

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۵

## هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری سیستم در ریزشکده‌ای متشکل از منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی

سعید ابریشم فروشان اصل<sup>۱</sup>، مجید گندمکار<sup>۲\*</sup>، جواد نیکوکار<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

saeed.abrisham@stu.iau-saveh.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

gandomkar@iau-saveh.ac.ir

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

j.nikoukar@iau-saveh.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری سیستم به صورت مسئله تصادفی در ریزشکده با مدهای عملکردی اتصال به شبکه و جزیره‌ای متشکل از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بیان می‌شود. این مسئله برای تنظیم بهینه رله‌های اضافه جریان تنظیم دوگانی و انتخاب اندازه راکتانس محدودکننده جریان خطا، کمیته‌سازی زمان عملکرد کل رله‌ها در مدهای حفاظتی اولیه و پشتیبان را بر عهده دارد. همچنین مقید به محدودیت‌های فاصله زمانی هماهنگی، پارامترهای تنظیم رله‌ها، اندازه محدودکننده جریان خطا و پایداری ریزشکده در شرایط خطا می‌باشد. ریزشکده‌ها عموماً دارای منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی هستند، پس طرح حفاظتی پیشنهادی نیاز به بهره‌برداری روزانه ریزشکده با مدل تصادفی به منظور محاسبه متغیرهای شبکه قبل از رخداد خطا دارد. لذا مسئله مذکور، کمیته‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری و ریزش بار ریزشکده مقید به معادلات پخش توان بهینه آن در حضور منابع مختلف با فرض عدم قطعیت‌های بار و تولید را بر عهده دارد. بنابراین، اعمال طرح پیشنهادی بر روی ریزشکده‌های ۹ و ۳۲ باس، حل آن با الگوریتم جست‌وجوی کلاغ و با انتخاب اندازه بهینه برای منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی متناسب با شاخص‌های بهره‌برداری و هماهنگی حفاظتی، می‌توان راه‌حل حفاظتی سریع مقید به پایداری سیستم در شرایط خطا را به دست آورد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم جست‌وجوی کلاغ، بهره‌برداری بهینه روزانه ریزشکده، پایداری سیستم، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر، هماهنگی حفاظتی بهینه.

## ۱. مقدمه

هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان دوپل معکوس<sup>۱۱</sup> در شرایط خطا برای شبکه توزیع بیان شده است. علاوه بر این، شاخص پایداری سیستم برای طرح پیشنهادی در مرجع [۱۰] در نظر گرفته شده و مرجع [۱۱] نیز شاخص امنیت ناشی از پیشامد  $N - 1$  در طرح OPC را مطرح کرده است. عموماً طرح مذکور دارای چهارچوب بهینه‌سازی غیرخطی است؛ لذا در مرجع [۱۲-۱۵] به ترتیب از الگوریتم ژنتیک<sup>۱۱</sup> (GA)، الگوریتم ژنتیک مینی بر توری فازی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۱۳</sup> (MOPSO) متناسب با ابزار تصمیم‌گیری فازی<sup>۱۴</sup> (FDMT)، و الگوریتم کرم شبتاب اصلاح‌شده تطبیقی<sup>۱۵</sup> (AMFA) برای حل مسئله OPC استفاده کرده‌اند. توجه شود که چهارچوب هماهنگی حفاظتی در شبکه متشکل از تولیدات پراکنده نسبت به طرح OPC مرسوم متفاوت است؛ زیرا در این شرایط شبکه یک‌سو تغذیه به شبکه چندسو تغذیه مبدل خواهد شد [۱۶]. این موارد در مرجع [۱۷ و ۱۸] برای تعیین بهینه پارامترهای تنظیم شاخص زمانی<sup>۱۶</sup> (TDS) و جریان پیکاپ<sup>۱۷</sup> به ترتیب برای رله‌های اضافه جریان و DSORها با فرض ظرفیت ثابت برای تولیدات پراکنده بیان شده است. در نهایت با توجه به پیشینه تحقیق، سه شکاف تحقیقاتی مهم در طرح OPC پیشنهادی وجود دارد که به شرح زیر است:

- عموماً بیشتر تحقیقات روش OPC را برای داده‌های شبکه در یک لحظه و ظرفیت ثابت تولیدات پراکنده مدل‌سازی کرده‌اند؛ از این رو متغیرهای شبکه قبل از رخداد خطا را توسط معادلات پخش بار محاسبه می‌کنند. ولی توجه شود که عموماً ریزشبه‌ها دارای RESها جهت کاهش آلودگی زیست‌محیطی و ESSها برای بهبود انعطاف‌پذیری شبکه هستند. لذا طرح OPC نیاز به بهره‌برداری بهینه روزانه ریزشبه دارد.
- در زمینه حفظ پایداری شبکه در شرایط خطا کمتر سخنی توسط تحقیقات پیشین صورت گرفته است. ولی بایستی گفت که طرح هماهنگی حفاظتی زمانی مفید و مؤثر خواهد بود که علاوه بر دستیابی به راه حل حفاظتی سریع در شرایط خطا، پایداری شبکه را که شامل تولیدات پراکنده مختلف است، نیز تأمین کند.
- در بیشتر تحقیقات، الگوریتم تکاملی مرسوم مانند الگوریتم

حفاظت شبکه در شرایط وقوع خطا یک نیاز اساسی در سیستم قدرت به‌خصوص در شبکه توزیع است که بیش از ۸۰٪ خاموشی‌ها در آن رخ می‌دهد [۲-۱]. چهارچوب حفاظت بهینه بایستی قادر به قطع بخشی از شبکه دچار خطا در کمترین زمان ممکن توسط هماهنگی مابین ادوات حفاظتی مانند رله‌ها و محدودکننده جریان خطا<sup>۱</sup> (FCL) باشد [۳]. علاوه بر این، توجه شود که به‌تازگی شبکه توزیع متشکل از چندین ریزشبه به علت حضور فناوری‌های جدید مانند منبع انرژی تجدیدپذیر<sup>۲</sup> (RES)، سیستم ذخیره‌سازی انرژی<sup>۳</sup> (ESS) و موارد دیگر است که هر ریزشبه به صورت شبکه چندسو تغذیه می‌باشد و قادر است در مدهای اتصال به شبکه<sup>۴</sup> و جزیره‌ای<sup>۵</sup> فعالیت کند [۴]. از این رو رله اضافه جریان تنظیم دوگانی<sup>۶</sup> (DSOR) نقش مهمی برای حفاظت ریزشبه در شرایط خطا بازی می‌کند. این رله قادر است که در دو جهت جلورونده<sup>۷</sup> و معکوس<sup>۸</sup> با تنظیم پارامترهای مرتبط هر کدام فعالیت کند؛ همچنین با پهنای باند مخابراتی کم می‌تواند هماهنگی حفاظتی مناسبی را برقرار کند [۵]. بنابراین هماهنگی حفاظتی بهینه<sup>۹</sup> (OPC) مرسوم در این شرایط مناسب نیست؛ زیرا آن برای شبکه یک‌سو تغذیه طراحی شده است [۶]. لذا این مقاله طرح OPC متناسب با ریزشبه چندسو تغذیه متشکل از RESها و ESSها با مدهای عملکردی اتصال به شبکه و جزیره‌ای برای تنظیم بهینه DSORها و انتخاب بهینه اندازه راکتانس FCL را ارائه می‌دهد.

در زمینه طرح هماهنگی حفاظتی در شبکه توزیع و ریزشبه تحقیقات مختلفی صورت گرفته است، به طوری که مرجع [۷] یک طرح OPC در ریزشبه برای هماهنگی بهینه مابین رله‌های اضافه جریان جهت تنظیم دوگانی ارائه کرده‌اند. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی فاخته خطی<sup>۱۱</sup> در مرجع [۸] برای حل مسئله OPC به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیم DSORها و اندازه FCL استفاده شده است. آن نیز در مرجع [۹] برای برقراری

1. Fault Current Limiter (FCL)
2. Renewable Energy Source (RES)
3. Energy Storage System (ESS)
4. Grid-Connected Mode
5. Islanded Mode
6. Dual Setting Overcurrent Relay (DSOR)
7. Forward Direction
8. Reverse Direction
9. Optimal Protection Coordination (OPC)
10. Cuckoo-Linear Optimization Algorithm

11. Double-Inverse Overcurrent Relay
12. Genetic Algorithm (GA)
13. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
14. Fuzzy Decision-Making Tool (FDMT)
15. Adaptive Modified Firefly Algorithm (AMFA)
16. Time Dial Setting (TDS)
17. Pickup Current

می‌شود، و سپس روش کانترویج<sup>۹</sup> برای کاهش سناریوهای تولید شده به سناریوهایی با احتمال رخداد بالا استفاده می‌گردد. شایان ذکر است که در نهایت برای دستیابی به پاسخ مطمئن و باثبات که دارای انحراف معیار پایین است، از الگوریتم جست‌وجوی کلاغ<sup>۱۰</sup> (CSA) برای حل مسئله مذکور در ریزشبه‌های با ظرفیت بهینه RESها و ESSها از نظر شاخص‌های بهره‌برداری و هماهنگی حفاظتی<sup>۱۱</sup> (PCI) استفاده می‌شود.

بنابراین نوآوری‌های این مقاله در زمینه طرح OPC عبارت‌اند از:  
 - مدل‌سازی طرح هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری سیستم در ریزشبه‌های متشکل از منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی؛  
 - استفاده از بهره‌برداری بهینه روزانه برای ریزشبه‌های متشکل از منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی برای محاسبه متغیرهای شبکه قبل از رخداد خطا؛  
 - انتخاب یک حل‌کننده قوی و باثبات مانند الگوریتم جست‌وجوی کلاغ برای حل مسئله پیشنهادی؛

در ادامه مقاله، مدل مسئله SSCOPC در بخش دوم ارائه می‌شود. در بخش ۳، نحوه محاسبه شاخص هماهنگی حفاظتی بیان می‌شود. نتایج عددی در بخش چهارم و نتیجه‌گیری در بخش ۵ ذکر می‌شوند.

## ۲. هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری سیستم

در این بخش، مدل مسئله هماهنگی حفاظتی مقید به پایداری سیستم (SSCOPC) بیان می‌شود که آن کمینه‌سازی زمان عملکرد کل DSORS را در دو مد حفاظتی اولیه و پشتیبان بر عهده دارد. این مسئله دارای محدودیت‌های پارامترهای تنظیم رله‌ها، یعنی TDS و جریان پیکاپ ( $I^P$ )، در دو جهت جلورونده و معکوس، اندازه راکتانس FCL، قیود فاصله زمانی هماهنگی و پایداری سیستم است. در نهایت، مدل مسئله پیشنهادی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\min T = \sum_{w \in S} \pi_w \sum_{i \in ST} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \left( t_{c,i,j,t,w}^{P-fw} + \sum_{k \in K} t_{c,i,j,k,t,w}^{B-rv} \right) \quad (1)$$

به شرطی که:

$$t_{c,i,j,t,w}^{P-fw} = TDS_i^{fw} \frac{A}{\left( \frac{I_{c,i,j,t,w}^{sc}}{I_i^{P-fw}} \right)^B - 1} \quad \forall c, i, j, t, w \quad (2)$$

$$t_{c,i,j,k,t,w}^{B-rv} = TDS_i^{rv} \frac{A}{\left( \frac{I_{c,i,j,k,t,w}^{sc}}{I_i^{P-rv}} \right)^B - 1} \quad \forall c, i, j, k, t, w \quad (3)$$

ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسائل هماهنگی حفاظتی در شبکه توزیع و یا ریزشبه استفاده می‌شود. اما توجه شود که با در نظر گرفتن بهره‌برداری روزانه ریزشبه در طرح OPC، حجم مسئله مذکور بالا خواهد بود. لذا این الگوریتم قادر به دستیابی به پاسخ مطمئن و باثبات در این شرایط نیستند.

