

# بازیابی غیرمتمرکز شبکه توزیع با استفاده از سیستم چندعامله

شایان بهنام پور<sup>۱</sup> محمودرضا حقی فام<sup>۲</sup> علی اخوین<sup>۳</sup> حسن سیاهکلی<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب - تهران - ایران

[St\\_sh\\_behnampour@azad.ac.ir](mailto:St_sh_behnampour@azad.ac.ir)

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران

[Haghifam@modares.ac.ir](mailto:Haghifam@modares.ac.ir)

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب - تهران - ایران

[a\\_akhavein@azad.ac.ir](mailto:a_akhavein@azad.ac.ir)

۴- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب - تهران - ایران

[h\\_siahkali@azad.ac.ir](mailto:h_siahkali@azad.ac.ir)

**چکیده:** پس از بروز خطا و از مدار خارج شدن بخشی از شبکه توزیع، به مدار برگرداندن حداکثر بار در حداقل زمان، هدف اصلی فرآیندی است که بطور کلی تحت عنوان بازیابی شناخته می‌شود. ابزارهای محاسباتی و تصمیم‌گیری می‌توانند نقش مهمی در موفقیت‌آمیز بودن بازیابی داشته باشند. یکی از این ابزارها، سیستم چندعامله است که یک سیستم نرم‌افزاری مبتنی بر اجزای عاملهایی با قابلیت تبادل اطلاعات و تصمیم‌سازی محلی است. در این مقاله روشی براساس سیستم چندعامله برای بازیابی شبکه‌های توزیع شعاعی پیشنهاد می‌شود. مزیت روش پیشنهادی، علاوه بر مدیریت غیرمتمرکز فرآیند بازیابی، امکان لحاظ کردن اولویت زون‌ها یا نواحی در فیدر توزیع برای به مدار برگرداندن آنها است. این اولویت‌بندی بر مبنای نوع بارهای موجود در یک زون تعریف می‌شود. پیاده‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از **Java Agent Development Framework (JADE)** و ارزیابی آن بر روی یک شبکه توزیع آزمون، نشان‌دهنده کارایی آن در اجرای بازیابی ضمن اولویت‌بندی بارها است.

**واژه‌های کلیدی:** بازیابی بار، سیستم چندعامله، شبکه توزیع، اولویت‌بندی بار

**نوع مقاله:** پژوهشی

**DOI:** 10.52547/jiaeee.19.1.237

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی اخوین

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان کریم خان زند - خیابان ایرانشهر شمالی - شماره ۲۲۳ - ساختمان مرکزی دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران جنوب - کد پستی ۱۵۸۴۷۱۵۴۱۴

## ۱- مقدمه

چگونگی تعیین وظایف عاملها در یک سیستم، از جمله مواردی هستند که در معماری سیستم چندعامله مورد بحث قرار می‌گیرند.

روشهایی هم وجود دارند که هم از مفهوم مدیریت غیرمتمرکز (سیستم چندعامله) و هم از ابزارهای محاسباتی سازگار با مدیریت متمرکز، استفاده کرده‌اند. این روشها دارای مشکلاتی نظیر کارکرد پیچیده عاملها (مثلاً در بعضی از موارد عامل ناگزیر است یک فرآیند ریاضی را تا رسیدن به جواب اجرا کند) و احتمال ناکارآمد شدن شرح و تقسیم وظایف بین عاملها (مثلاً اینکه یک عامل هوشمند نظیر یک مرکز کنترل رفتار کند) را دارند. این مشکلات با فلسفه طراحی و بکارگیری سیستم چندعامله در تعارض است. چراکه فلسفه بکارگیری این سیستمها، پرهیز از تمرکز تصمیم‌سازی است. پس، سیستمهای چندعامله هم از نظر مزیت ایجاد قابلیت مدیریت غیرمتمرکز و هم از نظر نحوه طراحی ساختار و بکارگیری عاملها، جای کار بیشتری دارند. در این مقاله روشی براساس سیستم چندعامله برای بازیابی شبکه‌های توزیع شعاعی پیشنهاد می‌شود. با توجه به مقالات مرور و نکات مطرح شده در پاراگراف‌های قبلی، مهمترین مزایای روش پیشنهادی عبارتند از:

- معماری غیرپیچیده سیستم چندعامله که باعث کاهش میزان مدیریت متمرکز بازیابی و مشکلات مربوطه در فرآیند آن می‌گردد.
- امکان تمایز بارها در بازیابی، که بصورت انواع مختلف بارها و اولویت متناظر با آنها در اولویت‌بندی لحاظ می‌شود.
- پرهیز از اجرای محاسبات پیچیده ریاضی توسط عاملها که روند کار را مشابه روشهای سنتی مبتنی بر بهینه‌سازی نسازد.
- طراحی سیستم چندعامله و تعریف شرح وظایف عاملها بصورتی که تعداد پیام‌های ارسالی بین عاملها کاهش یابد.

ادامه این مقاله شامل پنج قسمت است. قسمت دوم؛ معماری سیستم چندعامله را ارائه می‌دهد. در قسمت سوم؛ مفروضات و نکات فنی لحاظ شده مطرح میشوند. قسمت چهارم وظایف عاملها و چگونگی ارتباط آنها با یکدیگر را شرح می‌دهد. در قسمت پنجم، نتایج شبیه‌سازی سیستم چندعامله پیشنهادی در یک شبکه توزیع ارائه می‌شود. قسمت نتیجه‌گیری، این مقاله را خاتمه می‌دهد.

