مقاله پژوهشی

قابلیت عملکرد نمودارهای کنترلی چند متغیره T^2 و MEWMA درپایش پروژه

محمد مهدی میرزایی

(**نویسنده مسئول**)، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
mehdi.mirzaei.ind@gmail.com

کریم آتشگر

دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. Atashgar@iust.ac.ir

چکیده: یکی از کاربردی‌ترین روش‌های پایش و کنترل عملکرد پروژه مدیریت ارزش کسب شده است. بکارگیری گسترده این روش در بسیاری از پروژه‌ها منجر به تولید شاخص‌های متعدد با تأثیر متقابل می‌گردد، این ویژگی مهم تحلیل انفرادی آنها را با خطا همراه می‌سازد. در این روش نه تنها به تأثیر متقابل شاخص‌ها توجه نمی‌شود، بلکه عدم توجه به پایش تغییرپذیری شاخص‌ها موجب شده که این روش جهت پایش پروژه بر اساس معیار شاخص‌پذیری، عملکرد مناسبی نداشته باشد. در این پژوهش با استفاده از نمودارهای کنترلی چند متغیره، به صورت همزمان شاخص‌های عملکردی یک پروژه گازرسانی مبتنی بر داده‌های واقعی را بررسی نموده‌ایم و پس از تحلیل نتایج به دست‌آمده، عملکرد دو نمودار هتلینگ و (MEWMA) را با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم که نمودار (MEWMA) از قابلیت و حساسیت بیشتری نسبت به نمودار هتلینگ در شناسایی تغییرات در فرایندهای چندمتغیره برخوردار است.

واژگان کلیدی: مدیریت ارزش کسب شده، پایش پروژه، نمودار هتلینگ، MEWMA

۱. مقدمه

پروژه تلاشی موقتی است که به دلیل منحصر به فرد بودن محصول پروژه و غیر تکراری بودن آن، دارای عدم قطعیت است[1]. برای هر پروژه، سازمانی موقت از افراد تشکیل می‌شود و منابع لازم (بودجه، نیروی انسانی، ماشین‌آلات و مانند آن) در اختیار آن قرار می‌گیرد تا محصولی منحصر به فرد را با الزامات تعیین شده در چارچوب یک قرارداد تحویل دهد. چارچوب‌ها یا قیدهای پروژه معمولاً چهار مورد هستند: محدوده، زمان، هزینه، کیفیت؛ نکته مهم قابل بیان این است که این موارد با یکدیگرتأثیر متقابل دارند[2]. از مهم‌ترین اهداف تیم مدیریت پروژه آن است که بتوانند پروژه را مطابق با بودجه، زمان‌بندی و با پوشش کلیه محدوده کاری، به پایان برسانند. بنابراین در یک پروژه این عوامل باید به طور مداوم کنترل شوند[1]. امروزه اهمیت و لزوم استفاده از نظام جامع برنامه‌ریزی وکنترل پروژه، در بسیاری از سازمان‌ها کاملاً آشکار شده است. سال‌های متمادی است که از پیدایش سیستم‌های نوین و منظم برنامه‌ریزی و کنترل پروژه می‌گذرد و کار توسعه این روش‌ها و سیستم‌ها و تکمیل بسته‌های نرم‌افزاری (software packages) برنامه‌ریزی و کنترل پروژه، همچنان ادامه دارد. در جریان تدوین و تکمیل این سیستم، روش‌های گوناگونی برای برنامه‌ریزی و نمایش فعالیت‌ها ابداع شده است .روش نمودار میله‌ای (bar chart) و روش‌های تحلیل شبکه (Network Analysis methods) که در گفتگوهای روزمره از آنها با عنوان روش (CPM) یا روش مسیر بحرانی یاد می‌شود، از مهم‌ترین این روش‌ها است[3]. هنگامی که زمان انجام فعالیت‌ها در پروژه قطعی است روش مسیر بحرانی ابزاری مفید در مدیریت چنین پروژه‌هایی است، لیکن در بسیاری از شرایط، زمان اجرای فعالیت‌ها در قالب اعداد قطعی قابل ارائه نیست.

corresponding author: mehdi.mirzaei.ind@gmail.com
https://doi.org/10.48313/jqem.2023.194411

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹
دوره ۱۳/ شماره ۳
صفحات ۲۵۳-۲۶۶

بنابراین ابزارهایی که بتوانند با چنین مسائلی مقابله کنند بسیار مؤثر خواهند بود. از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده برای حل مشکل مذکور، این ارزیابی و بازنگری پروژه، روش پرت می‌باشد[4]. وجود عدم قطعیت و مبانی احتمالی چه در حوزه زمان‌های احتمالی و چه در مباحث مربوط به وجود شاخه‌ها و فعالیت‌های احتمالی به جذابیت مسائل حوزه مدیریت و کنترل پروژه می‌افزاید. قطعی بودن فعالیت‌ها و زمان لازم برای تکمیل هر یک از فعالیت‌های پروژه، مدیر پروژه را ملزم به استفاده از تکنیک‌های متناسب با ماهیت خاص پروژه مورد بررسی خود می‌کند. روش گرت برای شرکت RAND آمریکا پایه‌گذاری شده و اولین کاربردهای آن در پروژه‌های ساخت سفینه‌های فضایی بوده است.

