



پایش آماری پیشامدهای کمیاب در حوزه بهداشت و درمان

امیرافشین فتاحی^{*}، رسول نورالسناء، پرشنگ دوکوهکی و مسعود باباخانی

چکیده:

در حوزه بهداشت و درمان، مشخصه‌های کیفی متفاوتی وجود دارند که لازم است مورد پایش (Monitoring) و کنترل قرار گیرند. البته پایش هر مشخصه کیفی نیازمند روش آماری (نمودار کنترل) خاصی است. مشخصه‌های کیفی خاصی در بهداشت و درمان وجود دارند که به دلیل نرخ رخداد بسیار کم آن‌ها، این طور بهنظر می‌رسد که دلیلی برای پایش و کنترل آن‌ها وجود نداشته باشد، یا اصلاً پایش آن‌ها امکان‌پذیر نباشد؛ زیرا نرخ رخداد آن‌ها به حدی کوچک است که پایش آن‌ها با استفاده از نمودارهای کنترل متداول p و np امکان‌پذیر نیست؛ در صورتی که برای چنین مشخصه‌های کیفی نیز روش‌های متنوعی با کارایی‌های گوناگون توسعه داده شده است. چنین مشخصه‌های کیفی، پیشامدهای بهداشتی نادر (Rare health events) نامیده می‌شوند. این مقاله درصد است تا با معرفی معروفترین این روش‌ها و البته مقایسه آن‌ها بر اساس شاخص متوسط طول دنباله (ARL)، کارترین روش آماری را در این خصوص شناسایی کند.

کلمات کلیدی:

کنترل آماری فرآیند، بهداشت و درمان، پیشامدهای نادر (کمیاب)، روش مجموعه‌ها، روش امتیاز تجمعی، روش SHDA، روش جمع‌تجمعی برنولی، متوسط طول دنباله.

بهداشت و درمان مشخصه‌های کیفی دیگری نیز وجود دارند که به دلیل رخدادهای نادر (کمیاب) و ناچیز آن‌ها، ممکن است این طور بهنظر برسد که پایش و کنترل آن‌ها لزومی ندارد و یا اصلاً امکان‌پذیر نباشد؛ زیرا نرخ رخداد آن‌ها در حدود ۰/۰۱ یا کوچکتر از آن است. پایش چنین مشخصه‌های کیفی، با استفاده از نمودارهای کنترل p و np، بهدلیل پیدیده بیش افتراقی^۴ امکان‌پذیر نیست.

در سال‌های اخیر، مسئله پایش نرخ رخداد پیشامدهایی که احتمال رخداد آن‌ها ناچیز است، به عنوان مسئله‌ای جذاب در حوزه‌های صنعتی، بیمارستانی و اپیدمیولوژی مطرح شده است. مثال‌های ویژه پژوهشی در این زمینه عبارتند از پایش افزایش ریسک رخداد سلطان [۷]، پایش نرخ عیوب خروجی‌های بیمارستانی، بهویژه، جراحی‌ها [۷] و پایش نرخ رخداد نافرجاری‌های مادرزادی [۱۱-۹].

توسعه روش‌های متعدد در مورد پایش رخدادهای کمیاب در بهداشت و درمان در سطح جهانی [۱۲-۵۰]، تأکیدی بر توجه خاص جوامع بین‌المللی بر ضرورت به کارگیری این روش‌ها است.

۱. مقدمه

در بخش بهداشت و درمان مشخصه‌های کیفی^۲ متفاوتی وجود دارند که می‌توانند مورد پایش و کنترل قرار گیرند. مشخصه‌هایی کیفی مانند نرخ عفونت بیمارستان [۱]، نرخ مرگ‌ومیر بیماران [۲]، میزان قند خون [۳] یا فشار خون [۴، ۵] یک بیمار و ... از این جمله‌اند؛ که البته هر کدام روش (نمودار کنترل) آماری خاصی را طلب می‌کند. ابزارهای پایش و کنترل مشخصه‌های کیفی را می‌توان در مقوله‌ای چون «کنترل فرآیند آماری»^۳ [۶]، به عنوان زیرسیستمی از مدیریت کیفیت، جستجو کرد. در بخش

تاریخ وصول: ۹۰/۲/۱۲

تاریخ تصویب: ۹۰/۳/۲۵

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر امیر افشن فتاحی، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند afshinfatahi@iust.ac.ir

دکتر رسول نورالسناء، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران rassoul@iust.ac.ir

پرشنگ دوکوهکی، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند dokouhaki@iust.ac.ir

دکتر مسعود باباخانی، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران m.babakhani@iust.ac.ir

² - Quality Characteristic

³ - Statistical Process Control (SPC)

فرض کنید Y_1, Y_2, Y_3 و ... یک سری آزمایش‌های مستقل برنولی باشند؛ به‌گونه‌ای که $Y = 1$ نشان‌دهنده وجود ناهنجاری مادرزادی و $Y = 0$ بیان‌کننده عدم آن باشد. همچنین، فرض کنید $\tau \geq 1$ نشان‌دهنده زمان افزایش نرخ رخداد باشد؛ احتمال رخداد به‌ازای $1 - \tau, 2 - \tau, \dots, \tau + 1$ برابر با $p_0 = P(Y_j = 1)$ و به‌ازای τ برابر با $\gamma p_0 = P(Y_j = 1) = \gamma$ خواهد بود؛ به‌گونه‌ای که $\gamma < 1/p_0$ و $\gamma > 1$ است. فرض ساده‌ساز دیگری هم باید در نظر گرفت و آن این‌که مقدار p_0 مشخص است. البته به‌کارگیری این روش‌ها در عمل، نیازمند برآورد (تخمین) مقدار p_0 از داده‌های پیشین است. چنین و همکاران [۲۹] تأثیر فرض مشخص بودن پارامترها (در حالی که واقعاً باید از داده‌های پیشین تخمین زده شوند) را بر نمودارهای کنترل، در قالب مقاله‌ای مروری ارایه داده‌اند. چن و همکاران [۳۰] این موضوع را در مورد روش مجموعه‌ها و روش امتیاز تجمعی لحاظ کرده‌اند.

