

ارزیابی عملکرد عملیاتی پروژه با تلفیق رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده و تئوری منحنی یادگیری

سید اکبر غلامیان*

عضو هیئت‌علمی دانشگاه پیام‌نور، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۲، تاریخ روایت اصلاح‌شده: ۱۳۹۶/۰۵/۳۱ تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۲۷)

چکیده

عملکرد یک پروژه در قالب زمان و هزینه قابل‌ارزیابی و پیش‌بینی است. هدف اصلی این پژوهش، توسعه مدلی برای ارزیابی عملکرد پروژه در قالب ابعاد زمان و هزینه و مبتنی بر ریسک است. به‌عنوان یکی از مدل‌های شناخته‌شده در حوزه ارزیابی عملکرد زمان و هزینه، از رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده استفاده می‌شود. تلفیق این رویکرد با مقوله منحنی‌های یادگیری و مدل‌سازی تأثیر آن در عملکرد و نیز توجه به تأثیر ریسک بر آن با بهره‌گیری از روش کالمن-فیلتر، از نوآوری‌های پژوهش حاضر است. تلفیق روش مدیریت ارزش کسب‌شده، منحنی‌های یادگیری و روش پیش‌بینی کالمن-فیلتر ابزاری کارآمد در پیگیری روند پیشرفت، آنالیز ریسک و پیش‌بینی اهداف عملکردی است. به‌منظور اعتبارسنجی پژوهش، دقت روش‌های مدیریت ارزش کسب‌شده، زمان‌بندی کسب‌شده و روش کالمن-فیلتر در مقایسه با روش پیشنهادی در مطالعه‌ای مورد بررسی شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد روش پیش‌بینی تلفیقی برای ارزیابی عملکرد پروژه‌های دانش‌محور، کمترین متوسط درصد خطای پیش‌بینی عملکرد در پروژه مورد مطالعه است، در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی نتایج مطمئن‌تری در مقایسه با روش‌های رایج ارزیابی عملکرد ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی عملکرد پروژه، پیش‌بینی هزینه، تئوری منحنی یادگیری، مدیریت ارزش کسب‌شده.

مقدمه

تعیین می‌شود که برای عملکرد فنی و اهداف پروژه قابل‌ارزیابی هستند. این رویکرد مدل پشتیبان تصمیم‌گیری برای ارزیابی عملکرد پروژه، پایش مداوم پیشرفت، مدیریت ریسک‌ها و اقدامات اصلاحی است. در اینجا مدل‌های پشتیبان تصمیم‌گیری با هدف کمک به مدیران پروژه در فرایند تصمیم‌گیری عمومیت یافته‌اند. این سیستم مشخصه‌های تعاملی بودن، منعطف و قابل‌انطباقی دارد که به‌صورت خاص، برای پشتیبانی راه‌حل‌های مسئله و بهبود فرایند تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. همچنین این رویکرد سیستمی هشداردهنده برای شناسایی تهدیدها و فرصت‌های پروژه است [۵].

هدف پژوهش حاضر، توسعه مدلی برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد پروژه‌های دانش‌محور مبتنی بر ریسک است. برای این منظور، ساختار عمومی مدیریت ارزش کسب‌شده (EVM) با ادغام منحنی‌های یادگیری توسعه می‌یابد تا شاخص‌های جدیدی برای ارزیابی عملکرد در

ارزیابی عملکرد پروژه به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که به‌منظور افزایش سطح استفاده بهینه از امکانات و منابع، برای دستیابی به اهداف پروژه به شیوه‌ای اقتصادی صورت می‌گیرد [۱]. در دو دهه اخیر پژوهشگران دانشگاهی به مقوله ارزیابی عملکرد توجه بسیاری داشته‌اند (شکری و همکاران، ۱۳۹۴). مدیران پروژه علاقه‌مندند عملکرد پروژه را در سطوح زمان و هزینه ارزیابی و پیش‌بینی کنند [۲]. یکی از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری عملکرد در طول زمان، رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده است [۳]. این مفهوم برگرفته از این تفکر است که هر فرایند، هزینه برنامه‌ریزی‌شده‌ای دارد که به آن ارزش گفته می‌شود. زمانی که این فرایند به‌موقع تکمیل شود، ارزش مربوط در پروژه حاصل خواهد شد که به آن ارزش کسب‌شده (EV) گفته می‌شود [۴]. در این رویکرد، سطوح مطلوبی برای شاخص‌های هزینه و زمان

تئوری منحنی‌های یادگیری^۲ به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف کسب‌وکار از جمله علوم، فناوری، مهندسی و صنعت استفاده می‌شود [۷]. منحنی یادگیری نمایشی گرافیکی از افزایش یادگیری (محور عمودی) با افزایش تجربه (محور افقی) است. این منحنی برای موضوعی واحد نشان می‌دهد که چگونه با افزایش تجربه، یادگیری بهبود می‌یابد. یکی از قابلیت‌های منحنی‌های یادگیری، توانایی آن‌ها در پیش‌بینی زمان فعالیت‌ها و پیش‌بینی عملکرد در آینده است [۸]. در این منحنی، محور افقی می‌تواند نشانگر میزان کسب تجربه و محور عمودی نشان‌دهنده زمان انجام موفقیت‌آمیز فرایند باشد. منحنی‌های یادگیری بیانگر بهبود عملکرد فعلی و توسعه برنامه‌هایی برای بهبود بلندمدت است [۹]. علاوه بر این، منحنی یادگیری در تمامی سطوح فعالیت‌های پروژه از جزئی‌ترین تا کلی‌ترین آن‌ها قابلیت استفاده دارد [۱۰]. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد به‌کارگیری تکنیک‌های مدیریت و ارزیابی عملکرد به‌صورت یکپارچه می‌تواند مزایای بیشتری داشته باشد [۱۱]. در ادبیات پژوهش، مزایای حاصل از یکپارچه‌سازی روش مدیریت ارزش کسب‌شده با رویکرد اندازه‌گیری عملکرد مبتنی بر مدیریت ریسک تشریح شده است [۱۲]. همچنین بنا بر یافته‌های پژوهش‌های قبلی، موفقیت پروژه به دقت پیش‌بینی عملکرد آینده آن با توجه به وضعیت فعلی بسیار وابسته است [۲۸].

قالب زمان و هزینه ارائه شود. جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد:

- توسعه روش مدیریت ارزش کسب‌شده با در نظر گرفتن آنالیز ریسک پویا و آثار یادگیری؛
- استفاده از روش پیش‌بینی کالمن-فیلتر و اعمال منحنی یادگیری بر عملکرد پروژه به‌منظور برآورد زمان و هزینه.

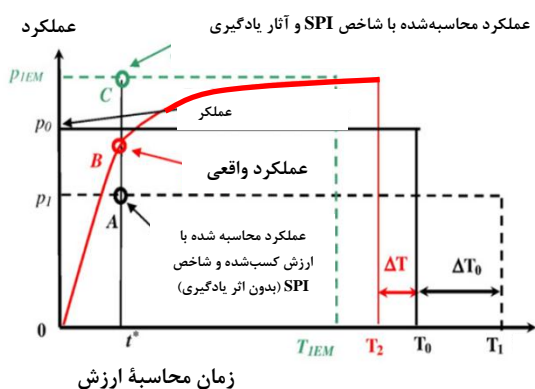
مرور ادبیات

در ادبیات پژوهش، بسیاری از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد توسعه یافته‌اند (جدول ۱) که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های برازش منحنی‌های یادگیری با کمترین مربعات خطا، مدل‌های رگرسیون چندمتغیره و مدل شبکه‌های عصبی اشاره کرد که معمولاً به‌عنوان ابزارهای تحلیلی در مدل پیش‌بینی استفاده می‌شوند [۶]. ربیعی و همکاران (۱۳۸۸) به مقایسه روش‌های پیش‌بینی برای تخمین هزینه تکمیل پروژه با رویکرد EVM پرداختند. در پژوهش مذکور، روش‌های پیش‌بینی هزینه تکمیل پروژه به دو دسته شاخص عملکردی، و رگرسیونی و سری زمانی تقسیم شده‌اند. برای مقایسه مدل‌ها، از خطاهای پیش‌بینی MSE، MAPE، MAD، روند صعودی یا نزولی مقادیر درصد خطا در دوره‌های مختلف و آنالیز واریانس استفاده شده است. در این میان، نتایج برخی مدل‌های رگرسیونی قابل اعتماد است.

