

طراحی استوار اقتصادی- آماری نمودار کنترلی (مطالعه موردی در صنعت خودرو)

عبدالستار صفایی^۱، رضا برادران کاظمزاده^{۲*} و محمد اقدسی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی بابل

^۲ دانشیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۹۱/۵/۷ - تاریخ دریافت اصلاح شده ۹۳/۲/۲۰ - تاریخ تصویب ۹۳/۴/۲۲)

چکیده

از مشکلات مهم طرح‌های رویکردهای سنتی طراحی اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی ناکارآمدی در مواجهه با عدم قطعیت است. عدم قطعیت در پارامترهای مدل‌های اقتصادی- آماری ممکن است به عدم موفقیت در شناسایی سریع تغییرات در فرایند و تحمیل هزینه‌های بیشتر به سازمان منجر شود. طرح پایش فرایند ماشین‌کاری در صنعت خودروسازی ضرورت توجه به رویکرد استوار نمودارهای کنترلی را بیشتر تبیین کرده است. تحقیق حاضر، طراحی نمودارهای کنترلی را، برای پایش مشخصه‌های کیفی فرایند، در شرایط عدم قطعیت، در پارامترهای هزینه و فرایند در نظر دارد. طرح استوار پیشنهادی تضمین می‌کند که نمودار کنترلی هشدار تغییرات در فرایند را، با وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل، همواره در زمانی کمتر از مقدار تعیین شده از سوی کاربر اعلام کند. جواب بهینه استوار به دست آمده، علاوه بر اینکه کارایی جواب را در همه تحققاتی که ممکن است از بازه پارامترهای مدل ضمانت می‌کند، تسهیل کننده اجرای عملی نمودارهای کنترلی است و از طریق ارتقای کیفیت خروجی‌های فرایند سبب کاهش هزینه‌های سازمان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی استوار، طراحی اقتصادی- آماری، کنترل فرایند آماری.

مقدمه

فرایندهای مختلف از طریق دو رویکرد عمده آماری و اقتصادی توجه کرده‌اند. در رویکرد آماری فقط به مشخصه‌های آماری فرایند توجه می‌شود [۲]. طراحی اقتصادی نمودارهای کنترل به هزینه‌های پایش فرایند نیز توجه می‌کند. ترکیب دو رویکرد فوق طراحی اقتصادی- آماری نمودارهای کنترل نامیده می‌شود که در کنار بررسی هزینه‌های پایش فرایند بر بهبود مشخصه‌های آماری نیز تمرکز می‌کند. در این زمینه تحقیقات بسیاری صورت گرفته است که از آن‌ها می‌توان به تحقیقات ۳- ۷ اشاره کرد.

تحقیق حاضر به طراحی نمودارهای کنترلی برای پایش مشخصه‌های کیفی فرایند در شرایط کمبود اطلاعات و عدم قطعیت در پارامترهای هزینه و فرایند پرداخته است. بنابراین طرح‌های اقتصادی- آماری نمودار کنترل برای مواجهه با عدم قطعیت با نمایش

تغییرپذیری جزء لاینفک همه فرایندهای تولیدی و خدماتی است. تغییرپذیری ممکن است از عوامل متعدد ناشی شود. گاهی تغییرات ناچیز است و موجب نارضایتی مشتری نمی‌شود. اما گاهی تغییرات محصولات نهایی نارضایتی مشتری را به دنبال می‌آورد. حذف کامل تغییرات، در فرایند تولید، امکان‌پذیر یا به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. ولی تغییرپذیری فرایندها باید در محدوده‌ای پذیرفتنی پایش و کنترل شود. از این رو، بنگاه‌های اقتصادی ناگزیر به طراحی و تثبیت یک سیستم کنترلی مناسب، به منظور شناسایی تغییرات غیر قابل قبول و حذف عوامل آن‌ها در فرایندها، هستند. نمودار کنترل مهم‌ترین و قدرتمندترین ابزار کنترل فرایند آماری برای کاهش پراکندگی و در نتیجه بهبود کیفیت است [۱].
محققان همواره به طراحی نموداری متناسب با

حداقل‌سازی مدل اقتصادی متناسب با آن مجموعه پارامترها می‌پردازد، صحیح نیست. زیرا، به‌ازای مجموعه جواب‌های مختلف برای نمودار کنترلی، سناریوهای جداگانه‌ای ممکن است به منزله سناریوی منجر به ماکزیمم ریسک گزارش شوند. جست‌وجوی این سناریو باید هم‌زمان با ترکیبات مختلف جواب‌ها باشد و جوابی که منجر به مینیمم ماکزیمم ریسک می‌شود انتخاب شود.

از اشکالاتی که در تحقیقات پیشین در زمینه بهینه‌سازی استوار اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی وجود دارد انعطاف‌پذیر نبودن آن‌هاست. در رویکرد استوار، برخلاف رویکرد سنتی، طرح بهینه نمودار کنترل برای مقابله با بدترین سناریوی ممکن پیشنهاد می‌شود. این موضوع می‌تواند به جوابی محافظه‌کارانه^۲ منجر شود که هزینه بیشتری طلب می‌کند.

در این تحقیق، برای اجتناب از محافظه‌کاری زیاد، از رویکرد پیشنهادی برتسیماس و سیم [۱۳] استفاده شد. مفهوم بودجه عدم قطعیت^۳، که سطحی از انعطاف‌پذیری را در انتخاب موازنه^۴ بین استواری و عملکرد^۵ به طراح ارائه می‌کند، در پژوهش‌های متعدد در مجموعه‌های عدم قطعیت متفاوت استفاده شده است [۱۴]. این مفهوم ترجیح‌های تصمیم‌گیرنده را در زمینه ریسک با انتخاب مجموعه عدم قطعیت برای داده‌های در دسترس در نظر می‌گیرد و برای ساخت مجموعه عدم قطعیت از داده‌های عینیت‌یافته تاریخی خطوط راهنمایی ارائه می‌کند.

بنابراین، ابتدا ضرورت پایش استوار فرایند تبیین و مدل استوار اقتصادی- آماری با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های مرتبط با پایش فرایند توسعه داده شد. سپس، مدل هم‌تای استوار اقتصادی- آماری برای رویکردهای استوار معرفی شد. در بخش چهارم، روش حل مدل هم‌تای استوار توسعه داده شد. در ادامه، برای کاهش عملیات محاسباتی، فضای عدم قطعیت کاهش داده شد. بخش ششم تحلیل عددی نتایج مدل استوار را از طریق بررسی نمونه موردی در صنعت خودروسازی نشان می‌دهد. در پایان نتیجه‌گیری تحقیق ارائه می‌شود.

سناریوهایی از مجموعه پارامترهای نادقیق با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار پیشنهاد می‌شود. هنگامی که برای پارامترهای مدل مقادیری متفاوت از مقدار اسمی^۱ آن‌ها عینیت یابد، ممکن است پاسخ گزارش‌شده، با توجه به مجموعه پارامترهای جدید، عملکرد خوبی نداشته باشد. از این رو، ضرورت طراحی استوار اقتصادی- آماری نمودارهای کنترل احساس می‌شود.

امکان‌پذیر نبودن تخمین دقیق پارامترهای هزینه و فرایند در مدل هزینه‌ای طرح اقتصادی- آماری و احتمال وقوع چندین سناریو برای علت بادلیل و آثار متقابلی که تغییر هر یک از پارامترها بر دیگری دارد لزوم توجه به رویکرد استوار طرح‌های اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی را روشن می‌کند. مورتارینو [۸] توصیه کرده است، ضمن بررسی اثر هر یک از پارامترهای مدل اقتصادی، هنگامی که عدم قطعیت در پارامترهای مدل قابل چشم‌پوشی نیست، از رویکرد استوار اقتصادی- آماری استفاده شود.