چهار روش مذکور، نه تنها افزایش ناگهانی در نرخ رخداد، بلکه کاهش ناگهانی آن ($\gamma < 1$) را نیز می‌توانند کشف کنند. چهار روش نامبرده، به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که شرایط بهینگی حداقل حداکثر، برای کشف یک تغییر اسمی از مقدار p_0 به $p_1 = \gamma_1 p_0$ ، به‌ازای $\gamma_1 < 1$ برقرار باشد؛ بنابراین، نشان‌دهنده اندازه تغییری است که نمودار برای کشف آن طراحی شده است.

رویکردهای آماری در روش‌های فوق با هم متفاوت است. به عنوان مثال، در روش جمع‌تجمعی برنولی [۲۳]، نرخ رخداد ناهنجاری‌های مادرزادی در قبال یک سری آزمایش‌های برنولی مدل‌سازی می‌شود؛ در حالی که در سه روش دیگر، فاصله بین رخداد ناهنجاری‌ها در مدل‌سازی‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. این فاصله می‌تواند به عنوان تعداد تولد نوزادان سالم در بین دو تولد با ناهنجاری مادرزادی در نظر گرفته شود؛ البته در صورتی که نرخ تولد را بتوان ثابت در نظر گرفت، این فاصله را می‌توان به عنوان زمان بین هر دو تولد با ناهنجاری مادرزادی در نظر گرفت. در مورد نخست، تعداد تولد نوزادان سالم در بین دو تولد با ناهنجاری مادرزادی، یک متغیر تصادفی هندسی (Geometric) در نظر گرفته می‌شود [۱۹] در حالی که در مورد دوم، زمان بین هر دو تولد با ناهنجاری مادرزادی، متغیر تصادفی نمایی (Exponential) اطلاق می‌شود [۲۰]. علیرغم تفاوت در رویکردهای چهار روش مذکور، مفروضات آن‌ها بیکسان است؛ از جمله این‌که نرخ رخدادهای کمیاب در همه آن‌ها ثابت و رخدادها از هم مستقل فرض می‌شوند.

علاوه بر چهار روش مذکور، تعدادی روش‌های پایش دیگر نیز وجود دارند. در صورتی که تعداد تولد نوزادان سالم در بین دو تولد با ناهنجاری مادرزادی در دسترس باشد، می‌توان یک نمودار

ضرورت تحقیق حاضر نیز، معرفی متدائل‌ترین این روش‌ها [۱۳] و البته مقایسه آن‌ها به‌منظور شناسایی کارترین روش آماری در مورد پایش رخدادهای کمیاب است.

در این مقاله، ابتدا مروری بر روش‌های موجود برای پایش رخدادهای کمیاب ارایه می‌شود. در این راستا، پارامترها و روابط مرتبط با چهار روش اصلی در این زمینه معرفی می‌شوند؛ سپس با ارایه شاخص «متوسط طول دنباله»، عملکرد این چهار روش محاسبه می‌شوند. محاسبه شاخص موردنظر برای هر یک از روش‌ها، در قالب شبیه‌سازی رایانه‌ای و با استفاده از نرم‌افزار Matlab صورت گرفته است. در انتها، بحث و نتیجه‌گیری در مورد مقایسه عملکرد این روش‌ها ارایه شده است.

۲. معرفی روش‌های پایش

مبث پایش رخدادهای بهداشتی نادر (کمیاب)، از جمله ناهنجاری‌های مادرزادی، از زمان فاجعه تالیدومید^۱ در دهه ۱۹۶۰ مورد توجه قرار گرفت. از آن پس، روش‌های آماری متنوعی برای پایش نرخ رخداد پیشامدها توسعه داده شده است. مرور روش‌های پایش آماری در سلامت عمومی توسط سانسون و باک [۱۲] و وودال [۱۳] ارایه شده است. ویژگی‌های بهینگی روش‌های پایش [۱۴] و پایش، به‌گونه‌ای گستره، توسط فریسن و سانسون [۱۵] و فریسن [۱۶، ۱۷] مرور شده است. قبل از آن نیز توسط باربوجانی [۱۸] و لای و همکاران [۱۹] مقلالاتی مروری، با تمرکز بر پایش

پیوسته رخداد ناهنجاری‌های مادرزادی، منتشر شده است.

در این مقاله، ضمن معرفی و مروری بر روش‌های آماری توسعه داده شده برای رخداد پیشامدهای نادر و کمیاب، چهار روش اساسی در این زمینه با جزئیاتی بیشتر معرفی می‌گردد؛ که هر یک برای کشف افزایش ناگهانی در نرخ رخداد یک پیشامد کمیاب توسعه داده شده است.

روش مجموعه‌ها، به عنوان یکی از این روش‌ها را می‌توان در منبع [۱۹] مورد مذاقه قرار داد. دو روش بهبود یافته از روش مجموعه‌ها، یعنی روش امتیاز تجمعی و روش SHDA را به ترتیب در منابع [۲۰، ۲۱] و [۲۱، ۲۲] می‌توان مطالعه کرد. روش دیگر که توسعه سِگو و همکاران [۲۳] توسعه داده شده است، روش جمع‌تجمعی برنولی نام دارد. در حالی که روش جمع‌تجمعی برای نخستین بار توسعه پیج [۲۴] ارایه شد، سِگو و همکاران [۲۳] از مدلی توسعه یافته بر اساس این روش، توسعه رینولذ و استامبوس [۲۵، ۲۶]، برای پایش پیشامدهای کمیاب استفاده کرده‌اند. مقایسه چهار روش مذکور بر اساس ویژگی‌های بهینگی حداقل حداکثر (MinMax)، که در روش جمع‌تجمعی مطرح است [۲۷، ۲۸]، قابل انجام است.

^۱ - Thalidomide

هشدار می‌دهد؛ در حالی که اگر افزایشی بیشتر از چهار برابر مقدار مینا، در نرخ رخدادها ایجاد شود، روش مجموعه‌ها کاراتر عمل می‌کند. باربوجیا و کالزو لاری [۴۱] با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده‌اند که روش جمع‌تجمعی پواسون از روش مجموعه‌ها کاراتر است؛ ولی چن [۴۳] متداول‌تری به کار رفته در تحقیق آن‌ها را زیر سؤال برده است. چن [۴۵] ادعا می‌کند که اگر متوسط تعداد رخدادها در سال، کوچک‌تر یا مساوی ۵ باشد، سرعت عمل روش مجموعه‌ها بیشتر از نمودار جمع‌تجمعی پواسون خواهد بود. اختلاف‌نظرهای بین نتایج چن [۴۵] و دیگران در مقایسه روش مجموعه‌ها با نمودار جمع‌تجمعی پواسون، ممکن است به دلیل رویکردهای مختلف ایشان به مسئله باشد. همچنین، روش مجموعه‌ها با روش‌های دیگری همچون روش جمع‌تجمعی هندسی [۴۶]، روش جمع‌تجمعی نمایی [۳۵]، روش امتیاز تجمعی [۴۷]، SHDA [۷، ۲۲، ۳۰، ۴۴] و روش [۴۷] مورد مقایسه قرار گرفته است.