جدول ۱. مروری بر مدل‌های ارزیابی عملکرد

روش	مرجع	ابعاد اندازه‌گیری عملکرد	رویکرد	محدودیت‌ها
تحلیل شبکه‌ای ^۳	[۱۳]	ارزش نگهداری و تعمیرات، هزینه‌های عملیاتی	توسعه ساختار یکپارچه ارزیابی عملکرد و تصمیم‌گیری چندمعیاره	نیاز به اعتبار تجربی دارد.
کارت امتیازی متوازن	[۱۴]	مالی، مشتری، فرایندهای داخلی، یادگیری و رشد	توسعه ساختار مفهومی برای ارزیابی عملکرد پایدار	مدل کیفی و ساختار مفهومی ارائه شده و به توسعه شاخص‌های مناسب پرداخته نشده است.
منحنی‌های یادگیری	[۱۵]	هزینه و زمان	استفاده از منحنی‌های یادگیری	مدل پیشنهادی تنها به فعالیت‌های نیروی انسانی در صنعت ساخت پرداخته است.
مدیریت عملکرد و اندازه‌گیری ارزش مدت کسب‌شده ^۴	[۱۶]	هزینه و زمان	مدیریت زمان کسب‌شده	چارچوب مفهومی به اعتبار تجربی نیاز دارد.
مدیریت ارزش کسب‌شده	[۱۲]	هزینه و زمان	تلفیق مدیریت ارزش کسب‌شده و ریسک	همه ذینفعان در نظر گرفته نشده‌اند.
ارزیابی ثبات عملکرد	[۱۷]	هزینه	ارزیابی هزینه در قالب رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده	برنامه عملی مدل به‌طور گسترده در دسترس نیست.
سیستم‌های هوشمند در سنجش عملکرد	[۱۸]	زمان و هزینه	شبیه‌سازی	متمرکز بر پروژه
مدیریت ارزش کسب‌شده	[۵]	هزینه و زمان	مدیریت ارزش کسب‌شده	پایه‌سازی چارچوب به اندازه کافی توضیح داده نشده است.

ارزش کسب‌شده با ارزش برنامه‌ریزی‌شده و مورد انتظار برابر خواهد بود [۲۰]. همچنین دو مقوله «عملکرد غیرخطی» و «سطح اولیه تجربه نیروی انسانی» باید در روش ارزیابی عملکرد در نظر گرفته شوند، به‌ویژه اگر آثار یادگیری به‌صورت معناداری در پروژه وجود داشته باشد [۱۹]. منحنی ترسیم‌شده در شکل ۱، مثالی از منحنی یادگیری است.



شکل ۱. توسعه مدل EVM مبتنی بر یادگیری [۱۹]

در مدل ارزیابی عملکرد از نمادگذاری زیر استفاده می‌شود:

EV_{EM} : ارزش کسب‌شده (هزینه کار انجام‌شده) که برابر است با سطح زیر منحنی خط مجانب p_{IEM} از لحظه $t = 0$ تا زمان $t = t^*$:

T_{IEM} : کوتاه‌ترین زمان ممکن برای اجرا.

نقطه A: عملکرد اولیه بدون تأثیرات یادگیری.

نقطه B: محدوده عملکرد واقعی را نشان می‌دهد.

نقطه C: بیشترین عملکرد بالقوه با یادگیری.

SPI_{EM} : شاخص عملکرد برنامه‌ای با توجه به ضریب تصحیح مربوط به شاخص اصلاحی عملکرد (PCI^5) محاسبه می‌شود.

$P_L(t)$: منحنی یادگیری.

t^* : زمان فعلی (زمان بررسی و سنجش عملکرد).

معادله ۳ نمایش ریاضی از منحنی یادگیری است که در آن k ضریب منحنی یادگیری و p_{IEM} خط مجانب به منحنی یادگیری است. هرچه مقدار ضریب k (پارامتر تابع یادگیری) مقداری بزرگ‌تر باشد، یادگیری در زمان طولانی‌تری انجام می‌شود و نرخ عملکرد کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، هرچه نرخ یادگیری یا همان k ، یعنی زمان لازم برای یادگیری کمتر باشد، یادگیری سریع‌تر انجام می‌شود. در نتیجه تخمین زمان

بیان مسئله و مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، طراحی مدل مطلوب ارزیابی عملکرد با توجه به ریسک و یادگیری مدنظر است. در طراحی این روش ارزیابی عملکرد لازم است مدل یادگیری مناسب براساس تئوری منحنی یادگیری برای پروژه استفاده شود. همچنین جهت در نظر گرفتن ریسک‌ها و انحرافات زمانی و هزینه‌ای، مدل تلفیقی EVM و مدل منحنی یادگیری به‌کار می‌رود. کاربرد اصلی پژوهش حاضر در ارزیابی عملیاتی پروژه‌های نوآورانه و دانش‌محور مانند پروژه‌های پژوهش و توسعه با در نظر گرفتن آثار معنادار یادگیری نیروی انسانی بر سطح عملکرد و در شرایط وجود خطا در تخمین شاخص زمان و هزینه پروژه است. در این پژوهش، براساس مفاهیم رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده، شاخص عملکرد برنامه‌ای SPI با توجه به مدل منحنی یادگیری و نیز آثار ریسک برآورد می‌شود. این شاخص مبنای تخمین زمان و هزینه اتمام طرح خواهد بود.

تلفیق EVM و منحنی‌های یادگیری

براساس رویکرد EVM مقدار عملکرد واقعی (p_1) براساس رابطه ۱ به‌دست می‌آید و مدت‌زمان پیش‌بینی فعالیت (T_1) نیز براساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود. مقادیر p_{OEM} و p_{IEM} نیز به‌ترتیب با مقدار عملکرد اولیه و مقدار عملکرد نهایی مبتنی بر یادگیری برابر است.

$$p_1 = SPI * p. \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{T}{SPI} \quad (2)$$

یکی از پارامترهای منحنی یادگیری که در مدل EVM استفاده می‌شود، حداکثر سطح عملکردی یا به عبارت دیگر، خطوط مجانب به منحنی یادگیری (p_{IEM}) است. t_1 نشان‌دهنده مدت‌زمان آموزش و یادگیری اولیه پیش از شروع به کار و k ضریب منحنی یادگیری است که شیب منحنی یادگیری (نرخ یادگیری) را تعیین می‌کند. براساس مقدار ارزش کسب‌شده (EV) در زمان t_E ، تصمیم‌گیرنده می‌تواند مقداری را برای ارزش برنامه‌ریزی‌شده به‌دست بیاورد. با توجه به اینکه ارزش نهایی در زمان تکمیل با مقدار ارزش برنامه‌ریزی‌شده (PV) برابر است، می‌توان مقدار PV(t) در زمان $t=T_2$ را برابر با مقدار ارزش برنامه‌ریزی‌شده قرار داد. با فرض آثار یادگیری و تأثیر آن بر تابع عملکرد می‌توان مدت‌زمان واقعی اتمام طرح (T_2) را برآورد کرد. به‌عنوان قاعده کلی، در زمان خاتمه طرح،

$$\int_0^{t^*} p_{1EM}(1 - e^{-kt}) dt = PCI * p_{1EM} * t^* \quad (12)$$

با انتگرال گیری و ساده سازی می توان گفت:

$$kt^* + e^{-kt^*} - 1 = PCI * kt^* \quad (13)$$

به این ترتیب ضریب PCI به صورت زیر به دست می آید:

$$PCI = 1 + \frac{e^{-kt^*}}{kt^*} - \frac{1}{kt^*} \quad (14)$$

می توان به سادگی با انتگرال گیری از تابع عملکرد حداکثری (p_{1EM}) و منحنی یادگیری ($P_L(t)$) به رابطه زیر رسید:

$$\int_{T_{1EM}}^{T_1} p_{1EM} dt = \int_{T_{1EM}}^{T_1} p_{1EM} (1 - e^{-kt}) dt \quad (15)$$

با ساده سازی رابطه انتگرال گیری بالا و حذف p_{1EM} داریم:

$$KT_1 + e^{-kT_1} = kT_{1EM} + 1 \quad (16)$$

با معلوم بودن ضریب مدل k در منحنی یادگیری در معادله بالا، تنها مقدار مجهول، متغیر T_2 (مقدار پیش بینی مدت زمان اجرا) است. ریشه های معادله بالا را می توان با استفاده از روش های تحلیل عددی به دست آورد. مقدار متغیر T_2 می تواند برآوردی از زمان تکمیل طرح EDAC باشد.

تحلیل ضریب PCI

یکی از راه های برآورد ضریب k ، استفاده از آزمایش های گوناگون برای آزمون عملکرد نیروی انسانی برای انجام کاری مشخص است [۲۲]. در صورتی که آثار یادگیری حذف شود و مقدار k به بی نهایت میل کند ($k \rightarrow \infty$) مقدار PCI برابر با ۱ خواهد شد. اگر مقدار ضریب تابع یادگیری برابر با $k=1$ باشد، آنگاه داریم:

$$PCI = 1 + \frac{e^{-t^*}}{t^*} - \frac{1}{t^*} < 1 \quad (17)$$

اگر مقدار k به صفر میل کند ($k \rightarrow 0$)، آنگاه مقدار شاخص اصلاح عملکردی PCI نیز به صفر میل خواهد کرد ($PCI \rightarrow 0$). توجه به مقادیر PCI و شاخص عملکرد برنامه ای می توان عملکرد پروژه را از نظر شاخص هزینه ارزیابی کرد؛ به طوری که به آثار منحنی های یادگیری در آن توجه شده باشد. با توجه به اینکه آثار ریسک هنوز در مدل لحاظ نشده است، باید رویکردی برای

انتهایی کوتاه تر از مقدار برنامه ریزی شده خواهد بود. منحنی های یادگیری انواع مختلفی دارند که برای شرح بیشتر می توان به پژوهشی از جابر و همکاران (۲۰۱۱) رجوع کرد [۲۱]. در میان مدل های مختلف برای یادگیری، توابع لجستیک و S-شکل رایج تر هستند.

