



تدوین چارچوبی استاندارد برای پایش و تحلیل آماری شاخص‌های عملکردی در مدیریت پروژه با در نظر گرفتن مهارت تیم‌های کاری

سجاد باقری^۱، شروین اسدزاده^{۲*}، حمید اسماعیلی^۳

۱ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲ دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳ دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

سابقه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

چکیده

در عصر حاضر، تغییرات زیاد در پروژه‌ها و وجود پیچیدگی و عدم قطعیت در اجرای پروژه‌ها، باعث شده تا رویکردهای سنتی در مدیریت و کنترل زمان و هزینه‌های پروژه، کارکرد اصلی خود را از دست بدهند. پایش مستمر شاخص‌های کلیدی مدیریت ارزش کسب‌شده، از ارکان اساسی کنترل پروژه محسوب می‌شود، اما به دلیل محدودیت داده‌های در دسترس، استفاده از ابزارهای سنتی تحلیل عموماً ناکارآمد و ناهم‌راستا با واقعیت‌های پروژه‌ها است. پیچیدگی مسئله، زمانی ایجاد می‌شود که عملکرد تیم‌های کاری مختلف باید به نوعی در پایش لحاظ شود. افزون بر آن، تغییرات شاخص‌های عملکردی پروژه باید از طریق تحلیل نقطه تغییر پایش شوند تا بتوانیم زمان شروع انحرافات به‌وجود آمده در پروژه را به طور دقیق پیش‌بینی کنیم. برای همین در این پژوهش، چارچوب استاندارد مدیریت پروژه‌ها با استفاده از نمودار کنترل مبتنی بر حدود احتمال برای پایش شاخصهای عملکردی با در نظر گرفتن تاثیر عملکرد تیم‌های کاری مختلف توسعه داده شد. همچنین رویکردی پارامتریک برای تحلیل نقطه تغییر ارائه و تاثیر داده‌های اضافی بر عملکرد این رویکرد بررسی شد. نتایج حاکی از عملکرد بهتر رویکرد استاندارد پیشنهادی برای مدیریت و کنترل بهینه پروژه‌ها است، زیرا شاخص متوسط طول دنباله خارج از کنترل به ازای یک شیفت خاص بسیار کمتر است و برای همین، شناسایی مشکلات احتمالی در پروژه‌ها زودتر انجام می‌شود. همچنین رویکرد پارامتریک پیشنهاد شده کمک شایانی به مدیر پروژه برای شناسایی دقیقتر نقطه تغییر و در نتیجه کشف ریشه انحراف با دلایل و انجام اقدامات اصلاحی کرد.

¹ Sajjad.bagheri437@iau.ac.ir

² Sh.asadzadeh@iau.ac.ir (Corresponding Author)

³ hamidesmaeli@iau.ac.ir

کلیدواژه‌ها: استاندارد و کنترل کیفیت، مدیریت و کنترل پروژه، نمودار کنترل مبتنی بر حدود احتمال، نقطه تغییر، مدیریت ارزش کسب شده

۱ مقدمه

مدیریت ارزش کسب‌شده^۱ یکی از پیشرفته‌ترین و قابل‌اعتمادترین روش‌های کنترل و نظارت بر پروژه است که با ترکیب اطلاعات زمان‌بندی، هزینه و میزان پیشرفت، تصویری دقیق از عملکرد واقعی پروژه ارائه می‌دهد (مردیت و منتل^۲، ۲۰۱۱). این روش به مدیران پروژه امکان می‌دهد تا با نگاهی یکپارچه، ارزیابی کنند آیا پروژه مطابق برنامه پیش می‌رود، از بودجه تعیین‌شده فراتر رفته یا از برنامه زمانی عقب مانده است. در مدیریت سنتی پروژه معمولاً پیشرفت فیزیکی، هزینه و زمان به صورت جداگانه سنجیده می‌شد، اما در روش ارزش کسب‌شده این سه بُعد در قالب شاخص‌هایی به هم پیوسته تحلیل می‌شوند؛ به همین دلیل تصمیم‌گیری‌های مدیریتی با دقت و سرعت بیشتری انجام می‌شود و احتمال بروز انحرافات کنترل‌نشده بسیار کاهش می‌یابد. هسته اصلی سیستم مدیریت ارزش کسب‌شده بر سه مقدار کلیدی استوار است: ارزش برنامه‌ریزی‌شده، ارزش کسب‌شده و هزینه واقعی. مقایسه این سه شاخص امکان تحلیل انحرافات زمانی و هزینه‌ای را فراهم می‌کند. در این راستا مدیران می‌توانند با استفاده از شاخص‌هایی مانند شاخص عملکرد هزینه و شاخص عملکرد زمان تشخیص دهند آیا پروژه از نظر زمان‌بندی عقب یا جلوتر است و آیا در محدوده بودجه حرکت می‌کند یا خیر. در کل مدیریت ارزش کسب‌شده در سازمان‌هایی با ساختار رسمی مدیریت پروژه کاربرد گسترده‌ای دارد. با وجود کاربرد زیاد این روش در بیشتر پروژه‌ها (با ماهیت و مقیاسهای متفاوت)، مدیریت ارزش کسب‌شده، عملکرد پروژه از حیث زمان و هزینه را تنها در دوره‌های مورد نظر بررسی کرده و تغییرات آن‌ها را در طول زمان مطالعه نمی‌کند. حال آنکه با پایش این انحرافات در طول زمان می‌توان سطح عملکرد پروژه را در مراحل مختلف پایش کرده و با یافتن مشکلات احتمالی و انجام اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه، عملکرد پروژه را بهبود بخشید. لذا پُر واضح است که از نمودارهای کنترل برای نظارت مستمر بر رفتار فرایندها و تشخیص انحرافات غیرعادی استفاده

¹ Earned value management

² Meredith and Mantel

می‌شود. اما بهره‌برداری از این رویکرد در کنترل پروژه‌ها با موانعی نیز روبه‌رو است. یکی از این چالش‌های جمع‌آوری داده‌های عملکردی زمان و هزینه است؛ زیرا جمع‌آوری این داده‌ها در هر دوره از ارزیابی عملکرد پروژه ممکن است مستلزم صرف زمان زیادی است و ارزیابی پروژه در تمام دوره‌های عملکردی با این رویکرد ممکن است برای ارکان پروژه دشوار باشد و صرفه اقتصادی نداشته باشد. به نظر می‌رسد استفاده از رویکردی که بتواند با تعداد داده‌های محدود عملکرد پروژه را پیش کند راهکار موثری باشد. از سوی دیگر، این روش مرسوم، سایر عوامل تاثیرگذار بر عملکرد پروژه را در نظر نمی‌گیرد. به عنوان مثال، در دوره‌های زمانی مختلف پروژه‌ها، با توجه به منابع مورد نیاز تخصیص یافته برای تحقق برنامه زمان‌بندی پروژه، تیم‌های کاری مختلف مشغول به کار هستند که عملکرد هر یک از آن‌ها متفاوت است. بدیهی است این تفاوت در عملکرد تیم‌ها، می‌تواند بر انجام زودهنگام یا دیر هنگام فعالیت‌های پروژه نسبت به زمان برنامه‌ریزی شده و همچنین بهره‌وری هزینه‌کرد در پروژه‌ها تاثیرگذار باشد. از این رو ارائه رویکردی که بتواند این تاثیرات را بر عملکرد پروژه و شاخص‌های عملکردی زمان و هزینه در نظر بگیرد می‌تواند سودمند باشد. یکی دیگر از محدودیت‌های موجود در روش مدیریت ارزش کسب‌شده، نمودارهای کنترل آماری آن است که با وجود شناسایی انحراف در پروژه قادر به تشخیص زمان دقیق شروع این انحراف نیستند. اما چنانچه مدیر یا ارکان پروژه زمان دقیق آغاز انحراف در پروژه را تشخیص دهند می‌توانند زمان بسیار کمتری برای تشخیص، تحلیل و برطرف‌سازی علل ریشه‌ای انحراف صرف نمایند. در این مقاله برای رفع این مانع، رویکرد تحلیل نقطه تغییر پیشنهاد داده شد. تحلیل نقطه تغییر یکی از ابزارهای تحلیل آماری پیشرفته در حوزه کنترل کیفیت آماری با هدف شناسایی لحظه‌هایی است که در آن‌ها ویژگی‌های یک فرآیند از حالت تحت کنترل به حالت خارج از کنترل تغییر می‌کند. قطعاً در یک سیستم تولیدی یا خدماتی، فرض کلیدی این است که فرآیند در شرایط پایدار، دارای توزیع و پارامترهای آماری ثابت، نظیر میانگین و واریانس است. اما چنانچه هر یک از آنها دستخوش تغییری شوند، نمودارهای کنترل به عنوان ابزاری برای کشف سریع حالت‌های خارج از کنترل دست به کار خواهند شد و پس از دریافت سیگنال خارج از کنترل، ریشه‌یابی و انجام اقدام اصلاحی توصیه می‌شود. در این راستا، تحلیل نقطه تغییر، ابزاری است که در شناسایی نقطه شروع این تغییرات نقش کلیدی ایفا می‌کند، چرا که لحظه دریافت سیگنال توسط نمودار کنترل به زمان تغییر در فرآیند اشاره ندارد. برای همین نمودارهای کنترل با وجود کارایی و توانایی بالا در کنترل و پایش فرآیندها، توانایی تشخیص زمان واقعی اختلالات به وجود آمده در

فرآیند را ندارند. در نتیجه تخمین نقطه تغییر می‌تواند منجر به کاهش مدت زمان جستجو برای شناسایی و حذف علل ریشه‌ای انحرافات شود. این مهم در زمینه ارزیابی و تحلیل روند شاخصهای عمرانی پروژه‌ها از حساسیت بسیار زیادی برخوردار است. از این رو در این مقاله، چارچوبی استاندارد بر پایه یک نمودار کنترل جدید مبتنی بر متغیرهای موهومی در فرآیند مدیریت پروژه، با در نظر گرفتن تاثیر عملکرد متفاوت تیم‌های کاری در حضور داده‌های اولیه کم و محدود ارائه می‌شود. همچنین یک روش تحلیل نقطه تغییر مبتنی بر برآورد بیشینه درستی‌نمایی پیشنهاد می‌شود.

