مدل‌سازی چرخهٔ عملیاتی سامانهٔ اسکادا با استفاده از شبکهٔ پتری

پیام محمودی نصر

دانشگاه مازندران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی کامپیوتر، مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

سامانه‌های اسکادا وظیفهٔ کنترل زیرساخت‌های حیاتی را به عهده داشته و مطالعه بر روی آن‌ها از اهمیت فراوانی برخوردار است. در سامانه اسکادا وضعیت سلامت تمامی فرآیندهای صنعتی و تجهیزات میدانی در پست‌های راه دور به‌وسیلهٔ رویدادها و هشدارهای دریافتی در مرکز کنترل مورد پایش لحظه‌ای قرار می‌گیرند. اپراتورها با مشاهده رویدادها و هشدارها، دستورهای لازم را به‌منظور مدیریت و حفظ پایداری شبکه صادر می‌کنند. هرگونه تصمیم اشتباه اپراتور برای برطرف‌شدن هشدار می‌تواند موجب ایجاد هشدارهای جدید در شبکه شود. ازآنجاکه هشدارها نقش کلیدی در سامانه اسکادا دارند، مدل‌سازی چرخه عملیاتی سامانه اسکادا برای مدیریت هشدارها تأثیر فراوانی در تحلیل عملکرد اپراتور و بررسی ناهنجاری در شبکه می‌تواند داشته باشد. در این مقاله یک مدل جدید از چرخه عملیاتی سامانه اسکادا از مرحله ایجاد هشدار تا برطرف‌شدن آن توسط اپراتور با استفاده از شبکه‌های پتری رنگی ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، چند سناریو در چند موردکاوی مختلف بررسی‌شده، و نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده از کارایی لازم در شبیه‌سازی رفتارهای پست، شبکه و اپراتور برخوردار است.

واژگان کلیدی: چرخه عملیاتی، هشدار، مدل‌سازی، اسکادا، شبکه‌های پتری.

A Petri-net Model for Operational Cycle in SCADA Systems

Payam Mahmoudi Nasr

Department of Computer Engineering and Information Technology, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran

Abstract

Supervisory control and data acquisition (SCADA) system monitors and controls industrial processes in critical infrastructures (CIs) and plays the vital role in maintaining the reliability of CIs such as power, oil, and gas system. In fact, SCADA system refers to the set of control process, which measures and monitors sensors in remote substations from a control center. These sensors usually have a type of automated response capability when a certain criteria is met. When an abnormal system status occurs, an alarm signal is raised in control center and as a result the operator will be notified. In this way, all normal and abnormal system statuses are monitored in control center. In CI's application, since several substation resources and their related sensors are too high (because the CI's grid is often large, complex and wide), the number of alarms is very high. It gets worse when the operator mistakes and as a result, cascading alarms are flooded. In this condition, the rate of raising alarms may be more than clearing them.

In SCADA system, alarm clearing is one of the main duties of operators. When an alarm is raised in control center, the operator should clear it as soon as possible. However, the recent reports confirm the poor alarm clearing causes accidents in the SCADA system. As any operator mistake can increase the number of

* Corresponding author

*نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

• تاریخ ارسال مقاله:۱۳۹۷/۰۶/۲۴ • تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۱۱ • تاریخ انتشار: ۱۳۹۹/۰۶/۲۴ • نوع مطالعه: پژوهشی

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

alarms and jeopardize the system reliability, alarms processing and decision-making for clearing them are a stressful and time-consuming for the SCADA operators. In a large and complex CI such as power system, when operators are overwhelmed by the system alarms, they may take wrong decisions and even ignore alarms. Alarm flooding, lots of operator's workload and his/her fatigue as a result, are the main causes of operator's mistake.

If generating of an alarm in a remote substation is denoted as an *operational cycle* in an SCADA system until clearing it by the operator in control center, the aim of this paper is modeling the operational cycle by using colored petri nets. The proposed model is based on a general approach which alarm messages are integrated with the operator's commands. Of course, the model focuses on generating of alarms by substation resources. To verify the proposed model, a real data set of power system of Iran is used and to demonstrate the potential of the proposed model some scenarios about operator' workload and alarm flooding are simulated.

Keywords: Alarm, Modeling, Operational cycle, Petri nets, SCADA.

۱- مقدمه

سامانه‌های اسکادا[1] در زیرساختارهای حیاتی[2] متفاوتی مانند شبکه‌های توزیع برق، آب، نفت و گاز استفاده می‌شوند و نقش به‌سزایی در حفظ پایداری شبکه، امنیت ملی و فعالیت‌های اقتصادی در هر کشور دارند. یکی از بخش‌های مهم اسکادا، سامانه هشدار آن است. هنگامی‌که خطا یا خرابی در یکی از تجهیزات شبکه به‌وجود می‌آید، سامانه‌های حفاظتی در پست، هشدار(های) مربوطه را برای سامانه هشدار اسکادا ارسال کرده تا توسط اپراتور اقدام مقتضی به‌منظور برطرف‌شدن آن(ها) انجام گیرد.

در شبکه‌های گسترده و پیچیده‌ای مانند شبکه انتقال و توزیع برق، یک اختلال اساسی ممکن است گاهی صدها هشدار و رویداد تکراری/غیرتکراری تولید کند که البته همگی آن‌ها معتبر نیستند. بررسی این حجم زیاد هشدار و رویداد خارج از توان اپراتور اسکادا بوده و مانع از بررسی دقیق و تصمیم‌گیری صحیح در مورد نحوه برطرف‌کردن آن‌ها خواهد شد. این موضوع موجب می‌شود تا اپراتور با استرس کاری فراوانی مواجه شده و گاه برحسب عادت، هشدارها را به‌طور گروهی تصدیق[3] و یا نادیده[4] فرض کند [1]. با توجه به مطالعات انجام‌شده، چنین وضعیتی هنگامی به وجود می‌آید که هشدارها دارای اولویت نبوده و تعداد آن‌ها بیش از ده عدد در هر ده دقیقه باشد [2]. پژوهشی از ۸۷ شرکت توزیع برق نشان می‌دهد که تعداد زیاد هشدارهای تکراری و عدم اولویت‌بندی آنها از جمله بزرگ‌ترین مشکلات اپراتورهای اسکادا بوده و بیش از یک دهه است که اپراتورها با چنین مشکلی مواجه هستند [3]. هدف این مقاله ارائه مدلی برای درک بهتر سامانه هشدار اسکادا و نحوه عملکرد آن است.

امروزه باوجود آن‌که سامانه‌های اتوماسیون در کاربردهای مختلفی استفاده می‌شوند، اما همچنان اپراتورها در سامانه‌های اسکادا نقش اساسی ایفا می‌کنند. هرگونه تأخیر و اشتباه (عمدی یا غیرعمدی) آن‌ها می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری به همراه داشته و پایداری شبکه را با مشکل روبه‌رو کند [5 , 4]؛ به همین دلیل پژوهش‌های فراوانی تاکنون در مورد سامانه هشدار اسکادا با هدف کمک به اپراتور انجام گرفته است. پژوهشی در مورد اثر فراوانی هشدارها و نحوه نمایش آن‌ها بر کارایی اپراتور در [6] انجام شده است. روشی برای اسخراج انواع الگوی خطا با توجه به هشدارهای ثبت‌شده و وزن‌دهی هشدارها با هدف کمک به اپراتور در تشخیص خطا در [7] ارائه شده است. منبع [8] روشی برای یافتن الگوی تکرار ترافیک هشدارها در شبکه‌های صنعتی ارائه کرده است. منبع [9] با استفاده از شبکه‌های پتری یک سامانه هشدار مبتنی بر فازی ارائه کرده است. در منبع [10] یک سامانه استنتاج مبتنی بر فازی و ریسک با هدف کمک به اپراتور برای تشخیص خرابی در شبکه برق ارائه شده است. یک مدل پتری از سامانه‌های حفاظتی به‌منظور پیداکردن محل خرابی در شبکه الکتریکی هوشمند در [11] ارائه شده است. در مرجع [12] با استفاده از شبکه‌های پتری مبتنی بر فازی یک سامانه هشدار با توجه به جنبه‌های اقتصادی در بازار برق ارائه شده است.