$$P_L(t) = p_{1EM} (1 - e^{-kt}), \quad P_L(0) = 0 \quad (3)$$

دلیل نداشتن مقدار EV_{EM} ، مقدار اصلی SPI_{EM} را نمی توان از طریق رابطه زیر محاسبه کرد.

$$SPI_{EM} = \frac{EV_{EM}}{PV} \quad (4)$$

برای محاسبه SPI_{EM} باید از ضریب اصلاحی با عنوان شاخص اصلاحی عملکرد PCI استفاده کرد. در روابط بالا، PCI میزان کاهش یا افزایش کار ناشی از یادگیری را بیان می کند [۲۱]. اگر مقدار PCI مشخص باشد، رابطه بین شاخص اصلاحی عملکرد و SPI_{EM} به صورت زیر است:

$$SPI_{EM} = \frac{SPI}{PCI} \quad (5)$$

مقدار p_{1EM} نیز از طریق معادلات زیر محاسبه می شود:

$$\frac{p_{1EM}}{P} = \frac{SPI}{PCI} \quad (6)$$

مقادیر T_{1EM} و p_{1EM} به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$p_{1EM} = SPI_{EM} * P \quad (7)$$

$$T_{1EM} = \frac{T_1}{SPI_{EM}} \quad (8)$$

با استفاده از رابطه $SPI = \frac{EV}{PV}$ به معادله زیر می رسیم:

$$\frac{EV_{EM}}{PV} = \frac{1}{PCI} \frac{EV}{PV} \quad (9)$$

با توجه به مفهوم تابع عملکرد، اگر سطح عملکرد به صورت ثابت و برابر با سطح حداکثری خود (p_{1EM}) باشد، آنگاه سطح زیر منحنی این تابع در زمان t^* به ازای سطح عملکرد p_{1EM} برابر با مقدار ارزش کسب شده است؛ بنابراین می توان معادله مربوط به مقدار ارزش کسب شده را به صورت زیر نوشت:

$$EV_{EM} = p_{1EM} * t^* \quad (10)$$

در نتیجه با ترکیب معادلات ۴ و ۹ داریم:

$$EV = EV_{EM} * PCI = p_{1EM} * t^* * PCI \quad (11)$$

زمان t^* با انتگرال گیری از تابع منحنی یادگیری (تابع غیرخطی عملکرد و محاسبه سطح زیر منحنی) محاسبه می شود:

می‌شود که منحنی پیشرفت تجمعی، از معادله پویای فضای حالت که پیشرفت واقعی را نشان می‌دهد، حاصل می‌شود. از آنجا که وضعیت و عملکرد آینده پروژه به‌طور قطعی مشخص نیست و از انواع ریسک‌های زمانی و هزینه‌ای تأثیر می‌پذیرد، عدم قطعیتی با عنوان خطای فرایند در سیستم در نظر گرفته می‌شود. هدف به‌کارگیری روش پیش‌بینی کالمن-فیلتر، برآورد نحوه پیشرفت فعالیت‌ها و تخمین انحرافات میان مقادیر واقعی و برنامه‌ای در انتهای افق برنامه‌ریزی است. در دوره‌های زمانی مختلف $k=1,2,\dots,n$ مقادیر متغیرهای حالت براساس اطلاعات موجود، خطاهای اندازه‌گیری و خطای فرایند به‌روزرسانی می‌شود. کوواریانس خطا نیز معرف عدم قطعیت در تخمین متغیرهای حالت است. در اینجا متغیر حالت، بیانگر انحرافات زمانی و سرعت تغییرات آن است که به‌دلیل وجود شرایط ریسک و تأثیر یادگیری در پروژه به‌وجود می‌آید. در اینجا، تمرکز بر تخمین انحرافات یا واریانس زمانی (TV) است که اختلاف میان پیشرفت برنامه‌ریزی شده و عملکرد واقعی را نشان می‌دهد. در هر لحظه از زمان مانند t ، مقدار $TV(t)$ اختلاف بین زمان فعلی و زمان‌بندی کسب‌شده (ES) را نشان می‌دهد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$TV(t) = t - ES(t) \quad (18)$$

پیش‌بینی شاخص‌های عملکردی در شرایط ریسک به‌کار گرفته شود. باید توجه داشت که پیش‌بینی عملکرد یک پروژه می‌تواند با خطای برآورد و خطای اندازه‌گیری همراه باشد. در نتیجه باید مدلی به‌کار گرفته شود که تأثیر این خطاها را بر نتایج پیش‌بینی شاخص‌های عملکردی لحاظ مدنظر قرار بگیرد. برای این منظور در پژوهش حاضر از روش پیش‌بینی کالمن-فیلتر استفاده شده است.

روش پیش‌بینی کالمن-فیلتر (KF)

کالمن-فیلتر یک روش پیش‌بینی بازگشتی کارا مبتنی بر یک فرایند تصادفی است که حالت آینده یک سیستم پویا را پیش‌بینی می‌کند [۲۴]. این الگوریتم برای تخمین دقیق حالت آینده سیستم پویا که در آن امکان رخداد خطاهای مربوط به فرایند و خطاهای اندازه‌گیری وجود دارد، به‌کار گرفته می‌شود. حالت سیستم در زمان k با دو نوع متغیر شامل متغیر حالت (x_k) و کوواریانس خطا (P_k) نشان داده می‌شود. مدل اندازه‌گیری با استفاده از مشاهدات جدید از داده‌های واقعی (مشاهدات) به‌دست‌آمده (z_k)، داده‌های مقدماتی را به‌روزرسانی و حالت آینده سیستم را در مرحله بعدی ($k+1$) پیش‌بینی می‌کند. به‌منظور اجرای روش کالمن-فیلتر در چارچوب مدیریت ارزش کسب‌شده فرض

جدول ۲. نمادگذاری متغیرها و اجزای مدل پیش‌بینی کالمن-فیلتر

نماد (روابط) در مدل	اجزای مدل پیش‌بینی کالمن-فیلتر
Q_k	ماتریس کوواریانس خطای فرایند
R_k	ماتریس کوواریانس خطای اندازه‌گیری
A_k	ماتریس انتقال
H	ماتریس مشاهدات
K_k	بهره کالمن در دوره زمانی k ام
w_{k-1}	بردار خطای فرایند تصادفی
z_k	مشاهدات جدید در دوره زمانی k ام
v_k	بردار خطای اندازه‌گیری تصادفی
r	متغیر مربوط به خطای اندازه‌گیری
σ_v^2	واریانس خطای اندازه‌گیری
$x_k = A_k \cdot x_{k-1} + w_{k-1}$, $A_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $w_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ w_{k-1} \end{bmatrix}$	مدل سیستم پویا
$z_k = Hx_k + v_k$, $z_k = [z_k]$; $H = [1 \ 0]$; $v_k = [v_k]$	مدل اندازه‌گیری
$\hat{x}_k^- = A_k \hat{x}_{k-1}^+$, $P_k^- = A_k P_{k-1}^+ A_k^T + Q_{k-1}$	فرایند پیش‌بینی
$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R_k)^{-1}$	بهره کالمن ^۷
$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$, $P_k^+ = [I - K_k H] P_k^-$	فرایند به‌روزرسانی

$$CF(t) = \frac{EDAC(t)}{PD} = \frac{1}{SPI_t(t)} = SPI_t(t)^{-1} \quad (20)$$

اگر مقدار CF که براساس پیشرفت کار تا لحظه فعلی محاسبه می‌شود، بزرگ‌تر از ۱ باشد نشان می‌دهد طرح اولیه به احتمال زیاد با تأخیر به اتمام می‌رسد. از سوی دیگر اگر مقدار آن کمتر از ۱ باشد، احتمالاً زمان واقعی اتمام زودتر از زمان پیش‌بینی شده است. برای تخمین هزینه در زمان تکمیل، از روش رگرسیون غیرخطی استفاده می‌شود. برای این منظور با ترکیب اطلاعات ارزش برنامه‌ریزی شده PV و هزینه واقعی در طول زمان، مدل رشد طراحی می‌شود. سپس نتایج به دست آمده از این مدل در رابطه تخمین CEAC قرار می‌گیرد. گام‌های الگوریتم پیشنهادی برای برآورد هزینه در زمان تکمیل مبتنی بر مدل رشد لجستیک در ادامه تشریح شده است.

طراحی مدل رشد

در گام اول، باید مدل رشد غیرخطی مبتنی بر رگرسیون طراحی شود. فرم عمومی یک تابع هزینه رشد لجستیک در زمان t (تابع $C(t)$) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C(t) = \frac{a}{1 + e^{(\beta - \gamma t)}} \quad (21)$$

متغیر پیش‌بینی t نشان‌دهنده زمان نرمال شده در بازه $[0, 1]$ است؛ به طوری که عدد ۱ بیانگر پیشرفت کامل یا همان زمان برنامه‌ریزی شده اتمام طرح (PD) است.

محاسبه مقدار برآورد هزینه در زمان تکمیل

CEAC

در پژوهش حاضر، برای محاسبه CEAC از معادله ۲۲ استفاده شد. در این معادله فرض می‌شود که مقادیر حاصل از مدل رشد (GM) هنگامی که طرح به طور کامل تکمیل شده است، به دست می‌آیند.

