مقاله پژوهشی

توسعه نمودارهای کنترل جهت پایش آماری شبکه دینامیک خدمات فوریتی

حوریه نجفی

گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. hourieh.najafi@srbiau.ac.ir .

عباس سقایی*

(نویسنده مسئول) گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. a.saghaei@srbiau.ac.ir

چکیده: در چند سال اخیر تحلیل و پایش آماری شبکه‌های اجتماعی و شناسایی وضعیت‌های غیر عادی بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است. در دنیای واقعی علاوه بر شبکه‌های اجتماعی، طیف گسترده‌ای از مسئله‌ها وجود دارد که با راهکار پایش شبکه‌ها قابل تحلیل و بهبود هستند، شبکه‌هایی مانند شبکه‌های حمل‌ونقل، عرضه و تقاضا، تبادلات مالی، شبکه‌های موجود در بهداشت و درمان و غیره، که پایش آن‌ها و تحلیل نتایج حاصل می‌تواند منافع قابل توجهی برای ذینفعان شبکه داشته باشد. این تحقیق برمبنای شناسایی و حل مسئله واقعی شکل گرفته است، به این معنا که یک مسئله واقعی در کشور شناسایی شده و برای حل آن متدولوژی طراحی و اجرا می‌شود. موردکاوی مورد نظر، پایش شبکه‌ای از مراکز یک مجموعه است که خدمات فوریتی در شهرها ارائه می‌دهد. ماهیت این شبکه دینامیک، مبتنی بر ویژگی، جهت‌دار و وزن‌دار می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با مدل کردن سیستم‌های پیچیده به‌عنوان یک شبکه و پایش مداوم آن می‌توان وضعیت‌های غیر عادی را زودهنگام شناسایی و مدیریت نمود و از رخداد بحران در شهرها جلوگیری کرد.

واژگان کلیدی: شبکه‌های مبتنی بر ویژگی، شبکه‌های وزن‌دار، آزمون نسبت درستنمایی (LRT)

۱- مقدمه

در جامعه مدرن، مفهوم شبکه کاملاً مشهود و ملموس است و این مفهوم که میان گروهی از موجودیت‌ها اتصال برقرار است را منتقل می‌کند. با ظهور اینترنت، شبکه‌های اجتماعی محبوبیت قابل توجهی پیدا کرده‌اند. شبکه اجتماعی ساختاریست شامل مجموعه‌ای از موجودیت‌ها مانند افراد، گروه‌ها یا سازمان‌ها و ارتباط بین آن‌ها. در شبکه اجتماعی گره‌ها توسط یک یا چند نوع خاص از رابطه‌ها به هم متصلند. روابطی مانند تبادلات مالی، دوستی‌ها، خویشاوندی، روابط تحصیلی، تجارت، لینک‌های وب، سرایت بیماری (اپیدمولوژی) و غیره. تعداد عناصر، نوع و شیوه ارتباطات عناصر، تنوع و پیچیدگی‌های ارتباط‌ها در شبکه‌ها باعث شده است که شبکه‌ها از شبکه‌های بسیار ساده تا بسیار پیچیده تقسیم‌بندی شوند. تحلیل شبکه‌های اجتماعی به معنای مطالعه ویژگی‌های شبکه‌های اجتماعی و روابط بین افراد و بخش‌های یک شبکه با رویکرد تئوری شبکه ای یا گراف است.

در علوم اجتماعی، رویکرد ساختاری که مبتنی بر مطالعه کنش‌های متقابل میان کنشگران اجتماعی است، تحلیل شبکه اجتماعی نام دارد. به بیانی ساده‌تر، علم تحلیل شبکه‌های اجتماعی، علم تحلیل و مطالعه ساختاری روابط میان افراد است. هر شبکه در برابر تغییرات درونی اعضا و ارتباطات خود دارای ثبات است و یا در طول زمان با پویایی مداومی همراه خواهد بود. این تغییرات ممکن است به استحکام شبکه کمک کند و یا به تضعیف آن بیانجامد. به‌عنوان مثال استحکام یا فروپاشی یک شبکه و شناسایی مهاجمان که در صدد اختلال یا فروپاشی هستند، یکی از مسئله‌های مهم مورد بررسی در بعضی شبکه‌ها است. این امر و موارد مشابه در سایر شبکه‌ها نشان‌دهنده اهمیت مطالعه و تحلیل و پایش شبکه‌ها است و می‌تواند نسبت به نوع شبکه نیاز به بررسی و تحلیل‌های متفاوتی باشد. به‌عنوان مثال در این خصوص می‌توان به شبکه ارتباطی اعضای سازمان القاعده اشاره نمود. داده‌های مرتبط با ارتباطات اعضای سازمان القاعده از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۴ توسط مرکز تحلیل محاسباتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴
دوره ۱۱/ شماره ۴
صفحات: ۳۷۷-۳۹۲

Corresponding author: a.saghaei@srbiau.ac.ir

شاخص‌های ساختاری مرکزیت مفید هستند (نیومن، باراباسی و واتز، ۲۰۰۶). تحقیقات صورت‌گرفته نشان می‌دهد شاخص‌های مرکزیت، بینیت و چگالی، که از شاخص‌های ساختاری شبکه‌ها هستند، از سال ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۴ در حال افزایش بوده است و پس از آن ثابت مانده است [۱] [۲]. چنین اتفاقاتی در شبکه‌های اجتماعی و در سایر شبکه‌ها با استفاده از روش‌های پایش آماری قابل ردیابی و تشخیص هستند و بنا به نتیجه پایش و موضوعیت شبکه می‌توان اقدامات مختلفی را پیش‌بینی کرد. در شبکه‌های مختلف تغییر رفتار شبکه و نوع ارتباطات موجود در آن می‌تواند بیانگر رخدادهایی باشد که غالباً قابل تحلیل هستند و این تحلیل‌ها بسیار پرکاربرد بوده و مزیت‌ها و منافع قابل توجهی را به همراه دارند. لذا امروزه با توجه به گستردگی مفهوم شبکه در حوزه‌های مختلف از جمله شبکه‌های اجتماعی، تحلیل و پایش شبکه‌ها به یک امر گریزناپذیر تبدیل شده است و هر چه مدل‌ها و ابزارهای طراحی شده جامع‌تر باشند (یعنی شبکه‌ها با ویژگی‌های وسیع‌تری را مدل کنند) و بتوانند انواع وسیع‌تری از ساختارهای شبکه و با موضوعیت‌های گوناگون را پوشش دهد از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود.

موضوعی که در چند سال اخیر مطرح شده است پایش آماری الگوی رفتاری شبکه و یا اجزای آن می‌باشد که منجر به شناسایی شرایط غیر عادی و خارج از کنترل در شبکه‌ها می‌شود. به عبارتی استفاده از نمودارهای کنترل در فضای کنترل کیفیت آماری، پس از پایش فرایندهای تک‌متغیره، فرایندهای چندمتغیره و پس از آن پایش توابع، تحت عنوان پروفایل‌ها، بر پایش شبکه‌ها تمرکز یافته است.

