**تحلیل اثرگذاری برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انعطاف‌پذیر بر بهبود شاخص‌های پایایی در خودترمیمی شبکه توزیع هوشمند**

**صادق کریمی طالخونچه1و، علیرضا فریدونیان2، امیر مشاری3**

**1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران**

**2-** **استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران**

**3- استادیار، گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران**

**خلاصه**

پاسخ‌گویی بار یکی از تحولات جدید در حوزه مدیریت سمت مصرف بشمار می آید که در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه اجرای این برنامه‌ها صورت گرفته است. به طور کلی هدف از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند مواردی نظیر کاهش قیمت برق، بهبود گرفتگی خطوط، جبران کردن کمبود تولید و بهبود پایایی (قابلیت اعتماد) شبکه باشد. در این مقاله از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انعطاف‌پذیر استفاده شده است تا بدون نقض محدودیت‌های شبکه توزیع، علاوه بر بهبود شاخص‌های پایایی در فرآیند خودترمیمی، هزینه‌های شرکت‌های توزیع نیز کاهش یابند. وجود بارهای پاسخگو در شبکه دارای خطا این امکان را به شرکت‌های توزیع می‌دهد تا بدون نقض محدودیت‌های جریان فیدر پشتیبان و از طریق کاهش مصرف مشترکین فیدر خطادار و فیدر پشتیبان، به مشترکین بیشتری سرویس دهند. در این مقاله از برنامه‌های قیمت‌گذاری اوج بحرانی و کنترل مستقیم بار که به صورت انعطاف‌پذیر مدل‌سازی شده‌اند، استفاده شده است. همچنین تاثیر تغییرات قیمت و همچنین پرداخت‌های تشویقی بر شاخص‌های پایایی بررسی شده است. برای ارزیابی مدل پیشنهادی از شین شماره 4 سیستم تست روی – بیلینتون استفاده شده است.

**کلمات کليدي:** پاسخگویی بار، پایایی، خودترمیمی، بهبود خودترمیمی، شبکه هوشمند، برنامه قیمت گذاری اوج بحرانی، کنترل مستقیم بار

**1. مقدمه**

در سیستم های توزیع الکتریکی[[1]](#footnote-2)، فرآیند خودترمیمی[[2]](#footnote-3) توسط مجموعه‌ای از تجهیزات، الگوریتم‌ها و فن‌آوری‌های ارتباطی انجام می‌شود که پس از یک خطای دائمی ، اقدامات لازم را برای شناسایی محل خطا ، جداسازی بخش دارای خطا از سایر بخش‌های شبکه و بازیابی سیستم با حداقل بار تامین نشده (کمترین مشترک بی برق) تعیین و اجرا می‌نمایند [1]. بازیابی مشترکین از طریق انتقال مشتریان بی برق بدون خطا به منابع انتخابی صورت می‌گیرد که این منابع اختیاری می‌توانند مواردی نظیر فیدرهای مجاور، منابع تولید پراکنده[[3]](#footnote-4) و ذخیره‌سازهای انرژی توزیع شده[[4]](#footnote-5) باشند [2]. فرآیند خودترمیمی باید بتواند با حداقل مداخله انسانی ، در مدت زمان مناسب بهینه‌ترین راه‌حل‌های ممکن جهت بازیابی بارها که با توجه به محدودیت‌های شبکه قابل پیاده‌سازی هستند را ارائه دهد [1]. این امر در شبکه های هوشمند[[5]](#footnote-6) امکان‌پذیر است [3]. این‌گونه شبکه‌ها با استفاده از سیستم زیرساخت فناوری اطلاعات و یک سیستم اتوماسیون توزیع تلاش دارند تا با استفاده از اطلاعات همه ذینفعان، پایداری و پایایی سیستم قدرت را بهبود بخشند [4]. فرآیند خودترمیمی شامل چهار مرحله بی‌برق شدن شبکه و مکان‌یابی خطا، جداسازی ناحیه خطادیده، بازیابی سرویس، برطرف شدن خطا و پیکربندی مجدد شبکه است که تمامی مراحل مذکور به صورت اتوماتیک و بدون دخالت انسان انجام خواهند شد [5]. مراحل مختلف خودترمیمی در شکل 1 قابل مشاهده است.



شکل 1- مراحل مختلف خودترمیمی [6].

در مقالات مختلف به بررسي خودترميمي پرداخته شده است که در ادامه به بررسي تعدادي از آنها پرداخته خواهد شد. در مرجع [7] یک روش بازآرایی تکاملی و توزیع‌یافته برای خودترمیمی ارائه شده است. در این مقاله هدف یافتن بهترین رویکرد در کمترین زمان ممکن است. این راهکار با استفاده از یک الگوریتم مبتنی بر گراف که از یک فضای سرچ افزایشی و تکاملی بهره‌مند می‌شود، شناسایی می‌شود. در [8] برای بازیابی مشترکین بی‌برق شده در شبکه‌های توزیع هوشمند دارای منابع تولید پراکنده، یک روش چهار عاملی در نظر گرفته شده است که این عوامل عبارتند از: فیدر، منطقه، کلید و منابع تولید پراکنده. این عوامل برای بازیابی مشترکین بی‌برق شده می‌توانند با یکدیگر ارتباط گرفته و همکاری نمایند. خودترمیمی بر اساس داده‌های محلی با درنظر گرفتن شرایط شبکه، محدودیت‌های عملیاتی و محل خطا صورت می‌پذیرد. در [9] بازیابی سرویس با بهینه کردن تابع چند هدفه شامل بازیابی بیش‌ترین تعداد مشترکین قابل بازیابی، کمترین تعداد عملیات کلیدزنی، اولویت دادن به کلیدزنی‌های اتوماتیک و بازیابی سریع‌تر بارهای با اولویت بالاتر با استفاده از روش آنالیز سلسله مراتبی بررسی شده است. چگونگی رسیدن به یک بازیابی سرویس سریع و موثر در شبکه‌های توزیع برق[[6]](#footnote-7) (PDNs)، با در نظر گرفتن شبکه توزیع نامتوازن و تغییرات بار، هدف اصلی در مرجع [10] است. مرجع [11] از یک مدل مبتنی بر سناریوهاي مختلف براي انتخاب زیرساخت مخابراتی شبکه هوشمند استفاده نموده است.