رویکرد استوار اقتصادی- آماری به دنبال حداقل‌سازی زیان ناشی از انحراف مدل از فرض‌های پایه‌ای است. پینیاتیلو و تسای [۹] برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده از آرایه‌های متعامد تاگوچی L27 را پیشنهاد کردند. لیندرمن و چوو [۱۰]، برای استوارسازی نمودارهای کنترل، سناریوهای گسسته از فرایند را در نظر گرفتند. از نظر این محققان، هنگامی که بیشتر از یک سناریو وجود دارد، نمودار کنترل نباید برای سناریویی خاص طراحی شود. طراحی نمودار کنترل برای سناریویی خاص، زمانی که سناریوی دیگری محقق شود، ممکن است به صرف هزینه بالاتر منجر شود. وممی و استلا [۱۱] آماره‌ای را که امید ریاضی موزون سناریوهای مختلف است برای مواجهه با چند سناریوی محدود پیشنهاد کردند. آن‌ها [۱۲] در تحقیقی دیگر به حداقل‌سازی ریسک عدم اطلاع از پارامترهای واقعی پرداختند. روش پیشنهادی ایشان ریسک طرح را مینیمم می‌کند و برای مقادیر پارامترهای واقعی استوار است. این رویکرد، از آنجا که ابتدا مجموعه پارامترهایی را که به ماکزیمم ریسک منجر می‌شوند شناسایی می‌کند و پس از آن به

ضرورت پایش استوار فرایند

پیشرفت صنعتی کشورها در بخش‌های مختلف، از جمله در صنعت خودروسازی، بسیار چشمگیر و به لحاظ رقابتی مهم است. برای رسیدن به سیری صعودی، در چشم‌اندازی مشخص، بهینه‌سازی به منظور دستیابی به بالاترین راندمان با کمترین درصد خطا و ضایعات ضروری است. همچنین، در همهٔ مراحل تولید و مونتاژ، از جمله ماشین‌کاری و ریخته‌گری، بهبود کیفیت و افزایش بهره‌وری سرلوحهٔ کار تولیدکنندگان است. تضمین ایمنی و سلامت جهت رفاه مشتریان در صنعت خودروسازی بسیار ضروری است. کیفیت قطعات سیستم تعلیق خودرو بر ایمنی سرنشینان خودرو به صورت مستقیم تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، پایش یکی از مشخصه‌های کلیدی در فرایند تولید قطعهٔ تویی پژو ۲۰۶ با استفاده از طرح استوار اقتصادی- آماری نمودار کنترلی \bar{x} بررسی شد.

این محصول از پردازش قطعهٔ خام از نوع فولاد فورج‌کاری شده پس از طی نه مرحله ماشین‌کاری تولید می‌شود. مشخصه‌های مهندسی این محصول با ابزارآلات دقیق و با روند کیفی دقیقی کنترل می‌شود. کنترل این محصول در کارخانه در سه مرحله صورت می‌گیرد. پس از تولید، نمایندهٔ مشتری آن را بازرسی می‌کند. مشخصهٔ کیفی انتخابی قطر بلبرینگ 37.017 میلی‌متر حاصل از ماشین‌کاری مرحلهٔ پنجم است. اپراتور مشخصه‌های مهندسی قطعه را در مرحلهٔ تولیدی بازرسی می‌کند. در هر ساعت اپراتور پنج قطعه را نمونه‌گیری و در فرم‌های مربوطه ثبت می‌کند. ضریب کنترلی سه انحراف معیار در طرح پایش موجود برای این مشخصهٔ کیفی استفاده می‌شود.

جدول ۱. مقادیر معیارهای آماری طرح پایش فرایند

موجود ($ATS_0 = 37.040$ ساعت)

δ^s	ATS_1 (ساعت)
۱	۴,۵۰
۱,۵	۱,۵۷
۲	۱,۰۸
۲,۵	۱
۳	۱

از آنجا که انحراف بادلیل در فرایند ممکن است به میزان شیفت از میانگین (δ^s) به ۱ تا ۳ انحراف معیار منجر شود، برای تبیین ضرورت توجه به طرح استوار اقتصادی- آماری، معیارهای آماری متنظر با پنج سناریوی شیفت از میانگین، در جدول ۱، ارائه شد. بر اساس جدول ۱، متوسط زمان هشدار اشتباهی (ATS_0) برابر 37.040 ساعت است و از آنجا که معیار آماری متوسط زمان هشدار خارج از کنترل (ATS_1) در تناسب با اندازهٔ شیفت از میانگین است، بین ۱ تا 4.5 ساعت می‌تواند باشد.

با اجرای این طرح، تضمینی وجود ندارد که نمودار کنترلی حالت خارج از کنترل را در زمان مناسب هشدار دهد. بنابراین، متوسط زمان هشدار نمودار در طرح پیشنهادی باید به‌زای همهٔ حالت‌های ممکن، از بازه برآورد شود. در ادامه، پایش فرایند با استفاده از خروجی‌های مدل استوار پیشنهاد می‌شود که به کاربران اطمینان می‌دهد هشدار خارج از کنترل را در زمان کمتر از ATS_{max} ، با وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل، دریافت کنند. در طرح استوار پیشنهادی، ATS_{max} معادل یک ساعت (60 دقیقه) است.

مدل پیشنهادی پایش فرایند

در طراحی استوار، فرض بر این است که پارامترهای دارای عدم قطعیت به مجموعه‌ای محدود^۲ تعلق دارند و برای سایر پارامترها مقادیر اسمی (تخمین نقطه‌ای) متصور است. از مجموعهٔ عدم قطعیت سناریوهایی ممکن $s \in S$ ، که نشان‌دهندهٔ مقادیر محتمل برای عینیت پارامترهای مدل است، ایجاد می‌شود. هر سناریوی s به دو مجموعهٔ پارامترهای هزینه $C^s = \{C_0^s, C_1^s, a_1^s, a_2^s, a_3^s, a_4^s\}$ و فرایند $P^s = \{\lambda^s, \delta^s, E^s, T_0^s, T_1^s, T_2^s, \gamma_1^s, \gamma_2^s\}$ قابل تفکیک است. مدل پیشنهادی مسئله در ادامه می‌آید.

توسعهٔ مدل ریاضی

برای پایش میانگین یک مشخصهٔ کیفی در یک نمودار کنترلی \bar{x} سه پارامتر اساسی باید انتخاب شود؛ اندازهٔ نمونه (n)، فاصلهٔ زمانی نمونه‌گیری (h)، ضریب حدود

$$E(T, s) = 1/\lambda^s + 2\Phi(-L_{\bar{X}})(1-\gamma_1)T_0^s/\lambda^s h + \quad (1)$$

$$h/[1-\Phi(L_{\bar{X}}-\delta^s\sqrt{n})+\Phi(-L_{\bar{X}}-\delta^s\sqrt{n})]$$

$$+\lambda^s h^2/12-h/2+nE^s+T_1^s+T_2^s$$

$$E(C, s) = C_0^s/\lambda^s + C_1^s\{h/[1-\Phi(L_{\bar{X}}-\delta^s\sqrt{n})+\Phi(-L_{\bar{X}}-\delta^s\sqrt{n})] + \lambda^s h^2/12-h/2+nE^s+\gamma_1 T_1^s+\gamma_2 T_2^s\} + [(a_1^s+a_2^s n)] \quad (2)$$

$$\times \{1/\lambda^s+h/[1-\Phi(L_{\bar{X}}-\delta^s\sqrt{n})+\Phi(-L_{\bar{X}}-\delta^s\sqrt{n})]\}$$

$$+\lambda^s h^2/12-h/2+nE^s+\gamma_1 T_1^s+\gamma_2 T_2^s+a_3^s$$

$$+2a_4^s\Phi(-L_{\bar{X}})/\lambda^s h$$

$$E(x, s) = E(C, s) \div E(T, s) \quad (3)$$

در این تحقیق، جواب مسئله طراحی اقتصادی نمودار کنترلی از طریق بهینه‌سازی هم‌تای استوار آن حاصل می‌شود.