۲ پیشینه پژوهش

نصار و هگاب^۱ (۲۰۰۵) هزینه‌های اضافی در عملیات آسفالت‌ریزی در پروژه‌های ساخت‌وساز را با استفاده از فنون کنترل فرآیند آماری^۲ مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. لئو و لین^۳ (۲۰۰۸) شاخص‌های مدیریت ارزش کسب‌شده را با نمودارهای کنترل آماری ترکیب کردند تا پایش عملکرد پروژه (زمان و هزینه) دقیق‌تر شود و عملکرد مدیریت ارزش کسب‌شده سنتی را اصلاح کرده و بهبود بخشد و همچنین نشان دهد فنون کنترل فرآیند آماری می‌توانند در تشخیص زودهنگام انحرافات عملکرد پروژه و کاهش هشدارهای نادرست مفید باشند. علی‌وردی، مسلمی نائی و صالحی پور^۴ (۲۰۱۳) به ارتقای فرآیند کنترل پروژه‌های ساخت‌وساز با ترکیب روش‌های آماری و شاخص‌های مدیریت ارزش کسب‌شده به منظور پایش مدت زمان و هزینه پروژه پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از نمودارهای کنترل آماری، سطح انحرافات پذیرفتنی را بهتر تعریف کردند. نتایج پژوهش نشان داد که روش ترکیبی مدیریت ارزش کسب‌شده و نمودارهای کنترل آماری، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های معمول داشت، به‌گونه‌ای که تیم پروژه توانست دانش و آگاهی بیشتری نسبت به وضعیت پروژه به دست آورد. نارباو و دی

¹ Nassar, Nassar and Hegab

² Statistical Process Control

³ Leu and Lin

⁴ Aliverdi, Moslemi Naeni and Salehipour

مارکو^۱ (۲۰۱۴) روش نوینی را برای تخمین هزینه تا تکمیل پروژه^۲ ارائه کردند که محدودیت‌های روشهای موجود مبتنی بر مدیریت ارزش کسب‌شده را کاهش می‌دهد. آنها با برآزش رگرسیونی غیر خطی رشد، مدلی پیشنهاد کردند که پیش‌بینی هزینه باقی‌مانده با در نظر گرفتن پیشرفت زمانی پروژه را امکان‌پذیر می‌سازد. باتسلیر و وانهووک^۳ (۲۰۱۷) روشهای مدیریت ارزش کسب‌شده را با روش‌های هموارسازی نمایی و تکنیک پیش‌بینی کلاس مرجع ادغام کردند تا دقت پیش‌بینی پروژه (مدت زمان نهایی و هزینه نهایی) را بهبود بدهند. در این پژوهش، فرمول‌های پیش‌بینی هزینه و زمان را با افزودن یک پارامتر هموارسازی توسعه دادند و نشان دادند که چگونه این پارامتر را می‌توان به صورت پویا در جریان پروژه تنظیم کرد. هادیان و رحیمی فرد^۴ (۲۰۱۹) با استفاده از نمودار کنترل T^2 هتلینگ چند متغیره، رویکردی را برای غلبه بر این محدودیت ارائه دادند تا همبستگی‌های احتمالی بین شاخص‌های مدیریت ارزش کسب‌شده را در نظر گرفته و کل قابلیت عملکرد پروژه را با دقت بیشتری توصیف کنند. در این پژوهش هر دو جنبه‌های عملکرد پروژه که به شدت بهم وابسته هستند، به صورت همزمان تحلیل شدند. مرتجی، نوری و باقرپور^۵ (۲۰۲۱) یک طرح مدیریتی کنترل پروژه ارائه کردند که در آن فاصله زمان بین نقاط بازبینی ثابت نیست، بلکه به صورت تابعی از میزان انحراف بین عملکرد برنامه‌ریزی شده و عملکرد واقعی پروژه تعیین شده است. این رویکرد با هدف بهبود کارایی پایش فرایند و کنترل پروژه و فراهم آوردن اطلاعات به موقع برای مدیران پروژه ارائه شد. سلانگ، مارتن و وانهووک^۶ (۲۰۲۲) رویکردهای کنترل پروژه را برای پروژه‌هایی با محدودیت منابع گسترش دادند تا میزان پیشرفت پروژه را اندازه‌گیری و ارزیابی کنند. همچنین پژوهشگران سه سناریو (منابع مشترک، رقابت منابع و تاخیر ناشی از محدودیت) را با در نظر گرفتن تضادهای احتمالی منابع طراحی کردند تا در صورت نیاز، اقدامات اصلاحی لازم را زمانبندی و پیاده‌سازی کنند. لینگ چن و تریپیاوان^۷ (۲۰۲۴) نشان دادند چگونه می‌توان از

¹ Narbaev and De Marco

² Cost Estimate at Completion

³ Batselier and Vanhoucke

⁴ Hadian and Rahimifard

⁵ Mortaji, Noori and Bagherpour

⁶ Song, Martens and Vanhoucke

⁷ Ling Chen and Tripiawan

روش‌های کنترل فرآیند آماری برای پایش، ارزیابی و بهبود عملکرد پروژه‌های فنی با پیچیدگی‌های زیاد استفاده کرد. در این مطالعه از روش‌های کنترل فرآیند آماری و مدیریت ارزش کسب‌شده برای نظارت مؤثر بر پیشرفت زمان‌بندی پروژه استفاده شد. چارچوب پیشنهادی به مدیران کمک کرد تا تصمیم‌های به‌موقع و مبتنی بر داده را برای پیشگیری از شکست پروژه بگیرند. توما، عبدالعظیم و ابراهیم^۱ (۲۰۲۶) دقت و ثبات تخمین‌های هزینه و زمان فعالیت در پروژه‌های ساخت‌وساز را با استفاده از رویکرد کنترل فرآیند آماری ارزیابی کردند. هدف این پژوهش این بود که مشخص کنند آیا فرایند تخمین‌زنی پروژه‌ها از نظر آماری تحت کنترل است یا خیر، اگر نیست چه عواملی باعث آن می‌شود. پُر واضح است که در تمام پژوهش‌های موجود، در کنار مزیت پایش مؤثر شاخص‌های عملکردی پروژه، همواره فرض شده است که داده‌های اولیه کافی برای ساخت و بکارگیری نمودارهای کنترل وجود دارند. افزون بر آنکه شاخص‌های کلیدی عملکرد همواره به طور مستقل و بدون لحاظ کردن متغیرهای تاثیرگذار مورد توجه و پایش قرار گرفته‌اند. دو مورد مذکور از محدودیت‌ها و معایب رویکردهای ارائه شده در ادبیات موضوع می‌باشند.

اما همانطور که اذعان شد، دغدغه اصلی در بیشتر پروژه‌ها این است که معمولاً امکان دستیابی به حجم کافی از داده‌های مورد نیاز برای ایجاد نمودارهای کنترل و پایش دقیق شاخص‌های مدیریت ارزش کسب‌شده فراهم نیست. این کمبود اطلاعات می‌تواند دقت تحلیل‌ها و اعتبار نتایج حاصل از روش‌های آماری سنتی را به‌شدت کاهش دهد. بنابراین، لازم است از ابزارها و روش‌هایی بهره گرفته شود که بتوانند با تکیه بر تعداد محدود داده‌ها نیز روندها و وضعیت شاخص‌های کلیدی پروژه را پایش و ارزیابی نمایند. نمودارهای کنترل خودآغازشونده از جمله ابزارهایی هستند که این قابلیت را فراهم می‌کنند و می‌توانند با حجم نمونه یا داده‌های اولیه کم، فرآیند تحلیل و پایش پروژه را به شکل بهینه پشتیبانی نمایند (ترکروگومز و همکاران^۲، ۲۰۱۴، ژو و همکاران^۳، ۲۰۲۴). با این حال، گاهی پایش مشخصه کیفی مورد نظر همچون شاخص‌های عملکرد هزینه و زمان در پروژه‌های عمرانی بدون در نظر گرفتن اثر متغیرهای تاثیرگذار امکان‌پذیر نیست و شایسته است تا مقادیر متناظر با مشخصه کیفی و یا

¹ Toma, Abdelazim and Ibrahim

² Tercero Gómez et al.

³ Xue et al.

آماره مورد پایش، بر اساس مقادیر به دست آمده از این متغیرهای تاثیرگذار تعدیل شوند (کیوانی، اسدزاده و صمیمی^۱، ۲۰۲۵). به عنوان مثال، شاخصهای عملکردی پروژه معمولاً به عملکرد تیمهای کاری مستقر در پروژه وابسته هستند و برای همین، این مهم مستلزم ارائه رویکردی خاص و کارا می باشد تا این تاثیر را به نوعی لحاظ کند. از این رو نوآوری مقاله حاضر، ارائه چارچوبی استاندارد بر پایه یک نمودار کنترل جدید مبتنی بر متغیرهای موهومی در فرآیند مدیریت پروژه با در نظر گرفتن تاثیر متغیرهای کیفی در حضور داده های اولیه کم و محدود است. همچنین یک روش تحلیل نقطه تغییر مبتنی بر برآورد بیشینه درستنمایی با هدف کاهش مدت زمان جستجو برای شناسایی و حذف علل ریشه ای انحرافات پیشنهاد می شود. این مهم در زمینه ارزیابی و تحلیل روند شاخصهای عملکردی پروژه ها از حساسیت بسیار زیادی برخوردار است. رویکرد پایش پیشنهادی هر دو محدودیت مطرح شده در پروژه ها، شامل حجم ناکافی داده ها برای ساخت رویکرد پایش و پیچیدگی در نظر گرفتن تاثیر عملکرد تیمهای کاری مختلف را به طور همزمان برطرف می کند.

