

تخصیص بهینه نیروی انسانی و منابع سیار انرژی در مدیریت خطای سیستم‌های توزیع نیروی برق

علی جلیلیان^۱ بابک طاهری^۲ امیر صفدریان^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران
ali.jalilian@ee.sharif.edu

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران
taheri@alum.sharif.edu

۳- دانشیار - دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران
safdarian@sharif.edu

چکیده: بهینه‌سازی مدیریت خطا در شبکه‌های توزیع نیروی برق بالاخص در شرایط بحرانی خطاهای چندگانه در اثر شرایط نامساعد آب و هوایی به عنوان تلاشی در جهت کاهش پیامدهای مخرب اجتماعی و اقتصادی خاموشی‌های گسترده و طولانی مدت در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین این حوزه قرار گرفته است. در این مقاله، یک طرح بازیابی بار بهینه با تمرکز بر روی برنامه‌ریزی اعزام تیم‌های تعمیر و عملیات و هماهنگی سیستم اتوماسیون و اعزام منابع تولید توان سیار با عملیات این تیم‌ها ارائه شده است. مدل ارائه شده اقدامات اصلاحی را در جهت کاهش خاموشی مشترکین در ضمن حفظ قیود بهره‌برداری شبکه شامل حفظ ساختار شعاعی، رعایت محدوده مجاز ولتاژ و حدود حرارتی هادی‌های شبکه طرح‌ریزی می‌کند. روابط ریاضی این مدل در چهارچوب مسأله خطی-عدد صحیح (MILP) ارائه شده است. در نتایج عددی این مقاله، به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، شبکه ۶۹ باسه IEEE در نظر گرفته شده است. نتایج عددی به دست آمده کارآیی مدل را در تصمیم‌گیری بهینه در شرایط خطا تصدیق می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت خطا، تیم‌های تعمیرات، کلید دستی، کلید قابل کنترل از راه دور، منبع تولید توان سیار

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.43

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر صفدریان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

تداوم تأمین انرژی و حفظ قابلیت اطمینان همواره یکی از مهمترین مسائل سیستم‌های توزیع نیروی برق بوده است. بازیابی بار به عنوان مجموعه اقدامات اصلاحی پس از رخداد خطا که در جهت کاهش خسارت مشترکین است، فرایند به کارگیری مناسب تجهیزات شبکه مانند کلیدهای جداکننده و منابع تولید توان و همچنین زمانبندی عملیات و مسیریابی تیم‌های تعمیرات را شامل می‌شود. تاکنون، توصیفات از نحوه انجام بازیابی بار توسط محققین این زمینه صورت گرفته است. فرایند بازیابی بار توصیف شده در [۱] در دو مرحله با استفاده از کلیدهای قابل کنترل از راه دور و کلیدهای دستی ناحیه خطا را محدود می‌کند. در این روش، سپس، امان دارای خطا را تعمیر کرده و همه‌ی بارها برقرار می‌شوند. بازیابی بار با استفاده از کلیدزنی - های دستی و قابل کنترل از راه دور با زمان‌های متفاوت برای کلیدها در یک توالی حاصل از شش قانون کلی در [۲] معرفی شده است. در [۳]، با به کارگیری ضرایبی در تابع هدف سعی شده تا کلیدزنی از راه دور نسبت به کلیدزنی دستی در اولویت قرار گیرد. در [۴]، یک فرایند بازیابی بار چند مرحله‌ای با فواصل زمانی ثابت معرفی شده که در آن تأکید بر استفاده بهینه از کلیدهای قابل کنترل از راه دور، منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی است. در [۵]، با هدف بازیابی سریع‌تر، کمینه کردن تعداد کلیدزنی‌ها و ترجیح کلیدزنی از راه دور به کلیدزنی دستی پیشنهاد شده است. مشابه [۵]، در برخی مراجع دیگر [۶]-[۹] نیز تعداد عملیات کلیدزنی با هدف تسریع بازیابی بار کمینه شده است. اما، همواره تعداد کلیدزنی کمتر به معنی بازیابی بار سریع‌تر نیست. با این حال کاهش تعداد کلیدزنی‌ها به دلیل کاهش هزینه تعمیر و نگهداری آنها و توجه به طول عمر کلیدها قابل توجیه است [۱۰].

با توجه به نیاز به عملیات دستی چه به صورت کلیدزنی و چه به صورت تعمیر خطا، محدودیت نیروی انسانی در فرایند بازیابی بار خصوصاً در شرایط خطاهای چندگانه حاصل از بلاهای طبیعی، یکی از چالش‌های پیش رو خواهد بود. این پیشامدها که به صورت حوادث با احتمال کم اما تأثیر زیاد شناخته می‌شوند [۱۱] مبنای ارائه طرح‌هایی جهت حفظ تاب‌آوری سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی شده‌اند [۱۲]. بنابراین، در برخی مراجع، با توجه ویژه به این مسأله به برنامه‌ریزی بهینه عملیات تیم‌ها پرداخته شده است. مرجع [۱۳] به منظور لحاظ محدودیت تعداد تیم‌ها، تعداد عملیات دستی همزمان را محدود می‌کند. در [۱۴]، با استفاده از قوانین فازی ترتیب تعمیر تجهیزات آسیب‌دیده و همچنین ترتیب اعزام تیم‌ها پیشنهاد می‌شود. در [۱۵] و [۱۶]، یک مدل دو مرحله‌ای که در آن، در مرحله اول، مسیریابی تیم‌ها و در مرحله دوم بازیابی بار انجام می‌شود، ارائه شده است. مراجع [۱۷]، [۱۸] برای کاهش پیچیدگی محاسباتی مسأله مسیریابی، ابتدا

خطاها را به چند دسته گروه‌بندی کرده سپس هر دسته خطا را توسط تیم‌های تخصیص یافته به آن تعمیر می‌کند.

در بسیاری از مراجع، مسیریابی تیم‌های عملیات تنها به جهت تعمیر تجهیزات آسیب‌دیده و نه کلیدزنی دستی انجام شده است [۱۵]-[۲۰]. همچنین، در برخی مراجع مانند [۲۱]، [۲۲] مدل بازیابی بار به وسیله کلیدهای دستی و قابل کنترل از راه دور پیش از آغاز فرایند تعمیر خطا پیشنهاد شده است. این در حالی است که با وجود این مدل‌ها اعزام تیم‌ها با لحاظ عملیات دستی کلیدزنی و تعمیر به صورت همزمان هنوز به صورت یک چالش در بازیابی سیستم‌های توزیع نیروی برق باقی است.

در شرایط خطا در سیستم‌های توزیع معمولاً دسترسی نقاط بار به شبکه بالادست و منابع تولید پراکنده امکان‌پذیر نیست. از این رو، از منابع سیار برای بازیابی سریع‌تر برخی نواحی نظیر نقاط بار حساس می‌توان بهره برد. مرجع [۲۳] منابع سیار تولید توان را به منظور بازیابی بارهای حساس در شرایط خطا به کار می‌گیرد. در [۲۴]، یک مدل دو مرحله‌ای برای اعزام منابع سیار تولید توان در شرایط پیش و پس از رخداد خطا ارائه شده است. در این مراجع، با فرض وجود برنامه تعمیر، از قیود مربوط به تیم‌ها چشم‌پوشی شده است.