هم‌تای استوار مسئله طراحی اقتصادی-آماري

عدم قطعیت بدین معنی است که پارامترهای مدل در زمان تعیین جواب‌ها دقیقاً مشخص نیست؛ ولی مجموعه عدم قطعیت (نمایش بازه‌ای) از مقادیر محتمل پارامترها قابل تعیین است. در این دست مسائل بهینه‌سازی، تصمیم‌گیرنده تا هنگامی که پارامترهای واقعی در مجموعه عدم قطعیت هستند مسئول نتیجه تصمیم‌های خود است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل ریاضی، بن تال و همکاران [۱۴] مدلی عمومی برای بهینه‌سازی استوار ارائه کردند. مدل هم‌تای استوار مسئله طراحی اقتصادی-آماري نمودارهای کنترلی به صورت رابطه ۴ قابل ارائه است. برای اجتناب از افزایش تعداد محدودیت‌ها و هم‌سو کردن تابع هدف با محدودیت‌ها، این مسئله به صورت مجموعه گسسته‌ای از سناریوها مدل شده است.

(۴)

$$\min_{x \in X} \max_{s \in S} E(x, s)$$

Subject to

$$nE^s \leq h \quad \forall s \in S$$

$$ATS_0^s \geq ATS_{\min} \quad \forall s \in S$$

$$ATS_1^s \leq ATS_{\max} \quad \forall s \in S$$

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$$

$$L_{\min} \leq L_{\bar{X}} \leq L_{\max}$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$$

$$n \in Z^+$$

محدودیت‌های در نظر گرفته شده در مدل در ادامه

می‌آید. گفتنی است این محدودیت‌ها به صورت سخت^۷

کنترل (k). پارامترهای مدل تحت سناریوی s به شرح ذیل است:

C₀^s هزینه تولید محصول معیوب در شرایطی که فرایند تحت کنترل است؛

C₁^s هزینه تولید محصول معیوب در شرایطی که فرایند خارج از کنترل است؛

a₁^s هزینه ثابت نمونه‌گیری؛

a₂^s هزینه متغیر هر واحد نمونه‌گیری؛

a₃^s هزینه یافتن یک انحراف بادلیل؛

a₄^s هزینه هر بار هشدار اشتباهی؛

λ^s نرخ شکست فرایند؛

δ^s میزان شیفیت از میانگین فرایند؛

E^s مدت زمان اخذ واحد نمونه و تفسیر نتایج؛

T₀^s متوسط زمان جست‌وجو برای هشدار اشتباهی؛

T₁^s متوسط زمان جست‌وجو برای شناسایی انحراف بادلیل؛

T₂^s متوسط زمان مورد نیاز جهت اصلاح فرایند؛

γ₁ برابر ۱ اگر فرایند در طول جست‌وجو ادامه داشته باشد و برابر ۰ اگر فرایند در طول جست‌وجو متوقف شود؛

γ₂ برابر ۱ اگر فرایند در طول تعمیر ادامه داشته باشد و برابر ۰ اگر فرایند در طول تعمیر متوقف شود.

هزینه انتظاری پایش فرایند در هر ساعت از تقسیم

هزینه هر سیکل کیفی بر مدت زمان انتظاری یک

سیکل کیفی حاصل می‌شود. زمان انتظاری سیکل

کیفی برای سناریوی s از یک حالت تحت کنترل و به

دنبال آن یک حالت خارج از کنترل تشکیل می‌شود.

زمان انتظاری سیکل کیفی برای سناریوی s به صورت

رابطه ۱ قابل بیان است. در رابطه ۱، Φ(.) تابع توزیع

تجمعی نرمال استاندارد است. هزینه هر سیکل کیفی

تحت سناریوی s به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود.

مقدار هزینه هر سیستم کیفی تحت سناریوی s در هر

ساعت، E(x, s)، طبق رابطه ۳ حاصل می‌شود. این تابع

هزینه به تابع هزینه لورنس و وانس مشهور است [۱۵].

$\Gamma \in (0, m)$ باشد، تصمیم‌گیرنده بین عملکرد و درجهٔ محافظه‌کاری جواب‌ها موازنه برقرار می‌کند.

اغلب مدل‌های توسعه‌داده‌شده به مدل‌های خطی برای پارامترهای دارای عدم قطعیت پرداخته‌اند. در حالت‌های خاص غیر خطی، همچون برنامه‌ریزی کوادراتیک، نیز تحقیقات اندکی صورت گرفته است [۱۶]. با توجه به اینکه مسئله طراحی اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی از مسائل بهینه‌سازی غیر خطی است، رویکرد اشاره‌شده در زمینه استفاده از مفهوم بودجه عدم قطعیت به صورت مستقیم قابل به‌کارگیری نیست. از این رو، بر پایهٔ مفاهیم بهینه‌سازی استوار انطباق‌پذیر^۱، به منظور در نظرگیری بودجه عدم قطعیت، الگوریتم فراابتکاری برای حل این مسئله ارائه شده است.

روش حل مدل هم‌تای استوار

برای حل مسئله هم‌تای استوار طراحی اقتصادی- آماری، مطابق رابطه ۴، از الگوریتم توسعه‌داده‌شده، که بر پایهٔ الگوریتم ژنتیک (GA)^۹ است، استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی مهندسی استفاده شده است [۱۷-۱۹]. نیایکی و همکاران [۲۰] و برزین‌پور و همکاران [۲۱] روش‌های حل پیشنهادی را برای حل مدل اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی مقایسه کردند. نتیجه تحقیقات برتری GA را بر سایر الگوریتم‌ها نشان داد. بنابراین، در مقاله حاضر الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شد. الگوریتم ۱ گام‌های الگوریتم حل مسئله را توصیف می‌کند.

الگوریتم ۱. الگوریتم حل مدل استوار پیشنهادی

۱. ورودی‌ها

- i. بازه تخمینی برای هر یک از متغیرهای تصمیم را مشخص کنید.
- ii. مقادیر ATS_{\min} و ATS_{\max} و محدودیت‌های مورد نظر را تعیین کنید.
- iii. پارامترهای دارای عدم قطعیت را تعیین و محدوده هر یک از آن‌ها را مشخص کنید.
- iv. اندازه مجموعه عدم قطعیت و تعداد پارامترهای دارای عدم قطعیت (m) را مشخص کنید.

هستند و کوچک‌ترین تخطی از این محدودیت‌ها، مادامی که پارامترها در مجموعه عدم قطعیت باشند، پذیرفته نیست. محدودیت $NE^s \leq h$ اطمینان می‌دهد که جواب‌های طرح اقتصادی قابل قبول و عملی باشند. این محدودیت جواب‌هایی را که زمان نمونه‌گیری آن از بازه نمونه‌گیری (h) فراتر روند در نظر نمی‌گیرد. محدودیت $ATS_0^s \geq ATS_{\min}$ زمان منطقی و قابل قبولی برای هشدارهای اشتباهی حفظ خواهد کرد. تضمین اعلام هشدار خارج از کنترل در محدوده زمانی مورد نظر با محدودیت $ATS_1^s \leq ATS_{\max}$ صورت می‌پذیرد. محدودیت‌هایی روی متغیرهای تصمیم مسئله ممکن است با توجه به نوع فرایند و ترجیح کاربران مورد نیاز باشد.