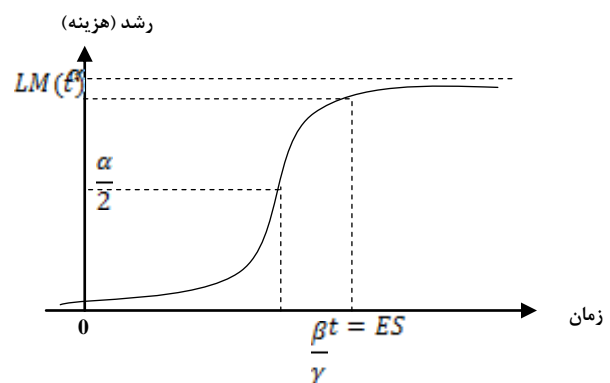
$$CEAC(t) = AC(t) + \{GM(1.0) - GM(t)\} * BAC \quad (22)$$

ترکیب ES با معادله هزینه در زمان تکمیل CEAC به منظور بهبود دقت پیش‌بینی می‌توان به جای انتخاب افق زمان طولانی‌تر (زمان تکمیل طرح) از ترکیب مقادیر AC و ارزش کسب شده فعلی در هر زمان مانند t استفاده کرد؛ بنابراین در این مرحله، هزینه نهایی اتمام طرح، متأثر از

تخمین هزینه CEAC براساس مدل رشد لجستیک

با توجه به شکل الگوی رشد S-شکل هزینه برحسب زمان، از این مدل می‌توان به منظور پیش‌بینی و برازش منحنی‌های پیشرفت استفاده کرد. تابع رشد لجستیک (LM) یکی از مدل‌های رشد S-شکل است که به دلیل سادگی و قابلیت تحلیل پذیری آن به طور گسترده استفاده می‌شود [۲۹]. صورت عمومی تابع رشد لجستیک LM در معادله ۱۹ آمده است. در این رابطه منظور از α مقدار خط مجانب مدل و نشان‌دهنده هزینه نهایی در شرایطی است که زمان t به بی‌نهایت میل کند. پارامتر β معرف اندازه بودجه اولیه و γ پارامتر مقیاس است که بر نرخ رشد هزینه مؤثر است.

$$LM(t) = \frac{a}{1 + e^{(\beta - \gamma t)}} \quad (19)$$



شکل ۲. مدل رشد لجستیک

با توجه به شکل ۲ مشخص شده است که تابع رشد لجستیک نقطه عطفی بعد از گذشت ۵۰ درصد از رشد کل $(LM(t) = \alpha/2)$ در زمان $(t = \beta/\gamma)$ است. در این نقطه، نرخ رشد تابع $(\alpha\gamma/4)$ در بیشترین مقدار خود است. با توجه به رشد هزینه در طول زمان، مدل لجستیک LM توصیف مناسبی از روند رشد و افزایش عملکرد با توجه به رفتار هزینه دارد. مقدار برآورد شده EDAC در زمان t با نسبت مدت زمان برنامه‌ریزی شده (PD) به شاخص عملکرد برنامه‌های $(SPI(t))$ در زمان t برابر است. با توجه به مفهوم زمان بندی کسب شده، مدل برآورد هزینه از نسبت معکوس شاخص عملکرد برنامه‌های استفاده می‌کند. این نسبت معکوس فاکتور تکمیل طرح (CF) نامیده می‌شود:

با توجه به مقدار این شاخص، مدت اجرا در زمان تکمیل (EDAC) برآورد شده است.

$$EDAC_{KF/LC} = \frac{PD}{SPI_{KF/LC}} = \frac{PD}{\frac{SPI_{KF}}{PCI_{LC}}} \quad (26)$$

$$= \frac{PCI_{LC}}{SPI_{KF}} \cdot PD$$

شاخص CEAC در زمان $t = EDAC_{KF/LC}$ با توجه به رابطه ۲۸ محاسبه می‌شود. براین اساس، به کمک رابطه زیر، تخمین نهایی هزینه طرح در زمان تکمیل (CEAC) به صورت زیر خواهد بود:

$$CEAC = AC(EDAC_{KF/LC}) + \{LM(CF(EDAC_{KF/LC})) - LM(EDAC_{KF/LC})\} * BAC \quad (27)$$

نتایج پژوهش

به منظور اعتبارسنجی رویکرد ارزیابی عملکرد، از پروژه دانش‌محور در حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات استفاده شد. در جدول ۳، داده‌های جمع‌آوری شده از این پروژه و پارامترهای اساسی برای تجزیه و تحلیل اندازه‌گیری عملکرد آمده است. این اطلاعات مربوط به پروژه توسعه محصولی جدید مبتنی بر فناوری اطلاعات است.

جدول ۳. اطلاعات لازم برای ارزیابی عملکرد پروژه دانش‌محور

مقدار	پارامتر
۰/۵	ضریب منحنی یادگیری k
۱۱۰۰۰۰ دلار	بودجه برنامه‌ریزی شده BAC
۵۸۲ روز	مدت زمان برنامه‌ریزی شده (PD)
۰/۵	احتمال اولیه موفقیت (POS)
ماه هفتم	زمان پیش‌بینی ^{۱۱} (زمان فعلی)
۹۵ درصد	سطح اطمینان ^{۱۱}

نتایج اولیه شاخص‌های عملکردی

در جدول ۴، مقادیر شاخص‌های عملکرد به دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف پیش‌بینی ارائه شده است. در این جدول نتایج رویکرد سنتی مدیریت ارزش کسب‌شده و روش زمان‌بندی کسب‌شده، با روش پیشنهادی (تلفیق تئوری منحنی یادگیری و روش کالمن-فیلتر) مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد به دلیل تأثیر یادگیری و ریسک بر عملکرد، مقدار شاخص عملکرد برنامه‌ای اولیه (حاصل از مدل EVM) از ۹۵ درصد به مقدار ۳۸/۸ درصد

پیشرفت برنامه‌ای در هر لحظه از زمان مانند t برآورد می‌شود. برای این منظور، باید تخمین هزینه در زمانی مانند t که ارزش زمان‌بندی در آن حاصل می‌شود، قابل برآورد باشد. به عبارت دیگر، در اینجا هدف برآورد هزینه در زمان t=ES است. در نتیجه مقدار ارزش کسب‌شده در انتهای طرح (t=1) با مقدار ارزش فاکتور تکمیل CF در تابع رشد جایگزین می‌شود. این اصلاح با استفاده از روش زمان‌بندی کسب‌شده ES برای تخمین شاخص هزینه (CEAC) به صورت زیر خواهد بود.

$$CEAC(t) = AC(t) + \{GM[CF(t)] - GM(t)\} * BAC \quad (23)$$

با توجه به اینکه در این پژوهش از مدل رشد لجستیک استفاده شده است، رابطه نهایی تخمین هزینه با جایگذاری تابع $LM(t)$ در رابطه ۲۳ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$CEAC(t) = AC(t) + \{LM(CF(t)) - LM(t)\} * BAC \quad (24)$$

به طوری که مقدار t همان مقدار نرمالیزه شده زمان‌بندی کسب‌شده (ES) در بازه [0,1] است.

برآورد نهایی شاخص‌های زمان و هزینه

در این گام، با تلفیق اثر ریسک و اثر یادگیری در قالب نمودارها و توابع یادگیری شاخص‌های کلیدی، عملکرد شامل برآوردهای مربوط به مدت اجرا در زمان تکمیل EDAC و نیز هزینه در زمان تکمیل CEAC به دست می‌آیند. ابتدا مدت اجرای طرح در زمان تکمیل تحت تأثیر ریسک ($EDAC_{KF}$) با استفاده از مدل کالمن-فیلتر برآورد می‌شود. سپس مقدار انحراف برنامه‌ای SV پیش‌بینی شده و سپس با استفاده از رابطه $EV = PV - SV$ مقدار ارزش کسب‌شده EV برآورد می‌شود. در نتیجه شاخص عملکرد برنامه‌ای پروژه دانش‌محور به صورت زیر به دست می‌آید:

$$SPI_{KF} = \frac{PD}{EDAC_{KF}} \quad (24)$$

بر اساس ضریب اصلاح عملکرد PCI، مقدار شاخص عملکرد برنامه‌ای $SPI_{KF/LC}$ برآورد می‌شود.

$$SPI_{KF/LC} = \frac{SPI_{KF}}{PCI_{LC}} \quad (25)$$

شاخص‌های عملکردی شده است. براین اساس، به میزان ۱۹/۳۳ درصد تخمین شاخص EDAC نسبت به مقدار اولیه آن افزایش یافته است.

