

## کنترل و پایش آماری شاخص‌های عملکرد زمان و هزینه پروژه‌ها: مطالعه موردی در پروژه‌های

### عمرانی

علی‌اکبر اکبری، امیر صالحی‌پور

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب  
، [a\\_akbari@azad.ac.ir](mailto:a_akbari@azad.ac.ir)  
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس  
، [a.salehipour@modares.ac.ir](mailto:a.salehipour@modares.ac.ir)

### چکیده

سیستم مدیریت ارزش کسب‌شده متدولوژی ارزش‌مندی در تحلیل و کنترل عملکرد پروژه است. مدیریت ارزش کسب‌شده با یکپارچه‌سازی سه بعد مدیریت زمان پروژه، مدیریت هزینه پروژه و مدیریت محدوده پروژه امکان اندازه‌گیری دقیق میزان پیشرفت پروژه و اتخاذ تصمیمات به‌موقع برای انجام اقدامات اصلاحی را فراهم می‌آورد. سیستم مدیریت ارزش کسب‌شده مدیران پروژه را قادر می‌سازد بتوانند میزان مغایرت‌های زمانی و هزینه‌ای پروژه را از طریق محاسبه شاخص‌های عملکرد زمان و هزینه پروژه تشخیص دهند و همچنین بتوانند هزینه نهایی و زمان اتمام پروژه را پیش‌بینی کنند. تاکنون روش‌های متعددی به‌منظور کنترل و پایش عملکرد زمانی و هزینه‌ای فعالیت‌های پروژه ارائه شده‌است. در این مقاله در راستای ارتقای عملکرد تکنیک مدیریت ارزش کسب‌شده، از نمودارهای کنترل کیفیت آماری به‌منظور کنترل و پایش آماری عملکرد زمانی و هزینه‌ای فعالیت‌های پروژه استفاده می‌شود. نتایج با نمودارهای روند که در حل حاضر به‌عنوان رویکرد مرسوم مطرح می‌باشند، مقایسه شده‌است.

**واژه‌های کلیدی:** تکنیک ارزش کسب‌شده، نمودارهای کنترل کیفیت آماری، کنترل و پایش شاخص‌های ارزش کسب‌شده

### مقدمه

امروزه با افزایش پروژه‌های صنعتی، عمرانی و خدماتی در تمام دنیا و گسترش پروژه‌های چند ملیتی، نیاز به زبان مشترک در مدیریت پروژه‌ها روز به روز در حال افزایش است. نیاز به زبان مشترک و انجام درست پروژه‌ها در زمان مقرر، مطابق با بودجه مصوب و محدوده کار تعیین‌شده، همگی موجب ارتقاء و مهم‌تر شدن دانش مدیریت پروژه در زمینه‌های مختلف شده‌است. در سال‌های اخیر، در راستای مدیریت زمان و هزینه پروژه که همانا از مهمترین حوزه‌ها و اهداف هر پروژه‌ای به شمار می‌روند، بحث مدیریت ارزش کسب‌شده پروژه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. روش‌های نو و ابزارهای تازه که هر روزه به مدیریت ارزش کسب‌شده اضافه می‌شوند توانایی و کاربری آن را ارتقاء بخشیده و موجب گسترش استفاده از آن در کنترل زمان و هزینه پروژه‌های بزرگ و کوچک شده‌است.

تعیین میزان اثربخشی یک برنامه کنترل زمان و هزینه پروژه بسیار مهم است به‌طوری‌که نشان‌دهنده روند پیشرفت پروژه بوده و بسیار بر هزینه‌های آتی پروژه و زمان اتمام آن اثرگذار است. این اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که تاخیر در تحویل یک پروژه تبعات سنگین مالی و اعتباری را بر پروژه تحمیل خواهد نمود. در حال حاضر تکنیک ارزش کسب‌شده به‌عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین تکنیک کنترل و پایش زمان و هزینه پروژه‌ها مطرح می‌باشد. در این تکنیک شاخص‌های موردنظر پس از محاسبه و استخراج، با عدد ثابت ۱ و یا در مواردی با پروژه‌های مشابه مقایسه می‌شوند. این مقایسه مبنای نتیجه‌گیری و قضاوت وضعیت پروژه را شکل می‌دهد.

در مواردی نیز مشاهده شده‌است که مقایسه بر مبنای سوابق شاخص‌ها صورت می‌گیرد. بدین صورت که مقادیر شاخص‌ها طی

زمان (روی نمودار روند) ترسیم می‌شوند. به راحتی می‌توان نشان داد که هر یک از دو روش دارای معایب و مشکلاتی هستند و بنابراین نمی‌توانند روش‌های کارایی در کنترل و پایش شاخص‌ها باشند. به عنوان مثال هنگام مقایسه مقادیر شاخص‌ها با عدد ثابت ۱ دو سؤال به ذهن می‌آید. اول اینکه برای پروژه‌هایی که از حساسیت بالاتری برخوردار هستند چگونه می‌توان فهمید که عملکرد شاخص‌ها مناسب است و اصطلاحاً پروژه در وضعیت مناسبی قرار دارد. دوم اینکه چگونه می‌توان اثربخشی سیستم کنترل و پایش زمان و هزینه پروژه را بررسی و ارزیابی نمود. بنابراین تنها با بهره‌گیری از این روش نمی‌توان دریافت که چه مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده برای شاخص‌ها مجاز است. دلایل مشابهی را می‌توان برای رویکرد دوم برشمرد. لذا توسعه روش‌های پیشرفته‌تر که بتواند شاخص‌های مذکور را طی زمان کنترل و پایش نموده و تحت کنترل بودن / نبودن آن‌ها را نشان دهند، بسیار حائز اهمیت است.

در این مقاله نگرشی جدید به مدیریت ارزش کسب‌شده شده است و با به کارگیری اصول کنترل کیفیت آماری، قابلیت‌ها و کاربردهای مدیریت ارزش کسب‌شده را ارتقاء می‌دهیم. رویکرد ارائه شده مبتنی بر بهره‌گیری از نمودارهای کنترل کیفیت آماری و پایش شاخص‌ها توسط این نمودارها می‌باشد. رویکرد توسعه داده شده این امکان را فراهم می‌آورد که حتی تغییرات کوچک رخ داده در شاخص‌ها را نیز بتوان کنترل و پایش نمود. ساختار مقاله بدین شرح است. بخش دوم یک مرور اجمالی بر پیشینه تحقیق مسئله دارد. بخش سوم رویکرد پیشنهادی را به همراه ملاحظات آماری مربوطه شرح می‌دهد. نتایج یک مطالعه موردی نیز در بخش سوم ارائه شده است. نتیجه‌گیری و بیان تحقیقات آتی خاتمه‌دهنده این مقاله هستند.

### پیشینه تحقیق

مفهوم اولیه ارزش کسب‌شده در اواخر قرن بیستم میلادی توسط مهندسين صنایع در ایالات متحده آمریکا پدید آمد. این مفهوم اولیه شامل استفاده از یک رویکرد سه بعدی برای ارزیابی کارایی عملکرد هزینه کار انجام شده در کارخانه‌ها می‌باشد. بنابراین آن‌ها جهت اندازه‌گیری عملکرد کارخانه‌ها "استانداردهای کسب‌شده" را با "هزینه‌های صرف شده" مورد مقایسه قرار می‌دادند. در نتیجه ساده‌ترین حالت مدیریت ارزش کسب‌شده به وجود آمد. در سال ۱۹۶۵ مفهوم ارزش کسب‌شده در قالب ۳۵ معیار مطرح گردید. در سال ۱۹۹۵ اولین نسخه "سیستم مدیریت ارزش کسب‌شده" مشتمل بر ۳۲ معیار معرفی گردید. در سال ۲۰۰۰ انجمن مدیریت پروژه آمریکا مجموعه‌ای از اصطلاحات و فرمول‌های ساده شده مدیریت ارزش کسب‌شده را در راهنمای پیکره دانش مدیریت پروژه (PMBOK®) قرار داد. آن‌چه که امروزه این سیستم را بسیار فراگیر و پرکاربرد نموده است، بهبود در عملکرد هزینه و زمان‌بندی پروژه است که در نتیجه به کارگیری سیستم مدیریت ارزش کسب‌شده حاصل می‌گردد. براساس مطالعات نویسندگان، تاکنون تحقیق مشابهی با موضوع بهره‌گیری از نمودارهای کنترل کیفیت آماری برای کنترل و پایش شاخص‌های تکنیک مدیریت ارزش کسب‌شده صورت نگرفته است. اگرچه تحقیقات نسبتاً پراکنده‌ای در راستای بهبود فرآیندهای کنترل و مدیریت پروژه براساس استفاده از ابزارهای کنترل کیفیت آماری صورت گرفته است، ولی به استثناء چند مطالعه نسبتاً ساده که با ملحوظ نمودن مفروضات بسیاری صورت گرفته است، نمی‌توان دقیقاً آن‌ها را به عنوان سوابق و تحقیقات پیشین با توجه به موضوع این تحقیق ملحوظ نمود. علی‌رغم این مسئله به دلیل نبود تحقیقات مرتبط با موضوع تحقیق، در این بخش برخی از مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته در خصوص بهره‌گیری از نمودارها و ابزارهای کنترل کیفیت آماری به منظور بهبود سیستم‌های کنترل زمان و هزینه پروژه و خصوصاً تکنیک مدیریت ارزش کسب‌شده آورده می‌شود.