با کاربرد تحلیل شبکه در طراحی و کنترل پروژه‌ها از دهه ۱۹۵۰ و توسعه مدل‌های شبکه‌های همچون CPM و PERT به تدریج مشخص شد که امکانات محدود روش‌های مذکور در مدل‌سازی پروژه‌هایی که دارای شبکه‌های پیچیده هستند، مشکلی در برنامه‌ریزی این پروژه‌ها است. به همین دلیل محققینی همچون مغربی و پرینسکر و سایر همکارانشان به دنبال ابزار تعمیم‌یافته‌تری در تحلیل شبکه‌ای که قابلیت تطابق بالاتری نسبت به روش‌های CPM و PERT داشته باشد، این روش را ابداع کرده و توسعه دادند[5]. کارآمدی و قابلیت‌های ویژه روش گرت برای شبیه‌سازی، طرح‌ریزی، زمان‌بندی و تجزیه و تحلیل پروژه‌ها در سیستم‌های متعدد در صنایع مختلف به اثبات رسیده است. افسر و ضیایی در تحقیقی در سال ۱۴۰۱ با تشریح پروژه احتمالی ساخت هواپیما مدل، با توجه به فضای یک الگوریتم مناسب بر پای روش گرت و شبیه‌سازی مونت کارلو به گونه‌ای ارائه نمودند که در نتیجه آن مدیر پروژه بتواند از خروجی حاصل از الگوریتم به بررسی مؤلفه‌های اساسی و برآورد متغیرهای تصادفی نظیر زمان مورد انتظار تکمیل پروژه و هزینه متوسط تکمیل فعالیت‌های پروژه بپردازد و نتایج دلخواه خود را جهت مدیریت و کنترل هرچه بهتر پروژه استخراج نماید، با توجه به قابلیت انعطاف‌پذیری بالای الگوریتم پیشنهادی، می‌توان از آن جهت مدیریت و برنامه‌ریزی پروژه‌های مختلف با ماهیت احتمالی در خصوص فعالیت‌ها و زمان های احتمالی، استفاده نمود. همچنین با توجه به قابلیت تطبیق‌پذیری الگوریتم پیشنهادی می‌توان از آن جهت کنترل و بهبود روند پروژه، بهره برد [6]. همانطور که امکان بهبود زمان و هزینه مورد انتظار تکمیل پروژه با اضافه شدن یک فعالیت جدید (فعالیت بالانس وزنی)، بررسی گردید و در نهایت با توجه به کارگیری دوباره الگوریتم پیشنهادی برای شبکه جدید پروژه و بررسی و تحلیل نتایج و انجام آزمون‌های آماری مرتبط، مشخص شد. اضافه شدن این فعالیت جدید اثر معناداری در بهبود متغیرهای پروژه ندارد و همچنین استفاده از الگوریتم پیشنهادی و به کارگیری روش و مفاهیم موجود در این الگوریتم می‌تواند منافع زیادی در مدیریت و برنامه‌ریزی پروژه‌های با ماهیت احتمالی داشته باشد و مدیر پروژه را در برآورد متغیرهای اساسی مورد انتظار پروژه پیش روی خود یاری دهد. کاظمی در تحقیقی به منظور کاهش محدودیت‌های مربوط به عدم قطعیت در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه، منطق و سیستم کنترل فازی پیشنهاد و در آن میانگین، واریانس، ارزش و تعداد حلقه‌های شبکه گرت و همچنین عوامل تأثیرگذار محیطی بر اجرای پروژه به صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند بدین ترتیب برای اولین‌بار با استفاده از قابلیت‌های موجود در شبکه‌های گرت و همچنین منطق و سیستم فازی، سیستم کنترل فازی طراحی شده و در آن سعی شده تا تمامی حالت‌های موجود برای اجرای یک پروژه تحلیل شود(۴). ذکی دیزجیه به منظور مدیریت و زمان‌بندی هرچه بهتر تعمیرات اساسی دروگر نیشکر در شرکت کشت و صنعت امیرکبیر استفاده کردند، مطابق با این پژوهش مشخص شد زمان‌بندی و مدیریت صحیح عملیات تعمیرات سالانه دروگر ضروری بوده و انجام این تعمیرات در مدت زمان بهینه سبب افزایش قابلیت اطمینان دروگر و راندمان عملیات برداشت و سوددهی تولید می‌گردد [7]. علیایی و همکاران برای تخمین هزینه پروژه‌های احداث راه آهن مدلی بر پایه سیستم عصبی‌سازی پیشنهاد دادند و با توجه به شناسایی عوامل تأثیرگذار بر هزینه‌های پروژه، به پیش‌بینی آن پرداختند [8]. غلامیان در تحقیقی در سال ۱۳۹۷یکی از راهکارهای مؤثر مدیریت عدم قطعیت‌های پروژه، استفاده از تکنیک‌های نظارت و کنترل ذخیره‌های زمانی احتیاطی پروژه دانست. در این مقاله، مدلی یکپارچه برای کنترل تأخیرات پروژه مبتنی بر رویکرد مدیریت بافرهای زمانی ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی کنترل پروژه، در زمانی که سیگنال‌های هشداردهنده از حد مشخصی فراتر رود، موازنه هزینه-زمان برای بهینه‌سازی استراتژی تسریع زمان فعالیت‌ها انجام می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی که به‌صورت دوره‌ای، فرایند کنترل پروژه را انجام می‌دهد، در زمانی که سیگنال‌های هشداردهنده بر اساس شاخص SPI تولید شود، اقدامات

اصلاحی پیشنهاد می‌شود. در صورت اجرای اقدامات اصلاحی برای جبران تأخیرات احتمالی، یک مدل بهینه‌سازی موازنه هزینه-زمان برای بهینه‌سازی استراتژی تسریع زمان فعالیت‌ها حل می‌شود. استفاده از این استراتژی موجب بهبود شاخص‌های عملکردی پروژه در مقایسه با روش‌های سنتی کنترل پروژه می‌شود. این چارچوب جدید برای فرایند کنترل پروژه، وظیفه پیش‌بینی میزان انحراف هزینه-زمان از برنامه اولیه را برعهده دارد، به طوری که بر اساس میزان مصرف ذخیره‌های زنجیره‌های بحرانی و غیر بحرانی و درصد پیشرفت آنها، سیگنال‌های هشداردهنده صادر می‌شوند [9]. مدیریت ارزش کسب شده یک روش برای یکپارچه‌سازی سه بعد زمان، هزینه و محدوده، در راستای اندازه‌گیری عینی، تحلیل و کنترل عملکرد پروژه است[10]. یکی از مشکلاتی که روش مدیریت ارزش کسب شده دارد این است که شاخص عملکرد زمان‌بندی (SPI[۳]) پروژه را با استفاده از مؤلفه‌های ارزش برنامه‌ریزی شده[۱](PV) و ارزش کسب شده [۲](EV) محاسبه می‌کند که از مؤلفه‌های مالی محسوب می‌شوند و لذا هیچکدام دارای دیمانسیون زمانی نیستند. لذا عدم امکان استفاده از دیمانسیون زمان یکی از نقاط ضعف این روش محسوب می‌شود. از طرفی به طور کلی می‌دانیم که هرچه به انتهای پروژه نزدیک می‌شویم، مقدار کاری که تاکنون انجام داده‌ایم به مقدار کاری که برای کل پروژه برنامه‌ریزی کرده‌ایم نزدیک خواهد شد. به عبارت ساده‌تر، در پایان پروژه، به دلیل تکمیل تمامی کارهای زمان‌بندی شده، ارزش کسب شده معادل با ارزش برنامه‌ای تجمعی می‌شود. بنابراین در پایان پروژه با نزدیک شدن پیشرفت واقعی به پیشرفت برنامه‌ای، شاخص عملکرد زمان‌بندی پروژه به یک میل خواهد کرد که این به معنای پیشروی پروژه مطابق برنامه زمان‌بندی است، در صورتیکه ممکن است عملکرد واقعی پروژه از حیث زمان‌بندی کمتر از یک یا بیشتر از یک باشد، لذا به شاخصی نیاز داریم که در تمامی طول پروژه رفتاری قابل اطمینان داشته باشد و عملکرد پروژه به لحاظ زمان را به دقت نشان دهد. به منظور حل این مشکلات لیپکه[۳]روشی تحت عنوان زمان‌بندی کسب شده[۴](ES) ارائه نمود که نقطه ضعف روش ارزش کسب شده را حل می‌کرد، در این روش با در نظر گرفتن زمان کسب شده که نسخه توسعه‌یافته از ارزش برنامه‌ریزی شده و ارزش کسب شده است، شاخص عملکرد زمان‌بندی پروژه با توجه به واحد زمانی محاسبه می‌گردد[11]، اما از آنجا که هر دو روش مدیریت ارزش کسب شده و زمان‌بندی کسب شده جهت ارزیابی عملکرد فرآیند پروژه بیش از یک شاخص محاسبه می‌نمایند، در حالی‌که این شاخص‌ها مستقل نبوده و دارای همبستگی هستند نیاز است که این شاخص‌ها به صورت هم‌زمان پایش گردند. در ادبیات کنترل کیفیت آماری روش‌های مختلفی برای کنترل فرآیندهای چند متغیره معرفی شده است. از جمله روش‌هایی که به منظور پایش هم‌زمان چند متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به نمودارهای معروف چند متغیره؛ هتلینگ (T^2) و میانگین متحرک موزون نمایی چند متغیری[۵] (MEWMA) اشاره نمود[12]. با توجه به آن‌که در روش‌های کنترل پروژه تأثیر متقابل شاخص‌های کنترلی بررسی نمی‌شود، و تغییرپذیری این شاخص نیز کنترل و پایش نمی‌شود، این پژوهش درصدد است تا با در نظر گرفتن تأثیر متقابل شاخص‌های مهم در کنترل پروژه تغییرپذیری آنها را با استفاده دو نمودار کنترلی پیشنهادی پایش نماید. این روش به مدیران پروژه کمک می‌کند که با کنترل تغییرپذیری متوجه شوند که عملکرد پروژه تا چه میزان خوب است و تحت تأثیر تغییرات طبیعی کار می‌کند. در این پژوهش جهت مقایسه نمودارهای چند متغیره هتلینگ و میانگین متحرک موزون نمایی، پروژه بازرسی خط لوله گاز رسانی که ۱۹ ماهه و با بودجه ۴۰۰.۰۰۰ واحد پولی برنامه‌ریزی شده بود را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این موردکاوی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی این مقاله می‌تواند در کنترل عملکردی پروژه‌ها مفید و اثربخش باشد.