در این مقاله، یک راهبرد بهینه مدیریت خطای شبکه‌های توزیع نیروی برق ارائه شده که در آن مسیریابی و زمان‌بندی عملکرد کلیدزنی دستی و تعمیر خطا توسط تیم‌ها و همچنین هماهنگی کلیدهای قابل کنترل از راه دور با این عملیات انجام می‌شود. علاوه بر آن، این مقاله بر بهره‌برداری از منابع سیار انرژی به عنوان راه‌کاری جهت کاهش زمان‌های خاموشی تأکید دارد. بنابراین، این مقاله با ارائه مدلی که بسیاری از مسائل بازیابی بار را به صورت همزمان در نظر می‌گیرد، بر چالش‌هایی که در اثر بررسی جداگانه هر یک ایجاد می‌شود فایده‌آمده است. بنابراین، ویژگی‌های مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- با توجه به فراهم شدن اطلاعات گسترده از سطح شبکه در بستر شبکه‌های هوشمند در آینده نزدیک، در نظرگیری محدودیت‌های تیم‌های عملیات در فرایندهای بازیابی بار به صورت یک ضرورت عملی می‌نماید. بنابراین، مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله محدودیت‌های حمل و نقل تیم‌های عملیات را برای انجام وظایف تعمیر و کلیدزنی دستی به صورت همزمان در نظر می‌گیرد.
- استفاده از منابع سیار تولید در شرایط خطا و هماهنگی آن در عملیات تیم‌ها و سیستم اتوماسیون، می‌تواند نقش برجسته‌ای در کاهش خسارات ناشی از خاموشی مشترکین داشته باشد. استفاده از این منابع و هماهنگی آن‌ها با سایر عوامل فرایند بازیابی، در مدل ارائه شده در این مقاله در نظر گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی مسأله مدیریت خطا

پس از رخداد خطا در سیستم توزیع نیروی برق و بروز خاموشی در شبکه، بهره‌بردار سیستم تیم‌هایی را جهت ارزیابی خسارات وارده، جایابی خطاها و بازکردن کلیدهای جداکننده جهت جداسازی نواحی خطا اعزام می‌کند [۲۵]. این مقاله کلیه فعالیت‌های پس از مرحله اولیه، شامل اعزام تیم‌های عملیات جهت تعمیر المان دارای خطا، کلیدزنی و برنامه‌ریزی منابع شبکه را بهینه می‌کند. در این قسمت، مدل‌سازی مسأله بهینه‌سازی مدیریت خطا در سیستم‌های توزیع نیروی برق آورده شده است. از آنجا که عمده مشکل در هنگام بروز خطا در شبکه قدرت خسارات ناشی از خاموشی شبکه است، در برنامه پیشنهادی به منظور ارزیابی کیفیت مدیریت خطا، شاخص انرژی تأمین نشده مشترکین به عنوان هدف کمینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تابع هدف به شکل (۱) در این مقاله در نظر گرفته شده است. در این رابطه، انرژی تأمین نشده از طریق حاصل‌ضرب توان مصرفی هر ناحیه در زمان خاموشی آن محاسبه می‌شود. در این مقاله، هر ناحیه مجموعه‌ای از خطوط، باس‌ها و تجهیزات شبکه است که توسط کلیدهای جداکننده قابل جداسازی از هم نباشند. از این رو، برقرار شدن آن‌ها به صورت همزمان صورت می‌گیرد.

$$\text{Min} : \sum_{z \in Z} T_z^{\text{zone}} \times P_z^{\text{zone}} \quad (1)$$

که در آن، Z و z اندیس و مجموعه نشان دهنده نواحی مختلف در شبکه توزیع است. T_z^{zone} متغیر مربوط به مدت زمان خاموشی ناحیه و P_z^{zone} مقدار بار مصرفی ناحیه مربوطه است.

تخصیص بهینه تیم‌های عملیات به منظور کلیدزنی کلیدهای دستی و تعمیر المان‌های دارای خطا در قالب فرمول‌بندی مسأله مسیریابی توصیف شده است. با توجه به اینکه هر تیم می‌تواند وظیفه تعمیر یا کلیدزنی دستی را به عنوان اولین عمل اصلاحی خود بر عهده گیرد و یا این عمل اصلاحی را پس از تعمیر یا کلیدزنی دیگری انجام دهد، اعزام هر یک از تیم‌های عملیات می‌تواند در شش حالت ممکن صورت گیرد. روابط مربوط به مسیریابی تیم‌ها در این شش حالت به صورت (۲)-(۶) آورده شده است.

$$\sum_{m \in M} \beta_{c,m}^{cm} + \sum_{f \in F} \beta_{c,f}^{cf} \leq 1; \forall c \in C \quad (2)$$

$$\sum_{c \in C} \beta_{c,m}^{cm} + \sum_{m' \in M} \beta_{m',m}^{mm} + \sum_{f \in F} \beta_{f,m}^{fm} = \beta_m^{MS}; \forall m \in M \quad (3)$$

$$\sum_{m' \in M} \beta_{m,m'}^{mm} + \sum_{f \in F} \beta_{m,f}^{mf} \leq \sum_{c \in C} \beta_{c,m}^{cm} + \sum_{m' \in M} \beta_{m',m}^{mm} + \sum_{f \in F} \beta_{f,m}^{fm}; \forall m \in M \quad (4)$$

$$\sum_{c \in C} \beta_{c,f}^{cf} + \sum_{f' \in F} \beta_{f',f}^{ff} + \sum_{m \in M} \beta_{m,f}^{mf} = 1; \forall f \in F \quad (5)$$

$$\sum_{f' \in F} \beta_{f',f}^{ff} + \sum_{m \in M} \beta_{m,f}^{mf} \leq 1; \forall f \in F \quad (6)$$

$$\beta_{m,m}^{mm} = 0; \forall m \in M \quad (7)$$

$$\beta_{f,f}^{ff} = 0; \forall f \in F \quad (8)$$

که در آن، C ، M و F به ترتیب مجموعه تیم‌ها، کلیدهای دستی و خطاها را نشان می‌دهند. β^{cm} ، β^{mm} و β^{fm} متغیرهای دودویی هستند که اعزام تیم برای عملیات کلیدزنی از محل اولیه، محل کلید دستی دیگر و یا محل یک خطا را به ترتیب نشان می‌دهند. به طور مشابه، متغیرهای β^{cf} ، β^{mf} و β^{ff} اعزام یک تیم به منظور تعمیر خطا را نشان می‌دهند. β_m^{MS} متغیر دودویی نشان‌دهنده وضعیت وصل در کلید دستی است. به این ترتیب، مطابق رابطه (۲)، هر تیم از محل اولیه خود حداکثر یک بار اعزام می‌شود. رابطه (۳) در صورت بسته شدن هر کلید دستی، از اعزام یک و فقط یک تیم به محل آن کلید اطمینان حاصل می‌کند. در رابطه (۴)، تعداد تیم‌های اعزامی از هر کلید دستی به تعداد تیم‌های اعزامی به آن کلید محدود می‌شود. رابطه (۵) از اعزام یک تیم به منظور تعمیر هر خطا اطمینان حاصل می‌کند. سپس، در رابطه (۶)، تیم اعزام شده برای تعمیر خطا در عمل اصلاحی بعدی خود حداکثر یک عمل کلیدزنی یا تعمیر را انجام می‌دهد. در روابط (۷) و (۸) از اعزام دوباره یک تیم در محل یک کلید دستی یا خطا به همان محل جلوگیری شده است.