## ۲- اجزای سیستم چندعامله پیشنهادی

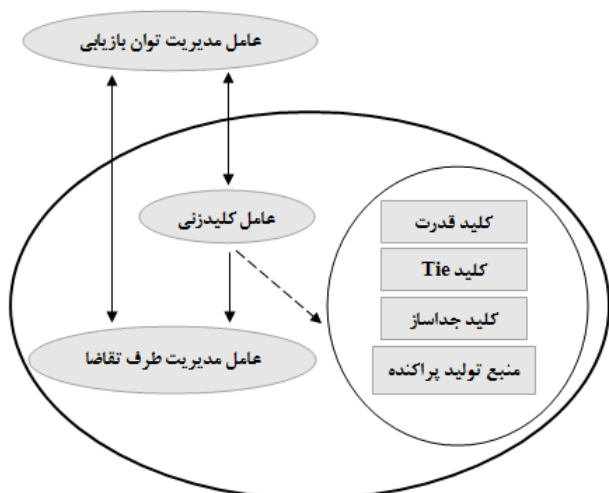
تعریف اجزای سیستم چندعامله در این مقاله، بر مبنای ایده اصلی بکار رفته در بازیابی است. در این ایده، فرض می‌شود بهره‌بردار شبکه توزیع اولویت‌بندی زون‌های قطع شده برای بازیابی را با توجه به انواع بار موجود در یک زون انجام می‌دهد. در فیدر اصلی، منظور از زون (با مخفف Z)، بخش‌هایی است که بوسیله دو کلیدجدا ساز می‌تواند جدا شود. با توجه به ایده فوق، سیستم چندعامله پیشنهادی، سه نوع عامل را شامل می‌شود. این عوامل عبارتند از: عامل مدیریت توان بازیابی<sup>۱</sup>، عامل کلیدزنی<sup>۲</sup> و عامل مدیریت طرف تقاضا<sup>۳</sup>. این عاملها نرم‌افزاری

پس از وقوع خطا و قطع برق در شبکه توزیع، مهم است که مسیره‌های اصلی و پشتیبان برق‌رسانی به بارها بگونه‌ای تعیین شوند که بتوان حداکثر بارهای قطع شده را به مدار بازگرداند. این عملیات تحت عنوان کلی بازیابی شناخته می‌شود [۱]. فرآیند بازیابی در شبکه‌های توزیع بدلیل تعداد زیاد تجهیزات و ترکیب‌های متعدد مسیره‌های برق‌رسانی، پیچیده است و به ابزارهای محاسباتی و تصمیم‌گیری نیاز دارد. علاوه بر این، ورود تکنولوژی‌های جدید به شبکه توزیع، نظیر منابع تولید پراکنده، به پیچیدگی این کار می‌افزاید. بنابراین تسهیل فرآیند بازیابی اهمیت زیادی دارد.

روش‌های بازیابی را می‌توان به سه گروه تقسیم‌بندی کرد: مبتنی-بر بهینه‌سازی، با استفاده از سیستم‌های خبره و مبتنی بر الگوریتم‌های اکتشافی. در گروه اول، به بازیابی نظیر یک مسأله بهینه‌سازی مقید نگریسته و از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی با تابع هدف و قیود مختلف استفاده می‌شود [۲] و [۳]. در سیستم‌های خبره، قوانین تجربی بشکل نظام‌مند و در قالب برنامه‌های کامپیوتری بکار می‌رود [۴] و [۵]. در الگوریتم‌های اکتشافی، تکنیک‌هایی برای ساده‌سازی و بالابردن کارایی روش‌های مبتنی بر محاسبات پیچیده بکار گرفته می‌شود [۶-۸]. همچنین، در این روشها، مدیریت بازیابی دو رویکرد متمرکز یا غیرمتمرکز دارد. روشهای بازیابی متمرکز دارای مشکلاتی نظیر انعطاف‌پذیری کم، ابتکار عمل کم در سطوح پایین‌تر و نیاز به حجم زیاد تبادل داده بین سطوح پایین و بالا هستند که می‌تواند باعث کندی شود [۹]. برای حل این مشکلات، روشهای غیرمتمرکز پیشنهاد شدند. این روشها به‌دلیل امکان تصمیم‌گیری محلی، مزایای انعطاف‌پذیری بالا و ابتکار عمل بیشتر در سطوح پایین‌تر را دارند. ضمن اینکه نیازی نیست تمام داده‌ها برای تصمیم‌سازی به سطوح بالاتر مخابره شود. این مزایا باعث شده که مطالعه روی روشهای غیرمتمرکز بازیابی توجه بیشتری را به خود جلب کند. یکی از روشهای با قابلیت مدیریت غیرمتمرکز بازیابی، بکارگیری سیستم چندعامله است [۱۰-۱۴].

یک سیستم چندعامله، شامل چندین عامل هوشمند است که برای حصول مجموعه‌ای از اهداف یا انجام مجموعه‌ای از وظایف بایکدیگر تعامل می‌کنند [۱۵]. این عاملها ساختار نرم‌افزاری دارند که اضافه شدن آنها به سخت‌افزارهای مورد نظر در سیستم، قابلیت تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند. می‌توان گفت که عوامل مذکور، باعث پخش شدن هوش مصنوعی در سیستم میشوند چراکه هر عامل هوشمند، قابلیت تصمیم‌گیری محلی و خودمختار دارد [۱۶]. تصمیم‌های گرفته شده توسط عاملها در یک سیستم چندعامله، معمولاً براساس قوانین سیستم‌های خبره می‌باشد [۱۷]. با این ویژگیها، سیستم‌های چندعامله، راه مناسبی را برای توصیف و طراحی سیستم‌های با محاسبات غیرمتمرکز ارائه می‌کنند [۱۸]. تعداد عاملها و

یافته است صورت می‌گیرد. در ضمن، فرض شده بخشی از اطلاعات مورد نیاز عامل‌های پایین‌دست و تجهیزات، در عامل‌های بالادست وجود دارد تا تعداد و حجم پیام‌ها کاهش یابد. یعنی عامل‌های بالادست برخی از اطلاعات درباره عامل‌های پایین‌دست و تجهیزات تحت فرمان آنها را دارند و نیاز به مخابره تمام اطلاعات نیست. این داده‌های موجود، اطلاعات اولیه نامیده میشوند. مثلاً زون‌هایی که کلید Tie دارند، از قبل در عامل مدیریت توان بازیابی معلوم هستند. جدول (۱) اطلاعاتی را خلاصه می‌کند که برای عاملها، از قبل معلوم فرض شده است.