گریگ و فیریول [۴۸، ۴۹] از روش مجموعه‌ها برای پایش خروجی دودویی (مرگ و بقا) عمل جراحی استفاده کردند، البته از آن جا که احتمال رخدادها در این حالت برای هر فرد متفاوت خواهد بود، روش مجموعه‌های تعديل شده ریسک (Risk Adjusted Sets Method) را توسعه داده‌اند. ایشان روش خود را با روش جمع‌تجمعی تعديل شده ریسک (CUSUM) مقایسه و ادعا کردند که این روش دارای عملکردی بهتر است. در زیر معرفی اجمالی از چهار روش موردنظر برای پایش پیشامدهای کمیاب و مقایسه آن‌ها ارایه شده است.

۱- روش مجموعه‌ها:

یک مجموعه عبارت است از گروهی از نوزادان سالم که در فاصله بین تولد دو نوزاد با ناهنجاری مادرزادی متولد شده‌اند [۱۹]. فرض کنید X_i نشان‌دهنده اندازه (حجم) i مین مجموعه باشد. به عبارت دیگر، X_i برابر با تعداد تولدهای بین رخدادهای $i-1$ و i ، بهاری $\dots, 1, 2, 3, \dots, n$ است؛

بنابراین، X_1, X_2, \dots, X_n یک سری از متغیرهای تصادفی هندسی را تشکیل می‌دهد کهتابع توزیع احتمال آن‌ها برابر با $p^x(1-p)^{1-x}$ است. در صورتی که تعداد n مجموعه متوالی، دارای اندازه‌ای کمتر از مقدار حد آستانه t باشد، روش مجموعه‌ها هشدار خواهد داد. (اندیس s منحصرًا نمایانگر روش مجموعه‌ها است).

در زمانی که n ناهنجاری مادرزادی مشاهده می‌شود، S_i برابر است با تعداد مجموعه‌های متوالی که دارای اندازه‌ای کمتر از مقدار حد آستانه t دارند. یعنی:

^۹ - Sets Method

جمع‌تجمعی بر اساس توزیع احتمال هندسی توسعه داد [۳۱ و ۳۲]. در واقع، نمودار جمع‌تجمعی هندسی، از نظر عملکرد، در حد نمودار جمع‌تجمعی برنولی است [۲۵ و ۳۲]. در موقعی که تک‌تک افراد را نتوان مورد پایش قرار داد، روش‌هایی بر اساس زمان بین رخدادها توسعه داده شده‌اند؛ یکی از این روش‌ها نمودار جمع‌تجمعی نمایی^۱ است [۳۳-۳۵]. به عنوان روشی دیگر از این نوع، می‌توان به روش شیریایوف- رابتز^۲ برای مشاهدات نمایی اشاره کرد [۳۶].

زمانی که تنها بتوان داده‌ها را به صورت گروهی در فرجههای زمانی، مشخص جمع‌آوری کرد (مانند تعداد رخدادها در هر ماه)، به کارگیری روش‌های پایش بر اساس توزیع احتمال پواسون منطقی به نظر می‌رسد. از جمله این روش‌ها می‌توان به نمودار جمع‌تجمعی پواسون^۳ [۳۷، ۳۳] و نمودار میانگین متحرک موزون نمایی پواسون^۴ [۳۸] اشاره کرد.

البته نمودارهای جمع‌تجمعی بینم^۵ [۲۶] و میانگین متحرک موزون نمایی بینم^۶ [۳۹] را نیز می‌توان مورد استفاده قرار داد. هر زمان که امکان داشته باشد، باید از تجمیع^۷ داده‌ها در بازه‌های زمانی (مدل‌های پواسون) یا تجمیع داده‌ها در قالب تعداد معینی از مشاهدات (مدل‌های بینم) امتناع کرد؛ زیرا این عمل می‌تواند باعث کاهش کارایی نمودار کنترل شود.

استفاده از روش‌هایی که نیاز به تجمیع داده‌ها دارند، مستلزم اتمام بازه زمانی هستند، تا نمودار بتواند افزایش نرخ رخداد را در انتهای بازه زمانی نشان دهد؛ که این امر باعث تأخیر در هشدار توسط نمودار کنترل می‌شود. روش‌های شوهارت^۸ مبتنی بر توزیع‌های احتمال هندسی، نمایی، پواسون یا بینم نیز می‌توانند برای پایش برخی پیشامدهای کمیاب به کار گرفته شوند [۶، ۴۰]. نمودارهای شوهارت، از لحاظ قابلیت شناسایی تغییرات با نرخ بسیار کم، در مقایسه با روش‌های مبتنی بر CUSUM و EWMA، دارای عملکردی نسبتاً ضعیفتر هستند؛ ولی پیاده‌سازی و تفسیر نتایج آن‌ها ساده‌تر است.

مقالات متعددی در مورد مقایسه روش‌های مجموعه‌ها، امتیاز تجمعی، SHDA و جمع‌تجمعی برنولی به چاپ رسیده است. بسیاری از محققان، نمودار جمع‌تجمعی پواسون را با روش مجموعه‌ها یا روش امتیاز تجمعی مقایسه کردند [۱۹، ۴۱-۴۴]. گالوس و همکاران [۴۲] و رادالی [۴۴] نشان داده‌اند زمانی که افزایشی کمتر از چهار برابر مقدار مینا، در نرخ رخدادها حدث شود، نمودار جمع‌تجمعی پواسون سریع‌تر از روش مجموعه‌ها

^۱ - Exponential CUSUM

^۲ - Shirayev-Roberts

^۳ - Poisson CUSUM

^۴ - Poisson EWMA

^۵ - Binomial CUSUM

^۶ - Binomial EWMA

^۷ - Aggregation

^۸ - Shewhart

۱-۳. روش امتیاز تجمعی:

در روش امتیاز تجمعی، نمادهای X_i , n_c و t_c , با همان مفهوم موجود در روش مجموعه‌ها به کار گرفته می‌شوند؛ البته اندازه c منحصرًا نمایان‌گر روش امتیاز تجمعی است. برای هر اندازه مجموعه (X_i) امتیازی درنظر گرفته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که اگر $t_c < X_i$ باشد، این وزن برابر با $=1 - g(X_i)$ و در غیر این صورت، برابر با $=g(X_i) - 1$ خواهد بود. امتیاز تجمعی (C_i) برابر است با:

$$C_0 = 0$$

$$C_i = \max(0, C_{i-1} + g(X_i)), \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

زمانی که $C_i = n_c$ باشد، روش امتیاز تجمعی هشدار خواهد داد. همانند روش مجموعه‌ها، در صورتی که $n_c = 1$ باشد، این روش به نمودار شوهارت هندسی با حد کنترل پایین $LCL = t_c$ تبدیل می‌شود.