در کنار مسیریابی تیم‌های عملیات، در این مقاله به اعزام منابع تولید سیار نیز پرداخته شده است. منابع تولید سیار در شرایط بحرانی خطا که دسترسی به شبکه بالادست و منابع تولید پراکنده محدود شده یا امکان‌پذیر نیست، می‌تواند موجب تسریع بازیابی و کاهش خسارت مشترکین شود. در ادامه به مدل‌سازی این منابع پرداخته شده است.

$$\sum_{b \in B} \beta_{s,b}^{MDG} \leq 1; s \in S^{MDG} \quad (9)$$

که در آن، B و S^{MDG} به ترتیب مجموعه باس‌های شبکه و منابع تولید توان سیار و متغیر دودویی β^{MDG} اعزام یک منبع تولید سیار به یک باس شبکه را نشان می‌دهند. به این ترتیب، طبق رابطه‌ی (۹) هر منبع حداکثر به یک باس وصل می‌شود.

در این مقاله، به طور کلی برقرار کردن هر ناحیه به چهار طریق متصور است. هر ناحیه می‌تواند شامل پست یا منابع تولید پراکنده باشد و از طریق آنها برقرار شود. در غیر این صورت، حتماً باید به یک ناحیه مجاور خود متصل شده یا اینکه از طریق منابع تولید توان سیار انرژی مورد نیاز آن تأمین شود. با توجه به مطلب عنوان شده، رابطه (۱۰) وجود یکی از منابع تأمین توان چهارگانه را برای برقرار کردن هر ناحیه الزامی می‌کند.

$$\sum_{z' \in Z} \beta_{z',z}^{zz} + \sum_{\substack{s \in S^{MDG} \\ b \in B_z}} \beta_{s,b}^{MDG} = 1 - \alpha_z^{\text{source}}; \forall z \in Z \quad (10)$$

که در آن، B_z مجموعه باس‌های موجود در هر ناحیه را نشان می‌دهد. α_z^{source} یک مقدار دودویی نشان دهنده وجود منابع تولید پراکنده یا

همچنین، زمان رفع کامل هر خطا از حاصل جمع زمان مورد نیاز برای تعمیر خطا، زمان مسافرت و زمان پایان عملیات قبلی تیم بدست می-آید. این مطلب در روابط (۱۷) تا (۱۹) مدلسازی شده است. در رابطه (۱۷)، عمل تعمیر خطا اولین اقدام اصلاحی تیم مربوطه است. در حالی که در روابط (۱۸) و (۱۹) این تیم قبل از تعمیر به ترتیب خطای دیگری را تعمیر کرده و یا عمل کلیدزنی کلید دستی انجام داده است.

$$T_m^{Fault} \geq \beta_{c,f}^{cf} \times TT_{c,f}^{cf} + T_f^{rep}; \forall f \in F, c \in C \quad (17)$$

$$T_f^{Fault} \geq TT_{f,f'}^{ff} + T_f^{Fault} + T_f^{rep} - M_2(1 - \beta_{f',f}^{ff'}) \quad (18)$$

$$\forall f, f' \in F$$

$$T_f^{Fault} \geq TT_{m,f}^{mf} + T_m^{MS} + T_f^{rep} - M_2(1 - \beta_{m,f}^{mf}) \quad (19)$$

$$\forall m \in M, f \in F$$

که در روابط اخیر، $TT_{c,f}^{cf}$ ، $TT_{m,f}^{mf}$ و $TT_{f,f'}^{ff}$ به ترتیب زمان‌های مورد نیاز برای رسیدن یک تیم به محل خطا از محل ابتدایی آن، کلید دستی یا خطای دیگر را نشان می‌دهد. T_f^{rep} مقدار زمان مورد نیاز برای تعمیر خطا توسط تیم حاضر در محل را نشان می‌دهد.

در ادامه، زمان‌های بازبایی نواحی مختلف شبکه در روابط (۲۰) تا (۲۳) محاسبه می‌شود. بنا بر رابطه (۲۰)، ناحیه‌ای که توسط منبع تولید توان سیار برقرار شود، زمان خاموشی آن حداقل برابر با زمان مورد نیاز برای انتقال و نصب آن خواهد بود. روابط (۲۱) و (۲۲) مربوط به زمان برقرار شدن یک ناحیه توسط ناحیه مجاور خود است. در این روابط، زمان خاموشی هر ناحیه از ناحیه مجاور خود که توسط آن بازبایی شده بیشتر است. همچنین، اگر ارتباط دو ناحیه از طریق کلید دستی صورت گرفته باشد، برقرار شدن ناحیه تا زمانی تأخیر می‌یابد که زمان بسته شدن کلید دستی را شامل شود. رابطه (۲۳) از برقرار شدن یک ناحیه پیش از رفع خطا در آن جلوگیری می‌کند.

$$T_z^{Zone} \geq \beta_{s,b}^{MDG} \times (TT_{s,b}^{sb} + T^{inst}); \quad (20)$$

$$\forall s \in S^{MDG}, z \in Z, b \in B_z$$

$$T_z^{Zone} \geq T_{z'}^{Zone} - M_2(1 - \beta_{z',z}^{zz}); \forall z, z' \in Z \quad (21)$$

$$T_z^{Zone} \geq T_m^{MS} - M_2(1 - \beta_{z,m}^{zz}); \forall z \in Z, m \in M_{z,z'} \quad (22)$$

$$T_z^{Zone} \geq T_f^{Fault}; \forall z \in Z, f \in F_z \quad (23)$$

که در روابط فوق، F_z مجموعه خطاهای موجود در یک ناحیه است. مقادیر $TT_{s,b}^{sb}$ و T^{inst} به ترتیب زمان‌های مورد نیاز برای انتقال و نصب یک منبع تولید توان سیار را نشان می‌دهند.