رسیده که با کاهش ۱۱/۷ درصدی همراه بوده است. دلیل این تغییر ریسک‌های زمانی و تأثیرات یادگیری در طول اجرای طرح است که سبب معقول‌تر شدن تخمین

جدول ۴. مقایسه روش‌های مختلف پیش‌بینی عملکرد

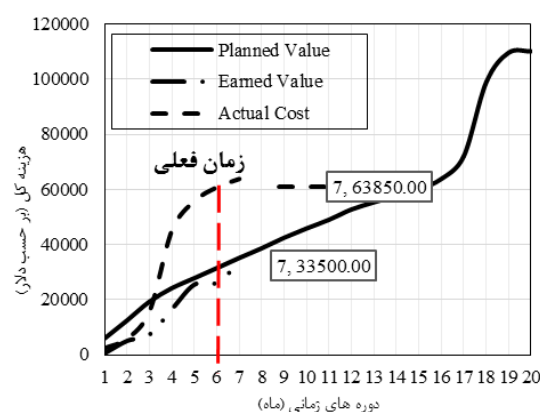
روش مدیریت ارزش کسب‌شده EVM	روش زمان‌بندی کسب‌شده ES	تلفیق تئوری منحنی یادگیری و روش کالمن-فیلتر
$SPI_{EV}=95\%$	$SPI_{ES}=94\%$	$SPI_{KF/LC}=83.8\%$
$CPI_{EV}=52\%$		$EDAC_{KF}=699.21$ روز
$EDAC_{EV}=582$ روز	$EDAC_{ES}=622.42$ روز	$EDAC_{KF/LC}=694.55$ روز
دلار $CEAC_{EV}=209974.4$		$CEAC_{KF/LC}=186000.1$ دلار

تخمین شاخص زمان EDAC، گراف احتمال موفقیت و پروفایل احتمال موفقیت آمده است. این نمودارها ابزاری مؤثر برای نمایش، تجزیه و تحلیل، تفسیر و ارزیابی نتایج پیش‌بینی عملکرد در شرایط ریسک و احتمالی هستند. در ادامه تجزیه و تحلیل احتمالی از شاخص‌های عملکرد زمانی به تفکیک ارائه می‌شود.

نمودار احتمال موفقیت

این نمودار اطلاعاتی مناسب درباره دقت برآورد و احتمال نهایی اتمام پروژه در مدت‌زمان از پیش تعیین‌شده به مدیر پروژه می‌دهد. این احتمالات با توجه به توابع توزیع چگالی احتمال و براساس تابع توزیع تجمعی آن به دست آمده‌اند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، در شکل ۴ منحنی‌های توزیع احتمال مقدم و مؤخر موفقیت پروژه آمده است که احتمال اتمام پروژه را در تاریخ مقرر نشان می‌دهند. توزیع احتمال مقدم برای پروژه براساس مدت‌زمان برنامه‌ریزی‌شده پروژه (به‌عنوان مقدار میانگین) و واریانس مورد انتظار که از طریق قضاوت مهندسی به دست می‌آید، محاسبه شده است. از سوی دیگر، توزیع احتمال مؤخر (برای برآورد شاخص EDAC) در طول اجرای پروژه برآورد شده است. منحنی‌های توزیع احتمالات مقدم^{۱۲} و مؤخر^{۱۳} احتمال خاتمه پروژه در مدت برنامه‌ریزی‌شده را نشان می‌دهند. توزیع مقدم قبل از اجرای پروژه محاسبه شده و بر پایه تجربیات و دیدگاه‌های کارشناسان است. توزیع مؤخر نیز توزیع احتمالات تخمین‌های آتی در طی فازهای اجرایی

در شکل ۳، منحنی‌های ارزش کسب‌شده و هزینه واقعی در مقابل ارزش برنامه‌ای همچنین ارزش کسب‌شده و داده‌های واقعی در پایان ماه هفتم در این نمودار نشان داده شده است. در زمان فعلی، ارزش کسب‌شده، هزینه واقعی و ارزش برنامه‌ریزی‌شده به ترتیب ۳۳۵۰۰، ۳۵۱۶۶ و ۶۳۸۵۰ دلار است. روند این سه منحنی نشان می‌دهد پروژه در اجرای طرح تا زمان فعلی ($t_{now}=7$) بیش از هزینه برنامه‌ریزی‌شده، صرف مخارج طرح کرده و ارزش کسب‌شده مقداری کمتری از ارزش برنامه‌ریزی‌شده بوده است.

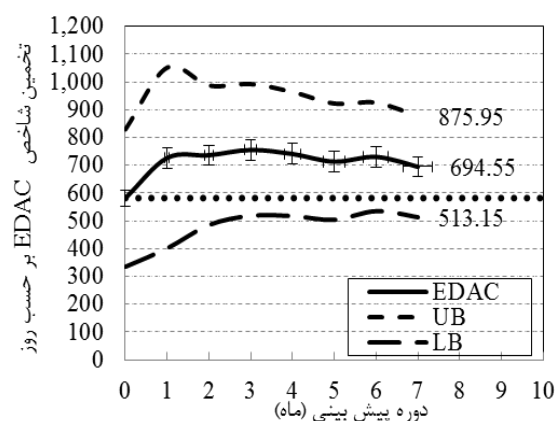


شکل ۳. ارزش کسب‌شده در مقابل ارزش برنامه‌ریزی‌شده

نتایج آنالیز ریسک و پیش‌بینی اهداف عملکردی

در این بخش، نتایج آنالیز ریسک و پیش‌بینی‌های اهداف عملکردی در قالب سه نمودار، با عناوین پروفایل احتمالی

کران‌های بالا و پایین مربوط به برآورد شاخص EDAC می‌تواند به‌طور مستقیم با استفاده از محاسبات روش کالمن-فیلتر و با توجه به ماتریس کوواریانس خطا و پس از آن با تأثیر نتایج منحنی یادگیری برآورد شود. منحنی EDAC در شکل ۵ با خط تیره نمایش داده شده است. این منحنی نشان‌دهنده مدت‌زمان تخمین‌زده‌شده برای شاخص EDAC با استفاده از پارامتر میانگین تابع توزیع احتمال مؤخر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هرچه پیشرفت بیشتری در اجرای پروژه حاصل شود، منحنی‌های EDAC، UB و LB به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. همه نتایج مربوط به منحنی‌های UB و LB در سطح اطمینان موردنظر (۹۵ درصد) به‌دست آمده‌اند. براساس نتایج می‌توان از این نمودار به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ایجاد هشدارهای به‌موقع در هنگام افت سطح عملکرد پروژه استفاده کرد.

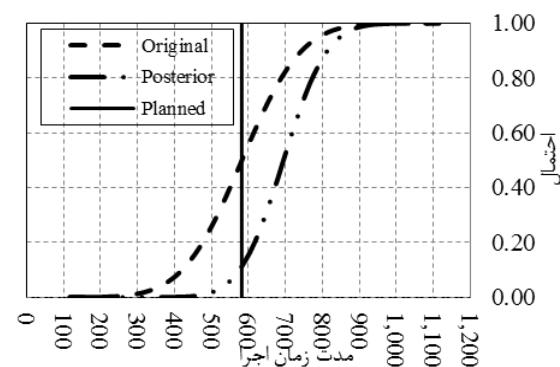


شکل ۵. پروفایل احتمالی EDAC

پروفایل احتمال موفقیت

پروفایل احتمال موفقیت، روند تغییرات مربوط به احتمال رسیدن به مقدار برنامه‌ریزی‌شده برای اهداف اولیه پروژه (زمان، هزینه) را نمایش می‌دهد (شکل ۶). این نمودار ابزار هشداردهنده‌ای به ازای سطح مشخصی از ریسک‌پذیری پروژه است. با توجه به شکل ۶، احتمال موفقیت از ۵۰ درصد در شروع پروژه به ۷ درصد در ماه ششم کاهش یافته است که نشان می‌دهد این پروژه به‌شدت از ریسک تأخیرات تأثیر پذیرفته است. پس از آن دوره، احتمال مشخصات موفقیت به ۱۱ درصد در ماه هفتم افزایش یافته است. در این دوره از زمان، وضعیت پروژه جلوتر از برنامه اولیه است و با احتمال ۱۱ درصد

پروژه و در زمان‌های مشخص را نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر، فرض بر این است که واریانس توزیع احتمال مقدم و مؤخر یکسان است. در این مقاله همچنین واریانس مدت‌زمان اجرای پروژه با استفاده از رابطه برآورد سه‌نقطه‌ای (روش PERT) تعیین شده است. با توجه به شکل ۴، در سطح احتمال ۵۰ درصد، مقدار EDAC تخمین‌زده‌شده در پایان ماه هفتم تقریباً ۶۹۵ روز است. براین اساس عملکرد برنامه‌ای پروژه در مقایسه با عملکرد مورد انتظار در طرح اولیه تقریباً ۱۱۳ روز تأخیر است و با توجه به روند پیشرفت کنونی، احتمال موفقیت به ۱۱ درصد تقلیل پیدا کرده است. با توجه به بدترین سناریوی ممکن، تخمین زمان اتمام طرح نیز ۸۹۵.۷۵ روز است.