لاروس و همکاران به منظور تسهیل کنترل و پایش عملکرد پروژه‌ها رویکردی توسعه داده‌اند که می‌تواند با در نظر گرفتن فاکتورها و شاخص‌های مربوط به زمان، هزینه، محدوده، کیفیت و ریسک، عملکرد پروژه را کنترل و پایش نماید [۱۸]. علی‌رغم مزایای تکنیک مدیریت ارزش کسب‌شده، این تکنیک ممکن است برخی اطلاعات مهم را ارائه ندهد و بنابراین مدیران پروژه نتوانند از برخی مغایرت‌ها و تغییرات در عملکرد پروژه‌هایشان و همین‌طور از علت این مغایرت‌ها مطلع شوند. به منظور رفع این مشکل، لو و لین از نمودارهای کنترل کیفیت آماری در بهبود تکنیک مدیریت ارزش کسب‌شده بهره گرفتند. به منظور نشان دادن مزایای رویکرد توسعه داده شده، آن‌ها رویکرد خود را با رویه مرسوم تکنیک مدیریت ارزش کسب‌شده مقایسه

نموداند [۱۹]. استین نیز به مطالعه کیفیت در پروژه‌ها پرداخته‌است. با توجه به اینکه تکنیک‌ها و رویکردهایی که در بحث کنترل کیفیت به‌کار گرفته می‌شوند بسیار غنی بوده ولی کمتر در بحث مدیریت کیفیت پروژه‌ها راه یافته‌اند. وی نشان داده‌است چگونه بهره‌گیری از این تکنیک‌ها در حوزه مدیریت پروژه می‌تواند مفید و کمک‌کننده باشد [۳۲]. ناون به‌منظور کنترل برخط پروژه‌های عمرانی به‌خصوص در محل کارگاه (سایت پروژه)، اقدام به توسعه ابزارها و تکنیک‌های کنترل کیفیت آماری برای برخی از مهم‌ترین عملیات‌های مربوط به این پروژه‌های عمرانی نموده‌است [۲۹]. چئونگ و همکاران اقدام به توسعه یک سیستم کنترل و پایش عملکرد پروژه‌های عمرانی مبتنی بر وب با در نظر گرفتن عوامل مربوط به نیروی انسانی، هزینه، کیفیت، زمان، ایمنی و محیط زیست و رضایت ذی‌نفعان نموده‌اند. سیستم آن‌ها شامل توسعه معیارهای عملکردی و کارکردی برای هر یک از عوامل فوق و نحوه اندازه‌گیری آن‌ها می‌باشد. به‌عنوان یکی از مزایای سیستم مبتنی بر وب توسعه داده‌شده، مدیران پروژه، تیم پروژه و سایر ذی‌نفعان می‌توانند پیشرفت پروژه را تحت نظارت و پایش داشته‌باشند [۱۰]. مک‌کیم و همکاران با استفاده از مصاحبه‌های انجام‌شده با مدیران و تیم پروژه ۴۰ پروژه عمرانی، اقدام به شناسایی فاکتورهای مهم و اثرگذار در پیشرفت پروژه و مشکلات معمول نموده‌اند [۲۸]. الطباطبایی و همکاران از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌منظور کنترل پروژه و خصوصاً پایش و پیش‌بینی عملکرد پروژه استفاده کرده‌اند. آن‌ها ۵ شبکه عصبی مصنوعی را طراحی نموده‌اند که مدیران پروژه را قادر می‌سازد تا برنامه بازنگری‌شده پروژه را در بازه‌های مشخصی و آن‌هم طی پیشرفت پروژه توسعه داده و ترسیم نمایند [۴]. برازا و بوئنو با معرفی یک رویکرد احتمالی جدید در خصوص کنترل پروژه، عملکرد پایانی پروژه را پیش‌بینی کرده‌اند. رویکرد آن‌ها می‌تواند پیش‌بینی‌های قابل قبولی از عملکرد آتی پروژه ارائه دهد [۶]. برای اولین بار لپیکه و واگن در سال ۲۰۰۰ نحوه استفاده از نمودارهای کنترلی در کنترل شاخص‌های ارزش کسب‌شده را تشریح نمودند [۲۵]. با مطرح‌شدن این موضوع تحقیقات دیگری در مورد نرمال‌بودن یا نرمال‌نبودن توزیع آماری شاخص‌ها و مغایرت‌های شاخص‌های مذکور صورت گرفت تا اثباتی بر امکان استفاده از نمودارهای کنترلی برای این شاخص‌ها باشد [۱۱، ۲۱ و ۲۳]. پس از این، مطالعات تمرکز بیشتری بر استفاده از آمار و ابزارهای آماری در پیش‌بینی و تحلیل وضعیت پروژه‌ها داشته‌است [۲۴].

### بهره‌گیری از نمودارهای کنترلی فردی در کنترل و پایش عملکرد هزینه و زمان پروژه: مطالعه موردی در پروژه‌های عمرانی

هر فرآیندی به‌طور طبیعی دارای واریانس عملکردی است، و نمودارهای کنترل کیفیت آماری به‌عنوان ابزارهایی توانمند در کنترل و نظارت بر فرآیندها، می‌توانند به کمک اصول آماری میان واریانس‌های طبیعی و واریانس‌های غیرطبیعی فرآیند اختلاف ایجاد می‌کنند. همان‌طور که در بخش ۲ اشاره گردید، تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در این زمینه صورت گرفته‌است به‌طوری‌که تمامی آن‌ها مبتنی بر این فرض بوده‌اند که توزیع آماری داده‌های مربوط به شاخص‌ها بایستی از توزیع آماری نرمال پیروی کند و یا با دقت مناسبی به توزیع آماری نرمال قابل تقریب باشد. در این مقاله عملاً فرض خاصی برای توزیع آماری داده‌های مربوط به شاخص‌ها در نظر گرفته نشده‌است و بنابراین چند رویکرد متفاوت هنگامی که توزیع آماری داده‌های تحت مطالعه غیرنرمال باشد، ارائه شده‌است. لذا چهارچوب توسعه داده‌شده در این مقاله دارای جامعیت و کاربردپذیری بیشتری می‌باشد.

#### ۱.۳. شاخص‌های عملکرد دوره‌ای

شاخص‌های عملکرد هزینه و زمان که از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد در تکنیک مدیریت ارزش کسب‌شده می‌باشند، می‌توانند به‌صورت دوره‌ای محاسبه و بررسی شوند. در این حالت مقدار ارزش کسب‌شده در یک دوره ارزیابی نسبت به ارزش واقعی و ارزش برنامه‌ریزی شده در همان دوره سنجیده می‌شود. این شاخص‌ها کارایی تیم پروژه را در یک دوره ارزیابی نشان می‌دهند. استفاده از نمودار کنترلی برای شاخص‌های مذکور نشان می‌دهد که آیا تغییرات ایجاد شده در عملکرد زمان‌بندی و عملکرد هزینه در هر دوره، حالتی غیرعادی دارند و یا تغییرات ایجاد شده طبیعی و قابل چشم‌پوشی هستند. مهم‌ترین

شاخص‌های عملکرد زمان و هزینه به‌ترتیب شاخص‌های SPI و CPI هستند [۱].

### ۱.۱.۳. شاخص عملکرد هزینه

شاخص عملکرد هزینه<sup>۱</sup> نشان‌دهنده کارایی تیم پروژه در استفاده از منابع مالی پروژه است. این شاخص از تقسیم ارزش کسب‌شده تجمعی بر هزینه واقعی تجمعی به‌دست می‌آید (منظور از تجمعی در نظر گرفتن کل فعالیت‌ها تا زمان حال است). این شاخص توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$CPI = \frac{EV}{AC} \quad (1)$$

### ۲.۱.۳. شاخص عملکرد زمان‌بندی

شاخص عملکرد زمان‌بندی<sup>۲</sup> نشان‌دهنده کارایی تیم پروژه در استفاده از زمان پروژه است و از تقسیم ارزش کسب‌شده تجمعی بر هزینه برنامه‌ای تجمعی حاصل می‌شود (رابطه ۲).

$$SPI = \frac{EV}{PV} \quad (2)$$

### ۲.۳. شرایط بهره‌گیری از نمودارهای کنترلی

نمودارهای کنترلی شوهارت پایه و اساس شکل‌گیری بسیاری از نمودارهای کنترلی هستند. محاسبات ساده و دامنه کاربردپذیری وسیع آن‌ها که به دلیل شکل‌گیری این نمودارها براساس توزیع آماری نرمال می‌باشد، این نمودارها را به پراراسته‌ترین نمودارهای کنترل کیفیت آماری تبدیل کرده‌است. از آنجایی‌که بسیاری از فرآیندها را می‌توان توسط توزیع آماری نرمال مدل نمود و یا با دقت قابل قبولی به توزیع آماری نرمال تقریب زد، امروزه این نمودارها کاربرد زیادی دارند. نمودارهای کنترلی شوهارت براساس دو فرض زیر بنا شده‌اند [۲].