برای رفع شکاف‌های تحقیقاتی ارائه‌شده در طرح OPC، هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری سیستم<sup>۱</sup> (SSCOPC) در ریزشبه‌های با مدهای عملکردی اتصال به شبکه و جزیره‌ای متشکل از RESها و ESSها برای تعیین راه‌حل حفاظتی سریع که پایداری تولیدات پراکنده یا به‌طور کلی پایداری سیستم را نیز در نظر گرفته است، در این مقاله بیان می‌شود. طرح SSCOPC پیشنهادی به صورت یک مسئله تصادفی<sup>۲</sup> مدل‌سازی می‌شود که کمینه‌سازی میانگین زمان عملکرد کل DSORSها را در دو مدهای حفاظتی اولیه و پشتیبان<sup>۳</sup> تحت عنوان تابع هدف بر عهده دارد. همچنین آن محدودیت‌های فاصله زمانی هماهنگی<sup>۴</sup> (CTI)، پارامترهای تنظیم TDS و جریان پیکاپ در دو جهت جلورونده و معکوس، اندازه راکتانس FCL و پایداری سیستم را به عنوان قیود مسئله در نظر گرفته است. قابل توجه است که پایداری سیستم در این مقاله متناظر با پایداری RESها و ESSها ناشی از سیگنال‌های خطا در شرایط وقوع اتصال کوتاه می‌باشد. علاوه بر این، ریزشبه‌ها عموماً متشکل از RESها و ESSها هستند، لذا طرح پیشنهادی برای محاسبات متغیرهای شبکه قبل از رخداد خطا نیاز به بهره‌برداری بهینه روزانه ریزشبه در مدهای عملکرد مختلف است. از این رو در این مسئله، کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبه و ریزش بار<sup>۵</sup> آن در مد جزیره‌ای به عنوان تابع هدف منظور می‌شود. همچنین قیود این مسئله برابر معادلات پخش توان بهینه<sup>۶</sup> (OPF) ریزشبه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای انرژی است. علاوه بر این، برنامه‌ریزی تصادفی مبنی بر سناریو<sup>۷</sup> (SBSP) برای مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت بار مصرفی و توان تولیدی RESها در طرح پیشنهادی استفاده می‌شود. در این روش، روش شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۸</sup> (MCS) برای تولید سناریو استفاده

1. System Stability-Constrained Optimal Protection Coordination (SSCOPC)
2. Stochastic Problem
3. Primary and Backup Protection Modes
4. Coordination Time Interval (CTI)
5. Load Shedding
6. Optimal Power Flow (OPF)
7. Scenario-Based Stochastic Programming (SBSP)
8. Mont Carlo Simulation (MCS)

9. Kantorovich Method
10. Crow search Algorithm (CSA)
11. Protection Coordination Index (PCI)

ولی بایستی گفت که عموماً ESSها در ریزشبه‌ها از نوع باتری هستند، و از آنجا که باتری‌ها دارای ثابت زمانی بسیار کوچکی هستند، لذا سرعت پاسخ‌دهی آنها در برابر تغییرات توان بالا است. بنابراین آنها در صورت حذف توان خروجی خودشان در شرایط خطا می‌توانند سریع توان ورودی خود را صفر کنند. از این رو ESSها قادرند که پایداری خود را در تمامی شرایط بحرانی حفظ کنند. به‌عنوان نکته دیگر، RESها عموماً از نوع بادی و خورشیدی (فتولتائیک) کاربرد فراوانی در سیستم قدرت دارند، که سیستم‌های فتولتائیک توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند. بنابراین فتولتائیک‌ها همانند ESSها دارای پاسخ‌دهی سریع هستند و می‌توانند پایداری خود را در شرایط خطا حفظ کنند. لذا با توجه به موارد اشاره‌شده، تنها سیستم‌های بادی که دارای ژنراتور سنکرون هستند و بخش ورودی آن به‌صورت مکانیکی است، فقط نیاز به عملکرد بهینه رله‌های برقراری پایداری سیستم به‌علت بالا بودن ثابت زمانی سیستم مکانیکی دارند. از این رو عبارت CCT بایستی برای سیستم‌های بادی بالادستی یک موقعیت خطا به دست آید [۱۰]: زیرا این نوع RESها بار خروجی خود را در شرایط خطا از دست داده‌اند، ولی RESهای پایین‌دستی موقعیت خطا بار خود را در شرایط خطا حفظ کرده‌اند. بنابراین عبارت CCT برای موقعیت خطای  $z$  به‌صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$CCT_j = \min \{ CCT_{W1,j}, CCT_{W2,j}, \dots, CCT_{Wn,j} \} \quad (9)$$

که  $Wn$  برابر تعداد سیستم‌های بادی بالادستی خطا در موقعیت  $z$  است. همچنین CCT هر RES از نوع بادی از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۰]:

$$CCT_{W,j} = \sqrt{\frac{2 \times H}{Pm_0 \times \pi \times f} (\delta_{W,j}^{cr} - \delta_{W,j}^0)} \quad (10)$$

$$\forall W \in \{W1, W2, \dots, Wn\}$$

$$\delta_{W,j}^{cr} = \cos^{-1} \left( (\pi - \delta_{W,j}^0) \sin(\delta_{W,j}^0) - \cos(\delta_{W,j}^0) \right) \quad (11)$$

که  $\delta^{cr}$  برابر زاویه قدرت یا ولتاژ بحرانی باسی است که سیستم بادی به آن متصل می‌باشد و  $\delta^0$  برابر زاویه ولتاژ این باس قبل از رخداد خطا در موقعیت  $z$  است. همچنین  $Pm_0$  برابر توان ورودی این سیستم بادی است.

در روابط (۲)، (۳)، (۱۰) و (۱۱) نیاز به محاسبه جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها، زاویه ولتاژ باس‌ها قبل از رخداد خطا و توان تولیدی تولیدات پراکنده است. لذا نیاز به حل مسئله پخش توان بهینه (OPF) در ریزشبه‌ها است. از آنجا که عموماً ریزشبه‌ها

$$t_{c,i,j,k,t,w}^{P-rv} - t_{c,i,j,t,w}^{B-fw} \leq CTI \quad \forall c,i,j,k,t,w \quad (4)$$

$$\underline{I}_i^P \leq I_i^{P-fw}, I_i^{P-rv} \leq \bar{I}_i^P \quad \forall i \quad (5)$$

$$\underline{TDS}_i \leq TDS_i^{fw}, TDS_i^{rv} \leq \bar{TDS}_i \quad \forall i \quad (6)$$

$$0 \leq X^{FCL} \leq \bar{X}^{FCL} \quad (7)$$

$$t_{c,i,j,t,w}^{P-fw} \leq CCT_{c,i,j,t,w} \quad \forall c,i,j,t,w \quad (8)$$

در رابطه (۱)، تابع هدف مسئله OPC مدل‌سازی شده است که برابر با کمینه‌سازی زمان عملکرد کل DSORs در دو مد حفاظتی اولیه و پشتیبان با در نظر گرفتن دو مد عملکردی اتصال به شبکه و جزیره‌ای ریزشبه‌ها و موقعیت‌های مختلف خطا می‌باشد [۷]. زمان عملکرد هر رله در دو جهت جلورونده و معکوس به‌ترتیب مبنی بر مد حفاظتی اولیه و پشتیبان به‌ترتیب در روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند. در این روابط، A و B برابر پارامترهای ثابتی هستند که به‌ترتیب مقدار آنها برابر ۰/۱۴ و ۰/۰۲ هستند [۷]. در قید (۴)، محدودیت فاصله زمانی بین مدهای حفاظتی اولیه و پشتیبان برای رله‌های مختلف بیان شده است که تحت عنوان محدودیت CTI شناخته می‌شود [۷]. متغیرهای تصمیم‌گیری در مسئله پیشنهادی برابر پارامترهای تنظیم DSOR یعنی  $TDS_i^{fw}, TDS_i^{rv}, I_i^{P-fw}$  و اندازه راکتانس FCL و  $X^{FCL}$  هستند که محدودیت‌های آنها در قیود (۵) تا (۷) بیان شده است. قابل توجه است که انواع مختلفی برای FCLها وجود دارد که به‌طور کلی تحت عنوان FCLهای پسیو، جامد و ترکیبی شناخته می‌شوند. FCLهای پسیو به‌صورت مقاومتی و سلفی هستند که نوع مقاومتی موجب افزایش تلفات سیستم خواهد شد، ولی نوع سلفی دارای تلفات بسیار پایین است. نوع ترکیبی و جامد که دارای ادوات الکترونیک قدرت هستند، کارایی بهتری نسبت به نوع پسیو دارند، ولی هزینه آنها بالاتر است. از این رو در این مقاله از FCL نوع سلفی استفاده می‌شود که تلفات کمتری دارد و همچنین هزینه آن کم است. در نهایت، محدودیت پایداری سیستم در رابطه (۸) بیان می‌شود که بر اساس آن بایستی که زمان عملکرد رله در مد حفاظتی اولیه کمتر از زمان تسویه بحرانی<sup>۱</sup> (CCT) باشد [۱۰]. عبارت CCT برابر با حداکثر زمانی است که RES و یا ESS در شرایط خطا می‌تواند از شبکه قطع باشد، سپس به ریزشبه متصل گردد تا اینکه آن عملکرد پایدار خود را ادامه دهد.

$$0 \leq P_{n,t,w}^{ESch} \leq CR_n(1 - x_{n,t}) \quad \forall n,t,w \quad (26)$$

$$\sqrt{(P_{n,t,w}^{ES})^2 + (Q_{n,t,w}^{ES})^2} \leq (1 + \varepsilon) S_n^{ES \max} \quad \forall n,t,w \quad (27)$$

در رابطه (۱۲)، تابع هدف مسئله بهره‌برداری بهینه ریزش‌بکه بیان شده است. بخش‌های اول و دوم مربوط به هزینه شارژ و دشارژ ESSها است. همچنین هزینه ریزش بار که امکان دارد در مد جزیره‌ای ریزش‌بکه به وجود آید، در بخش سوم رابطه (۱۲) فرمول‌بندی شده که وابسته به بار تغذیه‌نشده<sup>۱</sup> ( $L^D$ ) و ارزش بار از دست رفته<sup>۲</sup> (VOLL) است [۱۹]. قیود (۱۳) تا (۱۶) مرتبط با معادلات پخش بار AC در ریزش‌بکه است که به ترتیب بیانگر تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس ریزش‌بکه برای زمان‌های مختلف، محاسبه توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توزیع در ساعات مختلف هستند [۲۰]. همچنین محدودیت‌های فنی ریزش‌بکه مانند محدودیت ظرفیت خطوط توزیع، ظرفیت پست توزیع و ولتاژ باس‌های ریزش‌بکه به ترتیب در روابط (۱۷) تا (۱۹) ذکر شده است [۲۰]. علاوه بر این، قیود (۲۰) و (۲۱) به معادلات حاکم بر RESها اشاره دارد، به طوری که محدودیت توان اکتیو تولیدی این منابع متناسب با اقلیم آب‌وهوایی در (۲۰) مدل‌سازی شده است، در صورتی که محدودیت ظرفیت خروجی آن‌ها در (۲۱) ارائه شده است [۲۱]. در نهایت معادلات حاکم بر ESSها در (۲۲) تا (۲۷) ارائه شده است که به ترتیب برابر با انرژی ذخیره‌شده در ESS در ساعات مختلف، انرژی اولیه آن، محدودیت انرژی ESS، محدودیت شارژر ESS هستند [۲۱]. قابل توجه است که در این روابط، متغیر باینری  $x$  به منظور جلوگیری از عملکرد همزمان حالت‌های شارژ و دشارژ ESS استفاده شده است. همچنین بایستی گفت که عبارت  $\varepsilon$  برابر با نرخ مجاز عملکرد اضافه‌باری RESها و ESSهاست؛ به عبارتی دیگر، در این مقاله فرض شده است که ادوات مذکور می‌توانند در شرایط بحرانی به یک مقدار مجاز در شرایط اضافه‌باری فعالیت کنند.