۳ مبانی نظری

۳-۱) مدسازی آماری و ارائه چارچوب استاندارد پایش مبتنی بر مدل

فرض کنید مشخصه کیفی مورد پایش، که آنرا با Y نمایش می دهیم، هر یک از شاخصهای عملکرد هزینه و یا عملکرد زمان باشند که به صورت ماهانه گزارش می شوند. در این راستا آماره زیر که دارای توزیع تقریبی نرمال استاندارد است، برای پایش موثر واقع می شود

(۱)

$$z_i = \text{Sign}((\sqrt{(i-1)/i})(y_i - \bar{y}_{i-1})/\sqrt{S_{i-1}/(i-2)}) \left(\frac{8(i-2)+1}{8(i-2)+3} \right) \sqrt{(i-2) \ln(1 + \frac{((\sqrt{(i-1)/i})(y_i - \bar{y}_{i-1})/\sqrt{S_{i-1}/(i-2)})^2}{(i-2)})}$$

که در رابطه بالا

¹ Keyvani, Asadzadeh and Samimi

$$\bar{y}_i = \bar{y}_{i-1} + (y_i - \bar{y}_{i-1})/i \quad (2)$$

$$S_i = S_{i-1} + (i-1)(y_i - \bar{y}_{i-1})^2/i \quad (3)$$

اما همانطور که بیان شد، گاهی کنترل شاخصهای عملکرد هزینه و زمان در پروژه‌ها تنها با در نظر گرفتن اثر متغیرهای تاثیرگذار میسر است. شایان ذکر این که این متغیرهای تاثیرگذار ممکن است به صورت کمی و یا کیفی باشند که باعث ایجاد ناهمگونی در مقادیر مشخصه کیفی و یا آماره اصلی می‌شوند؛ مسلماً و به طور خاص لحاظ کردن متغیرهای کیفی امری پیچیده است که باید در امر پایش مد نظر قرار گیرد و این امر رویکردهای پایش پیشین را با چالش اساسی روبرو می‌کند. به عنوان مثال، شایسته است تا شاخصهای عملکردی پروژه‌ها بر اساس عملکرد تیم‌های مستقر، در هر ماه از پروژه مورد قضاوت و پایش قرار گیرند. لذا پر واضح است که ناهمگون بودن مشاهدات مساله‌ای بحرانی و مهم است که نیازمند مدلسازی به کمک ابزارهای پیشرفته آماری است. برای این منظور، رویکردهای پایش وابسته به مدل باید مدنظر قرار گیرند؛ رویکردهایی که تلاش می‌کنند از اطلاعات موجود در مدل به صورت مناسب در استقرار سیستم پایش بهره گیرند. ایده اصلی برای حل این مهم، استفاده از مدل‌های رگرسیونی است. یکی از پرکاربردترین مدل‌های رگرسیونی برای لحاظ کردن متغیرهای تاثیرگذار، مدل‌های رگرسیونی تحلیل بقا است. در حقیقت، بکارگیری متغیرهای تاثیرگذار در یک مدل رگرسیونی از پراهمیت‌ترین روشها برای توجیه ناهمگونی موجود در مقادیر مشخصه کیفی یا آماره آن است. از مهمترین این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های رگرسیونی مخاطره متناسب کاکس^۱ اشاره کرد. در مدل‌های رگرسیونی مخاطره متناسب کاکس، متغیر تاثیرگذار (x) بر تابع مخاطره آماره یا مشخصه کیفی تاثیر خود را اعمال می‌کنند. از این رو تابع مخاطره برای z به شرط x به شکل زیر است:

$$h(z|x) = h_0(z)g(x) \quad (4)$$

که $g(x)$ یک تابع غیرمنفی مشخص و $h_0(z)$ یک تابع مخاطره پایه اختیاری است. یک مدل مرسوم و متداول برای $g(x)$ همان $\exp(\beta x)$ است. در برخی موارد، مشخصه کیفی مورد

¹ Cox Proportional Hazards

نظر به متغیرهای تاثیرگذاری وابسته است که از جنس کیفی هستند و برای همین امکان مدلسازی از طریق روش بالا میسر نیست. فرض کنید مقدار مشخصه کیفی همچون شاخصهای عملکردی پروژه‌ها متأثر از تابعی از عوامل و متغیرهای کیفی ورودی قابل مشاهده است. در چنین شرایطی باید مدل رگرسیون مخاطره متناسب را برای لحاظ کردن متغیرهای کیفی بسط دهیم. رویکرد کارا در این شرایط، در نظر گرفتن متغیرهای کیفی در یک مدل واحد به کمک متغیرهای موهومی^۱ است. در این حالت، متغیر کیفی یا دسته‌ای به کمک $q-1$ متغیر موهومی در مدل لحاظ می‌شود که q تعداد سطح مرتبط با متغیر کیفی است. از این رو، با فرض همکاری ۳ تیم مختلف در پروژه (در نظر گرفتن تنها یک متغیر تاثیرگذار در ۳ سطح)، تابع مخاطره مشخصه کیفی با دو متغیر موهومی به قرار زیر است:

$$h(z | k_1) = h_0(z) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31}) \quad (5)$$

k_{jr} مرتبط با سطح j از r آمین متغیر دسته‌ای (تیم کاری پروژه) است که هرگاه r آمین متغیر دسته‌ای در سطح j باشد، مساوی یک است، و در غیر اینصورت مساوی صفر خواهد بود. همچنین k_{jr} ضریب مرتبط با سطح j از r آمین متغیر کیفی (تیم کاری پروژه) است. از این رو، توابع بقا و چگالی احتمال نیز به صورت زیر توسعه داده می‌شوند:

$$s(z | k_1) = s_0(z) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31}) = e^{-H_0(z) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31})} \quad (6)$$

$$f(z | k_1) = h_0(z) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31}) e^{-H_0(z) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31})} \quad (7)$$

در ادامه با رفع محدودیت‌های داده‌های اولیه کم و تاثیر عملکرد متفاوت تیم‌های کاری مختلف، رویکرد پایش پیشنهادی مبتنی بر حدود احتمال^۲ مورد توجه قرار می‌گیرد. نمودارهای کنترل مورد بحث در این زیربخش تحت دو سناریوی حضور و عدم حضور متغیر تاثیرگذار کیفی بسط داده خواهند شد. شایان ذکر است که نمودارهای کنترل یکطرفه به منظور شناسایی شیفت‌های کاهشی در میانگین شاخصهای عملکردی پروژه‌ها توسعه داده خواهند شد، زیرا کشف کاهش این شاخصها هدف اصلی در کنترل پروژه است. ابتدا ساخت نمودارهای کنترل بر مبنای روابط

¹ Dummy Variables

² Probability-limits based Monitoring Schemes

ابتدایی بدون در نظر گرفتن متغیر تاثیرگذار مورد توجه قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن مقداری مشخص برای خطای نوع اول (احتمال هشدار اشتباهی) حد کنترل پایین این نمودار کنترل که با LCL نمایش داده می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \int_{-\infty}^{LCL} f(z) dz = \int_{-\infty}^{LCL} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8)$$

وقتی آماره مورد ترسیم پایین‌تر از حد کنترل پایین قرار گیرد، کاهش در میانگین و حالت خارج از کنترل مشهود است که باید اقدامات اصلاحی در جهت جلوگیری از آثار مخرب بیشتر و کاهش در شاخصهای عملکردی پروژه‌های عمرانی صورت پذیرد. حالا با توجه به مسئله حال حاضر و با در نظر گرفتن یک متغیر کیفی تاثیرگذار، حد کنترل پایین رویکرد پایش با حدود احتمال پیشنهادی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \sum_{d_1} \left(\int_{-\infty}^{LCL} \left(h_0(z) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31}) e^{-H_0(z) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31})} \right) dz \right) \quad (9)$$

$(d_{21} + d_{31} \leq 1)$

که در نتیجه داریم

$$\alpha = \sum_{d_1} \left(1 - e^{-H_0(LCL) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31})} \right) \quad (10)$$

$(d_{21} + d_{31} \leq 1)$

تعمیم این نمودار کنترل پیشنهادی یکطرفه به یک نمودار کنترل دوطرفه نیز امری آسان است، اما ماهیت مسئله و اهمیت کشف شیفتهای کاهش در شاخصهای عملکردی پروژه‌ها، ساخت و توسعه نمودارهای کنترل یکطرفه را مورد توجه قرار داده است. در ادامه تحلیل نقطه تغییر با هدف کاهش مدت زمان جستجو برای شناسایی و حذف علل ریشه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مهم در زمینه ارزیابی و تحلیل روند شاخصهای عمرانی پروژه‌ها از حساسیت بسیار زیادی برخوردار است.