در مرجع [12] نویسنده برای مسئله مکان‌سنجی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترلی یک برنامه‌ریزی خطی ارائه نموده است. این برنامه‌ریزی خطی با استفاده از سه سناریو برای انتخاب بهترین نوع کلیدها و آرایش کلیدها بررسی شده است. در مرجع [13] یک رویکرد سه حالته جدید با استفاده از الگوریتم بهینه‎سازی ازدحام ذرات، برای تعیین تعداد و مکان بهینه دو نوع کلید (کلیدهای جداکننده[[7]](#footnote-8) و مدار شکن‎ها[[8]](#footnote-9)) در سیستم‎های توزیع شعاعی تهیه و ارائه شده است. در این مرجع تابع هدف عبارت است از: کمینه‌سازی هزینه پرداختی به مشترکین به دلیل وقفه ایجاد شده در شبکه و همچنین هزینه سرمایه‎گذاری. در مرجع [14] به تعیین تعداد بهینه، انواع و مکان بهینه تجهیزات اتوماسیون در شبکه توزیع پرداخته شده است. در این مرجع، در تابع هدف، هزینه باز شدن و نصب مجدد تجهیزات اتوماسیونی که در حال حاضر در شبکه وجود دارند نیز لحاظ شده است. در [15] جایابی کلیدهای کنترل از راه دور و کنترل دستی و همچنین جایابی و تخصیص ظرفیت منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به صورت همزمان و با درنظر گرفتن محدودیت‌های فنی و اقتصادی شبکه انجام شده است. در این مرجع تابع هدف از دو قسمت کاهش هزینه‌های شبکه و بهبود شاخص پایایی سایدی تشکیل شده است. در [16] یک روش جدید برای جایابی کلیدهای کنترل از راه دور و دستی در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. راه‌حل ارائه شده در این مرجع خطی بوده و همچنین یک فرمولاسیون خطی برای پخش بار ارائه شده است. تابع هدف در این مقاله شامل دو بخش هزینه و پایایی است که بخش هزینه در برگیرنده مواردی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه های نصب و نگهداری و هزینه‌های قطعی مشترکین است. در [17] نشانگرهای خطا[[9]](#footnote-10) که از داده‌های زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته[[10]](#footnote-11) استفاده می‌کنند با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در شبکه‌های توزیع برق مکان‌یابی شده‌اند. تابع هدف در این مقاله شامل دو بخش هزینه و پایایی است که بخش هزینه در برگیرنده مواردی نظیر هزینه‌های قطعی مشترکین و هزینه‌های نصب نشانگرهای خطا است. همچنین بخش پایایی نیز با استقاده از شاخص سایدی مدل‌سازی شده است.

در مرجع [18] با استفاده از برنامه‎ پاسخ‎گویی بار اضطراری جایابی بهینه ادوات کنترلی و حفاظتی انجام شده است. هدف این مقاله کمینه‌سازی هزینه وقفه، هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری تجهیزات بوده است. در این مرجع در طول فرآیند بازیابی بار شبکه ثابت فرض شده است. در مرجع [19] برنامه پاسخ‎گویی بار اضطراری جهت تقویت ترمیم‎گر درنظر گرفته شده است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه‎سازی ازدحام ذرات، انتخاب راهبردهای بازیابی و همچنین پاداش مشارکت بارهای پاسخگو کاهش یافته است. در [4] تاثیر برنامه‎های قیمت‌گذاری اوج بحرانی و قطع/کاهش بار با کشسانی ثابت بر بهبود خودترمیمی در شبکه‌های توزیع هوشمند، بررسی شده است همچنین در این مقاله برنامه ‌های مذکور به صورت خطی مدل‌سازی شده‌اند. در [20] برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی به دو صورت خطی و نمایی با کشسانی ثابت مدل‌سازی شده است و تاثیر تغییرات قیمت اوج در مدل‌های مذکور بر بهبود خودترمیمی در شبکه‌های توزیع هوشمند، تحلیل شده است. در این مقاله نرخ مشارکت مشترکین در برنامه پاسخ‌گویی بار نیز لحاظ شده است. در [21] تاثیر نرخ مشارکت مشترکین در برنامه‎های قیمت‌گذاری اوج بحرانی و قطع/کاهش بار با کشسانی ثابت بر بهبود خودترمیمی در شبکه‌های توزیع هوشمند، بررسی شده است.

در مقالات گذشته تاثیر اجرای دو برنامه پاسخ‌گویی بار به طور همزمان بررسی نشده است. همچنین همواره نرخ کشسانی ثابت در نظر گرفته شده است این درحالی است که با افزایش قیمت بهای برق مصرفی مشترکین تمایل بیشتری به کاهش مصرف از خود بروز می‌دهند. همچنین در مقالات گذشته این نکته در نظر گرفته شده است که در طول ساعات بازیابی شبکه مصرف برق مشترکین افزایش خواهد یافت اما افزایش پرداخت‌های تشویقی و تنبیهی لحاظ نشده است.