از آنجایی که در میان حجم زیاد ترافیک داده‌های ورودی اسکادا، توجه به هشدارها برای حفظ پایداری شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است، این مقاله مدلی مبتنی بر شبکه‌های پتری رنگی برای چرخه هشدار سامانه اسکادا (از پست تا مرکز کنترل و برعکس) در شبکه الکتریکی ارائه کرده است. در این مدل (۱) ترافیک هشدارهای سامانه اسکادا و (۲) رفتار اپراتور در مرکز کنترل با استفاده از قابلیت‌های موجود در شبکه‌های پتری رنگی مدل‌سازی شده

[1] Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)
[2] Critical Infrastructure
[3] Acknowledge
[4] Ignore

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

است. به عبارتی این مقاله یک توصیف شیءگرا از جریان هشدارها و فعالیت‌های اپراتور با استفاده از قابلیت‌های خصیصه (رنگ و نوع) و تابع در شبکه‌های پتری رنگی ارائه کرده است. به‌منظور راستی‌آزمایی مدل پیشنهادی از داده‌های واقعی یکی از مراکز دیسپاچینگ در شبکه برق ایران استفاده شده است. همچنین برای نشان‌دادن طریقه استفاده از مدل پیشنهادی، چندین موردکاوی[1] به همراه سناریوهای مختلف برای اندازه‌گیری حجم کاری اپراتور و بررسی نرخ ایجاد هشدارهای آبشاری[2] در سامانه اسکادای شبیه‌سازی‌شده ارائه شده است.

در ادامه در بخش دوم، مبانی سامانه‌های اسکادا و شبکه‌های پتری به‌اختصار مرور و مدل پیشنهادی برای سامانه هشدار اسکادا در بخش سوم ارائه می‌شود. بخش چهارم نحوه ارزیابی مدل و نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در بخش پنجم نتایج حاصل از این مقاله آورده شده است.

۲- پیش‌زمینه

۲-۱- سامانه اسکادا

سامانه‌های اسکادا وظیفه پایش[3] و کنترل عملیات شبکه‌های صنعتی را به‌عهده دارند. در این سامانه‌ها داده‌های اندازه‌گیری‌شده در پست‌ها به‌وسیله پایانه‌های راه دور[4] جمع‌آوری و از طریق یک شبکه مخابراتی خصوصی و یا عمومی برای مرکز کنترل ارسال و در صفحه‌نمایش کاربر نشان داده می‌شوند. سامانه هشدار اسکادا در سرویس‌دهنده HMI[5] داده‌های دریافتی در مرکز کنترل را به اپراتور نمایش داده و برعکس فرمان‌های کنترلی اپراتور را برای تجهیزات داخل پست‌ها ارسال می‌کند [13]. هرگونه تغییر در شرایط سامانه که نیازمند توجه اپراتور باشد در قالب یک هشدار اعلام خواهد شد. اپراتور با بررسی رویدادها و هشدارهای دریافتی، ابتدا آن‌ها را تصدیق کرده و سپس دستورهای کنترلی لازم را به‌منظور برطرف‌کردن هشدارها ارسال می‌کند. تمامی داده‌ها و فرمان‌ها در سرویس‌دهنده بایگانی[6] ذخیره می‌شوند. این داده‌ها در ارزیابی نحوه عملکرد تجهیزات، بررسی مهارت اپراتور و در تصمیم‌گیری‌های آینده، کاربرد فراوان دارد. شکل (۱) ساختار کلی سامانه اسکادا را نشان می‌دهد.

(شکل-۱): ساختار کلی سامانه اسکادا
(Figure-1): SCADA system architecture

(جدول-۱): تعدادی از هشدارهای اصلی و فرعی در اسکادای برق [12]
(Table-1): Sample Major/Minor alarms of Power system SCADA [12]

نوع	توضیحات
هشدارهای اصلی	-CB failure, e.g. air or gas low pressure -AC/DC supply failure, e.g. DC indication supply failure -Sensitive over current alarm -Transformer mechanical alarm e.g. cooling system fail -Line distance faulty, e.g. distance power swing blocking
هشدارهای فرعی	-Bus bar high/low voltage alarm -Line distance protection operated -Feeder protection trip, e.g. over current protection operated -Trans. main protection trip e.g. differential relay operated -CB blocking and auto tripping

۲-۲- داده‌های اسکادا

ترافیک داده‌های اسکادا شامل مجموعه رویدادها و هشدارها است که به‌صورت زیر گروه‌بندی می‌شوند [14]: (۱) داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای مقادیر آنالوگ، مانند مقادیر ولتاژ، جریان، توان اکتیو و راکتیو. (۲) داده‌های وضعیتی برای مقادیر دیجیتال، مانند وضعیت باز یا بسته‌بودن کلیدهای قدرت. (۳) هشدارها برای نشان‌دادن هر تغییر غیرعادی، خرابی و خطا در عملکرد تجهیزات، مانند هشدار پایین‌بودن سطح روغن، هشدار خرابی سامانه خنک‌کننده. (۴) دستورهای کنترلی دیسپاچر، مانند دستور باز یا بسته‌شدن کلید قدرت.

به‌منظور داشتن تصویری پویا و زنده از شرایط شبکه، داده‌های سامانه اسکادا به‌طورمعمول در هر دو تا پنج ثانیه جمع‌آوری می‌شوند. در این میان هشدارها که نیازمند توجه بیشتر اپراتور هستند سهم کوچکی را به خود اختصاص

[1] Case study
[2] Cascade alarms
[3] Monitoring
[4] Remote Terminal Unit (RTU)
[5] Human Machine Interface (HMI)
[6] Historian Server

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

می‌دهند. رویدادها در مقایسه با هشدارها، ارزش چندانی ندارند و تنها برای آگاهی اپراتور از وضعیت جاری سامانه استفاده می‌شوند. هشدارها از نظر ماندگاری به دو گروه گذرا و پایدار تقسیم می‌شوند. هشدارهای گذرا هشدارهایی هستند که با ارسال دستور اپراتور از راه دور به‌راحتی برطرف می‌شوند؛ درحالی‌که هشدارهای پایدار نیازمند عملیات تعمیر و نگهداری برای برطرف‌شدن هستند و به همین دلیل برای مدت بیشتری (گاهی تا چند روز) بر روی صفحه‌نمایش اپراتور باقی می‌مانند. هشدارها به‌لحاظ درجه اهمیت نیز به دو گروه اصلی[1] و فرعی[2] تقسیم می‌شوند [14]:

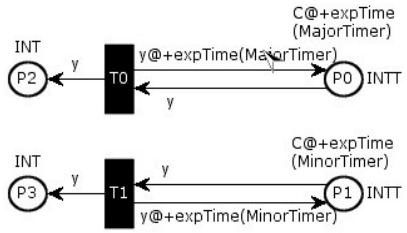
(۱) هشدارهای اصلی: این گروه از هشدارها که ممکن است گذرا و یا پایدار باشند، به این دلیل اصلی نامیده می‌شوند که اپراتور برای برطرف‌کردن آن‌ها بایستی هرچه سریع‌تر اقدام کند تا از بروز هشدارهای جدی‌تر جلوگیری به عمل آید. عواملی مانند الگوی مصرف صحیح، دمای مناسب محیط، بازدیدهای دوره‌ای و تعویض تجهیزات قدیمی تأثیر فراوانی در کاهش تعداد هشدارهای اصلی دارند.