۲. مبانی نظری

۱.۲. زمان‌بندی کسب شده

مدیریت ارزش کسب شده با ارائه شاخص‌های عملکردی امکان اندازه‌گیری میزان پیشرفت پروژه و اتخاذ تصمیمات لازم را برای پیاده‌سازی اقدامات اصلاحی فراهم می‌آورد. این روش در تحلیل و کنترل عملکرد پروژه‌ها، مدیران پروژه را قادر می‌سازد ضمن

[1] Planed Value (PV)
[2] Earned Value (EV)
[3] Lipke
[4] Earned Schedule (ES)
[5] Multivariate Exponentially Weighted Moving Average (MEWMA)

تشخیص میزان مغایرت‌های پروژه در مقابل برنامه، بتوانند هزینه نهایی و زمان اتمام پروژه را نیز پیش‌بینی کنند(۱۳). شاخص عملکرد زمانی (SPI) و شاخص عملکرد هزینه‌ای (CPI)[۶] در روش مدیریت ارزش کسب شده به صورت رابطه ۱ و رابطه ۲، محاسبه می‌شود:

$$SPI=\frac{EV}{PV} \quad (۱)$$

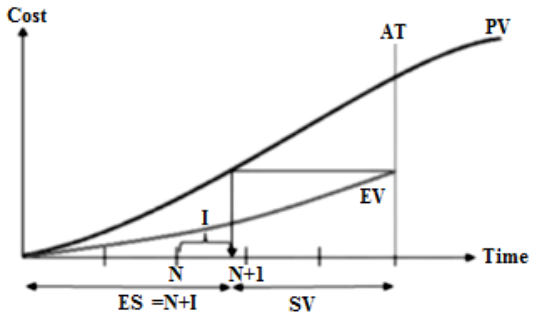
$$CPI=\frac{EV}{AC} \quad (۲)$$

در رابطه ۲، AC[۷]، هزینه واقعی کار انجام شده است، اما همانطور که قبلاً نیز گفته شد، به دلایل ضعف‌هایی که در این روش وجود داشت، لیپکه روشی تحت عنوان زمان‌بندی کسب شده (ES) ارائه نمود. در این روش ES در حقیقت معادل زمانی EV است و همانگونه که در شکل ۱، نشان داده شده است، از تصویر نمودن EV بر خط مبنای عملکرد به دست می‌آید[14]. مقدار عددی ES به کمک رابطه ۳، محاسبه می‌شود:

$$ES = N + \frac{EV - PV_N}{PV_{N+1} - PV_N} \quad (۳)$$

در رابطه فوق، با توجه به رابطه ۴، N نشان‌دهنده نزدیک‌ترین دوره‌ای است که EV فعلی از ارزش برنامه‌ریزی شده آن دوره بیشتر باشد:

$$PV_N < EV < PV_{N+1} \quad (۴)$$



شکل ۱: نمایش زمان کسب شده در پروژه

در شکل (۱) AT[۸]، بیانگر مدت زمان است که در آن EV محاسبه شده است. با داشتن ES شاخص جدیدی برای عملکرد زمان‌بندی پروژه SPI (t) قابل محاسبه است که معادل زمانی SPI است. و از رابطه ۵، بدست می‌آید:

$$SPI\ (t) = \frac{ES}{AT} \quad (۵)$$

SPI (t) نسبت به SPI دارای برتری است، زیرا شاخص SPI در اواخر پروژه به دلیل نزدیک شدن EV به PV به عدد یک همگرا می شود و در نهایت چون EV با PV برابر می‌گردد، همیشه مقدار SPI در پایان پروژه یک خواهد بود، که به صورت نادرستی کارایی تیم پروژه در استفاده از زمان را ۱۰۰٪ نشان می‌دهد. چنین مشکلاتی با به‌کارگیری SPI (t) مرتفع می‌شوند.

در روش زمان‌بندی کسب شده، شاخص عملکرد هزینه‌ای پروژه همانند شاخص عملکرد هزینه‌ای پروژه در روش مدیریت ارزش کسب شده محاسبه می‌گردد.

۲.۲. نمودار هتلینگ (T^2)

نمودار کنترل T^2 هتلینگ رایج‌ترین نمودار کنترل کیفیت برای کنترل فرآیندهای چند متغیره است [18].