در این مقاله قصد داریم تا مشترکینی را بازیابی نماییم که به دلیل وقوع خطا در بخشی از شبکه، قادر به دریافت سرویس از فیدر اصلی خود نیستند. برای این کار روش‌های متفاوتی وجود دارد که در این مقاله از فیدر‌های پشتیبانی که به وسیله کلیدهای کنترل از راه دور به فیدر اصلی متصل شده است، استفاده گردید. در واقع وقتی خطایی در شبکه بوجود می‌آید، تمام راهکارهای بازیابی بیشترین تعداد مشترکین با توجه به محدودیت‌های شبکه نظیر حداکثر جریان عبوری از خطوط و اندازه ولتاژ شینه‌ها شناسایی می‌شوند. سپس از میان راهکارهای شناسایی شده، بهترین راهکار به نحوه انتخاب می‌شود که علاوه بر بازیابی بیشترین بار، محدودیتهای شبکه نیز ارضا گردد.

در این مقاله از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انعطاف‌پذیر استفاده شده است تا در هنگام وقوع خطا در شبکه، مشترکین بیشتری بازیابی شوند بدون اینکه محدودیت‌های شبکه نقض گردند. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انعطاف‌پذیر استفاده شده عبارتند از: برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی که در دسته برنامه‌های قیمت محور قرار می‌گیرد، برنامه کنترل مستقیم بار که در دسته برنامه‌های پاداش‌محور قرار می‌گیرد و برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی همزمان با برنامه کنترل مستقیم بار. منظور از انعطاف‌پذیر بودن بارهای پاسخ‌گو این است که کشسانی (در بخش‌های بعدی این مفهوم تشریح خواهد شد) در این نوع بارها متناسب با تغییرات قیمت تغییر خواهد کرد و عدد ثابتی برای کشسانی بار درنظر گرفته نشده است. با توجه به این نکته که تعمیر شبکه در چند ساعت اتفاق می‌افتد و ممکن است در این بازه زمانی بار مصرفی نقطه‎بارها افزایش یابد، در این مقاله نیز افزایش بار مصرفی مشترکین در ساعات بازیابی لحاظ شده است. همچنین در ساعات بازیابی تشویق‌های پرداختی به مشترکین شرکت‌کننده در برنامه کنترل مستقیم بار ثابت نبوده و متناسب با افزایش مصرف برق، این پرداخت‌های تشویقی هم افزایش خواهد یافت.

بخش‌های مختلف مقاله به صورت زیر طبقه‌بندی می‌گردد: در بخش 2 به مدل‌سازی مسئله در حضور برنامه‌های قیمت‌گذاری اوج بحرانی و برنامه ‌کنترل مستقیم بار و تلفیقی از آنها پرداخته شده است. در بخش 3 قیود مسئله نظیر اندازه ولتاژ شینه ها و جریان مجاز خطوط بررسی شده است. در بخش 4 به بررسی شینه شماره 4 سیستم تست روی – بیلینتون که مدل پیشنهادی در این شینه بررسی شده است، پرداخته شده است. در بخش 5 نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود و در بخش 6 نیز به جمع‌بندی مطالب بیان شده در این مقاله و نتیجه‌گیری از نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته شده است.

**2.مدل‌سازی مسئله**

در این قسمت مشارکت بارهای پاسخ‌گو و تاثیر حضور آنها بر بهبود خودترمیمی در شبکه توزیع نمونه مدل‎سازی می‌شود.

**2.1. مدلسازی برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی**

تابع هدف با استفاده از برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی در رابطه (1) نشان داده شده است. از آنجایی که در برنامه قیمت‎گذاری اوج بحرانی شرکت‌های بهره‌بردار با استفاده از افزایش قیمت مصرف برق مشترکین را به کاهش مصرف برق تشویق می‎کند، اجرای برنامه قیمت‎گذاری اوج بحرانی هزینه برای این شرکت‌ها نخواهد داشت از این رو تنها هزینه وقفه مشترکین در تابع هدف آورده شده است. رابطه (2) نحوه محاسبه کل هزینه وقفه مشترکین را مشخص می کند.

(1)

(2)

همچنین در این مقاله برنامه قیمت‎گذاری اوج بحرانی به صورت زیر مدلسازی شده است[21]:

(3)

مفهوم هریک از متغیرهای بکار رفته در عبارات فوق به صورت زیر است:

*TCIC*: کل هزینه وقفه مشترکین ()

*LP*: مجموعه نقطه بارهای شبکه

EC: مجموعه پیشامدهای شبکه

KLP: مجموعه نوع مشترکین نقطه بارهای شبکه (مسکونی، تجاری، صنعتی، عمومی و حساس)

: باراکتیو نقطه­بار iام ناشی از رخداد خطا در تجهیز j ام در ساعت tام فرآیند بازیابی

: درصد مشترکین نوع *z* در نقطه بار iام

: جریمه­ای که به مشترکین نوع *z* بابت خاموشی پرداخت می­شود ()

: نرخ رخداد خطا در تجهیز jام در سال

: متغیر باینری مشخص کننده تاثیرپذیری نقطه­بار *i*ام در صورت رخداد خطا در تجهیز jام در ساعت tام فرآیند بازیابی

: مقدار انرژی مصرفی کاهش یافته مشترک نوع zام نقطه بار *i*ام در ساعت tام فرآیند بازیابی

: مقدار انرژی مصرفی اولیه مشترک نوع zام نقطه بار *i*ام در ساعت tام فرآیند بازیابی

: مقدار کشسانی مشترک نوع zام

: قیمت برق مشترک نوع zام نقطه بار *i*ام بعد از بروز خطا در شبکه

: قیمت برق مشترک نوع zام نقطه بار *i*ام قبل از بروز خطا در شبکه

در فرمول فوق منظور از کشسانی به شرح زیر است:

«حساسیت بار نسبت به تغییرات قیمت را کشسانی گویند [22]»

لازم به ذکر است که هرچه قدرمطلق کشسانی بیشتر باشد به این معناست که آن بار نسبت به تغییرات قیمت حساسیت بیشتری دارد و در صورت افزایش بهای برق مقدار توان مصرفی خود را بیشتر کاهش می دهد و مقدار صفر به این معناست که آن نوع بار کاملا غیرکشسان است یعنی حتی با افزایش بهای برق و یا پرداخت‎های تشویقی نیز توان مصرفی خود را کاهش نمی دهد.

