

طراحی اقتصادی آماری یک نمودار کنترل به منظور پایش مدت زمان بقای بیماران

نوید رفیعی (دانشجوی دکتری)

شروین اسدزاده* (استادیار)

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران شمال

سید تقی اخوان نیکی (استاد)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

در سال‌های اخیر استفاده از نمودارهای کنترل در سیستم‌های سلامت توجه محققین را به خود جلب کرده است. در این مقاله طراحی یک نمودار کنترل جمع تجمعی تعدیل ریسک شده برای پایش مدت زمان بقای بیماران پیشنهاد می‌شود. در این نمودار، تعدیل ریسک با هدف در نظر گرفتن تاثیر ریسک‌های قبل از عمل هر بیمار بر روی زمان بقای او انجام می‌گیرد. به منظور بکارگیری نمودار کنترل پیشنهادی نیاز است تا پارامترهای طراحی به گونه‌ای تعیین شوند که خواص مطلوب اقتصادی و آماری بطور همزمان برآورده شوند. از اینرو، یک مدل چندهدفه پیشنهاد شده است و حل آن توسط یک الگوریتم چندمرحله‌ای انجام می‌پذیرد. سپس، عملکرد رویکرد پیشنهادی در یک مرکز جراحی قلب مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان، مقایسه‌ای با مدل طراحی اقتصادی خالص انجام شده است که نتایج نشان می‌دهد طراحی چندهدفه نمودار کنترل با افزایش مقدار نسبتاً کمی در هزینه، دارای ویژگی‌های آماری بهتری می‌باشد.

واژگان کلیدی:

نمودار کنترل جمع تجمعی، تعدیل ریسک، مدل زمان شکست تسریع‌یافته، طراحی اقتصادی آماری، تحلیل پوششی داده‌ها.

۱. مقدمه

پایش سیستم‌های سلامت به یک بخش مهم بهداشت و درمان نوین تبدیل شده است که موجب بهبود کیفیت خدمات جراحی و دیگر خدمات درمانی می‌شود. نمودارهای کنترل اصلی‌ترین ابزارهای پایش اثربخش در حوزه بهداشت و درمان هستند که برای تشخیص تغییرات در پارامترهای فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، یکی از بهترین نوع نمودار کنترل جمع تجمعی (CUSUM)^[۱] می‌باشد که برای پایش آماری و تشخیص تغییرات کوچک در حوزه بهداشت و درمان دارای عملکرد بهتری است^[۱]. زمانیکه از این نمودار برای پایش فرایند استفاده می‌شود باید چهار پارامتر تعیین شوند: اندازه نمونه، فاصله نمونه‌گیری، حدود کنترل و پارامتر طراحی شده برای تشخیص بهینه تغییراتی خاص در نمودار. انتخاب مجموعه‌ای از این پارامترها را طراحی نمودار کنترل می‌نامند. طراحی نمودار کنترل دارای جنبه‌های اقتصادی و آماری متعددی است. اولین مدل طراحی اقتصادی توسط دانکن برای پایش میانگین یک فرایند طبیعی پیشنهاد شد و پارامترهای نمودار را زمانی که یک انحراف با دلیل وجود داشت به گونه‌ای تعیین کرد که متوسط هزینه حداقل گردد. مدل هزینه او شامل هزینه‌های نمونه‌گیری، هزینه‌های مربوط به هشدارهای خارج از کنترل، هزینه‌های کشف و اصلاح انحراف با دلیل و هزینه‌های دریافت محصول معیوب توسط مشتری بود^[۲]. پس از آن، مطالعات قابل توجهی توسط سایر پژوهشگران صورت پذیرفت و تا امروز مقالات زیادی درباره طراحی اقتصادی نمودارهای کنترل به چاپ رسیده است. مدل معروف دیگر برای طراحی اقتصادی توسط لورنزن و ونس پیشنهاد گردید که بر خلاف مدل دانکن دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است و در این مدل به فرایند اجازه داده می‌شود که در طول جستجو برای کشف و اصلاح انحراف با دلیل، متوقف شود و یا به کار خود ادامه دهد^[۳]. در ادامه، ژیانو و هلو^[۴] الگوریتمی را برای طراحی بهینه نمودار کنترل جمع تجمعی به منظور شناسایی تغییرات در میانگین مشخصه کیفی پیشنهاد دادند. الگوریتم پیشنهادی آنها از طریق حداقل کردن ارزش میانگین کلی یک تابع زیان تاگوچی، پارامترهای طراحی نمودار جمع تجمعی شامل اندازه نمونه، فاصله نمونه‌گیری، حد کنترل و امتیاز ارجح را بهینه می‌کرد. لی^[۵] بر اساس مدل هزینه لورنزن و ونس و تلفیق آن با یک مدل همبستگی، طراحی اقتصادی نمودار جمع تجمعی را برای نظارت فرایندی با نمونه‌های همبسته بررسی کرد و برای دستیابی به پارامترهای بهینه طراحی با حداقل هزینه، الگوریتم ژنتیک را بکار برد. سلانو و همکاران^[۶] به دلیل کافی نبودن مقدار طول دنباله نمونه‌ها در فاز اول کنترل،

*نویسنده مسئول

آدرس: حکیمیه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، دانشکده فنی و مهندسی

N.raffei@iau-tnb.ac.ir
Sh_asadzadeh@iau-tnb.ac.ir
Niaki@sharif.edu

برای پایش دنباله تولیدات کوتاه‌مدت به طراحی اقتصادی نمودار کنترل جمع تجمعی t پرداختند. پارامترهای طراحی بهینه این نمودار با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی جامع تعیین شدند. همچنین، نمودار طراحی شده با نمودار جمع تجمعی \bar{X} برای سناریوهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج نشان داد که زبان اقتصادی نمودار جمع تجمعی t ، زمانی که پارامترهای فرایند به درستی تخمین زده نشوند، بسیار ناچیز است.

با این حال، طراحی اقتصادی نمودارهای کنترل ممکن است منجر به خواص آماری ضعیفی شود که این مسئله می‌تواند تصمیم مدیران برای استفاده از نمودارهای کنترل را با تردید مواجه کند. خواص آماری شامل احتمال خطاهای نوع اول و نوع دوم یا متوسط طول دنباله در شرایط تحت کنترل و در شرایط خارج از کنترل می‌باشد. به منظور بهبود خواص آماری یک نمودار کنترل که با مدل‌های اقتصادی طراحی شده است، سانیکا^[7] با اضافه کردن خطاهای نوع اول و نوع دوم به عنوان محدودیت‌ها به مدل اقتصادی دانکن، طراحی اقتصادی آماری را معرفی کرد. طراحی اقتصادی آماری کمک می‌کند که به طور همزمان به خواص اقتصادی و آماری مطلوب دست یافت. پس از آن، کارهای بسیاری در این زمینه انجام شد. اسدزاده و خوش‌الحان^[8] برای طراحی اقتصادی آماری نمودار کنترل \bar{X} ، یک مدل چندهدفه را پیشنهاد دادند و در کنار حداقل کردن یک تابع هدف هزینه انتظاری، به دنبال حداکثر کردن تابع هدف توان آزمون و تابع هدف متوسط طول دنباله در شرایط تحت کنترل بودند. روش حل مدل چندهدفه آنها بر اساس بهینگی سطح پارتو و روش تحلیل پوششی داده‌ها بود. نیاکی و همکاران^[9] نیز به مقایسه طراحی اقتصادی آماری و طراحی اقتصادی نمودارهای کنترل میانگین متحرک موزون نمایی پرداختند و به منظور حل آن روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات را معرفی کردند.

پایش خروجی‌های بیمارستانی و فرایندهای بالینی به یک بخش مهم سیستم‌های سلامت تبدیل شده است. بیماری‌هایی که در این سیستم‌ها تحت درمان قرار می‌گیرند به دلیل داشتن ویژگی‌های پیش از عمل متفاوت مانند سن، جنس، دیابت، فشار خون و غیره، جامعه ناهمگونی را تشکیل می‌دهند. از این رو احتمال مرگ هر بیمار پس از عمل جراحی نه تنها به میزان مهارت جراح، بلکه به ویژگی‌های پیش از عمل هر بیمار نیز بستگی دارد. بنابراین، پایش و ارزیابی عملکرد جراحی باید بر اساس این ویژگی‌ها تعدیل شود. این فرایند تعدیل ریسک نام دارد. این نکته حائز اهمیت است که تشخیص مناسب و یا نامناسب بودن کیفیت جراحی

بدون در نظر گرفتن تعدیل ریسک غیر ممکن است و در صورت عدم تعدیل ریسک، نمودارهای کنترل به عنوان یک ابزار بهبود کیفیت کارایی خود را از دست می‌دهند^[10]. در مطالعه‌ای در این زمینه، برای تشخیص افزایش و کاهش در نرخ مرگ و میر زود هنگام بیماران بعد از عمل جراحی ترمیم پارگی آنوریسم آئورت شکمی از نمودار کنترل جمع تجمعی تعدیل ریسک شده (RACUSUM)² استفاده شد و نتیجه نشان داد نرخ مرگ و میر نسبت به مقدار پیش‌بینی شده کاهش یافته است^[11]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد که با استفاده از یک نمودار جمع تجمعی تعدیل ریسک شده جدید پایش خروجی‌های جراحی قلب در نظر گرفته شده است^[12].