این پژوهش بر کاربرد روش‌های پایش آماری در شبکه‌هایی غیر از شبکه‌های اجتماعی تمرکز دارد. در این پژوهش سعی بر این است که اهمیت بکارگیری روش‌های پایش آماری در کنترل و مدیریت سیستم‌های پیچیده‌تر، در قالب یک شبکه، مورد توجه قرار گیرد. هدف از این پژوهش مدل‌سازی و پایش آماری شبکه خدمات فوریتی بر اساس داده‌های واقعی اخذ شده است. داده‌های مورد استفاده در این مقاله مرتبط با یکی از مجموعه-های مراکز خدمات فوریتی است که ارائه خدمات سریع و با کیفیت، مأموریت اصلی این مجموعه است و از اهمیت بسیار قابل توجهی برخوردار می‌باشد. این شبکه دارای ویژگی‌های خاصی بوده که لازم است در مدل‌سازی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر آن که این شبکه اسپارس، مبتنی بر ویژگی‌های گره، وزن‌دار و جهت‌دار می‌باشد، دارای الگوی ذاتی دینامیک است. علاوه بر اهمیت توسعه روشی آماری که بتواند به طور همزمان این ویژگی‌ها را مدل کند، با پایش مداوم این شبکه و شناسایی زودهنگام وضعیت‌های غیر عادی می‌توان از بروز بحران به ویژه در کلان‌شهرها و هچنین مرگ شهروندان جلوگیری نمود. به طور خلاصه ویژگی‌های این تحقیق را می‌توان در موضوعات زیر خلاصه نمود:

- مدل‌سازی و پایش آماری یک سیستم واقعی در قالب یک شبکه جهت حل یکی از چالش‌ها و مسئله‌های موجود در یکی از سازمان‌ها
- مدل‌سازی شبکه با ویژگی‌های همزمان دینامیک، اسپارس، مبتنی بر ویژگی، وزن‌دار و جهت‌دار
- مدل‌سازی شبکه دینامیک بر اساس روش پنجره متحرک
- ارائه یک مثال واقعی جهت تأکید بر اهمیت استفاده از تکنیک‌های پایش آماری برای مدیریت و کنترل شبکه‌هایی غیر از شبکه‌های اجتماعی

در بخش دوم این مقاله پژوهش‌های انجام شده در زمینه پایش شبکه‌ها با استفاده از نمودارهای کنترل، به ویژه شبکه‌های دینامیک، مرور می‌شود. در بخش سوم متدولوژی طراحی شده جهت مدل‌سازی و پایش شبکه خدمات فوریتی و روابط آماری مربوطه ارائه می‌گردد. همچنین در این بخش به نتایج اجرای مدل و تحلیل آن نیز پرداخته می‌شود. در بخش چهارم این مقاله، خلاصه پژوهش انجام شده و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- پایش آماری شبکه‌های دینامیک

روش‌های پایش آماری شبکه‌ها با پایش شبکه‌های تروریستی مانند القاعده و همین طور شبکه‌های اجتماعی مانند شبکه ایمیل‌های Enron آغاز شد. ایده اصلی در پایش شبکه‌ها تشخیص تغییرات ناگهانی در رفتار اجزای شبکه و یا زیرگروهی از شبکه می‌باشد مانند افزایش معنادار ارتباطات در کل شبکه، یا در قسمتی از شبکه و یا در اجزای خاصی از شبکه (برخی گره‌ها یا یال‌ها). البته در برخی موارد ممکن است کاهش قابل توجه ارتباطات در پایش شبکه مد نظر باشد. این وضعیت‌ها حالت‌هایی از شبکه هستند که نسبت به وضعیت معمول شبکه، غیر عادی هستند. غالباً این تغییرات در صورتی که به اندازه

کافی بزرگ نباشند لزوماً با بررسی شکل ترسیمی شبکه قابل شناسایی نمی‌باشد. این موضوع در شبکه‌های بزرگتر از اهمیت بیشتری می‌تواند برخوردار باشد. برای تشخیص وضعیت‌های غیر عادی از وضعیت‌های عادی شبکه از مدل‌سازی‌ها و روش‌های آماری می‌توان استفاده نمود.

همان طور که سویج[1] و دیگران در مقاله خود اشاره نموده‌اند وضعیت‌های غیر عادی را در شبکه‌های دینامیک را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود: گره‌های غیر عادی[2]، یال‌های غیر عادی[3]، زیرشبکه‌های (زیرگراف‌ها) غیر عادی و شناسایی رویدادها[4]. در این بخش به کلیات تحقیقات انجام شده و مقاله‌های پایه‌ای موجود در حوزه به‌کارگیری نمودارهای کنترل برای شناسایی وضعیت‌های غیر عادی می‌پردازیم. استفاده از نمودارهای کنترل برای کشف تغییرات در شبکه‌های مبتنی بر ویژگی، که موضوع اصلی این تحقیق می‌باشد، در بخش آتی به طور کامل مورد توجه قرار می‌گیرد.

مفاهیم و روش‌های کنترل فرآیند آماری می‌توانند مزیت‌های قابل توجهی در پایش شبکه‌ها داشته باشند. یکی از این مفاهیم، تحلیل گذشته‌نگر[5] بر اساس داده‌ها مبنا[6] (پایش فاز I) و روش‌هایی برای پایش داده‌های آتی[7] (پایش فاز II) هستند که در این بخش بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال مک‌کالا[8] و کارلی[9] در تحقیقات خود [۳] [۴] از روش‌های پایش مانند نمودارهای کنترل جمع تجمعی[10] (CUSUM) و میانگین متحرک موزون نمایی[11] (EWMA) برای تشخیص تغییرات در کل شبکه استفاده کرده است. تمرکز مک‌کالا و کارلی در تحقیقات خود، پیدا کردن الگوهای ارتباطی در واحدهای نظامی بوده است. در این تحقیقات شاخص‌های کلی شبکه مانند میانگین نزدیکی و میانگین بینیت به‌عنوان ورودی نمودارهای کنترل در نظر گرفته شده است. روش‌های پیشنهادی روی چند مجموعه داده اجرا شده است که مهم‌ترین آن‌ها شبکه اجتماعی القاعده بوده است. نتایج پایش داده‌ها نشان می‌دهد این سازمان تروریستی که در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ به برج‌های دوقلو حمله کردند، تحرکات خود را در سال ۱۹۹۷ آغاز کرده‌اند. بنابراین با پایش شبکه‌های اجتماعی می‌توان قبل از آن که رویدادی رخ دهد، زودتر ردپای تغییرات در شبکه کشف شود. به طور مشابه [۵] [۶] کشف تغییرات در شبکه‌های اجتماعی را به ترتیب در یک شبکه سیاسی (در سودان) و در یک شبکه تروریستی (شبکه تروریستی نوردین[12] در اندونزی) به کار برده‌اند.

در سال ۲۰۱۶، آذرنوش و دیگران احتمال ایجاد ارتباط بین دو گره در شبکه را با استفاده از رگرسیون لجستیک[13] مدل کردند. در واقع در این تحقیق مبنای مدل آماری، تاثیر ویژگی‌های دو گره در ایجاد یال بین آن دو می‌باشد. سپس یک آزمون نسبت درستنمایی[14] (LRT) برای شناسایی تغییرات رگرسیون لجستیک پیشنهاد کردند. در صورتی که طبق آزمون نسبت درستنمایی تغییری در مکانیزم شکل‌گیری شبکه ایجاد شده باشد به‌عنوان وضعیت غیر عادی تشخیص داده می‌شود. از طریق شبیه‌سازی، عملکرد روش پیشنهادی با روش مک‌کالا و کارلی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که احتمال ایجاد ارتباط بین گره‌ها در شبکه تغییر می‌کند روش‌هایی که معیارهای ساختاری را در نظر می‌گیرند دیرتر از روش‌های مبتنی بر ویژگی شرایط غیر عادی را شناسایی می‌کنند و سیگنال می‌دهند [۷].