۲-۴. روش جمع‌تجمعی برنولی:

آماره روش جمع‌تجمعی برنولی به صورت زیر است.

$$B_0 = 0$$

$$B_j = \max(0, B_{j-1} + Y_j - \delta), \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

به‌گونه‌ای که مقدار مرجع برابر است با:

$$\delta = \frac{-\log\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)}{\log\left(\frac{p_1(1-p_0)}{p_0(1-p_1)}\right)} = \frac{1}{k}$$

که از نسبت درستنمایی برنولی در آزمون نسبت احتمال متوالی^۳ منسوب به والد $[53]$ به دست می‌آید. در صورتی که $B_j \geq h$ باشد، این روش هشدار خواهد داد. همه روش‌های مبتنی بر روش جمع‌تجمعی بر اساس k و h توصیف می‌شوند؛ که به تفضیل در منبع $[6]$ تشریح شده است. رینولد و استامبوس $[26]$ این روش را با جزئیات کامل بیان کردند.

۳. ارزیابی و مقایسه روش‌ها

یکی از شاخص‌های اصلی در ارزیابی روش‌های آماری (از جمله نمودارهای کنترل)، «متوسط طول دنباله»^۴ است. این شاخص

$$S_0 = 0$$

$$S_i = (1 + S_{i-1}) I_{\{X_i < t_i\}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

زمانی که $S_i = n_s$ باشد، روش مجموعه‌ها هشدار می‌دهد. اگر $n_s = 1$ باشد، روش مجموعه‌ها به نمودار شوهارت هندسی یک‌طرفه، با حد کنترل پایین t_i ، تبدیل می‌شود $[50]$. لازم به ذکر است که روش مجموعه‌ها یک مورد خاص از روش پایش قوانین دنباله‌ها است که قبلًا توسط پیج $[51]$ مورد بحث قرار گرفته بود.

۲-۲. روش SHDA

برای روش SHDA، نمادهای X_i , n_i و t_i ، با همان مفهوم موجود در روش مجموعه‌ها به کار گرفته می‌شوند؛ البته اندازه t منحصرًا نمایان‌گر روش SHDA است. بهمنظور اجرای این روش، اگر تعداد n_i مجموعه متوالی، هرکدام دارای اندازه‌ای کوچک‌تر از t_i باشند، بیچمی افراسه می‌شود؛ در این صورت، اگر تعداد کل مجموعه‌هایی که پس از آخرین پرچم به وجود آمده‌اند، کوچک‌تر یا مساوی حد آستانه u_i باشد، روش SHDA هشدار خواهد داد.

زمانی که \bar{n} امین ناهنجاری مادرزادی مشاهده شود، D_i را برابر با تعداد مجموعه‌های متوالی درنظر بگیرید که دارای اندازه‌های کمتر از t_i هستند. همچنین، A_i را برابر با تعداد کل مجموعه‌هایی که پس از آخرین پرچم ایجاد شده‌اند، درنظر بگیرید. بنابراین داریم:

$$D_0 = 0$$

$$D_i = (1 + D_{i-1} I_{\{D_{i-1} < n_i\}}) I_{\{X_i < t_i\}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

$$A_0 = 0$$

$$A_i = 1 + A_{i-1} I_{\{D_{i-1} < n_i\}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

زمانی که $A_i \leq u_i$ و $D_i = n_i$ است، روش SHDA هشدار می‌دهد. هر دو شمارنده D_i و A_i با مقدار صفر شروع به کار می‌کنند و در هر بار که پرچمی افراسه شود ($D_i = n_i$ ، دوباره برابر صفر درنظر گرفته می‌شوند).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقداری باید برای i درنظر گرفته شود که البته نباید از u_i بزرگ‌تر باشد؛ در غیر این صورت، این SHDA نمودار هرگز هشدار نخواهد داد. اگر $n_i = u_i$ باشد، روش SHDA در صورتی هشدار می‌دهد که نخستین n_i مجموعه مشاهده شده، اندازه‌ای کمتر از t_i داشته باشند؛ یا این که $2n_i$ مجموعه متوالی با اندازه‌هایی کمتر از t_i مشاهده شده باشند. بنابراین، زمانی که $n_i = u_i$ باشد، روش SHDA معادل روش مجموعه‌ها با خواهد بود.

¹ - CUSCORE

² - Bernoulli CUSUM

³ - Sequential probability ratio test

⁴ - Average Run Length (ARL)

البته لازم به ذکر است، از آن جا که هر چهار روش آماری موردنظر بر اساس متغیرهای تصادفی گسته پایه‌گذاری شده‌اند، نمی‌توان پارامترها را به‌گونه‌ای تنظیم کرد که $ARL(p_0)$ برای همه آن‌ها دقیقاً با هم برابر باشد؛ ولی باید سعی شود تا حد امکان، مقادیر به هم نزدیک باشند. جدول ۱، نتایج تنظیم پارامترها را نشان می‌دهد.

به‌منظور تعیین ترکیب‌های مختلفی از مقادیر p_0 ، γ و m_0 که منجر به مقداری نزدیک به $ARL(p_0)$ شوند، 7600 ترکیب مختلف از p_0 ، γ و m_0 درنظر گرفته شده‌اند. 40 مورد از 7600 ترکیب، برای تشریح جزئیات انتخاب شده‌اند.