شکل (۱): حوزه ارتباط عاملها

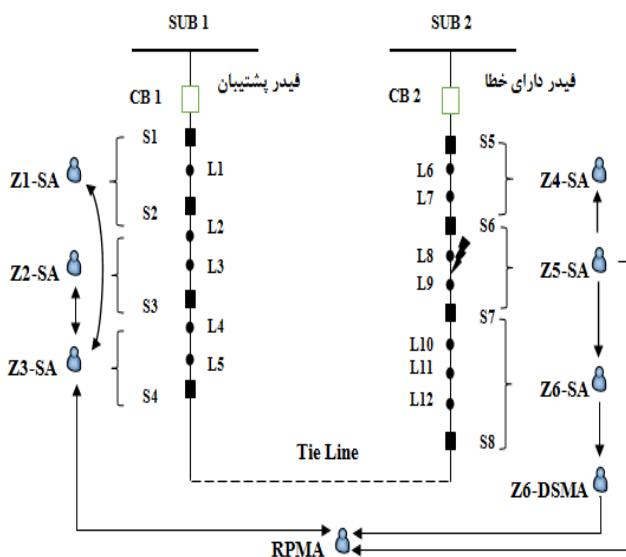
هستند و به تجهیزات منتخب در شبکه اضافه میشوند تا به آنها قابلیت تصمیم‌گیری دهند. نتیجه این تصمیمات، مجموعه عملیات کلیدزنی برای بازیابی است.

شکل (۱) حوزه ارتباط هر عامل با دیگر عاملها و تجهیزات را نشان می‌دهد. در این شکل پیکان یک‌جهته، دوجهته و خط‌چین بترتیب بیانگر ارتباط یکطرفه، دوطرفه و فرمان اجرایی می‌باشد. همانطور که در شکل مشخص است، حوزه ارتباط عامل مدیریت توان بازیابی دو عامل دیگر را شامل می‌شود (مرز بیضی). این عامل، یک عامل بالادست یا فرامحلی است که تصمیمات مربوط به استفاده مناسب از ظرفیت‌های توان برای بازیابی را برعهده دارد. عامل کلیدزنی بیشتر وظیفه اجرایی دارد و با تجهیزاتی شامل: کلید قدرت (Circuit Breaker)، کلید Tie، کلید جداساز (Sectionalizer Switch) و منبع تولید پراکنده (Distributed Generator) در ارتباط است (مرز دایره‌ای شکل). پس، این عامل می‌تواند تصمیمات را اجرا کند. عامل مدیریت طرف تقاضا، یک عامل تصمیم‌ساز است که حوزه کاری آن به نقاط بار محدود می‌شود. این عامل به اولویت‌بندی زون‌ها با توجه به نوع بار داخل زون توجه می‌کند و تصمیمات اتخاذ شده خود را به عامل مدیریت توان بازیابی ارسال می‌کند. جزئیات بیشتر عملکرد عاملها در قسمت چهارم توضیح داده می‌شود. شکل (۲) ارتباط بین عاملها در طول فیدر را نشان می‌دهد. در این شکل، یک عامل مدیریت توان بازیابی برای کل شبکه، یک عامل کلیدزنی و یک عامل مدیریت طرف تقاضا به تمام زون‌های فیدر اختصاص داده شده است.

در خصوص تبادل اطلاعات بین عاملها در این مقاله فرض شده ارتباط مذکور بوسیله <sup>f</sup> ACL [۱۶] که توسط <sup>e</sup> FIPA [۱۹] توسعه

جدول (۱): اطلاعات اولیه

اطلاعات اولیه		عامل	
۱	زون‌های فیدر	۱	عامل کلیدزنی
۲	کلید قدرت و کلیدهای جداساز تشکیل دهنده زون		
۳	عامل مدیریت توان بازیابی و عامل مدیریت طرف تقاضای زون		
۴	اطلاعات مربوط به زون (حد مجاز جریان شاخه)		
۵	اطلاعات منبع تولید پراکنده (ظرفیت مجاز و ضریب قدرت)		
۲	۱	اطلاعات گره‌های بار زون‌ها (نوع بار و اندازه بار قبل از خطا)	عامل مدیریت طرف تقاضا
	۲	عامل مدیریت توان بازیابی و عامل کلیدزنی زون	
۳	۱	زون‌های دارای منبع تولید پراکنده و کلید Tie	عامل مدیریت توان بازیابی
	۲	فیدرهای شبکه	