زو[15] و لی[16] یک مدل حالت – فضا[17] برای مدل کردن پویایی که به طور طبیعی در شبکه‌های اجتماعی دینامیک وجود دارد، ارائه دادند [۸]. مدل‌های حالت – فضا چهارچوبی انعطاف‌پذیر برای مدل‌سازی سیستم‌های دینامیک است. در این روش، گرچه وضعیت واقعی سیستم ناشناخته است، اما می‌توان آن را با استفاده از مشاهدات دارای نویز به مرور زمان استنباط نمود. هنگامی که مجموعه داده‌ای، به‌عنوان سری زمانی چندمتغیره دارای نویز باشد و توصیف تکامل داده‌ها مشکل باشد، استفاده از مدل‌های حالت- فضا مفید واقع می‌شود [۹]. برای تخمین

[1] Savage
[2] Anomalous vertices
[3] Anomalous edges
[4] Event Detection
[5] Retrospective
[6] Baseline
[7] Prospective
[8] McCulloh
[9] Carley
[10] Cumulative – Sum: CUSUM
[11] Exponentially Weighted Moving Average: EWMA
[12] Noordin
[13] Logistic Regression
[14] Likelihood Ratio Test: LRT
[15] Zou
[16] Li
[17] State-Space Model

پارامترها ماکزیمم‌سازی انتظارات[18] را با هموارسازی بهینه بیزین[19] یکپارچه کرده‌اند و در نهایت از روش تجزیه و تحلیل ارزش واحد[20] برای ادغام مدل حالت – فضای شبکه و کنترل فرآیند آماری استفاده کرده‌اند [۸].

در خصوص شبکه‌های وزن‌دار، اسپارکس[21] در دو مقاله روش‌هایی را پیشنهاد داده است که انحراف سطح هموارشده ارتباطات در شبکه به ترتیب از میانگین و میانه مورد انتظار مورد پایش قرار می‌گیرد [۱۰]. در مقاله اول از میانگین متحرک موزون نمایی چندمتغیره (MEWMA) و در مقاله دوم از نمودار کنترل جمع تجمعی تطبیقی[22] برای پایش تعداد ارتباطات در شبکه استفاده شده است. در این مقاله‌ها فرض بر این است که ارتباطات بین دو گره از توزیع پوآسون تبعیت می‌کند. در ادامه تحقیقی که اسپارکس و ویلسون[23] ارائه دادند، از همان مدل و نمودار کنترل EWMA که اسپارکس پیشنهاد داده بود، استفاده شده است [۱۱]. همین طور توزیع آماری تعداد ارتباطات بین گره‌ها پوآسون می‌باشد. این روش تیم‌های همکار، تیم‌هایی با یک رهبر توانمند، و ارتباطات کلی را پوشش می‌دهد. آن‌ها روشی برای جستجوی مبتنی بر همسایگی جهت پیدا کردن تیم‌های ناشناخته کاندید طراحی کردند. آن‌ها ابتدا تعداد ارتباطات را با یک استراتژی چندمتغیره هموار می‌کنند، سپس تیم‌های متراکم را شناسایی می‌کنند. به طور کلی در روش آن‌ها تعداد ارتباطات یک تیم با میانگین تعداد ارتباطات انتظاری مقایسه می‌شود [۱۱].

۳- پایش آماری شبکه دینامیک مراکز ارائه‌دهنده خدمات فوریتی

در این بخش متدولوژی مورد نظر در خصوص پایش آماری شبکه مراکز ارائه‌دهنده خدمات فوریتی ارائه می‌شود.

۳-۱- کاربرد آزمون نسبت درستنمایی (Likelihood Ratio Test) در پایش شبکه‌ها

آزمون نسبت درستنمایی[24] (LRT) یکی از روش‌های آزمون فرض آماری است که بین درستی یک فرضیه و متمم آن تصمیم می‌گیرد که در سال ۱۹۲۸ توسط نیمن و پیرسون مطرح شد.

$$\lambda(x)=\frac{sup_{\Theta_0}\ L(\theta)}{sup_{\Theta}\ L(\theta)}=\frac{L(\hat{\theta}_0)}{L(\hat{\theta})} \qquad (۱)$$

آزمون نسبت درستنمایی هنگامی که $\lambda(x)<\lambda_0$ باشد، فرض H_0 را رد می‌کند، که در آن λ_0 عددی ثابت در فاصله $[0,1]$ است و با توجه به سطح آزمون مشخص می‌شود.

به طور خاص در کنترل فرآیند آماری، نمودارهای کنترل برمبنای آزمون نسبت درستنمایی هم از لحاظ عملی و هم از لحاظ تئوری مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. این نمودارها در حوزه‌های مختلف SPC مورد استفاده قرار گرفته است مانند تحقیقات سیگموئید[25] و ونکاتامران[26] [۱۳]، اپلی[27] و شی[28] [۱۴]، هان[29] و تیسانگ[30] [۱۵] و ژانگ[31]، زو[32] و وانگ[33] [۱۲]. همین طور به طور خاص در حوزه پایش پروفایل که مشابهت قابل توجهی با مدل‌سازی و پایش شبکه‌های مبتنی بر ویژگی دارد، نمودارهای کنترل LRT به کار گرفته شده است مانند ژانگ، لی[34] و وانگ [۱۶]، شانگ[35]، تیسانگ و زو [۱۷]، نورالسناء و دیگران [۱۸]، سلیمانی، خدمتی و محلوجی [۱۹] و چی[36] و دیگران [۲۰].

در مقاله آذرنوش و دیگران [۷] نیز بر این موضوع تأکید شده است که روش‌هایی که بر اساس LRT طراحی شده‌اند، برای پایش در حوزه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و کاربردهای موفقیت آمیزی در مسائل گوناگون داشته‌اند مانند سالیوان[37] و وودال[38] [۲۱]، زو و تیسانگ [۲۲]، پی‌نبر،

[18] Expectation maximization
[19] Bayesian optimal smoothing
[20] Value decomposition – based method
[21] Sparks
[22] Adaptive CUSUM
[23] Wilson

[24] Likelihood Ratio Test
[25] Siegmund
[26] Venkatraman
[27] Apley
[28] Shi
[29] Han
[30] Tsung
[31] Zhang
[32] Zou
[33] Wang
[34] Li
[35] Shang
[36] Qi
[37] Sullivan

جیونگوا[39] و یه[40] [۲۳]. لذا در مقاله آذرنوش و دیگران که شبکه‌های باینری پایش شده‌اند از نمودار کنترل LRT استفاده شده است.

پس از آن نیز در پایش شبکه‌های مبتنی بر ویژگی، به طور گسترده‌ای از نمودارهای کنترل LRT استفاده شده است مانند کارهای فراهانی، نورالسناء و برادران [۲۴]، فتوحی، امیری و ملکی [۲۵]، فراهانی و دیگران [۲۶]، موگویی و دیگران [۲۷]، نجفی و سقایی [۲۸] و شقاقی و سقایی [۲۹]. بنا به اذعان پژوهشگران غالباً نمودارهای کنترل LRT در این حوزه نیز نسبت به سایر نمودارهای کنترل کارایی بهتری داشته است، مانند تحقیق فتوحی، امیری و ملکی [۲۵] که در آن بیان شده است که روش LRT کارایی بهتری نسبت به روش‌های نمودار کنترل T2 هتلینگ تعمیم یافته و F تعمیم یافته داشته است. لذا در این پژوهش نیز از LRT برای پایش شبکه و شناسایی وضعیت‌های غیر عادی استفاده می‌شود.