قابل توجه است که مسئله مذکور قابل اجرا بر روی دو مد عملکرد ریزش‌بکه یعنی مدهای اتصال به شبکه و جزیره‌ای است، ولی در مد اتصال به شبکه به دلیل اینکه شبکه منبع پشتیبان RESها است، نیاز به اضافه کردن مدل ریزش بار در مسئله پیشنهادی نیست؛ از این رو بخش سوم تابع هدف و عبارت  $L^D$  در رابطه (۱۳) حذف خواهند شد. همچنین نیازی نیست که شبکه در شرایط اضافه‌باری

دارای تولیدات پراکنده تجدیدپذیر برای کاهش آلودگی و ذخیره‌سازی انرژی برای بهبود انعطاف‌پذیری ریزش‌بکه است، بایستی بهره‌برداری بهینه برای افق زمانی خاصی مانند ۲۴ ساعت انجام شود؛ از این رو قبل از اجرای مسئله SSCOPC پیشنهادی، ابتدا محاسبات مسئله بهره‌برداری بهینه ریزش‌بکه در دو مد اتصال به شبکه و جزیره‌ای انجام می‌شود. این مسئله کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری ذخیره‌سازهای انرژی به علاوه هزینه ریزش بار در عملکرد جزیره‌ای ریزش‌بکه مقید به معادلات OPF در ریزش‌بکه متشکل از RESها و ESSها را بر عهده دارد. بنابراین طرح پیشنهادی به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\min Cost = \sum_{w \in S} \pi_w \sum_{n \in N} \sum_{t \in ST} \left\{ \begin{aligned} &\rho_n^{ch} P_{n,t,w}^{ESch} + \\ &\rho_n^{dech} P_{n,t,w}^{ESch} + \\ &VOLL \times L_{n,t,w}^D \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

به شرطی که:

$$P_{n,t,w}^S + P_{n,t,w}^{RES} + (P_{n,t,w}^{ESch} - P_{n,t,w}^{ESch}) - \sum_{l \in N} A_{n,l}^L P_{n,l,t,w}^L = P_{n,t,w}^D - L_{n,t,w}^D \quad \forall n,t,w \quad (13)$$

$$Q_{n,t,w}^S + Q_{n,t,w}^{RES} + Q_{n,t,w}^{ES} - \sum_{l \in N} A_{n,l}^L Q_{n,l,t,w}^L = Q_{n,t,w}^D \quad \forall n,t,w \quad (14)$$

$$P_{n,l,t,w}^L = g_{n,l} (V_{n,t,w})^2 - V_{n,t,w} V_{l,t,w} \left\{ \begin{aligned} &g_{n,l} \cos(\theta_{n,t,w} - \theta_{l,t,w}) \\ &+ b_{n,l} \sin(\theta_{n,t,w} - \theta_{l,t,w}) \end{aligned} \right\} \quad \forall n,l,t,w \quad (15)$$

$$Q_{n,l,t,w}^L = -b_{n,l} (V_{n,t,w})^2 + V_{n,t,w} V_{l,t,w} \left\{ \begin{aligned} &b_{n,l} \cos(\theta_{n,t,w} - \theta_{l,t,w}) \\ &- b_{n,l} \sin(\theta_{n,t,w} - \theta_{l,t,w}) \end{aligned} \right\} \quad \forall n,l,t,w \quad (16)$$

$$\sqrt{(P_{n,l,t,w}^L)^2 + (Q_{n,l,t,w}^L)^2} \leq S_{n,l}^{L \max} \quad \forall n,l,t,w \quad (17)$$

$$\sqrt{(P_{n,t,w}^S)^2 + (Q_{n,t,w}^S)^2} \leq S_n^{S \max} \quad \forall n,t,w \quad (18)$$

$$V_{n,t,w}^{\min} \leq V_{n,t,w} \leq V_{n,t,w}^{\max} \quad \forall n,t,w \quad (19)$$

$$0 \leq P_{n,t,w}^{RES} \leq (1 + \varepsilon) \bar{P}_{n,t,w}^{RES} \quad \forall n,t,w \quad (20)$$

$$\sqrt{(P_{n,t,w}^{RES})^2 + (Q_{n,t,w}^{RES})^2} \leq (1 + \varepsilon) S_n^{RES \max} \quad \forall n,t,w \quad (21)$$

$$E_{n,t+1,w} = E_{n,t,w} + \eta_n^{ch} P_{n,t,w}^{ESch} - \frac{1}{\eta_n^{dech}} P_{n,t,w}^{ESch} \quad \forall n,t < 24:00, w \quad (22)$$

$$E_{n,t,w} = E_n^{ini} \quad \forall n,t = 1, w \quad (23)$$

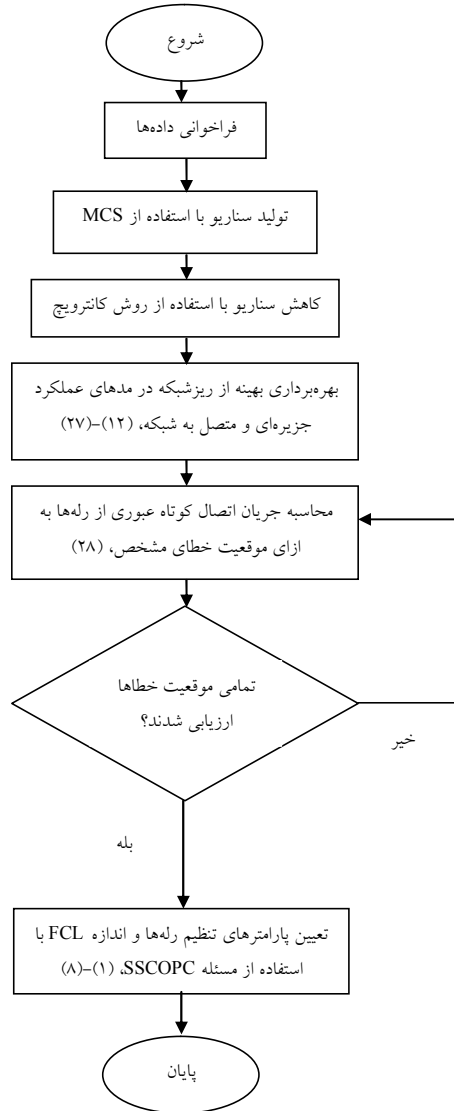
$$E_n^{\min} \leq E_{n,t,w} \leq (1 + \varepsilon) E_n^{\max} \quad \forall n,t,w \quad (24)$$

$$0 \leq P_{n,t,w}^{ESch} \leq DR_n x_{n,t} \quad \forall n,t,w \quad (25)$$

1. Load Not Supplied
2. Value of Lost Load (VOLL)

### ۳. محاسبه شاخص هماهنگی حفاظتی

یکی از شاخص‌های مهم در مسئله OPC که قادر است اثرات RESها و ESSها را بر روی مسئله هماهنگی حفاظتی ریزشکبه بررسی کند، شاخص هماهنگی حفاظتی (PCI) است [۲۳].



شکل (۱): روندنمای طرح SSSOPC پیشنهادی مبنی بر بهره‌برداری روزانه ریزشکبه

این شاخص برابر با نسبت نرخ تغییرات سطح ظرفیت RES و یا ESS و نرخ تغییرات CTI است که به صورت  $\Delta S^{RESmax}/\Delta CTI$  و یا  $\Delta S^{ESSmax}/\Delta CTI$  برای RES و ESS بیان می‌شود [۲۳]. قابل توجه است که برای محاسبه PCI، ابتدا مسئله OPC، (۱) تا (۷)، بدون در نظر گرفتن وجود RES و ESS محاسبه می‌شود که با عنوان هماهنگی حفاظتی مرسوم<sup>۱</sup> (CPC) شناخته می‌شود. سپس منابع

نیز کار کند، بنابراین عبارت  $\epsilon$  برابر صفر در نظر گرفته خواهد شد. اما در مد جزیره‌ای ریزشکبه، از آنجا که شبکه بالادست منبع پشتیبان برای RESها و ESSها نیست، عبارت‌های  $P^S$  و  $Q^S$  از روابط (۱۳) و (۱۴) حذف خواهند شد و رابطه (۱۸) در نظر گرفته نخواهد شد. بنابراین، معادلات ریزش بار و عملکرد اضافه‌باری فقط در مدل جزیره‌ای ریزشکبه در نظر گرفته می‌شود.

در مسئله SSSOPC پیشنهادی، پارامترهای از قبیل بار اکتیو و راکتیو،  $P^D$  و  $Q^D$  و حداکثر توان اکتیو RESها،  $\bar{P}^{RES}$ ، به صورت عدم قطعیت هستند. از این رو برنامه‌ریزی تصادفی مبنی بر سناریو (SBSP) برای مدل‌سازی این پارامترهای متناظر با توزیع احتمال نرمال برای بار مصرفی، توزیع احتمال ویبول برای سیستم بادی و توزیع احتمال بتا برای سیستم خورشیدی استفاده می‌شود [۲۲]. آن از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) برای تولید سناریو استفاده می‌کند. همچنین روش کانتروپچ برای کاهش سناریوهای تولیدشده به تعدادی سناریو با احتمال رخداد بالا استفاده می‌گردد. جزئیات کامل این روش در مرجع [۲۲] ذکر شده است.

در مرحله بعد، می‌توان عبارت‌های  $\delta^0$ ،  $Pm_0$  و جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها را محاسبه کرد. عبارت  $\delta^0$  در یک باس برابر با  $\theta$  در آن باس است. همچنین  $Pm_0$  نیز برابر  $P^{RES}/\eta$  است که  $\eta$  معرف راندمان RES می‌باشد. ولی برای محاسبه جریان اتصال کوتاه، ابتدا موقعیت خطا  $z$  به عنوان یک باس مجازی با اندیس  $j$  فرض می‌شود که میزان ولتاژ این باس قبل از رخداد خطا ( $V_j^0$ ) با استفاده از قانون KVL بر اساس نتایج خروجی مسئله (۱۲) تا (۲۷) محاسبه خواهد شد. سپس ولتاژ باس‌های دیگر در شرایط خطا (حالت ماندگار) به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$V_{n,t,w}^f = V_{n,t,w}^0 - \frac{Z_{n,j}^{new}}{Z^f + Z_{j,j}^{new}} V_{j,t,w}^0 \quad \forall n,t,w \quad (28)$$

که عبارت‌های  $V^f$  و  $V^0$  به ترتیب معرف ولتاژ قبل و بعد از رخداد خطا می‌باشند. همچنین  $Z^{new}$  اشاره به ماتریس امپدانس شبکه با در نظر گرفتن باس مجازی  $z$  دارد که برابر  $(Y^{new})^{-1}$  می‌باشد. نیز معرف ماتریس امپدانس شبکه با فرض باس  $z$  است. در نهایت عبارت  $Z^f$  برابر امپدانس مسیر اتصال کوتاه است. سپس جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها با استفاده از قانون اهم و KCL قابل محاسبه است. [۷]. برای مثال، جریان عبوری از رله مابین باس‌های  $n$  و  $j$  برابر  $(V_n^f - V_j^f)/Z_{n,j}$  است که عبارت  $Z$  معرف امپدانس مسیر بین باس‌های  $n$  و  $j$  است. در نهایت، روندنمای مسئله پیشنهادی به صورت شکل (۱) است.