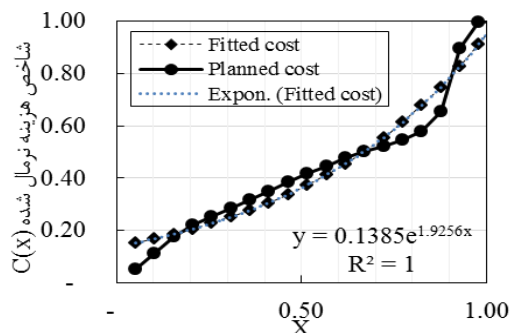


شکل ۴. نمودار احتمال موفقیت پروژه در مطالعه موردی

پروفایل احتمالی تخمین شاخص زمان EDAC

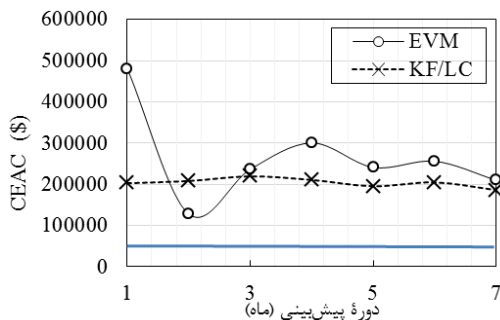
در این بخش، نتایج و نمودارهای پروفایل احتمالی تخمین شاخص زمان EDAC به‌دست‌آمده از محاسبات مدل کالمن-فیلتر و منحنی یادگیری بحث شده است. این پروفایل شامل سه منحنی، حد بالا (UB)، حد پایین (LB) و مقدار پیش‌بینی است. این منحنی‌ها روند تخمین‌های احتمالی انجام‌شده برای اهداف عملکردی از شروع پروژه تا زمان پیش‌بینی (زمان فعلی) را نشان می‌دهند. حدود بالا و پایین براساس سطح اطمینان تعیین‌شده توسط تصمیم‌گیرنده (۹۵ درصد) تعیین می‌شوند. این سه منحنی، محدوده تحت کنترل در نزدیکی مقدار برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد و می‌توان از آن‌ها به‌عنوان ابزارهایی برای دریافت هشدارهای زودهنگام از انحرافات غیرقابل کنترل در آینده و تعیین اقدامات اصلاحی به‌موقع استفاده کرد.

مطابق شکل ۷ منحنی‌های هزینه برنامه‌ریزی شده و تابع هزینه برآزش شده نمایش داده شده‌اند. منحنی برآزش هزینه در زمان تکمیل (به‌عنوان متغیر پاسخ) با ورودی زمان (به‌عنوان متغیر پیش‌بینی کننده مدل) برآزش شده است.



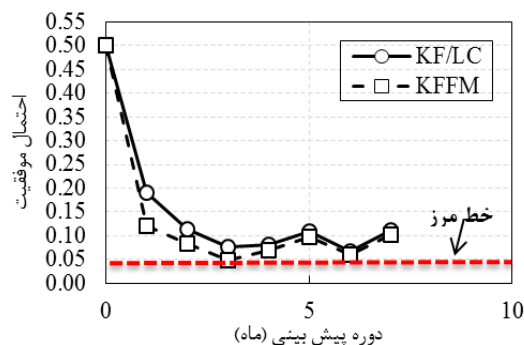
شکل ۷. برآزش شاخص هزینه پروژه در طول زمان

منحنی برآزش شده تناسب خوبی با هزینه‌های واقعی و ارزش برنامه‌ریزی شده دارد. با توجه به ویژگی‌های معادله ۲۹، نقطه عطف زمانی رخ می‌دهد که پیشرفت زمانی پروژه ۵۰ درصد است. در این زمان، رشد هزینه حدود ۳۵ درصد از کل بودجه پیش‌بینی شده BAC است. با توجه به نتایج، پس از ۷ ماه از شروع اجرای پروژه، حدود ۷۶ درصد آن تکمیل شده و هزینه تجمعی، ۵۸ درصد از کل بودجه اولیه (BAC) است. پیش‌بینی شاخص CEAC با روش‌های EVM و روش پیشنهادی KF/LC (تلفیق رویکرد منحنی یادگیری و روش کالمن-فیلتر) در طول دوره‌های زمانی مختلف در شکل ۸ آمده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار شاخص هزینه در دوره‌های زمانی اولیه در روش EVM نوسانات بیشتری از تخمین روش پیشنهادی KF/LC دارد و به تدریج نتایج دو روش به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند.



شکل ۸. پیش‌بینی شاخص CEAC در دوره‌های زمانی گوناگون

طرح در زمان مقرر تکمیل می‌شود. براین اساس مدل‌های پیش‌بینی تصمیم‌گیرنده می‌توانند در زمان مناسب اقدامات اصلاحی را صورت دهند که سبب کاهش زمان‌های تأخیر و جلوگیری از افزایش هزینه می‌شود. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، اجرای پروژه مورد مطالعه تا مرز هشدار پیش رفته و در ماه هفتم نیز احتمال موفقیت پروژه افزایش یافته است.



شکل ۹. احتمال موفقیت پروژه در دوره‌های زمانی مختلف

ارزیابی شاخص عملکرد هزینه

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، دقت و صحت پیش‌بینی شاخص هزینه CEAC مبتنی بر مدل رگرسیون در مقایسه با رویکردهای مبتنی بر شاخص (مانند شاخص CPI) بیشتر است. در این بخش، این ادعا آزموده شده و به تحلیل نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از روش برآزش غیرخطی مبتنی بر رگرسیون، پارامترهای مربوط به مدل رشد لجستیک به‌دست‌آمده است. به کمک نرم‌افزار MINITAB نیز مدل تابع هزینه برحسب زمان براساس معادله رشد لجستیک و تحلیل رگرسیون غیرخطی به‌صورت زیر حاصل شده است:

$$LM(t) = \frac{104.68}{1 + e^{(6.627 - 1.934t)}} \quad (28)$$

براساس مدل برآزش شده فوق، نتایج ارزیابی عملکرد هزینه براساس مدل پیش‌بینی رگرسیون و پارامترهای مربوطه در معادله ۲۹ آمده است.

جدول ۵. نتایج پیش‌بینی هزینه

مقدار شاخص CF	هزینه واقعی در	تخمین هزینه در
	انتهای پروژه AC(x)	انتهای پروژه CEAC(x)
۱/۳۷	دلار ۶۳۸۵۰	دلار ۱۸۶۰۰۰/۱

مقادیر برنامه‌ریزی شده دارد. این مقادیر بیشتر از آنکه از مقدار اندکی داده واقعی گزارش شده در ماه‌های اولیه تأثیر بپذیرد، بیشتر از برنامه اولیه پیروی می‌کند؛ زیرا نمی‌توان تنها با اطلاعات عملکرد پروژه در ماه اول برای ۲۰ ماه آینده به درستی تصمیم‌گیری کرد. در روش پیشنهادی در این مقاله KF/LC، طی فرایند ارزیابی عملکرد، به تدریج با پیشرفت برنامه تأثیر استفاده از داده‌های واقعی در پیش‌بینی شاخص عملکرد بیشتر می‌شود و بالعکس تأثیر مقادیر برنامه‌ریزی روی نتایج مدل کاهش می‌یابد.

این نمودار نشان‌دهنده اختلاف مقادیر پیش‌بینی از مقدار برنامه‌ریزی شده است که این اختلاف مربوط به فرض اولیه رویکرد EVM در پیش‌بینی آتی، مبنی بر ثابت بودن سطح عملکرد (یکسان بودن عملکرد آینده با عملکرد گذشته) است. روش EVM در پیش‌بینی شاخص عملکرد زمانی، بسیار پرنوسان است و انحرافات بسیاری از مقدار برنامه‌ریزی دارد. همچنین نتایج دقت پایین این روش را در مقایسه با روش پیشنهادی KF/LC نشان می‌دهد. مقادیر پیش‌بینی، فاصله نزدیک و نوسان تقریباً متعادلی با

جدول ۶. نتایج مدل برآورد هزینه برای مطالعه موردی پروژه

مربع خطای پیش‌بینی	داده‌های برازش شده		داده‌های واقعی		مدل EVM		دوره‌های زمانی (ماه)
	LM(x)	X	هزینه واقعی (نرمال شده)	X	هزینه واقعی (دلار) AC	رویکرد ES (روز)	
۰/۰۰۹۸	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۲/۴۰۰	۳	۱
۰/۰۰۳۱	۰/۱۷	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱	۵/۸۵۳	۲۶	۲
۰/۰۰۰۱۳	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۵	۱۵/۷۳۳	۳۶	۳
۰/۰۰۰۱۹	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۱	۴۵/۱۶۷	۷۸	۴
۰/۰۰۰۶۳	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۶	۵۵/۷۸۳	۱۳۱	۵
۰/۰۰۱۱۹	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۳۱	۶۰/۷۸۳	۱۳۶	۶
۰/۰۰۱۷۳	۰/۲۸	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۳۶	۶۳/۸۵۰	۱۹۶	۷
۰/۰۰۱۹۶	۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۴۱	-	-	۸
۰/۰۰۲۲۲	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۳۹	۰/۴۶	-	-	۹
۰/۰۰۱۷۹	۰/۳۷	۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۵۲	-	-	۱۰
۰/۰۰۱۰۳	۰/۴۱	۰/۵۷	۰/۴۵	۰/۵۷	-	-	۱۱
۰/۰۰۰۵۲	۰/۴۶	۰/۶۲	۰/۴۸	۰/۶۲	-	-	۱۲
۰	۰/۵	۰/۶۷	۰/۵	۰/۶۷	-	-	۱۳
۰/۰۰۱۰۵	۰/۵۶	۰/۷۲	۰/۵۲	۰/۷۲	-	-	۱۴
۰/۰۰۴۷	۰/۶۱	۰/۷۷	۰/۵۵	۰/۷۷	-	-	۱۵
۰/۰۰۹۷۷	۰/۶۸	۰/۸۲	۰/۵۸	۰/۸۲	-	-	۱۶
۰/۰۰۸۸۸	۰/۷۵	۰/۸۸	۰/۶۵	۰/۸۸	-	-	۱۷
۰/۰۰۵۱۱	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹	۰/۹۳	-	-	۱۸
۰/۰۰۶۸۷	۰/۹۱	۰/۹۸	۱	۰/۹۸	-	-	۱۹
۰/۰۰۰۰۵	۱/۰۱	۱	۱	۱	-	-	۲۰