۳-۲- مدل‌سازی شبکه‌های دینامیک

در مقاله آذرنوش و دیگران [۷] به استفاده از پنجره متحرک[41] اشاره شده است. بنا به این تحقیق یکی از چالش‌هایی که در خصوص مجموعه مرجع ایستا مطرح است، زمان‌بر بودن جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای تشکیل مجموعه مرجع، که شبکه‌های تحت کنترل می‌باشد، است. این موضوع مانع از پایش فوری شبکه می‌باشد و به این ترتیب در این شرایط ایده استفاده از روش‌های خود راه‌انداز[42] تقویت می‌شود [۷] [۳۰] [۳۱]. یک راهکار اولیه برای این مسئله، بروزرسانی یک مجموعه مرجع کوچک می‌باشد. به این ترتیب که پایش شبکه با یک مجموعه مرجع کوچک شروع می‌شود. شبکه جدید بر اساس این مجموعه پایش می‌شود، در صورتی که تحت کنترل بود به این مجموعه اضافه می‌گردد. یک راهکار بهتر که در پژوهش آذرنوش و دیگران نیز به آن اشاره شده است ولی اجرا نشده است، استفاده از پنجره متحرک می‌باشد. این روش کمک می‌کند تا با توجه به رفتارهای معمول سیستم، مجموعه مرجع به طور دینامیک به‌روز شود و از این طریق امکان تشخیص بهتر تغییرات ناگهانی در زمانی که تغییرات ذاتی دینامیک در شبکه وجود دارد، فراهم گردد.

یکی دیگر از روش‌هایی که برای مدل‌سازی دینامیک شبکه پیشنهاد شده است، استفاده از مدل‌های حالت-فضا می‌باشد [۳۲]. در این مدل‌ها، ضرایب مدل رگرسیونی متغیرهای حالت می‌باشند که توسط یک فرآیند تصادفی ایجاد شده‌اند و وزن یال‌ها مشاهدات نویزدار می‌باشند. این روش در حالتی که وابستگی پیچیده‌تری بین داده‌های شبکه (تصویرهای لحظه‌ای شبکه) وجود داشته باشد، توصیه می‌شود [۳۲].

در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی تغییرات تدریجی شبکه از پنجره متحرک استفاده می‌شود. مجموعه مرجع اولیه تعدادی از شبکه‌های تحت کنترل می‌باشد و با ورود شبکه جدید تحت کنترل بروزرسانی می‌شود. به این معنا که هر شبکه جدید (تصویر لحظه‌ای بعدی از شبکه) که پایش می‌شود، در صورتی که وضعیت عادی داشته باشد و تحت کنترل باشد، به مجموعه اضافه می‌شود و در صورتی که شبکه تحت کنترل نباشد و مکانیزم تشکیل شبکه تغییر معناداری داشته باشد، به مجموعه مرجع اضافه نمی‌شود و مجموعه اولیه به صورت قبل باقی می‌ماند تا شبکه تحت کنترل بعدی وارد شود. به این ترتیب الگوی تغییرات ذاتی شبکه در طول پایش در نظر گرفته می‌شود تا امکان تشخیص بهتر وضعیت‌های عادی از وضعیت‌های غیر عادی فراهمشود.

۳-۳ – طراحی متدولوژی پایش شبکه دینامیک مراکز ارائه‌دهنده خدمات فوریتی

شبکه مورد نظر در این پژوهش، شبکه‌ای از مراکزی است که خدمات فوری به جامعه ارائه می‌دهند. یکی از موضوعات کلیدی در مدیریت حوادث حضور به موقع تیم و ارائه خدمات در حداقل زمان ممکن می‌باشد و از طرفی در هر حال منابع و امکانات موجود در این مراکز محدود است، بنابراین پایش مداوم سیستم ارسال تیم‌ها، ماشین و تجهیزات و تشخیص زودهنگام وضعیت‌های غیر عادی این سیستم، به ویژه در مناطق بزرگ و پرجمعیت، موضوع مهمی است. چالشی که وجود دارد این است که چطور می‌توان سیستمی که دارای تعداد مراکز زیادی می‌باشد، این مراکز ویژگی‌های متنوعی دارند و با هم در تعامل هستند را، به صورت مستمر، پایش نمود. یکی از موضوعاتی که

[38] Woodall
[39] Jionghua
[40] Yeh
[41] Moving-window approach
[42] Self-starting

در این شبکه مطرح است نبود امکانات منابع انسانی، ماشین یا تجهیزات در یک مرکز، در زمان درخواست خدمات است. در این وضعیت، درخواست به مرکز دیگر ارجاع داده می‌شود و گاهی تا چند مرکز این درخواست منتقل می‌شود. بدیهی است در چنین شرایطی مخاطرات جانی و مالی شهروندان را تهدید می‌نماید.

در این تحقیق پایش شبکه مورد نظر در یکی از شهرهای بزرگ کشور مورد نظر می‌باشد که دارای حدود ۱۵۰ مرکز می‌باشد. داده‌های حدود ۴۰ روز از این شبکه در اختیار قرار گرفته است. با توجه به آن که ۱۵۰ مرکز در این شبکه موجود است و شبکه جهت‌دار می‌باشد، تعداد رکوردها جهت مدل‌سازی در هر روز حدود ۲۰،۰۰۰ رکورد بوده است. در این شبکه، مراکز، گره‌ها و درخواست یک مرکز برای ارائه خدمات از مرکز دیگر، یال‌های شبکه را تشکیل می‌دهد. این شبکه، یک شبکه مبتنی بر ویژگی است، لذا مدل‌سازی مکانیزم تشکیل یال‌ها بین دو گره بر اساس ویژگی‌های گره‌ها انجام می‌شود. ویژگی‌هایی که در این مسئله به کار رفته است، میزان درخواست استفاده از خدمات هر مرکز (تقاضا) و فاصله جغرافیایی مراکز می‌باشد.

در این متدولوژی، با توجه به عملکرد خوبی که نمودارهای کنترل LRT در تحقیقات قبل داشته‌اند، برای پایش شبکه از این نمودارها استفاده می‌شود. به این منظور مجموعه‌ای از شبکه‌های تحت کنترل به‌عنوان مجموعه مرجع (مجموعه مبنا[43]) در نظر گرفته می‌شود. این مجموعه مرجع به صورت دینامیک بروزرسانی می‌شود، به این معنا که هر شبکه جدید که پایش می‌شود و در واقع با مجموعه مبنا مقایسه می‌شود، در صورتی که تحت کنترل باشد، وارد این مجموعه می‌گردد و با تکرار این فرآیند پنجره مجموعه مبنا در طول زمان حرکت می‌کند. مجموعه مرجع را به صورت $\{G(t), t \in R\}$ نشان می‌دهیم که در آن $G(t)$، تصویر شبکه مورد نظر در زمان t می‌باشد. R، مجموعه‌ای از زمان‌هایی می‌باشد که شبکه تحت کنترل است. تصویر جدید شبکه در زمان τ، با این مجموعه مقایسه می‌شود.

با توجه به این که شبکه مورد نظر اسپارس می‌باشد و ماهیت آن ایجاب می‌کند، مکانیزم تشکیل شبکه با استفاده از رگرسیون پوآسون Hurdle مدل‌سازی می‌شود. در صورتی که مکانیزم تشکیل شبکه به صورت معناداری تغییر کرده باشد ضرایب متغیرها در رگرسیون تغییر می‌کند. برای شناسایی این موضوع که آیا مکانیزم تشکیل شبکه تغییر معناداری داشته است یا خیر، آزمون نسبت درستنمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه (۲) این آزمون را نشان می‌دهد که در آن β^0، ضرایب رگرسیون شبک ه‌های مجموعه مرجع و β^1، ضرایب رگرسیون شبکه جدید، در زمان τ می‌باشد.

$$H_0: \beta^0 = \beta^1$$
$$H_1: \beta^0 \neq \beta^1 \qquad (۲)$$

برای انجام این آزمون فرض از آزمون نسبت درستنمایی استفاده می‌شود و پارامترهای مدل رگرسیون با روش ماکزیمم درستنمایی تخمین زده می‌شود. رابطه (۳) صورت کلی آماره LRT را نشان می‌دهد.

$$\Lambda(\tau) = 2(l_1 - l_0) \qquad (۳)$$

که در آن l_1 و l_0 به ترتیب تابع لگ درستنمایی[44] تحت فرض H_1و تابع لگ درستنمایی تحت فرض H_0 می‌باشد.