تا آنجا که مشخص است، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که تا کنون طراحی اقتصادی آماری نمودارهای کنترل تعدیل ریسک شده برای پایش سیستم‌های سلامت توسط پژوهشگران در نظر گرفته نشده است. بنابراین، هدف از این مقاله، گسترش یک مدل طراحی چندهدفه نمودار کنترل RACUSUM در سیستم‌های سلامت با ملاحظات اقتصادی و آماری است. در این مدل پارامترهای طراحی نمودار RACUSUM به گونه‌ای تعیین می‌شوند که هزینه انتظاری و همچنین، متوسط طول دنباله در شرایط خارج از کنترل (ARL_1) ³ حداقل می‌شوند، درحالی‌که متوسط طول دنباله در شرایط تحت کنترل (ARL_0) ⁴ حداکثر می‌گردد. برای حل مدل پیشنهادی روش‌های مختلفی وجود دارد که با توجه به مرور ادبیات می‌توان به الگوریتم‌های فراابتکاری مانند ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات اشاره کرد^[5, 9]. الگوریتم‌های فراابتکاری دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. این الگوریتم‌ها راه‌حل‌های قابل قبول در زمان معقول را برای فضاهای پیوسته، بسیار بزرگ و پیچیده ارائه می‌دهند ولی ممکن است بهینه بودن جواب‌های بدست آمده را تضمین نکنند. فضای مورد بررسی در این مقاله یک فضای گسسته با راه‌حل‌های از پیش مشخص می‌باشد. بنابراین، برای حل مدل پیشنهادی یک رویکرد چندمرحله‌ای در نظر گرفته می‌شود.

اصل پارتو⁵ از محبوب‌ترین سازوکارها در بهینه‌سازی است که ظرفیت ارتقا دادن کیفیت راه‌حل‌ها را دارا می‌باشد. از اینرو، برای مشخص کردن راه‌حل‌های نامغلوب یا سطح پارتو، مدل پیشنهادی از اصل پارتو استفاده می‌شود^[13]. سپس، برای تعیین راه‌حل‌های کارا و انتخاب کاراترین راه‌حل روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)⁶ بکار گرفته می‌شود. تحلیل پوششی داده‌ها برای ارزیابی و مقایسه کارایی نسبی واحدهای مشابه که وظایف یکسانی را

انجام می‌دهند کاربرد دارد [۱۴] و در حل مسائل چندمعیاره در زمینه‌های مدیریتی و اقتصادی به گستردگی بکار رفته است مانند: ارزیابی عملکرد خدمات بیمارستانی [۱۵] و ارزیابی زنجیره تامین شرکتهای حمل و نقل [۱۶].

مقاله حاضر به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲ که شامل چند زیربخش می‌باشد، فرم کلی طرح پایشی در قالب مفهوم اصلی نمودار کنترل RACUSUM ارائه می‌شود. در ادامه این بخش، تابع هزینه استفاده شده در طراحی اقتصادی توصیف می‌گردد و مدل چندهدفه برای طراحی اقتصادی آماري توسعه داده می‌شود. در بخش ۳، اصل پارتو و تحلیل پوششی داده‌ها به جهت بهینه‌سازی، و الگوریتم استفاده شده برای حل مدل چندهدفه توضیح داده می‌شود. بخش ۴، یک مطالعه موردی را در مرکز جراحی قلب نشان می‌دهد که کاربرد روش پیشنهادی را در سیستم‌های سلامت روشن می‌کند و سپس، یک مقایسه بین طراحی چندهدفه و طراحی خالص اقتصادی ترتیب داده می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ذکر شده است.

۲. رویکرد پایش پیشنهادی

۲.۱. طرح پایشی مبتنی بر نمودار کنترل RACUSUM

ویژگی‌های پیش از عمل منحصر به فرد بیماران در هنگام ورود به فرایند جراحی، پایش سیستم‌های سلامت را با چالش ناهمگونی جامعه مواجه می‌کند. این ویژگی‌ها که تحت عنوان ریسک شناخته می‌شوند شامل سن، جنس، دیابت، فشار خون و غیره هستند که می‌توانند بر پایش عملکرد جراحی تاثیرگذار باشند [۱۷]. به عنوان مثال، بیماران با ریسک‌های حادثه، امکان تجربه خروجی‌های بدتری دارند، حتی اگر مراقبت‌های عالی از آنها انجام شده باشد. بنابراین، این واقعیت باید در نظر گرفته شود که عملکرد جراحی برای هر بیمار علاوه بر کیفیت جراحی، به پیشینه سلامت منحصر به فرد بیمار نیز بستگی دارد که این پیشینه از ریسک‌های پیش از عمل تشکیل می‌شود. در نتیجه، برای اینکه یک طرح پایشی مؤثری را داشته باشیم نیاز است تا ارتباط بین مرگ و میر یک بیماری خاص و عوامل ریسک آن مشخص شود یا به اصطلاح طرح پایشی تعدیل ریسک شود. در ادبیات، با توجه به خروجی‌های گسسته و پیوسته کارهای متنوعی با استفاده از نمودارهای کنترل تعدیل ریسک وجود دارد، اما طرح پایشی که بر اساس متغیر پیوسته زمان بقای بیمار باشد در تشخیص تغییرات در نرخ مرگ و میر نسبت به سایر رویکردها خیلی حساس‌تر و بهتر عمل می‌کند. باید توجه شود که زمان بقا متغیری است که

دارای ماهیت قابلیت اطمینان می‌باشد. یکی از ویژگی‌های خاص داده‌های قابلیت اطمینان سانسورشدگی است و زمانی رخ می‌دهد که پایش زمان بقا تا یک حد از پیش تعیین شده مورد توجه باشد. بنابراین به منظور کاهش زمان و هزینه می‌توان در فرایند جراحی از مکانسیم سانسورشدگی از راست استفاده کرد. علاوه بر این، داده‌های قابلیت اطمینان به وسیله عضوی از توزیع‌های مکان-مقیاس و لگاریتم مکان-مقیاس مدل‌سازی می‌شوند. در میان آنها، ویبول یکی از پرکاربردترین توزیع‌ها می‌باشد که در موقعیت‌های متنوع مفید واقع شده است [۱۸]. در نتیجه، بدون از دست دادن کلیات، فرض بر این است که متغیر خروجی یا زمان بقا از توزیع ویبول پیروی می‌کند. توابع چگالی احتمال و بقای این توزیع که به ترتیب، با f و S نشان داده می‌شوند، به صورت زیر هستند:

$$f(y) = \frac{k}{\eta} \left(\frac{y}{\eta}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{y}{\eta}\right)^k\right) \quad (1)$$

$$S(y) = \exp\left(-\left(\frac{y}{\eta}\right)^k\right)$$

در این رابطه η ارزش ثابت شده از خروجی اندازه‌گیری شده یعنی زمان بقا است. همچنین، $k > 0$ پارامتر شکل و $\eta > 0$ پارامتر مقیاس توزیع ویبول هستند.

از طرف دیگر، ماهیت قابلیت اطمینان زمان بقا و ناهمگونی موجود در جامعه بیماران، ما را به استفاده از مدل‌های رگرسیونی تحلیل بقا رهنمون می‌سازد. از جمله مدل‌های رگرسیون تحلیل بقا می‌توان به مدل زمان شکست تسریع‌یافته (AFT) اشاره کرد که این مدل یک یا چند پارامتر توزیع را به وسیله تابعی از متغیرهای تاثیرگذار شناسایی شده بیان می‌کند [۱۹]. در این مقاله به منظور تعدیل ریسک از مدل AFT استفاده می‌کنیم و بر اساس آن، پارامترهای توزیع پایه می‌توانند با رابطه (۲) نشان داده شوند:

$$\omega_i = q(\beta, X_i) \quad (2)$$

که q تابع مدل رگرسیون، ω_i برداری از پارامترهای توزیع، β بردار پارامترهای رگرسیونی و X_i بردار متغیرهای تاثیرگذار است که عوامل ریسک را برای بیمار i منعکس می‌کند. با استفاده از مدل AFT برای توزیع ویبول، پارامتر مقیاس را به تنها متغیر تاثیرگذار در این مقاله وابسته می‌کنیم یعنی:

$$\eta = \exp(\beta_0 + \beta_1 x) \quad (3)$$

از اینرو، تابع چگالی احتمال و بقا به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$W_i = \log\left(\frac{L(y_i | \omega_{i1})}{L(y_i | \omega_{i0})}\right) \quad (7)$$

که در آن L تابع درستنمایی را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه بالا آشکار است که نمودار برای تشخیص سریع تغییرات از ω_{i0} به ω_{i1} طراحی شده است. به محض اینکه آمار بروز رسانی شده این نمودار از یک مقدار هدف خاص یا یک حد کنترلی تجاوز کند، هشدار خارج از کنترل صادر می‌شود. به دلیل اینکه در این مقاله از یک نمودار CUSUM یک‌طرفه استفاده می‌شود و هدف آن کشف تغییرات کاهشی در میانگین زمان بقا می‌باشد، باید یک حد پایین کنترل را در نظر بگیریم. در همین راستا، LCL حد پایینی کنترل است و به طریقی انتخاب می‌شود که به یک ARL_0 مطلوب برسیم. بنابراین، زمانی که $LCL > V_i$ باشد نمودار CUSUM یک هشدار خارج از کنترل را نشان می‌دهد.