به‌منظور ارزیابی عملکرد چهار روش مذکور، برای دامنه‌ای از تغییرات γ ، $(\gamma = 1/25, 1/5, \dots, 7/758)$ ، $ARL(\gamma)$ برای 40 ترکیب موردنظر محاسبه شده‌اند. جداول 2 تا 4 ، نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها روش جمع تجمعی برنولی، در 40 مورد، دارای کوچک‌ترین مقدار برای $ARL(\gamma)$ است؛ این موضوع نشان می‌دهد که روش جمع تجمعی برنولی به‌طور متوسط زودتر از سه روش دیگر، وجود تغییر در فرآیند را هشدار می‌دهد.

اگر متوسط طول دنباله را برای حالت خارج از کنترل در مورد روش‌های جمع تجمعی برنولی، مجموعه‌ها، امتیاز تجمعی و $SHDA$ به‌ترتیب با $ARL_b(\gamma)$ ، $ARL_c(\gamma)$ و $ARL_t(\gamma)$ نشان دهیم، در 37 مورد از 40 مورد رابطه $ARL_t(\gamma) < ARL_b(\gamma) < ARL_c(\gamma) < ARL_t(\gamma)$ برقرار است. سه موردی که نامساوی مذکور برای آن‌ها صادق نیست، به سه روش مجموعه‌ها، امتیاز تجمعی و $SHDA$ مربوط می‌شوند. بنابراین، در همه موارد، روش جمع تجمعی برنولی از سه روش دیگر عملکرد بهتری دارد. برتری نسبی چهار روش آماری موردنظر، برای 40 مورد تحت بررسی، در جدول 5 نشان داده شده است.

نشان می‌دهد که روش آماری به‌کارگرفته شده برای کنترل یک فرآیند، به‌طور متوسط پس از نشان دادن چند مشاهده تحت کنترل، یک مشاهده خارج از کنترل را نشان خواهد داد.

روش‌های آماری با این هدف توسعه داده می‌شوند که از هشدارهای اشتباهی پرهیز کنند و حساسیت زیادی در برابر تغییرات غیرصادفی نیز داشته باشند؛ بدین منظور لازم است پارامترهای هر روش آماری به‌گونه‌ای تنظیم شوند که در صورتی که فرآیند واقعاً تحت کنترل است، متوسط طول دنباله $(ARL(p_0))$ بزرگ بوده و زمانی که فرآیند واقعاً خارج از کنترل است، متوسط طول دنباله $(ARL(p))$ کوچک باشد. معمولاً مقدار خارج از کنترل p را بر حسب ضریبی از p_0 نمایش می‌دهیم (یعنی: $p = \gamma p_0$).

به‌منظور مقایسه چهار روش مجموعه‌ها، امتیاز تجمعی، $SHDA$ و جمع تجمعی برنولی با استفاده از شاخص متوسط طول دنباله، لازم است پارامترهای زیر تعریف شوند. برای درک بهتر این پارامترها، آن‌ها را برای یک مورد کاوی خاص (مثلاً رخدادهای نادر ناهنجاری‌های مادرزادی) به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

p_0 : نرخ مبنا (Baseline Rate) برای رخداد تولداتی با ناهنجاری مادرزادی

γ : مقدار تغییر فرآیند از نرخ مبنا p_0 (بر حسب ضریبی از p_0)

r_0 : متوسط تعداد تولدات تا اعلام یک هشدار، زمانی که فرآیند تحت کنترل است ($ARL(p_0) \geq r_0$).

m_0 : متوسط تعداد ناهنجاری‌های مادرزادی تا اعلام یک هشدار، زمانی که فرآیند تحت کنترل است ($m_0 = p_0 r_0$).

برای این‌که چهار روش آماری موردنظر را بتوان با هم مقایسه کرد، از رویکرد حداقل حداکثر (Minimax) استفاده شده است. با استفاده از این رویکرد، هر روش به‌گونه‌ای طراحی می‌شود (پارامترهای هر روش به‌گونه‌ای تنظیم می‌شوند) که شاخص $ARL(p_0)$ حداقل شود؛ به‌گونه‌ای که $ARL(p) \geq r_0$ باشد.

جدول ۱. تنظیم پارامترهای چهار روش آماری موردنظر با استفاده از رویکرد حداقل حداقل برای چهار مورد انتخابی

مورد	روش مجموعه‌ها			روش SHDA			روش امتیاز تجمعی			روش جمع تجمعی برنولی		
	p_0	γ	m_0	n_s	t_s	n_t	u_t	t_t	n_c	t_c	k	h
۱۲	.00060	1/25	400	27	328	12	12	300	15	108	149	11/63758
۱۳	.00060	2/25	350	10	157	6	6	183	8	84	108	5/87963
۲۸	.0009	3/50	850	9	796	4	4	689	7	440	557	5/23339
۴۰	.0002	5/75	350	5	2047	3	3	2605	4	1275	1841	3/65226

جدول ۲. مقدار $ARL(p_0)$ در چهار روش آماری موردنظر، برای چهار مورد انتخابی

مورد	p_0	γ	m_0	r_0	روش		روش SHDA	روش امتیاز تجمعی	جمع تجمعی برنولی	$ARL(p_0)$
					مجموعه‌ها	SHDA				
۱۲	۰/۰۰۶۰	۱/۲۵	۴۰۰	۶۶۶۶۷	۶۶۸۴۷	۶۶۷۶۶	۶۶۷۳۱	۶۶۷۷۵		
۱۳	۰/۰۰۶۰	۲/۲۵	۳۵۰	۵۸۲۳۳	۵۸۴۴۸	۵۸۳۴۲	۵۸۴۷۱	۵۸۵۰۲		
۲۸	۰/۰۰۰۹	۲/۵۰	۸۵۰	۹۴۴۴۴	۹۴۴۵۲	۹۴۵۸۰	۹۴۵۸۴۴	۹۴۵۹۳۴		
۴۰	۰/۰۰۰۲	۵/۷۵	۳۵۰	۱۷۵۰۰۰	۱۷۵۱۳۲۴	۱۷۵۱۱۵۹	۱۷۵۰۷۶۵	۱۷۵۱۵۱۷		