توزیع آماری داده‌ها باید از توزیع آماری نرمال پیروی کند و یا با دقت مناسبی قابل تقریب به آن باشند. داده‌های متوالی مستقل از یکدیگر باشند. استقلال داده‌ها بدین معنا است که مشاهده یک نمونه در مقدار مشاهده شده برای نمونه دیگر اثری نداشته‌باشد.

به‌راحتی می‌توان نشان داد که مناسب‌ترین نمودار کنترلی برای کنترل و پایش شاخص‌های مورد مطالعه در این مقاله، نمودارهای کنترلی فردی می‌باشند، چراکه (۱) دو شاخص ارزش کسب‌شده مورد بررسی دارای مقادیر کمی بوده و در بازه‌ای پیوسته تهیه می‌شوند و (۲) این دو شاخص و بسیاری از شاخص‌های دیگر تکنیک ارزش کسب‌شده در بازه‌های هفتگی و یا ماهانه جمع‌آوری می‌شوند. این بدان معنی است که تعداد نمونه‌های لازم برای ترسیم نمودارهای کنترلی بسیار کم است.

### ۳.۳. توزیع آماری داده‌های جمع‌آوری‌شده

به‌منظور درک بهتر رویکرد پیشنهادی، توسعه آن‌را با یک مثال عملی ادامه می‌دهیم. این مثال یک مطالعه موردی برگرفته از یک پروژه عمرانی می‌باشد. مقادیر شاخص‌های CPI و SPI به‌صورت ماهانه محاسبه شده‌اند و برای یک بازه ۳۰ ماهه استخراج شده‌است (جدول ۱). از دو نرم‌افزار Minitab (نسخه ۱۵) و Easyfit (نسخه ۳.۴) به‌منظور تشخیص توزیع آماری داده‌ها بهره گرفته شده‌است. علی‌رغم قابلیت نرم‌افزار Minitab در محاسبات و تحلیل‌های آماری و ترسیم نمودارهای کنترل کیفیت آماری، قابلیت این نرم‌افزار در تعیین توزیع آماری داده‌ها محدود به انتخاب کاربر از بین چند توزیع می‌باشد. در نقطه مقابل نرم‌افزار Easyfit توانایی منحصر به فردی در تشخیص بسیاری از توزیع‌های آماری معروف دارد. به‌منظور شناخت جامع‌تری از توزیع آماری داده‌های تحت مطالعه، آزمون‌های برازندگی از طریق سه آزمون آماری متفاوت کلموگراف - اسمیرنوف، اندرسون - دارلینگ و خی‌دو صورت گرفته‌اند.

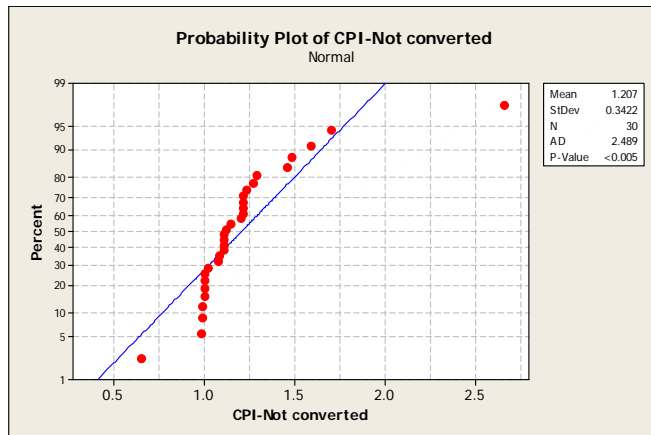
<sup>۱</sup> Cost Performance Index: CPI

<sup>۲</sup> Schedule Performance Index: SPI

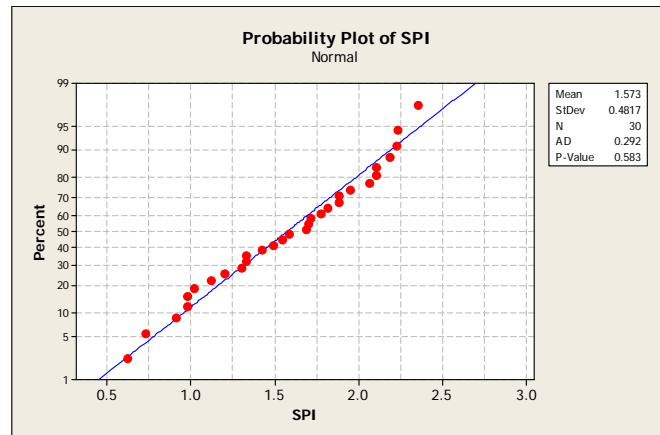
جدول ۱. اطلاعات جمع آوری شده مربوط به شاخص‌های SPI و CPI

| شماره نمونه | شاخص SPI | شاخص CPI |
|-------------|----------|----------|
| ۱           | ۰.۷۳     | ۱.۰۰     |
| ۲           | ۰.۶۲     | ۱.۲۱     |
| ۳           | ۰.۹۸     | ۱.۰۸     |
| ۴           | ۰.۹۱     | ۱.۱۵     |
| ۵           | ۱.۳۳     | ۱.۰۸     |
| ۶           | ۲.۱۰     | ۱.۵۹     |
| ۷           | ۱.۰۲     | ۱.۴۶     |
| ۸           | ۰.۹۸     | ۱.۱۱     |
| ۹           | ۲.۳۳     | ۱.۰۲     |
| ۱۰          | ۲.۳۵     | ۱.۲۰     |
| ۱۱          | ۱.۱۲     | ۰.۹۸     |
| ۱۲          | ۲.۲۲     | ۰.۹۹     |
| ۱۳          | ۲.۱۸     | ۱.۱۱     |
| ۱۴          | ۲.۱۰     | ۱.۴۸     |
| ۱۵          | ۱.۹۵     | ۱.۲۱     |
| ۱۶          | ۱.۳۳     | ۲.۶۶     |
| ۱۷          | ۱.۵۴     | ۱.۱۲     |
| ۱۸          | ۲.۰۶     | ۱.۲۱     |
| ۱۹          | ۱.۸۸     | ۱.۷۰     |
| ۲۰          | ۱.۸۸     | ۱.۰۰     |
| ۲۱          | ۱.۸۱     | ۱.۱۱     |
| ۲۲          | ۱.۲۰     | ۰.۶۵     |
| ۲۳          | ۱.۷۷     | ۱.۲۹     |
| ۲۴          | ۱.۷۰     | ۱.۲۳     |
| ۲۵          | ۱.۴۹     | ۰.۹۹     |
| ۲۶          | ۱.۶۹     | ۱.۲۱     |
| ۲۷          | ۱.۷۱     | ۱.۲۷     |
| ۲۸          | ۱.۵۸     | ۱.۰۰     |
| ۲۹          | ۱.۳۰     | ۱.۰۰     |
| ۳۰          | ۱.۴۲     | ۱.۱۱     |

براساس نتایج نرم‌افزار Easyfit (در اینجا آورده نشده‌اند) داده‌های شاخص SPI از توزیع آماری نرمال پیروی می‌کنند. شکل الف. ۱ که بر پایه آزمون آماری اندرسون-دارلینگ و با بهره‌گیری از نرم‌افزار Minitab تهیه شده‌است ضمن تایید این مطلب نشان می‌دهد که نمی‌توان فرض نرمال بودن توزیع آماری داده‌های شاخص SPI را رد نمود.



ب.



الف.