در ادامه، به منظور توسعه نمودار کنترل RACUSUM و بکارگیری آن، روش پیشنهادی سگو و همکاران^[17] در نظر گرفته شد. این روش برای ایجاد تابع درستنمایی در امتیاز نمودار کنترل CUSUM، از توابع چگالی و بقای پیش‌بینی شده توسط مدل AFT استفاده می‌کند. همچنین، این روش برای مشاهدات سانسورشدگی را در نظر می‌گیرد، یعنی زمان بقای بیماران تا یک زمان از پیش تعیین شده یا زمان سانسور شده از راست (c) مشاهده می‌شود. با انجام این کار تابع درستنمایی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$L(z_i | \omega_i, \delta_i) = [f(z_i)]^{\delta_i} [S(z_i)]^{1-\delta_i}$$

$$z_i = \text{Min}(y_i, c) \quad (8)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i \leq c \\ 0 & \text{if } y_i > c \end{cases}$$

با جایگذاری توابع چگالی احتمال و بقای مبتنی بر مدل AFT، در رابطه (8) تابع درستنمایی نمودار کنترل RACUSUM حاصل می‌شود. سپس، می‌توان با استفاده از رابطه (7) نسبت درستنمایی در امتیاز نمودار کنترل RACUSUM را ایجاد کرد. بنابراین، برای تشخیص یک تغییر به اندازه v در پارامتر مقیاس، امتیاز لگاریتم درستنمایی به صورت زیر است:

$$f(y|x) = \frac{\kappa}{\exp(\beta_0 + \beta_1 x)} \left(\frac{y}{\exp(\beta_0 + \beta_1 x)}\right)^{\kappa-1} \exp\left(-\left(\frac{y}{\exp(\beta_0 + \beta_1 x)}\right)^\kappa\right) \quad (4)$$

$$S(y|x) = \exp\left(-\left(\frac{y}{\exp(\beta_0 + \beta_1 x)}\right)^\kappa\right)$$

که β_0 و β_1 پارامترهای مدل رگرسیونی هستند. در رابطه قبل، نقش قسمت ثابت $\exp(\beta_0)$ با پارامتر مقیاس یکسان است. در نتیجه، با توجه به رابطه (4) می‌توان نشان داد که مدل AFT برای توزیع ویبول دارای پارامتر شکل κ و پارامتر مقیاس $\eta \exp(\beta_1 x_i)$ است^[19]. بنابراین، بردار پارامترهای تحت کنترل به صورت $\omega_{i0} = (\kappa, \eta \exp(\beta_1 x_i))$ مشخص می‌شود. فرض بر این است که $\omega_{i1} = (\kappa, v \eta \exp(\beta_1 x_i))$ شرایط خارج از کنترل را نشان می‌دهد که v یک تغییر از پیش تعیین شده است که نمودار کنترل CUSUM برای تشخیص بهینه آن طراحی شده است. به دلیل رابطه مستقیم بین پارامتر مقیاس و میانگین توزیع ویبول، هر تغییری در پارامتر مقیاس معادل با تغییر در میانگین زمان بقا می‌باشد. رابطه میانگین توزیع ویبول به صورت زیر است:

$$\mu = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \quad (5)$$

در رابطه بالا منظور از Γ ، تابع گاما است^[19]. پس از مشخص شدن ارتباط بین زمان بقا و ریسک‌های قبل از عمل به وسیله مدل AFT، به منظور پایش زمان بقا نیاز به طراحی و توسعه نمودار کنترل RACUSUM است. در دنیای پزشکی هر گونه سهل‌انگاری و اشتباه باعث بر هم خوردن ایمنی بیمار شده و هزینه‌های غیر قابل جبرانی را برای بیمار، اطرافیان وی، پزشک و کادر درمانی ایجاد می‌کند. از اینرو، با توجه به حساسیت سیستم سلامت، در این مقاله به دنبال تشخیص تغییرات کاهشی در زمان بقا خواهیم بود. برای این منظور، یک نمودار کنترل یک‌طرفه پیشنهاد داده شده و بکار گرفته می‌شود^[19]. آماره این نمودار تعدیل ریسک شده (V_i) به صورت زیر است:

$$V_i = \text{Min}(0, V_{i-1} - W_i), \quad i = 1, 2, \dots$$

$$V_0 = 0 \quad (6)$$

در این رابطه W_i امتیاز CUSUM است که با استفاده از رابطه (7) محاسبه می‌شود:

$$W_i = \log \frac{\left[\frac{\kappa}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^{\kappa-1} \exp\left(-\left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{\delta_i} \left[\exp\left(-\left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{1-\delta_i}}{\left[\frac{\kappa}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^{\kappa-1} \exp\left(-\left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{\delta_i} \left[\exp\left(-\left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{1-\delta_i}} \quad (9)$$

که برای صورت کاهش یافته آن داریم:

$$W_i = [(1-v^{-\kappa}) \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa] - \delta_i \kappa \log v \quad (10)$$

نحوه تبدیل رابطه (9) به رابطه (10) در قسمت (الف) پیوست ذکر شده است. در نهایت، با دستیابی به امتیاز نمودار کنترل RACUSUM، می‌توان با استفاده از رابطه (6) به سادگی به آماره آن دست یافت.

ب. مدت زمانی که فرایند خارج از کنترل است،
ج. مدت زمان برای شناسایی و تشخیص انحراف با دلیل، و
د. مدت زمان برای اقدامات جهت اصلاح انحراف با دلیل.
بنابراین، با کنار هم قرار گرفتن چهار قسمت زمانی، طول انتظاری یک دوره برابر است با:

$$E_T = \frac{1}{\lambda} + [(h.ARL_1) - \tau] + TF + TD \quad (11)$$

و همچنین، هزینه کل انتظاری یک دوره به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$E_C = \frac{\frac{1}{A \cdot \lambda} + [(h.ARL_1) - \tau] + \gamma_1.TF + \gamma_2.TD}{h} + CO.ARL_1 + (CF + CD) \quad (12)$$

پارامترهای این توابع به صورت زیر معرفی می‌شوند:

- ARL_0 : متوسط طول دنباله در شرایط تحت کنترل.
- ARL_1 : متوسط طول دنباله در شرایط خارج از کنترل.
- τ : زمان انتظاری رخ دادن انحراف با دلیل بین نمونه‌های i و $i+1$ ، که به کمک رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{1 - (1 + \lambda h) e^{-\lambda h}}{\lambda (1 - e^{-\lambda h})} \quad (13)$$

جزئیات این رابطه در قسمت (ب) پیوست آمده است.

- TF : متوسط زمان برای جستجو و شناسایی انحراف با دلیل.
- TD : متوسط زمان برای اجرای اقدامات اصلاحی.
- A : هزینه‌های نمونه‌گیری برای هر بیمار.
- CO : هزینه تحمیل شده بر بیمارستان به دلیل جراحی خارج از کنترل برای هر بیمار ناشی از رخداد انحراف با دلیل.
- CF : هزینه جستجو و شناسایی انحراف با دلیل.
- CD : هزینه اقدامات اصلاحی برای بر طرف نمودن انحراف با دلیل.
- γ_1 : ۱ است، اگر فرایند در طول زمان جستجو و شناسایی انحراف با دلیل متوقف نشود، در غیر این صورت ۰ می‌باشد.

۲.۲. تابع هزینه طراحی اقتصادی نمودار کنترل

RACUSUM در حضور یک انحراف با دلیل

تعیین پارامترهای نمودار کنترل RACUSUM با حداقل کردن یک تابع هزینه مناسب، طراحی اقتصادی نامیده می‌شود. این پارامترها n (اندازه نمونه)، h (فاصله نمونه‌گیری)، LCL (حد پایین کنترل) و v (ضریب طراحی شده در CUSUM برای کشف بهینه تغییر) هستند. در این مقاله، برای تعیین ارزش‌های بهینه پارامترهای نمودار کنترل RACUSUM از تابع هزینه لورنزن و ونس کمک می‌گیریم [۳]. این تابع برای حضور یک انحراف با دلیل در فرایند در نظر گرفته شده است. تابع هزینه پیشنهادی به سه قسمت اصلی تجزیه می‌شود:

الف. هزینه‌های نمونه‌گیری،

ب. هزینه‌های متحمل شده بر بیمارستان (سیستم‌های سلامت) در شرایط جراحی در حالت خارج از کنترل برای هر بیمار، و
ج. هزینه‌های شناسایی و اقدام اصلاحی برای انحراف با دلیل.

فرض بر این است که فرایند در یک دوره، از یک حالت تحت کنترل آغاز می‌شود و در این حالت، زمان تا رخداد یک انحراف با دلیل از یک توزیع نمایی با میانگین $1/\lambda$ پیروی می‌کند. پس از رخداد انحراف با دلیل فرایند به حالت خارج از کنترل می‌رود و تا زمان پیدا کردن و اصلاح انحراف با دلیل ادامه می‌یابد، سپس دوره جدیدی آغاز می‌شود. هزینه انتظاری در واحد زمانی، با تقسیم هزینه کل انتظاری در طول یک دوره بر طول انتظاری یک دوره، محاسبه می‌شود. همچنین، طول انتظاری یک دوره شامل چهار قسمت است:

الف. مدت زمانی که فرایند در حالت تحت کنترل باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، این مدت زمان یک متغیر تصادفی نمایی با میانگین $1/\lambda$ است،

- γ_2 : ۱ است، اگر فرایند در طول زمان برطرف نمودن و حذف انحراف با دلیل متوقف نشود، در غیر این صورت ۰ می‌باشد.

در نهایت، هزینه انتظاری در واحد زمانی تحمیل شده بر فرایند، با تقسیم هزینه کل انتظاری در طول یک دوره بر طول انتظاری یک دوره و به صورت محاسبه می‌شود:

$$E_A = \frac{E_C}{E_T} \quad (14)$$

۳.۲. مدل چندهدفه طراحی نمودار کنترل RACUSUM در حضور یک انحراف با دلیل

همانطور که در بخش مقدمه بیان شد، مشکل اصلی طراحی اقتصادی نمودارهای کنترل، عدم توجه به خواص آماری مطلوب است. بنابراین، به منظور غلبه بر ضعف بودن خواص آماری در طراحی اقتصادی نمودار کنترل RACUSUM، یک مدل برنامه-ریزی چندهدفه پیشنهاد داده می‌شود که به طور همزمان هر دو ملاحظات اقتصادی و آماری را در نظر می‌گیرد. این مدل دارای یک هدف اقتصادی شامل حداقل کردن هزینه انتظاری هر واحد زمانی (E_A) برای پایش فرایند و دو هدف آماری شامل بیشینه کردن متوسط طول دنباله در شرایط تحت کنترل (ARL_0) به منظور کاهش رخدادهای هشدار اشتباهی و بیشینه کردن معکوس متوسط طول دنباله در شرایط خارج از کنترل ($1/ARL_1$) به منظور تشخیص سریع شرایط خارج از کنترل می‌باشد. فرم ریاضیاتی مدل چندهدفه پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Min} && E_A(D) \\ & \text{Max} && ARL_0(D) \\ & \text{Max} && \frac{1}{ARL_1(D)} \\ & \text{s.t.} && \\ & && ARL_0(D) \geq ARL^L \\ & && ARL_1(D) \leq ARL^U \end{aligned} \quad (15)$$

که در این مدل، ARL^L و ARL^U در دو محدودیت آماری، به ترتیب نشان‌دهنده حد پایین ARL_0 و حد بالای ARL_1 می‌باشند. همچنین، D یک ترکیب ممکن از پارامترهای طراحی شامل n ، h ، LCL و v است. بنابراین، به منظور انتخاب یک ترکیب از پارامترهای طراحی نمودار کنترل RACUSUM با ارزش‌های بهینه، می‌توان مدل چندهدفه رابطه (۱۵) را حل کرد. در زیربخش بعدی یک الگوریتم حل چندمرحله‌ای بر اساس یکپارچه-

سازی اصل پارتو و روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) برای بهینه‌سازی مدل چندهدفه رابطه (۱۵) شرح داده می‌شود.