زمان بندی کسب‌شده به ترتیب از طریق معادلات ۳۰ و ۳۲ انجام می‌شود.

$$EDAC_{EVM} = \frac{PD}{SPI} \quad (29)$$

$$SPI_{ES}(t) = \frac{ES(t)}{t} \quad (30)$$

$$EDAC_{ES} = \frac{PD}{SPI(t)} \quad (31)$$

شکل ۹ پیش‌بینی شاخص EDAC را در طول دوره‌های زمانی گوناگون برای روش‌های مختلف تخمین زمان نشان می‌دهد. براین اساس، در ماه هفتم، برخلاف

اعتبار سنجی رویکرد ارزیابی عملکرد پیشنهادی

در این بخش، به منظور اعتبارسنجی مدل ارزیابی عملکرد پیشنهادی، مقایسه‌ای بین آن و سایر روش‌های رایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی عملکرد زمان و هزینه ارائه می‌شود. یکی از روش‌های شناخته شده در برآورد زمان، روش مسیر بحرانی (CPM) است [۳۱]. شاخص EDAC با استفاده از روش CPM با توجه به داده‌های واقعی و پیشرفت فیزیکی هر فعالیت از طرح محاسبه می‌شود [۳۲]. همچنین برآورد شاخص زمان EDAC به کمک روش‌های مدیریت ارزش کسب‌شده و روش

(KF/LC) نتایج مطمئن تری از پیش‌بینی شاخص عملکرد زمان در مقایسه با روش‌های رایج پیش‌بینی عملکرد مانند EV و ES نشان می‌دهد. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر این روش‌ها، درصد خطای پیش‌بینی برای شاخص EDAC پیش‌بینی‌شده با مدل پیشنهادی و مقدار متناظر آن برای روش مسیر بحرانی $EDAC_{CPM}$ به کمک رابطه زیر محاسبه شده است:

$$PE = \left| \frac{EDAC_{KF/LC} - EDAC_{CPM}}{EDAC_{CPM}} \right| * 100 \quad (32)$$

شاخص $EDAC_{KF/LC}$ مدت‌زمان تخمین‌شده با استفاده از ترکیب مدل کالمن-فیلتر و مدل منحنی یادگیری است. شاخص $EDAC_{CPM}$ نیز برآورد مدت‌زمان طرح توسط روش مسیر بحرانی CPM است. متوسط درصد خطای روش‌های پیش‌بینی عملکرد زمانی در مقایسه با روش CPM در دوره‌های زمانی مختلف در ممکن است مدل پیش‌بینی مبتنی بر CPM تخمین‌های دقیق‌تری را از روش‌های دیگر ارائه کند.

روش سنتی EVM، مقادیر پیش‌بینی فاصله بسیار نزدیکی با مقدار برنامه‌ریزی‌شده دارد و این مقادیر بیشتر از آنکه از داده‌های واقعی گزارش‌شده تأثیر بپذیرد، از برنامه مینا پیروی می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان بدین‌صورت تفسیر کرد که روش فیلتر-کالمن از هر دو اطلاعات برنامه‌ریزی‌شده و واقعی استفاده می‌کند و خطاهای اندازه‌گیری را نیز در فرایند ارزیابی عملکرد در نظر می‌گیرد.

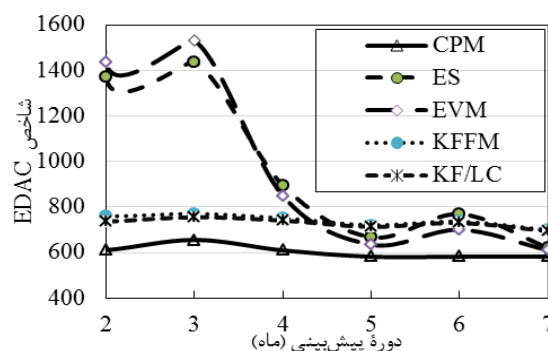
روش‌های CPM، EVM، ES و KF به تأثیر یادگیری بر عملکرد توجهی ندارند. در این میان، مدل پیشنهادی KF/LC هم‌زمان تأثیر ریسک و یادگیری را در فرایند ارزیابی عملکرد مدل‌سازی کرده است. با توجه به شکل ۹، پیش‌بینی مدل‌های EVM و ES دقت کمتری از رویکرد KF/LC دارد که با کمترین مجموع مربعات خطا همراه است. در نتیجه، براساس این مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد تلفیقی منحنی یادگیری و روش کالمن-فیلتر جدول ۷ آمده است. باید توجه داشت که روش CPM عملکرد زمان را در سطح فعالیت‌ها برآورد می‌کند؛ بنابراین

جدول ۷. مقایسه روش‌های ارزیابی عملکرد

خطای پیش‌بینی عملکرد درصد				شاخص EDAC					دوره پیش‌بینی (ماه)
KF/LC (%)	KFFM (%)	EVM (%)	ES (%)	KF/LC	KFFM	EVM	ES	CPM	
۲۲/۵۴	۳۰/۹۳	۹۵۸/۷۸	۹۵۸/۷۸	۷۲۷	۷۷۶	۶۲۷۹	۶۲۷۹	۵۹۳	1
۲۴/۱۵	۲۸/۰۸	۱۳۰/۸۸	۱۴۲/۵۵	۷۳۶	۷۶۰	۱۳۶۹	۱۴۳۸	۶۱۱	2
۲۷/۳۷	۲۹/۹۲	۱۴۲/۴۸	۱۵۸/۳۰	۷۵۵	۷۷۰	۱۴۳۸	۱۵۳۲	۶۵۶	3
۲۴/۹۲	۲۶/۶۹	۵۰/۹۹	۴۳/۳۷	۷۴۱	۷۵۱	۸۹۵	۸۵۰	۶۱۰	4
۲۰/۲۶	۲۱/۵۴	۱۲/۶۱	۷/۱۲	۷۱۳	۷۲۱	۶۶۸	۶۳۵	۵۸۲	5
۲۳/۱۶	۲۴/۲۰	۲۹/۶۷	۱۸/۱۵	۷۳۰	۷۳۷	۷۶۹	۷۰۱	۵۸۲	6
۱۷/۱۲	۱۷/۹۱	۴/۹۶	۳/۰۳	۶۹۵	۶۹۹	۶۲۲	۶۱۱	۵۸۲	7
۱۷/۰۴	۱۷/۶۲	۱۸/۹۸	۱۲/۶۲	۶۹۴	۶۹۸	۷۰۶	۶۶۸	۵۸۸	۸
۲۰/۴۸	۲۱/۰۴	۲۱/۸۹	۲۳/۰۳	۷۱۴	۷۱۸	۷۲۳	۷۳۰	۶۱۵	۹
۲۱/۸۹	۲۴/۲۱	۱۵۲/۳۶	۱۵۱/۱۸۸	متوسط درصد خطای پیش‌بینی					
۰/۰۳	۰/۰۵	۳/۰۷	۳/۰۸	انحراف استاندارد خطای پیش‌بینی					

پروژه‌ها مبتنی بر رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده نادیده گرفته شده‌اند. مزایای عملی استفاده از مدل رگرسیون پیشنهادی ارتباط معناداری بین داده‌های موجود (گذشته) با داده‌های برنامه‌ریزی شده (آینده) برقرار می‌کند. درحالی‌که رویکرد سنتی EVM به‌طور مشخص تنها بر داده‌های عملکرد تاریخی (قبلی) متکی است و از پیش‌بینی وضعیت آتی پروژه و بروز انحرافات محتمل در آینده برآوردی نمی‌کند. در پژوهش حاضر، این رابطه میان گذشته، حال، و عملکرد آینده پروژه به‌کمک اجرای مدل رشد لجستیک محقق شد. در بخش اعتبارسنجی، دقت روش‌های EVM، ES، KF و روش پیش‌بینی تلفیقی ارزیابی عملکرد KF/LC در دوره‌های زمانی متعددی بررسی شد. نتایج مقایسه به‌خوبی نشان می‌دهد در مطالعه موردی، روش پیش‌بینی تلفیقی ارزیابی عملکرد KF/LC کمترین متوسط درصد خطا را دارد، در نتیجه در مسئله حل‌شده، روش پیشنهادی نتایج مطمئن‌تری در مقایسه با روش‌های EVM، ES و KF ارائه می‌کند. ذکر این نکته ضروری است که تعمیم نتایج این پژوهش برای همه پروژه‌های دانش‌محور، نیازمند آزمایش مدل روی چندین پروژه مختلف دانش‌محور و مقایسه نتایج مربوط است. این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آتی مدنظر پژوهشگران قرار بگیرد. از جمله سایر زمینه‌های مطالعات آتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: در نظر گرفتن سایر مدل‌ها و توابع یادگیری در مدل ارزیابی عملکرد، توسعه مدل تخمین ریسک با استفاده از شبکه احتمال بیزی برای توانمندسازی مدیران پروژه در پیش‌بینی احتمال دقیق شکست پروژه‌های دانش‌محور از جمله پروژه‌های پژوهش و توسعه، استفاده از مدل‌های شبکه عصبی برای پیش‌بینی و مقایسه با رویکرد پیشنهادی و در نظر گرفتن تغییرات عملکرد هزینه در طول چرخه عمر پروژه و پیش‌بینی هزینه در زمان تکمیل در مدل پیش‌بینی.