در مدل پیشنهادی، هر کلید دستی زمانی بسته می‌شود که بخواهد یک ناحیه را از طریق ناحیه دیگر برقرار کند. حال اگر کلید دستی بین دو ناحیه پیش از برقرار شدن ناحیه مبدأ بسته شود، به محض برقرار شدن ناحیه مبدأ، ناحیه پایین دست نیز برقرار می‌شود. در این حالت باید توجه داشت که ناحیه مبدأ پیش از تعمیر خطاهای ناحیه خود و همچنین ناحیه پایین دست نمی‌تواند بازبایی شود. اما اگر کلید دستی بین دو ناحیه پس از برقرار شدن ناحیه مبدأ بسته شود، ناحیه پایین دست در زمان بسته شدن کلید دستی برقرار می‌شود. بنابراین، برای

پست در هر ناحیه است. مقدار متغیر دودویی $\beta_{z',z}^{zz}$ زمانی برابر یک است که ناحیه z از طریق z' بازبایی شود. در رابطه (۱۱)، امکان برقرار شدن دو ناحیه متقابلاً به کمک یکدیگر سلب شده است. همچنین، ارتباط برقرار کردن یک ناحیه از طریق ناحیه دیگر در رابطه (۱۲) مستلزم بسته شدن حداقل یک کلید دستی یا قابل کنترل از راه دور است.

$$\beta_{z',z}^{zz} + \beta_{z,z'}^{zz'} \leq 1; \forall z, z' \in Z \quad (11)$$

$$\beta_{z',z}^{zz} + \beta_{z,z'}^{zz'} \leq \sum_{m \in M_{z,z'}} \beta_m^{MS} + \sum_{r \in R_{z,z'}} \beta_r^{RCS}; \forall z, z' \in Z \quad (12)$$

که در رابطه فوق، $M_{z,z'}$ و $R_{z,z'}$ به ترتیب مجموعه کلیدهای دستی و قابل کنترل از راه دور ارتباط دهنده دو ناحیه z و z' است. β_r^{RCS} متغیر دودویی نشان‌دهنده وضعیت وصل در کلیدهای قابل کنترل از راه دور است.

زمان بسته شدن هر یک از کلیدهای دستی وابسته به تیم عملیات و مسیر پیموده شده توسط این تیم خواهد بود. روابط (۱۳) تا (۱۶) این زمان را محاسبه می‌کنند. در رابطه (۱۳)، در صورتی که تیم عملیات برای اولین بار اعزام می‌شود، زمان عملکرد کلید دستی حداقل برابر با زمان مورد نیاز برای رسیدن این تیم به محل و بستن آن است. در روابط (۱۴) و (۱۵)، زمان عملکرد کلید علاوه بر دو مورد زمان مسافرت به محل کلید و زمان مورد نیاز برای بستن آن، شامل زمان اقدام قبلی تیم (به ترتیب کلیدزنی یا تعمیر) نیز می‌شود. در رابطه (۱۶)، اگر هیچ تیمی به منظور بستن کلید دستی اعزام نشود، زمان عملکرد آن حداقل برابر با مقداری به اندازه کافی بزرگ (T^{max}) به طوری که خارج از محدوده زمانی فرایند بازبایی قرار گیرد، فرض می‌شود.

$$T_m^{MS} \geq \beta_{c,m}^{cm} \times TT_{c,m}^{cm} + T^{MSO}; \forall m \in M, c \in C \quad (13)$$

$$T_m^{MS} \geq TT_{m',m}^{mm} + T_m^{MS} + T^{MSO} - M_1(1 - \beta_{m',m}^{mm}) \quad (14)$$

$$\forall m, m' \in M$$

$$T_m^{MS} \geq TT_{f,m}^{fm} + T_f^{Fault} + T^{MSO} - M_1(1 - \beta_{f,m}^{fm}) \quad (15)$$

$$\forall m \in M, f \in F$$

$$T_m^{MS} \geq T^{max} -$$

$$M_1 \left(\sum_{c \in C} \beta_{c,m}^{cm} + \sum_{m' \in M} \beta_{m',m}^{mm} + \sum_{f \in F} \beta_{f,m}^{fm} \right) \quad (16)$$

که در روابط فوق، مقادیر $TT_{c,m}^{cm}$ ، $TT_{m',m}^{mm}$ و $TT_{f,m}^{fm}$ به ترتیب زمان‌های مورد نیاز برای رسیدن یک تیم به محل کلید دستی از محل ابتدایی آن، کلید دستی دیگر یا خطا را نشان می‌دهد. متغیرهای T_m^{MS} و T_f^{Fault} زمان پایان اقدام اصلاحی مربوط به کلیدزنی یا تعمیر را نشان می‌دهند. T^{MSO} برابر مقدار زمان مورد نیاز برای بستن کلید دستی توسط تیم حاضر در محل است. در این مقاله، مقادیر مثبت بزرگ هستند. توجه شود که در رابطه (۱۶) $T^{max} \leq M_1$ باید انتخاب شود.

$$\pm \left\{ \begin{array}{l} U_{b_l^{se}} - U_{b_l^{re}} - 2 \times \\ \left(R_l P_l^{line} + X_l Q_l^{line} \right) \end{array} \right\} \leq \begin{cases} M_4(1 - \beta_m^{MS}); \alpha_{l,m}^{MS} = 1 \\ M_4(1 - \beta_r^{RCS}); \alpha_{l,r}^{RCS} = 1 \\ 0; \alpha_{l,m}^{MS} = \alpha_{l,r}^{RCS} = 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$\forall l \in L, m \in M, r \in R$$

که در آن، L مجموعه خطوط شبکه و b_l^{se} و b_l^{re} به ترتیب باس‌های ابتدایی و انتهایی مربوط به هر خط هستند. پارامترهای R_l و X_l به ترتیب مقاومت و راکتانس خطوط، متغیر U_b توان دوم اندازه ولتاژ هر باس و متغیرهای P_l^{line} و Q_l^{line} توان‌های حقیقی و راکتیو عبوری از خطوط را نشان می‌دهند. $\alpha_{l,m}^{MS}$ و $\alpha_{l,r}^{RCS}$ مقادیر دودویی نشان دهنده وجود کلید دستی یا قابل کنترل از راه دور در یک خط هستند. رابطه (۳۲) قید تعادل توان در باس‌های شبکه را بیان می‌کند. رابطه (۳۳) حدود توان تولیدی در هر باس را نشان می‌دهد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\substack{l \in L; \\ b=b_l^{se}}} (P_l^{line} + jQ_l^{line}) + (P_b^{load} + jQ_b^{load}) - \\ \sum_{\substack{l \in L; \\ b=b_l^{re}}} (P_l^{line} + jQ_l^{line}) - (P_b^{Gen} + jQ_b^{Gen}) \end{array} \right\} = 0 \quad (32)$$

$$\forall b \in B$$

$$\sum_{s \in S} (P_s^{MDG} + jQ_s^{MDG}) \times \beta_{s,b}^{MDG} + (P_b^{DG} + jQ_b^{DG}) \leq P_b^{Gen} + jQ_b^{Gen} \leq \sum_{s \in S} (\bar{P}_s^{MDG} + j\bar{Q}_s^{MDG}) \times \beta_{s,b}^{MDG} + (\bar{P}_b^{DG} + j\bar{Q}_b^{DG}) \quad (33)$$

$$\forall b \in B$$

که در این روابط، مقادیر P_b^{load} و Q_b^{load} به ترتیب توان حقیقی و راکتیو مصرفی و متغیرهای P_b^{Gen} و Q_b^{Gen} توان‌های تولیدی در هر باس را نشان می‌دهند. در رابطه (۳۳)، $\bar{P} + j\bar{Q}$ حد بالا و $P + jQ$ حد پایین توان تولیدی منابع تولید پراکنده و منابع سیار را نشان می‌دهند.