جدول ۳. مقدار $ARL(\gamma)$ در چهار روش آماری موردنظر، برای چهار مورد انتخابی

مورد	p_0	γ	m_0	روش		روش SHDA	روش امتیاز تجمعی	جمع تجمعی برنولی	$ARL(\gamma)$
				مجموعه‌ها	SHDA				
۱۲	۰/۰۰۶۰	۱/۲۵	۴۰۰	۱۴۸۲۳/۰۱	۱۶۲۱۷/۵۲	۱۱۲۶۰/۴۷	۸۸۳۴/۵۰		
۱۳	۰/۰۰۶۰	۲/۲۵	۳۵۰	۱۵۴۶/۱۳	۱۵۷۰/۳۸	۱۳۶۷/۲۵	۱۰۸۸/۵۰		
۲۸	۰/۰۰۰۹	۳/۵۰	۸۵۰	۴۵۲۶/۹۳	۴۶۵۴/۸۴	۴۱۴۴/۰۵	۳۳۷۰/۱۵		
۴۰	۰/۰۰۰۲	۵/۷۵	۳۵۰	۶۴۶۶/۲۵	۶۶۷۶/۵۶	۶۳۶۸/۵۹	۵۴۶۰/۴۸		

جدول ۴. مقدار $ARL(\gamma)$ در چهار روش آماری، برای موارد ۱۳۵ و ۴۰، به ازای دامنه‌ای از تغییرات (بر حسب γ ، ضریبی از p_0)

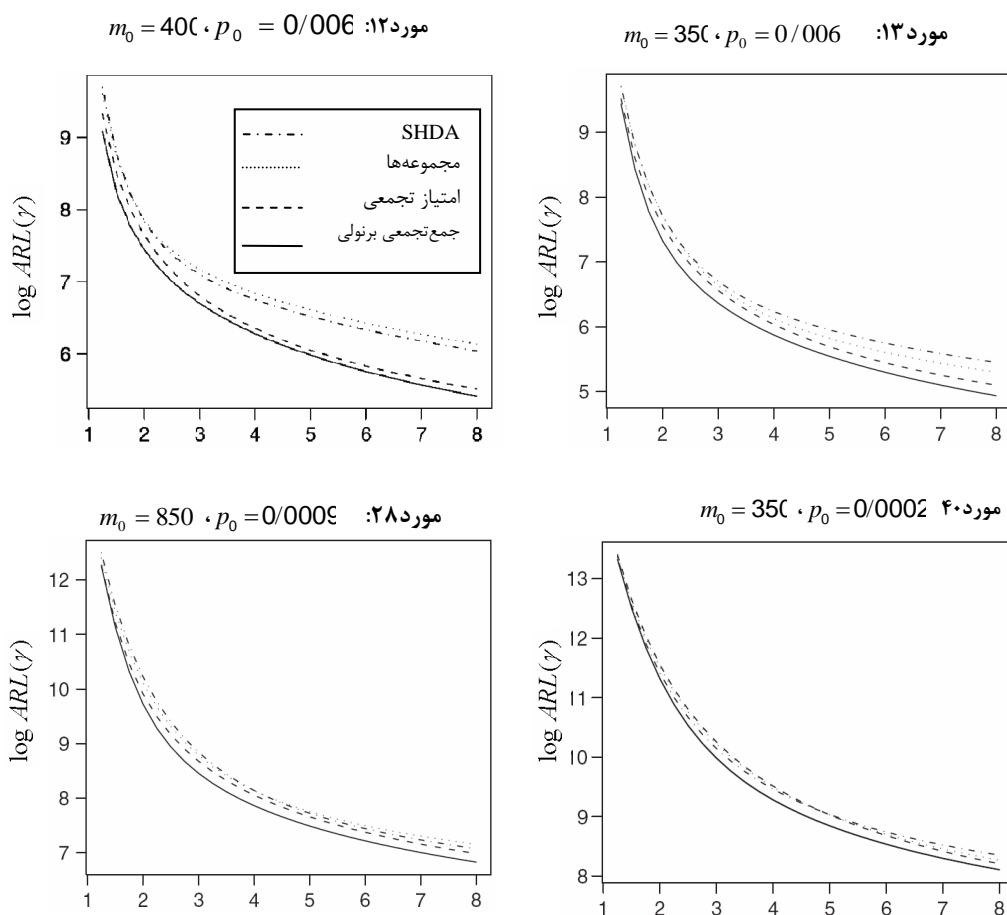
مورد	p_0	γ	m_0	روش		روش SHDA	روش امتیاز تجمعی	جمع تجمعی برنولی	$ARL(\gamma)$
				مجموعه‌ها	SHDA				
۱۳	۰/۰۰۶۰	۱/۵	۶۷۷۳/۹۹	۶۶۸۸۱/۱۵	۵۴۵۵/۸۶	۴۶۰۴/۹۹			
۱۳	۰/۰۰۶۰	۲/۰	۲۲۳۲/۶۳	۲۲۳۲/۲۲	۱۹۱۰/۴۵	۱۵۱۷/۴۹			
۱۳	۰/۰۰۶۰	۲/۵	۱۱۶۴/۴۶	۱۲۰۲/۱۹	۱۰۵۳/۷۰	۸۴۶/۶۵			
۱۳	۰/۰۰۶۰	۳/۰	۷۶۴/۷۸	۸۱۴/۱۱	۷۰۶/۷۵	۵۸۱/۱۱			
۱۳	۰/۰۰۶۰	۴/۰	۴۵۹/۳۸	۵۱۰/۹۶	۴۱۸/۴۷	۳۵۵/۸۳			
۱۳	۰/۰۰۶۰	۶/۰	۲۷۷۲/۷۵	۳۱۴/۵۲	۲۳۲/۲۱	۲۰۰/۳۴			
۱۳	۰/۰۰۶۰	۸/۰	۲۰۰/۴۶	۲۳۳/۰۷	۱۳۹/۰۵	۱۳۹/۵۰			
۴۰	۰/۰۰۰۲	۱/۵	۲۹۷۹۸۰/۸۸	۲۷۹۷۳۸/۰۵	۳۱۰۷۴۳/۴۵	۲۶۸۵۷۶/۴۱			
۴۰	۰/۰۰۰۲	۲/۰	۹۹۴۸۴/۱۶	۹۰۲۰۵/۵۱	۱۰۳۹۴۳/۷۸	۸۲۰۵۴/۴۴			
۴۰	۰/۰۰۰۲	۲/۵	۴۷۱۵۹/۶۹	۴۲۸۵۶/۲۶	۴۸۹۹۹/۶۰	۳۷۳۲۲/۶۳			
۴۰	۰/۰۰۰۲	۳/۰	۲۷۴۹۴/۹۸	۲۵۴۰۹/۱۴	۲۸۳۸۲/۹۸	۲۱۶۲۲/۹۵			
۴۰	۰/۰۰۰۲	۴/۰	۱۳۳۰/۱۰۴	۱۲۸۴۶/۷۲	۱۳۵۳۳/۵۸	۱۰۷۲۶/۹۴			
۴۰	۰/۰۰۰۲	۶/۰	۶۰۱۵/۱۳	۶۲۵۸/۲۱	۵۸۹۴/۱۰	۵۰۹۸/۲۳			
۴۰	۰/۰۰۰۲	۸/۰	۳۸۹۴/۶۵	۴۲۴۱/۹۰	۳۶۶۶/۰۱	۳۳۲۰/۶۴			

جدول ۵. تعداد مواردی که هر روش‌های دیگر برتر است.