(۲) هشدارهای فرعی: این گروه از هشدارها خرابی‌های جدی و گاهی خاموشی‌های گسترده‌تری را در پی‌دارند؛ اما به این دلیل فرعی نامیده می‌شوند که تعداد آن‌ها در شبکه بسیار کم است. درواقع اپراتور با برطرف‌کردن به‌موقع هشدارهای اصلی مانع به‌وجودآمدن هشدارهای فرعی، خواهد شد. عدم بازدیدهای دوره‌ای، برطرف‌نشدن به‌موقع هشدارهای اصلی و بلایای طبیعی تأثیر فراوانی در افزایش تعداد هشدارهای فرعی دارد. جدول (۱) تعدادی از هشدارهای اصلی و فرعی برای سامانه اسکادا در شبکه الکتریکی را نشان می‌دهد.

۳-۲- شبکه‌های پتری رنگی

شبکه‌های پتری ابزاری ساده و گرافیکی برای مدل‌سازی رفتار سامانه‌های با رویدادهای غیرهم‌زمان، پردازش هم‌زمان و مدیریت منابع است. شبکه‌های پتری ابزاری مناسب برای تحلیل رفتار سامانه‌های صنعتی مانند تأسیسات تولیدی و شبکه‌های توزیع برق، آب، گاز و نفت است [15].

در شبکه پتری رنگی مکان‌ها برای نمایش منابع و وضعیت‌های سامانه استفاده می‌شوند. هر مکان می‌تواند حاوی تعدادی نشانه[3] باشد. هر نشانه حاوی اطلاعاتی است که تحت عنوان رنگ نشانه شناخته می‌شود. وضعیت سامانه در هر زمان با نشانه‌های موجود در مکان‌ها نشان داده می‌شود. رنگ‌های تعریف‌شده برای مکان‌ها مانع ورود هر نوع نشانه در آن‌ها می‌شود. به‌عبارت‌دیگر رنگ نشانه‌های موجود در هر مکان با رنگ مکان یکسان است. انتقال‌ها به‌عنوان توابع عملیاتی سامانه در مدل هستند. توابع وابسته به انتقال‌ها و بردارها اجرای مدل را کنترل می‌کنند. یک انتقال به شرطی عمل می‌کند که (۱) مکان‌های ورودی آن شامل نشانه باشند، (۲) مقدار بازگشتی تابع گارد آن (در صورت وجود) درست باشد، (۳) توابع بردارهای ورودی آن اجرا شوند. در شبکه‌های پتری رنگی برای هر یک از مکان‌ها، انتقال‌ها، و نشانه‌ها می‌توان زمان تعریف کرد. زمان هر نشانه معین می‌کند که در چه زمانی آن نشانه می‌تواند از مکان خود خارج شود. نشانه‌های زمان‌دار در مکان‌های زمان‌دار قرار می گیرند. زمان هر انتقال مقدار تأخیر ایجادشده توسط آن انتقال هنگام اجرای مدل را نشان می‌دهد. برای انتقال‌های زمان‌دار از مستطیل سفید و برای انتقال‌های بدون زمان از مستطیل سیاه استفاده می‌شود [15, 16].



(شکل-۲): مدل پتری رنگی ایجاد هشدارهای اصلی و فرعی در یک منبع تولید هشدار

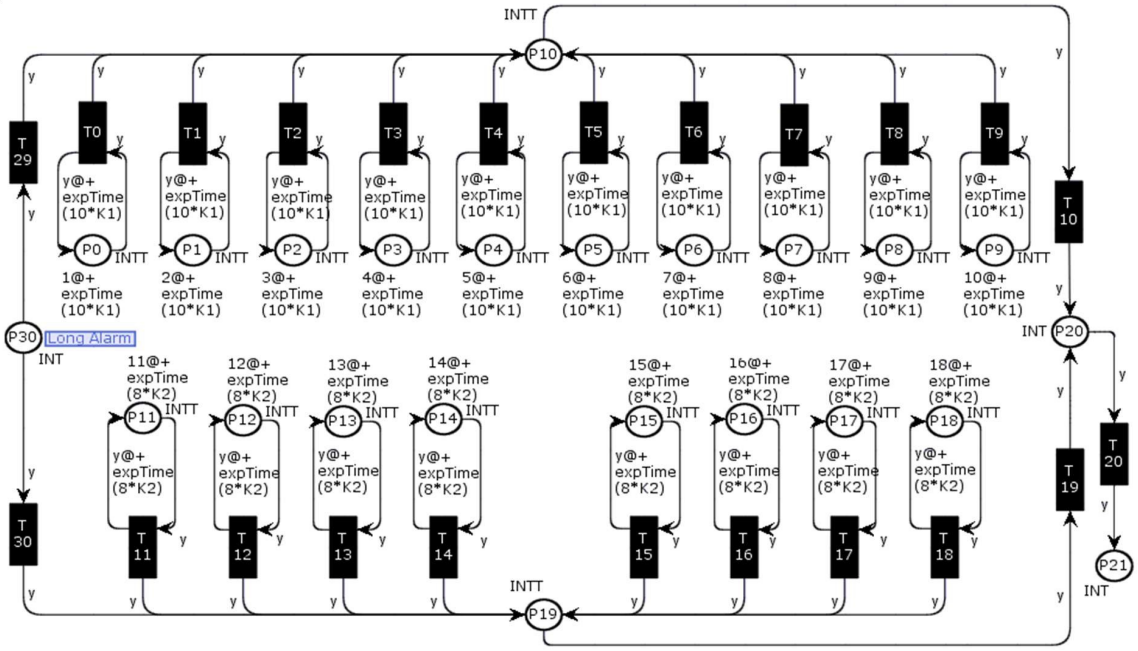
(Figure-2): A color Petri net model for Major/Minor alarms

۳- مدل پیشنهادی سامانه هشدار اسکادا

در سامانه هشدار اسکادا، هشدارها و اپراتورها نقش اساسی دارند. در مدل‌سازی سامانه هشدار اسکادا با استفاده از شبکه‌های پتری رنگی می‌توان از نشانه‌ها به‌عنوان هشدارها و از رنگ نشانه‌ها برای تعیین نوع هشدار استفاده و همچنین با استفاده از ویژگی زمان برای هر نشانه می‌توان زمان ایجاد هشدار و برطرف‌شدن آن را شبیه‌سازی و برای شبیه‌سازی رفتار اپراتور در هر مرحله از پردازش می‌توان از انتقال‌ها و توابع آنها استفاده و همچنین از انتقال‌های زمان‌دار برای شبیه‌سازی تأخیر اپراتور در پردازش هشدارها می‌توان استفاده کرد.