۳-۲) ارائه رویکرد نقطه تغییر مبتنی بر برآوردکننده بیشینه درست‌نمایی^۱

تحلیل نقطه تغییر یکی از ابزارهای تحلیل آماری پیشرفته در حوزه کنترل کیفیت آماری با

¹ Maximum Likelihood Estimation (MLE)

هدف شناسایی لحظه‌هایی است که در آن‌ها ویژگی‌های یک فرآیند از حالت تحت کنترل به حالت خارج از کنترل تغییر می‌کند. قطعاً در یک سیستم تولیدی یا خدماتی، فرض کلیدی این است که فرآیند در شرایط پایدار، دارای توزیع و پارامترهای آماری ثلثیت، نظیر میانگین و واریانس است. اما چنانچه هر یک از آنها دستخوش تغییری شوند، نمودارهای کنترل به عنوان ابزاری برای کشف سریع حلالتهای خارج از کنترل دست به کار خواهند شد و پس از دریافت سیگنال خارج از کنترل، ریشه‌یابی و انجام اقدام اصلاحی توصیه می‌شود. برای این منظور، تحلیل نقطه تغییر، ابزاری است که در شناسایی نقطه شروع این تغییرات نقش کلیدی ایفا می‌کند، زیرا لحظه دریافت سیگنال توسط نمودار کنترل، به زمان تغییر در فرآیند اشاره ندارد. از این رو، نمودارهای کنترل با وجود کارایی و طولانی زیاد در کنترل و پایش فرآیندها، طولانی تشخیص زمان واقعی اختلالات به وجود آمده در فرآیند را ندارند. در متداولترین حالت تحلیل نقطه تغییر، تغییرات معمولاً به صورت پله‌ای^۱ لحاظ می‌شوند. تغییر پله‌ای به وضعیتی گفته می‌شود که مقدار یک پارامتر فرایندی به صورت ناگهانی و در یک لحظه، از یک سطح ثابت به سطحی جدید منتقل می‌شود. این تغییر معمولاً بدون مقدمه و به شکل یک جهش آنی رخ می‌دهد و پیش از وقوع آن، هیچ روند یا نشانه تدریجی قابل مشاهده نیست. سرعت تشخیص این تغییرات سریع و آسان است. مثلاً اگر فرایند تا زمان τ دارای میانگین μ_0 باشد و پس از آن میانگین به μ_1 تغییر کند، داریم:

$$z_t = \begin{cases} \mu_0 & t < \tau \\ \mu_1 & t \geq \tau \end{cases} \quad (11)$$

در روش برآورد بیشینه درستنمایی معمولاً مفروض می‌شود که داده‌ها از یک توزیع مشخص پیروی می‌کنند و هدف، شناسایی بهینه زمان τ است که پارامتر توزیع (میانگین، واریانس یا هر پارامتر دیگر) به صورت ناگهانی تغییر می‌کند. با فرض بررسی شیفیت در میانگین داده‌ها، تابع درستنمایی برای یک نقطه تغییر فرضی τ به شکل زیر است:

$$L(\mu_0, \mu_1, \tau) = \prod_{t=1}^{\tau} f(z_t | \mu_0) \prod_{t=\tau+1}^n f(z_t | \mu_1) \quad (12)$$

¹Step Change

بعد از گرفتن لگاریتم از تابع درستنمایی داریم:

$$\ln L(\mu_0, \mu_1, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} \ln f(z_t | \mu_0) + \sum_{t=\tau+1}^n \ln f(z_t | \mu_1) \quad (13)$$

در شرایط واقعی بیان شده در این پژوهش و حضور تیم‌های مختلف کاری مستقر در پروژه به عنوان متغیر تاثیرگذار کیفی و بکارگیری رابطه (۷)، لگاریتم تابع درستنمایی به قرار زیر است:

(۱۴)

$$\ln L(\mu_0, \mu_1, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} \ln \left(h_0(z_t | \mu_0) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31}) e^{-H_0(z_t | \mu_0) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31})} \right) + \sum_{t=\tau+1}^n \ln \left(h_0(z_t | \mu_1) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31}) e^{-H_0(z_t | \mu_1) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31})} \right)$$

در رابطه بالا، باید مقدار μ_1 را طوری برآورد کنیم تا بیشینه عبارت برای لگاریتم تابع درستنمایی به دست آید. لذا با گرفتن مشتق جزئی داریم:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \mu_1} = \frac{\partial \sum_{t=\tau+1}^n \ln \left(h_0(z_t | \mu_1) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31}) e^{-H_0(z_t | \mu_1) \exp(\xi_{21} k_{21} + \xi_{31} k_{31})} \right)}{\partial \mu_1} \quad (15)$$

و با مساوی صفر قرار دادن و حل رابطه، برآورد بیشینه درستنمایی حاصل خواهد شد. نقطه τ که لگاریتم درستنمایی را بیشینه می‌کند، به عنوان نقطه تغییر انتخاب می‌شود. در بخش بعد به بررسی عملکرد رویکردهای پایش موجود و پیشنهادی و ارزیابی برآوردکننده نقطه تغییر خواهیم پرداخت.

۴ روش پژوهش

روش پژوهش در این مقاله مبتنی بر مطالعات شبیه‌سازی گسترده است که به منظور ارزیابی عملکرد نمودارهای کنترل مبتنی بر حدود احتمال موجود و پیشنهادی به کمک معیار متوسط طول دنباله صورت می‌گیرد. همچنین شبیه‌سازی به منظور بررسی کارایی برآوردکننده نقطه تغییر پارامتریک بیشینه درستنمایی انجام خواهد شد. در نهایت بررسی داده‌های اضافی بر کارایی برآوردکننده نقطه تغییر مورد توجه قرار خواهد گرفت.

نکته قابل ذکر این که در نمودار کنترل با حدود احتمال، محاسبه مقادیر متوسط طول دنباله به طور دقیق و از طریق بکارگیری فرمولهای ریاضی صورت می‌پذیرد. احتمال ارتکاب خطای نوع

II (β) برای نمودار کنترل با حدود احتمال بدون لحاظ کردن متغیر تاثیرگذار کیفی و با لحاظ کردن متغیرهای تاثیرگذار کیفی به ترتیب توسط فرمول های ۱۶ و ۱۷ محاسبه می شوند:

$$\beta = \int_{LCL}^{\infty} f(z | \mu_1) dz = \int_{LCL}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0.5(z-\mu_1)^2} dz \quad (16)$$

$$\beta = \sum_{d_1} e^{-H_0(LCL|\mu_1) \exp(\xi_{21}k_{21} + \xi_{31}k_{31})} \quad (17)$$

$(d_{21} + d_{31} \leq 1)$

شایان ذکر این که حد کنترل پایین هردو رویکرد پایش به گونه ای تعیین شده که متوسط طول دنباله تحت کنترل ۲۰۰ خواهد بود. همچنین عملکرد نمودارهای کنترل به ازای دو مقدار مختلف نقطه تغییر (τ) ۱۰ و ۳۰ ارزیابی می شود. علاوه بر این مقادیر متوسط (امید ریاضی) اربیی و خطای استاندارد برآوردکننده نقطه تغییر پیشنهادی تحت شیفت های مختلف با شبیه سازی های گسترده با ۱۰۰۰۰ بار تکرار بررسی می شود. در انتها، بررسی تاثیر داده های اضافی (W) مورد توجه قرار می گیرد که پس از کشف شیفت برای بهبود تحلیل گرفته می شود. این مهم به ازای دو مقدار نقطه تغییر ۱۰ و ۳۰ و دو مقدار ۵ و ۱۰ برای W گزارش می شود. در بخش بعد به بررسی یافته های پژوهش می پردازیم.

۵ یافته های پژوهش

جداول ۱ و ۲ نتایج ارزیابی عملکرد نمودارهای کنترل مبتنی بر حدود احتمال موجود و پیشنهادی را نشان می دهند.

جدول ۱. ارزیابی عملکرد نمودارهای کنترل مبتنی بر حدود احتمال موجود و پیشنهادی به ازای نقطه تغییر ۱۰

نمودار کنترل	$\mu_1 = 0$	$\mu_1 = -0.25$	$\mu_1 = -0.5$	$\mu_1 = -1$	$\mu_1 = -2$	$\mu_1 = -3$
موجود	۲۰۰	۱۷۰.۹۱	۱۳۸.۱۲	۷۹.۵۹	۳۰.۸۱	۹.۹۰
پیشنهادی	۲۰۰	۱۵۵.۲۳	۱۲۵.۵۷	۶۸.۷۸	۲۴.۲۱	۶.۸۴

جدول ۲. ارزیابی عملکرد نمودارهای کنترل مبتنی بر حدود احتمال موجود و پیشنهادی به ازای نقطه تغییر ۳۰

نمودار کنترل	$\mu_1 = 0$	$\mu_1 = -0.25$	$\mu_1 = -0.5$	$\mu_1 = -1$	$\mu_1 = -2$	$\mu_1 = -3$
موجود	۲۰۰	۱۶۷.۴۴	۱۳۱.۶۱	۷۶.۰۶	۲۷.۱۰	۸.۹۲
پیشنهادی	۲۰۰	۱۵۱.۹۵	۱۲۰.۴۸	۶۶.۲۱	۲۲.۶۳	۵.۷۸

نتایج حاکی از آن است که عملکرد نمودار کنترل مبتنی بر حدود احتمال پیشنهادی که تاثیر متغیر تاثیرگذار کیفی را لحاظ می‌کند، از نمودار کنترل موجود بهتر است، چرا که مقادیر متوسط طول دنباله خارج از کنترل به ازای یک شیفت خاص بسیار کمتر هستند. این اختلاف به‌ویژه در کشف شیفت‌های کوچک و متوسط مشهود است. هرچه میزان شیفت بزرگتر می‌شود، عملکرد دو نمودار کنترل به یکدیگر نزدیک می‌شود. به عنوان مثال، به ازای شیفت ۰.۵- و نقطه تغییر ۱۰، مقادیر متوسط طول دنباله برای نمودارهای کنترل موجود و پیشنهادی به ترتیب ۱۳۸.۱۲ و ۱۲۵.۵۷ است که نشان از کشف بهتر نمودار کنترل پیشنهادی دارد.