فرض کنید $X = \left(x_1 . x_2 . \ldots . x_p\right)^T$ برداری از P مشخصه یا شاخص است که در شرایط تحت کنترل دارای توزیع $N_p\left(\mu_0 . \Sigma_0\right)$ می‌باشد که در آن $\mu_0 . \Sigma_0$ به ترتیب ماتریس کوواریانس و بردار میانگین شاخص‌ها هستند. همچنین فرض کنید بردار میانگین و ماتریس کوواریانس یک نمونه تصادفی n_1 تایی در شرایط کنترل در فاز اول به صورت رابطه ۶ و رابطه ۷ باشند:

$$\bar{X} = N_1^{-1} \sum_{r=1}^{n_1} X_r \quad (۶)$$

[6] Cost Performance Index (CPI)
[7] Actual Cost (AC)
[8] Actual Time

$$S = \left(n_1 - 1\right)^{-1} \sum_{r=1}^{n_1} (X_r - \bar{X})(X_r - \bar{X})^T \quad (۷)$$

واضح است که $\bar{X}$ و S به ترتیب برآوردهای ناریب برای μ_0 و Σ_0 است. اکنون فرض کنید $\bar{Y}_t$ بردار میانگین t امین نمونه n_2 تایی از زمان شروع پیگیری کنترل آماری فرآیند است. به عبارت دیگر $\bar{Y}_t$ مربوط به فاز دوم است و لذا مستقل از $\bar{X}$ و S است. با توجه به تعریف متغیر تصادفی T^2 هتلینگ و رابطه آن با F به سهولت می‌توان نشان داد که متغیر تصادفی زیر با افزودن ضریبی دارای توزیع F است:

$$T_i^2 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}(\bar{Y}_t - \bar{X})^T S^{-1}(\bar{Y}_t - \bar{X}) \sim \frac{p\left(n_1 - 1\right)}{n_1 - p} F_{P,n_1 - p} \quad (۸)$$

اگر از این آماره کنترل استفاده شود حد بالای کنترل به‌صورت رابطه ۹، است:

$$UCL = \frac{p\left(n_1 - 1\right)}{n_1 - p} F_{a.P.n_1 - p} \quad (۹)$$

که در آن $F_{a.P.n_1 - p}$ صدک $\left(1 - a\right)$ ۱۰۰ درصد توزیع F با p و $n_1 - p$ درجه آزادی است.

۲.۳. نمودار میانگین متحرک موزون نمایی چند متغیره (MEWMA)

این نمودار کنترل اولین بار توسط لوری و همکاران در سال ۱۹۹۲، برای کنترل بردار میانگین یک فرآیند چند متغیره پیشنهاد شد. این نمودار که تعمیم نمودار کنترل میانگین متحرک موزون نمایی یک متغیره است، دارای حافظه است و نسبت به تغییرات کوچک حساس می‌باشد[15]. فرض کنید $X = \left(X_1, X_2, \ldots, X_P\right)^T$ یک بردار تصادفی P بعدی که مشخصه‌های کیفیت به هم وابسته را نشان می‌دهد و فرض کنید در زمانی که فرآیند تحت کنترل است X دارای توزیع $N_p\left(\mu_0, \Sigma_0\right)$ باشد، تعریف می‌کنیم[17]:

$$Z_t = R\left(X_t - \mu_0\right) + (1 - R)Z_{t-1} \qquad t \geq 1 \quad (۱۰) \qquad Z_0 = 0$$

$$R = \operatorname{diag}\left(r_1, r_2, \ldots, r_p\right) \qquad 0 < r_j \leq 1 \quad j = 1, 2, \ldots, p \quad (۱۱)$$

در حالت کلی اگر $r_1 = r_2 = \cdots = r_p = r$ باشد در نتیجه:

$$Z_t = r\left(X_t - \mu_0\right) + (1 - r)Z_{t-1} \qquad t \geq 1 \quad (۱۲)$$

آماره کنترل به‌صورت رابطه ۱۱، تعریف می‌شود:

$$T_t^2 = Z_t' \Sigma_{Z_t}^{-1} Z_t \quad (۱۳)$$

که در آن:

$$\Sigma_{Z_t} = Var(Z_t) = \frac{r}{2 - r}\left(1 - \left(1 - r\right)^{2t}\right)\Sigma_0 \quad (۱۴)$$

اگر چه نمودار کنترل MEWMA برای تشخیص تغییر در بردار میانگین طراحی شده است، اما نسبت به تغییر در ماتریس کوواریانس نیز حساس است[16].در واقع وقتی تغییرپذیری فرآیند افزایش یابد، در رابطه ۱۰، مقدار $X_t - \mu_0$ از مقدار اسمی‌اش که صفر است منحرف می‌شود. در نتیجه T_t^2 در رابطه ۱۳، ممکن است از حد بالای کنترل تجاوز کند. در واقع در شرایط کنترل انتظار می‌رود که $X_t - \mu_0$ در اطراف صفر نوسان کند[19].

۳. روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی است و از نظر فرآیند اجرای پژوهش به صورت کمی داده‌ها جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل می شود. داده‌ها از بازرسی جوش (رادیوگرافی) صورت گرفته توسط یک شرکت پیمانکاری از خط لوله گازرسانی ۸ اینچ به فاصله

۳۵ کیلومتر در استان فارس، حد فاصل شهر کوار تا روستای باوریان جمع‌آوری گردیده‌است در این پژوهش تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش ترکیبی زمان‌بندی کسب شده و نمودارهای کنترل کیفیت آماری چندمتغیره هتلینگ و MEWMA و با کمک نرم‌افزارهای Excel و Minitab صورت می‌گیرد. به این صورت که پس از گردآوری داده‌های مورد نیاز، در ابتدا شاخص SPI (t) و CPI محاسبه می‌شود سپس با استفاده از نمودارهای کنترل کیفیت آماری چندمتغیره هتلینگ و MEWMA مورد تحلیل قرار می‌گیرند و در نهایت نتایج حاصل شده با همدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

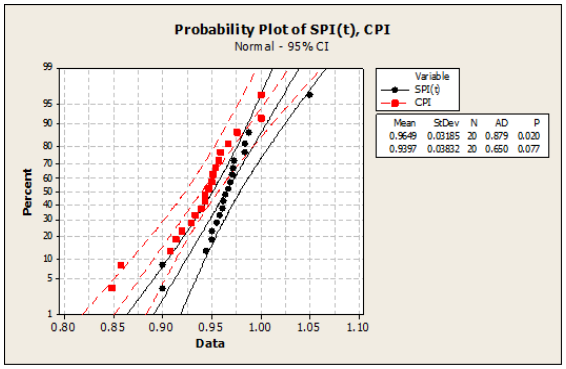
۴. یافته‌ها

پس از گردآوری اطلاعات در خصوص ارزش برنامه‌ریزی شده (PV)، ارزش کسب شده (EV) و هزینه واقعی (AC) برای ۲۰ دوره زمانی یک ماهه، شاخص‌های عملکرد هزینه‌ای پروژه (CPI)، شاخص عملکرد زمان‌بندی پروژه (SPI) و شاخص عملکرد زمان‌بندی پروژه بر اساس زمان (SPI (t)) محاسبه شد که نتایج در جدول ۱، نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می‌کنید در دوره ۲۰ ام، SPI برابر با یک است و هیچگونه عقب‌افتادگی از برنامه زمان‌بندی را نشان نمی‌دهد در حالی که SPI (t) برابر با ۰/۹۵ است و نشان‌دهنده این است که این پروژه به میزان ۵٪ از برنامه زمان‌بندی عقب افتادگی داشته است .