[1] Major alarms
[2] Minor alarms
[3] Token

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]



(شکل-۳): مدل پتری رنگی ایجاد ترافیک هشدارها در پست

(Figure-3): A Colored petri net model for alarm generation in substation

۱-۳- مدل ایجاد ترافیک هشدارها در پست

برای هر یک از منابع تولید هشدار در پست با توجه به آن‌که هشدار اصلی/فرعی و یا هر دو را ایجاد می‌کند می‌توان یک یا دو مکان به‌ترتیب برای هشدارهای اصلی و فرعی در نظر گرفت. در شکل (۲) مدل پتری رنگی برای ایجاد هشدارهای اصلی و فرعی در یک منبع هشدار نشان داده شده است. مکان های زمان دار P_0 و P_1 به‌ترتیب برای ایجاد هشدارهای اصلی و فرعی در نظر گرفته شده‌اند. از انتقال‌های T_0 و T_1 برای انتقال هشدارهای ایجاد شده به مکان‌های دیگر (مانند P_2 و P_3) و همچنین ایجاد نشانه در مکان‌های P_0 و P_1 به‌منظور ایجاد هشدارهای جدید استفاده شده است. برای نزدیکی بیشتر به دنیای واقعی از توزیع پوآسون به‌منظور مدل‌سازی تعداد هشدارهای ایجادشده در یک منبع (مکان‌های P_0 و P_1) استفاده شده است. لازم به توضیح است که همواره در سامانه‌های کاربردی از توزیع پوآسون برای مدل‌سازی توزیع آماریِ تعداد انواع رویدادهای ایجادشده استفاده می‌شود (مانند تعداد قطعات معیوب در یک خط تولیدی، تعداد خطاهای ایجادشده در یک پردازش، تعداد پیام‌های دریافتی در واحد زمان، تعداد عبور ماشین از یک خیابان و غیره) [17]. لازمه این استفاده آن است که منابع بالقوه برای ایجاد رویدادها بی‌نهایت زیاد و احتمال مشاهده رویداد در هر یک از منابع ثابت و کم باشد. در سامانه اسکادا ازآنجایی‌که احتمال وقوع هشدار در هر یک از منابع کم بوده و تعداد منابع بالقوه تولید هشدار به‌دلیل بزرگی و گستردگی شبکه انتقال و توزیع به‌اندازه کافی زیاد است، از توزیع پوآسون برای مدل‌سازی ترافیک هشدارهای ایجادشده در آن می‌توان استفاده کرد [18, 19]. چنانچه تعداد رویدادها از توزیع پوآسون با پارامتر 1/K پیروی کند، زمان وقوع بین رویدادها از توزیع نمایی با پارامتر K پیروی خواهد کرد (exp(k)) [17]. به همین دلیل در مکان‌های P_0 و P_1 از توزیع نمایی با پارامترهای MajorTimer و MinorTimer برای هر یک از هشدارهای اصلی و فرعی استفاده شده است. به‌منظور ایجاد تمایز بین هشدارها در منابع مختلف می‌توان از مقادیر متفاوتی برای متغیر C (در مکان‌های P_0 و P_1) به‌ازای هر منبع تولید هشدار استفاده کرد.

شکل (۳) مدل ایجاد هشدارهای اصلی و فرعی در یک پست را با توجه به منابع مختلف تولید هشدار نشان می‌دهد. ازآنجایی‌که منابع تولید هشدار در پست‌های انتقال و فوق توزیع به‌طورمعمول به نُه بخش شامل خطوط انتقال، فیدرهای خروجی، باسبار، ترانس‌های قدرت، خازن‌ها، راکتورها، تجهیزات عمومی پست، مقادیر اندازه‌گیری و تغییر وضعیت‌ها تقسیم می‌شوند [14]، در شکل (۳) نیز منابع تولید هشدار به نُه بخش تقسیم شده‌اند. جداول (۲) و (۳) به‌ترتیب مکان‌ها و انتقال‌ها استفاده‌شده در مدل پیشنهادی

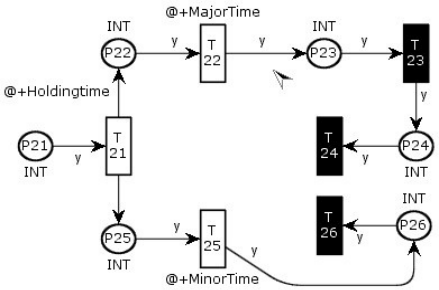
[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

را نمایش می‌دهد. مکان‌های زمان‌دار P_0 تا P_8 منابع تولید هشدارهای اصلی، و مکان‌های زمان‌دار P_{11} تا P_{17} منابع تولید هشدارهای فرعی را نشان می‌دهند. به‌دلیل آن‌که هشدارهای مربوط به مقادیر اندازه‌گیری و تغییر وضعیت‌ها تنها به‌عنوان هشدارهای اصلی در سامانه اسکادا بررسی می‌شوند [14] لذا از تعداد مکان کمتری برای هشدارهای فرعی استفاده شده است. نشانه‌های موجود در مکان‌های نام‌برده‌شده زمان‌دار بوده و هر یک از آن‌ها نماینده یک خرابی یا خطا در منبع مربوطه هستند. مکان‌های زمان‌دار P_9 و P_{18} به‌ترتیب برای ایجاد هشدارهای کاذب و تکراری (اصلی و فرعی) در نظر گرفته شده‌اند. به‌منظور ایجاد تمایز بین هشدارهای منابع مختلف، از مقادیر یک تا ده به‌عنوان رنگ نشانه‌های هشدارهای اصلی، و یازده تا هجده به‌عنوان رنگ نشانه‌های هشدارهای فرعی استفاده شده است. به این ترتیب مکان‌های P_{10}, P_{19} به‌ترتیب مجموع هشدارهای اصلی و فرعی ایجادشده در پست را نشان می‌دهند. این هشدارها به‌وسیلهٔ انتقال‌های T_{10}, T_{19} به RTU (مکان P_{20}) و توسط انتقال T_{20} به مرکز کنترل (مکان P_{21}) منتقل می‌شوند. مکان P_{21} حاوی تمامی هشدارهای اصلی و فرعی دریافتی در مرکز کنترل است. به‌منظور آن‌که از توزیع پوآسون با پارامترهای $1/K_1$, $1/K_2$ به‌ترتیب برای تعداد هشدارهای اصلی و فرعی استفاده شود و از آنجا که تعداد منابع تولید هشدارهای اصلی و فرعی (با در نظر گرفتن هشدارهای کاذب) در مدل ارائه شده به‌ترتیب ده و هشت درنظر گرفته شده است، از مقادیر $\exp(10*k_1)$, $\exp(8*K_2)$ به‌عنوان مقدار اولیه در مکان‌های مربوطه استفاده شده تا بدین ترتیب زمان وقوع بین هشدارهای اصلی و فرعی در مکان‌های P_{10}, P_{19} دارای توزیع نمایی با مقادیر $\exp(k_1)$, $\exp(k_2)$ درنظر گرفته شوند.

