویکرد سوم تعداد انتخاب بیشتری را برای تصمیم‌گیرنده فراهم می‌سازد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، رویکرد سوم بهتر از رویکرد دوم است؛ زیرا مسائل طراحی معمولاً به‌طور همزمان چندین هدف را در نظر می‌گیرند.



شکل (۶): محدوده ریزشبکه‌ها در رویکرد سوم



شکل (۷): نمودار همگرایی دو تابع هدف در رویکرد سوم



شکل (۸): نمودار جبهه پارتو در رویکرد سوم

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن اهمیت هر دو جنبه هزینه و قابلیت اطمینان، به‌منظور طراحی مفهومی بهینه ریزشبکه‌ها

- Distribution Networks Into Microgrids," *IEEE Systems Journal*, pp. 1-11, 2019.
- [13] Xu. X, F. Xue, S. Lu, H. Zhu, L. Jiang, and B. Han, "Structural and hierarchical partitioning of virtual microgrids in power distribution network," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, pp. 823-832, 2018.
- [14] S. Mojtahedzadeh, S. N. Ravadanegh, and M.-R. Haghifam, "Optimal multiple microgrids based forming of greenfield distribution network under uncertainty," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 11, pp. 1059-1068, 2017.
- [15] Arefifar. S. A, Yasser. A.-R. M, and El-Fouly. T. H, "Optimum microgrid design for enhancing reliability and supply-security," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, pp. 1567-1575, 2013.
- [16] Arefifar. S. A, Ordonez. M, and Mohamed Y. A.-R. I., "Voltage and current controllability in multi-microgrid smart distribution systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, pp. 817-826, 2018.
- [17] Gazijahani. F. S, and Salehi J., "Robust design of microgrids with reconfigurable topology under severe uncertainty," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 9, pp. 559-569, 2018.
- [18] Dong. L, Cheng. W, Bao. H, and Yang. Y, "Probabilistic load flow analysis for power system containing wind farms," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pp. 1-4, 2010.
- [19] Haddadian. H and Noroozian. R, "Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices," *Applied Energy*, Vol. 185, pp. 650-663, 2017.
- [20] L. Dong, W. Cheng, H. Bao, and Y. Yang, "Probabilistic load flow analysis for power system containing wind farms," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, 2010, pp. 1-4.
- [21] Mohammadi. S, Soleymani. S, and Mozafari. B, "Scenario-based stochastic operation management of microgrid including wind, photovoltaic, micro-turbine, fuel cell and energy storage devices," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, pp. 525-535, 2014.
- [22] Atwa. Y, El-Saadany. E, Salama. M, and Seethapathy. R, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, pp. 360-370, 2010.
- [23] Pregelj. A, Begovic. M, and Rohatgi. A, "Recloser allocation for improved reliability of DG-enhanced distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, pp. 1442-1449, 2006.
- [24] Thapa. S. and Karki. R, "Reliability benefit of energy storage in wind integrated power system operation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, pp. 807-814, 2016.
- [25] Deb. K, Pratap. A, Agarwal. S, and Meyarivan. T, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE transactions on evolutionary computation*, Vol. 6, pp. 182-197, 2002
- [26] Garcia. J. A. M, and Mena. A. J. G, "Optimal distributed generation location and size using a
- [1] Viral. R and Khatod. D "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16 ,pp. 5146-5165, 2012.
- [2] Nunna. H. K and Doolla. S, "Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60 ,pp. 1678-1687, 2013.
- [3] Hasanvand. S, Nayeripour. M, Arefifar. S. A, and Fallahzadeh-Abarghouei. H, "Spectral clustering for designing robust and reliable multi-MG smart distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, pp. 1359-1365, 2017.
- [4] Arefifar. S. A, Ordonez. M, and Mohamed. Y. A.-R. I, "Energy management in multi-microgrid systems—Development and assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, pp. 910-922, 2017.
- [5] Nguyen. N, Bera. A, and Mitra. J, "Energy storage to improve reliability of wind integrated systems under frequency security constraint," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2017 IEEE*, 2017, pp. 1-8.
- [6] Parhizi. N, Marzband. M, Mairhosseini Moghaddam. S. M, Azarinajadian. F, Mohammadi-Ivatloo. B, "Optimal energy management system implementation in power networks with multiple Microgrids by using multi-period imperialist competition" *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 49-66, 2016.
- [7] Kanchev. H, Lu. D, Colas. F, Lazarov. V, and Francois. B, "Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, pp. 4583-4592, 2011.
- [8] Arefifar. S. A, Mohamed. Y. A.-R. I, and El-Fouly. T. H, "Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 711-723, 2015.
- [9] Arefifar. S. A, Mohamed. Y. A.-R. I, and El-Fouly. T. H, "Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems," *IEEE transactions on smart grid*, Vol. 3, pp. 1491-1502, 2012.
- [10] Haddadian. H and Noroozian R, "Multi microgrid-based operation of active distribution networks considering demand response programs," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 10, pp. 1804-1812, 2018.
- [11] Hasanvand. S, M. Nayeripour, Arefifar S. A, and Fallahzadeh-Abarghouei. H, "Spectral Clustering for Designing Robust and Reliable Multi-Microgrid Smart Distribution Systems." *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, pp. 1359-1365, 2018.
- [12] Osama. R. A, Zobia A. F, and Abdelaziz A. Y, "A Planning Framework for Optimal Partitioning of

worth," WESCANEX'91'IEEE Western Canada Conference on Computer, Power and Communications Systems in a Rural Environment, pp. 271-277, 1991.

modified teaching-learning based optimization algorithm," International journal of electrical power & energy systems, Vol. 50, pp. 65-75, 2013.  
[27] Goel. L, Billinton. R, and Gupta. R, "Basic data and evaluation of distribution system reliability

---

<sup>1</sup> Distributed Generation

<sup>2</sup> Energy Storage Systems

<sup>3</sup> Multi-microgrid

<sup>4</sup> Genetic Algorithm

<sup>5</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

<sup>6</sup> Photovoltaic

<sup>7</sup> Forward-backward