در این مقاله بر خلاف مقالات گذشته، کشسانی به صورت ثابت در نظر گرفته نشده است و به نحوی مدلسازی شده است که با تغییرات بهای برق کشسانی مشترکین نیز تغییر خواهد نمود. از این رو با توجه به [23] رابطه (3) به صورت زیر اصلاح خواهد شد:

(4)

مفهوم هریک از متغیرهای بکار رفته در عبارات فوق به صورت زیر است:

*:* ضرایب منحنی بار خطی

در رابطه فوق ضرایب و به نحوی درنظر گرفته شده‌اند که بارهای عمومی و حساس در برابر تغییرات قیمت، مصرف خود را تغییر نمی‌دهند. به عبارت دیگر این گونه بارها غیر کشسان درنظر گرفته‌شده‌اند*.*

**2.2. مدلسازی برنامه کنترل مستقیم بار**

برنامه کنترل مستقیم بار یکی از قدیمی‌ترین برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به حساب می‌آید. این روش شامل برنامه‌هایی است که شرکت بهره‌بردار می‌تواند از راه دور و توسط یک سوئیچ کنترل، تجهیزات الکتریکی مشترکین نظیر تهویه مطبوع و پمپ‌های استخر را با اطلاع قبلی مشترکین قطع می‌نمایند. در این برنامه مبلغی به عنوان تشویق برای این مشارکت به مصرف‌کنندگان پرداخت خواهد شد.

تابع هدف با استقاده از برنامه کنترل مستقیم بار به صورت رابطه (5) درنظر گرفته شده است که دارای دو قسمت می‎باشد. بخش اول که مطابق برنامه قیمت‎گذاری اوج بحرانی است مربوط به هزینه وقفه مشترکین است. بخش دوم مشخص‎کننده میزان پاداش پرداختی توسط شرکت‎های توزیع به مشترکینی است که در برنامه شرکت کرده‎اند و با استفاده از رابطه (7) محاسبه می‎گردد.

(5)

(6)

(7)

همچنین در این مقاله برنامه کنترل مستقیم بار به صورت رابطه (8) مدلسازی شده است [24] :

(8)

در این قسمت نیز، کشسانی به صورت ثابت در نظر گرفته نشده است و به نحوی مدلسازی شده است که با تغییرات بهای برق کشسانی مشترکین نیز تغییر خواهد نمود. از این رو با توجه به [23] رابطه (8) به صورت زیر اصلاح خواهد شد:

(9)

که در رابطه فوق به صورت زیر محاسبه خواهد شد [23]:

(10)

در رابطه فوق نیز ضرایب و به نحوی درنظر گرفته شده‌اند که بارهای عمومی و حساس در برابر تغییرات قیمت، مصرف خود را تغییر نمی‌دهند. به عبارت دیگر این گونه بارها غیر کشسان درنظر گرفته‌شده‌اند.

مفهوم هریک از متغیرهای بکار رفته در عبارات فوق به صورت زیر است:

*TCEC*: کل هزینه تشویقی پرداختی به مشترکین ()

*: باراکتیو کاهش‎یافته نقطه­بار iام ناشی از رخداد خطا در تجهیز j ام در ساعت tام*

*: مبلغ تشویقی که به مشترکین نوع z بابت کاهش مصرف پرداخت می­شود ()*

*: متغیر باینری مشخص کننده لزوم کاهش مصرف نقطه­بار iام در صورت رخداد خطا در تجهیز jام در ساعت t‎ام*

*: مقدار تشویق در نظر گرفته شده به‎ازای کاهش مصرف*

*: چارامتر نسبت بار در ساعت iام*

**2.3. مدلسازی برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی در حضور برنامه کنترل مستقیم بار**

در این قسمت نیز تابع هدف نظیر رابطه (5) در نظر گرفته شده است. همچنین در پیاده‌سازی برنامه پاسخ‌گویی بار از رابطه (9) استفاده شده است با این تفاوت که در برنامه کنترل مستقیم بار مقادر مربوط به و یکسان در نظر گرفته می‌شود اما در این بخش این مقادیر همانند برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی یکسان نبوده و مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرند که در بخش‌های بعدی این مقادیر بیان شده است.

**3. سایر قیود مسئله**

*برخی محدودیت‌های فنی شبکه مانع از انتقال تمامی بارهای ایزوله شده در فیدر اصلی به فیدر پشتیبان می‌گردند. از این رو در شبیه‌سازی‌ها این موارد باید درنظر گرفته شود. محدودیت­های فنی که در این مسئله در نظر گفته‌شده‌اند، به صورت زیر هستند[25]:*

* *ساختار شعاعی شبکه: در حل مسئله باید به این نکته توجه گردد که ساختار شعاعی شبکه همواره (در طول فرآیند بازیابی و همچنین بعد از آن) باید حفظ گردد [25].*
* *اندازه ولتاژ شینه­ها: اندازه ولتاژ شینه­ها باید در محدوده مشخصی قرار داشته‌باشد. این مقادیر مشخص در این مسئله به صورت زیر مشخص شده­اند [25]:*

*(11)*

* *جریان مجاز خطوط: مهمترین قید موجود در این مسئله، محدودیت جریان مجاز خطوط می‌باشد. که در این مسئله به صورت رابطه (12) تعریف می­شود [25]:*