۳. رویکرد حل

۳.۱. اصل پارتو

در اصل پارتو رتبه‌بندی راه‌حل‌ها بر اساس نامغلوب‌ها با استفاده از مفهوم غلبه صورت می‌گیرد. به طور کلی برای مرتب کردن راه-حل‌ها بر اساس سطوح نامغلوب‌ها، هر راه‌حل با تمام راه‌حل‌های دیگر موجود در جمعیت مقایسه شده، تا مغلوب بودن یا نبودن آن مشخص گردد. در نهایت مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها وجود دارد که هیچ کدام غالب و مغلوب همدیگر نمی‌شوند. لذا این راه‌حل‌ها سطح پارتو^۱ را تشکیل می‌دهند. برای یک مسئله کمینه‌سازی با Q تابع هدف، راه‌حل g در صورتی به راه‌حل o غلبه می‌کند که:

$$\begin{aligned} & g < o \mid \forall_i : f_i(g) \leq f_i(o) \\ & \text{and} \\ & \exists_i : f_i(g) < f_i(o) \end{aligned} \quad (16)$$

که $f_i(g)$ و $f_i(o)$ مقادیر اهداف t ام مرتبط با راه‌حل‌های g و o هستند. عبارت بالا به این مفهوم است که همه اهداف مربوط به g کوچکتر یا مساوی تابع هدف متناظر مربوط به o باشند. یعنی o از هیچ نظر بهتر از g نباشد و g حداقل از یک نظر اکیداً بهتر از o باشد. راه‌حل‌های نامغلوب، راه‌حل سطح پارتو نامیده می‌شوند ^[۲۱]

۳.۲. تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)

این روش اولین بار توسط چارنز، کوپر و رودز معرفی شد و یک روش بر اساس برنامه‌ریزی ریاضی است که کارایی نسبی خوشه‌های همگون از واحدهای تصمیم‌گیری با ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه را اندازه‌گیری می‌کند ^[۲۲]. در این مقاله، هر مجموعه ممکن از پارامترهای طراحی به عنوان یک واحد تصمیم‌گیری فرض می‌شود. علاوه بر این، با توجه به مفهوم DEA برای مدل چندهدفه پیشنهادی، دو هدف آماری یعنی ARL_0 و $1/ARL_1$ که به صورت حداکثرسازی هستند را به عنوان خروجی‌ها و هدف هزینه (E_A) که به صورت حداقل‌سازی است را به عنوان تنها ورودی در نظر می‌گیریم. برای محاسبه کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیری نیاز است که وزن‌های اختصاص داده شده به ورودی‌ها و خروجی‌ها بهینه شوند. برای رسیدن به این هدف، می‌توان به مدل‌های CCR^۱، BCC^۱ و جمعی اشاره کرد. در مدل‌های CCR و BCC نیاز است که بین حالت‌های ورودی‌محور و

۳.۳. الگوریتم حل

در این زیربخش یک الگوریتم حل پنج مرحله‌ای برای بهینه کردن مدل چندهدفه پیشنهادی معرفی می‌شود. توجه شود که در این مدل باید برای هر مجموعه ممکن از پارامترهای طراحی، مقادیر سه تابع هدف مذکور از قبل محاسبه شوند. الگوریتم حل برای بهینه‌سازی مدل چندهدفه به صورت زیر توصیف می‌شود:

الف. تعیین ترکیبات ممکن از پارامترهای طراحی با تعریف کردن بازه‌هایی برای هر پارامتر طراحی: در این مقاله که در یک مرکز جراحی قلب اجرا می‌شود، به دلیل حساس بودن حوزه سلامت، نمونه‌گیری به صورت جداگانه و در بازه‌های زمانی ثابت بر روی همه بیماران انجام می‌پذیرد. بنابراین $n = 1$ و $h = 4$ (ساعت) است. لذا بهینه‌سازی در ارتباط با این دو پارامتر مد نظر قرار نمی‌گیرد. اما بازه‌هایی که برای دو پارامتر دیگر در نظر گرفته شده است به صورت $v^L \leq v \leq v^U$ و $LCL^L \leq LCL \leq LCL^U$ هستند. در این بازه‌ها v^L و v^U به ترتیب، بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز برای v و همچنین، LCL^L و LCL^U به ترتیب، بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز برای حد پایین کنترل می‌باشند. در این مطالعه فرض می‌کنیم $0.1 \leq v \leq 0.2$ ، که با مقدار 0.1 افزایش می‌یابد و $-0.1 \leq LCL \leq -0.5$ که گام افزایشی آن نیز مقدار 0.1 است. بنابراین، با در نظر گرفتن تمام ترکیبات ممکن تعداد راه‌حل‌های بالقوه 1000 خواهد بود.

ب. از بین بردن راه‌حل‌های غیر ممکن: با توجه به محدودیت‌های آماری $ARL_0 \geq ARL^L$ و $ARL_1 \leq ARL^U$ عناصر غیر جذاب را حذف می‌کنیم. محدودیت‌های آماری این مطالعه به صورت $ARL_0 \geq 20$ و $ARL_1 \leq 5$ هستند.

ج. تعیین سطح پارتو: در این مرحله برای مشخص شدن راه‌حل‌های نامغلوب یا سطح پارتو از اصل پارتو استفاده می‌شود. در میان مجموعه راه‌حل‌های باقیمانده از مرحله قبل، یک راه‌حل نامغلوب است اگر از لحاظ ویژگی‌های آماری و هزینه توسط سایر راه‌حل‌ها به طور کامل مغلوب نشود.

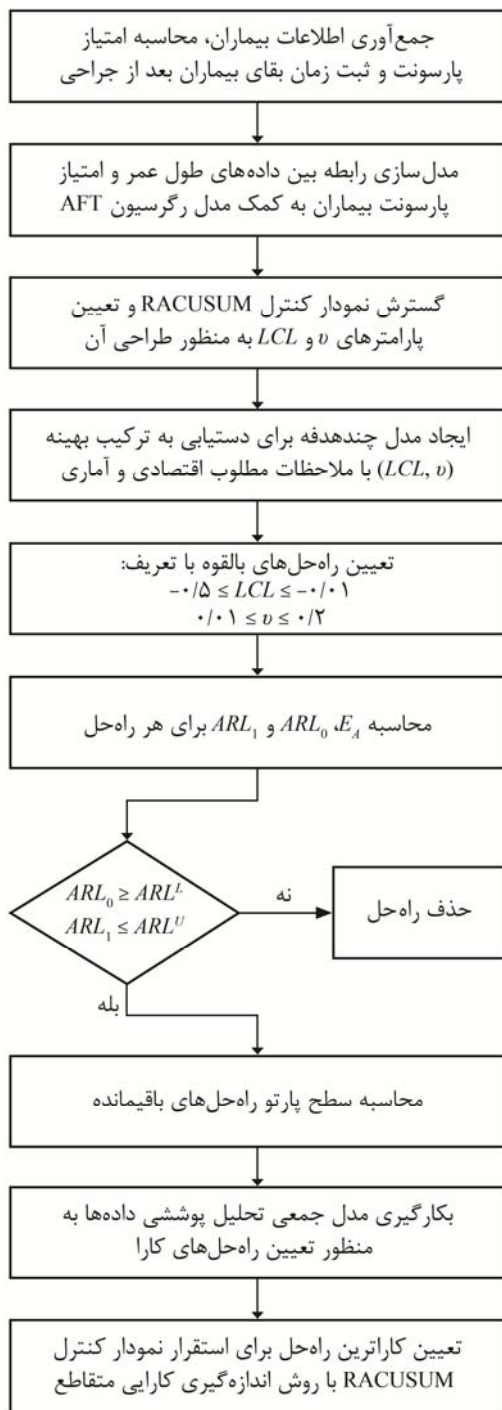
د. انتخاب راه‌حل‌های کارا: کارایی نسبی راه‌حل‌های باقیمانده را با مدل جمعی DEA محاسبه می‌کنیم و مجموعه پارامترهای طراحی کارا را انتخاب می‌نماییم.