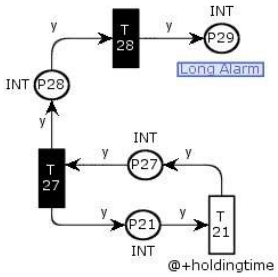
عامل دیگری که در یک پست ممکن است موجب ایجاد هشدارهای جدید شود، هشدارهای برطرف‌نشدهٔ طولانی است. هشداری که برای مدت طولانی برطرف نشده باشد برحسب تأثیری که در پست دارد، می‌تواند به‌صورت آبشاری عامل ایجاد هشدارهای جدید گردد [20]. برای این منظور از مکان P_{30} برای نمایش هشدارهای برطرف نشده طولانی استفاده شده است. نشانه‌های موجود در مکان P_{30} توسط انتقال T_{29} یا T_{30} یک هشدار جدید اصلی یا فرعی را ایجاد می‌کنند.

۲-۳- مدل پردازش هشدار توسط اپراتور

شکل (۴) مدل پردازش هشدار توسط اپراتور هنگام برطرف‌کردن هشدارها را نشان می‌دهد. تصمیم‌گیری برای انتخاب فرمان صحیح به‌منظور برطرف‌کردن هر یک از هشدارها نیاز به زمان دارد؛ لذا انتقال‌های T_{21}, T_{22}, T_{25} از نوع انتقال‌های زمان‌دار درنظر گرفته شده‌اند. هر یک از هشدارها ابتدا در انتقال T_{21} تصدیق شده (تأیید دریافت و مشاهده توسط اپراتور) و سپس فرمان لازم برای برطرف‌شدن آن‌ها در انتقال‌های T_{22} (برای هشدارهای اصلی) یا T_{25} (برای هشدارهای فرعی) صادر می‌شود. ازآنجایی‌که تأخیر پاسخ‌گویی و نحوه برطرف‌کردن هشدارهای اصلی و فرعی می‌تواند متفاوت باشد، از انتقال‌های جداگانه‌ای برای برطرف‌شدن آن‌ها استفاده شده است. به‌منظور نزدیک‌شدن به شرایط واقعی از متغیرهای HoldingTime, MajorTime, MinorTime به‌ترتیب برای شبیه‌سازی تأخیر اپراتور هنگام تصدیق و پاسخ‌گویی به هر یک از هشدارهای اصلی و فرعی در انتقال‌های T_{21}, T_{22}, T_{25} استفاده شده است.



(شکل-۴): مدل پتری رنگی پردازش هشدار توسط اپراتور
(Figure-4): A Colored petri net model for alarm processing



(شکل-۵): مدل پتری رنگی برای هشدارهای آبشاری
(Figure-5): A Colored petri net model for cascading alarms

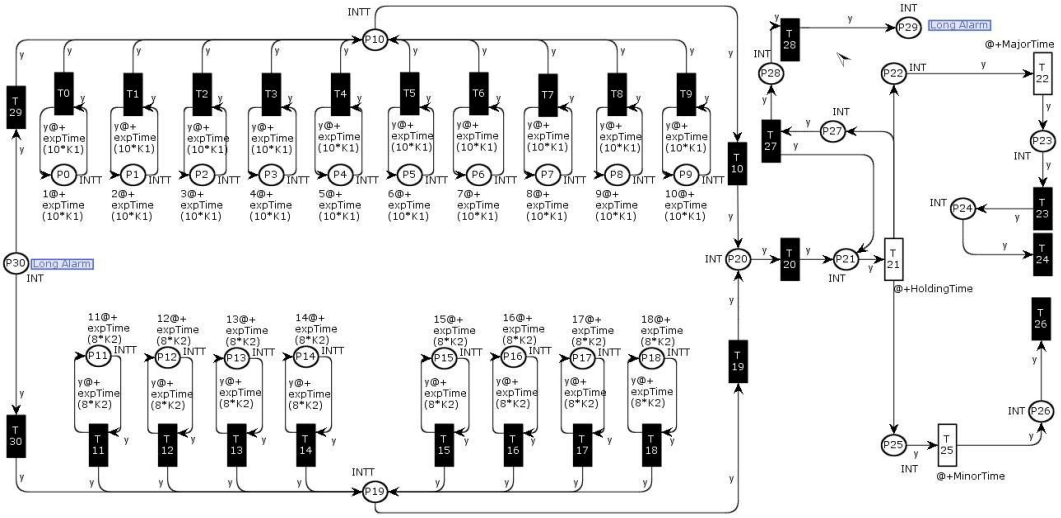
۳-۳- مدل ایجاد هشدارهای آبشاری

همان‌طور که اشاره شد، چنانچه هشداری به‌موقع برطرف نشود، ممکن است عامل ایجاد هشدارهای آبشاری جدید در همان پست و یا دیگر پست‌ها شود. ایجاد هشدارهای آبشاری

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

به عوامل مختلفی بستگی دارد که می توان آنها را به دو دسته کلی (الف) میزان مهارت اپراتور در برطرف‌کردن هشدارها و (ب) رفتار شبکه در لحظه (مانند شرایط پایداری شبکه، میزان بار شبکه، قدیمی‌بودن تجهیزات، نوع هشدار و غیره) تقسیم کرد. در این مقاله به‌منظور ساده‌سازی هرچه بیشتر (به‌دلیل آنکه نحوه ایجاد هشدارهای آبشاری خارج از موضوع این مقاله است)، از متغیرهای ساده عددی m, d, CP به‌ترتیب برای شبیه‌سازی میزان مهارت اپراتور و رفتار شبکه در لحظه استفاده شده است.

شکل (۵) مدل بسیار ساده‌ای را برای ایجاد هشدارهای آبشاری نشان می‌دهد. چنان‌چه اپراتور از مهارت کافی در برطرف‌کردن هشدارها برخوردار نباشد، ممکن است هر یک از رفتارهای زیر را هنگام پردازش هشدار از خود نشان دهد: (الف) تأخیر، به‌صورت عدم تصدیق و بی‌توجهی به هشدار و یا تأخیر در پاسخ‌گویی به هشدار پس از تصدیق هشدار (ب) صدور فرمان اشتباه. به‌منظور شبیه‌سازی رفتار اپراتور می‌توان از متغیر d به‌عنوان درصد تأخیر اپراتور و از متغیر m به‌عنوان درصد صدور فرمان اشتباه در تابع وابسته به انتقال T_{21} استفاده کرد. بدین ترتیب در انتقال T_{21} به‌احتمال d% پس از گذشت زمان HoldingTime هم‌چنان هشدار با عدم تصدیق و بی‌توجهی در پاسخ‌گویی همراه است، و یا پس از گذشت زمان HoldingTime به‌احتمال m*(100-d)% فرمان اشتباه برای برطرف‌شدن هشدار صادر می‌شود. مکان P_{27} شامل هشدارهایی است که دچار تأخیر زیاد و یا فرمان اشتباه اپراتور شده‌اند. بدین ترتیب احتمال تصدیق به‌موقع هشدار و قرارگرفتن در چرخهٔ صدور فرمان صحیح برای برطرف‌شدن در انتقال‌های T_{22}, T_{25} برابر با (100- d - m*(100-d)) خواهد بود. انتقال T_{27} هشدارهای موجود در P_{27} را علاوه‌بر آن‌که دوباره در مکان P_{21} برای بررسی مجدد اپراتور قرار می‌دهد، آنها را در مکان P_{28} برای ایجاد هشدارهای آبشاری قرار می‌دهد. انتقال T_{28} با احتمال CP% از نشانه‌های موجود در مکان P_{28} برای ایجاد هشدارهای آبشاری و ایجاد نشانه درمکان P_{29} استفاده می‌کند.