برای اجتناب از محافظه‌کاری زیاد در مسئله بهینه‌سازی استوار، از رویکردی که برتسیماس و سیم [۱۳] ارائه کردند استفاده شد. مفهوم بودجه عدم قطعیت، که سطحی از انعطاف‌پذیری را در انتخاب موازنه بین استواری و عملکرد به طراح ارائه می‌کند، در پژوهش‌های متعدد در مجموعه‌های عدم قطعیت متفاوت استفاده شده است [۱۶]. این مفهوم ترجیح تصمیم‌گیرنده را در زمینه ریسک، با انتخاب مجموعه عدم قطعیت برای داده‌های در دسترس، در نظر می‌گیرد و خطوط راهنمایی برای ساخت مجموعه عدم قطعیت از داده‌های عینیت‌یافته تاریخی ارائه می‌کند.

پارامتر Γ ، متعلق به بازه بسته $[0, m]$ ، بودجه عدم قطعیت نامیده می‌شود. برای اجرای این رویکرد باید برای بودجه عدم قطعیت مقداری تعیین شود. در این تحقیق، بودجه عدم قطعیت به صورت عدد صحیح در نظر گرفته شد. تعبیر آن نیز بیشترین تعداد پارامترهای دارای عدم قطعیت است که می‌توانند از مقدار اسمی خودشان انحراف داشته باشند. تعداد آن‌ها نیز از مقدار Γ نمی‌تواند بیشتر باشد. اگر $\Gamma = 0$ باشد، پارامترها مقدار اسمی پیش‌بینی‌شده خود را می‌گیرند و هیچ حفاظتی در برابر عدم قطعیت در مسئله در نظر گرفته نمی‌شود. در مقابل، اگر $\Gamma = m$ در نظر گرفته شود، مسئله به طور کامل در برابر عدم قطعیت محافظت می‌شود و نتایج آن کاملاً محافظه‌کارانه است. اگر

پارامترهای دارای عدم قطعیت به تعداد Γ تا به صورت تصادفی در بازه خود مقدار می گیرند و تعداد $(m-\Gamma)$ تا از پارامترها مقدار اسمی خود را خواهند گرفت.

۲. تعداد $2^{\Gamma} \binom{m}{\Gamma}$ سناریو تولید کن. در اینجا از

پارامترهای دارای عدم قطعیت به تعداد Γ تا مقدار انتهایی بازه خود را می گیرند و تعداد $(m-\Gamma)$ تا از پارامترها مقدار اسمی خود را خواهند گرفت.

۳. کل سناریوهای محتمل را برابر $S = Sc \binom{m}{\Gamma} + 2^{\Gamma} \binom{m}{\Gamma}$

قرار بده.

رویه شماره ۲. ارزیابی

۱. مقدار تابع هدف $E(x,s)$ را برای جواب x و سناریو s ارزیابی کن.

۲. موجه بودن محدودیت های داده شده را بررسی کن.

۳. اگر جوابی موجه نبود، پس مقدار تابع هزینه مربوطه را در ۱۰۰ ضرب کن.

۴. پایان

انتخاب ترکیب بهینه پارامترهای GA در اغلب موارد از طریق سعی و خطا انجام می شود، که به دلیل تعدد حالت های ممکن دشوار است. برای تعیین مقادیر بهینه چهار پارامتر GA از آرایه متعامد تاگوچی $L9$ ^{۱۸} بهره گرفته شد. نرخ جهش^{۱۹} در این مسئله به صورت ترکیب خطی از سایر پارامترها در نظر گرفته شده است. استفاده از این روش را در تعیین بهینه پارامترهای GA محققان بسیاری در حوزه طراحی اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی توصیه کرده اند [۲۲-۲۵]. آرایه متعامد $L9$ نه ترکیب از پارامترها را در سه سطح مختلف برای هر یک در نظر می گیرد. سطوح پارامترها در جدول ۲ می آید.

جدول ۲. سطوح هر یک از پارامترها در طرح متعامد

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
اندازه جمعیت PS	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
کسر ترکیب CF	۰.۰۵	۰.۴۰	۰.۷۵
تعداد جمعیت نخه NE	۲	۴	۶
تعداد تکرار NG	۵۰	۱۰۰	۱۵۰

v. مقدار بودجه عدم قطعیت را اعلام کنید.

vi. مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک: اندازه جمعیت^{۱۰}، کسر ترکیب^{۱۱}، تعداد جمعیت نخه^{۱۲}، تعداد تکرار الگوریتم^{۱۳} را مشخص کنید.

vii. مقدار Sc را به عنوان شاخص تعداد سناریوهای تصادفی وارد کنید.

۲. مقداردهی اولیه به الگوریتم

i. تعداد S سناریو تولید کنید (بر اساس رویه شماره ۱ تولید سناریو)

ii. جمعیت اولیه جواب ها را به صورت تصادفی تولید کنید.

۳. تا هنگامی که^{۱۴} به حداکثر تعداد تکرارهای

الگوریتم نرسیدی برای هر^{۱۵} جواب $x = (L_{\bar{x}}, n, h)$ انجام بده.^{۱۶}

برای هر سناریو $s = 1..S$ انجام بده.

مقدار تابع هدف را بر اساس رویه شماره ۲ ارزیابی

کن.

پایان حلقه

جواب متناظر با $\max_{x \in X, s \in S} E(x,s)$ را بیاب.

پایان حلقه

عملگرهای ژنتیک را اعمال کن.

جمعیت فعلی را با جمعیت تولیدشده جدید تعویض کن.

تعداد تکرارهای الگوریتم را یکی افزایش بده.

۴. پایان حلقه شماره ۳

۵. از طریق روش های جست و جوی محلی بهترین پاسخ را بیاب.

۶. خروجی: مجموعه جواب را از بین جواب های نهایی چاپ کن.

در خلال الگوریتم ۱، رویه شماره ۱ برای تولید سناریوهایی از پارامترهای دارای عدم قطعیت و رویه شماره ۲ برای ارزیابی تابع هدف و محدودیت ها برای هر یک از سناریوها پیشنهاد شده است.

رویه شماره ۱. تولید سناریو

۱. تعداد $Sc \binom{m}{\Gamma}$ سناریو تولید کن. در اینجا از

حتی هنگامی که پارامترهای عدم قطعیت به صورت گسترده توزیع شده باشند تضمین می‌کند. جواب بهینه مدل هم‌تای استوار جواب بهینه استوار برای طراحی اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی در حالت عدم قطعیت نامیده می‌شود.

کاهش فضای عدم قطعیت

در بررسی انجام شده در داده‌های مورد آزمایش، در همه مجموعه پارامترها مشاهده شد سناریویی که منجر به $\max_{x \in X, s \in S} E(x, s)$ می‌شود از مقادیر انتهایی^{۲۱} در بازه پارامترهای هزینه‌ای شکل گرفته است. طبق این نتیجه، گزاره‌های^{۲۲} در ارتباط با $\max_{x \in X, s \in S} E(x, s)$ برای مجموعه پارامترهای داده شده بیان و اثبات شد.