ه. رتبه‌بندی مجموعه پارامترهای طراحی کارا: برای رتبه‌بندی مجموعه پارامترهای طراحی کارا و انتخاب کاراترین آنها، از روش اندازه‌گیری کارایی متقاطع استفاده می‌کنیم. تفسیر جالب کارایی متقاطع این است که هر مجموعه از

خروجی محور تمایز قائل شد، اما در مدل جمعی هر دو حالت به صورت یک مدل واحد ارائه می‌شود. مدل جمعی از اولین و مهمترین مدل‌های ارائه شده برای تعیین کارایی در DEA است که خود این مدل، پایه و منشأ تعریف بسیاری از مدل‌های دیگر می‌باشد. در نتیجه، در این مقاله برای محاسبه کارایی هر واحد تصمیم‌گیری به عنوان یک مجموعه ممکن از پارامترهای طراحی، از حل مدل جمعی استفاده می‌کنیم. از دیگر دلایل اهمیت این مدل کامل بودن کارایی محاسبه شده توسط آن است، زیرا مدل مستقیماً به حداقل‌سازی متغیرهای کمکی می‌پردازد. درحالی‌که در دیگر مدل‌ها تشخیص وجود متغیرهای کمکی در کارایی، عموماً به وسیله یک مدل دیگر شبیه مدل جمعی و به عنوان مرحله دوم اندازه‌گیری کارایی انجام می‌شود. بنابراین، از مزیت‌های مدل جمعی این است که نیازی به روش دو مرحله‌ای نیست و ارزیابی کارایی واحد با حل یک مدل به دست می‌آید. فرض می‌شود m واحد تصمیم‌گیری با a ورودی و b خروجی وجود دارد. ارزش‌های ورودی و خروجی برای واحد تصمیم‌گیری k ($k=1,2,\dots,m$)، به ترتیب با $(j=1,2,\dots,a) p_{jk}$ و $(r=1,2,\dots,b) q_{rk}$ نشان داده می‌شوند. با این حال، فرم ریاضی مدل جمعی برای محاسبه کارایی واحد تصمیم‌گیری k به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Max } E_k(D) = & \sum_{r=1}^b u_r q_{rk}(D) - \sum_{j=1}^a e_j p_{jk}(D) - T \\ \text{s.t.} & \sum_{r=1}^b u_r q_{rk}(D) - \sum_{j=1}^a e_j p_{jk}(D) - T \leq 0, \\ & u_r, e_j \geq 1, \\ & T \text{ is free.} \end{aligned} \quad (17)$$

که در اینجا e_j و u_r به ترتیب اوزان ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند و علامت T نوع بازده به مقیاس را نشان می‌دهد. رابطه (17) باید برای هر واحد تصمیم‌گیری یا ترکیبی از پارامترهای طراحی فرموله شود تا مجموعه‌ای از اوزان برای حداکثر کردن کارایی واحد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده، پیدا شود. اگر $E_k^* = 1$ باشد، واحد تصمیم‌گیری k کارایی نسبی است، در غیر این صورت ناکاراست. لذا، در رویکرد پیشنهادی قصد بر این است که از DEA برای سنجش کارایی سطح پارتو مدل چندهدفه به منظور یافتن پارامترهای طراحی بهینه نمودار کنترل RACUSUM استفاده شود. برای این منظور یک الگوریتم حل چندمرحله‌ای در نظر گرفته شده است که در زیربخش بعدی توضیح داده می‌شود.



شکل ۱. فرایند اجرای رویکرد پیشنهادی در یک مرکز جراحی قلب.

پس از اینکه ریسک های قبل از عمل برای هر بیمار مشخص شد، تاثیر آنها توسط مدل AFT و ویبول بر روی زمان بقا تعدیل می شود. به دلیل قوانین و مقررات بیمارستان، زمان بقای بیمارانی که در طول مطالعه زنده ماندند در روز بیست و یکم سانسور شد و

پارامترهای طراحی کارا از لحاظ بهترین اوزان خود و بهترین اوزان مجموعه پارامترهای طراحی کارای دیگر چگونه عمل می کند [۱۴]. با فرض اینکه اوزان بهینه رابطه (۱۷) برای واحد تصمیم گیری d ، $(e_{jd}^*, u_{rd}^*, T_d^*)$ باشد، سپس، کارایی واحد تصمیم گیری k ($k=1,2,\dots,m$)، با اوزان واحد تصمیم گیری d در یک فرایند همتا ارزیابی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_{dk} = \frac{\sum_{r=1}^b u_{rd}^* q_{rk} - T_d^*}{\sum_{j=1}^a e_{jd}^* P_{jk}} \quad (18)$$

میانگین همه E_{dk} ها کارایی متقاطع نامیده می شود و واحد تصمیم گیری با بالاترین کارایی متقاطع بهترین رتبه را دارد. این میانگین به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\bar{E}_k = \frac{\sum_{d=1}^m E_{dk}}{m}, \quad k=1,\dots,m. \quad (19)$$

۴. تحلیل یافته ها

۱.۴. مطالعه موردی در مرکز جراحی قلب

بیماری های قلبی عروقی یک گروه از اختلالات عمده قلب و عروق هستند که عبارتند از بیماری های عروق کرونر قلب، عروق مغزی، شریان محیطی، روماتیسم قلبی، مادرزادی قلبی، ترومبوز ورید و آمبولی ریه. این نوع بیماری ها رتبه نخست علت مرگ و میر در جهان را به خود اختصاص داده و تعداد زیادی از مردم هر ساله جان خود را به دلیل این نوع بیماری ها از دست می دهند. جراحی قلب جز رایج ترین عمل های جراحی در میان بزرگسالان است و با توجه به اینکه حیات یک فرد به عملکرد قلب وی بستگی دارد، حساسیت این عمل جراحی بسیار بالاست و پایش زمان بقای بیمار بعد از جراحی پر اهمیت است. از اینرو، کاربرد واقعی رویکرد پیشنهادی در یک مرکز جراحی قلب مورد بررسی قرار می گیرد که فرایند اجرای آن در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. برای این منظور یک نوع عمل خاص به نام جراحی بای پس عروق کرونر (CABG) [۱۱] انتخاب شد و اطلاعات ۱۰۰ بیمار، شامل تاریخ عمل، نام جراح، رویکرد عمل، زمان بقا و امتیاز پارسونت جمع آوری شد. امتیاز پارسونت به منظور تعیین ریسک های قبل از عمل جراحی برای هر بیمار استفاده می شود که شامل ترکیب وزنی ریسک های قبل از عمل برای هر بیمار است و در فرایند جراحی قلب به عنوان تنها متغیر تاثیرگذار بر روی زمان بقا در نظر گرفته می شود [۲۳].

در مرکز جراحی قلب انتخاب این نقطه پایانی، معمولاً به عنوان یک اندازه رایج بالینی به حساب می‌آید. در ابتدا، داده‌های جمع‌آوری شده از ۱۰۰ بیمار برای پیدا کردن توزیع مناسب و برآورد پارامترهای تحت کنترل استفاده شدند. نتایج این قسمت نشان داد که داده‌های امتیاز پارسونت دارای توزیع گاما با پارامتر مقیاس برابر با $5/117$ و پارامتر شکل برابر با $4/208$ بودند. سپس، برای تخمین ارزش پارامترهای تحت کنترل مدل AFT ویبول از روش برآورد حداکثر درست‌نمایی استفاده شد و این ارزش‌ها با مقادیر η برابر با $183744/22$ ، κ برابر با $1/2066$ و β برابر با $0/2144$ - مشخص شدند. بنابراین، می‌توان با استفاده از روابط (۴) و (۹)، به ترتیب، توابع چگالی احتمال و بقای مدل AFT ویبول و به دنبال آن امتیاز نمودار کنترل RACUSUM را محاسبه کرد.

اما مهمترین قسمت، استقرار نمودار کنترل RACUSUM در فرایند جراحی بای‌پس عروق کرونر است که برای این منظور نیاز است تا چهار پارامتر طراحی این نمودار تعیین شوند. این پارامترها اندازه نمونه (n)، فاصله نمونه‌گیری (h)، حد پایین کنترل (LCL) و ضریب طراحی شده در نمودار کنترل RACUSUM برای کشف بهینه تغییر (v) هستند. همانطور که در الگوریتم حل بیان شد، در این مطالعه به دلیل حساسیت بالای سیستم‌های سلامت در پایش هر بیمار، تمامی بیماران به صورت جداگانه و پی‌درپی مورد پایش قرار می‌گیرند. بنابراین، اندازه نمونه ثابت و برابر با مقدار یک است. با این حال، چون بیماران در مرکز جراحی هر چهار ساعت یک بار تحت جراحی قرار می‌گیرند، مقدار فاصله نمونه‌گیری نیز ثابت و برابر با چهار است. پس از مشخص شدن دو پارامتر طراحی نمودار کنترل RACUSUM، نیاز است تا در فرایند جراحی قلب دو پارامتر دیگر نمودار، یعنی ضریب بهینه تغییر کاهشی (v) و حد پایینی کنترل (LCL) به گونه‌ای تعیین شوند که هر دو خواص آماری و اقتصادی ارضا گردند. در قسمت‌های پیشین، علت تمرکز بر تعیین ضریب بهینه تغییر کاهشی و حد پایینی کنترل بیان شد و پیشنهاد گردید که به منظور جلوگیری از برهم خوردن ایمنی بیمار و پیشگیری از هزینه‌های غیر قابل جبران برای بیمار، اطرافیان وی، پزشک و کادر درمان، یک نمودار کنترل یک‌طرفه به منظور تشخیص سریع تغییرات کاهشی بکار گرفته شود. در نتیجه، رویکرد طراحی چندهدفه پیشنهادی در این مقاله، برای انتخاب ترکیبی از پارامترهای

طراحی نمودار کنترل RACUSUM یعنی (LCL, v) مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طریقی که اهداف مطلوب کمینه هزینه انتظاری و بیشینه ویژگی‌های آماری حاصل شود.