(شکل-۶): مدل پتری رنگی سیستم هشدار اسکادا برای یک پست و یک مرکز کنترل

(Figure-6): A colored Petri net model for SCADA alarm system by single substation and control center

۴-۳- مدل نهایی سامانه

شکل (۶) مدل نهایی سامانه و جداول (۲) و (۳) به‌ترتیب انتقال‌ها و مکان‌های استفاده‌شده را برای یک مرکز کنترل و یک پست نشان می‌دهند. شکل (۷) نحوه افزایش تعداد پست‌ها را به‌صورت نمودار قطعه‌ای نمایش می‌دهد. برای هر پست جدید مدل هشدارهای اصلی و فرعی (با شماره‌های جدید برای مکان‌ها و انتقال‌ها) دوباره ترسیم خواهند شد. مدل‌های ایجاد هشدارهای آبشاری، و پردازش هشدار توسط اپراتور در مرکز کنترل به‌صورت مشترک برای همه پست‌ها استفاده خواهند شد. مکان P_{21} هشدارهای دریافت‌شده از تمامی پست‌ها را در مرکز کنترل نشان می‌دهد. مکان P_{29} با نام مستعار جدید در هر پست و با استفاده از ابزار پیوند[1] به‌صورت مشترک بین تمامی پست‌ها استفاده می‌شود. بدین ترتیب هر هشداری که برای مدت طولانی برطرف نشده باشد، می‌تواند عامل ایجاد خطایی جدید در همان پست و یا دیگر پست‌ها شود.

[1] Fusion

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

(جدول-۲): انتقال‌های مربوط به مدل پتری رنگی پیشنهادی

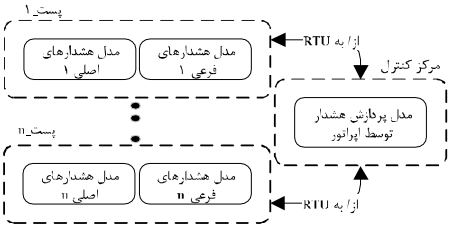
(Table-2): Transitions of the proposed model

انتقال	توضیح
T0 to T9	ایجاد هشدار اصلی
T10, T19	ارسال هشدار به RTU
T11 to T18	ایجاد هشدار فرعی
T20	ارسال هشدار از RTU به مرکز کنترل
T21	تصدیق و پردازش هشدار در مرکز کنترل
T22	ایجاد پاسخ صحیح برای برطرف شدن هشدار اصلی
T23	ارسال پاسخ صحیح به RTU
T24	برطرف شدن هشدار اصلی
T25	تصمیم‌گیری برای برطرف شدن هشدار فرعی و انجام تعمیرات
T26	برطرف شدن هشدار فرعی
T27	برطرف نشدن هشدار، ارسال پاسخ اشتباه به RTU
T28	ایجاد خطای جدید برای هشدارهای آبشاری
T29	ایجاد هشدار آبشاری جدید از نوع اصلی
T30	ایجاد هشدار آبشاری جدید از نوع فرعی

(جدول-۳): مکان‌های مربوط به مدل پتری رنگی پیشنهادی

(Table-3): Places of the proposed model

انتقال	توضیح	مقدار اولیه
P0	خطای اصلی در خطوط	1@exp (10*K_1)
P1	خطای اصلی در فیدرهای خروجی	2@exp (10*K_1)
P2	خطای اصلی در باس بار	3@exp (10*K_1)
P3	خطای اصلی در ترانس قدرت	4@exp (10*K_1)
P4	خطای اصلی در خازن‌ها	5@exp (10*K_1)
P5	خطای اصلی در راکتورها	6@exp (10*K_1)
P6	خطای اصلی در مقادیر اندازه‌گیری	7@exp (10*K_1)
P7	خطای اصلی در مقادیر دیجیتال	8@exp (10*K_1)
P8	خطای اصلی در تجهیزات عمومی	9@exp (10*K_1)
P9	خطای اصلی کاذب یا تکراری	10@exp(10*K_1)
P10	هشدار اصلی در پست	---
P11	خطای فرعی در خطوط	11@exp (8*K_2)
P12	خطای فرعی در فیدرهای خروجی	12@exp (8*K_2)
P13	خطای فرعی در باس بار	13@exp (8*K_2)
P14	خطای فرعی در ترانس قدرت	14@exp (8*K_2)
P15	خطای فرعی در خازن‌ها	15@exp (8*K_2)
P16	خطای فرعی در راکتورها	16@exp (8*K_2)
P17	خطای فرعی در تجهیزات عمومی	17@exp (8*K_2)
P18	خطای فرعی کاذب یا تکراری	18@exp (8*K_2)
P19	هشدار فرعی در پست	---
P20	درگاه خروجی RTU	---
P21	هشدار در مرکز کنترل (HMI Screen)	---
P22	هشدار اصلی تصدیق شده	---
P23	دستور یا پاسخ صحیح اپراتور	---
P24	درگاه ورودی RTU	---
P25	هشدار فرعی تصدیق شده	---
P26	تجهیزات تعمیر شده در پست	---
P27	هشدارهایی که دچار پاسخ اشتباه یا تأخیر اپراتور شده اند.	---
P28	هشدار برطرف نشده با مدت‌زمان طولانی	---
P29, P30	خطای آبشاری جدید	---
P31, P32	ناهنجاری در شبکه و پست	---



(شکل-۷): نمودار قطعه‌ای مدل پیشنهادی برای سامانه اسکادا با چند پست

(Figure-7): Block diagram of the proposed model by multi substations.

۴- راستی‌آزمایی و شبیه‌سازی

به‌منظور تنظیم اولیه پارامترهای کنترلی مدل پیشنهادی از داده‌های واقعی یکی از مراکز دیسپاچینگ در شبکه برق ایران که ۳۱ پست انتقال و فوق توزیع را پایش و کنترل می‌کند، استفاده شده است. جدول (۴) نتایج تحلیل داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از ده پست انتقال و فوق توزیع به‌مدت سه ماه به‌منظور تخمین بهترین تابع توزیع برای میزان تأخیر اپراتور هنگام پردازش هشدارها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به مقادیر $P\_Values > 0.05$ می‌توان از تابع توزیع *lognormal()* به‌منظور شبیه‌سازی میزان تأخیر اپراتور هنگام تصدیق (HoldingTime) و پاسخ‌گویی به هشدارهای اصلی (MajorTime) و فرعی (MinorTime) استفاده کرد. با این فرض که هیچ‌گونه تهدیدی برای برطرف‌شدن هشدارها از طرف اپراتور وجود ندارد. همچنین با استفاده از تحلیل تعداد هشدارهای ایجادشده در داده‌های واقعی مقدار پارامتر توابع توزیع نمایی برای هشدارهای اصلی و فرعی به‌ترتیب برابر K_1 = 100 to 150h و K_2 = 4000 to 8760h (میانگین بین چهار تا هفت هشدار اصلی در ماه و بین یک تا دو هشدار فرعی در سال) و مقدار m=d=0 در نظر گرفته شده‌اند.