شکل ۱. نیکویی برآزش انجام شده مربوط به توزیع داده‌های شاخص‌های مورد مطالعه توسط آزمون آندرسون-دارلینگ. الف. شاخص SPI، ب. شاخص CPI

نتایج برآزش‌های انجام شده توسط نرم‌افزار Easyfit روی داده‌های شاخص CPI نشان می‌دهد که توزیع آماری این داده‌ها از توزیع‌های آماری معروف همانند توزیع نمایی، توزیع ویبول و توزیع لاگ‌نرمال که برای آن‌ها نمودار کنترلی توسعه داده شده است پیروی نمی‌کند. لازم به ذکر است که حتی در صورت تبعیت توزیع داده‌های مذکور از توزیع‌های فوق، با توجه به ماهیت شاخص‌های مورد مطالعه و یادآوری این نکته که نمودارهای کنترلی فردی مناسب‌ترین نوع نمودار برای شاخص‌های مذکور هستند، نمودارهای کنترلی توسعه داده شده براساس دیگر توزیع‌های آماری نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. شکل ب. برآزش انجام شده توسط نرم‌افزار Minitab را برای داده‌های مذکور نشان می‌دهد. گرچه این آزمون تنها برای بررسی فرض نرمال بودن توزیع آماری داده‌های مربوطه انجام شده است و نمی‌توان آن‌را به دیگر توزیع‌های آماری تعمیم داد، ولی با توجه به شکل می‌توان فرض نرمال بودن داده‌های مربوطه را رد نمود. از طرفی، علی‌رغم اینکه بسیاری از محققین معتقدند که نمودارهای کنترلی فردی نسبت به نقض فرض نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها بسیار باثبات هستند [۳۱]، لیکن توصیه شده است از آن‌ها در شرایطی که توزیع آماری داده‌ها از توزیع آماری نرمال پیروی می‌کند و یا قابل تقریب به آن باشد، استفاده شود. بنابراین باید توزیع آماری داده‌های شاخص CPI را به توزیع آماری نرمال تبدیل نمود.

### ۴.۳. تبدیل داده‌های با توزیع آماری غیرنرمال به توزیع آماری نرمال

به‌عنوان یکی از روش‌های متداول در بهره‌گیری از نمودارهای کنترلی شوهارت برای داده‌های غیرنرمال، تبدیل توزیع آماری داده‌ها به توزیع آماری نرمال مطرح می‌باشد. روش‌های دیگری نیز قابل استفاده هستند که در راس آن‌ها می‌توان به محاسبه حدود کنترلی احتمالی اشاره نمود. در این مقاله از رویکرد تبدیل استفاده شده است.

#### ۱.۴.۳. تبدیل توانی (نمایی)

به‌عنوان یکی از رایج‌ترین تبدیل‌ها، در تبدیل توانی یک توزیع آماری ویبول با پارامتر شکل ۱ به توان ۱/۳.۶ رسانده می‌شود تا تقریب مناسبی از توزیع آماری ویبول به توزیع آماری نرمال به دست آید. در مرجع [۳۱] بهترین مقدار برای این تبدیل نمایی ۳.۵۱۴۲ معرفی شده است. البته باید توجه داشت که بسته به پارامترهای توزیع ممکن است این مقدار تغییر کند، همانند ۳.۷۷ و ۰.۲۷۷۷ که توسط مونت‌گومری استفاده شده است [۳۱]. حالت عمومی‌تر این نوع تبدیل به تبدیل Box-Cox معروف است و در آن مقداری که متغیر تصادفی مورد مطالعه به توان آن مقدار رسانده می‌شود، از -۵ تا +۵ قابل تغییر می‌باشد (رابطه ۳):

$$T(X) = (X^\lambda - 1)/\lambda \quad (3)$$

در رابطه (۳) پارامتر تبدیل است. برای مقدار  $X = 0$  براساس محاسبه لگاریتم طبیعی داده‌ها، تبدیل صورت می‌گیرد. از

معایب این تبدیل این است که فقط برای داده‌های مثبت می‌توان از آن استفاده کرد. جدول ۲ داده‌های تبدیل یافته شاخص CPI توسط این تبدیل را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که براساس نرم‌افزار Minitab مقدار بهینه پارامتر تبدیل Box-Cox ۰.۹- می‌باشد (شکل ح.۳). ولی حتی تبدیل با این مقدار هم نتوانسته‌است منجر به ارائه داده‌های دارای توزیع نرمال شود.

جدول ۲. اعمال تبدیل‌های متفاوت روی داده‌های غیرنرمال شاخص CPI

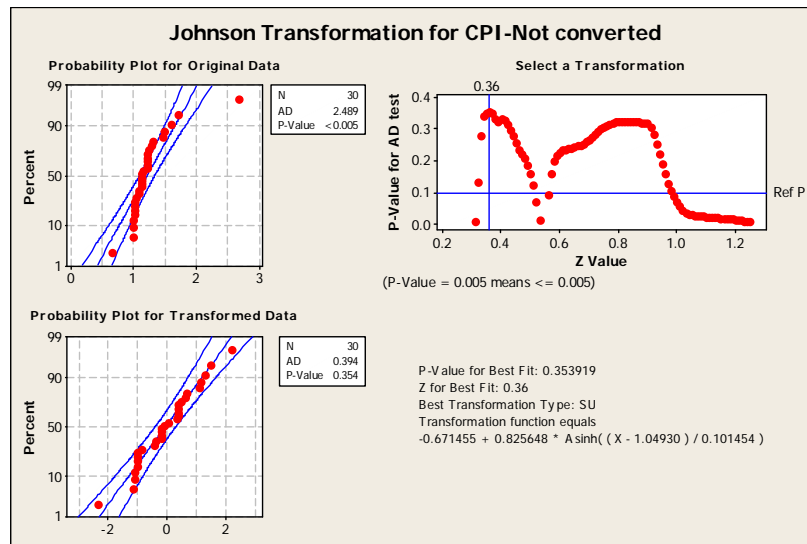
| شماره نمونه | ۰.۲۷۷۷ | ۳.۵۱۴۲ | ۰.۵   | ۰.۷۵  | ۱     | ۳     | ۵     |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ۱           | ۱.۰۰   | ۱.۰۰   | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  |
| ۲           | ۱.۰۵   | ۱.۹۶   | ۰.۲۰  | ۰.۲۱  | ۰.۲۱  | ۰.۲۶  | ۰.۳۲  |
| ۳           | ۱.۰۲   | ۱.۳۱   | ۰.۰۸  | ۰.۰۸  | ۰.۰۸  | ۰.۰۹  | ۰.۰۹  |
| ۴           | ۱.۰۴   | ۱.۶۱   | ۰.۱۴  | ۰.۱۴  | ۰.۱۵  | ۰.۱۷  | ۰.۲۰  |
| ۵           | ۱.۰۲   | ۱.۲۹   | ۰.۰۷  | ۰.۰۷  | ۰.۰۸  | ۰.۰۸  | ۰.۰۹  |
| ۶           | ۱.۱۴   | ۵.۱۰   | ۰.۵۲  | ۰.۵۵  | ۰.۵۹  | ۱.۰۱  | ۱.۸۳  |
| ۷           | ۱.۱۱   | ۳.۷۸   | ۰.۴۲  | ۰.۴۴  | ۰.۴۶  | ۰.۷۰  | ۱.۱۳  |
| ۸           | ۱.۰۳   | ۱.۴۴   | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۲  | ۰.۱۴  |
| ۹           | ۱.۰۱   | ۱.۰۷   | ۰.۰۲  | ۰.۰۲  | ۰.۰۲  | ۰.۰۲  | ۰.۰۲  |
| ۱۰          | ۱.۰۵   | ۱.۹۰   | ۰.۱۹  | ۰.۲۰  | ۰.۲۰  | ۰.۲۴  | ۰.۳۰  |
| ۱۱          | ۰.۹۹   | ۰.۹۳   | -۰.۰۲ | -۰.۰۲ | -۰.۰۲ | -۰.۰۲ | -۰.۰۲ |
| ۱۲          | ۱.۰۰   | ۰.۹۷   | -۰.۰۱ | -۰.۰۱ | -۰.۰۱ | -۰.۰۱ | -۰.۰۱ |
| ۱۳          | ۱.۰۳   | ۱.۴۴   | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۲  | ۰.۱۴  |
| ۱۴          | ۱.۱۲   | ۳.۹۸   | ۰.۴۳  | ۰.۴۶  | ۰.۴۸  | ۰.۷۵  | ۱.۲۳  |
| ۱۵          | ۱.۰۵   | ۱.۹۶   | ۰.۲۰  | ۰.۲۱  | ۰.۲۱  | ۰.۲۶  | ۰.۳۲  |
| ۱۶          | ۱.۳۱   | ۳۱.۱۳  | ۱.۲۶  | ۱.۴۴  | ۱.۶۶  | ۵.۹۴  | ۲۶.۴۳ |
| ۱۷          | ۱.۰۳   | ۱.۴۹   | ۰.۱۲  | ۰.۱۲  | ۰.۱۲  | ۰.۱۳  | ۰.۱۵  |
| ۱۸          | ۱.۰۵   | ۱.۹۶   | ۰.۲۰  | ۰.۲۱  | ۰.۲۱  | ۰.۲۶  | ۰.۳۲  |
| ۱۹          | ۱.۱۶   | ۶.۴۵   | ۰.۶۱  | ۰.۶۵  | ۰.۷۰  | ۱.۳۰  | ۲.۶۴  |
| ۲۰          | ۱.۰۰   | ۱.۰۰   | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  |
| ۲۱          | ۱.۰۳   | ۱.۴۴   | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۲  | ۰.۱۴  |
| ۲۲          | ۰.۸۹   | ۰.۲۲   | -۰.۳۹ | -۰.۳۷ | -۰.۳۵ | -۰.۲۴ | -۰.۱۸ |
| ۲۳          | ۱.۰۷   | ۲.۴۵   | ۰.۲۷  | ۰.۲۸  | ۰.۲۹  | ۰.۳۸  | ۰.۵۱  |
| ۲۴          | ۱.۰۶   | ۲.۰۷   | ۰.۲۲  | ۰.۲۲  | ۰.۲۳  | ۰.۲۹  | ۰.۳۶  |
| ۲۵          | ۱.۰۰   | ۰.۹۷   | ۰.۰۱  | -۰.۰۱ | -۰.۰۱ | -۰.۰۱ | -۰.۰۱ |
| ۲۶          | ۱.۰۵   | ۱.۹۶   | ۰.۲۰  | ۰.۲۱  | ۰.۲۱  | ۰.۲۶  | ۰.۳۲  |
| ۲۷          | ۱.۰۷   | ۲.۳۲   | ۰.۲۵  | ۰.۲۶  | ۰.۲۷  | ۰.۳۵  | ۰.۴۶  |
| ۲۸          | ۱.۰۰   | ۱.۰۰   | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  |
| ۲۹          | ۱.۰۰   | ۱.۰۰   | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  | ۰.۰۰  |
| ۳۰          | ۱.۰۳   | ۱.۴۴   | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۱  | ۰.۱۲  | ۰.۱۴  |