ریزشبکه، برای حل مسئله پخش بار از روش پسر-پیشرو استفاده می‌شود [۲۵] که در آن ولتاژ، توان عبوری از خطوط، توان پست توزیع تعیین می‌شوند. در نهایت، محدودیت‌های موجود در مسئله در طرح پیشنهادی با استفاده از روش جریمه‌های استاتیکی [۲۶] برآورده می‌شوند. همچنین میزان جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها با استفاده از رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود.

#### ۴.۱. ریزشبکه ۹ باس

در این بخش، طرح پیشنهادی بر روی ریزشبکه ۹ باس با مقادیر مبنای ۲۰ مگاوات آمپر و ۱۲/۴۷ کیلوولتی که در شکل (۲) رسم شده است، اجرا خواهد شد که فرض شده اتصال کوتاه‌های متقارن در وسط هر خط توزیع یعنی نقاط ۱۰ تا ۱۷ در شکل (۲) رخ می‌دهد [۱۲]. علاوه بر این، بار مصرفی در ساعت پیک مصرف برابر ۲ مگاوات آمپر با ضریب قدرت ۰/۹ پس‌فاز است. میزان بار در ساعات دیگر از حاصل ضرب بار پیک و منحنی زمانی ضریب بار به دست می‌آید؛ این منحنی در شکل (۳) بر اساس داده‌های شهر رفسنجان، ایران [۲۷] ترسیم شده است. همچنین در شبکه مذکور، تولیدات پراکنده اینورتری مانند فتوولتائیک (PV) و سیستم بادی (W) وجود دارد که منحنی زمانی نرخ توان آن‌ها بر اساس داده‌های شهر رفسنجان ایران در شکل (۳) رسم شده است [۲۷]. بایستی توجه شود که شکل (۳) مقادیر میانگین ضریب بار و نرخ توان منابع تجدیدپذیر را در ساعات‌های مختلف نمایش می‌دهد. انحراف معیار این پارامترها نیز برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است.

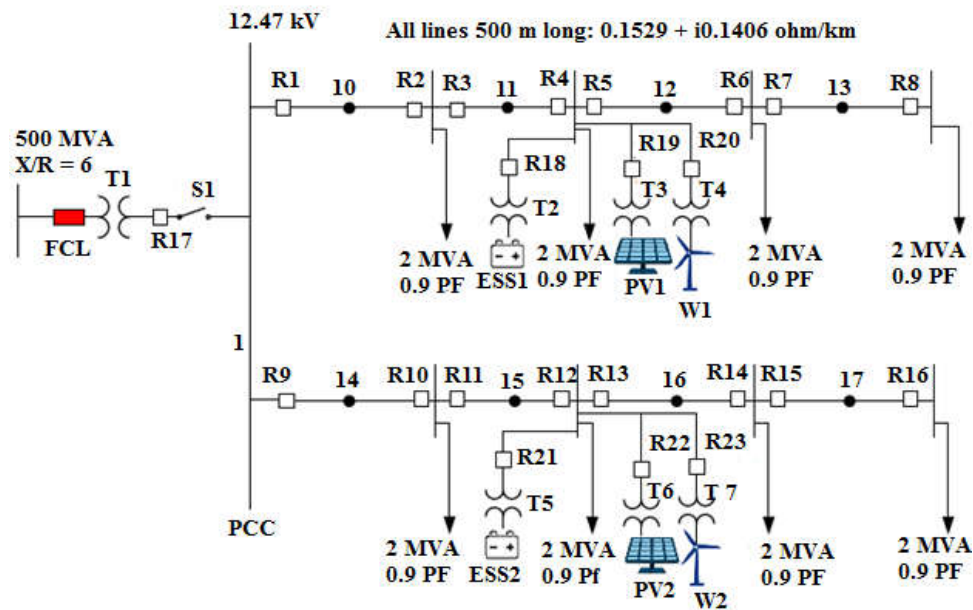
مذکور با یک ظرفیت مشخص به ریزشبکه متصل می‌شوند و با توجه نتایج مسئله CPC، زمان عملکرد تمامی رله‌ها با استفاده از روابط (۲) و (۳) دوباره محاسبه می‌شوند. در مرحله بعد، فاصله زمانی مابین رله‌ها در مد حفاظتی اولیه و پشتیبان ( $\Delta t$ ) به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{c,i,j,k,t,w}^{P_{rv}} - t_{c,i,j,k,t,w}^{B_{fw}} = \Delta t_{c,i,j,k,t,w} \quad \forall c,i,j,k,t,w \quad (29)$$

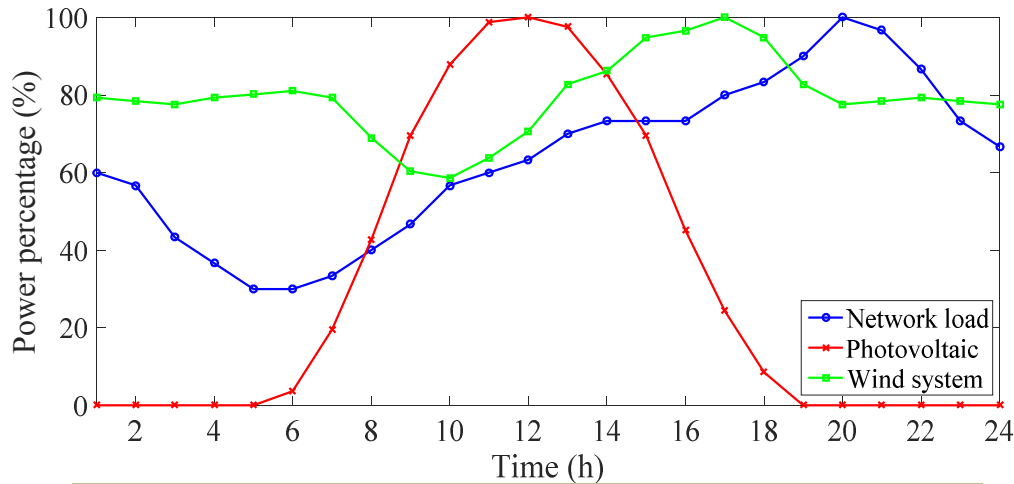
در نهایت توجه شود که نرخ تغییرات  $\Delta CTI$  بر اساس [۲۳] به صورت رابطه  $CTI - \max(\Delta t_{c,i,j,k,t,w})$  بیان می‌شود.

#### ۴. نتایج عددی

در این بخش، مدل مسئله پیشنهادی بر روی ریزشبکه‌های ۹ و ۳۲ باس در محیط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی خواهد شد. از آنجا که چهارچوب مسئله‌های SSSCOPC و بهره‌برداری بهینه ریزشبکه به ترتیب به صورت غیرخطی و غیرخطی عدد صحیح می‌باشند، لذا الگوریتم جست‌وجوی کلاغ‌ها (CSA) برای دستیابی به یک پاسخ و راه‌حل مطمئن برای حل این مسائل استفاده می‌شود [۲۴]. پارامترهای تنظیم این الگوریتم برابر تعداد جمعیت کلاغ‌ها، حداکثر تکرار، احتمال آگاهی و طول پرواز است که به ترتیب بر اساس مرجع [۲۴] برابر ۵۰، ۱۰۰۰، ۰/۱ و ۲ فرض شده‌اند. علاوه بر این در مسئله‌های SSSCOPC و بهره‌برداری بهینه ریزشبکه، مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری  $P^{RES}$ ،  $P^{ESch}$  و  $P^{ESch}$  و پارامترهای تنظیم DSOR و اندازه FCL بر اساس محدودیت‌های تعریف‌شده برای آن‌ها در معادلات (۲۰)، (۲۵)، (۲۶) و (۵) تا (۷) توسط الگوریتم CSA در هر مرحله حل تعیین می‌شوند. سپس در بهره‌برداری بهینه



شکل (۲): نمودار تک‌خطی ریزشبکه ۹ باس



شکل (۳): منحنی زمانی میانگین نرخ توان RESها و ضریب بار [۲۷] بر اساس داده‌های شهر رفسنجان، ایران

برای R2 نیز رله R4 به‌عنوان پشتیبان خواهد بود [۱۲]. علاوه بر این، حدود مجاز پارامترهای تنظیم DSORها در [۱۲] بیان شده و حداکثر اندازه در نظر گرفته‌شده برای FCL برابر ۶ پریونیت است. همچنین CTI در مقاله برابر ۰/۳ ثانیه انتخاب شده است. عبارت H در سیستم بادی با فرکانس کاری ۵۰ هرتز برابر ۲ است. علاوه بر این، ۱۰۰۰ سناریو توسط MCS برای پارامترهای عدم قطعیت مسئله پیشنهادی تولید می‌شود و سپس توسط روش کانترویج، ۲۰ سناریو با احتمال رخداد بالا انتخاب می‌گردد.

در جدول‌های (۲) و (۳) به‌ترتیب شاخص‌های هماهنگی حفاظتی و بهره‌برداری ریزشبه‌ها به‌ازای اندازه‌های مختلف RESها و ESSها بیان شده است. بر اساس جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه این عناصر در ریزشبه ۹ باس، میزان  $\Delta CTI$  افزایش می‌یابد و PCI برای هر عنصر در این شرایط پایین می‌رود. این موضوع بدین معنی است که  $\Delta t$  نسبت به مقدار CTI کاهش می‌یابد، بنابراین می‌توان بیان کرد که در اندازه‌های بزرگ‌تر RESها و ESSها می‌توان به زمان عملکرد سریع‌تر رله‌ها دست یافت؛ زیرا فاصله زمانی بین رله‌ها در مدهای حفاظتی اولیه و پشتیبان ناشی از افزایش جریان خطا کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بر اساس جدول (۳) مشاهده می‌شود که انتخاب اندازه بزرگ برای RESها و ESSها موجب کاهش میانگین هزینه ریزش بار از ۵۱۱۷۰ دلار به سمت صفر می‌شود، در صورتی که در این شرایط میانگین هزینه بهره‌برداری از ۳۱۲ دلار به ۵۰۴ دلار افزایش می‌یابد؛ به‌عبارتی دیگر، بایستی گفت که با انتخاب اندازه بزرگ برای این عناصر، با صرف هزینه بهره‌برداری پایین می‌توان میزان خاموشی ریزشبه‌ها در مد جزیره‌ای را حذف کرد.

ریزشبه ۹ باس در این مقاله دارای ESSهای با راندمان ۰/۸۸ می‌باشد که نرخ شارژ و دشارژ، حداقل انرژی، انرژی اولیه و ظرفیت شارژر به‌ترتیب برابر ۰/۴۰، ۰/۴۰، ۰/۱۰، ۰/۱۰ و ۰/۵۰ ظرفیت ESS ( $E^{max}$ ) هستند [۲۸]. همچنین قیمت شارژ و دشارژ در این ذخیره‌ساز به‌ترتیب برابر ۱ و ۱/۵ دلار بر مگاوات ساعت فرض شده است. محدوده مجاز دامنه ولتاژ [۱/۰۵۰/۹] است و نرخ مجاز اضافه‌باری برای RESها و ESSها و VOLL به‌ترتیب برابر ۰/۱ و ۱۰۰ دلار بر مگاوات ساعت است. علاوه بر این، در جدول (۱) مد عملکردی رله‌های مختلف در مکان‌های مختلف خطا در ریزشبه ۹ باس ارائه است. قابل توجه است که برای هر مکان خطا، دو رله اطراف آن در مد حفاظتی اولیه قرار خواهند داشت [۱۲]. همچنین با توجه به ساختار شبکه مذکور، هر رله اولیه می‌تواند دارای رله پشتیبان باشد. برای مثال، با فرض مکان خطا در نقطه ۱۰، رله‌های R1 و R2 در مد حفاظتی اولیه قرار خواهند گرفت و رله‌های R10 و R17 به‌عنوان رله‌های پشتیبان برای R1 استفاده می‌شوند.