(جدول-۴): تابع توزیع تاخیر اپراتور هنگام پردازش هشدار

(Table-4): Distribution timing of timed transitions

انتقال	نوع هشدار	میزان تاخیر (دقیقه)	تابع توزیع	P-valuc
T_{21}	اصلی/فرعی	[2,34]	lognormal(2.08,0.83)	0.073
T_{22}	اصلی	[7,6100]	lognormal(4.63,1.69)	0.084
T_{25}	فرعی	[18,28100]	lognormal(5.15,1.95)	0.099

به‌منظور راستی‌آزمایی و تحلیل مدل پیشنهادی شاخص‌های میانگین تأخیر برطرف‌شدن هشدارهای اصلی (ADJ) و فرعی (ADI) با درنظرگرفتن تعداد پست‌های

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

متفاوت (۸، ۹ و ۱۰ پست) اندازه‌گیری شده و با استفاده از آزمون میانگین تک‌نمونه‌ای با مقادیر متناظر از داده‌های واقعی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. جداول (۵) و (۶) نتایج آزمون میانگین تک‌نمونه‌ای را برای مدت سه ماه نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که اختلاف معناداری بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده از داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده وجود ندارد. لازم به توضیح است که مقادیر شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده در مدل شبیه‌سازی‌شده در محیط CPNTools [21] و پس از ۱۲۹۶۰۰ مرحله (معادل سه ماه) و در هر مرحله پس از هزار بار تکرار مستقل و با فاصله اطمینان ۹۵٪ اندازه‌گیری شده‌اند.

(جدول-۵): نتایج آزمون تک‌نمونه‌ای برای شاخص ADJ به مدت سه ماه

(Table-5): Single mean test results for ADJ at 3 months

تعداد پست	t	Sig.	میانگین اختلاف	میانگین خطای استاندارد	میانگین واقعی	میانگین شبیه سازی شده
8	0.47	0.82	18.74	49.54	246.26	228.63
9	0.82	0.58	35.74	49.62	261.63	226.91
10	0.49	0.81	20.13	50.71	248.56	229.54

(جدول-۶): نتایج آزمون تک‌نمونه‌ای برای شاخص ADI به مدت سه ماه

(Table-6): Single mean test results for ADI at 3 months

تعداد پست	t	Sig.	میانگین اختلاف	میانگین خطای استاندارد	میانگین واقعی	میانگین شبیه‌سازی شده
8	0.9	0.5	2658.1	2927.2	3104.8	566.9
9	-0.6	0.7	-82.3	293.2	463.1	566.3
10	-0.6	0.8	-74.6	293.2	463.2	548.6

در ادامه به‌منظور نمایش کاربرد مدل پیشنهادی دو موردکاوی مورد مطالعه قرار گرفته است. در هر یک از موردکاوی‌ها با تغییر در مقادیر پارامترهای کنترلی چندین سناریو با هدف تغییر در رفتار اپراتور و پست قابل مطالعه و مقایسه هستند. مدل اسکادای شبیه‌سازی‌شده در موردکاوی‌ها شامل پنج پست و یک مرکز کنترل است. جدول (۷) مقادیر پارامترهای کنترلی را در سه سناریوی مختلف برای هر یک از موردکاوی‌ها نشان می‌دهد. در سناریوی نخست (کنترل شبکه) با توجه به داده‌های واقعی، پارامترها به‌نحوی تنظیم شده‌اند که نرخ ایجاد هشدار در پست‌ها متناظر با داده‌های واقعی بوده و اپراتور نیز به‌نسبه از مهارت کافی برای برطرف‌کردن هشدارها برخوردار است:

K_1 = 100 to 150h (میانگین بین چهار تا هفت هشدار اصلی در ماه)

K_2 = 4000 to 8760h (میانگین بین یک تا دو هشدار فرعی در سال)

d = m = 2%

در سناریوی دوم (اپراتور ضعیف) رفتار شبکه همچنان متناظر با داده‌های واقعی فرض شده، اما اپراتور (عمدی یا غیرعمدی) در برطرف‌کردن هشدارها بسیار ضعیف عمل خواهد کرد:

d = m = 50%

در سناریوی سوم (شبکه ضعیف) نرخ ایجاد هشدار در پست‌ها بیشتر از شرایط طبیعی فرض شده و رفتار اپراتور نیز از مهارت کافی برخوردار نیست:

K_1= 24h (میانگین یک هشدار اصلی در روز.)

K_2 = 720h (میانگین یک هشدار فرعی در ماه.)

d = m = 10%

مقدار CP = 10% در همه سناریوها به‌صورت مشترک در نظر گرفته شده است. در تمامی سناریوها از ابزارهای شبیه‌سازی، فضای حالت[1] و پایش در محیط CPNTools استفاده شده است. برای شمارش تعداد نشانه‌ها در مکان‌های مورد نظر از ابزار پایش فایل[2] بهره گرفته شده است.

(جدول-۷): مقدار پارامترهای کنترلی برای سناریوها

(Table-7): parameter values for simulation scenarios

پارامترها		پست‌ها				
		A	B	C	D	E
سناریوی ۱ کنترل شبکه	K_1	۱۲۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۵۰
	K_2	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	۸۷۶۰
	d	۲	۲	۲	۲	۲
	m	۲	۲	۲	۲	۲
سناریوی ۲ اپراتور ضعیف	K_1	۱۲۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۵۰
	K_2	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	۸۷۶۰
	d	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
	m	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
سناریوی ۳ شبکه ضعیف	K_1	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
	K_2	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰
	d	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
	m	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

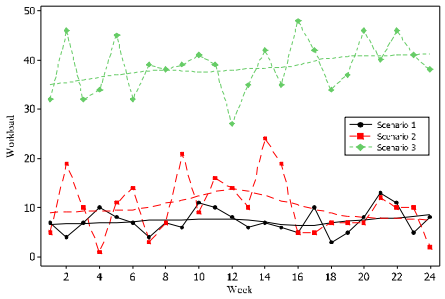
۱-۴- حجم کاری اپراتور

شکل (۸) حجم کاری اپراتور در هفته را برای هر سه سناریو در مدت شش ماه نشان می‌دهد. از تعداد هشدارهای دریافتی در مرکز کنترل به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری حجم کاری اپراتور استفاده شده است. مشاهده می‌شود که اگرچه تأخیر و اشتباه اپراتور در سناریوی اپراتور ضعیف تأثیر فراوانی در افزایش تعداد هشدارهای شبکه و افزایش حجم کاری وی داشته، اما حجم کاری اپراتور در سناریوی شبکه

[1] State space
[2] Write in file monitoring

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

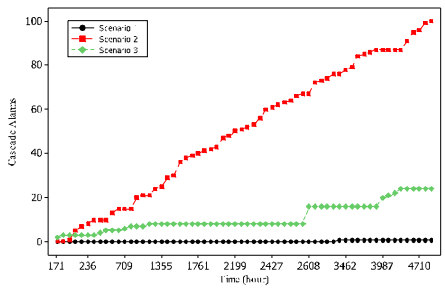
ضعیف همواره بیشترین مقدار را داشته است. این نمودار نشان می‌دهد که عواملی غیر از اپراتور که باعث افزایش تعداد هشدار در شبکه می‌شوند (مانند عدم سرویس‌های تعمیر و نگهداری به‌موقع و عملکرد نامناسب تجهیزات) تأثیر بیشتری در افزایش حجم کاری نسبت به تأخیر و اشتباه اپراتور دارند.