### ۲.۴.۳. تبدیل جانسون

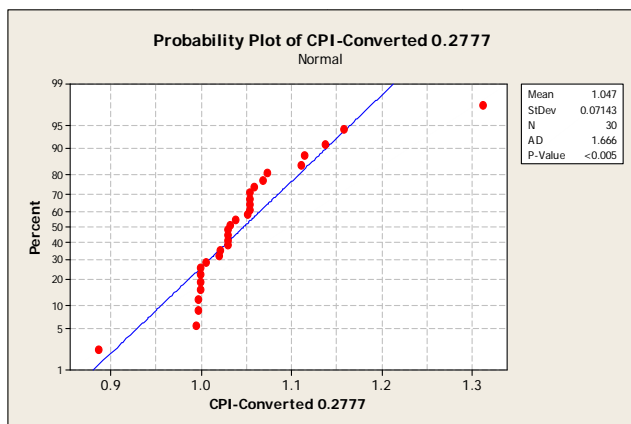
با توجه به اینکه تبدیل Box-Cox برای داده‌های منفی قابل به‌کارگیری نیست، لذا در بسیاری از موارد عملی قابل کاربرد

نخواهد بود. برای این منظور تبدیل دیگری توسعه داده شده است که دامنه کاربردپذیری آن بسیار جامع تر از تبدیل Box-Cox می باشد. برخلاف تبدیل Box-Cox که تنها در معدودی از نرم افزارهای آماری قابل دسترسی است، تبدیل جانسون در بسیاری از نرم افزارهای آماری نظیر Minitab قابل انجام است (با توجه به پیچیده گی محاسباتی تبدیل جانسون این یک مزیت است). بسیاری از نرم افزارهای آماری همانند Minitab در بسیاری از حالات می توانند اقدام به ارائه بهترین تبدیل جانسون برای داده های با توزیع آماری غیرنرمال نمایند.

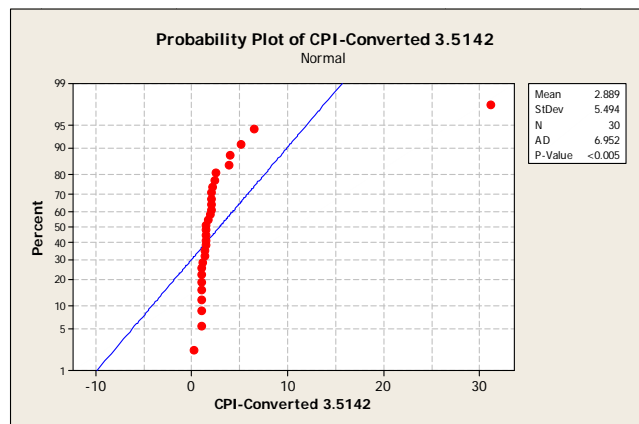
همان طور که با دقت در شکل ۲ می توان دریافت تبدیل جانسون (توسط نرم افزار Minitab) می تواند داده های شاخص CPI را تبدیل به توزیع آماری نرمال کند. در نقطه مقابل تبدیل های توانی و Box-Cox نمی توانند توزیع آماری داده های شاخص CPI را تبدیل به توزیع آماری نرمال کنند (شکل های ۳).