ولتاژهای باس‌ها و توان‌های عبوری خطوط باید در روابط (۳۴) و (۳۵) به منظور حفظ محدوده مجاز ولتاژ و حدود حرارتی خطوط صدق کنند.

$$\underline{U} \leq U_b \leq \bar{U}; \quad \forall b \in B \quad (34)$$

$$(P_l^{line})^2 + (Q_l^{line})^2 \leq (\bar{S}_l)^2 \quad \forall l \in L \quad (35)$$

محاسبه زمان برقدار شدن ناحیه پایین‌دست یک کلید دستی لازم است بدانیم که ابتدا کلید بسته شده یا ناحیه مبدأ برقدار شده است. برای این منظور روابط (۲۴) تا (۲۷) به مدل اضافه شدند.

$$1 - \beta_{z,z'}^{zz} + \beta_m^{prime} \geq \frac{T_z^{Zone} - T_m^{MS}}{T_{max}} \quad (24)$$

$$2 - \beta_{z,z'}^{zz} - \beta_m^{prime} \geq \frac{T_m^{MS} - T_z^{Zone}}{T_{max}} \quad (25)$$

$$T_z^{Zone} \geq T_{z'}^{Zone} - (2 - \beta_{z,z'}^{zz} - \beta_m^{prime}) \times M_3 \quad (26)$$

$$T_m^{MS} \geq T_{z'}^{Zone} - (1 - \beta_{z,z'}^{zz} + \beta_m^{prime}) \times M_3 \quad (27)$$

که در این روابط، $m \in M_{z,z',z,z'} \in Z$ و β_m^{prime} متغیر باینری نشان دهنده بسته شدن کلید پیش از برقدار شدن ناحیه مبدأ است. به این ترتیب، روابط (۲۴) و (۲۵) صفر یا یک بودن این متغیر را تعیین می‌کنند. سپس، با توجه به مقدار حاصل، در روابط (۲۶) و (۲۷)، زمان برقدار شدن ناحیه پایین‌دست مشخص می‌شود.

روابط (۲۸) و (۲۹) ارتباط بین دو ناحیه را در صورت بسته شدن کلید ارتباط‌دهنده آنها لازم می‌داند.

$$\beta_{z,z'}^{zz} + \beta_{z,z'}^{zz'} \geq \beta_m^{MS}; \quad \forall m \in M_{z,z',z,z'} \in Z \quad (28)$$

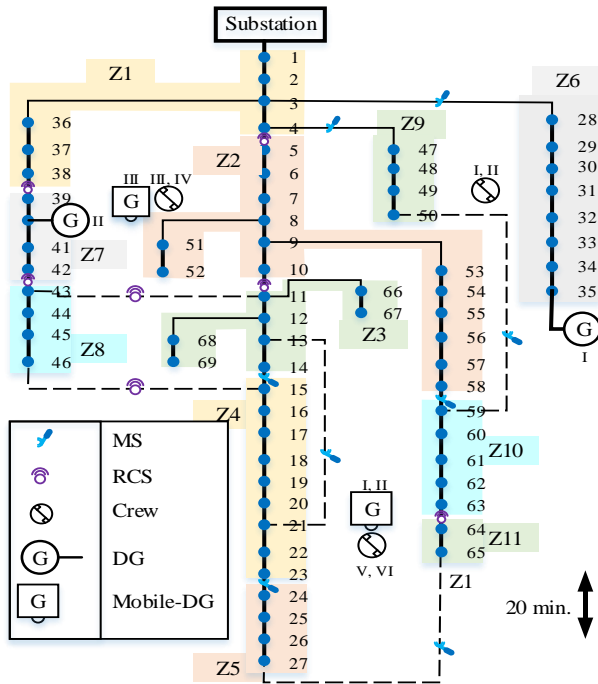
$$\beta_{z,z'}^{zz} + \beta_{z,z'}^{zz'} \geq \beta_r^{RCS}; \quad \forall r \in R_{z,z',z,z'} \in Z \quad (29)$$

در برنامه‌های بازایی بار و هر برنامه شامل کلیدزنی و بازآرایی شبکه همواره جلوگیری از ایجاد حلقه در آرایش جدید به عنوان یکی از قیود بهره‌برداری شبکه در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، در ابتدا حلقه‌های شبکه شناسایی شده و سپس به منظور جلوگیری از شکل‌گیری آنها، قیدی مبنی بر باز بودن حداقل یک کلید موجود در هر حلقه به مدل اضافه شده است [26]. این قید به صورت رابطه‌ی (۳۰) در نظر گرفته شده است.

$$\sum_{m \in M_n} (1 - \beta_m^{MS}) + \sum_{r \in R_n} (1 - \beta_r^{RCS}) \geq 1; \quad \forall n \in N \quad (30)$$

که در این رابطه، N مجموعه حلقه‌های ممکن در ساختار شبکه است. M_n و R_n مجموعه کلیدهای دستی و قابل کنترل از راه دور موجود در هر حلقه را نشان می‌دهند.

محاسبات پخش بار در شبکه‌های توزیع در شرایط کلیدزنی و بازآرایی سیستم حائز اهمیت است چرا که امنیت سیستم را از نظر حدود حرارتی هادی‌ها و همچنین سطح ولتاژ مشترکین در آرایش‌های متفاوت بررسی می‌کند. تاکنون، تحقیقات زیادی برای معرفی مدل خطی برای پخش بار در شبکه توزیع صورت گرفته است. در این مقاله از پخش بار پیشنهادی در [۲۷] استفاده شده است. در رابطه (۳۱)، افت ولتاژ در طول یک خط محاسبه می‌شود. این قید در صورتی که کلید دستی یا قابل کنترل از راه دور بر روی خط بوده و به حالت قطع باشد، آزاد می‌شود.



شکل (۱): شبکه ۶۹ باسه و کلیدها، تیمها و منابع اضافه شده

جدول (۱): مشخصات فنی منابع تولید پراکنده و منابع سیار

واحد	باس	\bar{P} (KW)	\underline{P} (KW)	\bar{Q} (KVar)	\underline{Q} (KVar)
DG1	۳۵	۵۰۰	۵۰	۴۰۰	-۴۰۰
DG2	۴۰	۴۰۰	۴۰	۳۰۰	-۳۰۰
MDG1	-	۲۰۰	۲۰	۱۵۰	-۱۵۰
MDG2	-	۴۰۰	۴۰	۳۰۰	-۳۰۰
MDG3	-	۴۰۰	۴۰	۳۰۰	-۳۰۰

مطالعه حالت اول- در این حالت فرض شده که در اثر رویدادی در شبکه ۱۰ خطا رخ دهد. محل این خطاها به صورت نشان داده شده در شکل (۲) است. زمان مورد نیاز برای تعمیر هر یک از خطاها در جدول (۲) نشان داده شده است. در این حالت از میان سه منبع سیار معرفی شده در شکل (۱) و جدول (۱)، فرض شده که تنها منبع سیار ۱ در دسترس است. دو مقدار ثابت مربوط به زمان مورد نیاز جهت کلیدزنی دستی و نصب منبع سیار در باس مربوطه به ترتیب ۵ و ۱۰ دقیقه فرض شده است. شکل (۲) فرایند بازیابی بار پیشنهادی در این مقاله را به صورت مسیرهای حرکت تیمها و منابع سیار نشان می‌دهد. همچنین، اقدامات اصلاحی مختلف در جدول (۳) شرح داده شده‌اند. در این جدول، محل کلیدها با استفاده از باس‌های ابتدایی و انتهایی آنها مشخص شده است.