در رابطه (۴) تابع لگ درستنمایی تحت فرض H_1 ارائه شده است.

$$l_1 = [I(k=0)\, log\left(\frac{e^{X_{ij}'(t)\beta^1}}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^1}}\right) + I(k \geq 1)\, log\left(\frac{1}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^1}}\right) + I(k \geq 1)\, log\ \left(\frac{\exp\ \left(X_{ij}'(t)\beta^1\right)^k\ e^{-\exp\left(X_{ij}'(t)\beta^1\right)}}{k!\,(1-\ e^{-\exp\ \left(X_{ij}'(t)\beta^1\right)})}\right)] \qquad (۴)$$

همین طور تابع لگ درستنمایی تحت فرض H_0 به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$l_0 = [I(k=0)\, log\left(\frac{e^{X_{ij}'(t)\beta^0}}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^0}}\right) + I(k \geq 1)\, log\ \left(\frac{1}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^0}}\right) + I(k \geq 1)\, log\ \left(\frac{\exp\ \left(X_{ij}'(t)\beta^0\right)^k\ e^{-\exp\left(X_{ij}'(t)\beta^0\right)}}{k!\,(1-\ e^{-\exp\ \left(X_{ij}'(t)\beta^0\right)})}\right)] \qquad (۵)$$

که در آن $I(.)$ تابع مشخصه[45] می‌باشد.

[43] Baseline

[44] Log-likelihood

[45] Indicator Function

به منظور محاسبه حد کنترل از منطق شبیه‌سازی مونت کارلو[۴۶] استفاده می‌شود.

در این موردکاوی، شبکه به طور ذاتی دینامیک است و به صورت هموار در طی روزهای مختلف سال تغییر می‌کند، لذا نمی‌توان مجموعه مبنا را همواره ثابت در نظر گرفت. به همین دلیل مجموعه مبنا را به صورت پنجره‌ای که به طور دینامیک در طی زمان بروزرسانی می‌شود در نظر گرفته شده است. هر بار مجموعه مرجع دینامیک بروز می‌شود و حد کنترل بر اساس آماره‌های LRT که برای شبکه‌هایی که در مجموعه مرجع قرار دارند محاسبه شده است، چندین بار (۱۲۰۰۰ بار) بازنمونه‌گیری انجام می‌شود و هر بار با توجه به منطق مونت کارلو حد کنترل مشخص می‌گردد، به طوری که خطای نوع اول حدود ۰/۰۵ باشد و بر اساس آن حد کنترل تعیین می‌شود.

۳-۴ – آماده‌سازی داده‌ها و اجرای متدولوژی پایش شبکه دینامیک مراکز ارائه دهنده خدمات فوریتی

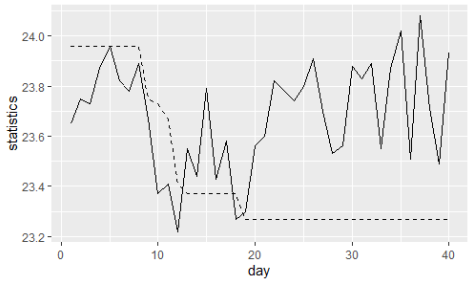
این پژوهش بر اساس داده‌های واقعی دریافت شده از سازمان مربوطه انجام شده است. داده‌های تقاضا و داده‌های کمبودهای اتفاق افتاده در دو پایگاه داده جداگانه به صورت روزانه ثبت می‌شود. با توجه به محدودیت‌های موجود در اخذ داده‌های واقعی شبکه، داده‌های حدود ۴۰ روز در اختیار قرار گرفت. در شهر مورد نظر ۱۵۰ مرکز وجود دارد، به عبارتی شبکه مورد نظر ۱۵۰ گره دارد و لذا از آن‌جایی که شبکه جهت‌دار می‌باشد، مجموعه داده‌های هر روز دارای ۲۲۳۵۰ رکورد است.

یک مجموعه داده شامل کلیه تقاضاهای هر مرکز در بازه زمانی ۴۰ روزه و اطلاعات مربوط به آن و مجموعه داده دیگر شامل تعداد درخواست پاسخ داده نشده ثبت شده در این مدت در پایگاه داده مرکز پیام می‌باشد. در مجموعه داده اول ابتدا تقاضای روزانه هر مرکز در هر روز محاسبه و سپس اختلاف تقاضای مراکز مختلف در هر روز نیز محاسبه و استخراج گردید. همین طور با توجه به مختصات جغرافیایی مراکز، فاصله هر مرکز با سایر مراکز محاسبه شده است. داده‌های مربوط به مختصات جغرافیایی و مجموعه داده تقاضا شامل کل گره‌های موجود (مراکز) در شبکه می‌شوند اما در مجموعه داده تعداد درخواست‌های پاسخ داده نشده، تنها مراکزی که دچار کمبود بوده‌اند در هر روز ثبت شده است. بنابراین قبل از یکپارچه‌سازی

جدول ۱- بخشی از جدول داده‌های شبکه در روز اول

ردیف	مرکز امدادی i	مرکز امدادی j	تقاضای مرکز i و j	فاصله مراکز i و j	تعداد درخواست بدون پاسخ
۱	۱	۲	۰	۰.۰۶	۰
۲	۱	۳	۰	۰.۰۴	۰
۳	۱	۴	۴	۰.۰۱	۰
۴	۱	۵	۴	۰.۲	۳
۵	۱	۶	۱	۰.۱۳	۱
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
۲۲۳۴۶	۱۵۰	۱۴۵	۲	۰.۰۲	۰
۲۲۳۴۷	۱۵۰	۱۴۶	۰	۰.۴۲	۰
۲۲۳۴۸	۱۵۰	۱۴۷	۲	۰.۰۷	۴
۲۲۳۴۹	۱۵۰	۱۴۸	۵	۰.۰۶	۰
۲۲۳۵۰	۱۵۰	۱۴۹	۴	۰.۲۷	۰

داده‌ها لازم بود در هر روز مراکزی که تبادلی با هم نداشته‌اند شناسایی شوند و لینک‌های صفر به همراه ویژگی‌های گره‌ها به مجموعه داده‌های هر روز اضافه شود. سپس با توجه به کد مراکز، اطلاعات هر روزِ سه مجموعه داده تقاضا، کمبودها و فاصله جغرافیایی مراکز یکپارچه گردید. جدول (۱) بخشی از جدول نهایی داده‌های شبکه در روز اول را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار پایش شبکه دینامیک یک مجموعه ارائه دهنده خدمات فوریتی

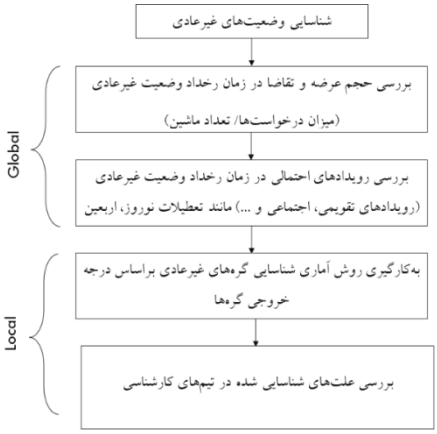
شکل (۱) نمودار پایش شبکه را مطابق متدولوژی شرح داده شده نشان می‌دهد. ۷ روز اول برای ساخت مجموعه مرجع لحاظ شده است. هر شبکه تحت کنترل مجموعه مرجع را بروز می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حد کنترل اولیه در ۷ روز اول ۲۳/۹۶ بوده است و با توجه به آن که شبکه در روزهای ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۸ و ۱۹ تحت کنترل بوده است، مجموعه مرجع را بروز کرده است و در نتیجه حد کنترل تغییر یافته است..