جدول (۱): مدل عملکردی رله‌ها در موقعیت‌های مختلف خطا

| موقعیت خطا | مد عملکردی رله، مد اولیه، P، مد پشتیبان، B | مد عملکردی رله، مد اولیه، P، مد پشتیبان، B | مد عملکردی رله، مد اولیه، P، مد پشتیبان، B |
|------------|--|--|--|
| ۱۰         | R1   | R10, R17                                   | B  |
| ۱۱         | R3   | R1   | R2, R4                                     |
| ۱۲         | R5   | R3, R18, R19, R20                          | R6, R8                                     |
| ۱۳         | R7   | R5   | R8   |
| ۱۴         | R9   | R2, R17                                    | R12  |
| ۱۵         | R11  | R9   | R12, R21, R22, R23                         |
| ۱۶         | R13  | R11, R21, R22, R23                         | R14, R16                                   |
| ۱۷         | R15  | R13  | R16  |



برای حداکثر انحراف (افت) ولتاژ در مد اتصال به شبکه کاهش می‌یابند، ولی در مد جزیره‌ای افزایش دارند. بایستی گفت که در مد اتصال به شبکه برای ریزشبه، افزایش اندازه عناصر مذکور موجب کاهش تقاضا از شبکه بالادست می‌شود و بیشتر بارها به صورت محلی تأمین می‌شوند. بنابراین میزان افت ولتاژ و تلفات نسبت به نتایج مرتبط با اندازه کوچک عناصر مذکور کاهش می‌یابند. اما در مد جزیره‌ای ریزشبه، در اندازه کوچک RESها و ESSها برخی از بارها خاموش می‌شوند، پس تقاضای توان از این منابع پایین است. از این رو تلفات و افت ولتاژ نسبت به نتایج مرتبط با اندازه بزرگ این عناصر کمتر خواهد بود؛ زیرا بر اساس جدول (۳)، در اندازه بزرگ RESها و ESSها هیچ باری خاموش نیست. اما به طور کلی، با افزایش اندازه RESها و ESSها، تلفات انرژی مجموع مدهای عملکردی ریزشبه کاهش خواهند یافت. با توجه به موارد اشاره شده در جدول‌های (۲) و (۳) و شکل‌های (۴) و (۵)، اندازه فتولتائیک، سیستم بادی، و ذخیره‌ساز انرژی بهینه از نظر شاخص‌های بهره‌برداری و هماهنگی حفاظتی به ترتیب برابر ۳، ۴ مگاوات آمپر و ۲۱ مگاوات ساعت هستند.

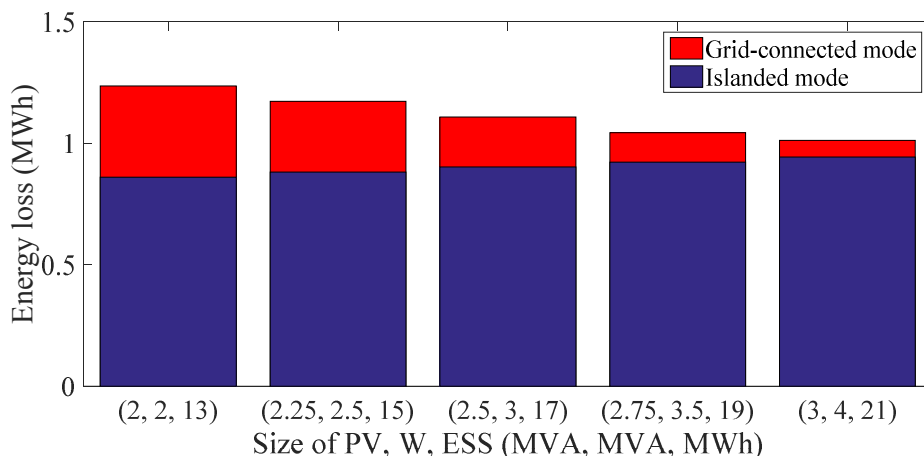
جدول (۲): مقادیر PCI برای RESها و ESSها

| PCI (MVA/s) |     |     | $\Delta CTI$ (s) | اندازه (PV, W, ESS) برحسب MWh و MVA |
|-------------|-----|-----|------------------|-------------------------------------|
| ESS         | W   | PV  |                  |                                     |
| ۲۱۶۷        | ۶۶۷ | ۶۶۷ | ۰/۰۰۶            | (۱۳، ۲، ۲)                          |
| ۱۲۵۰        | ۴۱۷ | ۳۷۵ | ۰/۰۱۲            | (۱۵، ۲، ۲/۲۵)                       |
| ۸۹۵         | ۳۱۶ | ۲۶۳ | ۰/۰۱۹            | (۱۷، ۳، ۲/۵)                        |
| ۷۶۰         | ۲۸۰ | ۲۲۰ | ۰/۰۲۵            | (۱۹، ۳/۵، ۲/۷۵)                     |
| ۶۵۶         | ۲۵۰ | ۱۸۷ | ۰/۰۳۲            | (۲۱، ۴، ۳)                          |

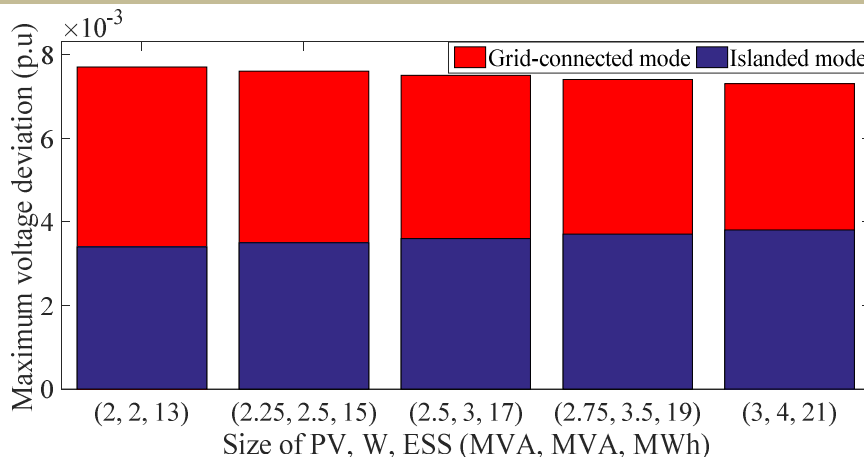
جدول (۳): شاخص‌های اقتصادی بهره‌برداری بهینه ریزشبه

| میانگین هزینه ریزش بار (دلار) | میانگین هزینه بهره‌برداری RESها (دلار) | اندازه (PV, W, ESS) برحسب MWh و MVA |
|-------------------------------|--|-------------------------------------|
| ۵۱۱۷۰                         | ۳۱۲                                    | (۱۳، ۲، ۲)                          |
| ۳۸۶۱۰                         | ۳۶۰                                    | (۱۵، ۲، ۲/۲۵)                       |
| ۲۶۰۶                          | ۴۰۸                                    | (۱۷، ۳، ۲/۵)                        |
| ۱۳۰۵                          | ۴۵۶                                    | (۱۹، ۳/۵، ۲/۷۵)                     |
| ۰                             | ۵۰۴                                    | (۲۱، ۴، ۳)                          |

بر اساس شکل‌های (۴) و (۵) نیز می‌توان بیان کرد که با افزایش اندازه این عناصر، میانگین تلفات انرژی و میانگین مقدار



شکل (۴): میانگین انرژی تلفاتی در مدهای عملکردی مختلف ریزشبه به‌ازای اندازه‌های مختلف RESها و ESSها



شکل (۵): مقدار میانگین برای حداکثر انحراف ولتاژ در مدهای عملکردی مختلف ریزشبه به‌ازای اندازه‌های مختلف RESها و ESSها

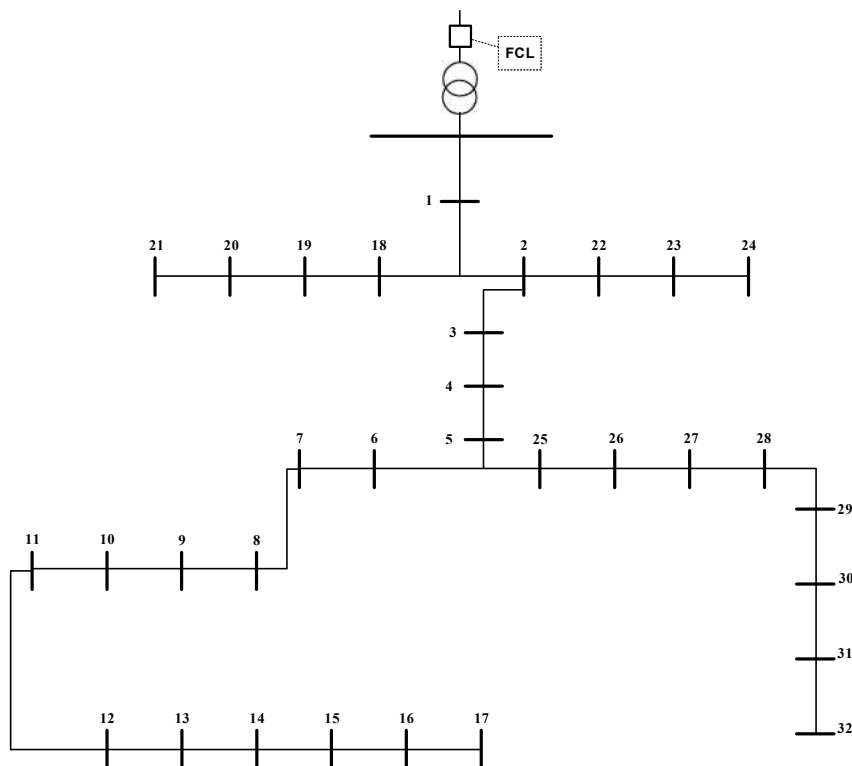
جدول (۴): ارزیابی پایداری سیستم در شرایط خطا برای اندازه بهینه

| CCT (s) | زمان عملکرد رله‌ها در مد حفاظتی اولیه |                             |                |                | موقعیت خطا |
|---------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------|
|         | P <sub>2</sub> زمان (ثانیه)           | P <sub>1</sub> زمان (ثانیه) | R <sub>2</sub> | R <sub>1</sub> |            |
| -       | ۱/۳۰                                  | ۰/۷۴                        | R2             | R1             | ۱۰         |
| -       | ۱/۴۵                                  | ۰/۵۶                        | R4             | R3             | ۱۱         |
| ۱/۸۳    | ۱/۶۱                                  | ۰/۳۷                        | R6             | R5             | ۱۲         |
| ۱/۸۳    | ۱/۷۵                                  | ۰/۱۸                        | R8             | R7             | ۱۳         |
| -       | ۱/۱۵                                  | ۰/۷۴                        | R10            | R9             | ۱۴         |
| -       | ۱/۳۱                                  | ۰/۵۷                        | R12            | R11            | ۱۵         |
| ۱/۸۳    | ۱/۴۸                                  | ۰/۳۸                        | R14            | R13            | ۱۶         |
| ۱/۸۳    | ۱/۶۱                                  | ۰/۱۹                        | R16            | R15            | ۱۷         |