جدول ۱: اطلاعات گردآوری شده شاخص‌های CPI، SPI، SPI (t)

دوره زمانی	CPI	SPI	SPI (t)
1	1/000	1/000	1/000
2	0/950	0/950	0/950
3	0/908	0/983	0/983
4	0/929	0/988	0/988
5	0/857	0/900	0/900
6	0/967	0/983	0/983
7	0/943	0/978	0/971
8	0/848	0/875	0/900
9	0/919	0/944	0/944
10	1/105	1/050	1/050
11	0/933	0/955	0/955
12	0/939	0/958	0/958
13	0/943	0/962	0/962
14	0/947	0/964	0/964
15	0/951	0/967	0/967
16	0/954	0/969	0/969
17	0/957	0/971	0/971
18	0/959	0/972	0/972
19	0/914	0/925	0/961
20	0/976	1/000	0/950

در این تحقیق لازم است داده‌ها از لحاظ نرمال بودن مورد بررسی قرار گیرند. نتایج بررسی نرمال بودن داده‌ها در شکل ۲، نشان داده شده است، از آنجا که مقدار P-Value برای SPI (t) برابر با ۰/۰۲ است و از مقدار خطای ۰/۰۵ کوچکتر است، فرض نرمال بودن داده‌های SPI (t) رد می‌شود لذا جهت نرمال‌سازی آنها از آزمون تبدیل Box-Cox استفاده می‌شود، مقدار P-Value برای مقادیر CPI برابر با ۰/۰۷۷ است که از مقدار خطای ۰/۰۵ بزرگتر است، لذا فرض نرمال بودن داده‌های CPI مورد قبول است.



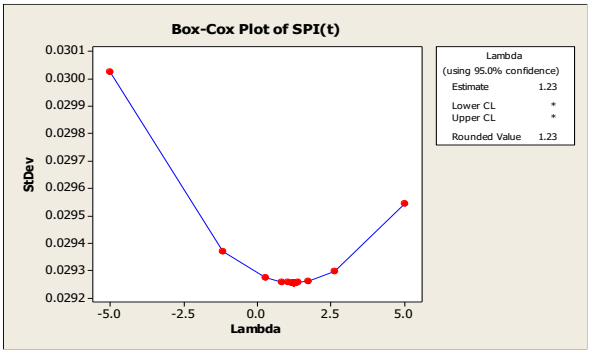
شکل ۲ - نمودار احتمال نرمال

پس از استفاده از آزمون تبدیل Box-Cox، جهت نرمال‌سازی داده‌های SPI (t)، داده‌ها به صورت جدول ۲، است:

جدول ۲: داده‌های نرمال شده SPI (t)

دوره زمانی	SPI (t) Normal
1	1/000
2	0/939
3	0/980
4	0/985
5	0/879
6	0/980
7	0/965
8	0/879
9	0/932
10	1/062
11	0/944
12	0/949
13	0/953
14	0/956

0/959	15
0/962	16
0/964	17
0/966	18
0/952	19
0/939	20



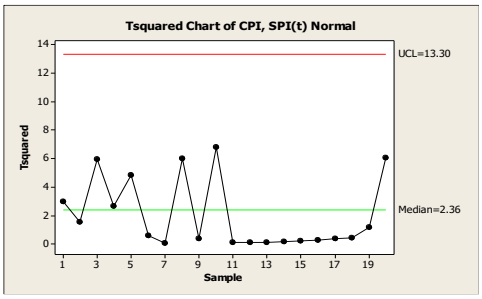
شکل ۳: نمودار تبدیل Box-Cox برای SPI (t)

پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها همبستگی آنها را با استفاده از آزمون پیرسون مورد بررسی قرار دادیم که نتایج آن در جدول ۳، نشان داده شده است، از آنجا که مقدار P-Value از مقدار خطای ۰/۰۵ بزرگتر است لذا فرض همبستگی بین شاخص SPI (t) و CPI مورد قبول است همچنین میزان همبستگی بین آنها مقدار ۰/۷۹۴ را نشان می‌دهد که بیانگر همبستگی قوی بین این دو شاخص است:

جدول ۳: نتایج آزمون همبستگی پیرسون

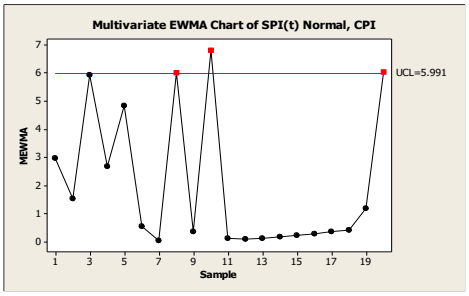
آماره P-Value	میزان همبستگی
۰/۰۰	۰/۷۹۴

پس از آنکه همبستگی بین دو شاخص مورد بررسی تأیید شد با استفاده از نمودار چندمتغیره T^2 (شکل ۴) تحت کنترل بودن پروژه را مورد بررسی قرار دادیم، با توجه به شکل ۴، نتایج حاصل شده از نمودار هتلینگ، نشان‌دهنده تحت کنترل بودن پروژه است.