شکل ۲. تبدیل جانسون اعمال شده روی داده های شاخص CPI

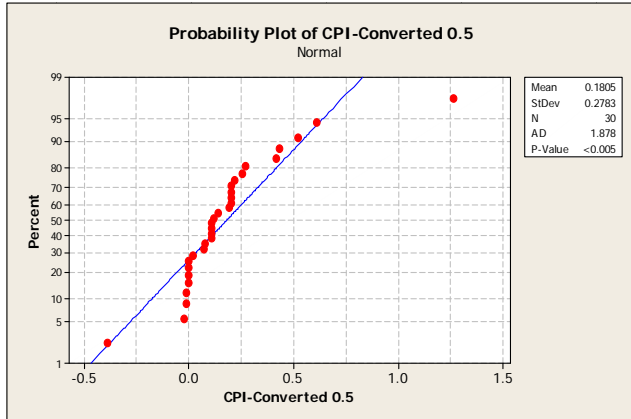


ب. تبدیل توانی ۰.۲۷۷۷

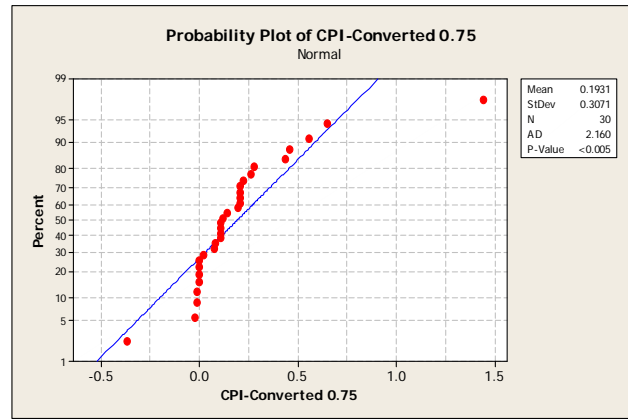


الف. تبدیل توانی ۳.۵۱۴۱

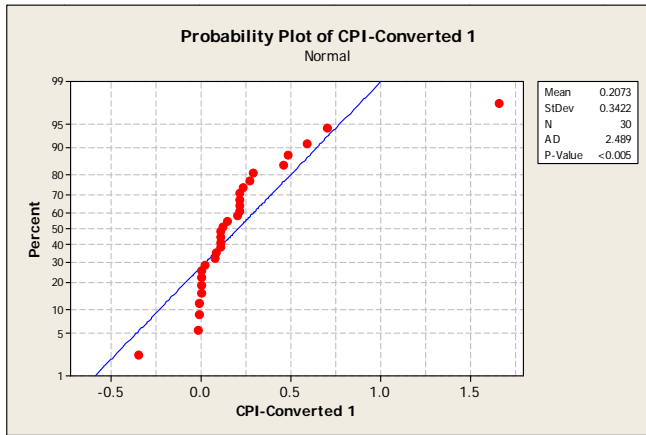




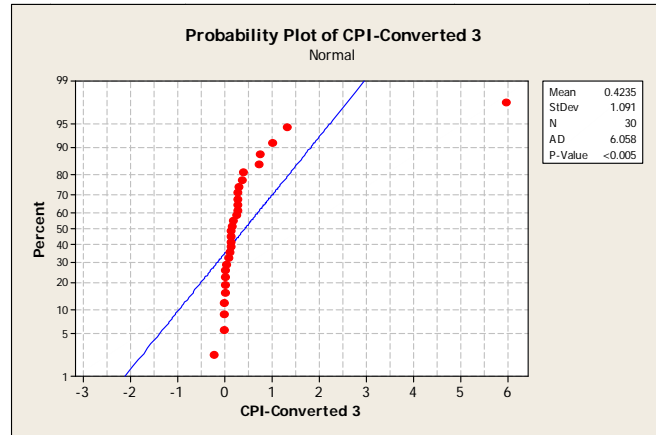
ت. تبدیل توانی Box-Cox با پارامتر ۰.۵



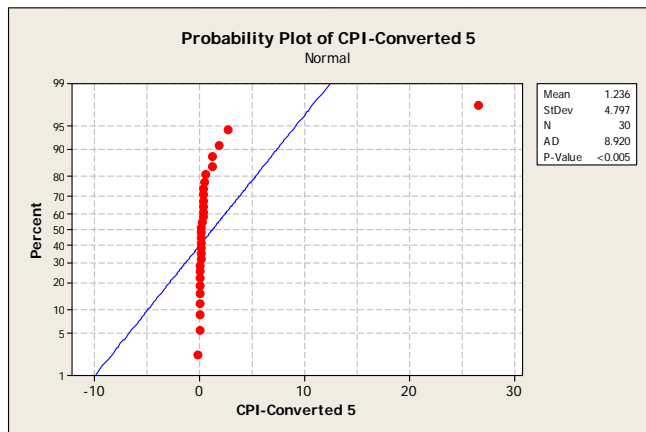
پ. تبدیل توانی Box-Cox با پارامتر ۰.۷۵



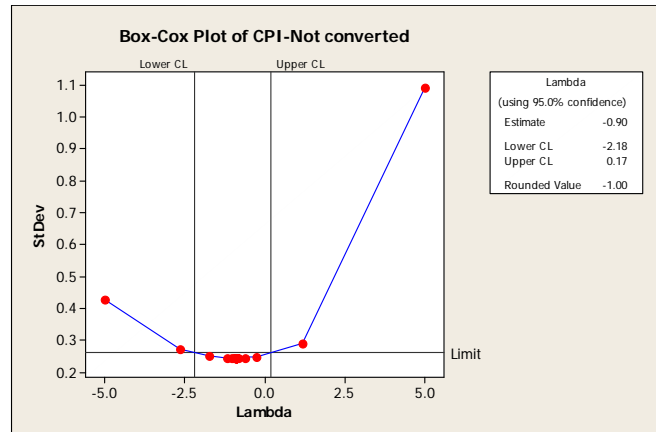
چ. تبدیل توانی Box-Cox با پارامتر ۱



ج. تبدیل توانی Box-Cox با پارامتر ۳



خ. تبدیل توانی Box-Cox با پارامتر ۵

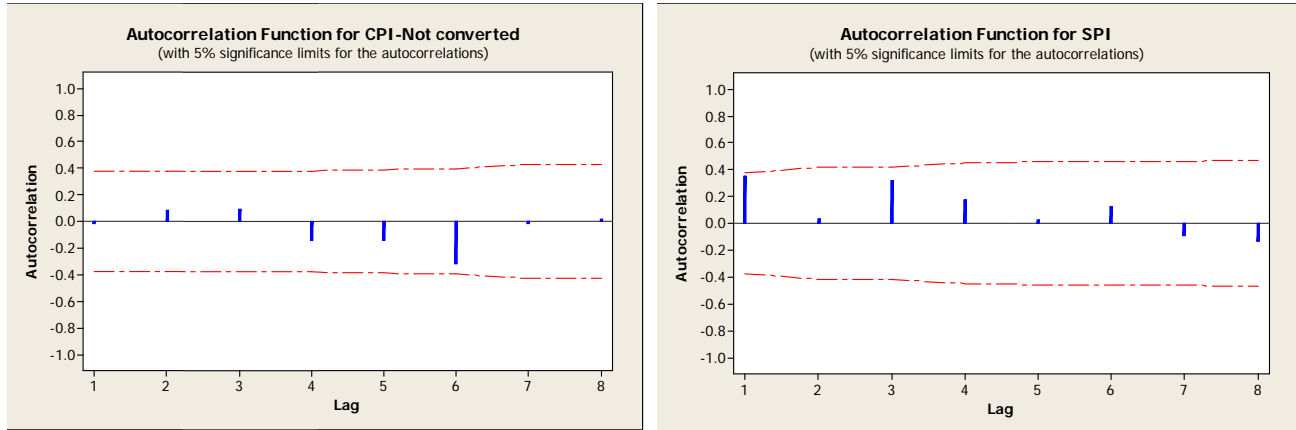


ح. مقادیر مختلف پارامتر تبدیل توانی Box-Cox

شکل ۳. نیکویی برآزش توزیع آماری نرمال برای داده‌های تبدیل‌یافته شاخص CPI با مقادیر متفاوت پارامتر  $\lambda$

جهت بررسی فرض دوم به‌کارگیری نمودارهای کنترلی شوهارت، استقلال داده‌ها، توسط نرم‌افزار Minitab نمودارهای خود همبستگی برای داده‌های مربوط به هر دو شاخص ترسیم شده‌اند (شکل ۴). استقلال به این معنی است که داده‌های متوالی روی یکدیگر تاثیر نمی‌گذارند. بنابراین مشاهده مقداری برای یک داده تاثیر در مقدار مشاهده‌شده برای داده‌های دیگر ندارد.

از شکل‌های الف.۴ و ب.۴ می‌توان دریافت که داده‌های مورد مطالعه به لحاظ آماری کاملاً مستقل از یکدیگر هستند.



ب.

الف.

شکل ۴. نمودار خود همبستگی برای شاخص‌های مورد مطالعه، الف. شاخص SPI، ب. شاخص CPI

### ۵.۳. نمودارهای کنترلی فردی

با معتبر بودن دو فرض نرمال بودن و استقلال داده‌ها، می‌توان نمودارهای کنترلی فردی اولیه برای هر یک از دو شاخص مورد مطالعه را ترسیم نمود. باید توجه داشت که هدف از ترسیم این نمودارها محاسبه حدود کنترلی و دیگر پارامترهای ترسیم نمودارها می‌باشد. پس از ترسیم نمودارها، آن‌ها برای کنترل آماری شاخص‌ها استفاده می‌شوند. همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد شاخص‌های مورد مطالعه در هر دوره از ارزیابی یک نمونه تک عضوی از عملکرد فرآیند ارائه می‌دهند و بنابراین نمودار کنترلی مناسب، نمودار کنترلی فردی خواهد بود. یادآوری می‌نماییم با توجه به محاسبه دوره‌های شاخص‌های عملکرد هزینه و زمان، آن‌ها نشان‌دهنده مقدار ارزش کسب‌شده در هر دوره ارزیابی و بنابراین بیانگر کارایی تیم پروژه هستند. لذا مقایسه آن‌ها با یکدیگر منعکس‌کننده تغییرات عملکردی تیم پروژه می‌باشند. نمودارهای کنترلی فردی که خود متشکل از دو نمودار است (شکل ۵)، نشان‌دهنده وجود اختلاف قابل توجهی میان نمونه‌ها هستند. نمودار اول<sup>۱</sup> بیانگر مقادیر به‌دست آمده از هر نمونه و نمودار دوم<sup>۲</sup> بیانگر اختلاف بین هر دو نمونه متوالی است [۱ و ۲]. اطلاعات شاخص CPI پروژه که پیشتر در جدول ۱ آورده شده بود، تحت تبدیل جانسون در جدول ۳ آورده شده است. این داده‌های تبدیل‌یافته در ترسیم نمودارهای کنترلی شاخص CPI استفاده شده است.

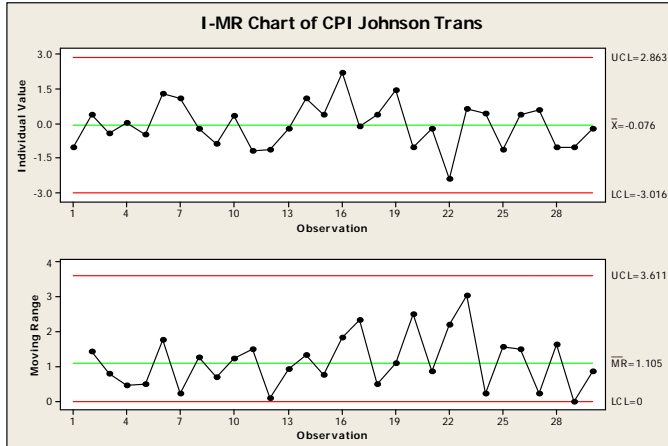
جدول ۳. مقادیر تبدیل‌یافته داده‌های شاخص CPI تحت تبدیل جانسون

|       |       |       |       |      |       |      |       |       |       |                              |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------------------------------|
| ۱۰    | ۹     | ۸     | ۷     | ۶    | ۵     | ۴    | ۳     | ۲     | ۱     | شماره نمونه شاخص تبدیل یافته |
| ۰.۳۱  | -۰.۹۱ | -۰.۲۰ | ۱.۰۷  | ۱.۲۹ | -۰.۴۶ | ۰.۰۳ | -۰.۴۳ | ۰.۳۶  | -۱.۰۶ |                              |
| ۲۰    | ۱۹    | ۱۸    | ۱۷    | ۱۶   | ۱۵    | ۱۴   | ۱۳    | ۱۲    | ۱۱    | شماره نمونه شاخص تبدیل یافته |
| -۱.۰۶ | ۱.۴۴  | ۰.۳۶  | -۰.۱۳ | ۲.۱۸ | ۰.۳۶  | ۱.۱۱ | -۰.۲۰ | -۱.۱۳ | -۱.۲۰ |                              |
| ۳۰    | ۲۹    | ۲۸    | ۲۷    | ۲۶   | ۲۵    | ۲۴   | ۲۳    | ۲۲    | ۲۱    | شماره نمونه                  |

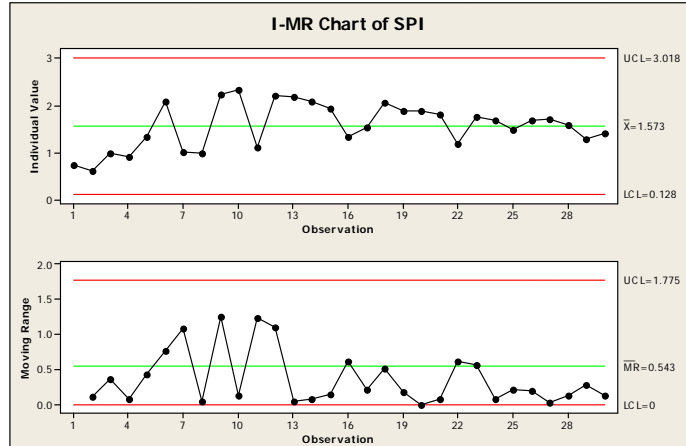
<sup>۱</sup> Individual X  
<sup>۲</sup> Moving Range

شخص  
تبدیل یافته

۰.۲۰ -۲.۳۹ ۰.۶۵ ۰.۴۴ -۱.۱۳ ۰.۳۶ ۰.۵۸ -۱.۰۶ -۱.۰۶ -۰.۲۰



ب.