همچنین واضح است که هرچه نقطه تغییر افزایش می‌یابد، عملکرد هر دو نمودار کنترل بهبود می‌یابد. این مساله به خاطر افزایش تعداد نمونه‌های تحت کنترل پیش از رخداد شیفت است، بدین معنا که هر چه تعداد نمونه‌های تحت کنترل پیش از نقطه تغییر افزایش پیدا می‌کند، تخمین پارامترها دقیقتر و بهتر خواهد بود و در نتیجه عملکرد نمودار کنترل بهبود می‌یابد. شایان ذکر است نمودار کنترل پیشنهادی در مقابل تغییر محل رخداد شیفت استوار و مقاوم‌تر است. این خاصیت در عمل بسیار سودمند است، زیرا عملکرد این رویکرد پایش به ازای تغییر نقطه تغییر، در مقایسه با رویکرد پایش موجود، نزدیکتر به یکدیگر است.

در کل، بررسی اثرات حاصل از نادیده گرفتن عملکرد تیم‌های کاری مختلف در مشاهدات مرتبط با شاخصهای عملکردی پروژه، دلالت بر آن دارد که برای پایش بهینه، باید این متغیر تاثیرگذار در روند مدلسازی مساله لحاظ شود. حتی در شرایطی که امکان اندازه‌گیری مشاهدات مرتبط با یک متغیر تاثیرگذار امکان‌پذیر نباشد، باید به دنبال راهکاری برای دخیل کردن این متغیر بود که در این راستا بکارگیری متغیرهای موهومی پیشنهاد شد. به طور خلاصه، انتخاب مدل مناسب و ساخت رویکرد پایش مبتنی بر مدل، دو عنصر اساسی در پایش بهینه هستند که کشف حالت‌های خارج از کنترل را سرعت می‌بخشند.

اما همانطور که بیان شد، یکی از مهمترین مسائلی که کاربران در بکارگیری هر نمودار کنترل با آن روبرو هستند، برآورد (تخمین) زمان تغییر فرآیند پس از مشاهده هشدار از نمودار کنترل است. وقتی نمودار کنترل، وجود انحراف بادلایل در فرآیند را هشدار می‌دهد، کاربر فرآیند جستجو برای شناسایی ریشه و منبع انحراف را آغاز می‌کند. از این رو اطلاع داشتن از اینکه تغییر یا شیفت در چه زمانی رخ داده است، می‌تواند فرآیند جستجو و ریشه‌یابی را تا حد بسیار زیادی ساده کند. اگر بتوان زمان تغییر را تعیین کرد، تمرکز روی پنجره کوچکی حول زمان معطوف می‌شود و در زمان کمتری ریشه انحراف بادلایل مشخص و برای حذف آن اقدام می‌شود. برای همین در ادامه، مطالعات شبیه‌سازی گسترده برای تحلیل نقطه تغییر تحت شیفت‌های مختلف بررسی می‌شود. جداول ۳ و ۴ عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر بیشینه درست‌نمایی $\hat{t}_{MLE}$ را به ازای نقاط تغییر مختلف برای نمودار کنترل مبتنی بر حدود احتمال پیشنهادی نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر متوسط (امید ریاضی) اریبی برآورد نقطه تغییر به همراه مقادیر خطای استاندارد متناظر آنها گزارش شده است.

جدول ۳. ارزیابی عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر بیشینه درست‌نمایی $\hat{t}_{MLE}$ به ازای نقطه تغییر ۱۰

شاخص	$\mu_1 = -0.25$	$\mu_1 = -0.5$	$\mu_1 = -1$	$\mu_1 = -2$	$\mu_1 = -3$
متوسط اریبی	۱۴۰.۱۲	۱۰۸.۶۵	۴۱.۸۴	۱۰.۵۹	۴.۷۴
خطای استاندارد	۱.۳۵	۰.۹۸	۰.۳۸	۰.۰۸	۰.۰۳

جدول ۴. ارزیابی عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر بیشینه درست‌نمایی $\hat{t}_{MLE}$ به ازای نقطه تغییر ۳۰

شاخص	$\mu_1 = -0.25$	$\mu_1 = -0.5$	$\mu_1 = -1$	$\mu_1 = -2$	$\mu_1 = -3$
متوسط اریبی	۱۱۰.۵۶	۸۱.۲۵	۲۲.۱۷	۷.۴۵	۲.۰۵
خطای استاندارد	۱.۰۴	۰.۷۴	۰.۱۸	۰.۰۵	۰.۰۱

مطالعه و تحلیل دقیق نتایج نشان می‌دهد که به ازای یک نقطه تغییر مشخص، هرچه میزان شیفت بزرگتر شود، مقادیر متوسط اریبی و خطای استاندارد متناظر با آن کاهش می‌یابند. به عنوان مثال، به ازای نقطه تغییر ۱۰ و تغییر شیفت از کوچک به بزرگ، میزان متوسط اریبی برای برآورد نقطه تغییر از ۱۴۰.۱۲ به ۴.۷۴ کاهش پیدا کرده است. همچنین واضح است که

هرچه تغییر دیرتر رخ دهد (نقطه تغییر بزرگتر باشد)، مجدد مقادیر متوسط اریبی و خطای استاندارد کاهش پیدا می‌کنند. مثلاً به ازای شیفت ۱-، مقادیر متوسط اریبی برای برآورد نقطه تغییر به ازای نقاط تغییر ۱۰ و ۳۰ به ترتیب برابر با ۴۱.۸۴ و ۲۲.۱۷ می‌باشند. این بهبود نیز به دلیل افزایش داده‌های تحت کنترل پیش از رخداد شیفت است، بدین معنا که هر چه تعداد این داده‌ها افزایش پیدا می‌کند، تخمین اولیه پارامترها با دقت بیشتری انجام می‌شود و در نتیجه عملکرد برآوردکننده بیشینه درست‌نمایی بهبود می‌یابد.

در ادامه به بررسی تاثیر داده‌های اضافی (W) پرداخته شده که پس از کشف شیفت (دریافت هشدار از نمودار کنترل) برای بهبود تحلیل گرفته می‌شود. هدف از این مهم، بررسی بهبود عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر بیشینه درست‌نمایی است. از آنجا که تحلیل جدول ۳ و ۴ نشان‌دهنده اریبی زیاد این دو برآوردکننده نقطه تغییر به‌ویژه در شیفت‌های کوچک و مقادیر نقطه تغییر کم بود، به دنبال راهکاری برای بهبود کارایی این برآوردکننده و کاهش میزان اریبی هستیم. جداول ۵ و ۶ و شکل‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل را به ازای دو مقدار نقطه تغییر ۱۰ و ۳۰ و دو مقدار ۵ و ۱۰ برای W گزارش می‌کنند.

جدول ۵. بررسی تاثیر داده‌های اضافی بر عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر $\hat{\tau}_{MLE}$ به ازای $W=5$ و نقطه

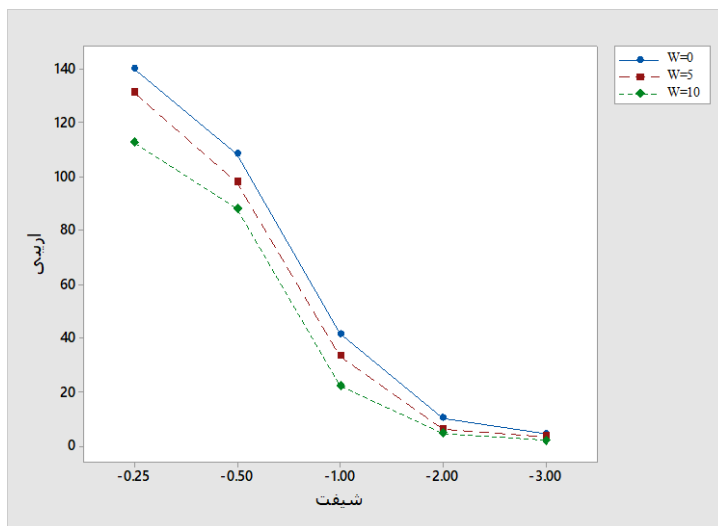
تغییرهای مختلف

$\tau=10$					
شاخص	$\mu_1 = -0.25$	$\mu_1 = -0.5$	$\mu_1 = -1$	$\mu_1 = -2$	$\mu_1 = -3$
متوسط اریبی	۱۳۱.۲۲	۹۸.۲۲	۳۳.۵۲	۶.۲۸	۳.۵۵
خطای استاندارد	۱.۲۱	۰.۹۲	۰.۲۹	۰.۰۴	۰.۰۲
$\tau=30$					
متوسط اریبی	۱۰۰.۲۵	۶۵.۵۴	۱۳.۸۵	۴.۸۹	۱.۹۲
خطای استاندارد	۰.۹۷	۰.۷۲	۰.۱۱	۰.۰۳	۰.۰۱

جدول ۶. بررسی تاثیر داده‌های اضافی بر عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر $\hat{\tau}_{MLE}$ به ازای $W=10$ و نقطه تغییرهای مختلف