شکل ۴: نمودار T^2

در نمودار میانگین متحرک موزون نمایی چندمتغیره MEWMA اگر مقدار R(ماتریس اوزان) را برابر با I(ماتریس یکه) در نظر بگیریم، در این‌صورت نمودار هتلینگ معادل نمودار MEWMA است(۱۲) و می‌توان این دو نمودار را با همدیگر مقایسه نمود، شکل ۵، نمودار MEWMA را در حالتی که قابلیت تشخیص برابر با یک است نشان می‌دهد، با توجه به شکل ۵، مقادیر MEWMA برای نمونه‌های ۸، ۱۰ و ۲۰ بالاتر از حدود کنترل می‌باشد لذا می‌توان خارج از کنترل بودن پروژه را با استفاده از نمودار MEWMA نتیجه گرفت، همچنین در این نمودار کنترل چندمتغیره، با وجود آنکه تمامی نقاط در محدوده حدود کنترل UCL و LCL قرار دارند، اما تعداد ۹ نقطه به‌صورت متوالی در یک طرف خط مرکزی قرار دارد که این شرایط یکی از حالات غیر طبیعی در نمودارهای کنترل است که منجر به خارج از کنترل شدن فرایند می‌گردد. مدیران پروژه در زمان اجرای پروژه به این بیرون‌افتادگی از شرایط تحت کنترل توجه نکرده‌اند. قالب زمان‌های خارج از کنترل در این پروژه گازرسانی، مربوط به مقاطعی است که خطوط لوله گازرسانی از روستاها و زمین‌های کشاورزی عبور کرده‌اند، و این امر (خارج از کنترل بودن) به این دلیل بوده که قبل از لوله‌گذاری، برخی از زمین‌هایی که خطوط لوله که می‌بایست از آن‌ها عبور کند و در آن‌ها کانال حفر شود با توجه به اینکه قبلاً از مالکان خریداری شده است ولی به دلیل وجود محصولات زراعی و همچنین به دلایل دیگر توسط مالکین تخلیه نشده‌اند و هماهنگی‌های لازم جهت حفر کانال در این زمین‌ها هم با هزینه بیشتر و هم در زمان بیشتر صورت پذیرفته است. اگر مدیران پروژه، قبلاً از این امر مطلع می‌شدند یا برآورد هزینه و زمان پروژه را بیشتر در نظر می‌گرفتند یا نسبت به تخلیه کامل زمین‌ها از قبل اقدامات لازم را انجام می‌دادند.



شکل ۵: نمودار MEWMA با قابلیت تشخیص یک

۵. بحث و نتیجه‌گیری

روش‌های موجود کنترل پروژه نه تنها اثر متقابل شاخص‌های ارزیابی عملکرد پروژه را مورد توجه قرار نمی‌دهند، بلکه تغییرپذیری آن شاخص‌ها را نیز پایش نمی‌کنند. پایش تغییرپذیری شاخص‌ها به مدیران کنترل پروژه کمک می‌کند، که متوجه شوند روند اجرایی تحت تأثیر عوامل غیر طبیعی قرار نگرفته باشد. در این تحقیق با استفاده روش نمودار کنترل چند متغیره، نشان داده شده که پایش شاخص‌های عملکردی یک پروژه، با در نظر گرفتن تأثیر متقابل آنها، می‌توانند به مدیران کنترل پروژه در کنترل تغییرپذیری شاخص‌های عملکردی، و تجزیه و تحلیل عملکرد پروژه کمک نماید. در این مقاله دو نمودار هتلینگ و میانگین متحرک موزون نمایی چندمتغیره برای پایش وضعیت پروژه‌ها پیشنهاد شد. در این مقاله عملکرد روش‌های پیشنهادی در یک پروژه بازرسی خط لوله گازرسانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل داده‌ها با استفاده از نمودار هتلینگ نشان داد که پروژه تحت کنترل است، اما نتایج تحلیل داده‌ها با استفاده از نمودار میانگین متحرک موزون نمایی حاکی از خارج از کنترل بودن پروژه دارد، با توجه به اینکه پروژه ۱۹ ماهه و با هزینه ۴۰۰۰۰۰ واحد پولی برنامه‌ریزی شده بود، اما در واقعیت، ۲۰ ماهه و با بودجه ۴۱۰۰۰۰ واحد پولی به اتمام رسیده است، می‌توان گفت که پروژه خارج از کنترل بوده است، چرا که زمان و هزینه پروژه از زمان و بودجه برنامه‌ریزی شده فراتر رفته است بیشتر زمان‌های خارج از کنترل در این پروژه گازرسانی، مربوط به مقاطعی است که حفاری کانال‌های خطوط لوله گازرسانی از روستاها و زمین‌های کشاورزی عبور کرده‌اند، و این امر (خارج از کنترل بودن) به این دلیل بوده که قبل از لوله‌گذاری، صاحبان برخی از زمین‌هایی که خطوط لوله از آن عبور می‌کرده است و می‌بایست در آن‌ها کانال حفر شود به دلیل وجود محصولات کشاورزی در آن‌ها یا عدم تخلیه صاحبان آن‌ها، پروژه را با تاخیر زمانی و یا افزایش هزینه جهت کسب رضایت صاحبان زمین جهت تخلیه زمین‌ها از محصولات و ...، و همچنین به طبع باعث افزایش هزینه‌های تجهیزات و منابع انسانی پروژه در این مقاطع زمانی گردیده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمودار کنترل میانگین متحرک موزون چندمتغیره (MEWMA) از قابلیت بهتری جهت تشخیص تحت کنترل بودن فرآیند برخوردار است و همچنین حساسیت بیشتری نسبت به نمودار چندمتغیره هتلینگ در شناسایی تغییرات کوچک و متوسط در فرایندهای چند متغیره برخوردار است. نتایج بررسی تحت کنترل بودن پروژه با استفاده از MEWMA با نتایج واقعی رخ داده همسو است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در کنترل پروژه‌ها علاوه بر روش‌های سنتی کنترل پروژه از نمودار چندمتغیره برای پایش تغییرپذیری شاخص‌ها نیز استفاده شود.

۶. منابع

[1] PMBOK. (2017). A Guide to the Project Management Body of Knowledge. PMBOK Guide6.

[2] Sabzeparvar, M. (2006). Project Control. Tehran: Terme Publishing.

[3] Mootadelro, A. (2019). Investigating the lack of establishing a comprehensive project planning and control system as a problem in project-oriented organizations (along with a case study in three provinces of the country). Science and Engineering Elites, 5(6), 39-47.(in persian)

[4] Kazemi, A., and Fakhouri, P. (2013). Presenting a fuzzy control system to estimate the project completion time in Gert networks. International Journal of Industrial Engineering and Production Management. 23 (2): 251-263.

[5] Farzi Poursaen, R. (1999). Management and Control of Research and Development Projects Using a Possible GERT Approach, The Second Conference of Industries and Mines Research and

Development Centers, Tehran, Association of Research and evelopment Centers of Industries and Mines.

[6]Afsar, A., Ziaei, S. J. (2022). Present an Algorithm Based On Gert Method and Monte Carlo Simulation to Manage and Control the Research and Development Projects (Case Study: Model Airplane). ournal of Strategic Management in Industrial Systems,59 (17), 1-24. (in prrsian)

[7] Zaki Dizaji, H. and Manjezi, N. (2018). Provide a network model for time management of overhaul of DerogarNeyshekar.Agricultural Machinery Quarterly. 8 (2): 403-412. (in Persian)

[8] Aliaei, E., Aghabeigi, P. and Jani, A. (2021). Predicting the cost of completing railway construction projects using the intelligent fuzzy-neural inference model. 7th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering

[9] Gholamian, S. A. (2017). Presenting an integrated model to control project delays based on the time buffers management approach, Journal of Modeling in Engineering, 16(55), 1-18. (in prrsian)

[10] PMI. (2013). "A Guide to the Project Management Body of Knowledge". PMBOK Guide 5.