در فرایند جراحی بای‌پس عروق کرونر ممکن است به دلیل مواردی مثل عدم دقت اعضای کادر درمانی که شامل: اعضای آزمایشگاهی، بیهوشی، جراحی و مراقبتی هستند، شرایط بیماران به حالت غیر عادی تغییر کند و دارای پیامدهایی باشد. این عدم دقت می‌تواند ناشی از عدم تمرکز لازم، نداشتن دانش کافی و خستگی اعضای کادر درمانی رخ دهد که خطاهای مختلف آزمایشگاهی، دارویی، تکنیکی و مراقبتی را به همراه دارد. با این حال، می‌توان بیان کرد که در فرایند جراحی بای‌پس عروق کرونر، یک انحراف با دلیل ناشی از عوامل انسانی رخ می‌دهد. در مرکز جراحی قلب، نرخ رخداد مربوط به عوامل انسانی سه بار در ماه است. با توجه به اینکه در هر ماه فقط بیست روز جراحی انجام می‌شود و هر روز، هشت ساعت که شامل دو عمل چهار ساعته می‌باشد، در نتیجه، یک انحراف با دلیل ناشی از عوامل انسانی با نرخ 7 برابر با $0/1875$ ساعت رخ داده و زمان بقای بیمار را به میزان 95% کاهش می‌دهد. نمونه‌گیری از بیماران به صورت انجام آزمایشات و اقدامات مورد نیاز برای جمع‌آوری امتیاز پارسونت صورت می‌گیرد. زمانی که صرف تکمیل پرسشنامه پارسونت خواهد شد دارای هزینه است که این هزینه به صورت ساعتی و به تعداد پرسشنامه‌ها برای هر فردی که مسئول جمع‌آوری اطلاعات باشد محاسبه می‌شود که به ازای هر بیمار معادل 840000 ریال است. زمانیکه یک انحراف با دلیل ناشی از عوامل انسانی رخ می‌دهد فرایند جراحی بای‌پس عروق کرونر به حالت خارج از کنترل رفته و بیمارانی که در این حالت تحت عمل جراحی قرار گرفتند هزینه‌هایی شامل هزینه‌های آزمایش، اکوکاردیوگرافی، آنژیوگرافی، مشاوره، جراحی، اتاق عمل، بیهوشی، لوازم مصرفی، داروهای مصرفی، تخت آی‌سی‌یو برای دو شب، خدمات پرستاری و تخت بخش برای هشت شب را به مقدار 21623500 ریال به بیمارستان تحمیل می‌کنند. جزئیات مربوط به هزینه‌های متحمل شده به بیمارستان در شرایط خارج از کنترل به دلیل رخ دادن انحراف با دلیل انسانی در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. جزئیات مربوط به هزینه متحمل شده بر بیمارستان در شرایط خارج از کنترل.

اقدام	هزینه (ریال)	اقدام	هزینه (ریال)
آزمایش	۳۲۴۰۰۰	بیهوشی	۲۱۵۰۰۰
اکوکاردیولوژی	۲۹۵۰۰۰	لوازم مصرفی	۱۰۰۰۰۰
آنژیوگرافی	۳۷۰۰۰۰	داروهای مصرفی	۴۸۵۰۰۰
مشاوره	۳۳۸۱۱۰۰۰	تخت ICU برای دو شب	۵۲۰۰۰
جراحی	۸۰۹۰۰۰	خدمات پرستاری	۱۹۰۴۰۰۰
اتاق عمل	۱۰۱۲۰۰۰۰	تخت بخش برای هشت شب	۴۸۳۰۰۰

علاوه بر این، زمانیکه فرایند جراحی بای پس عروق کرونر به دلیل رخداد عامل انسانی در حالت خارج از کنترل به سر می‌برد، برای پیدا کردن انحراف با دلیل اقداماتی صورت می‌گیرد. بنابراین، به محض اینکه هشدار مربوط به خارج از کنترل بودن صادر شد یک کمیته تخصصی با عنوان **مرییدیتی^{۱۲} یا مرتالییتی^{۱۳}** تشکیل خواهد شد. اگر هشدار خارج از کنترل بودن منجر به نامساعد شدن شرایط بیمار شود، کمیته تخصصی مرییدیتی نام دارد، در غیر اینصورت، اگر منجر به مرگ بیمار شود با عنوان مرتالییتی شکل می‌گیرد. این کمیته‌ها بلافاصله پس از صدور هشدار خارج از کنترل تشکیل خواهد شد و به بررسی کامل پرونده بیمار پرداخته می‌شود. سپس، حاضرین باید درباره موضوعات مربوط به خود توضیحاتی را مطرح نمایند. همچنین، در این کمیته‌ها سامانه سیستم ثبت خطا مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، متوسط زمانی که صرف این اقدامات جهت پیدا کردن انحراف با دلیل انسانی می‌شود چهار ساعت است و پس از کشف علت آن، اصلاح خطای انسانی به طور متوسط دو ساعت زمان نیاز دارد. علاوه بر این، برای پیدا کردن انحراف با دلیل انسانی به طور متوسط هزینه‌ای با مقدار ۱۶۰۰۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است و اصلاح خطاهای انسانی به طور متوسط ۸۰۰۰۰۰۰ ریال هزینه به همراه دارد. لازم به ذکر است که فرایند جراحی در طول جستجو برای پیدا کردن انحراف با دلیل و اصلاح آن ادامه پیدا می‌کند.

در ادامه، با توجه به مقادیر برآورد شده پارامترهای توزیع امتیازهای پارسونت و توزیع مدل AFT ویبول، مطالعات شبیه‌سازی برای محاسبه شاخص‌های آماری به اجرا در آمد. لازم به ذکر است که به منظور حداقل کردن خطاها، شبیه‌سازی ۱۰۰۰۰ بار تکرار شد. برای هر ترکیب از پارامترهای طراحی، بدون در نظر گرفتن تغییری در داده‌ها، ارزش‌های ARL_0 محاسبه شدند و همچنین، برای زمانیکه به سبب وجود انحراف با دلیل انسانی ۹۵٪ کاهش در زمان بقا وجود داشت، ارزش‌های ARL_1 ثبت شدند. به

منظور جلوگیری از نرخ رخدادهای بالای هشدار اشتباهی و دستیابی به قدرت قابل قبول کشف تغییر، حد پایین ARL_0 برابر با ۲۰ و حد بالای ARL_1 برابر با ۵ در نظر گرفته شد. علاوه بر این، حدودی بر روی دو پارامتر طراحی اعمال شدند که شرایط آن در الگوریتم حل شرح داده شد. با این حال، دستیابی به هزینه انتظاری هر واحد زمانی مربوط به استفاده از نمودار کنترل RACUSUM در مرکز جراحی قلب ممکن خواهد شد. در نهایت، به منظور بهینه‌سازی مدل اقتصادی آماری چندهدفه نمودار کنترل RACUSUM و دستیابی به بهترین ترکیب ممکن از پارامترهای طراحی، الگوریتم حل اجرا شد. لازم به ذکر است، تمامی محاسبات تحت برنامه‌های کد شده در محیط **MATLAB** نسخه ۲۰۱۶ تسهیل شدند. پس از اینکه ۱۰۰۰ راه‌حل بالقوه به صورت ترکیب (LCL, v) مشخص شد، با استفاده از محدودیت‌های آماری راه‌حل‌های غیر ممکن کنار گذاشته شدند. سپس، از میان راه‌حل‌های باقیمانده، با استفاده از اصل پارتو ۳۶ راه‌حل به عنوان سطح پارتو یا راه‌حل‌های نامغلوب انتخاب شدند. پس از اینکه راه‌حل‌های نامغلوب مشخص شدند، برای اولویت‌بندی آنها و انتخاب کارترین راه‌حل یا همان پارامترهای طراحی جهت استقرار نمودار کنترل RACUSUM از روش‌های DEA استفاده شد. در DEA، هر ترکیب از پارامترهای طراحی یعنی (LCL, v) ، به عنوان یک واحد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد. چون روش‌های DEA، واحد تصمیم‌گیری را که دارای حداقل مقدار ورودی و بیشینه مقدار خروجی است به عنوان کارا انتخاب می‌کند، در این مطالعه، تابع هزینه به عنوان تنها ورودی و خواص آماری به عنوان دو خروجی در نظر گرفته شدند. سپس، برای مشخص کردن واحدهای تصمیم‌گیری کارا، مدل جمعی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس خروجی‌های بدست آمده از مدل جمعی، هفت واحد تصمیم‌گیری به عنوان ترکیبی از پارامترهای طراحی کارا انتخاب شدند که نتایج آن در جدول ۲ قابل مشاهده است:

جدول ۲. پارامترهای طراحی کارای بدست آمده از مدل جمعی تحلیل پوششی داده‌ها.

توابع هدف			پارامترهای طراحی	
خروجی ۲	خروجی ۱	ورودی	v	LCL
۰/۳۶۰	۲۴/۰۴۱	۱۴۳۸۱۴۹/۵۲	۰/۱۹	-۰/۲۴
۰/۳۶۰	۳۲/۴۷۶	۱۴۳۸۷۳۵/۱۴	۰/۰۹	-۰/۳۱
۰/۳۵۹	۳۶/۵۶۵	۱۴۴۰۷۱۰/۳۹	۰/۰۷	-۰/۲۰
۰/۳۵۰	۴۹/۳۹۱	۱۴۵۷۰۹۸/۴۶	۰/۰۴	-۰/۴۲
۰/۳۳۸	۵۸/۹۴۰	۱۴۸۲۵۲۷/۹۵	۰/۰۲	-۰/۱۴
۰/۳۱۱	۷۵/۷۰۳	۱۵۴۱۴۶۸/۱۸	۰/۰۳	-۰/۳۷
۰/۲۴۷	۱۱۷/۱۵۹	۱۷۲۵۳۶۵/۱۰	۰/۰۱	-۰/۴۹

کارا ترین پارامترهای طراحی نمودار کنترل RACUSUM در مرکز جراحی قلب معرفی می‌کند که با $۱۴۵۷۰۹۸/۴۶$ ریال هزینه انتظاری در واحد زمانی و شاخص‌های آماری $ARL_0 = ۴۹/۳۹۱$ و $ARL_1 = ۲/۸۵۷$ مطلوب‌ترین ملاحظات اقتصادی و آماری را به طسور همزمان برآورده خواهد کرد.