جدول (۲): زمان مورد نیاز برای تعمیر هر خطا

شماره خطا	۱	۲	۳	۴	۵
زمان تعمیر (دقیقه)	۱۵۵	۱۱۵	۱۵۰	۱۰۰	۸۵
شماره خطا	۶	۷	۸	۹	۱۰
زمان تعمیر (دقیقه)	۱۹۰	۱۲۰	۱۶۰	۱۶۵	۱۳۰

که در آن، مقادیر \bar{U} و \underline{U} حدود بالا و پایین ولتاژ و متغیر \bar{S}_l حد بالای توان عبوری از خطوط را نشان می‌دهند. در این مدل، رابطه (۳۵) ناحیه ایمن توان عبوری از خطوط را به دایره‌ای محدود کرده که به منظور خطی ماندن مدل ریاضی مسأله، به جای استفاده از آن، از تقریب هشت ضلعی در روابط (۳۶) و (۳۷) استفاده می‌شود [۲۸]. رابطه (۳۸) حد بالای توان عبوری از خطوط با کلید قطع شده را صفر می‌کند.

$$\pm P_l^{line} \pm Q_l^{line} \leq 0.9239 \times \bar{S}_l; \forall l \in L \quad (36)$$

$$\pm P_l^{line}, \pm Q_l^{line} \leq 0.9239 \times \bar{S}_l; \forall l \in L \quad (37)$$

$$\bar{S}_l \leq \begin{cases} S_l^{Max} \times \beta_m^{MS}; & \alpha_{l,m}^{MS} = 1 \\ S_l^{Max} \times \beta_r^{RCS}; & \alpha_{l,r}^{RCS} = 1 \\ S_l^{Max}; & \alpha_{l,m}^{MS} = \alpha_{l,r}^{RCS} = 0 \end{cases} \quad (38)$$

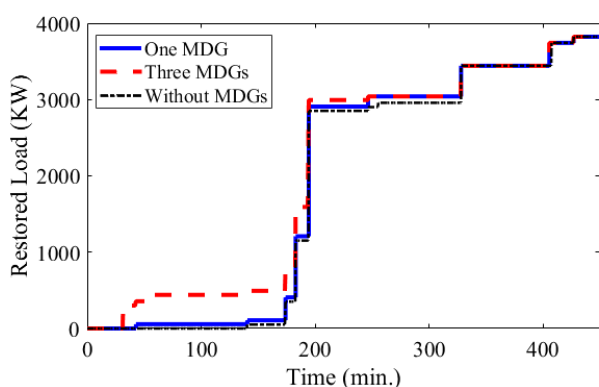
$$\forall l \in L, m \in M, r \in R$$

که در آن، S_l^{Max} مقدار حد حرارتی خطوط را نشان می‌دهد.

۳- نتایج عددی

در این قسمت، به منظور ارزیابی عملکرد مدل ارائه شده، کاربرد آن در بازیابی بار شبکه ۶۹ باسه مطالعه شده است. کلیه مطالعات این قسمت با استفاده از CPLEX 12.9 و با شکاف صفر درصد در یک سیستم با مشخصات پردازنده Intel® Celeron® 1000M، حافظه ۴ RAM، گیگابایت و سیستم عامل و پردازنده ۶۴ بیتی حل شده است. مشخصات شبکه ۶۹ باسه در [29] آمده است. علاوه بر آن، با توجه به اهداف مطالعاتی این مقاله، شبکه به هشت کلید دستی و هفت کلید قابل کنترل از راه دور تجهیز شده است. در نتیجه این کلیدگذاری، شبکه به یازده ناحیه تقسیم شده است. فرض شده که دو منبع تولید پراکنده متصل به باس‌های ۳۵ و ۴۰ و سه منبع سیار نیز در شبکه هستند. به منظور اجرای عملیات دستی تعمیر و کلیدزنی، فرض شده که شش تیم آماده در سطح شبکه حضور دارند. در شکل (۱) شبکه ۶۹ باسه و تجهیزات و تیم‌های فرضی اضافه شده به آن را می‌توان مشاهده کرد. کلیه فواصل زمانی دو به دوی بین تیم‌ها، کلیدهای دستی و خطاها و همچنین فواصل دو به دوی بین منابع سیار و باس‌های شبکه به صورت فاصله مستقیم هر دو نقطه در شکل (۱) و شکل (۲) و با مقیاس نشان داده شده در این شکل‌ها فرض شده است. مشخصات فنی منابع تولید پراکنده و منابع سیار در جدول (۱) آمده است.

مطالعه حالت دوم- در این حالت به منظور بررسی اثر منابع سیار، فرض شده که هر سه منبع در دسترس بوده و به این ترتیب در بازیابی سریع تر بارها مشارکت می کنند. همچنین به منظور مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری منابع سیار با سایر روش های پیشنهادی در مراجع (به عنوان مثال [25]) یک حالت نیز مربوط به عدم حضور منابع سیار در نظر گرفته شده است. سایر مفروضات این حالت مشابه حالت اول است. در حالت حضور سه منبع سیار، نسبت به حالت اول، بازیابی ناحیه ۸ از دقیقه ۲۴۶ به ۵۵ و ناحیه ۱۱ از دقیقه ۱۹۴ به ۳۲ رسیده است. شکل (۳) مقدار بار بازیابی شده در طول زمان را نشان می دهد. با توجه به این شکل، با به کارگیری منابع سیار می توان بخشی از بار شبکه را در مدت زمان کوتاهی بازیابی کرد. این موضوع به ویژه در بازیابی سریع نقاط بار مهم شبکه اهمیت می یابد.