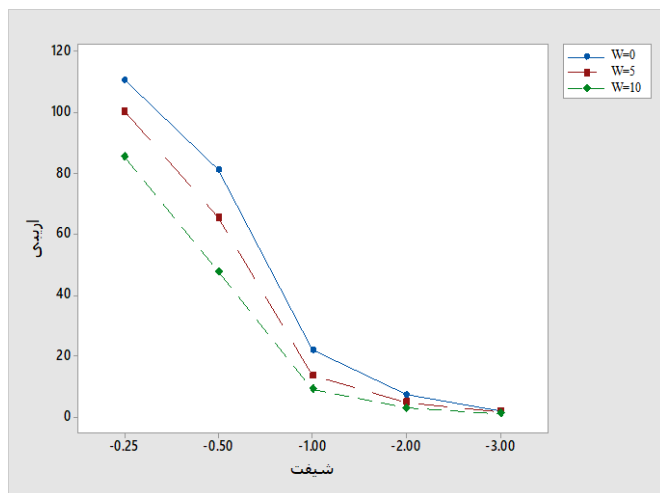
$\tau=10$					
شاخص	$\mu_1 = -0.25$	$\mu_1 = -0.5$	$\mu_1 = -1$	$\mu_1 = -2$	$\mu_1 = -3$
متوسط اریبی	۱۱۲.۶۵	۸۸.۲۳	۲۲.۴۷	۴.۸۵	۲.۳۱
خطای استاندارد	۱.۰۶	۰.۸۱	۰.۲۱	۰.۰۳	۰.۰۱
$\tau=30$					
متوسط اریبی	۸۵.۳۲	۴۷.۷۸	۹.۲۵	۳.۱۱	۱.۲۴
خطای استاندارد	۰.۷۹	۰.۵۸	۰.۰۸	۰.۰۲	۰.۰۰۹

نتایج به وضوح دلالت بر بهبود عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر دارد؛ به این معنی که هر چه مقدار داده‌های اضافی (W) بزرگتر می‌شود، کارایی بهبود می‌یابد. به بیان دیگر، با افزایش داده‌های اضافی، میزان متوسط اریبی و خطای استاندارد کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، به ازای شیف ۰.۵- و نقطه تغییر ۳۰، مقدار متوسط اریبی برای برآوردکننده نقطه تغییر به ازای داده‌های اضافی ۰، ۵، و ۱۰ به ترتیب ۸۱.۲۵، ۶۵.۵۴ و ۴۷.۷۸ خواهد بود. پُر واضح است که هر چه میزان شیف بزرگتر باشد، افزایش داده‌های اضافی منجر به کاهش بیشتری در متوسط اریبی (یا افزایش نااریبی) می‌شود (میزان اریبی به سمت صفر می‌رود) که قطعاً به مدیر پروژه برای شناسایی دقیق‌تر نقطه تغییر در شاخص‌های مدیریت ارزش کسب‌شده و ریشه انحراف بادل و انجام اقدامات اصلاحی کمک شایانی می‌کند.



شکل ۱. بررسی تاثیر داده‌های اضافی بر متوسط میزان ارببی بر آوردکننده نقطه تغییر به ازای ۵، ۱۰،

$$\tau = 10 \text{ و } W = 0$$



شکل ۲. بررسی تاثیر داده‌های اضافی بر متوسط میزان ارببی بر آوردکننده نقطه تغییر به ازای ۵، ۱۰،

$$\tau = 30 \text{ و } W = 0$$

یافته‌های این پژوهش تنها به بهبود یک شاخص آماری محدود نمی‌شود، بلکه استاندارد مدیریت را طرح می‌کند که مسیر تصمیم‌گیری در پروژه‌ها را تغییر می‌دهد. وقتی نمودار کنترل پیشنهادی، متوسط طول دنباله (ARL) را در تشخیص انحراف از ۱۳۸.۱۲ به ۱۲۵.۵۷ کاهش می‌دهد، آن هم برای شیف‌ت کوچکی به اندازه ۰.۵- در نقطه تغییر ۱۰، معنای عملیاتی‌اش این است که مدیر پروژه تقریباً ۱۳ دوره زودتر از وقوع یک انحراف واقعی مطلع می‌شود. این زمان، در پروژه‌های واقعی یعنی فرصت برای اقدام اصلاحی، پیش از آنکه هزینه‌ها از کنترل خارج شوند. دستاورد دوم که برای مدیران پروژه‌ها بسیار ارزشمند است، تخمین نقطه تغییر است. در رویکردهای سنتی مدیریت ارزش کسب‌شده، مدیر پروژه با بررسی شاخص‌ها، صرفاً متوجه بروز انحراف در همان دوره کنترل می‌شود، اما اینکه این انحراف از چند دوره قبل‌تر شروع شده میسر نیست. در این رویکرد کلاسیک، معمولاً مدیران پروژه از کانال برگزاری جلسات زمان‌بر با ارکان پروژه، درصدد یافتن علت اصلی و زمان بروز انحراف هستند که رسیدن به جواب دقیق و قابل اطمینان تقریباً محال است؛ از دستاوردهای مدیریتی ارزشمند این پژوهش تخمین نقطه تغییر و زمان آغاز انحراف است که می‌تواند کمک شایانی به یافتن دلیل ریشه‌ای آن در پروژه نماید و در یک پروژه واقعی، این بهبود می‌تواند از بروز هزینه‌های گزاف به پروژه و اختلافات و دعاوی قراردادی جلوگیری کند؛ و همچنین مدیر پروژه را بسیار زودتر از روش‌های مرسوم، از نیاز به اصلاح و تغییر برنامه زمان‌بندی پروژه آگاه نماید. اما کاربرد مدیریتی فراتر از این اعداد است. مدیری که می‌داند انحراف در کدام بازه رخ داده (مثلاً بین دوره ۱۰ تا ۱۵، نه ۱۰ تا ۱۵۰) می‌تواند علت‌یابی را هدفمند پیش ببرد؛ آیا تأخیر از تأمین‌کننده بوده؟ آیا تغییر در ترکیب تیم رخ داده؟ آیا یک ریسک محیطی فعال شده؟ به‌جای جلسات طولانی و بی‌حاصل برای ریشه‌یابی، تیم پروژه با دامنه‌ای محدود و مشخص مواجه است. این همان «مدیریت پیشگیرانه» است که ادبیات، راهنماها و استانداردهای مدیریت پروژه همواره بر آن تأکید دارند، اما کمتر ابزار عملیاتی برای آن ارائه داده‌اند. نکته‌ای که نباید از نظر دور داشت این است که جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهند بهبود عملکرد نمودار پیشنهادی، محدود به یک نقطه تغییر خاص یا یک اندازه شیف‌ت نیست. این پایداری در شرایط مختلف، اعتماد مدیر را برای استفاده عملیاتی جلب می‌کند. در واقع، این پژوهش یک نقشه‌راه استاندارد برای پیاده‌سازی در سیستم‌های اطلاعات پروژه ارائه می‌دهد، نمودار کنترل با حدود احتمال پیشنهادی، هشدار را صادر می‌کند؛ تحلیل نقطه تغییر، زمان تقریبی انحراف را مشخص می‌کند؛ و داده‌های اضافی به یافتن زمان دقیق‌تر انحراف کمک می‌کند. این چرخه استاندارد ساده اما دقیق، عملاً یک سیستم هشدار زودهنگام را برای پروژه‌ها ایجاد

می‌کند که نه تنها وجود مشکل در پروژه را نمایان می‌کند، بلکه می‌تواند با تحلیل علل ریشه‌ای زمان دقیق بروز مشکل را نیز مشخص کند. یکی دیگر از چالش‌های کلیدی در مدیریت پروژه‌های اجرایی این است که بسیاری از مدیران، به دلیل کمبود داده‌های اولیه، از به‌کارگیری روش‌های پیشرفته و یکپارچه‌ای نظیر مدیریت ارزش کسب‌شده صرف‌نظر کرده و به شاخص‌های ساده و سنتی راندمان بسنده می‌کنند. این نگرش، بر پایه یک پیش‌فرض مدیریتی نادرست شکل می‌گیرد؛ اینکه استفاده از ابزارهای دقیق پایش، تنها در حضور پایگاه داده‌های حجیم و سابقه طولانی عملکرد پروژه امکان‌پذیر است. نوآوری مدیریتی روش پیشنهادی در این پژوهش دقیقاً در شکستن همین بن‌بست اطلاعاتی و تغییر نگرش پایش پروژه نهفته است. این رویکرد با ارائه یک مدل پایش خودآغازشونده، به مدیران پروژه این اطمینان و ابزار را می‌دهد که حتی در پروژه‌هایی با ماهیت خاص، پروژه‌های جدید یا محیط‌هایی که با فقر داده‌های تاریخی مواجه‌اند، بتوانند فرآیند کنترل هوشمند و علمی را از همان مراحل آغازین شروع کنند. از منظر تصمیم‌گیری سازمانی، این دستاورد محدودیت‌های فنی را از پیش پای مدیر برمی‌دارد و به او اجازه می‌دهد تا به جای اتکا به شهود یا داده‌های ناقص، بر مبنای تحلیل‌های معتبر به تصمیم‌سازی بپردازد و ریسک انحرافات پنهان را در نقطه آغاز مهار کند.

۶ موردکاوی

در این بخش به منظور ارزیابی و درک بهتر عملکرد رویکردهای پایش موجود و پیشنهادی و برآوردکننده نقطه تغییر متناظر با آنها، یک موردکاوی برگرفته از یک پروژه عمرانی واقعی مورد توجه قرار می‌گیرد. واضح است که هدف از پایش شاخصهای مدیریت ارزش کسب‌شده در پروژه مذکور، یافتن سریع هرگونه تخطی در زمان و هزینه برآوردشده، ریشه‌یابی مشکلات و انجام اقدامات اصلاحی است که مدیر پروژه نسبت به آن مسئول و پاسخگو می‌باشد. در این پروژه عمرانی، مقادیر مرتبط با شاخصهای SPI و CPI به صورت ماهانه محاسبه و برای یک بازه ۳۰ ماهه (بخشی از زمان انجام پروژه) در جدول ۷ به شرح زیر گزارش شده‌اند.