چنانی‌که که در این نمودار مشاهده می‌شود در روزهای ۱۳ تا ۱۷، شبکه خارج از کنترل بوده است. پس از بررسی‌های انجام

[46] Monte Carlo simulation

شده در جلسات، مشخص شد این وضعیت غیر عادی به دلیل کمبود نیروی انسانی در چندین مرکز به دلیل شیوع ویروس کرونا بوده است که منجر به عدم تعادل عرضه و تقاضا شده است. همچنین اعزام تعداد قابل توجهی از ماشین‌ها به حومه شهر مورد بررسی، منجر به تکرار وضعیت غیر عادی از روز ۲۰ به به بعد شده است.

یکی از موضوعاتی که در اجرای متدولوژی به صورت آنلاین مطرح می‌شود، برنامه عملیاتی وضعیت‌های غیر عادی می‌باشد. به عبارتی متخصصان پس از دریافت سیگنال که نشان‌دهنده وضعیت‌های غیر عادی الگوی رفتاری شبکه می‌باشد، لازم است چه اقداماتی انجام دهند. شکل (۲) برنامه تدوین شده در این خصوص را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، ابتدا یک بررسی و تحلیل عمومی انجام شود. ابتدا در بازه زمانی رخداد وضعیت غیر عادی، موضوعات کلان شبکه مانند حجم عرضه و تقاضا (میزان درخواست‌های ثبت شده و تعداد تیم‌ها و ماشین‌ها و تجهیزات آماده خدمت) در کل شبکه مورد بررسی قرار گیرد که آیا در کل شبکه به دلیل خاصی افزایش یا کاهش قابل توجهی داشته است یا خیر.



شکل ۲- برنامه عملیاتی وضعیت‌های غیرعادی شناسایی شده (OCAP)

درگام بعد، از آنجایی که رویدادهای مختلف می‌تواند بر برنامه‌ریزی و توزیع منابع در مراکز داشته باشد، این موضوع نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. این دو مرحله بیشتر بر ریشه‌یابی و بررسی کلی شبکه تمرکز دارد. در مرحله بعد علت‌های ریشه‌ای به صورت محلی شناسایی می‌شوند. با سه بررسی مذکور فهرستی از علت‌های بالقوه شناسایی می‌شود. در نهایت لازم است این علت و شواهد شناسایی شده در تیم‌های تخصصی و کارشناسی بررسی شده و علت‌های ریشه‌ای مشخص شوند.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش بر کاربرد روش‌های پایش آماری در شبکه‌هایی غیر از شبکه‌های اجتماعی تمرکز داشت. در این پژوهش سعی بر این بود که اهمیت بکارگیری روش‌های پایش آماری در کنترل و مدیریت سیستم‌های پیچیده‌تر، در قالب یک شبکه، مورد توجه قرار گیرد. موردکاوی مورد نظر، یکی از مجموعه مراکز خدمات فوریتی بود که مأموریت آن ارائه خدمات سریع و با کیفیت به شهروندان می‌باشد. ماهیت این شبکه دینامیک بوده و متدولوژی ارائه شد که بتواند تغییرات ذاتی شبکه را مدل کند و به‌عنوان وضعیت غیر عادی تشخیص ندهد. متدولوژی طراحی شده برای داده‌های جمع‌آوری شده اجرا شد. اجرای مدل برای داده‌های ۴۰ روز شبکه نشان داد در روزهای ۱۳ تا ۱۷ام به دلیل کمبود نیروی انسانی در چند مرکز (به دلیل شدت گرفتن شیوع ویروس کرونا) و در روزهای ۲۰ام به بعد به دلیل اعزام ماشین‌ها و تجهیزات ارائه دهنده خدمات به خارج از شهر، شبکه تحت کنترل نبوده است. لذا با تشخیص زودهنگام وضعیت شبکه و انجام اقدامات لازم و مدیریت شرایط موجود از وقوع حوادث غیر قابل جبران می‌توان جلوگیری نمود. همین طور یک برنامه عملیاتی برای نحوه تحلیل وضعیت‌های غیر عادی توسط متخصصان مجموعه موردنظر طراحی و ارائه شد. لذا می‌توان اذعان نمود با پایش مداوم شبکه می‌توان شرایط خارج از کنترل را زودهنگام شناسایی نمود و به این ترتیب از بروز بحران به ویژه در کلان‌شهرها جلوگیری نمود. یکی از موضوعاتی که می‌تواند به‌عنوان تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد، بهینه نمودن طول پنجره متحرک (تعداد شبکه در مجموعه مرجع) می‌باشد، چنانی‌که وودال و همکاران نیز در مقاله خود به این موضوع اشاره نموده است [۳۳].

۵- منابع

[1] McCulloh, I., and Carley, K. M., 2008a. Social network change detection. *Technical Report*

CMU-ISR-08-116, Institute for Software Research, School of Computer Science, Carnegie Mellon University.

[2] McCulloh, I., and Carley, K. M., 2008b. Detecting change in human social behavior simulation. *Technical Report CMU-ISR-08-135, Institute for Software Research, School of Computer Science, Carnegie Mellon University.*

[3] McCulloh, I., Carley, K. and Horn, D. B., 2008. Change detection in social networks. *Technical Report 1235, United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.*

[4] McCulloh, I. and Carley, K. M., 2011. Detecting change in longitudinal social networks. *Technical report, United States: Military Academy West Point NY Network Science Center (NSC).*

[5] Tambayong, L. 2014. Change detection in dynamic political networks: the case of Sudan. In *Theories and Simulations of Complex Social Systems*, pp.43-59.

[6] Everton, S. F., Cunningham, D., 2013. Detecting significant changes in dark networks. *Behav Sci Terrorism Polit Aggress*. Vol.5, No.2, pp.94-114.

[7] Azarnoush, B., Paynabar, K., Jennifer, B., and Runger, G, 2016. Monitoring temporal homogeneity in attributed network streams. *Journal of Quality Technology*, Vol.48, pp.28-43.

[8] Zou, N., Li, J., 2017. Modeling and change detection of dynamic network data by a network state space model. *IISE Trans*. Vol.49, No.1, pp.45-57.

[9] Shi, J., 2006. Stream of variation modeling and analysis for multistage manufacturing processes. *CRC Press*.

[10] Sparks, R., Wilson, J. D., 2016. Monitoring communication outbreaks among an unknown team of actors in dynamic networks. *Journal of Quality Technology*, Vol.51, No.4, pp. 353-374.

[11] Woodall, W. H., Zhao, M. J., Paynabar, K., Sparks, R. and Wilson, J. D., 2017. An overview and perspective on social network monitoring. IISE Transactions, pp.354-365.

[12] Zhang, J., Zou, C., Wang, Z., 2010. A control chart based on likelihood ratio test for monitoring process mean and variability. *Quality and Reliability Engineering International*. Vol.26, pp.63-73.