الف.

شکل ۵. نمودار کنترلی فردی اولیه برای شاخص‌های مورد مطالعه، الف. شاخص SPI، ب. شاخص CPI

از نمودارهای شکل‌های الف.۵ و ب.۵ لازم است حدود کنترلی و پارامترهای مربوطه به منظور کنترل وضعیت زمانی و هزینه‌ای پیشرفت پروژه استخراج شوند. این حدود در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

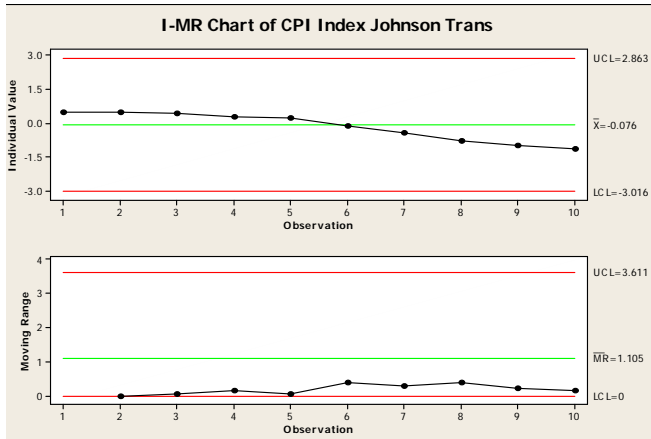
جدول ۴. حدود کنترلی در نمودارهای فردی برای شاخص‌های مورد مطالعه

| CPI    | SPI   |          |            |
|--------|-------|----------|------------|
| ۲.۸۶۳  | ۳.۰۱۸ | حد بالا  | نمودار اول |
| ۰.۰۷۶  | ۱.۵۷۳ | حد مرکزی |            |
| -۳.۰۱۶ | ۰.۱۲۸ | حد پایین |            |
| ۳.۶۱۱  | ۱.۷۷۵ | حد بالا  | نمودار دوم |
| ۱.۱۰۵  | ۰.۵۴۳ | حد مرکزی |            |
| ۰      | ۰     | حد پایین |            |

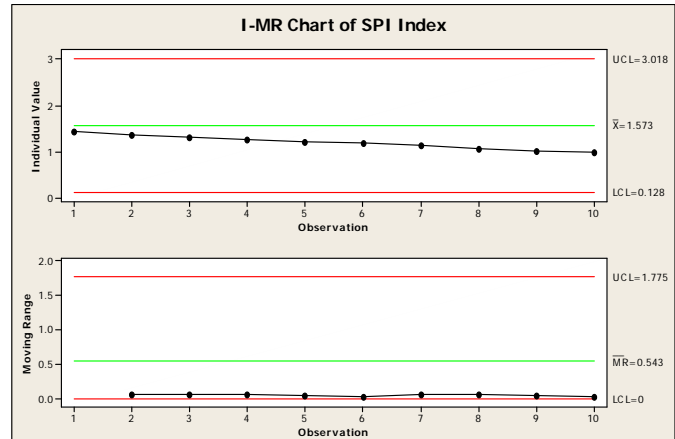
با در دست داشتن حدود کنترلی، اکنون نوبت به ترسیم نمودارهای کنترلی می‌رسد (شکل ۶). برای این منظور، از مقادیر شاخص‌ها برای ۱۰ دوره استفاده نموده‌ایم (جدول ۵).

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های به دست آمده از پروژه جهت کنترل آماری آن‌ها توسط نمودارهای کنترلی فردی (داده‌های شاخص CPI توسط تبدیل جانسون به توزیع آماری نرمال تبدیل شده‌اند)

| شماره نمونه          | ۱    | ۲    | ۳    | ۴    | ۵    | ۶     | ۷     | ۸     | ۹    | ۱۰    |
|----------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| شاخص SPI             | ۱.۴۳ | ۱.۳۸ | ۱.۳۱ | ۱.۲۵ | ۱.۲۱ | ۱.۱۹  | ۱.۱۳  | ۱.۰۸  | ۱.۰۳ | ۱     |
| شاخص CPI             | ۱.۲۱ | ۱.۲۱ | ۱.۲۰ | ۱.۱۸ | ۱.۱۷ | ۱.۱۱  | ۱.۰۸  | ۱.۰۵  | ۱.۰۳ | ۱.۰۱  |
| شاخص CPI تبدیل یافته | ۰.۴۷ | ۰.۴۷ | ۰.۴۳ | ۰.۲۸ | ۰.۲۴ | -۰.۱۴ | -۰.۴۱ | -۰.۷۸ | -۱   | -۱.۱۵ |



ب.ب

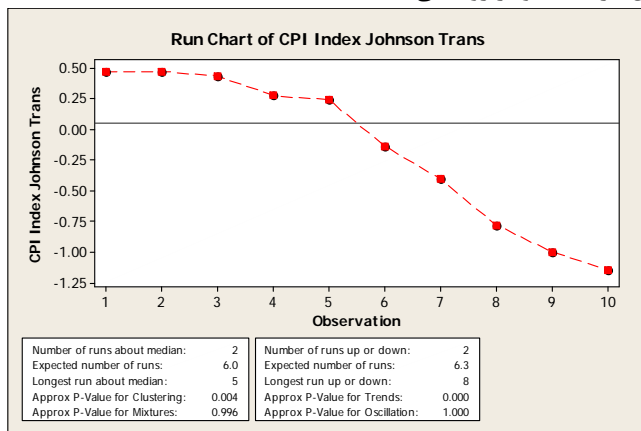


الف.ف

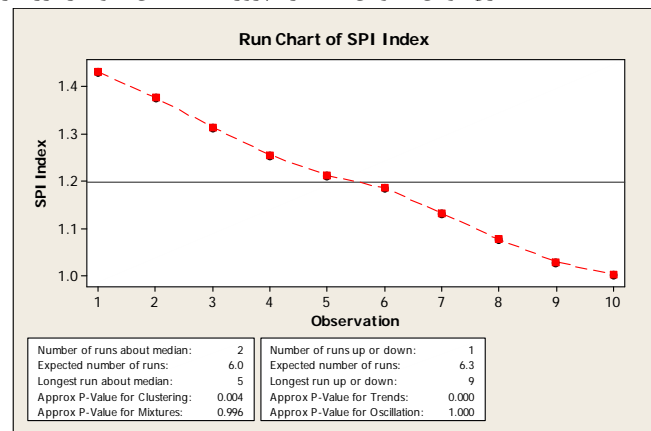
شکل ۶. نمودار کنترلی فردی برای کنترل شاخص‌های مورد مطالعه، الف. شاخص SPI، ب. شاخص CPI

با دقت در این نمودارهای کنترلی می‌توان دریافت، تحت کنترل بودن دو متغیر تصادفی فوق که شاخص‌های هزینه‌ای و زمانی یک پروژه در حال اجراء هستند، نشان‌دهنده این است که تمامی تخصیص‌های زمانی و هزینه‌ای فعالیت‌های پروژه در حال اجراء تحت کنترل است. البته بایستی این نکته متذکر شود که در صورتی که نمودارها عدم کنترل فرآیند را نشان دهند، نیز می‌توان تحلیل‌هایی برای نشان‌دادن نوع عدم کنترل ارائه داد (به‌عنوان مثال، این عدم کنترل می‌تواند ناشی از عدم اجراء چرخه بهبود مستمر باشد).