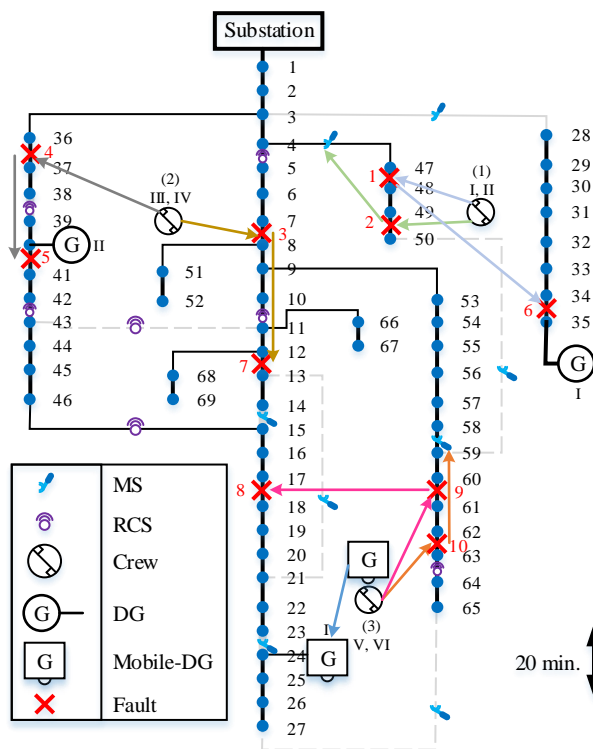
شکل (۳): مقدار بار بازیابی شده در زمان

مطالعه حالت سوم- در ادامه به منظور ارزیابی تأثیر تعداد تیم های عملیات بر فرایند بازیابی بار و همچنین مدل ارائه شده در این مقاله، حالت از حضور ۴ تا ۹ تیم در نظر گرفته شده است. هر یک از تیم ها در ابتدا در یکی از محل های سه گانه نشان داده شده در شکل (۲) قرار دارد. جدول (۴) تعداد و محل قرارگیری تیم ها و جزئیات نتایج حل مدل را در بر دارد. منظور از (۲-۳) در ستون محل تیم ها در جدول (۴) این است که در محل های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲، ۲ و ۳ تیم حضور دارند. توزیع تیم ها به گونه ای انتخاب شده که کمترین تجمع در هر محل صورت گیرد. سایر مفروضات این حالت مشابه حالت اول است. در جدول (۴)، زمان تکمیل بازیابی همان زمان آخرین اقدام اصلاحی را نشان می دهد. با توجه به نتایج عنوان شده در جدول (۴) با افزایش تعداد تیم ها، انرژی تأمین نشده و زمان تکمیل فرایند بازیابی به طور کلی کاهش می یابد. شایان ذکر است که با افزایش هر چه بیشتر تیم ها روند کاهش مذکور کمتر می شود. نکته قابل توجه دیگر در این جدول مربوط به زمان حل مسأله است. مطابق اعداد گزارش شده، با افزایش تعداد تیم ها اگرچه فضای جواب مسأله بازیابی گسترش می یابد، اما یافتن جواب بهینه در این فضا سریع تر انجام می شود.

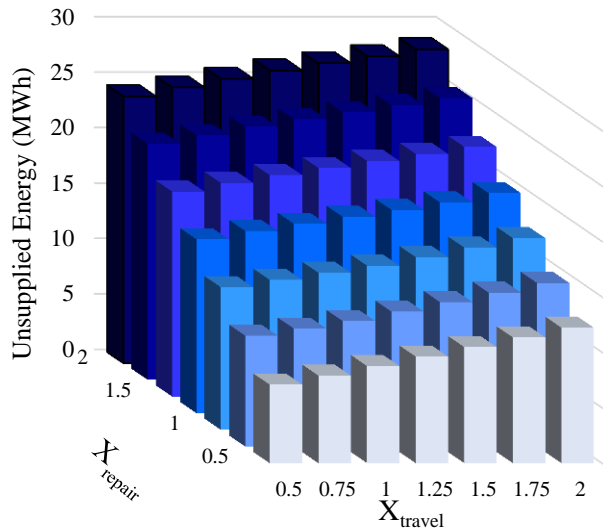
مطالعه حالت چهارم- در تحلیلی دیگر در ادامه تأثیر تغییرات دو پارامتر زمان مسافرت تیم ها و زمان مورد نیاز برای تعمیر عناصر

جدول (۳): اقدامات اصلاحی فرایند بازیابی در طول زمان

زمان (دقیقه)	شرح اقدامات اصلاحی
۰	آغاز فرایند بازیابی و اعزام تیم ها
۴۳	اتصال منبع سیار ۱ به باس ۲۴ و بازیابی ناحیه ۵
۱۴۰	تعمیر خطای ۴، بستن مدارشکن ابتدای فیدر و بازیابی ناحیه ۱
۱۴۱	تعمیر خطای ۲
۱۵۶	تعمیر خطای ۱۰
۱۷۴	تعمیر خطای ۳، بستن کلید قابل کنترل از راه دور ۴-۵ و بازیابی ناحیه ۲
۱۸۳	تعمیر خطای ۱، بستن کلید دستی ۴-۴۷ و بازیابی ناحیه ۹
۱۹۴	تعمیر خطای ۹، بستن کلید دستی ۵۸-۵۹ و بازیابی نواحی ۱۰ و ۱۱
۲۴۶	تعمیر خطای ۵، بستن کلید قابل کنترل از راه دور ۴۲-۴۳ و بازیابی نواحی ۷ و ۸
۳۲۸	تعمیر خطای ۷، بستن کلید قابل کنترل از راه دور ۱۰-۱۱ و بازیابی ناحیه ۳
۴۰۵	تعمیر خطای ۸، بستن کلید قابل کنترل از راه دور ۱۵-۴۶ و بازیابی ناحیه ۴
۴۲۷	تعمیر خطای ۶ و بازیابی ناحیه ۶



شکل (۲): فرایند بازیابی بار در شبکه ۶۹ باسه



شکل (۴): تأثیر تغییرات زمان مسافرت تیم‌ها و زمان تعمیر بر بازیابی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل خطی عدد صحیح به منظور حل مسأله بازیابی بار بهینه در شبکه‌های توزیع نیروی برق ارائه شد. مدل ارائه شده در شرایط بحرانی خطاهای گسترده در شبکه، با در نظرگیری محدودیت نیروی انسانی، تیم‌های عملیات را به صورت بهینه به منظور اجرای عملیات تعمیر و کلیدزنی دستی اعزام می‌کند. همچنین، امکان بهره‌برداری شبکه از منابع تولید توان سیار را در محل‌های دور از منابع تولید پراکنده و پست‌ها در جهت تسریع بازیابی بار فراهم می‌کند. مدل ارائه شده در بازیابی بار در شرایط خطا در شبکه ۶۹ با سه به کار گرفته شد. در این شرایط، برنامه زمانی اقدامات اصلاحی تیم‌ها، منابع تولید توان سیار و کلیدهای قابل کنترل از راه دور ارائه شد. در نهایت، نقش منابع تولید توان سیار و همچنین تأثیر پارامترهای تعداد تیم‌ها، زمان مسافرت آنها و زمان مورد نیاز برای تعمیر عناصر آسیب‌دیده در فرایند بازیابی بار و مقدار انرژی تأمین نشده بررسی شد. با توجه به مشاهدات صورت گرفته، مدل پیشنهادی در بهینه‌سازی فرایند بازیابی بار عملکرد مطلوبی دارد.

مراجع

- [1] M. Izadi, M. Farajollahi, and A. Safdarian, "Switch deployment in distribution networks," in *Electric Distribution Network Management and Control*, 2018, pp. 179–233.
- [2] Y. Xu, C. Liu, and H. Gao, "Reliability analysis of distribution systems considering service restoration," in *2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2015, pp. 1–5.
- [3] R. Romero, J. F. Franco, F. B. Leão, M. J. Rider, and E. S. de Souza, "A New mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1259–1268, 2016.
- [4] B. Chen, C. Chen, J. Wang, and K. L. Butler-purry, "Multi-time step service restoration for advanced distribution

آسیب‌دیده بررسی شده است. برای این منظور دو ضریب X_{travel} و X_{repair} هر یک از مقدار ۰/۵ تا ۲ تغییر کرده و در مقادیر این پارامترها ضرب شده است.