(شکل-۸): حجم کاری اپراتور برای هر سه سناریو در مدت ۶ ماه
(Figure-8): Operator workload in 6 months.

۲-۴- هشدارهای آبشاری

در این موردکاوی تعداد هشدارهای آبشاری در هر سه سناریو اندازه‌گیری شده و مقایسه آن‌ها با یکدیگر در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اگرچه احتمال به وجود آمدن هشدارهای آبشاری به‌طور ثابت در هر سه سناریو برابر با ۱۰٪ در نظر گرفته‌شده، اما تعداد آن‌ها در سناریوی اپراتور ضعیف به‌دلیل خطای بیشتر اپراتور افزایش چشم‌گیری داشته است. در سناریوی شبکه ضعیف برخلاف نرخ بالای ایجاد هشدار در پست‌ها، تعداد هشدارهای آبشاری رشد کمتری داشته و در سناریوی کنترل شبکه که شبکه در شرایط پایدار است، تعداد هشدارهای آبشاری بسیار کم و در بیشتر موارد صفر است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که میزان تأخیر و اشتباه اپراتور تأثیر مستقیم در نرخ ایجاد هشدارهای آبشاری دارد.



(شکل-۹): مقایسه تعداد هشدارهای آبشاری در سناریوهای مختلف
(Figure-9): Cascade alarms

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل جدید برای سامانه هشدار اسکادا با استفاده از شبکه‌های پتری رنگی ارائه شده است. این مقاله با توجه به نوع هشدارها توانست مدلی جدید برای ایجاد هشدارها در پست و پردازش آن‌ها در مرکز کنترل ارائه دهد. با برقراری ارتباط بین هشدارهای سامانه اسکادا و مکان‌های شبکه پتری رنگی، نشان داده شد که می‌توان وضعیت شبکه را در هرلحظه مورد ارزیابی قرارداد و ناهنجاری‌های احتمالی را در پست و شبکه شناسایی کرد.

با استفاده از پارامترهای کنترلی و تغییر در آن‌ها، تأثیر بالارفتن عوامل ایجاد هشدار در پست، عدم‌پردازش هشدار، تأخیر در پاسخ و پاسخ اشتباه به هشدارها در افزایش حجم کاری اپراتور، ایجاد ناهنجاری در شبکه و تعداد هشدارهای آبشاری بررسی شد. این مقاله نشان داد که شبکه‌های پتری ابزار مناسبی برای مدل‌سازی رفتار پست هنگام ایجاد هشدار و رفتار اپراتور هنگام پردازش هشدارها است.

6- References ۶- مراجع

[1] J. Wang, F. Yang, T. Chen, and S. L. Shah, "An overview of industrial alarm systems: main causes for alarm overloading, research status, and open problems," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,* vol. 13, pp. 1045-1061, 2016.

[2] D. Li, J. Hu, H. Wang, and W. Huang, "A distributed parallel alarm management strategy for alarm reduction in chemical plants," *Journal of Process Control,* vol. 34, pp. 117-125, 2015.

[3] Y. Wu, M. Kezunovic, and T. Kostic, "An advanced alarm processor using two-level processing structure," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 2007, pp. 125-130.

[۴] محمودی نصر. پیام، یزدیان ورجانی. علی، "یک سامانه مدیریت دسترسی برای کاهش تهدیدهای عملیاتی در سامانه اسکادا"، پردازش علائم و داده‌ها، دوره ۱۴، شماره ۴ - (۱۲-۱۳۹۶).

[4] P. Mahmoudi-Nasr and A. Yazdian-Varjani, "An Access Management System to Mitigate Operational Threats in SCADA System", *JSDP*, vol. 14 (4), pp. 3-18, 2018.

[5] P. Mahmoudi-Nasr and A. Yazdian-Varjani, "Toward Operator Access Management in SCADA System: Deontological Threat

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]

Mitigation," *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 14, pp. 3314-3324, 2018.

[6] P. T. Bullemer, M. Tolsma, D. Reising, and J. Laberge, "Towards improving operator alarm flood responses: alternative alarm presentation techniques," *Abnormal Situation Management Consortium,* 2011.

[7] S. Charbonnier, N. Bouchair, and P. Gayet, "Fault template extraction to assist operators during industrial alarm floods," *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* vol. 50, pp. 32-44, 2016.

[8] R. R. R. Barbosa, R. Sadre, and A. Pras, "Exploiting traffic periodicity in industrial control networks," *International journal of critical infrastructure protection,* vol. 13, pp. 52-62, 2016.

[9] M. Kezunovic and Y. Guan, "Intelligent alarm processing: From data intensive to information rich," in *System Sciences, 2009. HICSS'09. 42nd Hawaii International Conference on*, 2009, pp. 1-8.

[10] S. Khanmohammadi, K. Rezaie, J. Jassbi, and S. Tadayon, "A model of the failure detection based on fuzzy inference system for the control center of a power system," *Appl. Math. Sci,* vol. 6, pp. 1747-1758, 2012.

[11] V. Calderaro, C. N. Hadjicostis, A. Piccolo, and P. Siano, "Failure identification in smart grids based on petri net modeling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 58, pp. 4613-4623, 2011.

[12] Y. Guan and M. Kezunovic, "Contingency-based nodal market operation using intelligent economic alarm processor," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 4, pp. 540-548, 2013.

[13] D. Hadžiosmanović, D. Bolzoni, and P. H. Hartel, "A log mining approach for process monitoring in SCADA," *International Journal of Information Security,* pp. 1-21, 2012.

[۱۴] پژوهشگاه نیرو, "استاندارد سیستم های اتوماسیون پست‌های انتقال و فوق توزیع "،شرکت توانیر, ۱۳۸۶.

[14] Niroo Research Institue, "Substation automation systems standard (transmission and subtransmission substations), *Ministry of Energy of Iran*, 2008.

[15] T. M. Chen, J. C. Sanchez-Aarnoutse, and J. Buford, "Petri net modeling of cyber-physical attacks on smart grid," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 2, pp. 741-749, 2011.

[16] C. Fecarotti, J. Andrews, and R. Remenyte-Prescott, "Analysis of the Design, Operation and Maintenance Options to Provide a Fault Tolerant Railway System," in *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, 2014.

[17] D. C. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*: John Wiley & Sons (New York), 2009.

[18] X. Dong, K. Hopkinson, X. Tong, X. Wang, and J. Thorp, "IP-based communication systems for wide-area frequency stability predictive control," in *Critical Infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference on*, 2010, pp. 1-7.

[19] J. Zhao, Y. Xu, F. Luo, Z. Dong, and Y. Peng, "Power system fault diagnosis based on history driven differential evolution and stochastic time domain simulation," *Information Sciences,* vol. 275, pp. 13-29, 2014.

[20] V. Rodrigo, M. Chioua, T. Hagglund, and M. Hollender, "Causal analysis for alarm flood reduction," *IFAC-PapersOnLine,* vol. 49, pp. 723-728, 2016.

[21] (2017). http://CPNTools.org

پیام محمودی نصر تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۷۵ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و در مقطع دکترا مهندسی قدرت در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده و هم‌اکنون استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: امنیت شبکه‌های صنعتی و رایانه‌ای، امنیت داده‌ها و شبکه‌های رایانه‌ای.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

P.mahmoudi@umz.ac.ir

[DOI: 10.29252/jsdp.17.2.14]