افزای مجموعه عدم قطعیت

مجموعه سناریوها را به صورت $S = \{\Omega \cup \Omega'\}$ در نظر بگیرید. مجموعه سناریوهای Ω بدین صورت است که همه پارامترهای هزینه‌ای یکی از مقادیر انتهایی بازه خود را گرفته، ولی پارامترهای فرایند می‌توانند مقادیری تصادفی در بازه تعریف شده خود بگیرند. این مجموعه خود، به دو مجموعه تقسیم می‌شود: مجموعه $\bar{\Omega}$ سناریوهای با پارامترهای هزینه‌ای با مقدار حد بالای بازه خود $\bar{C} = \{\bar{C}_0, \bar{C}_1, \bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3, \bar{a}_4\}$ و پارامترهای فرایند $\Omega \setminus \bar{\Omega}$ و مجموعه $P^s = \{\lambda^s, \delta^s, E^s, T_0^s, T_1^s, T_2^s, \gamma_1, \gamma_2\}$ سناریوهای با پارامترهای هزینه‌ای که یکی از مقادیر حد بالا یا پایین بازه خود را اخذ می‌کنند. همچنین، مجموعه Ω' مشتمل بر سناریوهایی است که همه ضرایب می‌توانند هر مقداری بین مقادیر انتهایی بازه خود اخذ کنند. پارامترهای فرایند در هر دو مجموعه Ω و Ω' می‌توانند مقادیر تصادفی در بازه خود اخذ کنند.

گزاره

مسئله $\min_{x \in X} \max_{s \in S} E(x, s)$ را می‌توان به صورت مسئله $\min_{x \in X} \{ \max_{s \in \bar{\Omega}} E(x, s), \max_{s' \in (\Omega \setminus \bar{\Omega})} E(x, s') \}$ بازنویسی کرد. مسئله $\min_{x \in X} \{ \max_{s \in \bar{\Omega}} E(x, s), \max_{s' \in (\Omega \setminus \bar{\Omega})} E(x, s') \}$ معادل $\min_{x \in X} \{ \max_{s \in \bar{\Omega}} E(x, s), \max_{s' \in (\Omega \setminus \bar{\Omega})} E(x, s') \}$ است. برای اثبات این گزاره کافی

این الگوریتم برای هر یک از سطوح سه بار تکرار شده است. پس از اخذ نتایج حاصل از ۲۷ بار اجرای الگوریتم، نرخ سیگنال نسبت به نویز SN^{20} برای ارزیابی نتایج آزمایش‌های انجام شده از طریق رابطه ۵ محاسبه و در جدول ۳ خلاصه شد. از آنجا که تابع هدف مسئله از نوع حداقل سازی است، هر چه شاخص SN بزرگ‌تر باشد بهتر است [۲۶].

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r Y_i^2 \right) \quad (5)$$

جدول ۳. طرح متعامد L9 برای پارامترهای GA

پارامتر	PS	CF	NE	NG	SN
۱	۵۰	۰٫۰۵	۲	۵۰	-۹۵٫۱۳۰۱
۲	۵۰	۰٫۴۰	۴	۱۰۰	-۹۵٫۱۲۹۷
۳	۵۰	۰٫۷۵	۶	۱۵۰	-۹۵٫۱۳۰۹
۴	۱۰۰	۰٫۰۵	۲	۵۰	-۹۵٫۱۲۹۳
۵	۱۰۰	۰٫۴۰	۴	۱۰۰	-۹۵٫۱۳۰۹
۶	۱۰۰	۰٫۷۵	۶	۱۵۰	-۹۵٫۱۲۹۹
۷	۱۵۰	۰٫۰۵	۲	۵۰	-۹۵٫۱۲۸۴
۸	۱۵۰	۰٫۴۰	۴	۱۰۰	-۹۵٫۱۲۹۵
۹	۱۵۰	۰٫۷۵	۶	۱۵۰	-۹۵٫۱۲۹۴

مجموع نرخ SN برای سطوح پارامترهای GA در جدول ۴ می‌آید. بر اساس بیشترین مقدار شاخص SN در هر سطح، ترکیب بهینه از سطوح پارامتر به صورت اندازه جمعیت برابر ۱۵۰، کسر ترکیب برابر ۰٫۰۵، تعداد جمعیت نخبه برابر ۴، و تعداد ۱۰۰ تکرار الگوریتم به دست آمد.

برای اطمینان از کفایت سطوح اولیه تعیین شده برای پارامترها، اثر سایر ترکیبات بر جواب‌های GA نیز بررسی شد؛ مثلاً $CF < ۰٫۰۵$ و $PS > ۱۵۰$ نیز آزمایش شد. ترکیب بهینه به دست آمده از آرایه‌های متعامد L9 بهترین نتیجه را بین آزمایش‌های بررسی شده داشت.

جدول ۴. مجموع نرخ SN برای سطوح پارامترهای GA

پارامتر	PS	CF	NE	NG
سطح ۱	۲۸۵/۳۹۰	۲۸۵/۲۸۷۸ *	۲۸۵/۳۸۹۵	۲۸۵/۳۹۰۴
سطح ۲	۲۸۵/۳۹۰	۲۸۵/۳۹۰۱	۲۸۵/۳۸۸۴ *	۲۸۵/۳۸۸۰ *
سطح ۳	۲۸۵/۳۸۷ *	۲۸۵/۳۹۰۲	۲۸۵/۳۹۰۱	۲۸۵/۳۸۹۶

* بیشترین مقدار نرخ SN برای هر پارامتر

رویکرد بهینه‌سازی استوار موجه بودن جواب‌ها را

و با وقوع انحرافات بادلیل، ممکن است تغییر کنند. بنابراین، هزینه‌های فرایند ماشین‌کاری و سایر مؤلفه‌های سیستم کیفیت به صورت مجموعه‌ای از مقادیر محتمل پارامترها برآورد شده است. برآورد پارامترهای مدل برای حل مدل استوار اقتصادی-آماري در جدول ۵ می‌آید.

جدول ۵. برآورد پارامترهای مدل

۰٫۰۸۳ تا ۰٫۱۶۷ ساعت	E^s
۰٫۰۸۳ تا ۰٫۱۶۷ ساعت	T_0^s
۱ تا ۳ ساعت	T_1^s
۰٫۸۳ تا ۰٫۵ ساعت	T_2^s
۱ تا ۳ انحراف استاندارد	δ^s
۱	γ_1
۱	γ_2
۰٫۱ تا ۰٫۱۳۳	λ^s
۷۰	Pr
۱۱۵۵۰ تا ۱۵۷۵۰ ریال بر ساعت	C_0^s
۲۶۲۵۰ تا ۳۶۷۵۰ ریال بر ساعت	C_1^s
۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ ریال	a_1^s
۷۵۰ تا ۱۰۰۰ ریال	a_2^s
۱۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ ریال	a_3^s
۱۰۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ ریال	a_4^s

در بخش پیشین نشان داده شد که حل مدل استوار اقتصادی-آماري $\min_{x \in X} \max_{s \in S} E(x, s)$ معادل با حل مسئله $\min_{x \in X} \max_{s \in S} E(x, s)$ برای سناریو بدترین حالت برای پارامترهای هزینه‌ای است. بنابراین در ادامه حل مسئله مدل استوار اقتصادی-آماري، برای مشخصه کیفی مورد پایش، حد بالای بازه تخمین زده شده برای پارامترهای هزینه‌ای در نظر گرفته خواهد شد. برای شش پارامتر فرایند نیز سناریوهایی از بازه تخمین زده شده تولید شده است. بنابراین، فضای مجموعه عدم قطعیت به شش پارامتر فرایند کاهش داده شد. همچنین، محدودیت‌هایی روی متغیرهای تصمیم مسئله، با توجه به نوع فرایند و ترجیحات کاربر، لحاظ شد. محدودیت اندازه نمونه $2 \leq n \leq 20$ و بازه نمونه‌گیری $0.1 \leq h \leq 8$ برای اخذ نمونه در هر شیفت کاری لحاظ شد. فواصل زمانی کمتر از ۰٫۱ ساعت در عمل ممکن است قابل اجرا نباشد. محدودیت $1 \leq L_{\bar{x}} \leq 4$