جدول (۵): نتایج طرح SSCOPC در اندازه بهینه RESها و ESSها

| اندازه | پارامتر                      |
|--------|------------------------------|
| ۴۹۸    | مد اتصال به شبکه             |
| ۵۲۵    | مد جزیره‌ای                  |
| ۱۰۲۳   | در نظر گرفتن دو مد           |
| ۰/۵۶۲۱ | میانگین $I^{P-fw}$ (پریونیت) |
| ۰/۵۶۵۴ | میانگین $I^{P-fv}$ (پریونیت) |
| ۰/۱    | میانگین $TDS^{fv}$ (ثانیه)   |
| ۰/۲۹۷۱ | میانگین $TDS^{fv}$ (ثانیه)   |
| ۱/۴۸   | اندازه راکتانس FCL (پریونیت) |

جدول (۴) پایداری ریزشکته ۹ باس را در شرایط خطا به‌ازای اندازه بهینه RESها و ESSها بررسی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان عملکرد رله‌ها در مد حفاظتی اولیه مرتبط به مکان خطا نسبت به CCT مرتبط با آن خطا کمتر است، لذا قید (۸) در مسئله SSCOPC رعایت شده است. بنابراین می‌توان گفت که سیستم مذکور قادر است رله‌ها را به‌گونه‌ای تنظیم کند که سیستم پایداری حاصل شود. در نهایت، نتایج عملکرد رله بر اساس طرح SSCOPC پیشنهادی در جدول (۵) بیان شده است. بر اساس این جدول، طرح پیشنهادی توانسته است میانگین زمانی ۱۰۲۳ ثانیه را برای عملکرد بهینه کل رله‌ها به دست آورد که ۴۹۸ ثانیه برای مد عملکردی اتصال به شبکه برای ریزشکته مذکور است. همچنین ریزشکته در مد جزیره‌ای دارای میانگین زمان ۵۲۵ ثانیه برای عملکرد بهینه کل رله‌هاست. این شرایط با توجه به مقادیر میانگین  $I^{P-fw}$ ،  $I^{P-fv}$ ،  $TDS^{fv}$  و  $TDS^{fv}$  و اندازه بهینه FCL برابر ۱/۴۸ پریونیت محاسبه شده است.



شکل (۶): نمودار تک‌خطی ریزشکته ۳۲ باس

۲.۴. ریزشبکه ۳۲ باس

در این بخش، طرح پیشنهادی بر روی ریزشبکه ۳۲ باس با مقادیر مبنای یک مگاوات آمپری و ۱۲/۶۶ کیلوولتی اجرا می‌شود که نمودار تک‌خطی آن در شکل (۶) رسم شده است [۲۹]. قابل توجه است که اطراف چپ و راست هر باس n دو DSOR وجود دارد که به ترتیب با Rn و Rn' شناخته می‌شوند. همچنین این شبکه دارای سیستم‌های بادی W1 تا W6 است که به ترتیب دارای رله‌های R33, R35, R37, R39, R41 و R43 هستند. علاوه بر این، ESS1 تا ESS6 نیز در شبکه مذکور دارای رله‌های R34, R36, R38, R40, R42 و R44 هستند که این RESها و ESSها به ترتیب در باس‌های ۱۸، ۲۲، ۲۵، ۳۰، ۳ و ۶ قرار دارند. مشخصات دیگر از قبیل منحنی زمانی نرخ توان RESها و ضریب بار، پارامترهای مرتبط با ESSها، FCL و DSOR و موارد دیگر همانند داده‌های ریزشبکه ۹ باس می‌باشند. همچنین فرض شده است که امکان رخداد اتصال کوتاه متقارن در وسط خطوط توزیع وجود دارد. مکان هر خطا در جدول (۶) بیان شده است. این جدول مد حفاظتی رله‌ها را برای موقعیت‌های گوناگون خطا ارائه می‌دهد. در نهایت، نتایج این بخش متناظر با داده‌های ریزشبکه ۳۲ باس در جدول‌های (۷) تا (۹) بیان می‌شود. این جداول به ترتیب بیانگر نتایج بهره‌برداری و هماهنگی حفاظتی مقید به پایداری سیستم برای بررسی قابلیت‌های طرح پیشنهادی هستند.

در جدول (۷) به‌ازای اندازه بهینه RESها و ACTI، برابر ۰/۰۲۰ ثانیه به دست آمده است؛ از این رو می‌توان به‌جای عبارت CTI در معادله (۴) طرح SSCOPC پیشنهادی مقدار ۰/۲۸ جای‌گذاری کرد تا اینکه سرعت عملکرد بالایی برای رله‌های ریزشبکه ۳۲ باس حاصل شود. در این شرایط، شاخص هماهنگی حفاظتی به ترتیب برای سیستم بادی و ذخیره‌ساز برابر ۲۰۷ و ۲۸۰ مگاوات آمپر بر ثانیه خواهد بود. اندازه بهینه RESها و ESSها همانند جدول (۲) و (۳) بر اساس محاسبات سعی و خطا به دست آمده است تا اینکه مقدار بهینه‌ای برای شاخص حفاظتی و بهره‌برداری ریزشبکه حاصل شود. همان‌طور که در این جداول مشاهده می‌شود، نیاز به هزینه بهره‌برداری ۹۱۲ دلار برای حذف خاموشی ریزشبکه در مد جزیره‌ای ریزشبکه و دستیابی به تلفات انرژی پایین و برقراری ولتاژ در محدوده مجاز خود می‌باشد. بر اساس جدول (۸)، با تعیین مقادیر میانگین  $J^{P-fv}$  ۰/۱۰۳۶، ۰/۱۰۴۰، ۰/۱ و ۰/۳۱۷۰ برای پارامترهای تنظیم  $J^{P-fv}$  ۱/۸۲ پرونیست می‌توان کمترین میانگین زمان ممکن ۱۱۸۰ ثانیه را با توجه به عملکرد

بهینه کل رله‌های موجود در ریزشبکه ۳۲ باس به دست آورد. بر اساس جدول (۹) مشاهده می‌شود که زمان عملکرد رله‌ها در مد حفاظتی اولیه مرتبط به یک مکان خطا کمتر از CCT مرتبط با این مکان خطاست؛ بنابراین طرح پیشنهادی SSCOPC توانسته است که با برقراری عملکرد بهینه برای رله‌های مختلف، پایداری سیستم را برقرار کند.

جدول (۶): مدل عملکردی رله‌ها در موقعیت‌های مختلف خطا

| موقعیت خطا | مکان بین باس‌های | مد عملکردی رله، مد اولیه، P، مد پشتیبان، B | مد عملکردی رله، مد اولیه، P <sub>1</sub> | مد عملکردی رله، مد اولیه، P <sub>2</sub> | B             |
|------------|------------------|--|--|--|---------------|
| ۳۳         | ۱ و ۰            | R0'  | R0                                       | R1                                       | R2            |
| ۳۴         | ۲ و ۱            | R1'  | R0'                                      | R2                                       | R3            |
| ۳۵         | ۳ و ۲            | R2'  | R1'                                      | R3                                       | R4            |
| ۳۶         | ۴ و ۳            | R3'  | R2'                                      | R4                                       | R5            |
| ۳۷         | ۵ و ۴            | R4'  | R3,                                      | R5                                       | R6            |
| ۳۸         | ۶ و ۵            | R5'  | R4'                                      | R6                                       | R7, R41, R42  |
| ۳۹         | ۷ و ۶            | R6'  | R5', R41, R42                            | R7                                       | R8            |
| ۴۰         | ۸ و ۷            | R7'  | R6'                                      | R8                                       | R9            |
| ۴۱         | ۹ و ۸            | R8'  | R7'                                      | R9                                       | R10           |
| ۴۲         | ۱۰ و ۹           | R9'  | R8'                                      | R10                                      | R11           |
| ۴۳         | ۱۱ و ۱۰          | R10'                                       | R9'                                      | R11                                      | R12           |
| ۴۴         | ۱۲ و ۱۱          | R11'                                       | R10'                                     | R12                                      | R13           |
| ۴۵         | ۱۳ و ۱۲          | R12'                                       | R11'                                     | R13                                      | R14, R43, R44 |
| ۴۶         | ۱۴ و ۱۳          | R13'                                       | R12', R43, R44                           | R14                                      | R15           |
| ۴۷         | ۱۵ و ۱۴          | R14'                                       | R13'                                     | R15                                      | R16           |
| ۴۸         | ۱۶ و ۱۵          | R15'                                       | R14'                                     | R16                                      | R17           |
| ۴۹         | ۱۷ و ۱۶          | R16'                                       | R15'                                     | R17                                      | R17           |
| ۵۰         | ۱۸ و ۱           | R1'  | R0'                                      | R18                                      | R19, R33, R34 |
| ۵۱         | ۱۹ و ۱۸          | R18'                                       | R1', R33, R34                            | R19                                      | R20           |
| ۵۲         | ۲۰ و ۱۹          | R19'                                       | R18                                      | R20                                      | R21           |
| ۵۳         | ۲۱ و ۲۰          | R20'                                       | R19'                                     | R21                                      | R21           |
| ۵۴         | ۲۲ و ۲           | R2'  | R1'                                      | R22                                      | R23, R35, R36 |
| ۵۵         | ۲۳ و ۲۲          | R22'                                       | R2', R35, R36                            | R23                                      | R24           |
| ۵۶         | ۲۴ و ۲۳          | R23'                                       | R22'                                     | R24                                      | R24           |
| ۵۷         | ۲۵ و ۵           | R5'  | R4'                                      | R25                                      | R26, R37, R38 |
| ۵۸         | ۲۶ و ۲۵          | R25'                                       | R5', R37, R38                            | R26                                      | R27           |
| ۵۹         | ۲۷ و ۲۶          | R26'                                       | R25'                                     | R27                                      | R28           |
| ۶۰         | ۲۸ و ۲۷          | R27'                                       | R26'                                     | R28                                      | R29           |
| ۶۱         | ۲۹ و ۲۸          | R28'                                       | R27'                                     | R29                                      | R30           |
| ۶۲         | ۳۰ و ۲۹          | R29'                                       | R28'                                     | R30                                      | R31, R39, R40 |
| ۶۳         | ۳۱ و ۳۰          | R30'                                       | R29', R39, R40                           | R31                                      | R32           |
| ۶۴         | ۳۲ و ۳۱          | R31'                                       | R30'                                     | R32                                      | R32           |

| جدول (۸): نتایج SSCOPC                        |                         |
|---|-------------------------|
| پارامتر                                       | اندازه                  |
| میانگین زمان عملکرد                           | مد اتصال به شبکه ۵۵۰    |
| کل رله‌ها (ثانیه)                             | مد جزیره‌ای ۶۳۰         |
| میانگین $I_{P-fw}^P$ و $I_{P-fv}^P$ (پریونیت) | در نظر گرفتن دو مد ۱۱۸۰ |
| میانگین $TDS^{fw}$ (ثانیه)                    | ۰/۱                     |
| میانگین $TDS^{fv}$ (ثانیه)                    | ۰/۳۱۷۰                  |
| اندازهٔ راکتانس FCL (پریونیت)                 | ۱/۸۲                    |