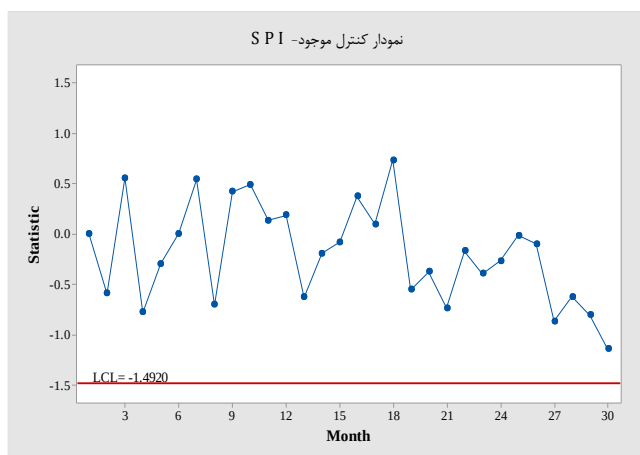
جدول ۷. بخشی از داده‌های مربوط به یک پروژه عمرانی در مطالعه موردی

شماره تیم مستقر	CPI	SPI	ماه	شماره تیم مستقر	CPI	SPI	ماه
۱	۰.۹۷۵۶	۱.۲۵۴۶	۱۶	۱	۱.۱۵۱۴	۱.۲۴۱۸	۱
۱	۰.۹۸۳۲	۱.۱۸۱۰	۱۷	۴	۰.۹۸۵۰	۰.۹۷۶۲	۲
۴	۰.۸۹۵۰	۱.۲۸۷۴	۱۸	۱	۱.۲۴۴۵	۱.۲۱۴۱	۳
۳	۰.۸۵۵۶	۰.۹۸۲۴	۱۹	۲	۰.۹۷۱۶	۰.۹۹۱۴	۴
۱	۰.۸۶۷۴	۱.۲۳۶۳	۲۰	۲	۱.۱۱۴۷	۱.۱۵۰۸	۵
۱	۰.۸۸۳۴	۱.۱۲۴۷	۲۱	۳	۱.۱۶۵۵	۱.۲۰۹۵	۶
۱	۰.۹۱۸۹	۰.۹۹۲۳	۲۲	۴	۰.۹۷۶۹	۱.۰۶۶۷	۷
۲	۰.۹۸۴۹	۱.۰۵۹۳	۲۳	۴	۱.۰۸۶۲	۰.۹۸۲۵	۸
۲	۰.۹۴۷۵	۱.۱۰۲۴	۲۴	۳	۰.۸۸۶۶	۱.۲۵۹۸	۹
۴	۰.۷۹۹۴	۰.۹۶۸۸	۲۵	۳	۰.۹۴۲۲	۱.۱۵۹۸	۱۰
۴	۰.۸۸۱۵	۰.۹۸۰۵	۲۶	۳	۰.۹۲۶۷	۱.۲۳۴۹	۱۱
۴	۰.۸۴۶۳	۰.۹۷۵۵	۲۷	۲	۰.۹۳۵۴	۱.۱۵۴۹	۱۲
۴	۰.۸۴۷۲	۰.۸۶۸۹	۲۸	۲	۰.۸۵۹۰	۰.۹۸۵۶	۱۳
۳	۰.۸۹۶۹	۰.۹۲۸۱	۲۹	۲	۰.۸۸۷۲	۱.۳۸۲۹	۱۴
۳	۰.۷۸۹۹	۰.۸۹۹۸	۳۰	۲	۰.۸۴۱۸	۱.۰۷۵۴	۱۵

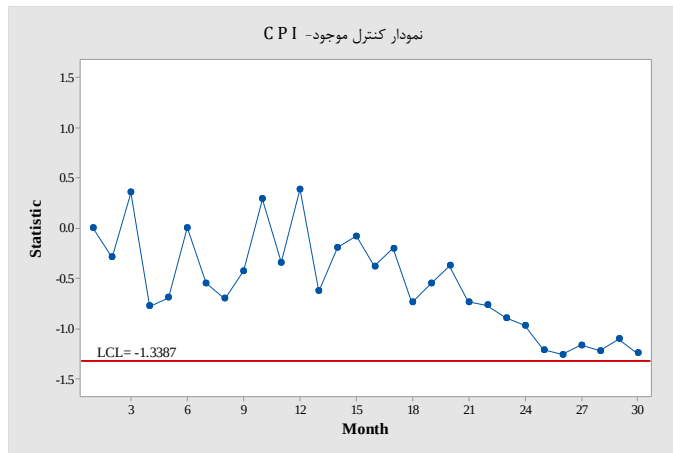
با توجه به اینکه در طول بازه ۳۰ ماهه در نظر گرفته شده، مدیر پروژه از تیم‌های مختلفی استفاده کرده و لذا ثبات در عملکرد تیم‌های مختلف پروژه وجود ندارد، یک راه‌حل، استفاده از نمودارهای کنترل مجزا برای بررسی و پایش عملکرد هر تیم مستقر در پروژه است. اما راه حل کارا، استفاده از متغیرهای موهومی (مجازی) برای لحاظ کردن تاثیر این متغیر است که از جنس کیفی و اما قابل مشاهده و اندازه‌گیری هستند تا عملکرد تیم‌های مختلف به طور همزمان در مدلسازی منعکس شود. برای همین در جدول ۷، چهار تیم مختلف مشخص شده‌اند که امور مرتبط با پروژه

را در ماه‌های مختلف عهده دار بودند. شکل‌های ۳ و ۴ عملکرد هر یک از دو نمودار کنترل خودآغازشونده را نشان می‌دهند.

همانطور که مشخص است هیچ یک از نمودارهای کنترل تغییر محسوس در شاخص زمانی SPI را نشان نمی‌دهند. اما تحلیل و بررسی نمودارهای کنترل برای پایش شاخص CPI نمایانگر این است که نمودار کنترل پیشنهادی در نقطه ۲۵ سیگنال خارج از کنترل صادر کرده است. این در حالی است که نمودار کنترل موجود که تاثیر متغیر تاثیرگذار کیفی قابل مشاهده را لحاظ نکرده است، هیچ‌گونه هشدار خارج از کنترلی صادر نکرده است. این بدان مفهوم است که مدیر پروژه بسیار سریعتر و کارا تر می‌تواند به دنبال یافتن ریشه انحراف بادل و انجام اقدامات اصلاحی مناسب باشد تا پروژه در ادامه مسیر به لحاظ شاخص هزینه، درگیر دغدغه و مشکلات بیشتر نشود. به این منظور، تحلیل نقطه تغییر در دستور کار قرار گرفته و از برآوردگر نقطه تغییر MLE برای برآورد زمان ابتدایی (آغازین) تغییر استفاده می‌شود. نتایج محاسبات حاکی از این است که مقدار $\hat{t}_{MLE} = 15$ با بکارگیری لگاریتم تابع درستنمایی تخمین زده شده است. تفسیر این کمیت به این صورت است که نمودار کنترل پیشنهادی بعد از ۱۰ نقطه قادر به کشف شیفت رخ داده در شاخص CPI بوده است. همانطور که اذعان شد، این مهم به مدیر پروژه کمک می‌کند تا تحلیل دقیقتر و متمرکزتری از ابتدای ماه پانزدهم آغاز کند تا ریشه دقیق رخداد این تغییر و حالت غیرعادی را در فرآیند کنترل پروژه شناسایی کند.