است اثبات کنیم هزینه متناظر با سناریوی $s \in \bar{\Omega}$ برای یک بردار جواب داده شده $x \in X$ بیشتر از هزینه سناریوی $s' \in \{\Omega \cup (\Omega \setminus \Omega')\}$ است. به تعبیری

$$E(x, s') \leq E(x, s) \quad \begin{matrix} s' \in \{\Omega \cup (\Omega \setminus \Omega')\} \\ s \in \bar{\Omega} \end{matrix}$$

اثبات

برای یک بردار جواب داده شده $x \in X$ به ازای هر سناریوی s سناریوی s از مجموعه $\bar{\Omega}$ می‌توان یافت که بر هزینه انتظاری سناریوی s' چیره^{۲۳} است. تابع هزینه انتظاری سیستم کیفی $E(x, s')$ متناظر با سناریوی s' ، به صورت ترکیب خطی از پارامترهای هزینه قابل بازنویسی است. مثلاً ضریب پارامتر هزینه تولید محصول معیوب، در شرایط تحت کنترل و سناریوی s' ، $C_0^{s'}$ ، به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود.

$$f_1(x, p^{s'}) = (1/\lambda^s) \div E(T, s') \quad (۶)$$

رابطه $f_1(x, p^{s'})$ تابعی از بردار جواب داده شده $x \in X$ و پارامترهای فرایند تحت سناریوی s' ، $p^{s'}$ ، است و شامل هیچ‌یک از پارامترهای هزینه‌ای نیست. بنابراین، رابطه بین $E(x, s)$ و $E(x, s')$ به صورت رابطه ۷ قابل ارائه است.

$$C_0^{s'} f_1(x, p^{s'}) + C_1^{s'} f_2(x, p^{s'}) + a_1^{s'} f_3(x, p^{s'}) + a_2^{s'} f_4(x, p^{s'}) + a_3^{s'} f_5(x, p^{s'}) + a_4^{s'} f_6(x, p^{s'}) \leq \bar{C}_0 f_1(x, p^s) + \bar{C}_1 f_2(x, p^s) + \bar{a}_1 f_3(x, p^s) + \bar{a}_2 f_4(x, p^s) + \bar{a}_3 f_5(x, p^s) + \bar{a}_4 f_6(x, p^s) \quad (۷)$$

بدین ترتیب نشان داده شد که مسئله

$$\min_{x \in X} \{ \max_{s \in \bar{\Omega}} E(x, s), \max_{s' \in \{\Omega \cup (\Omega \setminus \Omega')\}} E(x, s') \}$$

$$\min_{x \in X} \max_{s \in S} E(x, s) \quad \text{یعنی مسئله} \quad \min_{x \in X} \{ \max_{s \in \bar{\Omega}} E(x, s) \}$$

سناریوی بدترین مقدار پارامترهای هزینه‌ای در مدل اقتصادی-آماري نمودارهای کنترلی است.

تحلیل عددی

تخمین نقطه‌ای دقیق تعدادی از پارامترهای مدل نیازمند اطلاعات حسابداری صنعتی و محاسبات قیمت تمام شده مؤلفه‌های سیستم کیفی است. علاوه بر آن، مقادیر عینی یافته برای پارامترهای مدل، در گذر زمان

تحلیل نتایج

ارزیابی جواب‌های به‌دست‌آمده فقط با در نظر گرفتن هزینه متناظر با طرح‌های مختلف از دیدگاه طراحان نمودار کنترلی کفایت نمی‌کند. معیارهای آماری متناظر با هر طرح نیز باید به منزله محک ارزیابی کنار هزینه طرح‌ها لحاظ شوند. بنابراین، معیار آماری ATS_1 و هزینه هر یک از طرح‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و تولید ۱۰۰۰۰ سناریو از مجموعه عدم قطعیت داده‌شده مسئله محاسبه شد. مقدار هزینه بر حسب ریال و معیار آماری ATS_1 جواب‌های رویکرد سنتی و طرح استوار در شکل ۱ می‌آید. در شکل ۱ در بخش a هزینه^{۲۴} بر حسب ریال و معیار آماری ATS_1 متناظر با طرح سنتی پیشنهادی شوهارت در فضای مجموعه عدم قطعیت مدل اقتصادی- آماری برای نمودار کنترلی \bar{X} آمده است. عملکرد این طرح در معیار آماری ATS_1 در بازه ۱ تا ۴٫۵ گسترده شده است. به عبارت دیگر، اعلام هشدار خارج از کنترل، با توجه به طرح سنتی شوهارت، بسته به سناریوی فرایند، مدت ۱ تا ۴٫۵ ساعت طول می‌کشد.

عملکرد جواب بهینه مدل اقتصادی- آماری متناظر با سناریوی اسمی پارامترهای فرایند و مقادیر حد بالای بازه پارامترهای هزینه‌ای در بخش b شکل ۱، در معیار $Loss$ و ATS_1 می‌آید. این جواب با رویکرد سنتی بهینه‌سازی تک‌هدفه مدل اقتصادی- آماری متناظر با فقط یک سناریو حاصل شد. این طرح در بعضی سناریوها نسبت به طرح سنتی شوهارت ATS_1 کمتر از ۱ نیز ارائه کرده است. اما، با وجود اینکه طرح حاضر با محدودیت $ATS_1^s \leq 1$ حاصل شده است، از آنجا که بهینه‌سازی فقط برای یک سناریوی خاص صورت گرفته، با عنایت بعضی سناریوها، زمان هشدار تا ۶٫۵۰ ساعت نیز می‌رسد.

بخش‌های c و d شکل ۱ عملکرد جواب طرح استوار به‌ازای مقادیر بودجه عدم قطعیت $\Gamma = 1, 4$ را نشان می‌دهد. طرح استوار تصویرشده در بخش c، اگرچه ممکن است نسبت به طرح‌های سنتی هزینه بیشتری برای پایش فرایند نیاز داشته باشد، تضمین می‌کند که زمان اعلام هشدار نمودار کنترلی \bar{X} همواره کمتر از

برای ضریب نمودار کنترلی در نظر گرفته شده است. برای امکان اجرای جواب‌های بهینه استوار در مقاطع زمانی گسسته و اجتناب از زرد کردن جواب، جواب‌هایی برای بازه نمونه‌گیری ارزیابی می‌شوند که ضریبی از ۵ دقیقه باشند. حداقل متوسط زمان اعلام هشدار در شرایط تحت کنترل ۵۰۰ ساعت بوده است.

حل مسئله همتای استوار

حل مسئله استوار اقتصادی- آماری برای پایش فرایند ماشین‌کاری مطابق روش حل پیشنهادشده از طریق بهینه‌سازی همتای استوار آن حاصل خواهد شد. بردار جواب طرح استوار $(L_{\bar{X}}, n, h)$ است. جواب‌ها بر اساس مقادیر بودجه عدم قطعیت مختلف در جدول ۶ خلاصه می‌شود.