[11] Lipke, W. (2009). "Prediction of project outcome, the Application of Statistical methods to earend value managiment and earend schedule performance index". International journal of project management, 400-407.

[12] Atsagher, K. (2013). Advanced Statistical Quality Control, Publications of Defense Industries Educational and Research Institute, Tehran, first edition. (in prrsian)

[13] Akbari, A. A. & Salehipour, A. (2011). Statistical control of time and cost performance indicators in construction projects. Industrial Management Studies, 10(27), 144-166. (in prrsian)

[14] W.H.Lipke. (2012). Further Study Of The Normality Of CPI and SPI(t). The Measurable News, 16-18.

[15] Cynthia A. Lowry, William H. Woodall, Charles W. Champ and Steven E. Rigdon, A. (1992). Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart, Technometrics, 34 (1), 46-53.

[16] Steven E. Rigdon. (2007). An Integral Equation For the in control Average Run Length of a Multivariate Exponentially Weighted moving Average Control Chart, Journal of Statistical Computation and Simulation, 52 (4), 351-365.

[17] Hotelling, H. (1947). Multivariate Quality Control. Illustrated by AirTesting of Sample Bombsights. Techniques of Statistical Analysis, 111-184.

[18] Noorossana, R., Shekari, M., Saghaei, A. (2012). Introduction to Statistical Quality Control Solution Manual, House of Quality Publishing Co.

[19] Noorossana, R. (2012). Statistical quality control (third edition). Tehran: Publications of the University of Science and Technology.

Functionality of T2 and MEWMA multivariable control charts in project monitoring

Mohammad Mehdi Mirzaei[9]
(Corresponding Author), Department of Industrial Engineering, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. mehdi.mirzaei.ind@gmail.com

Karim Atashgar
Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
Atashgar@iust.ac.ir

Abstract: One of the most practical methods of monitoring and controlling project performance is earned value management. The widespread use of this method in many projects leads to the production of multiple indicators with mutual influence, This important feature makes their individual analysis with errors. In this method, not only the mutual influence of the indicators is not paid attention to, but also the lack of attention to the monitoring of the variability of the indicators has caused this method to monitor the project based on the criterion of indexability. In this research, using multivariable control charts, we have simultaneously checked the performance indicators of a gas supply project based on real data. After analyzing the obtained results, we have compared the performance of Hotelling and (MEWMA) charts with each other. After comparison, it was found that MEWMA chart has more capability and sensitivity than Hotelling chart in identifying changes in multivariate processes.

Keywords: earned value management, Project monitoring, Hotelling diagram, MEWMA

1-Aim and Intriduction

A project is a temporary effort that has uncertainty due to the uniqueness of the project product and its non-repetition. One of the most important goals of the project management team is to be able to finish the project according to the budget, schedule and covering the entire work scope. Therefore, in a project, these factors must be continuously controlled [4]. Today, the importance and necessity of using a comprehensive system of project planning and control has been fully revealed in many organizations, And various methods have been invented for planning and displaying activities. When the time to perform the activities in the project is certain, the CPM critical path method is a useful tool in managing such projects, But in many situations, the execution time of the activities cannot be presented in the form of definite numbers. Therefore, tools that can deal with such issues will be very effective, which is one of the most important methods used to solve the mentioned problem, this evaluation and revision of the project is the Pert

[9] Corresponding Author: mehdi.mirzaei.ind@gmail.com

method [3]. The existence of uncertainty and possible foundations, both in the field of possible times and in the discussions related to the existence of branches and possible activities, adds to the attractiveness of project management and control issues. With the application of network analysis in the design and control of projects since the 1950s and the development of network models such as CPM and PERT, it was gradually revealed that the limited possibilities of the aforementioned methods in modeling projects that have complex networks, a problem in planning this projects. For this reason, some researchers have been looking for a more generalized tool in network analysis that has a higher adaptability than these methods and invented and developed the GERT method [1], The efficiency and special capabilities of this method have been proven to simulate, plan, schedule and analyze projects in multiple systems in different industries. Also, today, earned value management is used as a method to integrate the three dimensions of time, cost and scope, in line with objective measurement, analysis and control of project performance[5]. One of the problems that the earned value management method has is that it calculates the schedule performance index (SPI) of the project using the components of planned value (PV) and earned value (EV), that these components are considered financial and do not have a time dimension And this is the weakness of this method. On the other hand, we generally know that as we get closer to the end of the project, the amount of work we have done so far will approach the amount of work we have planned for the entire project. In simpler words, at the end of the project, due to the completion of all the scheduled works, the acquired value becomes equivalent to the cumulative program value. Therefore, at the end of the project, as the actual progress approaches the planned progress, the project schedule performance index will approach one, which means that the project is progressing according to the schedule, If the actual performance of the project may be less than one or more than one in terms of schedule, Therefore, we need an index that has a reliable behavior throughout the project and accurately shows the performance of the project in terms of time. In order to solve these problems, Lipke proposed a method called Earned Scheduling (ES), which solved the weakness of the earned value method. In this method, taking into account the acquired time, which is the developed version of the planned value and the acquired value, the performance index of the project schedule is calculated according to the time unit. But since both methods of earned value management and earned timing calculate more than one index to evaluate the performance of the project process, while these indices are not independent and have correlation, it is necessary that these indices be calculated together. Time will follow. In the statistical quality control literature, various methods have been introduced to control multivariate processes. Among the methods that are used to monitor multiple variables at the same time are the famous multivariable charts; Hotelling (T2) and Multivariate Weighted Exponential Moving Average (MEWMA). Considering that in project control methods, the mutual influence of control indicators is not checked, and the changeability of this indicator is not controlled and monitored either. This research aims to monitor the variability of important indicators in project control by considering the mutual influence of the two proposed control charts, This method helps project managers to understand how well the project is performing under the influence of natural changes by controlling variability. In this research, in order to compare Hotelling's multivariate graphs and exponential moving average, the gas supply pipeline inspection project which was planned for 19 months and with a budget of 400,000 currency units is examined. The

results of this case study show that the method proposed in this article can be useful and effective in the functional control of projects.