[13] Siegmund, D. and Venkatraman, E.S., 1995. Using the generalized likelihood ratio statistics for sequential detection of a change-point. *Annual Statistics.* Vol.23, pp.255-271.

[14] Apley, D.W. and Shi, G.G., 1999. The GLRT for statistical process control of autocorrelated processes. *IIE Transaction*. Vol.31, pp.1123-1134.

[15] Han, D. and Tsung, F., 2005. Comparison of the CUSCORE, GLRT and CUSUM control charts for detecting a dynamic mean change. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics.* Vol.57, pp.531-552.

[16] Zhang, J., Li, Z. and Wang, Z., 2009. Control chart based on likelihood ratio for monitoring linear profiles. *Computer Statistics and Data Analysis.* Vol.53, pp.1440-1448.

[17] Shang, Y., Tsung, F., and Zou, C., 2011. Profile monitoring with binary data and random predictors. *Journal of Quality Technology*, Vol.43 No.3, pp.196–208.

[18] Noorossana, R., Saghaei, A., Izadbakhsh, H., and Aghababaei, O., 2013. Monitoring multinomial log it profiles via log-linear models. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, Vol.24 No.2, pp.137–142.

[19] Soleymanian, M. E., Khedmati, M., and Mahlooji, H., 2013. Phase II monitoring of binary response profile. *Scientia Iranica E*, Vol.20 No.6, pp.2238–2246.

[20] Qi, D., Wang, Z., Zi, X. and Li, Z., 2016. Phase II monitoring of generalized linear profiles using weighted likelihood ratio charts. *Computers & Industrial Engineering*, Vol.94, pp.178–187.

[21] Sullivan, J. H. and Woodall, W. H., 1996. A Control Chart for Preliminary Analysis of Individual Observations. *Journal of Quality Technology, Vol.*28 No.3, pp.265-278.

[22] Zou, C. and Tsung, F., 2010. Likelihood Ratio-Based Distribution-Free EWMA Control Charts. *Journal of Quality Technology, Vol.*42 No.2, pp.174.

[23] Paynabar, K., Jionghua, J. and Yeh, A. B., 2012. Phase I Risk-Adjusted Control Charts for Monitoring Surgical Performance by Considering Categorical Covariates. *Journal of Quality Technology*, Vol.44 No.1, pp.39-53.

[24] Mazrae Farahani, E., Baradaran Kazemzadeh, R., Albadvi, A. and Teimourpour, B., 2018. GLMM-Based Modeling and Monitoring Dynamic Social Network. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, Vol. 29, No. 3, pp.247- 259.

[25] Fotuhi, H., Amiri, A. and M. Maleki, R., 2018. Phase I monitoring of social networks based on Poisson regression profiles. *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.34, pp. 572-588.

[26] Mazrae Farahani, E., Baradaran Kazemzadeh, R., Albadvi, A. and Teimourpour, B., 2018. GLMM-Based Modeling and Monitoring Dynamic Social Network. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, Vol. 29, No. 3, pp.247- 259.

[27] Mogouie H., Raissi, G. A., Bahrami, E. and Amiri, A., 2019. Statistical monitoring of binary response attributed social networks considering random effects. *Communications in Statistics-Simulation and Computation* doi.org/10.1080/03610918.2019.1661471.

[28] Najafi, H. and Saghaei, A., 2020. Statistical monitoring for change detection of interactions between nodes in networks: With a case study in financial interactions network. *Communications in Statistics- Theory and Methods*, DOI:10.1080/03610926.2020.1725830.

[29] Shaghaghi, M. and Saghaei, A., 2020. PCA likelihood ratio test approach for attributed social networks monitoring. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, DOI: 10.1080/03610926.2018.1491599.

[30] Maboudou-Tchao, E. M. and Hawkins, D. M., 2011. Self-Starting Multivariate Control Charts for Location and Scale. *Journal of Quality Technology*, Vol.43, No.2, pp.113–126.

[31] Capizzi, G. and Masarotto, G., 2010. Self-Starting CUSCORE Control Charts for Individual Multivariate Observations. *Journal of Quality Technology*, Vol.42, No.2, pp. 136–151.

[32] Gahrooei Raeisi, M. and Paynabar, K., 2018. Change detection in a dynamic stream of attributed networks. *Journal of Quality Technology, Vol.*50, pp.418-430.

[33] Woodall, W. H., Zhao, M. J., Paynabar, K., Sparks, R. and Wilson, J. D., 2017. An overview and perspective on social network monitoring. *IISE Transactions*, pp.354-365.

Developing Control Charts for Statistical Monitoring of a Dynamic Network of Emergency Service

Hoorieh Najafi

Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. hourieh.najafi@srbiau.ac.ir

Abbas Saghaei

Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. a.saghaei@srbiau.ac.ir

1. Introduction

In modern society, the concept of a network is quite visible and tangible. A network connects a group of entities. In various networks, the change in network behavior and the type of communication can indicate events that can often be analyzed. These analyzes are often very widely used and have significant advantages and benefits. An issue that has been raised in the last few years is the statistical monitoring of the behavior pattern of the network or its components, which leads to the identification of abnormal conditions in the networks. This paper focuses on applying statistical monitoring methods in networks other than social networks. This research considers the importance of using statistical monitoring in the control and management of more complex systems. To this end, modeling and statistical monitoring of the emergency service network are done based on real data. The characteristics of this research can be summarized in the following topics:

• Modeling and statistical monitoring of a real system in the form of a network, to solve one of the problems in one of the organizations.
• Modeling dynamic, sparse, feature-based, weighted, and directed network
• Dynamic network modeling based on the moving window method
• Providing a real example to emphasize the importance of using statistical monitoring techniques to manage and control networks other than social networks.

2. Statistical monitoring of the dynamic network of emergency service providers

2.1. Application of Likelihood Ratio Test (LRT) in network monitoring

In the article of Azarnoush and others [1], it is emphasized that the methods designed based on LRT have been studied for monitoring in various fields and have been successfully applied in various issues. Such as Sullivan and Woodall [2], Zou and Tsung [3], Paynabar, Jionghua and Yeh [4]. In the monitoring of feature-based networks, the LRT control charts have been widely used, such as the works of Farahani, Noorossana and Baradaran [5], Fotuhi, Amiri and Maleki [6], Farahani et al. [7], Moguaiet al. [8], Shaghaghi and Saghaei [9] and Najafi and Saghaei [10]**.** According to the studies, the LRT control charts have been more efficient than

other control charts in this field. Therefore, in this research, LRT control chart is used to monitor the network and identify abnormal situations.

2.2. Modeling dynamic networks

In the article by Azarnoush and others [1], it is mentioned the use of moving window for monitoring dynamic networks. Another method that has been suggested for modeling network dynamics is the use of state-space models [11]. In these models, the coefficients of the regression model are the state variables created by a random process, and the weights of the edges are the noisy observations. This method is recommended when there is a more complex relationship between network data [11]. In this research, the moving window method is used to model the intrinsic and gradual changes of the network. The reference set includes a number of in-control networks and is updated with the arrival of a new in-control network.