جدول ۶. جواب بهینه استوار برای پایش فرایند ماشین‌کاری

Γ	$L_{\bar{X}}$	n	h	هزینه (ریال)
۰	۳٫۵۲	۶	۵۵	۴۰۷۷۴٫۶
۱	۳٫۱۶	۱۷	۵۰	۵۷۰۶۵٫۷
۲	۳٫۱۶	۱۷	۵۰	۵۷۲۱۸٫۵
۳	۳٫۱۶	۱۷	۵۰	۵۷۳۰۸٫۸
۴	۳٫۲۰	۱۵	۴۵	۵۷۷۰۹٫۹
۵	۳٫۲۰	۱۵	۴۵	۵۷۷۱۵٫۵
۶	۳٫۲۰	۱۵	۴۵	۵۷۷۱۵٫۵

در جدول ۶ به‌ازای مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت مشاهده می‌شود که جواب بهینه استوار به دو دسته تقسیم شده است. برای مقادیر عدم قطعیت Γ از ۱ تا ۳ بردار جواب ۵۰، ۱۷، ۳٫۱۶ و مقادیر Γ از ۴ تا ۶ بردار جواب ۴۵، ۱۵، ۳٫۲۰ به دست آمده است. این مطلب با رویکردی که برتسیماس و تیه‌له [۲۷] برای تعیین بهترین مقدار Γ پیشنهاد کرده‌اند مطابقت دارد. ایشان در تحقیق خود اشاره می‌کنند که بهترین مقدار برای $\Gamma = 0, 1, \dots, m$ همیشه در تناسب با \sqrt{m} است. در مورد بررسی‌شده در این تحقیق نیز انتخاب بودجه عدم قطعیت به اندازه $\Gamma = 4$ برای بهینه‌سازی مسئله طراحی استوار اقتصادی نمودار کنترلی \bar{X} کفایت می‌کند.

تولیدات فرایند و کاهش تغییرپذیری مشخصه کیفی، از طریق تغییر در دیدگاه مشتری به سازمان کاربر بازمی‌گردد.

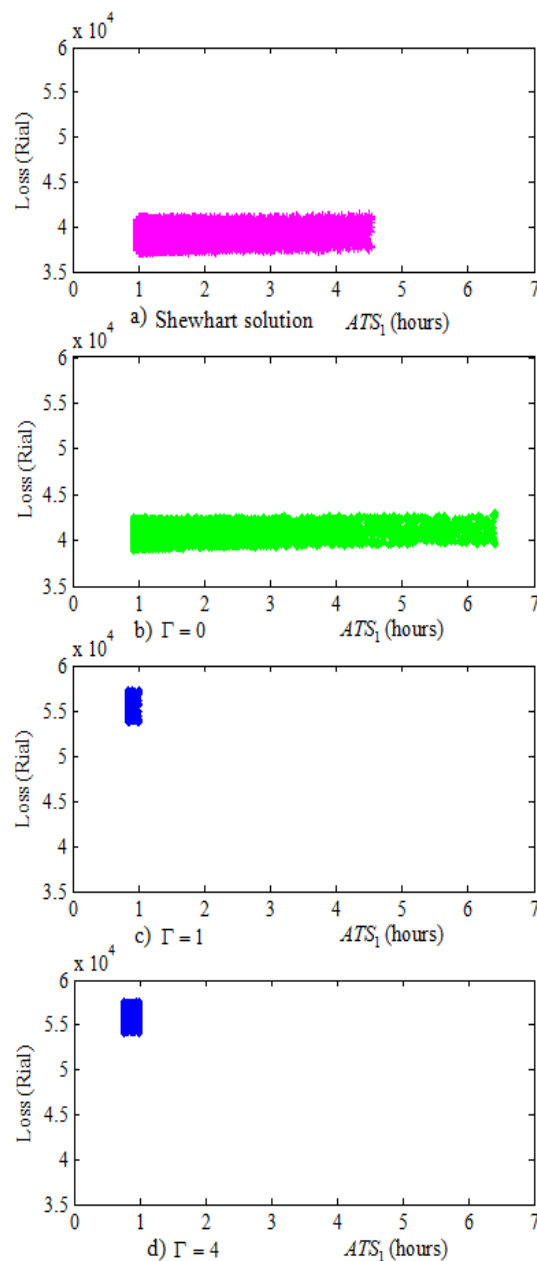
تحلیل حساسیت طرح استوار نسبت به معیار ATS_1 در طرح استوار اقتصادی- آماری نشان داده است که جواب بهینه استوار حاصله، برای حالتی که $ATS_1 \leq 1.2$ است، بازه نمونه‌گیری و ضریب نمودار کنترلی پیشنهادی شبیه طرح سنتی شوهارت است؛ اما اندازه نمونه به جای مقدار ۵ به ۱۶ تغییر یافته است. به عبارت دیگر، سازمان کاربر با حفظ طرح فعلی و فقط با تغییر اندازه نمونه‌گیری در هر بار اخذ نمونه‌ها از فرایند به مقدار ۱۶ می‌تواند با وجود عدم قطعیت در داده‌های مدل مطمئن باشد که نمودار کنترلی هشدار خارج از کنترل را در کمتر از ۱/۲۰ ساعت (۷۲ دقیقه) از وقوع شیفت اعلام خواهد کرد.

همچنین، مقایسه جواب‌های بهینه سناریوی بدترین حالت با جواب‌های بهینه استوار در مقادیر مختلف بودجه برتری جواب‌های استوار پیشنهادی را نشان می‌دهد. حل بهینه مدل اقتصادی، با توجه به سناریوی بدترین حالت ممکن همه پارامترها، منجر به هزینه ۵۸۹۲۳/۲ ریال در هر ساعت برای پایش فرایند خواهد شد. این در حالی است که جواب بهینه استوار، علاوه بر اینکه موجه بودن این جواب را در همه حالت‌های ممکن از بازه برآوردشده پارامترها تضمین می‌کند، مقدار هزینه کمتری نیز دربردارد. مقدار هزینه در حالتی که مسئله استوار اقتصادی- آماری نمودار کنترلی با بودجه $\Gamma = 6$ طراحی شده باشد، برابر ۵۷۷۱۵/۵ ریال در هر ساعت است. این مقدار ۱۲۰۷/۷ ریال در هر ساعت کمتر از هزینه متناظر با سناریوی بدترین حالت است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رویکردی نو برای طراحی استوار نمودارهای کنترلی در شرایط عدم قطعیت در داده‌های مدل اقتصادی- آماری ارائه شد. در این رویکرد حدود تغییرات پارامترهای مدل اقتصادی- آماری به صورت بازه‌ای از اعداد حقیقی نمایش داده می‌شود. در زمینه

یک ساعت باشد. به عبارت دیگر، این طرح استوار تضمین می‌کند متوسط زمان هشدار نمودار به‌ازای همه حالت‌های ممکن از بازه برآوردشده پارامترها کمتر از یک ساعت خواهد بود.



شکل ۱. ارزیابی پار تو جواب‌های رویکرد سنتی و طرح استوار با توجه به ATS_1 و Loss

جواب طرح استوار با بودجه عدم قطعیت $\Gamma = 4$ در بخش d شکل ۱ در معیار ATS_1 عملکرد بهتری نشان می‌دهد. افزایش هزینه طرح استوار ارائه شده نسبت به طرح سنتی در پایش فرایند، با توجه به بهبود کیفیت

استوار، علاوه بر اینکه کارآبودن جواب استوار را در همه حالت‌های ممکن از بازه برآوردشده پارامترها ضمانت می‌کند، مقدار هزینه کمتری در مقایسه با سناریوی بدترین حالت ممکن دربردارد. همچنین، ارزیابی پارتو به وسیله شبیه‌سازی مونت کارلوی جواب‌های استوار به کاربر امکان می‌دهد بهترین طرح را برای پایش فرایند و مواجهه با عدم قطعیت در پارامترهای سیستم کیفیت انتخاب کند. توسعه مدل استوار اقتصادی- آماری نمودارهای کنترلی حساس، همچون EWMA و CUSUM برای فرایندهای دارای مشخصه‌های کیفی حساس، از تحقیقاتی است که در آینده می‌تواند مورد توجه محققان باشد.