اگرچه ترسیم نمودارهای کنترل کیفیت آماری (شکل ۶) در بردارنده اطلاعات مفیدی است، به‌منظور نشان‌دادن مزایای آن در مقابل نمودارهای روند<sup>۱</sup>، که در برخی از پروژه‌ها جهت کنترل شاخص‌های مورد مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرند، برآن شدیم تا نمودارهای روند را برای ۱۰ داده مورد مطالعه ترسیم نماییم (شکل ۷). اگرچه استفاده از این نمودارها کمک به نمایش مقادیر شاخص‌ها در طی زمان و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌نماید، لیکن نمی‌تواند مبنایی برای قضاوت و تحلیل در خصوص تحت کنترل بودن/ نبودن عملکرد پروژه باشد. این خود از بزرگترین ایرادات نمودار روند می‌باشد.



ب.ب



الف.ف

شکل ۷. نمودارهای روند برای شاخص‌های مورد مطالعه، الف. شاخص SPI، ب. شاخص CPI

با دقت در شکل ۷ می‌توان دریافت که برای نمودارهای روند نمی‌توان تحلیل خاصی را انجام داد و فقط می‌توان اطلاعات جزئی از آن استخراج نمود. به‌عنوان مثال با دقت در نمودار روند شاخص SPI (شکل الف.۷) می‌توان دریافت که در اولین ماه از پایش،

<sup>۱</sup> Run Chart

وضعیت زمانی پیشرفت پروژه بسیار خوب بوده است و پروژه جلوتر از برنامه زمان بندی خود می باشد. اگرچه این روند در طی این ۱۰ ماه ادامه دارد و همچنان پروژه جلوتر از برنامه زمان بندی خود بوده است. ولی پیشرفت پروژه سیر نزولی دارد. آنچه از این نمودار روند به دست می آید این است که علی رغم سیر نزولی پیشرفت زمانی پروژه، پروژه از برنامه زمانی خود عقب نیست. ولی تنها با تکیه بر نمودار روند نمی توان به اطلاعات دیگر دست یافت. بنابراین رویکرد پیشنهادی در این مقاله می تواند عملکرد پروژه را به خوبی منعکس نماید.

### نتیجه گیری

علی رغم اهمیت سیستم مدیریت ارزش کسب شده به عنوان متدولوژی ارزش مندی در تحلیل و کنترل عملکرد پروژه ها، تحقیقات روی طراحی و توسعه رویکردی یکپارچه به منظور کنترل عملکرد پروژه از طریق این متدولوژی بسیار محدود بوده است. در این مقاله به منظور نشان دادن کاربرد و مزایای رویکرد پیشنهادی، از نمودارهای کنترل کیفیت آماری برای کنترل دو شاخص مهم پروژه ها (CPI و SPI) استفاده شد. برای اطمینان از تحقق شروط اصلی به کارگیری این نمودارها (استقلال داده ها و توزیع آماری نرمال داده ها)، آزمون های مربوطه انجام شدند. در ادامه قابلیت های این رویکرد نسبت به رویکردهای مرسوم در قالب مثالی نشان داده شد. باید توجه داشت صرف نظر از توزیع آماری داده ها، متدولوژی ارائه شده در این مقاله را می توان در حالت کلی برای تحت کنترل قراردادن عملکرد پروژه از طریق شاخص های ارزش کسب شده به کار بست.

### تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی "کنترل آماری انحراف از زمان و انحراف از هزینه انجام پروژه" و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام پذیرفته است.

### منابع

- مسلمی نائینی، لیلا، رویکردی مبتنی بر تئوری فازی برای ارزش کسب شده، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۵
- نوراسن، رسول، مقدمه ای بر کنترل آماری فرآیند، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ هشتم، (۱۳۸۲)
- Adamo, J. M. (۱۹۸۰), "Fuzzy Decision Trees", Fuzzy Sets and Systems, ۴: ۲۰۷-۲۱۹.
- Altatbabai, H., Kartam, N., Flood, I., and Alex, A. P., (۱۹۹۷), Construction Project Control using Artificial Neural Networks, Artificial Intelligence fro Engineering Design and Manufacturing, ۱۱(۱): ۴۵-۵۷.
- Anbari, F. (۲۰۰۳), "Earned Value Method and Extensions", International Journal of Project Management, ۳۴(۴): ۱۲-۲۳.
- Barraza, G. A., Bueno, R. A. (۲۰۰۸), Probabilistic Control of Project Performance using Control Limit Curves, Journal of Construction Engineering and Management-ASCE, ۱۳۳(۱۲): ۹۵۷-۹۶۵.
- Bortolan, G., and Degani, R. (۱۹۸۵), "A Review of Some Methods for Ranking Fuzzy Subsets", Fuzzy Sets and Systems, ۱۵: ۱-۱۹.
- Burke, R. (۲۰۰۳), "Project Management Planning and Control Techniques", ۴th Ed.
- Cheng, C. B. (۲۰۰۵), "Fuzzy Process Control: Construction of Control Charts with Fuzzy Number", Fuzzy Sets and System, ۱۵۴: ۲۸۷-۳۰۳.
- Cheung, S. O., Suen, H. C. H., and Cheung, K. K. W., (۲۰۰۴), PPMS: a Web-based construction project performance monitoring system, Automation in Construction, ۱۳(۳): ۳۶۱-۳۷۶.
- Christensen, D. S., Conley, R. J., Kankey, R. D. (۲۰۰۳), "Some Empirical Evidence on the Non-normality of Cost Variance on Defense Contracts", Journal of Cost Analysis & Management, Winter: ۳-۱۶.
- Fair, Douglas C., "Statistical Process Control Approaches: Basic Theory and Use of Control Charts"

- Fleming Q. W., and Koppelman, J. M. (۲۰۰۰), "Earned Value Project Management" ۲nd Ed., Project Management Institute.
- Gulbay, M., and Kahraman, C. (۲۰۰۶), "Development of Fuzzy Process Control Charts and Fuzzy Unnatural Pattern Analysis", Computational Statistics & Data Analysis (In Press).
- Handbook for basic Process Improvement, (۱۹۹۶), Navy Total Quality Leadership Office.
- Henderson, K. (۲۰۰۴), "Further Developments in Earned Schedule", The Measurable News, Spring: ۱۵-۱۶.
- Jacob, D. (۲۰۰۳), "Forecasting Project Schedule Completion with Earned Value Metrics", The Measurable News, March: ۷-۹.
- Lauras, M., Marques, G., Gourc, D. (۲۰۱۰), Towards a Multi-dimensional Project Performance Measurement System, Decision Support Systems, ۴۸(۲): ۳۴۲-۳۵۳.
- Leu, S. S., and Lin, Y. C., (۲۰۰۸), Project performance evaluation based on statistical process control techniques, Journal of Construction Engineering and Management-ASCE, ۱۳۴(۱۰): ۸۱۳-۸۱۹.
- Lipke, W. (۱۹۹۹), "Applying Management Reserve to Software Project Management", Journal of Defense Software Engineering, March: ۱۷-۲۱. (Reprinted in Projects and Profits, March ۲۰۰۲: ۱۹-۲۶)
- Lipke, W. (۲۰۰۲), "A Study of the Normality of Earned Value Indicators", The Measurable News, December: ۱-۱۶.
- Lipke, W. (۲۰۰۳), "Schedule is Different", The Measurable News, March.
- Lipke, W. (۲۰۰۳), "Achieving Normality for Cost", The Measurable News.
- Lipke, W. (۲۰۰۴), "The Probability of Success", The Journal of Quality Assurance Institute, January: ۱۴-۲۱.
- Lipke, W., and Vaughn, J., (۲۰۰۰), "Statistical Process Control Meets Earned Value", The Journal of Defense Software Engineering, Jun: ۱۶-۲۰.
- Long-Hui, C., (۲۰۰۵), "A Demerit Control Chart with Linguistic Weights", Journal of Intelligent Manufacturing, ۱۶: ۳۴۹-۳۵۶.
- Mabuchi, S. (۱۹۸۸), "An Approach to the Comparison of Fuzzy Subsets with  $\alpha$ -cut Dependent Index", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, ۱۸: ۲۶۴-۲۷۲.
- McKim, R., Hegazy, T., and Attalla, M., (۲۰۰۰), Project Performance Control in Reconstruction Projects, Journal of Construction Engineering and Management-ASCE, ۱۲۶(۲): ۱۳۷-۱۴۱.
- Navon, R., (۲۰۰۵), Automated Project Performance Control of Construction Projects, Automation in Construction, ۱۴(۴): ۴۶۷-۴۷۶.
- Project Management Institute, (۲۰۰۵), "Practice Standard for Earned Value Management".
- Rashmi Rohan Shenoy, (۲۰۰۸), "Misuse and Performance of Individuals Charts in Statistical Process Control for Single Parameter Distributions of Unknown Stability", Northeastern University, MSc Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering.
- Steyn, H., (۲۰۰۸), A Framework for Managing Quality on System Development Projects, Portland International Conference on Management of Engineering and Technology, Vols ۱-۵: ۱۲۹۵-۱۳۰۲.
- Wang, J. H., and Raz, T. (۱۹۹۰), "On the Construction of Control Charts using Li