RPMA: عامل مدیریت توان با وصل

Z6-DSMA: عامل مدیریت طرف تقاضا زون شماره ۶

Z6-SA: عامل کلیدزنی زون شماره ۶

شکل (۲): ارتباط بین عاملها در طول فیدر

### ۳- مفروضات و نکات فنی مربوط به بازیابی

- در این مقاله علاوه بر لحاظ شدن مفروضات و نکات فنی متداول در بازیابی که در [۲۰-۲۳] ذکر شده، موارد زیر نیز در نظر گرفته می-شود:
- منابع تولید پراکنده در تملک شرکت توزیع و تحت کنترل بهره-بردار شبکه هستند. فرض اخیر به این معنی است که فرآیند بازیابی پیشنهادی برای اجرا در محیط تجدید ساختار شده (Restructured) در نظر گرفته نشده و یا محیط سنتی فرض شده است. در این ساختار، نهادهای مختلف در شبکه توزیع با هم رقابت نمی کنند و لذا می توان فرض کرد تمام منابع تولید پراکنده موجود در شبکه تحت تملک یا کنترل شرکت توزیع هستند. قیود بهره برداری شبکه مانند حفظ قید شعاعی بودن و قید ولتاژ ایجاب می کند تا وارد شدن این منابع به شبکه با تصمیمات اتخاذ شده بهره بردار شبکه در زمان بازیابی سازگار باشند.
- در یک زون نمی تواند هم کلید Tie و هم منبع تولید پراکنده وجود داشته باشد (فقط یکی از این دو وجود دارد). برآوردن قیود افت ولتاژ، می تواند با اتصال منابع تولید پراکنده به باس هایی صورت گیرد که در زمان پرباری دچار افت ولتاژ میشوند و یا بارهای با اولویت بیشتر به آنها متصل شده اند. از طرف دیگر، یک کلید Tie سعی می کند مسیری را ایجاد نماید که به سمت باس دارای ظرفیت آزاد کافی باشد. چون این دو کار، رویکردهای مختلفی برای حل یک مشکل هستند، فرض می شود که لزومی به استفاده همزمان از هر دوی آنها در یک زون نیست.

• با استفاده از اطلاعاتی که عامل کلیدزنی به عامل مدیریت توان بازیابی می دهد، کلید یا کلیدهای Tie برای کلیدزنی انتخاب می-شود. این انتخاب با توجه به ظرفیت موجود توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده است تا احتمال بروز مشکل در توازن توان و نقض قید ولتاژ در طی بازیابی ناچیز شود. در ضمن کلیدزنی بگونه ای انجام می شود که مقدار توان دریافت شده از کلیدهای Tie برای بازیابی، از حداکثر توان قابل حصول آنها بیشتر نشود.

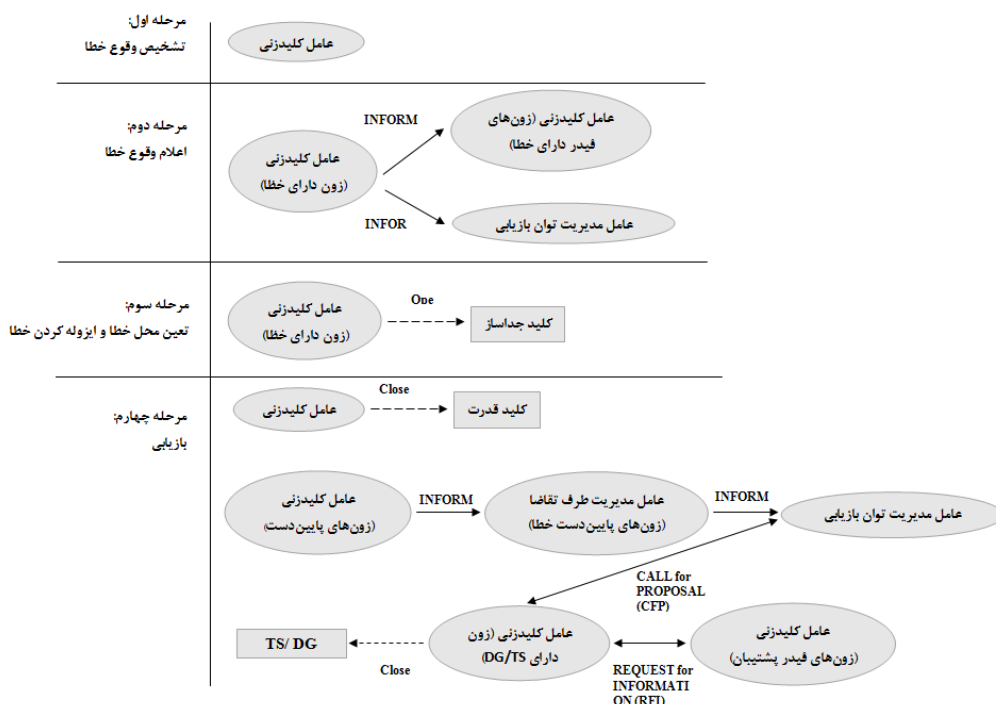
### ۴- اجرای بازیابی با استفاده از روش پیشنهادی

فرآیند بازیابی از لحظه وقوع خطا در فیدر تا به مدار برگرداندن حداکثر بارهای بی-برق، شامل چهار مرحله است. شکل (۳) این مراحل را به همراه ارتباط بین عملیات و تجهیزات نشان می دهد. اطلاعات پیش از وقوع خطا بعنوان مقاردهی اولیه، توسط عامل کلیدزنی برای شروع فرآیند بازیابی مورد استفاده قرار می گیرد. سپس عوامل دیگر، به شرح وظایفی که در ادامه می آید، وارد بازیابی می شوند.

#### ۴-۱- عامل کلیدزنی

وظایفی که این عامل انجام می دهد بترتیب زیر است:

- پس از تشخیص وقوع خطا و کلیدزنی های لازم برای ایزوله کردن زون مربوط به خود، با ارسال پیام به دیگر عاملهای کلیدزنی و عامل مدیریت توان بازیابی، وقوع خطا را اطلاع رسانی می کند (پیام INFORM با محتوای اعلام وقوع خطا).