کاهش آثار عدم قطعیت در پارامترهای طرح‌های اقتصادی، نمودارهای کنترلی استوار برای پایش فرایند از دیدگاه اقتصادی به گونه‌ای توسعه داده شده است که هزینه‌های پایش فرایند حداقل شود و طرح ارائه شده در برابر تغییرات در ورودی‌های مدل استوار باشد. ارزیابی طرح سنتی پایش فرایند در مطالعه موردی صنعت خودروسازی نشان داده است در شرایط عدم قطعیت جواب رویکردهای سنتی، علاوه بر اینکه هزینه بیشتری دربردارد، کارایی مناسب برای اعلام هشدار خارج از کنترل را، هنگام وقوع سناریوهای مختلف، ندارد. مدل استوار پیشنهادشده به کاربران اطمینان می‌دهد هشدار خارج از کنترل را، با وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل، در زمان مناسب دریافت کنند. جواب بهینه

مراجع

- 1- Montgomery, D. C. (2005). "Introduction to Statistical Quality Control." 5 ed., John Wiley & Son., New York.
- 2- Azarshab, A., Javanshir, H., and Ebrahimnejad, S. (2011). "Designing Combined EWMA-EWMA Quality Control Scheme." *Journal of Industrial Engineering*. 45(1), 1-11.
- 3- Amiri, F., Noghondarian, K., and Safaei, A. S. (2014). "Evaluating the performance of variable scheme X-bar control chart: a Taguchi loss approach." *International Journal of Production Research*, DOI:10.1080/00207543.2014.906762.
- 4- Faraz, A., Heuchenne, C., Saniga, E., and Foster, E. (2013). "Monitoring delivery chains using multivariate control charts." *European Journal of Operational Research*, 228, 282-289.
- 5- Franco, B. C., Celano, G., Castagliola, P., and Costa, A. F. B. (2014). "Economic design of Shewhart control charts for monitoring autocorrelated data with skip sampling strategies." *International Journal of Production Economics*, 151, 121-130.
- 6- Niaki, S. T. A., Gazaneh, F. M., and Toosheghanian, M. (2013). "A Parameter-Tuned Genetic Algorithm for Economic-Statistical Design of Variable Sampling Interval X-Bar Control Charts for Non-Normal Correlated Samples." *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 43(5), 1212-1240.
- 7- Yeong, W. C., Khoo, M. B. C., Lee, M. H., and Rahim, M. A. (2013). "Economic and economic statistical designs of the synthetic Xbar chart using loss functions." *European Journal of Operational Research*, 48, 571-581.
- 8- Mortarino, C. (2010) "Duncan's model for Xbar-control charts: sensitivity analysis to input parameters", *Quality and Reliability Engineering International*. 26(1), 7-26.
- 9- Pignatiello, J. J. and Tsai, A. (1988). "Optimal Economic Design of \bar{X} Control Charts When Cost Model Parameters are Not Precisely Known." *IIE Transactions*. 20(1), 103-110.
- 10- Linderman, K. and Choo, A. S. (2002). "Robust economic control chart design." *IIE transactions*, 34(12), 1069-1078.
- 11- Vommi, V. B. and Seetala, M. S. N. (2007). "A simple approach for robust economic design of control charts." *Computers & Operations Research*, 34(7), 2001-2009.

- 12- Vommi, V. B. and Seetala, M. S .N. (2007). "A new approach to robust economic design of control charts." *Applied Soft Computing*, 7(1), 211-228.
- 13- Bertsimas, D. and Sim, M. (2004). "The Price of Robustness." *Operations Research*, 52, 35-53.
- 14- Ben-Tal, A., Boyd, S., and Nemirovski, A. (2006). "Extending Scope of Robust Optimization: Comprehensive Robust Counterparts of Uncertain Problems". *Math. Program., Ser. B.*, 107, 63-89.
- 15- Lorenzen, T. J. and Vance, L. C. (1986). "The Economic Design of Control Charts: A Unified Approach". *Technometrics*, 28(1), 3-10.
- 16- Bertsimas, D., Brown, D. B., and Caramanis, C. (2011). "Theory and Applications of Robust Optimization." *SIAM Review*, 53(3), 464-501.
- 17- Tarokh, M. J. and Naseri, A. (2012). "Genetic Algorithm and Hybrid Method to Minimize Total Distribution Cost in Multi-level Supply Chain." *Journal of Industrial Engineering*, 46(1), 15-26.
- 18- Bagherinejad, J., Jolai, F., and Rafiee Majd, Z. (2013). "Solving the MRCPS/Max with the Objective of Minimizing Tardiness Costs and Maximizing Earliness Rewards of Activities with a Two-stage Genetic Algorithm." *Journal of Industrial Engineering*, 47(1), 1-13.
- 19- Teimoury, E. and Mousavi, F. S. (2011). Proposed a Genetic Algorithm for Inventory Planning Model in Project Supply Chain. *Journal of Industrial Engineering*, 45(1), 45-58.
- 20- Niaki, S. T. A., Malaki, M., and Ershadi, M. J. (2011). "A comparative study of four evolutionary algorithms for economic and economic-statistical designs of MEWMA control charts." *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 9(4), 1-13.
- 21- Barzinpour, F., Noorossana, R., Niaki, S., and Ershadi, M. (2013). "A hybrid Nelder–Mead simplex and PSO approach on economic and economic-statistical designs of MEWMA control charts." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 1339-1348.
- 22- Chou, C. Y., Chen, C. -H., and Chen, C. -H. (2006). "Economic design of variable sampling intervals T2 control charts using genetic algorithms." *Expert Systems with Applications*, 30(2), 233-242.
- 23- Chen, Y. K. and Chang, H. -H. (2008). "Economic design of variable parameters \bar{X} control charts for processes with fuzzy mean shifts. *The journal of the Operational Research Society*, 59(8), 1128-1135.
- 24- Yang, S. -F. and Chen, W. -Y. (2009). "Controlling over-adjusted process means and variances using VSI cause selecting control charts. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 7170-7182.
- 25- Chen, F. L. and Yeh, C. H. (2009). "Economic statistical design of non-uniform sampling scheme X bar control charts under non-normality and Gamma shock using genetic algorithm." *Expert Systems with Applications*, 36(5), 9488-9497.
- 26- Taguchi, G., Chowdhury, S., and Wu, Y. (2005). "Taguchi's quality engineering handbook.", John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- 27- Bertsimas, D. and Thiele, A. (2006). "Robust and data-driven optimization: modern decision making under uncertainty, in *Tutorials on Operations Research.*", INFORMS, Chapter 4, 195-222.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Nominal Values
- 2- Conservative Solution
- 3- Budget of Uncertainty
- 4- Trade-off
- 5- Performance
- 6- Bounded Set
- 7- Hard
- 8- Adjustable Robust Optimization

- 9- Genetic Algorithm
 - 10- Population Size
 - 11- Crossover Fraction
 - 12- Number of Elites
 - 13- Generation Number
 - 14- While
 - 15- For
 - 16- Do
 - 17- If
 - 18- Taguchi Orthogonal Array
 - 19- Mutation Rate
 - 20- Signal-to-Noise Ratio
 - 21- Extreme Values
 - 22- Proposition
 - 23- Dominate
 - 24- Loss
-