2.3. Dynamic network monitoring methodology of emergency service providers

One of the critical issues in incident management is the timely presence of the team and providing services in the least possible time. On the other hand, the available resources and facilities are limited, so continuous monitoring of the dispatch system of teams, machines, and equipment and early detection of abnormal situations of this system, especially in metropolises and populated areas, is an important issue. Equation (1) shows the test, where β^0 is the regression coefficients of reference set networks and β^1 is the regression coefficients of the new network at time τ.

$$\begin{aligned} H_0&: \beta^0 = \beta^1 \\ H_1&: \beta^0 \neq \beta^1 \end{aligned} \tag{1}$$

The likelihood ratio test is used and the parameters of the regression model are estimated by the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method. Equation (2) shows the general form of LRT statistic.

$$\Lambda(\tau) = 2(l_1 - l_0) \tag{2}$$

Where l_1 and l_0 are respectively the log-likelihood function under the hypothesis H_1 and the log-likelihood function under the hypothesis H_0.

$$\begin{aligned} l_1 = [I(k=0)\, log\left(\frac{e^{X_{ij}'(t)\beta^1}}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^1}}\right) + I(k\geq 1)\, log\left(\frac{1}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^1}}\right) \\ + I(k\geq 1)\, log\ (\frac{\exp\ (X_{ij}'(t)\beta^1)^k\ e^{-\exp(X_{ij}'(t)\beta^1)}}{k!\,(1-\ e^{-\exp\ (X_{ij}'(t)\beta^1)})})] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} l_0 = [I(k=0)\, log\left(\frac{e^{X_{ij}'(t)\beta^0}}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^0}}\right) + I(k\geq 1)\, log\ (\frac{1}{1+e^{X_{ij}'(t)\beta^0}}) + \\ I(k\geq 1)\, log\ (\frac{\exp\ (X_{ij}'(t)\beta^0)^k\, e^{-\exp(X_{ij}'(t)\beta^0)}}{k!(1-\ e^{-\exp\ (X_{ij}'(t)\beta^0)})})] \end{aligned} \tag{4}$$

Where the $I(.)$ is the Indicator Function**.** In order to calculate the control limit, Monte Carlo simulation logic is used.

2.4. Implementing the methodology

This study is based on real data received from the relevant organization. This network is a feature-based network, so the modeling of the mechanism of forming edges between nodes is done based on the features of the nodes. The features used in this study are the demand for the use of the services of each center and the geographical distance of the centers. There are 150 centers in the studied city. In other words, this network has 150 nodes. Therefore, since the network is directed, the data set of each day has 22350 records.

Figure (1) shows the network monitoring diagram. As can be seen in the figure, the initial control limit was 23.96 in the first seven days. Considering that the network was in-control on days 9, 10, 11, 12, 18 and 19, the reference set was updated. Therefore, the control limit has changed.

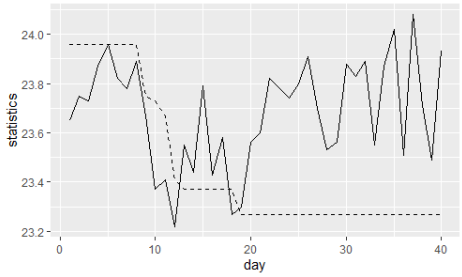


Figure 1- The dynamic network monitoring diagram of an emergency service provider

The diagram shows that on days 13 to 17, the network was out of control. After analyzing this issue in the meetings, it was found that this abnormal condition was due to the lack of man-power in several centers. This is due to the spread of COVID-19, which has led to an imbal-ance of supply and demand. Also, dispatching equipment to the countryside has caused the repetition of abnormal conditions from the 20th day onwards.

One of the issues raised in the online implementation of the methodology is the action plan to deal with abnormal conditions. In other words, what actions should professionals take after receiving a signal indicating an abnormal network behavior pattern? Figure (2) shows the summary of the written action plan.

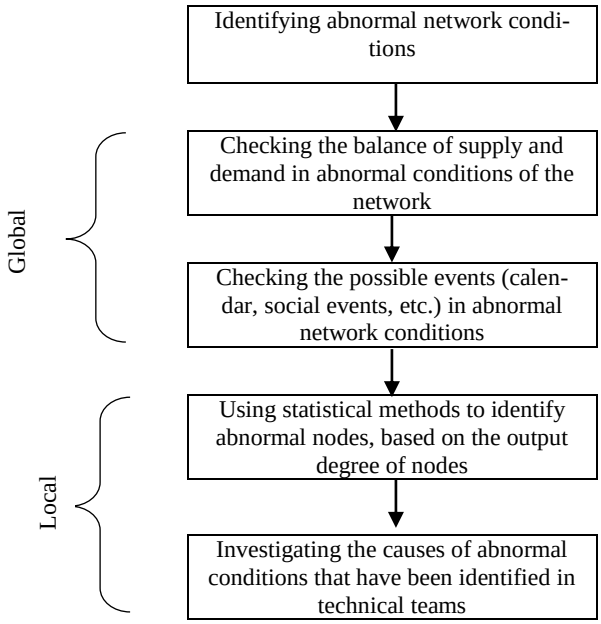


Figure 2- Out of Control Action Plan (OCAP)

3. Conclusion

This paper focused on the application of statistical monitoring methods in the control and management of more complex systems, in the form of a network. The intended case study was one of the emergency service centers whose mission is to provide fast and high-quality services to citizens. The nature of this network is dynamic and a methodology was presented that can model the inherent changes of the network and not recognize it as an abnormal condition. The monitoring of the emergency service network showed that by continuously monitoring the network, out of control conditions can be identified early and in this way the crisis can be prevented, especially in metropolises.

4. References

[1] Azarnoush, B., Paynabar, K., Jennifer, B., and Runger, G, 2016. Monitoring temporal homogeneity in attributed network streams. *Journal of Quality Technology*, Vol.48, pp.28-43.

[2] Sullivan, J. H. and Woodall, W. H., 1996. A Control Chart for Preliminary Analysis of Individual Observations. Journal of Quality Technology, Vol.28 No.3, pp.265-278.

[3] Shang, Y., Tsung, F., and Zou, C., 2011. Profile monitoring with binary data and random predictors. Journal of Quality Technology, Vol.43 No.3, pp.196–208.

[4] Paynabar, K., Jionghua, J. and Yeh, A. B., 2012. Phase I Risk-Adjusted Control Charts for Monitoring Surgical Performance by Considering Categorical Covariates. Journal of Quality Technology, Vol.44 No.1, pp.39-53.

[5] Mazrae Farahani, E., Noorossana, and R. Baradaran, R., 2017. Phase I monitoring of social network with baseline periods using poisson regression. Communications in Statistics-Theory and Methods, pp.1-21.

[6] Fotuhi, H., Amiri, A. and M. Maleki, R., 2018. Phase I monitoring of social networks based on Poisson regression profiles. Quality and Reliability Engineering International, Vol.34, pp. 572-588.

[7] Mazrae Farahani, E., Baradaran Kazemzadeh, R., Albadvi, A. and Teimourpour, B., 2018. GLMM-Based Modeling and Monitoring Dynamic Social Network. International Journal of Industrial Engineering & Production Research, Vol. 29, No. 3, pp.247- 259.

[8] Mogouie H., Raissi, G. A., Bahrami, E. and Amiri, A., 2019. Statistical monitoring of binary response attributed social networks considering random effects. Communications in Statistics-Simulation and Computation doi.org/10.1080/03610918.2019.1661471.

[9] Shaghaghi, M. and Saghaei, A., 2020. PCA likelihood ratio test approach for attributed social networks monitoring. Communications in Statistics - Theory and Methods, DOI: 10.1080/03610926.2018.1491599

[10] Najafi, H. and Saghaei, A., 2020. Statistical monitoring for change detection of interactions between nodes in networks: With a case study in financial interactions network. Communications in Statistics - Theory and Methods, DOI:10.1080/03610926.2020.1725830.

[11] Gahrooei Raeisi, M. and Paynabar, K., 2018. Change detection in a dynamic stream of attributed networks. Journal of Quality Technology, Vol.50, pp.418-430.