سپس، مسأله بازیابی بار در شبکه در هر حالت حل شده و انرژی تأمین نشده در هر حالت محاسبه شده است. سایر مفروضات این حالت نیز مشابه حالت اول است. شکل (۴) نتایج مربوط به این تغییرات را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تغییرات پارامترهای زمان مسافرت تیم‌ها و زمان تعمیر مستقیماً بر انرژی تأمین نشده مشترکین تأثیر می‌گذارد. از آنجا که عمده زمان بازیابی صرف تعمیر تجهیزات آسیب‌دیده می‌شود، این تأثیر در مورد زمان‌های تعمیرات بیشتر بوده است. لازم به ذکر است که با تغییرات اعمال شده در دو پارامتر مذکور در هیچ حالتی تغییر در روند بازیابی و ترتیب اقدامات اصلاحی پیشنهادی مشاهده نشد.

جدول (۴): تأثیر تعداد تیم‌ها بر بازیابی بار

حالت تیم‌ها	تعداد تیم‌ها	محل تیم‌ها	انرژی تأمین نشده (مگاوات ساعت)	زمان تکمیل (دقیقه)	زمان حل (ثانیه)
۱	۴	۱-۱-۲	۱۹/۴۲۵	۶۲۷	۵۴/۴۸
۲	۴	۱-۲-۱	۱۸/۷۹۹	۶۲۷	۴۳/۵۹
۳	۴	۲-۱-۱	۱۸/۷۳۹	۶۴۲	۴۶/۴۵
۴	۵	۱-۲-۲	۱۶/۵۷۴	۴۵۱	۱۷/۲۳
۵	۵	۲-۱-۲	۱۶/۸۴۵	۵۵۲	۲۲/۵۹
۶	۵	۲-۲-۱	۱۵/۷۸۹	۴۴۲	۱۵/۰۳
۷	۶	۲-۲-۲	۱۴/۱۶۳	۴۲۷	۴/۰۶
۸	۷	۲-۲-۳	۱۳/۱۶۲	۴۲۷	۴/۲۵
۹	۷	۲-۳-۲	۱۲/۹۲۸	۴۲۷	۳/۱۷
۱۰	۷	۳-۲-۲	۱۳/۱۵۹	۴۲۷	۴/۴۱
۱۱	۸	۲-۳-۳	۱۲/۴۳۸	۴۲۷	۱/۳۹
۱۲	۸	۳-۲-۳	۱۲/۴۸۷	۴۲۷	۱/۲۵
۱۳	۸	۳-۳-۲	۱۲/۳۸۵	۴۲۷	۱/۱۳
۱۴	۹	۳-۳-۳	۱۲/۰۱۵	۴۲۷	۰/۸۱

- IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 4, pp. 2755–2767, 2019.
- [20] A. Arif, Z. Wang, C. Chen, and J. Wang, "Repair and resource scheduling in unbalanced distribution systems using neighborhood search," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 11, no. 1, pp. 673–685, 2019.
- [21] B. Taheri, A. Safdarian, M. Moeini-Aghtaie, and M. Lehtonen, "Distribution systems resilience enhancement via pre-and post-event actions," IET Smart Grid, vol. 2, no. 4, pp. 549–556, 2019.
- [22] B. Taheri, A. Jalilian, A. Safdarian, M. Moeini-Aghtaie, and M. Lehtonen, "Toward Operational Resilience of Smart Energy Networks in Complex Infrastructures," in Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks, Springer, 2020, pp. 203–228.
- [23] S. Lei, J. Wang, and Y. Hou, "Remote-controlled switch allocation enabling prompt restoration of distribution systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 3, pp. 3129–3142, 2017.
- [24] S. Lei, C. Chen, H. Zhou, and Y. Hou, "Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 5, pp. 5650–5662, 2018.
- [25] B. Chen, Z. Ye, C. Chen, J. Wang, T. Ding, and Z. Bie, "Toward a synthetic model for distribution system restoration and crew dispatch," IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 3, pp. 2228–2239, 2018.
- [26] J. Y. Fan, L. Zhang, and J. D. McDonald, "Distribution network reconfiguration: single loop optimization," IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 3, pp. 1643–1647, 1996.
- [27] L. Gan and S. H. Low, "Convex relaxations and linear approximation for optimal power flow in multiphase radial networks," in Power Systems Computation Conference, 2014.
- [28] H. Ahmadi and J. R. Marti', "Linear current flow equations with application to distribution systems reconfiguration," IEEE Trans. Power Syst., vol. 30, no. 4, pp. 2073–2080, 2015.
- [29] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," IEEE Trans. power Deliv., vol. 4, no. 1, pp. 725–734, 1989.
- systems and microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6793–6805, 2017.
- [5] L. T. Marques, S. Member, and A. C. B. Delbem, "Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 1–12, 2017.
- [6] C. Yuan, M. S. Illindala, and A. S. Khalsa, "Modified viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 1, pp. 310–319, 2017.
- [7] M. R. Kleinberg, K. Miu, and H. Chiang, "Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1110–1117, 2011.
- [8] M. Gholami, J. Moshtagh, and L. Rashidi, "Service restoration for unbalanced distribution networks using a combination two heuristic methods," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 67, no. 1, pp. 222–229, May 2015.
- [۹] نصرت پور حسین، زنگنه علی. خودترمیمی بهینه شبکه‌های توزیع هوشمند مبتنی بر گراف درخت پوشا و بهبود قابلیت اطمینان شبکه. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۸؛ ۱۶ (۱): ۹۱–۱۰۱
- [10] Y. Li, J. Xiao, C. Chen, Y. Tan, and Y. Cao, "Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 4, pp. 4138–4150, 2018.
- [۱۱] امینی‌فر فرخ، فره‌مندی متین. مفاهیم و مبانی ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های برق. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۳): ۸۳–۹۱
- [۱۲] غلامی دهکردی حمید، احمدیان محمد، خدرزاده مجتبی. ارائه یک طرح حفاظت ویژه برای مقابله با پیشامدهای شدید ناحیه فارس در جنوب شبکه سراسری ایران. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۶؛ ۱۴ (۱): ۲۹–۴۲
- [13] P. Wang and W. Li, "Reliability evaluation of distribution systems considering optimal restoration sequence and variable restoration times," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 1, no. 4, pp. 688–695, 2007.
- [14] J. S. Wu, T. E. Lee, C. T. Tsai, T. H. Chang, and S. H. Tsai, "A fuzzy rule-based system for crew management of distribution systems in large-scale multiple outages," in International Conference on Power System Technology, 2004, vol. 2, p. 1084–1089 Vol.2.
- [15] A. Arif and Z. Wang, "Service restoration in resilient power distribution systems with networked microgrid," in 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, pp. 1–5.
- [16] A. Arif, S. Ma, Z. Wang, J. Wang, S. M. Ryan, and C. Chen, "Optimizing service restoration in distribution systems with uncertain repair time and demand," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 6, pp. 6828–6838, 2018.
- [17] A. Arif, S. Ma, and Z. Wang, "Optimization of transmission system repair and restoration with crew routing," in 2016 North American Power Symposium (NAPS), 2016, pp. 1–6.
- [18] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, and C. Chen, "Power Distribution System Outage Management With Co-Optimization of Repairs, Reconfiguration, and DG Dispatch," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 4109–4118, 2018.
- [19] Y. Lin, B. Chen, J. Wang, and Z. Bie, "A combined repair crew dispatch problem for resilient electric and natural gas system considering reconfiguration and DG islanding,"