*(12)*

*راهبردی قابلیت پیاده‎سازی دارد که در آن محدودیت‌های شبکه نقض نشده‌باشند. با انجام پخش­بار محدودیتهای فنی مسئله برای هر راهبرد بررسی می­گردند. به دلیل ساختار شعاعی شبکه‌های توزیع و همچنین نسبت نسبتاً زیاد در این نوع شبکه ها، استفاده از برخی پخش بار‌ها نظیر پخش­بار نیوتن رافسون و گاوس ساید در شبکه‎های توزیع امکان‌پذیر نیست [26]. در این مقاله از پخش­بار تنگ استفاده شده است که هم سرعت همگرایی مناسبی دارد و همچنین استفاده از آن در پخش­بار آنلاین نتایج خوبی به همراه خواهد داشت. معادلات پخش­بار تنگ به صورت زیر تعریف می­شوند[27]:*

*(13)*

*(14)*

مفهوم هریک از متغیرهای بکار رفته در عبارات فوق به صورت زیر است:

: اندازه ولتاژ در شینه iام ناشی از رخداد خطا در تجهیز jام

: جریان خط iام ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

: حداکثر جریان مجاز عبوری از خطوط

BR: مجموعه خطوط شبکه مورد مطالعه

: بردار اختلاف ولتاژ شینه­های شبکه از شینه اصلی ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

: ماتریس پخش­بار توزیع در راهبرد بازیابی sام

: بردار جریان شینه­های شبکه ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

: توان اکتیو خالص مصرفی شینه iام ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

: توان اکتیو خالص مصرفی شینه iام ناشی از بروز خطا در تجهیز jام.

**4. شبکه مورد مطالعه**

در *شینه شماره­ی 4 سیستم تست روی – بیلینتون، برای ارزیابی روش‎های پیشنهاد شده در این مقاله جهت بهبود خودترمیمی در شبکه­های توزیع، استفاده شده است. با توجه به شکل 2 مشاهده می­شود، این شبکه دارای 3 پست فوق توزیع با ولتاژ 33 کیلوولت، هفت فیدر 11کیلوولت، 38 نقطه­بار 415 ولت و 4779 مصرف­کننده است. این شبکه دارای کلیدهای کنترل­پذیر از راه دور با نرخ خرابی صفر است که زمان عملکرد این تجهیزات 30 ثانیه در نظر گرفته شده است. متوسط بار این شبکه 24.58 مگاوات و بار پیک این شبکه 40 مگاوات است. در این مقاله فرض بر این است که بار در ساعات بازیابی شبکه افزایش می­یابد. پنج نوع مشترک موجود در این شبکه عبارتند از: مسکونی، تجاری، صنعتی،عمومی و حساس [25].*

*همچنین در شبکه نمونه مقاومت و راکتانس خطوط به ترتیب 0.307 و 0.6295 اهم بر مایل است. حداکثر جریان مجاز عبوری از خطوط همانطور که در قسمت قبل بدان اشاره شده 530 آمپر است و حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز باس‌ها به ترتیب 0.95 و 1.05 پریونیت در نظر گرفته شده است[19].*

*آهنگ خرابی خطوط، برابر 0.065 خطا در هرکیلومتر در سال و آهنگ خرابی شینه بارها و ترانسفورماتور ها به ترتیب 0.001 و 0.015 خطا در سال در نظر گرفته شده است. زمان تعمیر خطوط پس از وقوع خطا در شبکه، دو ساعت فرض شده است. زمان تعمیر خطای شینه بار 3 ساعت درنظر گرفته شده است. همچنین به دلیل اینکه برای تعمییرات ترانسفورماتور زمان بسیار زیادی نیاز است (در حدود 50 تا 200 ساعت)، در اینجا فرض شده است که در صورت خرابی ترانسفورماتور، آنرا با ترانس رزرو تعویض می کنند که این فرایند 5 ساعت به طول می انجامد [19].*

*در جدول 1 جریمه­ای که شرکت توزیع باید در صورت قطع برق هریک از انواع مشترکین به آنها پرداخت نمایید، آمده است. همانطور که مشاهده می شود، بیشترین جریمه در قبال بارهای حساس باید پرداخت شود. بارهای حساس بارهایی هستند که قطعی در برقشان پیامدهای جبران ناپذیری به همراه خواهد آورد. ازجمله مصرف کنندگان حساس، بیمارستانها، مراکز پلیس، ایستگاه­های آتش­نشانی و ... هستند.*

جدول 1- جریمه عدم تامین برق مشترکین [24]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| حساس | عمومی | صنعتی | تجاری | مسکونی | نوع مشترک |
| 63.8 | 38.3 | 9.64 | 10 | 0.695 | جریمه() |



شکل 2- شینه شماره­ی 4 سیستم تست روی - بیلینتون [19]

**5. نتایج شبیه‌سازی**

همانطور که در قسمت‌های قبل بیان گردید، در این مقاله تاثیر اجرای چهار سناریو بر بهبود خودترمیمی در شبکه‌های توزیع هوشمند بررسی شده است که در ادامه این سناریوها بیان شده است:

در سناریو اول، اینگونه فرض شده است که هیچگونه برنامه پاسخگویی بار در شبکه اجرا نمی‌گردد.

سناریو دوم مربوط به برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی می‌باشد که با توجه به [23]، برای شبیه‌سازی این برنامه فرض شده است که در زمان بحرانی (بروز خطا در شبکه) قیمت بار پایه 5 برابر خواهد شد.

در سناریو سوم چنین فرض شده است که برنامه کنترل مستقیم بار توسط شرکت توزیع در شبکه اجرا شده است. همانطور که در بخش‌های قبلی بیان گردید، در برنامه کنترل مستقیم بار قیمت برق در دوحالت شرایط عادی و اضطراری یکسان است و صرفا با استفاده از پرداخت‌های تشویقی، مشترکین به کاهش مصرف تشویق می گردند. در این مقاله پرداخت‌های تشویقی در ساعات مختلف اجرای فرآیند خودترمیمی، ثابت درنظر گرفته نشده است بلکه به نسبت افزایش مصرف در ساعات بازیابی افزایش می‌یابد. مقدار تشویق در ساعت اول بازیابی مطابق با [23] 1.25 برابر بهای برق مصرفی در نظر گرفته شده است.