در نهایت، این هفت واحد تصمیم‌گیری برای رتبه‌بندی و تعیین کارا ترین ترکیب، ورودی‌های روش اندازه‌گیری کارایی متقاطع واقع شدند که با استفاده از این روش کارا ترین ترکیب مشخص شد که نتایج آن در شماره جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این جدول، روش اندازه‌گیری کارایی متقاطع پارامترهای طراحی $v = ۰/۰۴$ و $LCL = -۰/۴۲$ را به عنوان

جدول ۳. رتبه‌بندی پارامترهای طراحی کارا با استفاده از روش اندازه‌گیری کارایی متقاطع.

کارایی متقاطع	وزن بازده به مقیاس بهینه T^*	اوزان خروجی بهینه		وزن ورودی بهینه e_1^*	پارامترهای طراحی (LCL, v)
		u_2^*	u_1^*		
۰/۹۶۰۸	-۱۴۲۵۶۶۸/۶۷	۲۹۲۵۹۳/۹۷	۴۰/۴۴۶۲	۱/۰۷	(-۰/۲۴, ۰/۱۹)
۰/۹۷۴۶	-۱۲۰۷۵۹۵/۶۹	۸۱۷۷۶۹/۶۸	۷۰۶/۵۲۴۱	۱/۰۶	(-۰/۳۱, ۰/۰۹)
۰/۹۸۰۰	-۱۵۱۵۷۶۸/۱۰	۱۱۹۷۱۰/۵۸	۱۳۷۴/۳۴	۱/۱۲	(-۰/۲۰, ۰/۰۷)
۰/۹۸۹۰	-۱۸۹۸۵۷۹/۷۵	۱۳۳۹۲۲/۳۵	۳۹۶۱/۵۱	۱/۴۷	(-۰/۴۲, ۰/۰۴)
۰/۹۸۵۶	-۱۸۹۶۳۴۲/۲۳	۱۲۱۳۴۵/۰۹	۵۵۴۳/۳۳	۱/۵۳	(-۰/۱۴, ۰/۰۳)
۰/۹۷۰۱	-۱۸۴۹۶۳۴/۴۰	۶۲۴۴۴/۰۹	۵۶۲۱/۹۴	۱/۴۹	(-۰/۳۷, ۰/۰۳)
۰/۹۸۶۰	-۱۵۰۲۵۳۴/۴۰	۵۵۵۱۵۰/۸۸	۷۲۹۰/۷۴	۱/۴۵	(-۰/۴۹, ۰/۰۱)

خالص اقتصادی که فقط تابع هزینه را در نظر می‌گیرد انجام گرفت. پارامترهای بهینه طراحی اقتصادی آماری چندهدفه و طراحی خالص اقتصادی در جدول ۴ نشان داده شده است:

۲.۴. مقایسه طراحی چندهدفه نمودار کنترل RACUSUM با طراحی خالص اقتصادی آن به منظور تایید اثربخشی مدل طراحی اقتصادی آماری چندهدفه پیشنهادی در این مقاله، یک مقایسه بین این مدل و طراحی

جدول ۴. مقایسه طراحی چندهدفه و طراحی خالص اقتصادی نمودار کنترل RACUSUM.

ARL_1	ARL_0	E_A	(LCL, v)	طراحی
۲/۸۵۷	۴۹/۳۹۱	۱۴۵۷۰۹۸/۴۶	(-۰/۴۲, ۰/۰۴)	طراحی چندهدفه
۲/۷۷۹	۲۴/۰۴۱	۱۴۳۸۱۴۹/۵۲	(-۰/۲۴, ۰/۱۹)	طراحی اقتصادی خالص

با تمرکز بر اطلاعات داخل جدول ۴ مشخص است که هزینه انتظاری هر واحد زمانی طراحی اقتصادی آماری چندهدفه با مقدار $1457098/46$ ریال، در مقایسه با هزینه انتظاری هر واحد زمانی طراحی خالص اقتصادی با مقدار $1438149/52$ ریال، به میزان $1/3$ افزایش یافته است. با این حال، این افزایش در هزینه باعث می‌شود که ARL_0 طراحی اقتصادی آماری چندهدفه با مقدار $49/391$ در مقایسه با ARL_0 طراحی خالص اقتصادی با مقدار $24/041$ ، به میزان تقریباً 100% افزایش یابد. همچنین، در این شرایط بین ARL_1 برای هر دو نوع طراحی تفاوت چشم‌گیری وجود ندارد. نتیجه این مقایسه نشان می‌دهد که با افزایش نسبتاً کمی در هزینه انتظاری هر واحد زمانی، ARL_0 به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. این امر بدان معناست که با استفاده از طراحی اقتصادی آماری چندهدفه می‌توان با افزایش کمی در هزینه انتظاری هر واحد زمانی، عملکرد آماری نمودار کنترل RACUSUM در حضور یک انحراف با دلیل را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داد.

شایان ذکر است در صورتیکه در مرکز جراحی به طراحی چندهدفه و طراحی خالص اقتصادی نمودار کنترل توجه‌ای نشود و حالتی در نظر گرفته شود که بدون طراحی نمودار، پارامترهایی با مقادیر $v = 0/17$ و $LCL = -0/02$ انتخاب شوند، هزینه انتظاری هر واحد زمانی برابر با $1595689/93$ ریال و شاخص‌های آماری $ARL_0 = 23/528$ و $ARL_1 = 2/893$ خواهد بود. از اینرو، مشخص است که طراحی چندهدفه در مقایسه با این حالت، کاهش $8/9\%$ در هزینه انتظاری، افزایش 100% در ARL_0 و کاهش $1/2\%$ در ARL_1 را نشان می‌دهد. همچنین، مقایسه طراحی خالص اقتصادی با این حالت، کاهش $9/9\%$ در هزینه انتظاری، افزایش $2/2\%$ در ARL_0 و کاهش $3/9\%$ در ARL_1 را به همراه دارد.

این مقاله، تعیین پارامترهای نمودار کنترل RACUSUM بود به گونه‌ای که خواص اقتصادی و آماری را به طور همزمان برآورده کند. با توجه به ثابت بودن اندازه نمونه و فاصله نمونه‌گیری، پارامترهای طراحی (LCL, v) به گونه‌ای تعیین شدند که بهترین مبادله متعادل ممکن بین سه هدف اقتصادی و آماری مدل اتفاق بیفتد. برای مشخص شدن پارامترهای طراحی بهینه از یک الگوریتم حل چندمرحله‌ای بر اساس اصل بهینه‌سازی پارتو و روش‌های DEA استفاده گشت. در DEA هر ترکیب از پارامترها به عنوان یک واحد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد و ترکیب بهینه پارامترهای مدل چندهدفه با اندازه‌گیری کارایی متقاطع مشخص گردید. در نهایت، کاربرد رویکرد پیشنهادی از طریق یک مطالعه موردی در مرکز جراحی قلب نشان داده شد و سپس طراحی چندهدفه با طراحی خالص اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج نشان داد طراحی چندهدفه با افزایش کمی در مقدار هزینه، عملکرد آماری بهتری را دارد. در کل، رویکرد پیشنهادی در طراحی نمودار کنترل RACUSUM می‌تواند به طور موثر به منظور کشف تغییرات کاهشی در مدت زمان بقای بیماران مورد استفاده قرار گیرد.

در این مقاله به دلیل گسسته بودن فضای مسئله از رویکردی گسسته برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است که در صورت افزایش ابعاد و پیوسته شدن فضا، این رویکرد ناکارآمد خواهد بود و به عنوان پیشنهادی برای تحقیقات آتی می‌توان از روش‌های فراابتکاری توسعه یافته مانند الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده کرد. همچنین، طراحی اقتصادی آماری دیگر نمودارهای کنترل تعدیل ریسک شده مانند نمودار میانگین متحرک موزون نمایی می‌تواند گسترش داده شود.

تقدیر و تشکر

نویسنده اول مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از حمایت‌های حوزه معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی‌درمانی کرمانشاه اعلام می‌دارد.

پانوشت‌ها

1. Cumulative Sum
2. Risk-adjusted Cumulative Sum
3. In-control Average Run Length
4. Out-of-control Average Run Length
5. Pareto Principle
6. Data Envelopment Analysis
7. Accelerated Failure Time Model
8. Pareto front
9. Charnes, Cooper & Rhodes

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل طراحی چندهدفه نمودار کنترل RACUSUM برای پایش خروجی‌ها در سیستم‌های سلامت پیشنهاد شد. این مدل، تحت تاثیر یک انحراف با دلیل قرار داشت که ناشی از خطاهای انسانی بوده و باعث ایجاد تغییرات کاهشی در زمان بقای بیماران می‌شد. از اینرو، نمودار کنترل طراحی شده یک نمودار یک‌طرفه است که برای کشف تغییرات کاهشی در میانگین زمان بقای بیماران مورد توجه قرار گرفت. همچنین، در این نمودار برای تعدیل ریسک و غلبه بر مسئله ناهمگونی میان بیماران از مدل AFT ویبول استفاده شد که ارتباط بین ریسک‌های قبل از عمل بر روی زمان بقای هر بیمار را مشخص می‌کرد. هدف اصلی

risk-adjusted Bernoulli CUSUM chart to monitor surgical outcome quality”, *Int. J. Qual. Health. C.*, 29 (3), pp. 343-348 (2017).

[13]. Tzeng, G.H. and Huang, J.J. “Fuzzy multiple objective decision making”. CRC Press (2013).

[14]. Liu, H.H., Song, Y.Y. and Yang, G.L. “Cross-efficiency evaluation in data envelopment analysis based on prospect theory”, *Eur. J. Oper. Res.*, 273 (1), pp. 364-375 (2019).

[15]. Chowdhury, H. and Zelenyuk, V. “Performance of hospital services in Ontario: DEA with truncated regression approach”, *Omega*, 63, pp. 111-122 (2016).