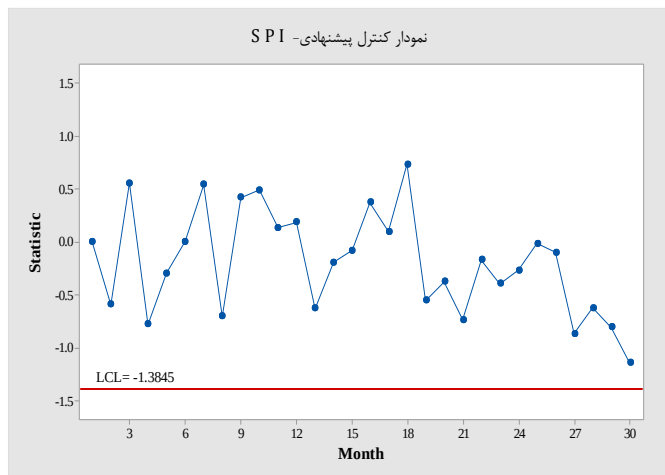
الف) SPI



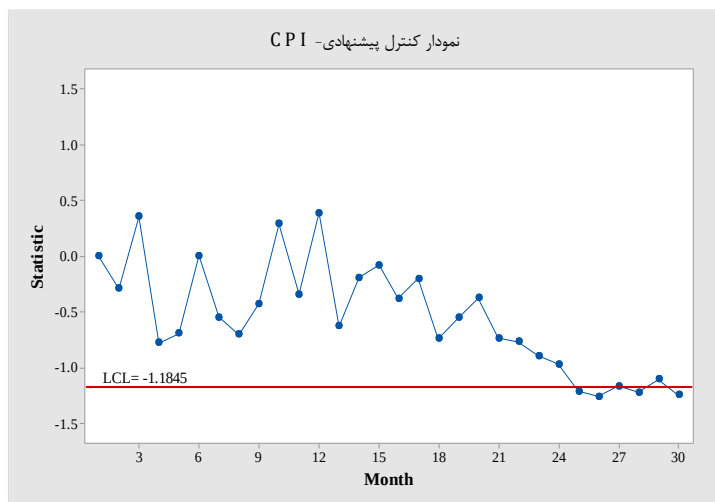
ب) CPI

شکل ۳. عملکرد نمودار کنترل مبتنی بر حدود احتمال موجود در پایش پروژه عمرانی

الف) SPI/CPI



الف) SPI



ب) CPI

شکل ۴. عملکرد نمودار کنترل مبتنی بر حدود احتمال پیشنهادی در پایش پروژه عمرانی

الف) SPI (ب) CPI

۷ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، چارچوبی استاندارد و نوین برای پایش و کنترل شاخص‌های کلیدی زمان و هزینه با در نظر گرفتن عملکرد مختلف تیم‌های مستقر در پروژه‌ها ارائه شد. با توجه به ناکارآمدی رویکردهای سنتی مدیریت پروژه، به‌ویژه با محدودیت داده‌های در دسترس و پیچیدگی لحاظ کردن تأثیر متغیرهای کیفی، مانند عملکرد تیم‌های کاری مختلف، این پژوهش به توسعه یک چارچوب پایش یکپارچه پرداخت. در این راستا، ابتدا با بکارگیری متغیرهای موهومی (مجازی) در مدل‌های رگرسیونی مخاطره متناسب کاکس، مدل‌سازی مسئله انجام شد و سپس یک نمودار کنترل مبتنی بر حدود احتمال طراحی شد. در ادامه با توجه به تابع چگالی توسعه یافته، یک رویکرد پارامتریک برای تحلیل نقطه تغییر مبتنی بر برآوردکننده بیشینه درست‌نمایی توسعه داده شد تا امکان شناسایی دقیق زمان شروع انحرافات و پیش‌بینی انحرافات آتی میسر شود. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر متوسط طول دنباله که به طور دقیق برای هر دو رویکرد رقیب محاسبه

شد، حاکی از برتری رویکرد پایش پیشنهادی نسبت به رویکرد موجود به منظور تشخیص زودهنگام انحرافات و ارائه تحلیلی جامع تر داشت. همچنین برآوردکننده نقطه تغییر پیشنهادی بستر لازم را برای شناسایی بهتر زمان رخداد انحرافات مهیا ساخت. در ادامه تاثیر داده‌های اضافی پس از دریافت سیگنال خارج از کنترل روی عملکرد برآوردکننده نقطه تغییر بررسی شد که نتایج حاکی از آن بود که هرچه داده‌های اضافی افزایش یابد، عملکرد بهبود می‌یابد. این پژوهش، با فراهم آوردن ابزاری قدرتمند برای مدیران پروژه، آن‌ها را قادر می‌سازد تا با شناسایی سریع تر انحرافات و علل ریشه‌ای آن‌ها به‌ویژه با در نظر گرفتن تاثیر عملکرد تیم‌های مختلف، اقدامات اصلاحی به‌موقع را اتخاذ کرده و در نهایت به مدیریت و کنترل بهینه‌تر پروژه‌ها دست یابند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای توسعه سیستم‌های هوشمندتر پایش و کنترل پروژه در آینده باشد. مهم‌ترین محدودیت این پژوهش، اتکای رویکرد پیشنهادی به فرضیات پارامتریک بودن مدل پایه است. مدل پارامتریک بر پایه فرضیات مشخصی درباره توزیع داده‌ها و ساختار تغییرات بنا شده است. در صورتی که این فرضیات در عمل برقرار نباشند، عملکرد مدل ممکن است کاهش یابد. همچنین بحث استقلال شاخصهای عملکردی پروژه نسبت به هم از دیگر فرضیات محدود کننده پژوهش حاضر است. در این راستا، به منظور بالا بردن کارایی رویکرد پایش پیشنهادی می‌توان در نظر گرفتن همبستگی بین شاخصهای عملکردی در پروژه‌ها و توسعه رویکردهای پایش خودهمبسته در چنین شرایطی را به عنوان مهمترین حوزه برای پژوهشهای آتی معرفی کرد. بکارگیری مدل‌های شکنندگی به منظور لحاظ کردن تاثیر متغیرهای کیفی غیرقابل مشاهده همچون مهارتهای رفتاری مدیران پروژه و ایجاد چارچوبی استاندارد برای پایش در این حوزه نیز از دیگر موضوعات جذاب برای پژوهشهای آتی است.

۸ مراجع

1. Aliverdi, R., Moslemi Naeini, L., & Salehipour, A. (2013). Monitoring Project Duration and Cost in a Construction Project by Applying Statistical Quality Control Charts. *International Journal of Project Management*, 31(3), 411-423. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.08.005>
2. Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2017). Improving Project Forecast Accuracy by Integrating Earned Value Management with Exponential Smoothing and Reference Class Forecasting. *International Journal of Project Management*, 35(1), 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.10.003>
3. Hadian, H., & Rahimifard A. (2019). Multivariate Statistical Control Chart and Process Capability Indices for Simultaneous Monitoring of Project Duration and Cost.

- Computers and Industrial Engineering, 130, 788-797. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.021>.
4. Keyvani, E., Asadzadeh, S., & Samimi, Y. (2025). A New Control Chart based on Proportional Hazards and Frailty Regression Models for Monitoring High-Quality Processes with Censored Observations. *Quality and Reliability Engineering International*, 41(1), 401-424. <https://doi.org/10.1002/qre.3662>
 5. Leu, S.S., & Lin, Y.C. (2008). Project Performance Evaluation based on Statistical Process Control Techniques. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(10), 813-819. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:10\(813\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:10(813))
 6. Ling Chen, H., & Tripiawan, W. (2024). Project Performance Measurement using Statistical Process Control: A Case Study of Electro Magnetic Compatibility (EMC)– in Indonesian Enterprise, In *Proceedings of the 5th Asia Pacific Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, (pp. 11-21). Tokyo, Japan,
 7. Meredith, J.R. & Mantel S.J. (2011). *Project Management: A Managerial Approach*, 8th edition, John Wiley & Sons.
 8. Mortaji, T.H., Noori, S. & Bagherpour, M. (2021). Adaptive Project Monitoring and Control with Variable Reviewing Intervals, *International Journal of Innovation in Engineering*, 1(4), 34-46. <https://doi.org/10.59615/ijie.1.4.34>
 9. Narbaev, T., & De Marco A. (2014). An Earned Schedule-based Regression Model to Improve Cost Estimate At Completion. *International Journal of Project Management*, 32(6), 1007-1018. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.12.005>
 10. Nassar, K.H.M., Nassar, W.M., & Hegab, M.Y. (2005). Valuating Cost Overruns of Asphalt Paving Project using Statistical Process Control Methods. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(11), 1173-1178. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:11\(1173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:11(1173))
 11. Song, J., Martens, A., & Vanhoucke, M. (2022). Using Earned Value Management and Schedule Risk Analysis with Resource Constraints for Project Control. *European Journal of Operational Research*. 297(2), 451-466. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.036>
 12. Tercero-Gómez, V.G., Cordero-Franco, A.E., Perez-Blanco, A., & Hernandez-Luna, A. (2014). A Self-starting CUSUM Chart Combined with a Maximum Likelihood Estimator for the Time of a Detected Shift in the Process Mean. *Quality and Reliability Engineering International*. 30 (4), 591-599. <https://doi.org/10.1002/qre.1511>
 13. Toma, H.M., Abdelazim, A., & Ibrahim, A.H. (2026). Assessment of Estimation Performance for Activities' Cost and Time in Construction Projects Using Statistical Process Control. *Engineering Construction and Architectural Management*. 33(4), 2669–2695. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2024-0995>
 14. Xue, L., Wang, Q., An, L., He, Z., Feng, S., & Zhu, J. (2024). A Nonparametric Adaptive EWMA Control Chart for Monitoring Mixed Continuous and Categorical Data using Self-starting Strategy. *Computers and Industrial*

Engineering.188,<https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109930>

Research paper

Development of a Standard Framework for Statistical Monitoring Project Management and Analysis of Performance Indicators in Considering Teams' Competencies

Sajjad Bagheri¹, Shervin Asadzadeh², Hamid Esmaeeli³

1. PhD Student, Department of Industrial Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Industrial Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.(Corresponding Author; sh_asadzadeh@iau.ac.ir)
3. Associate Professor, Department of Industrial Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received:05/06/2026

Accepted:31/08/2026

Abstract

In today's environment, the high level of changes in projects, and the complexity and uncertainty involved in project execution have reduced the effectiveness of traditional approaches to project time and cost management and control. Continuous monitoring of key earned-value management indicators is considered as one of the fundamental pillars of project control. However, due to the limitations of available data, the use of traditional analytical tools is generally inefficient and misaligned with the realities of projects. The complexity of the issue becomes even greater when the effects of the performance of different work teams must somehow be incorporated into the monitoring process. In addition, changes in project performance indicators should be monitored through change-point analysis in order to accurately estimate the starting time of deviations occurring in the project. Therefore, in this study, a standard framework of project management using a control chart based on probability limits is developed taking into account the effects of different work teams' performance. Moreover, a parametric approach for change-point analysis is proposed, and the impact of additional data on the performance of this approach is examined. The results indicate the superior performance of the proposed standard approach for optimal project management and control, as it yields a significantly lower out-of-control ARL for a specific shift. Consequently, deviations and potential problems can be detected at an earlier stage. Furthermore, the proposed parametric approach substantially assists project managers in more accurately identifying the change-point and determining the root cause of deviations, thereby facilitating the implementation of more effective corrective actions.

Keywords: Standard and Quality Control, Project Management and Control, Probability-limits-based Control Chart, Change-Point, Earned Value Management

DOI: 10.22034/jsqm.2026.595631.1702