و سناریو چهارم مربوط به حالتی است که هم برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی در شبکه اجرا شده است و هم برنامه کنترل مستقیم بار. به عبارت دیگر سناریو چهارم تلفیقی از سناریو دو و سه می‌باشد.

در شکل 3 با توجه به اینکه میزان بار مصرفی نقطه‌بارها در طول اجرای فرآیند بازیابی از کمترین مقدار به بیشترین مقدار خواهد رسید، میزان میانگین مصرف در ساعات بازیابی در سناریوهای مختلف نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، اجرای تمامی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (سناریوهای دو، سه و چهار) باعث کاهش مصرف مشترکین خواهد شد. بهترین نتیجه از اجرای سناریو چهارم حاصل شده است که در آن برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی و برنامه کنترل مستقیم بار به صورت همزمان اجرا شده است. این کار باعث می‌شود تا آن دسته از مشترکین که در برنامه تشویق‌محور شرکت نکرده‌اند با اجرای برنامه قیمت‌محور به کاهش مصرف سوق داده شوند. همچنین آن دسته از مشترکینی که به واسطه برنامه تشویق‌محور مصرف خود را کاهش داده‌بودند نیز به واسطه برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی بخش دیگری از میزان مصرف خود را کاهش دهند. باید به این نکته نیز توجه داشت که نقطه‌بارهایی که در آنها میزان بارهای عمومی و حساس کمتر است، کاهش مصرف بیشتری خواهند داشت و این موضوع به علت غیرکشسان بودن این‌گونه بارها است.

شکل 3- تاثیر اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر مصرف برق نقطه‌بارها

در جدول 2 هزینه‌های خاموشی مشترکین و برخی شاخص‌های پایایی حاصل از اجرای سناریو‌های بررسی شده در این مقاله آورده شده است. همانطور که از این جدول مشخص است، در سناریو اول که مربوط به عدم حضور بارهای پاسخ‌گو در شبکه است، هزینه ناشی از خاموشی مشترکین که شرکت‌های توزیع باید به مشترکینی که بی‌برقی را تجربه‌کرده‌اند، بپردازند، چیزی در حدود 171 هزار دلار در سال می‌باشد که این مقدار پرداختی شرکت‌های توزیع در حضور بارهای پاسخ‌گو (سناریوهای دو تا چهار) کاهش یافته است که مقادیر آن‌ها در جدول 2 مشخص هستند. اين پرداختي کمتر توسط شرکت‌هاي توزيع به معناي سود بيشتر و افزايش رضايت اين شرکت‌ها با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است. همچنین اکثر شاخص‌های پایایی در حضور بارهای پاسخ‌گو بهبود یافته‌اند. به عنوان مثال شاخص سایدی که نشان‌دهنده میانگین مدت‌زمان وقفه سیستم است، در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار کاهش یافته است که این کاهش نمایانگر کاهش میزان زمان وقفه مشترکین در طول سال است. از این رو با اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار رضایت‌مندی مشترکین نیز افزایش می‌یابد. در جدول 2 نشان داده شده است که شاخص سایفی (میزان فراوانی وقفه سیستم) در هر چهار سناریو مقداری ثابت است و استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بهبود این شاخص بی‌اثر بوده است. دلیل این موضوع وابستگی این شاخص به دو پارامتر تعداد خاموشی‌های مشترکین در سال و تعداد مشترکین و عدم تاثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر این دو پارامتر است. لازم به ذکر است که در اين پژوهش خاموشي‌هاي زير يک دقيقه نيز در شاخص سايفي لحاظ شده است و اين در حالي است که اگر اين خاموشي‌ها در اين شاخص در نظر گرفته‌نشود، همانطور که در برخي مراجع و استانداردها اين خاموشي‌ها در شاخص سايفي لحاظ نشده است، شاخص سايفي نيز در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بهبود می‌یابد.

جدول 2- نتایج حاصل از اجرای سناریوهای چهارگانه

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| آسایی | کایدی | سایدی | سایفی | هزینه () | سناریو |
| 0.999921 | 1.1982 | 0.6881 | 0.5743 | 171019.38 | سناریو اول |
| 0.999943 | 0.8735 | 0.5016 | 0.5743 | 108802.62 | سناریو دوم |
| 0.999930 | 1.0642 | 0.6112 | 0.5743 | 151104.10 | سناریو سوم |
| 0.999945 | 0.8361 | 0.4802 | 0.5743 | 100006.53 | سناریو چهارم |