[16]. Omrani, H., Keshavarz, M. and Ghaderi, S.F. “Evaluation of supply chain of a shipping company in Iran by a fuzzy relational network data envelopment analysis model”, *Sci. Iran.*, 25 (2), pp. 868-890 (2018).

[17]. Sego, L.H., Reynolds, M.R. and Woodall, W.H. Risk-adjusted monitoring of survival times’, *Stat. Med.*, 28 (9), pp. 1386-1401 (2009).

[18]. Asadzadeh, S. and Baghaei, A. “Robust AFT-based monitoring procedures for reliability data”, *Qual. Technol. Quant. M.*, 17 (1), pp. 1-15 (2020).

[19]. Asadzadeh, S. and Aghaie, A. “Improving the product reliability in multistage manufacturing and service operations”, *Qual. Reliab. Eng. Int.*, 28 (4), pp. 397-407 (2012).

[20]. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm”, *IEEE. T. Evolut. Comput.*, 6 (2), pp. 182-197 (2002).

[21]. Noghin, V.D. “Reduction of the Pareto Set. An Axiomatic Approach”. Springer Int. Publishing AG (2018).

[22]. Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. “Measuring the efficiency of decision making units”, *Eur. J. Oper. Res.*, 2 (6), pp. 429-444 (1978).

[23]. Bernstein, A.D. and Parsonnet, V. “Bedside Estimation of Risk as an Aid for Decision-Making in Cardiac Surgery”, *Ann. Thorac. Surg.*, 69 (3), pp. 823-828 (2000).

10. Banker, Charnes & Cooper

11. Coronary Artery Bypass Grafting

12. Morbidity

13. Mortality

(References) منابع

[1]. Woodall, W.H., Fogel, S.L. and Steiner, S.H. “The monitoring and improvement of surgical-outcome quality”, *J. Qual. Technol.*, 47 (4), pp. 383-399 (2015).

[2]. Duncan, A.J. “The economic design of \bar{X} charts used to maintain current control of a process”, *J. Am. Stat. Assoc.*, 51 (274), pp. 228-242 (1956).

[3]. Lorenzen, T.J. and Vance, L.C. “The economic design of control charts: a unified approach”, *Technometrics*, 28 (1), pp. 3-10 (1986).

[4]. Jiao, J.R. and Helo, P.T. “Optimization design of a CUSUM control chart based on Taguchi’s loss function”, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 35 (11-12), pp. 1234-1243 (2008).

[5]. Lee, M.H. “Economic Design of Cumulative Sum Control Charts for Monitoring a Process with Correlated Samples”, *Commun. Stat-Simul. C.*, 39 (10), pp. 1909-1922 (2010).

[6]. Celano, G., Castagliola, P. and Trovato, E. “The economic performance of a CUSUM t control chart for monitoring short production runs”, *Qual. Technol. Quant. M.*, 9 (4), pp. 329-354 (2012).

[7]. Saniga, E.M. “Economic statistical control chart designs with an application to \bar{X} and R charts”, *Technometrics.*, 31 (3), pp. 313-320 (1989).

[8]. Asadzadeh, S. and Khoshalhan, F. “Multiple-objective design of an \bar{X} control chart with multiple assignable causes”, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 43 (3-4), pp. 312-322 (2009).

[9]. Niaki, S.T.A., Malaki, M. and Ershadi, M.J. “A particle swarm optimization approach on economic and economic-statistical designs of MEWMA control charts”, *Sci. Iran.*, 18 (6), pp. 1529-1536 (2011).

[10]. Rasmussen, T.B., Ulrichsen, S.P. and Nørgaard, M. “Use of risk-adjusted CUSUM charts to monitor 30-day mortality in Danish hospital”, *J. Clin. Epidemiol.*, 10, pp. 445-456 (2018).

[11]. Harris J.R., Forbes, T.L., Steiner, S.H., Lawlor, D.K., DeRose, G. and Harris K.A. “Risk-adjusted analysis of early mortality after ruptured abdominal aortic aneurysm repair”, *J. Vasc. Surg.*, 42 (3), pp. 387-391 (2005).

[12]. Keefe, M.J., Loda, J.B., Elhabashy, A.E. and Woodall, W.H. “Improved implementation of the

بیوست

(الف). در این قسمت نحوه تبدیل رابطه (۹) به رابطه (۱۰) نشان

داده شده است:

$$\begin{aligned}
W_i &= \log \frac{\left[\frac{\kappa}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^{\kappa-1} \exp\left(-\left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{\delta_i} \left[\exp\left(-\left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{1-\delta_i}}{\left[\frac{\kappa}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^{\kappa-1} \exp\left(-\left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{\delta_i} \left[\exp\left(-\left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right]^{1-\delta_i}} \\
&= \delta_i \log \left[\frac{\kappa}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^{\kappa-1} \exp\left(-\left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right] - (1-\delta_i) \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&\quad - \delta_i \log \left[\frac{\kappa}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^{\kappa-1} \exp\left(-\left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)}\right)^\kappa\right) \right] + (1-\delta_i) \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&= \delta_i \log \left(\frac{\kappa}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right) + (\kappa-1)\delta_i \log \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right) - \delta_i \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa - \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa + \delta_i \left(\frac{z_i}{v\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&\quad - \delta_i \log \left(\frac{\kappa}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right) - (\kappa-1)\delta_i \log \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right) + \delta_i \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa + \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa - \delta_i \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&= \delta_i \log \kappa - \delta_i \log v\eta \exp(\beta_1 x_i) + (\kappa-1)\delta_i \log z_i - (\kappa-1)\delta_i \log v\eta \exp(\beta_1 x_i) - \frac{1}{v^\kappa} \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&\quad - \delta_i \log \kappa + \delta_i \log \eta \exp(\beta_1 x_i) - (\kappa-1)\delta_i \log z_i + (\kappa-1)\delta_i \log \eta \exp(\beta_1 x_i) + \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&= -\delta_i \log v\eta \exp(\beta_1 x_i) - (\kappa-1)\delta_i \log v\eta \exp(\beta_1 x_i) - v^{-\kappa} \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&\quad + \delta_i \log \eta \exp(\beta_1 x_i) + (\kappa-1)\delta_i \log \eta \exp(\beta_1 x_i) + \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa \\
&= -\delta_i \log v - \delta_i \log \eta - \delta_i(\beta_1 x_i) - (\kappa-1)\delta_i \log v - (\kappa-1)\delta_i \log \eta - (\kappa-1)\delta_i(\beta_1 x_i) \\
&\quad + \delta_i \log \eta + \delta_i(\beta_1 x_i) + (\kappa-1)\delta_i \log \eta + (\kappa-1)\delta_i(\beta_1 x_i) + \left[\left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa (1-v^{-\kappa}) \right] \\
&= -\delta_i \log v - (\kappa-1)\delta_i \log v + \left[\left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa (1-v^{-\kappa}) \right] \\
&= [(1-v^{-\kappa}) \left(\frac{z_i}{\eta \exp(\beta_1 x_i)} \right)^\kappa] - \delta_i \kappa \log v
\end{aligned}$$

انتظاری یا متوسط برای مشاهده آن در این فاصله برابر خواهد بود با:

$$\tau = \frac{\int_{ih}^{(i+1)h} e^{-\lambda\psi} \lambda(\psi - ih) d\psi}{\int_{ih}^{(i+1)h} e^{-\lambda\psi} \lambda d\psi} = \frac{1 - (1 + \lambda h) e^{-\lambda h}}{\lambda(1 - e^{-\lambda h})}$$

(ب). با فرض اینکه فرایند در حالت تحت کنترل شروع بکار می-کند، مدت زمانی که فرایند تحت کنترل باقی می ماند یک متغیر تصادفی نمایی با میانگین $1/\lambda$ ساعت خواهد بود. بنابراین، اگر انحراف با دلیل بین نمونه های i و $i+1$ ظاهر گردد آنگاه زمان

The Economic-statistical Design of a Control Chart for Monitoring Patients' Survival Time

Navid Rafiei (PhD Candidate)

Shervin Asadzadeh* (Assistant Professor)

Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Seyed Taghi Akhavan Niaki (Professor)

Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In recent years, the development of control charts has attracted the attention of researchers in healthcare systems. The purpose of this paper is to design a risk-adjusted cumulative sum (CUSUM) control chart to monitor the survival time of patients after performing a surgical operation. In this control chart, risk adjustment is conducted to consider the impact of each patient's preoperative risks on survival times. It should be noted that the Parsonnet score has been calculated and recorded for each patient before undergoing a surgical operation. Moreover, a class of survival analysis regression models called accelerated failure time models has been employed for risk-adjustment. However, the implementation of the RACUSUM control chart requires determining the design parameters such as the lower control limit and coefficient for optimal design of CUSUM control chart. These parameters should be selected in an optimal way putting the desired statistical and economic considerations into service. To this end, a multi-objective model, including three objectives of cost, the in-control ARL and the inverse of out-of-control ARL, has been proposed and the model is solved with the help of a multi-stage algorithm based on the data envelopment analysis (DEA) method. Then, to show the performance of the proposed procedure, a real case study has been considered in the cardiac surgery center in Iran. Doing so, a special kind of operation called coronary artery bypass grafting (CABG) surgery was selected, and the information associated with 100 patients was collected over time. Finally, a comparison has been made between the multi-objective design model and a pure economic design model. The results clearly reveal that with a relatively small increase in the cost function, the multi-objective design of the RACUSUM chart has better statistical performance. Therefore, it is advisable to implement the proposed multi-objective model to design the risk-adjusted CUSUM control chart in healthcare systems.

Keywords: Cumulative sum control chart, Risk adjustment, Accelerate failure time model, Economic-statistical design, Data envelopment analysis.

* Corresponding Author: sh_asadzadeh@iau-tnb.ac.ir