روش	تعداد دفعاتی که روش،			تعداد دفعاتی که روش، اولین دو مین روش برتر بوده است.	چهارمین روش برتر بوده است.
	مجموعه‌ها	r_0	روش SHDA		
امتیاز تجمعی	.	۱	۳۸	.	۲
جمع تجمعی برنولی	۴۰

مهمترین ویژگی نمودارهای شکل ۱، این است که به ازای همه موارد، عملکرد روش جمع تجمعی برنولی از سه روش دیگر بهتر است.

شکل ۱، چهار روش آماری موردنظر را به ازای دامنه‌ای از تغییرات (بر حسب γ ، ضریبی از p_0) برای موارد ۱۳، ۱۲، ۱۳، ۲۸ و ۴۰ نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقایسه عملکرد چهار روش آماری بهازی تغییرات مختلف (بر حسب γ ، ضریبی از p_0) برای موارد ۱۲، ۱۳، ۲۸ و ۴۰

مقاله، در اغلب موارد، روش‌های جمع تجمعی برنولی، مجموعه‌ها، امتیاز تجمعی و SHDA، به ترتیب عملکردی بهتر دارند؛ ولی در همه موارد، روش جمع تجمعی برنولی دارای عملکردی بهتر از سه روش دیگر است.

مراجع

- [1] Arantes, A., Carvalho, E.D.S., Medeiros, E.A.S., Farhat,C.K., Mantese, O.C., "Use of Statistical Process Control Charts in the Epidemiological Surveillance of Nosocomial Infections", Revista de Saúde Pública, Vol. 37, No. 6, pp. 768-774, 2003.
- [2] Paris, P.T., McCulloch, P., Steger, A.C., Benjamin, I.S., Poloniecki, J.D., "Mortality Control Charts for Comparing Performance of Surgical Units: Validation Study using Hospital Mortality Data", British Medical Journal, pp. 326-786, 2003
- [3] Solodky, C., Chen, H., Jones, P.K., Katcher, W., Neuhauser, D., "Patients as Partners in Clinical Research: a Proposal for Applying Quality Improvement Methods to patient Care", Medical Care, Vol. 36(Suppl.), pp.13–20, 1998.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با پیشرفت علوم و تکنولوژی، به تدریج، سطح برخی از مشخصه‌های کیفی در حوزه بهداشت و درمان بهبود یافته است؛ تا حدی که بسیاری از این مشخصه‌ها به مشخصه‌هایی نادر و کمیاب بدل شده‌اند (مانند نرخ تولدهایی با ناهنجاری‌های مادرزادی، که این نرخ در جوامع توسعه‌یافته بسیار ناچیز است). شاید در نگاه نخست، چنین مشخصه‌هایی نیاز به پایش و کنترل نداشته باشند؛ ولی روش‌های آماری توسعه داده شده در این زمینه نشان می‌دهند که این مشخصه‌های کیفی نیز به سبب عوامل گوناگون (انحرافات غیرتصادفی) می‌توانند از کنترل خارج شده، ناهنجاری‌های فردی و اجتماعی را موجب شوند. به کارگیری چنین روش‌های آماری و توسعه آن‌ها، لازمه بهبود مستمر در حوزه بهداشت و درمان برای هر کشور توسعه‌یافته و در حال توسعه است.

معروف‌ترین روش‌های توسعه‌داده شده در این خصوص، چهار روش مطرح شده در این مقاله هستند که بر اساس شاخص متوسط طول دنباله، نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این