| جدول (۹): پایداری سیستم با استفاده از SSCOPC |                                       |                    |              |         |
|--|---------------------------------------|--------------------|--------------|---------|
| موقعیت خطا                                   | زمان عملکرد رله‌ها در مد حفاظتی اولیه |                    |              | CCT (s) |
|  | $P_1$ (زمان ثانیه)                    | $P_2$ (زمان ثانیه) | زمان (ثانیه) |         |
| ۳۳   | R0 <sup>۱</sup>                       | ۰/۷۶               | R1           | ۱/۰۶    |
| ۳۴   | R1 <sup>۲</sup>                       | ۰/۷۳               | R2           | ۱/۱۳    |
| ۳۵   | R2 <sup>۳</sup>                       | ۰/۶۸               | R3           | ۱/۲۱    |
| ۳۶   | R3 <sup>۴</sup>                       | ۰/۶۱               | R4           | ۱/۲۸    |
| ۳۷   | R4 <sup>۵</sup>                       | ۰/۵۶               | R5           | ۱/۳۳    |
| ۳۸   | R5 <sup>۶</sup>                       | ۰/۵۰               | R6           | ۱/۳۹    |
| ۳۹   | R6 <sup>۷</sup>                       | ۰/۴۵               | R7           | ۱/۴۴    |
| ۴۰   | R7 <sup>۸</sup>                       | ۰/۴۱               | R8           | ۱/۵۲    |
| ۴۱   | R8 <sup>۹</sup>                       | ۰/۳۸               | R9           | ۱/۶۱    |
| ۴۲   | R9 <sup>۱۰</sup>                      | ۰/۳۱               | R10          | ۱/۶۸    |
| ۴۳   | R10 <sup>۱۱</sup>                     | ۰/۲۸               | R11          | ۱/۷۲    |
| ۴۴   | R11 <sup>۱۲</sup>                     | ۰/۲۴               | R12          | ۱/۷۵    |
| ۴۵   | R12 <sup>۱۳</sup>                     | ۰/۲۰               | R13          | ۱/۷۹    |
| ۴۶   | R13 <sup>۱۴</sup>                     | ۰/۱۷               | R14          | ۱/۸۲    |
| ۴۷   | R14 <sup>۱۵</sup>                     | ۰/۱۳               | R15          | ۱/۸۶    |
| ۴۸   | R15 <sup>۱۶</sup>                     | ۰/۱۱               | R16          | ۱/۹۰    |
| ۴۹   | R16 <sup>۱۷</sup>                     | ۰/۱۰               | R17          | ۱/۹۲    |
| ۵۰   | R1 <sup>۱۸</sup>                      | ۰/۷۳               | R18          | ۱/۱۵    |
| ۵۱   | R18 <sup>۱۹</sup>                     | ۰/۶۵               | R19          | ۱/۲۳    |
| ۵۲   | R19 <sup>۲۰</sup>                     | ۰/۴۴               | R20          | ۱/۳۱    |
| ۵۳   | R20 <sup>۲۱</sup>                     | ۰/۳۷               | R21          | ۱/۳۸    |
| ۵۴   | R2 <sup>۲۲</sup>                      | ۰/۶۸               | R22          | ۱/۲۱    |
| ۵۵   | R22 <sup>۲۳</sup>                     | ۰/۶۱               | R23          | ۱/۳۲    |
| ۵۶   | R23 <sup>۲۴</sup>                     | ۰/۵۳               | R24          | ۱/۴۱    |
| ۵۷   | R5 <sup>۲۵</sup>                      | ۰/۵۰               | R25          | ۱/۴۷    |
| ۵۸   | R25 <sup>۲۶</sup>                     | ۰/۴۶               | R26          | ۱/۵۰    |
| ۵۹   | R26 <sup>۲۷</sup>                     | ۰/۴۰               | R27          | ۱/۵۵    |
| ۶۰   | R27 <sup>۲۸</sup>                     | ۰/۳۵               | R28          | ۱/۶۱    |
| ۶۱   | R28 <sup>۲۹</sup>                     | ۰/۳۱               | R29          | ۱/۶۶    |
| ۶۲   | R29 <sup>۳۰</sup>                     | ۰/۲۵               | R30          | ۱/۶۹    |
| ۶۳   | R30 <sup>۳۱</sup>                     | ۰/۱۹               | R31          | ۱/۷۲    |
| ۶۴   | R31 <sup>۳۲</sup>                     | ۰/۱۴               | R32          | ۱/۷۵    |

در نهایت، قابلیت الگوریتم حل پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های تکاملی مرسوم مانند الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در جدول (۱۰) بررسی شده است. قابل توجه است که جدول (۱۰) نتایج محاسبات آماری برای ۱۰ بار تکرار حل مسئله را ارائه می‌دهد. لذا می‌توان گفت که الگوریتم CSA توانسته است که بهینه‌ترین نقطه را در مسئله‌های SSCOPC و بهره‌برداری ریزشکبه در کمترین زمان ممکن نسبت به الگوریتم‌های دیگر به دست آورد. همچنین این الگوریتم دارای انحراف معیار پایین‌تری نسبت به دو الگوریتم حل دیگر برای مسائل مختلف است، لذا بر این اساس می‌توان بیان کرد که الگوریتم پیشنهادی دارای پاسخی مطمئن‌تر نسبت به دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌باشد. علاوه بر این، در جدول (۱۱) نتایج SSCOPC حاصل از دو نرم‌افزار متفاوت سیستم قدرت بیان شده است که عبارت‌اند از:

- مورد اول: تمام مراحل روندنمای شکل (۱) در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده است.
- مورد دوم: در این مورد از لینک دو نرم‌افزار MATLAB و DIGSILENT استفاده شده است، به طوری که در طرح SSCOPC پیشنهادی، محاسبات پخش بار و اتصال کوتاه توسط نرم‌افزار DIGSILENT انجام شده است و الگوریتم CSA نیز در MATLAB کدنویسی شده است. شایان ذکر است که با توجه به نتایج جدول (۱۱) مشاهده می‌شود که خطای مابین دو مورد اول و دوم صفر است، بنابراین روند حل پیشنهادی برای طرح مذکور قابل اطمینان می‌باشد.

| جدول (۷): ارزیابی شاخص‌های حفاظتی و بهره‌برداری در اندازه بهینه RESها و ESSها |                        |
|---|------------------------|
| پارامتر   | اندازه                 |
| باس ۱۸  | ۰/۴۵ و ۱/۸۰            |
| باس ۲۲  | ۱/۱۰ و ۴/۸۰            |
| باس ۲۵  | ۰/۶۰ و ۲/۵۰            |
| باس ۳۰  | ۰/۶۰ و ۲/۵۰            |
| باس ۶   | ۰/۷۰ و ۲/۸۰            |
| باس ۱۳  | ۰/۷۰ و ۲/۸۰            |
| $\Delta CTI$ (s)  | ۰/۰۲۰                  |
| W   | ۲۰۷                    |
| PCI (MVA/s)   | ۲۸۰                    |
| ESS   | ۹۱۲                    |
| میانگین هزینه بهره‌برداری ESSها (دلار)  | ۰                      |
| میانگین هزینه ریزش بار (دلار)   | ۰                      |
| میانگین تلفات انرژی (مگاوات ساعت)   | مد اتصال به شبکه ۱/۸۷۷ |
| میانگین برای حداکثر انحراف ولتاژ (پریونیت)                                    | مد جزیره‌ای ۱/۵۲۶      |
|   | مد اتصال به شبکه ۰/۰۴۵ |
|   | مد جزیره‌ای ۰/۰۱۱      |

جدول (۱۰): قابلیت الگوریتم حل

| میزان |      |      | پارامتر                         |
|-------|------|------|---------------------------------|
| CSA   | PSO  | GA   |                                 |
| ۴۰    | ۳۰   | ۴۰   | جمعیت                           |
| ۱۰۰۰  | ۱۰۰۰ | ۱۰۰۰ | حداکثر تکرار                    |
| ۴۳۸   | ۵۲۷  | ۶۹۸  | زمان محاسباتی در SSCOPC (ثانیه) |
| ۶۹۵   | ۷۸۰  | ۹۵۷  | زمان محاسباتی در OPF (ثانیه)    |
| ۱۱۸۰  | ۱۲۱۱ | ۱۳۶۲ | میانگین T (ثانیه)               |
| ۹۱۲   | ۹۲۳  | ۹۴۸  | میانگین Cost (دلار)             |
| ۱/۱۹  | ۱/۹۶ | ۲/۷۱ | انحراف معیار T (%)              |
| ۱/۱۱  | ۱/۹۱ | ۲/۲۶ | انحراف معیار Cost (%)           |

جدول (۱۱): مقایسه نتایج حاصل از نرم افزارهای مختلف سیستم قدرت

| اندازه RES و ESS                      |          | همانند جدول (۷) |
|---------------------------------------|----------|-----------------|
| پارامتر                               | مورد اول | مورد دوم        |
| PCI (MVA/s)                           | ۲۰۷      | ۲۰۷             |
| RES                                   | ۲۸۰      | ۲۸۰             |
| ESS                                   | ۲۸۰      | ۲۸۰             |
| میانگین هزینه بهره برداری (دلار)      | ۹۱۲      | ۹۱۲             |
| میانگین هزینه ریزش بار (دلار)         | ۰        | ۰               |
| میانگین زمان عملکرد کل رله ها (ثانیه) | ۱۱۸۰     | ۱۱۸۰            |
| میانگین $I^{P-fw}$ (پریونیت)          | ۰/۱۰۳۶   | ۰/۱۰۳۶          |
| میانگین $I^{P-LV}$ (پریونیت)          | ۱/۱۰۴۰   | ۱/۱۰۴۰          |
| میانگین $TDS^{fw}$ (ثانیه)            | ۰/۱      | ۰/۱             |
| میانگین $TDS^{LV}$ (ثانیه)            | ۱/۳۱۷۰   | ۱/۳۱۷۰          |
| اندازه راکتانس FCL (پریونیت)          | ۱/۸۲     | ۱/۸۲            |

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله، طرح هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری به صورت یک مسئله تصادفی در یک ریزش شبکه با دو مد عملکردی اتصال به شبکه و جزیره ای برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیم DSORها و اندازه راکتانس FCL با توجه به استخراج راه حل حفاظتی سریع بیان شد. از این رو طرح پیشنهادی دارای یک چهارچوب بهینه سازی است که تابع هدف در آن، برابر کمینه سازی زمان عملکرد کل رله ها در دو مد حفاظتی اولیه و پشتیبان می باشد. همچنین این مسئله مقید به محدودیت های فاصله زمانی هماهنگی (CTI)، پارامترهای تنظیم رله ها، اندازه راکتانس FCL و پایداری تولیدات پراکنده و یا شبکه است. قابل توجه است که ریزش شبکه دارای منابع انرژی تجدید پذیر و ذخیره سازهای انرژی بودند؛ از این رو طرح هماهنگی حفاظتی پیشنهادی به نتایج خروجی مسئله بهره برداری بهینه ریزش شبکه به منظور تعیین میزان پارامترها و متغیرهای شبکه قبل از رخداد خطا نیاز دارد. پس در ادامه، یک مسئله بهره برداری بهینه تصادفی برای کمینه سازی مجموع هزینه های بهره برداری ریزش شبکه و ریزش بار در مد جزیره ای ریزش شبکه مقید به

معادلات پخش توان بهینه ریزش شبکه در حضور RESها و ESSها ذکر شد. در این طرح پیشنهادی، روش شبیه سازی مونت کارلو برای تولید سناریو متناظر با عدم قطعیت های بار مصرفی و توان خروجی RESها استفاده شد و سپس روش کانترویج تعداد پایینی از سناریوهای تولید شده که احتمال رخداد بالایی دارند، انتخاب می کند. در نهایت با حل مسئله مذکور توسط حل کننده مطمئن و با انحراف معیار پایین در پاسخ مانند الگوریتم جست و جوی کلاغ مشاهده شد که اندازه بزرگ RESها و ESSها قادر است که شاخص های بهینه ای برای بهره برداری و هماهنگی حفاظتی (PCI) به دست آورد. همچنین پیرو آن با تنظیم مناسب رله ها و تعیین اندازه بهینه برای FCL با استفاده از طرح حفاظتی پیشنهادی، یک راه حل حفاظتی سریع که پایداری سیستم را نیز در نظر می گیرد، حاصل شود.