شکل (۳): عاملها و تجهیزات درگیر در هر مرحله از بازیابی

از طرفی، جداسازی تک تک بارها و در نظر گرفتن آنها در اولویت بندی کار دشواری است. از طرف دیگر، در نظر نگرفتن تنوع بارها ممکن است بعضی بارهای تأثیرگذار را در فرآیند بازیابی نادیده بگیرد. لذا، در روش پیشنهادی، بارها در چند نوع گروه بندی و بر مبنای این گروه‌ها، اولویت بندی میشوند. بر این اساس، با توجه به نوع بارهای موجود در زون، یک اولویت به آن زون می‌توان اختصاص داد. اولویت بارها از بالاترین به پایین‌ترین، به این ترتیب بر حسب نوع در نظر گرفته می‌شود: صنعتی، تجاری، دولتی و اداری و مسکونی. هر زون که نوع مهمتری از بارها را در خود داشته باشد دارای اولویت بالاتری برای بازیابی است. در حالتی که دو زون دارای نوع بار یکسان باشند، مقدار بار آنها تعیین کننده است. در حالتی که بار یک زون مرکب از چند نوع باشد، ابتدا نوع بار و سپس مقدار آن تعیین کننده اولویت خواهد بود.

## ۵- مطالعه عددی

در این قسمت صحت عملکرد روش پیشنهادی بر روی شبکه شعاعی ۱۱ کیلو ولت نشان داده شده در شکل (۴) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اطلاعات این شبکه در [۱۵] ذکر شده است. انواع بار در گره-های شبکه، نظیر مطالبی است که در [۲۴] برای باس ۲ شبکه RBTS در نظر گرفته شده است. جدول (۲) اطلاعات بار هر زون را نشان می‌دهد. در ضمن مقدار باری که نشان داده شده است، مقدار بار قبل از خطا است. سیستم چندعامله در JADE [۲۵] پیاده سازی شده است که مطابق با استانداردهای FIPA است. تمام اعداد بر حسب p.u. می‌باشد.

## ۵-۱- مطالعه اول - بازیابی کامل

هدف از این مطالعه بررسی حالتی است که بتوان کل بارهای قطع شده را به مدار بازگرداند. فرض می‌شود خطا در زون  $Za7$  فیدر  $a$  رخ داده است. پس از قطع شدن FCB-1 اقدامات ذیل توسط عامل کلیدزنی  $Za7$  بترتیب انجام می‌شود:

- ایزوله کردن خطا- ارسال فرمان باز شدن به کلیدهای جداساز زون خود (S7 و S8)
- به مدار برگرداندن زون‌های بالادست خطا (Za1-Za6)- ارسال فرمان وصل دوباره FCB-1
- ارسال پیام اعلام وقوع خطا به دیگر عاملهای کلیدزنی فیدر  $a$  و عامل مدیریت توان بازیابی

- در صورت تشخیص بدون برق بودن باس، با ارسال پیام به عامل مدیریت طرف تقاضا، بازیابی بارهای زون خود را درخواست می‌کند (پیام INFORM با محتوای درخواست بازیابی).
- اطلاعات فنی (طبق جدول اطلاعات اولیه) کلید Tie یا منابع تولید پراکنده را به درخواست عامل مدیریت توان بازیابی، ارسال می‌کند.
- درخواست اطلاعات (ارسال پیام REQUEST for INFORMATION با مخفف RFI) به عامل کلیدزنی زون‌های فیدر پشتیبان جهت دریافت اطلاعات مربوط به زون (مطابق با جدول اطلاعات اولیه)، سپس محاسبه توان قابل ارائه جهت بازیابی از طریق کلید Tie موجود در زون و در نهایت اعلام آن به عامل مدیریت توان بازیابی (پاسخ به پیام CALL for PROPOSAL با مخفف CFP که این پیام حاوی درخواست اعلام توان قابل ارائه توسط فیدر پشتیبان می‌باشد).
- بستن کلید Tie یا بکارگیری منبع تولید پراکنده به منظور انتقال توان بازیابی به فیدر بی‌برق و تأمین بخشی از بارها به فرمان عامل مدیریت توان بازیابی
- در صورت نیاز، باز کردن کلید جداساز جهت ایجاد پیکربندی جدید شبکه به فرمان عامل مدیریت توان بازیابی

## ۴-۲- عامل مدیریت توان بازیابی

این عامل پس از دریافت پیام از عامل کلیدزنی و پیام‌های حاوی توان مورد نیاز بازیابی (پیام INFORM با محتوای مقدار توان مورد نیاز جهت بازیابی) از عاملهای مدیریت طرف تقاضا، فعالیت خود را به شرح زیر آغاز می‌کند:

- تشکیل مجموعه کلیدهای Tie مجاور فیدر دارای خطا
- اولویت بندی زون‌های بی‌برق با استفاده از اطلاعات ارسال شده از هر عامل مدیریت طرف تقاضا
- تخصیص زون‌های بی‌برق به کلیدهای Tie ضمن رعایت قید شعاعی بودن شبکه بگونه‌ای که بارهای بازیابی شده و تعداد کلیدزنی بترتیب حداکثر و حداقل باشد.
- ارسال فرمان بستن/ باز کردن کلیدهای جداساز لازم به عاملهای کلیدزنی مربوطه، جهت اجرای بازیابی با رعایت توالی و زمان کلیدزنی

## ۴-۳- عامل مدیریت طرف تقاضا

- وظایف این عامل، عبارتند از:
- محاسبه مجموع توان مورد نیاز بازیابی و اولویت زون مربوطه پس از دریافت پیام درخواست بازیابی از عامل کلیدزنی. نحوه محاسبه اولویت زون در ادامه توضیح داده خواهد شد.
  - ارسال مجموع توان مورد نیاز بازیابی و میزان اولویت زون به عامل مدیریت توان بازیابی

با توجه به محل خطا، کلیدهای Tie در دسترس عبارتند از: Tie1 در زون Zc6 در فیدر Feeder-c و Tie3 در زون Zd6 در فیدر Feeder-d. عامل مدیریت توان بازیابی پس از دریافت پیام وقوع خطا از عامل کلیدزنی Za7 به عاملهای کلیدزنی دو زون Zc6 و Zd6 پیام CFP ارسال می‌کند.