2-Methodology

This research is collected and analyzed quantitatively in terms of the practical purpose and in terms of the research implementation process. The data was collected from the weld inspection (radiography) conducted by a contractor company from the 8-inch gas pipeline at a distance of 35 kilometers in Fars province, between the city of Kovar and the village of Bavarian. In this research, data analysis is done using the combined method of obtained timing and multivariate statistical quality control charts of Hotelling and MEWMA with the help of Excel and Minitab software. After collecting the required data, SPI (t) and CPI index are calculated first, then they are analyzed using Hotelling and MEWMA multivariate statistical quality control charts and finally the results are compared with each other.

3-Findings

After collecting information about planned value (PV), earned value (EV) and actual cost (AC) for 20 one-month time periods, project cost performance indicators (CPI), project schedule performance index (SPI) and project scheduling performance index based on time (SPI (t)) was calculated, that in the 20th period, the SPI is equal to one and does not show any delay in the schedule, while the SPI (t) is equal to 0.95 and indicates that this project is 5% of the The schedule has been delayed. In this research, it is necessary to examine the data for normality. , since the P-Value for SPI (t) is equal to 0.02 and is smaller than the error value of 0.05, The assumption of normality of SPI (t) data is rejected, therefore, Box-Cox transformation test is used to normalize them. The value of P-value for CPI values is equal to ۰٫۰۷۷, which is greater than the error value of ۰٫۰۵, so the assumption of normality of CPI data is accepted.

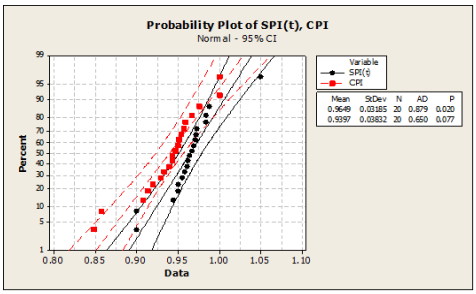


Figure1: Normal probability plot

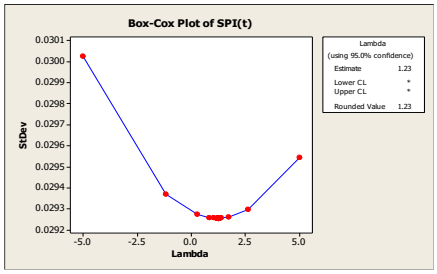


Figure2: Box-Cox transformation plot for SPI(t)

After checking the normality of the data, we checked their correlation using the Pearson test. Since the value of P-Value is greater than the error value of 0.05, therefore, the

assumption of correlation between SPI (t) and CPI index is accepted, Also, the correlation between them shows a value of 0.794, which indicates a strong correlation between these two indicators.

After the correlation between the two investigated indicators was confirmed, we examined whether the project is under control using a multivariable chart. According to Figure 3, the results obtained from the Hotelling chart indicate that the project is under control.

In the MEWMA multivariate exponentially weighted moving average chart, if we consider the value of R (weight matrix) to be equal to I (one matrix), then the Hotelling chart is equivalent to the MEWMA chart And these two charts can be compared with each other. Figure ٤ shows the MEWMA chart in a state where the detection capability is equal to one. According to Figure ٤, the MEWMA values for samples ٨, ١٠ and ٢٠ are higher than the control limits, so it can be concluded that the project is out of control using the MEWMA diagram. Also, in this multivariable control chart, even though all the points are within the range of UCL and LCL counters, there are ٩ points consecutively on one side of the center line, which is one of the abnormal conditions in the control charts that lead to out It comes from controlling the process.

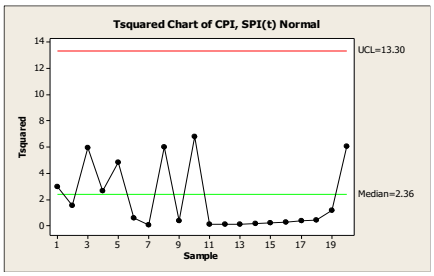


Figure3: Hotelling chart

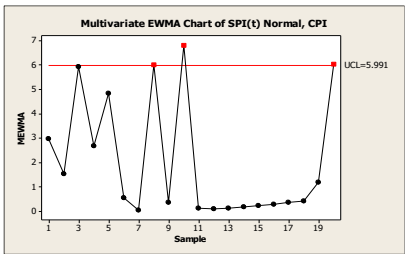


Figure4: MEWMA chart with the ability to detect one

4-Discussion and Conclusion

The existing methods of project control not only do not take into account the mutual effect of project performance evaluation indicators, but also do not monitor the variability of those indicators. Monitoring the variability of indicators helps the project control managers to realize that the implementation process is not affected by abnormal factors. In this research, using the multivariable control chart method, it has been shown that monitoring the performance indicators of a project, taking into account their mutual influence, can help project control managers in controlling the variability of performance indicators, and analyzing the performance of the project. In this article, two Hotelling diagrams and a multivariate exponential weighted moving average were proposed to monitor the status of projects. Then, the performance of the proposed methods was investigated in a gas pipeline inspection project. The results of data analysis using the Hotelling diagram showed that the project is under control. But the results of data analysis using exponential moving average chart indicate that the project is out of control. Considering that the project was planned for 19 months with a cost of 400,000 monetary units, but in reality it was completed in 20 months with a budget of 410,000 monetary units and it can be said that the project was out of control. Because the time and cost of

the project exceeded the planned time and budget. Most of the out-of-control times in this gas supply project are related to the times when the gas supply pipeline canals have passed through villages and agricultural lands, and this (being out of control) is due to the non-evacuation of the agricultural land owners who dug the canals. , the products of their last crop have affected them. This has delayed the project or increased the cost to obtain the consent of the land owners to empty the land of products, etc., and has also caused an increase in the cost of equipment and human resources of the project at these times. Therefore, it can be concluded that the MEWMA diagram has a better ability to detect whether the process is under control and also has more sensitivity than the multivariable Hotelling diagram in identifying small and medium changes in multivariable processes. The results of checking the controllability of the project using MEWMA are in line with the actual results. Therefore it is suggested that in project control, in addition to the traditional methods of project control, a multi-variable chart should also be used to monitor the variability of indicators.

5-Reference

[1] Farzi Poursaen, R. (1999). Management and Control of Research and Development Projects Using a Possible GERT Approach, The Second Conference of Industries and Mines Research and Development Centers, Tehran, Association of Research and Development Centers of Industries and Mines.

[2] Lipke, W. (2009). "Prediction of project outcome, the Application of Statistical methods to earend value managiment and earend schedule performance index". International journal of project management, 400-407.

[3] Kazemi, A., and Fakhouri, P. (2013). Presenting a fuzzy control system to estimate the project completion time in Gert networks. International Journal of Industrial Engineering and Production Management. 23 (2): 251-263.

[4] PMBOK (2017). A Guide to the Project Management Body of Knowledge. PMBOK Guide6.

[5] PMI. (2013). "A Guide to the Project Management Body of Knowledge". PMBOK Guide