در شکل های 4 و 5 نیز به مقایسه میانگین سالانه مدت زمان خاموشی نقطه‌بارها و میانگین سالانه کل هزینه وقفه نقطه‌بارها در اجرای سناریو های مختلف پرداخته شده است. همان طور که در شکل‌ها مشخص است در برخی از نقطه‌بارها علی‌رقم اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شاخص‌های فوق بهبود نیافته‌اند. علت این موضوع این است که نحوه قرار‌گیری کلید‌های کنترل از راه دور در شبکه به نحوی است که در صورت وقوع خطا در شبکه یا این‌نقطه‌بارها را نمی‌توان بازیابی نمود و یا بازیابی آنها از طریق فیدر اصلی اتفاق می‌افتد و حالتی برای بازیابی آنها از طریق فیدر پشتیبان وجود ندارد. از این رو اجرا و یا عدم اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بازیابی این گونه نقطه‌بارها تاثیری ندارد. به عنوان مثال در هزینه و زمان وقفه نقطه‌بارهای 1 و 2 تغییری ایجاد نشده است زیرا در صورت بروز خطا در تمام تجهیزاتی که بین قطع‌کننده کنترل‌پذیر از راه دور RCCB1 و کلید کنترل‌پذیر از راه دور RCS1 هستند، به دلیل اینکه نمی‌توان این دو نقطه‌بار را از خطای بوجود آمده ایزوله نمود پس این دو نقطه بار به ازای اینگونه خطاها و حتی در حضور برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی نیز امکان بازیابی ندارند، از این رو حضور برنامه پاسخ‌گویی بار در مدت زمان خاموشی این نقطه‌بارها تاثیری ندارد. همچنین به ازاء خطا در تمام تجهیزات بین RCS1 و RCTS1 نقطه‌بارهای 1 و 2 بدون برنامه پاسخ‌گویی بار نیز از طریق فیدر اصلی و بدون نقض محدودیت شبکه بازیابی می‌شوند. لذا برنامه پاسخ‌گویی بار بر روی نقطه‌بارهای یک و دو تأثیری ندارد. مطالب بیان شده در خصوص شکل 4 در مورد شکل 5 نیز صادق است.

شکل 4- تاثیر اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر میانگین سالانه مدت زمان خاموشی نقطه‌بارها

شکل 5- تاثیر اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر میانگین سالانه کل هزینه وقف نقطه‌بارها

**6. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری**

پاسخ‌گویی بار یکی از یکی از تحولات جدید در حوزه مدیریت سمت مصرف بشمار می آید. درهنگام وقوع خطا، مشارکت بارهای پاسخگو در فیدر پشتیبان و بخشی از فیدر آسیب دیده، می­تواند مانع از گرفتگی فیدر پشتیبان در بازیابی بارهای ایزوله‌شده از خطا در فیدر آسیب‌دیده شود و به انتخاب راهبرد بازیابی بهتر کمک کند. در این پژوهش، نقش برنامه قیمت‎گذاری اوج بحرانی انعطاف‌پذیر به عنوان یکی از برنامه‎های زمان‎محور و برنامه کنترل مستقیم بار انعطاف‌پذیر به عنوان یکی از برنامه‎های تشویق‎محور اختیاری از برنامه‎های پاسخ‏گویی بار در تقویت خودترمیمی بررسی گردید. نقش برنامه‎های پاسخ‏گویی بار در بهبود خودترمیمی شبکه‌های توزیع هوشمند به این صورت است که در صورت وقوع خطا در یکی از تجهیزات شبکه، در ابتدا سیستم‌های حفاظتی عمل کرده و کل فیدر بی‌برق می‌شود و سپس فرآیند خودترمیمی آغاز می‌گردد به این صورت که در ابتدا توسط آشکارسازهای خطای موجود در کلیدها، ناحیه‌ای که خطا در آن رخ داده تشخیص داده می‌شود و سپس آن ناحیه با باز شدن تعدادی از کلیدها، ایزوله می‌شود. سپس با بسته شدن کلید ارتباطی، بارهای پایین دست خطا به فیدر پشتیبان انتقال می‌یابند. اگر فیدر پشتیبان در این حالت دچار گرفتگی شود و توانایی بازیابی بارهای مورد نظر را نداشته باشد، با استفاده از برنامه قیمت‎گذاری اوج بحرانی، سیگنال افزایش قیمت برای تمام مشترکین فیدر پشتیبان و مشترکینی که در پایین دست خطا قرار گرفته‎اند، ارسال می‎شود و یا با استفاده از برنامه کنترل مستقیم بار، سیگنال کاهش بار به مشترکینی که در برنامه پاسخ‌گویی بار قرارداد بسته‌اند و در مسیر فیدر پشتیبان و پایین دست خطا در همان فیدر آسیب‌دیده هستند، ارسال می‌گردد. کاهش بار این مشترکین سبب انتخاب راهبرد بازیابی بهتر و در نتیجه بهبود ویژگی خودترمیمی شبکه توزیع می‌گردد. مشارکت بارهای پاسخگو سبب بهبود شاخص‌های پایایی مبتنی بر تداوم شده و بر روی شاخص‌های مبتنی بر فراوانی تأثیری ندارند. در این مقاله تغییرات کشسانی بارها متناسب با زمان و همچین اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به طور همزمان بررسی گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در بخش قبل مشخص است که استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار موجب شده است تا هم هزینه‎های پرداختی شرکت‎های توزیع به مشترکین بابت قطعی‎های برق کاهش یابد و هم شاخص‎های پایایی بهبود یابد که این باعث افزایش رضایت مشترکین می‎گردد. همچین ملاحظه می‌شود که سناریو چهارم که مربوط به اجرای همزمان برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است، نتایج بهتری را ایجاد کرده است.