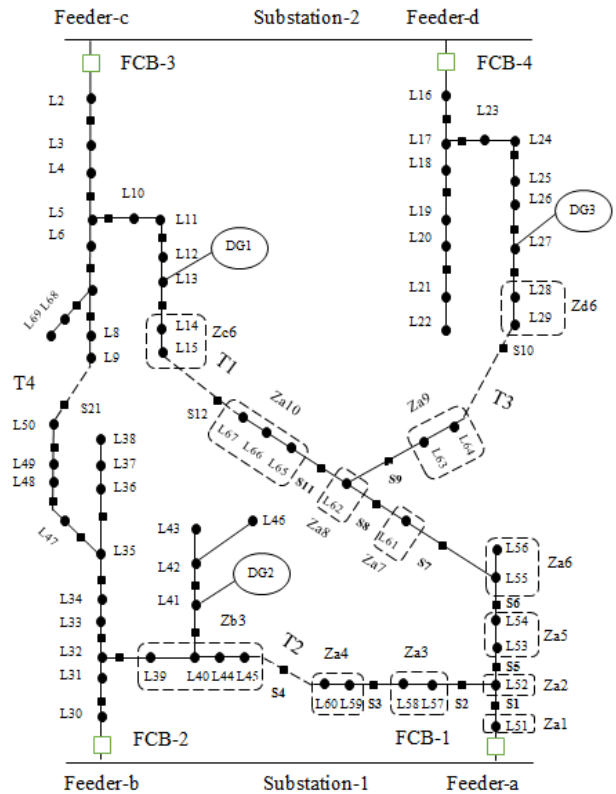
عاملهای کلیدزنی Zc6 و Zd6 پس از دریافت پیام CFP اقدامات زیر را بصورت مجزا انجام می‌دهد:

- ارسال پیام RFI به دیگر عاملهای کلیدزنی متناظر با فیدر خود جهت دریافت اطلاعات لازم برای محاسبه توان قابل ارائه جهت بازیابی
- محاسبه توان قابل ارائه جهت بازیابی و ارسال آن به عامل مدیریت توان بازیابی - این مقادیر برای Tie3 و Tie1 بترتیب برابر است با ۰,۰۶۷۸ و ۰,۰۸۹. این عامل براساس قوانین تجربی و برای جلوگیری از نقض قیود بهره‌برداری، حداکثر توان مجاز قابل دریافت از Tie3 و Tie1 را بترتیب برابر با ۰,۳۶۲ و ۰,۰۴۵ در محاسبات لحاظ می‌کند.

بطور همزمان، عامل مدیریت طرف تقاضا در زون‌های پایین دست خطا (Za8-Za10) پس از دریافت پیام بی‌برق بودن از عامل کلیدزنی اولویت، مجموع توان مورد نیاز زون خود را بطور مجزا محاسبه کرده و به عامل مدیریت توان بازیابی ارسال می‌کنند. در این مطالعه کل بار زون‌های پایین دست خطا (Za8-Za10) برابر با ۰,۱۳۷۲ است. در انتها عامل مدیریت توان بازیابی با گذراندن مراحل که در قسمت ۴-۲ ارائه شد، با ارسال پیام به عامل کلیدزنی Zc6 فرمان بسته شدن کلید S12 را صادر می‌کند تا به این ترتیب زون‌های قطع شده به مدار بازگردند. لازم به ذکر است عامل مدیریت توان بازیابی، تمام ترکیبات ممکن از دو کلید Tie موجود را با کل توان مورد نیاز زون‌ها جهت بازیابی کامل مقایسه می‌کند. این عامل ابتدا به بررسی امکان پذیر بودن بازیابی از طریق فقط Tie1 می‌پردازد که بازیابی کل بارهای قطع شده از طریق Tie1 ممکن تشخیص داده می‌شود.

## ۵-۲- مطالعه دوم - بازیابی جزئی (بدون منابع تولید پراکنده و اولویت بندی)

این مطالعه مطابق با حالتی است که حداکثر توان مجاز قابل دریافت از فیدرهای پشتیبان برای بازیابی تمام بارهای قطع شده کافی نباشد. فرض می‌شود خطا در زون Za1 رخ داده است. ایزوله شدن خطا مشابه مورد اول است. از آنجاییکه خطا در زون اول فیدر a رخ داده است، عامل کلیدزنی Za1 فرمان وصل دوباره FCB-1 را ارسال نمی‌کند. کل توان مورد نیاز زون‌های پایین دست خطا (Za2-Za10) برابر با ۱,۳۷۲ است و کلیدهای Tie1-Tie3 در دسترس می‌باشند. عامل کلیدزنی Zb3 توان قابل ارائه جهت بازیابی Tie2 را برابر با ۰,۲۶۵ محاسبه کرده و برای عامل مدیریت توان بازیابی ارسال می‌کند. توالی بازیابی مشابه مطالعه اول است. عامل مدیریت توان بازیابی توان



شکل (۴): شبکه نمونه مورد مطالعه [۱۵]

جدول (۲): اطلاعات فیدر a [۲۴]