قابل توجه است که بارها در این مقاله به صورت استاتیکی مدل سازی شدند، ولی می توان برای دستیابی به نتایج مطلوب تر، مدل سازی دینامیکی برای بارها در نظر گرفت که این مورد در کارهای آینده مرتبط با این مقاله انجام خواهد شد. همچنین پیش بینی می شود که در آینده، ریزش شبکه های متشکل از خودروهای الکتریکی باشند. لذا در نظر گرفتن مکان یابی ایستگاه های شارژ این خودروها و همچنین مکان یابی منابع و ذخیره سازهای مختلف در طرح SSCOPC پیشنهادی می توان موجب ارتقای تحقیق پیشنهادی شود که آن نیز در کارهای آینده مرتبط با این مقاله انجام خواهد شد.

## علائم

متغیرها: تمامی متغیرها برحسب پریونیت (p.u) هستند.

|  |                      |
|--|----------------------|
| مجموع هزینه های بهره برداری ریزش شبکه و ریزش بار | $Cost$               |
| آن در مد جزیره ای برحسب دلار                     | $E$                  |
| انرژی ذخیره شده در ESS                           | $I^{P-fw}, I^{P-LV}$ |
| جریان پیکاپ DSOR در جهت جلورونده و معکوس         | $F^c$                |
| جریان اتصال کوتاه                                | $L^D$                |
| بار تغذیه نشده                                   | $P^{RES}, Q^{RES}$   |
| توان اکتیو و راکتیو RES                          | $P^{ESch}, Q^{ES}$   |
| توان اکتیو شارژی/دشارژی و راکتیو ESS             | $P^L, Q^L$           |
| توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط توزیع            | $P^S, Q^S$           |
| توان اکتیو و راکتیو پست توزیع                    | $V, \theta$          |
| دامنه و زاویه (برحسب رادیان) ولتاژ               | $T$                  |
| میانگین زمان عملکرد کل DSORها در مدهای           | $TDS^{fw}$           |
| حفاظتی اولیه و پشتیبان برحسب ثانیه               |                      |
| تنظیم شاخص زمانی DSOR در جهت جلورونده و          |                      |

|   |                                   |  |                              |
|---|-----------------------------------|--|------------------------------|
| حداکثر ظرفیت RES برحسب p.u                      | $S^{RESmax}$                      | معکوس برحسب ثانیه  | $TDS^{rv}$                   |
| حداکثر ظرفیت پست توزیع برحسب p.u                | $S^{Smax}$                        | زمان عملکرد DSOR در مد حفاظتی پشتیبان در   | $t_{B-re}^P$                 |
| حداقل و حداکثر مقدار TDS برحسب ثانیه            | $\overline{TDS}, \underline{TDS}$ | جهت معکوس برحسب ثانیه  | $t_{P-fw}^P$                 |
| حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ برحسب p.u            | $V^{min}, V^{max}$                | زمان عملکرد DSOR در مد حفاظتی اولیه در جهت   |                              |
| ارزش بار ازدست‌رفته برحسب دلار بر مگاوات ساعت   | $VOLL$                            | جلورونده برحسب ثانیه   |                              |
| حداکثر اندازه راکتانس FCL برحسب p.u             | $\overline{X}^{FCL}$              | اندازه راکتانس FCL   | $X^{FCL}$                    |
| نرخ مجاز اضافه‌باری                             | $\varepsilon$                     |  | <b>پارامترها</b>             |
| راندمان شارژ و دشارژ ESS                        | $\eta^{ch}, \eta^{dch}$           | ماتریس اتصال باس (خطی مابین باس $b, j$ وجود دارد، $A_{bj}$ برابر ۱ است، در غیر این صورت صفر است) بدون واحد | $A^L$                        |
| قیمت شارژ و دشارژ ESS برحسب دلار بر مگاوات ساعت | $\rho^{ch}, \rho^{dch}$           |  |                              |
| <b>مجموعه‌ها و اندیس‌ها</b>                     |                                   | فاصله زمانی هماهنگی برحسب ثانیه  | $CTI$                        |
| شمارنده و مجموعه مدهای عملکرد ریزشبکه           | $c, C$                            | نرخ شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز انرژی برحسب p.u   | $CR, DR$                     |
| شمارنده و مجموعه DSOR                           | $i, I$                            | انرژی اولیه ذخیره‌ساز انرژی برحسب p.u  | $E^{ini}$                    |
| شمارنده و مجموعه مکان خطا                       | $j, J$                            | حداقل و حداکثر انرژی ESS برحسب p.u   | $E^{min}, E^{max}$           |
| شمارنده و مجموعه مدهای حفاظتی DSOR              | $k, K$                            | رسانایی و سوسپتانس خط توزیع برحسب p.u  | $g, b$                       |
| شمارنده و مجموعه باس                            | $n, l, N$                         | حداکثر و حداقل مقدار جریان پیکاپ برحسب p.u   | $\bar{I}^P, \underline{I}^P$ |
| شمارنده و مجموعه گام زمانی                      | $t, ST$                           | بار اکتیو و راکتیو برحسب p.u   | $P^D, Q^D$                   |
| شمارنده و مجموعه سناریو                         | $w, S$                            | حداکثر توان اکتیو RES برحسب p.u  | $\bar{P}^{RES}$              |
|   |                                   | حداکثر ظرفیت شارژ ESS برحسب p.u  | $S^{ESmax}$                  |
|   |                                   | حداکثر ظرفیت خط توزیع برحسب p.u  | $S^{Lmax}$                   |

## مراجع

- [۱] جعفری، مسعود، منصف، حسن، «جایابی و ظرفیت‌یابی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و ادوات حفاظتی با استفاده از ترکیب الگوریتم کلسونی مورچگان و تحلیل سلسله‌مراتبی»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال اول، شماره ۱، صفحه ۲۸-۳۷، ۱۳۹۰.
- [2] Abel-Hafez, A., Omran, W.A. and Hegazy, Y.G., "A Decentralized Technique for Autonomous Service Restoration in Active Radial Distribution Networks", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 1911-1919, 2018.
- [3] Zeineldin, H.H., Sharaf, H.M., Ibrahim, D.K. and El-Zahab, E.E.A., "Optimal Protection Coordination for Meshed Distribution Systems with DG Using Dual Setting Directional Over-Current Relays", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 1, pp. 115-123, 2015.
- [4] Tejeswini, M.V., Jacob-Raglend, I., Yuvaraja, T. and Radha, B.N., "An advanced protection coordination technique for solar in-feed distribution systems", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 379-388, 2019.
- [5] Mohammadi-Chabanloo, R., Ghotbi-Maleki, M., Mousavi-Agah, S.M. and Mokhtarpour-Habashi, E., "Comprehensive coordination of radial distribution network protection in the presence of synchronous distributed generation using fault current limiter", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 99, pp.214-224, 2018.
- [6] Bedekar, P., Bhide, S. and Kale, V., "Optimum coordination of overcurrent relays in distribution system using dual simplex method", 2009 International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), pp. 555-559, 2009.
- [7] Sharaf, H.M., Zeineldin, H.H., and El-Saadany, E., "Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 1, pp. 143-151, 2018.
- [8] Dehghanpour, E., Kazemi-Karegar, H., Kheirollahi, R. and Soleymani, T., "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Microgrids by Using Cuckoo-Linear Optimization Algorithm and Fault Current Limiter", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, pp. 1365-1375, 2018.
- [9] Soleymani-Aghdam, T., Kazemi-Karegar, H. and Zeineldin, H.H., "Optimal Coordination of Double-



- Inverse Overcurrent Relays for Stable Operation of DGs*", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 1, pp. 183-192, 2019.
- [10] Aghdam, T.S., Kazemi-Karegar, H. and Zeineldin, H.H., "Transient Stability Constrained Protection Coordination for Distribution Systems With DG", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 6, pp. 5733-5741, 2018.
- [11] Saleh, K.A., Zeineldin, H.H. and El-Saadany, E.F., "Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N-1 Contingency", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 13, No. 5, pp. 2270-2278, 2017.
- [12] Najy, W.K.A., Zeineldin, H.H. and Woon, W.L., "Optimal Protection Coordination for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capability", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 4, pp. 1668-1677, 2013.
- [13] Solati-Alkaran, D., Vatani, M.R., Sanjari, M.J., Gharehpetian, G.B. and Naderi, M.S., "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Networks by Using Fuzzy-Based GA Method", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3091-3101, 2018.
- [14] Baghaee, H.R., Mirsalim, M., Gharehpetian, G.B. and Talebi, H.A., "MOPSO/FDMT-based Pareto-optimal solution for coordination of overcurrent relays in interconnected networks and multi-DER microgrids", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 12, pp. 2871-2886, 2018.
- [15] Tjahjono, A. and et al., "Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 10, pp. 2575-2585, 2017.
- [16] Korde, P.N. and Bedekar, P.P., "Optimal overcurrent relay coordination in distribution system using nonlinear programming method", 2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), pp. 372-376, 2016.
- [17] Xu, K., and Liao, Y., "Intelligent Method for Online Adaptive Optimum Coordination of Overcurrent Relays", 2018 Clemson University Power Systems Conference (PSC), pp. 1-5, 2018.
- [18] Chakor, S.V. and Date, T.N., "Optimum coordination of directional overcurrent relay in presence of distributed generation using genetic algorithm", 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), pp. 1-5, 2016.
- [19] Aghaei, J., Amjady, N., Baharvandi, A. and Akbari, M.A., "Generation and transmission expansion planning: MILP-based probabilistic model", IEEE Trans. Power Syst, Vol. 29, No. 4, pp. 1592-1601, 2014.
- [20] Pirouzi, S., Aghaei, J., Vahidinasab, V., Niknam, T. and Khodaei, A., "Robust linear architecture for active/reactive power scheduling of EV integrated smart distribution networks", Electric Power System Research, Vol. 155, pp. 8-20, 2018.
- [21] Aghaei, J., Bozorgavari, S.A., Pirouzi, S., Farahmand, H. and Korpås, M., "Flexibility Planning of Distributed Battery Energy Storage Systems in Smart Distribution Networks", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, Vol. PP, pp. 1-17, 2019.
- [22] Aghaei, J., Barani, M., Shafie-khah, M., Nieta, A.A.S.d.l., and Catalão, J.P.S., "Risk-constrained offering strategy for aggregated hybrid power plant including wind power producer and demand response provider", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 7, No. 2, pp. 513-525, 2016.
- [23] Zeineldin, H.H., Mohamed, Y.A.I., Khadkikar, V. and Pandi, V.R., "A Protection Coordination Index for Evaluating Distributed Generation Impacts on Protection for Meshed Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 3, pp. 1523-1532, 2013.
- [24] Askarzadeh, A., "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm", Computers and Structures, Vol. 169, pp. 1-12, 2016.
- [25] Babu, P.R., Rakesh, C.P., Srikanth, G., Kumar, M.N. and Reddy, D.P., "A novel approach for solving distribution networks", 2009 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1-5, 2009.
- [26] Cai, Z. and Wang, Y., "A multiobjective optimization-based evolutionary algorithm for constrained optimization", Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, Vol. 10, No. 6, pp. 658-675, 2006.
- [27] Maleki, A. and Askarzadeh, A., "Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 7, pp. 147-153, 2014.
- [28] Hamidpour, H., Aghaei, J., Pirouzi, S., Dehghan, S. and Niknam, T., "Flexible, Reliable and Renewable Power

*System Resource Expansion Planning considering Energy Storage Systems and Demand Response Programs*", IET Renewable Power Generation, No. 11, pp.1-12, 2019.

[29] Kavousi-Fard, A. and Khodaei, A., "*Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids*", Energy, Vol. 111, pp. 653-663, 2016.