**7. مراجع**

1. F. Shen, J. C. López, Q. Wu, M. J. Rider, T. Lu, N. D. Hatziargyriou, "Distributed self-healing scheme for unbalanced electrical distribution systems based on alternating direction method of multipliers", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 3, pp. 2190-2199, May 2020.
2. J. R. Aguero, "Applying Self-Healing Schemes to Modern Power Distribution Systems", IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2012.
3. P. Gopakumar, B. Mallikajuna, M. J. B. Reddy, and D. K. Mohanta, “Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using pmu measurements,” Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 3, no. 3, pp. 159–168, Dec. 2018.
4. ص. کریمی طالخونچه، ع. فریدونیان، ا. مشاری، "بهبود خودترمیمی در شبکه‌های توزیع هوشمند با استفاده از برنامه‌های قیمت اوج بحرانی و قطع یا کاهش بار" کنفرانس شبکه‎های هوشمند انرژی، تهران، ایران، آذرماه 98.
5. A. Fereidunian, “A cybernetic approach to healer reinforcement in smart grid,” SGC 2014, NRI, Tehran, Iran, Dec. 2014.
6. P.L. Cavalcante, J.C. Lopez, J.F. Franco et al., "Centralized self-healing scheme for electrical distribution systems", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 145-155, 2016.
7. E. Drayer, N. Kechagia, J. Hegemann, M. Braun, M. Gabel and R. Caire, "Distributed Self-Healing for distribution Grids with evolving search space", IEEE Trans. Power Del., vol. 33, no. 4, pp. 1755-1764, Aug. 2018.
8. E.Shirazi, S.Jadid, "A multiagent design for self-healing in electric power distribution systems", Electric Power Systems Research Vol. 171,  pp. 230-239, June 2019.
9. R. Romero, J. F. Franco, F.B. Leo, M. J. Rider, E. S. Souza, “A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 2. pp. 1259-1268. Mar. 2016.
10. M. Gholami, J. Moshtagh, F. Felegari, “A new heuristic algorithm for service restoration in unbalanced distribution networks”, 19th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2014.
11. Fereidunian, A., Lucas, C., Lesani, H., Rahmani, R., Wymore, A.W., “A Policy-Driven Method for IT Infrastructure Selection in Power Distribution Automation System”, International Review of Electrical Engineering, Vol. 5, No. 2, Part B, March-April 2010, pp. 671-682.
12. ع. شهبازیان، ع. فریدونیان، " برنامه‌ریزی خطی و مکانیابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترل از راه دور و کنترل دستی، برای بهبود پایایی شبکه‌های توزیع هوشمند"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد 48 ، شماره 4 ، شماره پیاپی 86، زمستان 1397.
13. A. Moradi, M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 1, pp. 271-279, 2008.
14. Z. Popovic, B. Brbaklic, S. Knezevic, “A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks”, Electric Power System Research, Vol. 148, pp. 136-147, 2017.
15. ا. جعفری، ع. شهبازیان، ع. فریدونیان، ا. نیکوفرد، "بهبود خودترمیمی شبکه توزیع هوشمند با تخصیص کلیدها و منابع تولید پراکنده با استفاده از محاسبات نرم"، مجله هوش محاسباتی در مهندسی برق، سال 11، شماره 2، تابستان 99.
16. A. Shahbazian, A. Fereidunian, S. D. Manshadi, "Optimal Switch Placement in Distribution Systems: A High-Accuracy MILP Formulation", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 5009-5018, June 2020.
17. A. Fereidunian, M. Abbasi, " Service Restoration Enhancement by FIs Deployment in Distribution System Considering Available AMI System", IET Generation Transmission & Distribution, vol. 14, no. 18, pp. 3665-3672, 2020.
18. S. Heydari, S.M. Mohammadi-Hosseininejad, H. Mirsaeedi, A. Fereidunian, H. Lesani, “Simultaneous placement of control and protective devices in the presence of emergency demand response programs in smart grid”, Int Trans. Electric Energy syst., vol. 28, no. 5, 2018.
19. ب. مصطفی‎پور، ع. فریدونیان، ر غنی‎آبادی، ح. لسانی، " بهبود خود­­ترمیمی در شبکه توزیع هوشمند با استفاده از پاسخگویی بار اضطراری" کنفرانس شبکه‎های هوشمند انرژی، ایران، آذرماه 97.
20. ص. کریمی طالخونچه، ع. فریدونیان، ا. مشاری، "تحلیل تاثیر تغییرات قیمت برق بر بهبود خودترمیمی در شبکه توزیع هوشمند با درنظر گرفتن رفتار مشترکین" هفتمین کنگره ملی تازه یافته های مهندسی برق ایران، تهران، ایران، خرداد 99.
21. ص. کریمی طالخونچه، ع. فریدونیان، ا. مشاری، "تحليل اثر رفتار مشترکين بر اثربخشي برنامه‌هاي قيمت‌گذاري اوج بحراني و قطع يا کاهش بار در خودترميمي شبکه‌هاي توزيع هوشمند" پانزدهمین کنفرانس ملی کیفیت و بهره‌وری، تهران، ایران، بهمن ماه 99.
22. H. A. Aalami, Parsa Moghaddam, G. R. Yousefi, “A MADM-based Support System for DR Programs”, 43rd International universities power engineering conference (UPEC), Padova, Italy, September 2008.
23. M. ParsaMoghaddam, A.Abdollahi, M.Rashidinejad, " Flexible demand response programs modeling in competitive electricity markets", Applied Energy, Vol. 88, Issue 9, PP. 3257-3269 September 2011.
24. P. T. Baboli, M. Eghbal, M. P. Moghaddam, H. Aalami, "Customer behavior based demand response model", Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting, pp. 1-7, Jul. 2012.
25. S.M. Mohammadi-Hosseininejad, A. Fereidunian, A. Shahsavari, H. Lesani, “A healer reinforcement approach to self-healing in smart grid by PHEVs parking lot allocation”, IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 12, pp. 2020-2030, 2016.
26. K. Prakash, M. Sydulu, “An effective topological and primitive impedance based distribution load flow method for radial distribution systems”, Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008.
27. I. Teng, “A Direct Approach for Distribution System Load Solution”, IEEE Trans. on Power Deliver. Vol. 18, No. 3, 2003.

1. Electrical Distribution Systems [↑](#footnote-ref-2)
2. Self-healing [↑](#footnote-ref-3)
3. Distributed Generation [↑](#footnote-ref-4)
4. Distributed Energy Storage [↑](#footnote-ref-5)
5. Smart Grids [↑](#footnote-ref-6)
6. Power Distribution Networks [↑](#footnote-ref-7)
7. Sectionalizer [↑](#footnote-ref-8)
8. Circuit Breaker [↑](#footnote-ref-9)
9. fault indicators [↑](#footnote-ref-10)
10. advanced metering infrastructure [↑](#footnote-ref-11)