مقدار بار قبل از خطا (p.u.)	نوع بار	گره بار	زون
۰,۱۱۴	دولتی و اداری	L51	Za1
۰,۰۷۸	مسکونی	L52	Za2
۰,۰۲۲	مسکونی	L57 L58	Za3
۰,۱۱۴	دولتی و اداری	L53 L54	Za4
۰,۰۳۷	مسکونی	L59 L60	Za5
۰,۳۸۴	تجاری	L63 L64	Za6
۰,۱۰۶	مسکونی، دولتی و اداری	L61	Za7
۰,۰۴۱	تجاری و مسکونی	L62	Za8
۰,۲۴۵	تجاری	L55 L56	Za9
۰,۳۴۵	صنعتی	L65	Za10

جدول (۳): نتایج بازیابی

مطالعه دوم							
وضعیت کلیدهای جداساز	وضعیت کلیدهای Tie			مقدار بار بازیابی شده (p.u.)	زون های بازیابی شده		
S11	S12 ( T1)	S4 ( T2)	S10 ( T3)	S21 ( T4)	Za3, Za4	۰,۱۳۶	
باز	بسته	بسته	باز	باز	Za10	۰,۳۴۵	
مطالعه سوم							
S9	S7	S6	S12 ( T1)	S4 ( T2)	S10 ( T3)	S21 ( T4)	Za2-Za5
باز	باز	باز	بسته	بسته	باز	باز	Za10, Za7-Za8

پراکنده بارهای با اهمیت بازیابی شدند. همانطور که از دو ستون توان بازیابی شده و زون های بازیابی شده در جدول (۳) مشخص است مقدار بار بازیابی شده و زون های بازیابی شده نسبت به مطالعه دوم بیشتر است. در ضمن زون های با اولویت بالاتر بازیابی شده اند.

معیارهای کمی مختلفی می توانند برای مقایسه عددی عملکرد بازیابی مورد استفاده قرار گیرند. از جمله این معیارها می توان به تعداد گامهای بازیابی و حداکثر توان قابل ارائه به بارها پس از بازیابی اشاره کرد. به عنوان نمونه، در این مقاله عملیات انجام شده توسط عاملها جهت اجرای وظایف محول شده نسبت به آنچه در [۱۷] پیشنهاد شده است، حدود ۲۵ درصد گامهای بازیابی کمتری دارد. مثال دیگر، مقایسه مطالعه دوم در این مقاله نسبت به عملیات بازیابی است که در [۱۷] گزارش شده است. در مطالعه دوم نسبت به همین شرایط در [۱۷]، حدود ۸,۲ درصد بار بیشتری به مدار برمی گردد. همچنین در معماری سیستم چندعامله پیشنهادی یک عامل کمتر طراحی شده است که باعث می شود تعداد پیامهای جابجا شده بین عاملها کاهش یافته و بازیابی با سرعت بیشتری انجام شود.

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش بازیابی مبتنی بر سیستم چندعامله شبکه های توزیع شعاعی ارائه شد. در معماری سیستم چندعامله، یک عامل برای تصمیم گیری درباره اولویت بندی بارها، یک عامل برای تصمیم گیری درباره ظرفیت های موجود بازیابی و یک عامل برای اجرای کلیدزنی های لازم در نظر گرفته شده است. این عاملها برپایه قوانین تجربی اپراتور عمل می کنند. در اولویت بندی بارها، نوع بار (صنعتی، تجاری، دولتی و اداری و مسکونی یا ترکیبی از آنها) لحاظ گردید. برای نشان دادن مؤثر بودن روش پیشنهادی، حالت های مختلف بر روی یک شبکه شعاعی بررسی شد. نتایج این مطالعات نشان می دهد تصمیمات اتخاذ شده توسط عاملها مناسب و کارآمد است. پیشنهادهایی برای توسعه روش این مقاله قابل ذکر هستند، از جمله در نظر گرفتن شاخص های جدید اولویت بندی مانند ویژگی های فنی بارها از دید شبکه و قراردادهای منعقد شده بین مصرف کنندگان و بهره بردار شبکه جهت مدیریت مصرف.

قابل برداشت از Tie2 را برابر با ۰,۱۴۷ در محاسبات خود لحاظ می کند. نتایج بازیابی در جدول (۳) آورده شده است. به منظور اجرای تصمیمهای گرفته شده، عامل مدیریت توان بازیابی، فرمان باز شدن کلیدهای جداساز S2 و S11 را به عاملهای کلیدزنی مربوطه و سپس فرمان بسته شدن کلیدهای S4 و S12 را بترتیب به عاملهای کلیدزنی Zc6 و Zb3 ارسال می کند.

### ۵-۳- مطالعه سوم- بازیابی جزئی (با منابع تولید پراکنده و اولویت بندی)

این مطالعه مشابه مورد قبلی است با این تفاوت که اولویت بندی و منابع تولید پراکنده به آن اضافه شده است. عامل مدیریت توان بازیابی پس از دریافت پیام وقوع خطا از عامل کلیدزنی زون Za1، به عاملهای کلیدزنی زون های Zb3, Zc5 و Zd5 پیام RFI ارسال می کند. عامل مدیریت توان بازیابی براساس اطلاعات دریافت شده، حداکثر توان مجاز قابل دریافت از این منابع را بترتیب برابر با ۰,۱۴ برای DG-1، ۰,۱۲۷ برای DG-2 و ۰,۱۸۵ برای DG-3 در محاسبات خود لحاظ می کند. بنابراین حداکثر توان مجاز قابل دریافت از کلیدهای Tie2, Tie1 و Tie3 بترتیب به مقادیر ۰,۵۰۲، ۰,۲۶۷ و ۰,۲۳ افزایش می یابد. توالی بازیابی مشابه مطالعه دوم و نتایج بازیابی در جدول (۳) آورده شده است. به منظور اجرای تصمیمهای گرفته شده، عامل مدیریت توان بازیابی فرمان باز شدن کلیدهای جداساز S6, S7 و S11 را به عاملهای کلیدزنی مربوطه و سپس فرمان بسته شدن کلیدهای S4 و S12 را بترتیب به عاملهای کلیدزنی Zc6 و Zb3 ارسال می کند.