- [18] Lie, R.T., Stein, E.V., Botting, B., Skjaerven, R., "Statistical Methods for Surveillance of Congenital Malformations: When do the Data indicate a True Shift in the Risk that an Infant is Affected by Some Type of Malformation?", International Journal of Risk and Safety in Medicine, Vol. 2, pp. 289–300, 1991.
- [19] Chen, R., "A Surveillance System for Congenital Malformations", Journal of the American Statistical Association, Vol. 73, pp. 323–327, 1978.
- [20] Wolter, C., "Monitoring Intervals Between Rare Events: a Cumulative Score Procedure Compared with Rina Chen's Sets Technique", Methods of Information in Medicine, Vol. 26, pp. 215–219, 1987.
- [21] Munford, A.G., "A Control Chart Based on Cumulative Scores", Applied Statistics, Vol. 29, pp. 252–258, 1980.
- [21] Sitter, R., Hanrahan, L.P., Anderson, L.P., DeMets, D., "The Authors' Reply", American Journal of Epidemiology, Vol. 134, pp. 917–919, 1991.
- [22] Sego, L.H., Woodall, W.H., Reynolds, Jr, M.R., "A Comparison of Surveillance Methods for Small Incidence Rates", Statistics in Medicine, Vol. 27, No. 8, pp. 1225–1247, 2008.
- [23] Page, E.S., "Continuous Inspection Schemes", Biometrika, Vol. 41, pp. 100–114, 1954.
- [24] Reynolds, Jr M.R., Stoumbos, Z.G., "A CUSUM Chart for Monitoring a Proportion When Inspecting Continuously", Journal of Quality Technology, Vol. 31, pp. 87–108, 1999.
- [25] Reynolds, Jr M.R., Stoumbos, Z.G., "A General Approach to Modeling CUSUM Charts for a Proportion", IIE Transactions, Vol. 32, pp. 515–535, 2000.
- [26] Lorden G., "Procedures for reacting to a change in distribution", Annals of Mathematical Statistics, Vol. 42, pp. 1897–1908, 1971.
- [27] Moustakides, G.V., "Optimal Stopping Times for Detecting Changes in Distributions", Annals of Statistics, Vol. 14, pp. 1379–1387, 1986.
- [28] Jensen, W.A., Jones-Farmer, L.A., Champ, C.W., Woodall, W.H., "Effects of Parameter Estimation on Control Chart Properties: a Literature Review", Journal of Quality Technology, Vol. 38, pp. 349–364, 2006.
- [29] Chen, R., Connelly, R.R., Mantel, N., "The Efficiency of the Sets and the Cuscore Techniques Under Biased Baseline Rates", Statistics in Medicine, Vol. 16, pp. 1401–1411, 1997.
- [30] Bourke, P.D., "Detecting a Shift in Fraction Nonconforming Using Run-Length Control Charts with 100% Inspection", Journal of Quality Technology, Vol. 23, pp. 225–238, 1991.
- [4] Hebert, C., Neuhauser, D., "Improving Hypertension Care with Patient-Generated Run Charts: Physician, Patient, and Management perspectives", Quality Management Health Care, Vol. 13, pp. 174–7, 2004.
- [5] Solodky, C., Chen, H., Jones, P.K., Katcher, W., Neuhauser, D., "Patients as Partners in Clinical Research: a Proposal for Applying Quality Improvement Methods to Patient Care", Medical Care, Vol. 36(Suppl.), pp. 13–20, 1998.
- [6] Montgomery, D.C., "Introduction to Statistical Quality Control", 5th ed. Wiley: New York, 2005.
- [7] Sitter, R.R., Hanrahan, L.P., DeMets, D., Anderson, H.A., "A Monitoring System to Detect Increased Rates of Cancer Incidence", American Journal of Epidemiology, Vol. 132, pp. 123–130, 1990.
- [8] Leandro, G., Rolando, N., Gallus, G., Rolles, K., Burroughs, A.K., "Monitoring Surgical and Medical Outcomes: the Bernoulli Cumulative SUM Chart, A Novel Application to Assess Clinical Interventions", Postgraduate Medical Journal, Vol. 81, pp. 647–652, 2005.
- [9] Hill, G.B., Spicer, C.C., Weatherall, J.A.C., "The Computer Surveillance of Congenital Malformations", British Medical Bulletin, Vol. 24, pp. 215–218, 1968.
- [10] Bjerkedal, T., Bakketeg, L.S., "Surveillance of Congenital Malformations and Other Conditions of the Newborn" International Journal of Epidemiology, Vol. 4, pp. 31–36, 1975.
- [11] Weatherall, J.A.C., Haskey, J.C., "Surveillance of Malformations", British Medical Bulletin, Vol. 32, pp. 39–44, 1976.
- [12] Sonesson, C., Bock, D., "A Review and Discussion of Prospective Statistical Surveillance in Public Health", Journal of the Royal Statistical Society, Series A, Vol. 166, pp. 5–21, 2003.
- [13] Woodall, W.H., "The use of Control Charts in Health-Care and Public-Health Surveillance (with Discussion)", Journal of Quality Technology, Vol. 38, pp. 89–104, 2006.
- [14] Fris'en, M., Sonesson, C., "Optimal surveillance. In Spatial and Syndromic Surveillance for Public Health", Lawson AB, Kleinman K (eds). Wiley: New York, NY, pp. 31–52, 2005.
- [15] Fris'en, M., "Statistical Surveillance: Optimality and Methods", International Statistical Review, Vol. 71, pp. 403–434, 2003.
- [16] Fris'en, M., "Evaluation of Methods for Statistical Surveillance", Statistics in Medicine, Vol. 11, pp. 1489–1502, 1992.
- [17] Barbujani, G., "A Review of Statistical Methods for Continuous Monitoring of Malformation Frequencies" European Journal of Epidemiology, Vol. 3, pp. 67–77, 1987.

- [31] Bourke, P.D., "The Geometric CUSUM Chart with Sampling Inspection for Monitoring Fraction Defective", *Journal of Applied Statistics*, Vol. 28, pp. 951–972, 2001.
- [32] Lucas, J.M., "Counted Data Cusums", *Technometrics*, Vol. 27, pp. 129–144, 1985.
- [33] Gan, F.F., "Design of Optimal Exponential CUSUM Control Charts", *Journal of Quality Technology*, Vol. 26, pp. 109–124, 1994.
- [34] Mathers, C.D., Harris, R.S., Lancaster, P.A.L., "A Cusum Scheme Based on the Exponential Distribution for Surveillance of Rare Congenital Malformations", *Australian Journal of Statistics*, Vol. 36, pp. 21–30, 1994.
- [35] Kenett, R.S., Pollak, M., "Data-Analytic Aspects of the Shirayev–Roberts Control Chart: Surveillance of a Nonhomogeneous Poisson Process", *Journal of Applied Statistics*, Vol. 23, pp. 125–137, 1996.
- [36] Ewan, W.D., Kemp, K.W., "Sampling Inspection of Continuous Processes with no Autocorrelation Between Successive Results", *Biometrika*, Vol. 47, pp. 363–380, 1960.
- [37] Borror, C.N., Champ, C.W., Rigdon, S.E., "Poisson EWMA Control Charts", *Journal of Quality Technology*, Vol. 30, pp. 352–361, 1998.
- [38] Gan, F.F., "Monitoring Observations Generated from a Binomial Distribution Using Modified Exponentially Weighted Moving Average Control Chart", *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol. 37, pp. 45–60, 1990.
- [39] Woodall, W.H., "Control Charts Based on Attribute Data: Bibliography and Review", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, pp. 172–182, 1997.
- [40] Barbujani, G., Calzolari, E., "Comparison of Two Statistical Techniques for the Surveillance of Birth Defects Through a Monte Carlo Simulation", *Statistics in Medicine*, Vol. 3, pp. 239–247, 1984.
- [41] Gallus, G., Mandelli, C., Marchi, M., Radaelli, G., "On Surveillance Methods for Congenital Malformations", *Statistics in Medicine*, Vol. 5, pp. 565–571, 1986.
- [42] Chen, R., "The Relative Efficiency of the Sets and the CUSUM Techniques in Monitoring the Occurrence of a Rare Event", *Statistics in Medicine*, Vol. 6, pp. 517–525.
- [43] Radaelli, G., "Using the Cuscore Technique in the Surveillance of Rare Health Events", *Journal of Applied Statistics*, Vol. 19, pp. 75–81, 1992.