از دیدگاه مقایسه مطالعات انجام شده، می توان گفت که سیستم چندعامله پیشنهادی توانایی بازیابی کامل (مطالعه اول) و جزئی (مطالعه دوم و سوم) را دارد. در بازیابی کامل، سیستم چندعامله با استفاده از S12 (Tie1) بارهای بی برق را بطور کامل بازیابی می کند. در مطالعه دوم و سوم، بازیابی بصورت جزئی و با بکارگیری منابع تولید پراکنده و اولویت بندی زون ها اجرا می شود. در مطالعه دوم، بازیابی به حداکثر توان قابل دریافت از هر کلید Tie بستگی دارد و لذا در این حالت بخش قابل توجهی از بارهای تجاری بازیابی نشدند. در مطالعه سوم با استفاده از اولویت بندی پیشنهادی و اعمال ظرفیت منابع تولید

- intelligence. : MIT Press, Cambridge, MA, USA, pp. 27–78, 1999.
- [17] Ahmed Abel Hafez, Walid A. Omran, Yasser G. Higazi, "A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, Issue 3, pp. 1911–1919, 2016.
- [18] M. N. Huhns and L. M. Stephens, Multiagents systems: a modern approach to distributed artificial intelligence. MIT Press Cambridge, MA, USA., 1999, pp. 79–120.
- [19] The Foundation for Intelligent Physical Agents, <http://www.fipa.org>.
- [20] J. Solanki, S. Khushalani and N. Schulz, "A multi-agent solution to distribution systems restoration", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 22, Issue 3, pp. 1026-1034, 2007.
- [21] C. P. Nguyen, A. J. Flueck, "Agent based restoration with distributed energy storage support in smart grids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 2, pp. 1029-1038, June 2012.
- [22] T. Nagata, H. Sasaki, "A multi-agent approach to power system restoration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 457-462, May 2002.
- [23] Sharma, A.; Srinivasan, D.; Trivedi, A., "A decentralized multiagent system approach for service restoration using DG islanding," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.6, No.6, pp.2784-2793, Nov. 2015.
- [24] R. Billinton, S. Kumar, N. Chowdhury et al., "A reliability test system for educational purposes", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 1238-1244, 1989.
- [25] JADE agent development toolkit:<http://jade.tilab.com>
- [1] W. Chen, "Quantitative decision-making model for distribution system restoration", IEEE Transactions on power systems, Vol. 25, No. 1, Feb. 2010.
- [2] Y. Kumar, B. Das and J. Sharma, "Multiobjective, multi-constraint service restoration of electric power distribution system with priority customers", IEEE Transactions on Power Delivery., Vol. 23, pp. 261-270, 2008.
- [3] W. P. Luan, M. R. Irving, and J. S. Daniel, "Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks," IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, No. 2, pp. 145–151, Mar. 2002.
- [4] C. C. Liu, S. J. Lee and S. S. Venkata, "An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, pp. 619-626, 1988.
- [5] H. J. Lee, Y. M. Park, "A restoration aid expert system for distribution substations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, pp. 1765-70, Oct. 1996.
- [6] Takeru Inoue, Norihito Yasuda, Shunsuke Kawano, Yuji Takenobu, Shin-ichi Minato, Yasuhiro Hayashitakeru, "Distribution network verification for secure restoration by enumerating all critical failures", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, Issue 2, pp. 843–852, 2015.
- [7] S. Dimitrijevic, N. Rajakovic, "Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 3, pp. 1227-1232, May 2015.

[۸] نصرت پور. حسین و زنگنه. علی، "خودترمیمی بهینه شبکه‌های توزیع هوشمند مبتنی بر گراف درخت پوشا و بهبود قابلیت اطمینان شبکه"،

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۶:۱۳۹۸ (۱): ۹۱-۱۰۱

<sup>۱</sup>Switching Agent (SA)

<sup>۲</sup>Restoration Power Management Agent (RPMA)

<sup>۳</sup>Demand Side Management Agent (DSMA)

<sup>۴</sup>Agent Communication Language (ACL)

<sup>۵</sup>Foundation for Intelligent Physical Agencies (FIPA)

- [9] T. Nagata, H. Sasaki, "A multi-agent approach to power system restoration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 457-462, May 2002.
- [10] J.B. Leite, J.R.S. Mantovani, "Development of a self-healing strategy with multiagent systems for distribution networks", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2198-2206, 2016.
- [11] H. Sekhavatmanesh, R. Cherkaoui, "Distribution network restoration in a multi-agent framework using a convex OPF model", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 3, pp. 2618-2628, 2018.
- [12] A.A. Hafez, W.A. Omran, Y.G. Higazi, "A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 1911-1919, 2018.
- [13] A. Sharma, D. Srinivasan, A. Trivedi, "A decentralized multi-agent approach for service restoration in uncertain environment", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3394-3405, 2018.
- [14] R. F. Sampaio, L. S. Melo, R. P. S. Leão, G. C. Barroso, J. R. Bezerra, "Automatic restoration system for power distribution networks based on multi-agent systems", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, No. 2, pp. 475-484, Jan. 2017.
- [15] G. Weiss, Multiagent Systems: A Modern approach to distributed artificial intelligence, MIT Press, Cambridge MA, USA 1999.
- [16] M. Wooldridge, "Intelligent agents," in Multiagents systems: a modern approach to distributed artificial

## زیر نویس‌ها