مطابق نتایج جدول ۷، مقادیر پیش‌بینی دو روش KF و مدل پیشنهادی KF/LC تقریباً نزدیک به هم است. با توجه به شکل ۴، اگر در ماه چهارم تأثیر یادگیری را در نظر نگیریم (با توجه به اینکه در آستانه هشدار قرار داریم) باید اقدامات اصلاحی لازم انجام شود که این تصمیمی بحرانی و کلیدی است. احتمال موفقیت برای پروژه با در نظر گرفتن تأثیر یادگیری مقدار بالاتری از مدل‌هایی دارد که تأثیر یادگیری را بر عملکرد نادیده گرفته‌اند؛ یعنی نیازی به عکس‌العمل عجولانه مدیریتی درباره اقدامات پاسخ به ریسک نیست و با ادامه روند فعلی، احتمال رسیدن به مقدار برنامه‌ریزی شده همچنان در حد قابل قبول و بازه اطمینان مورد نظر قرار دارد.



شکل ۹. پیش‌بینی شاخص EDAC در طول دوره‌های زمانی گوناگون نتیجه و جمع‌بندی

روش‌های رایج برای ارزیابی عملکرد پروژه‌ها در سطح عملیاتی، از جمله مدیریت ارزش کسب‌شده، رویکردهایی قطعی هستند. در نتیجه ممکن است قادر به توصیف پیچیدگی ذاتی و ریسک‌های مرتبط در پیش‌بینی عملکرد طرح‌های نوآورانه نباشند. در این مطالعه، روش ارزش کسب‌شده با توجه به آثار یادگیری بر عملکرد برای پروژه‌های دانش‌محور در شرایط ریسک توسعه داده شد. این آثار تاکنون در ارزیابی عملکرد

منابع

۱. ربیعی، ایمان و همکاران (۱)، «به‌کارگیری و مقایسه روش‌های پیش‌بینی جهت تخمین هزینه تکمیل پروژه در روش ارزش حاصله»، نشریه مهندسی صنایع، ۱۳۹۰، شماره ۴۵، صص ۱۴۵-۱۵۷.
۲. شگری، مهنوش؛ جهانگشای رضائی، مصطفی و ایزدبخش، حمیدرضا (۲)، «ارائه مدل جامع ارزیابی عملکرد در محیط رقابتی با رویکرد ترکیبی تحلیل پوششی داده‌ها، کارت امتیازی متوازن و تئوری بازی‌ها (مطالعه موردی: شرکت‌های سیمان)»، نشریه مهندسی صنایع، ۱۳۹۴، شماره ۴۹، صص ۴۵-۵۴.

3. Neely, A., Gregory, M., and Platts, K. (1995). "Performance Measurement System Design: A Literature Review and Research Agenda", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 15, No. 4, PP. 80-116.
 4. Rubio, J., Muñoz, J., and Otegi, J. (2015). *Engineering Projects Assessment Using Earned Value Management with Performance Indexes Evaluation and Statistical Methods*, In *Project Management and Engineering*, Springer PP. 61-72.
 5. Vanhoucke, M., (2013). *Earned Value Management*, In *Project Management With Dynamic Scheduling*, 2013, Springer. P. 217-240.
 6. Fleming, Q. W., and Koppelman, J. M. (2000). *Earned Value Project Management*, Project Management Institute.
 7. Chen, H. L., Chen, W.T. and Lin, Y. L. (2016). "Earned Value Project Management: Improving the Predictive Power of Planned Value", *International Journal of Project Management*, Vol. 34, No. 1, PP. 22-29.
 8. Wong, P.S., On Cheung, S., and C. (2007). "Hardcastle, Embodying Learning Effect in Performance Prediction", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 6, No. 133, PP. 474-482.
 9. Badiru, A. B., and A. O. (2009). "Ijaduola, Half-Life Theory Of Learning Curves For System Performance Analysis", *Systems Journal, IEEE*, Vol. 3, No. 2, PP. 154-165.
 10. Hinze, J., and Olbina, S. (2009). "Empirical Analysis of the Learning Curve Principle in Prestressed Concrete Piles", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 5, No. 135, PP. 425-431.
 11. Farghal, S. H., and Everett, J. G. (1997). "Learning Curves: Accuracy in Predicting Future Performance", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 1, No. 123, PP. 41-45.
 12. Anzanello, M. J., and Fogliatto, F. S. (2011). "Learning Curve Models And Applications: Literature Review and Research Directions", *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 41, No. 5, PP. 573-583.
 13. Laihonen, H., (2015). "Performance Improvement in Twenty-First Century Organizations: Models, Tools, Techniques", *Measuring Business Excellence*, Vol. 19, No. 3, PP. 1-8.
 14. Shah, A. H. (2014). *Examining the Perceived Value of Integration of Earned Value Management with Risk Management-Based Performance Measurement Baseline*, 2014, Capella University.
 15. Van Horenbeek, A., and Pintelon, L. (2014). "Development of a Maintenance Performance Measurement Framework—Using the Analytic Network Process (ANP) for Maintenance Performance Indicator Selection", *Omega*, Vol. 42, No. 1, PP. 33-46.
 16. Yahanpath, N., and Islam, M. A *Conceptual Framework to Incorporate Risk Perspective into the Balanced Scorecard: Towards a Sustainable Performance Measurement System*. Available At SSRN 2474481, 2014.
 17. Malyusz, L., and Pem, A. (2014). "Predicting Future Performance by Learning Curves", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, No. 119, PP. 368-376.
 18. Khamooshi, H., and Golafshani, H. (2014). "EDM: Earned Duration Management, a New Approach to Schedule Performance Management and Measurement", *International Journal of Project Management*, Vol. 6, No. 32, PP. 1019-1041.
 19. Kim, B. C. (2015). "Probabilistic Evaluation of Cost Performance Stability in Earned Value Management", *Journal of Management in Engineering*, Vol. 32, No. 1, PP. 401-502.
 20. Iranmanesh, S. H. and Hojati, Z. T. (2015). "Intelligent Systems in Project Performance Measurement and Evaluation", In *Intelligent Techniques in Engineering Management*, Springer. PP. 581-619.
 21. Plaza, M., And Turetken, O. (2009). "A Model-Based DSS for Integrating the Impact of Learning in Project Control", *Decision Support Systems*, Vol. 47, No. 4, PP. 488-499.
 22. Wilson, B., Frolick, M., and Ariyachandra, T. (2013). "Earned Value Management Systems: Challenges And Future Direction", *Journal of Integrated Enterprise Systems*, Vol. 4. No. 1, PP. 1-9.
 23. Jaber, M. Y. (2011). *Learning Curves: Theory, Models, and Applications*, CRC Press.
 24. Adler, P. S., and Clark, K. B. (1991). "Behind the Learning Curve: A Sketch of the Learning Process", *Management Science*, Vol. 37, No. 3, PP. 267-281.
-

25. Argote, L., (1996). "Organizational Learning Curves: Persistence, Transfer And Turnover", International Journal of Technology Management, Vol. 11, No. 7 and 8 PP. 759-769.
26. Paliwal, K., KALMAN FILTERING. 1987.
27. Siu, N. (1994). "Risk Assessment for Dynamic Systems: An Overview", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 1, No. 1, PP. 43-73.
28. Juang, J. N. et al. (1993). "Identification of Observer/Kalman Filter Markov Parameters-Theory and Experiments. Journal of Guidance", Control, and Dynamics, Vol. 16, No. 2, PP. 320-329.
29. Kalman, R. E. (1960). "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Journal of Basic Engineering, Vol. 1, No. 82, PP.33-45 .
30. Kim, B. C., and Reinschmidt, K. F. (2010). "Probabilistic Forecasting of Project Duration Using Kalman Filter and the Earned Value Method", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 8, No. 136, PP. 834-843.
31. De Marco, A., and Narbaev, T. (2013). "Earned Value-Based Performance Monitoring of Facility Construction Projects", Journal of Facilities Management, Vol. 11, No. 1, PP. 69-80.
32. De Marco, A., Briccarello, D., and Rafele, C. (2009). "Cost and Schedule Monitoring of Industrial Building Projects: Case Study", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 9, No. 135, PP. 853-862.
33. Hammad, M. W., Abbasi, A., and Ryan, M. J. (2016). "Developing a Novel Framework to Manage Schedule Contingency Using Theory of Constraints and Earned Schedule Method", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 144, No. 4, PP. 18-40.
34. Nasr, W., Yassine, A., and Kasm, O. A. (2016). "An Analytical Approach to Estimate the Expected Duration and Variance for Iterative Product Development Projects", Research in Engineering Design, Vol. 1, No. 27, PP. 55-71.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن:

1. Earned Value
2. L-Curve
3. Analytic Network Process
4. Earned Duration Management
5. Performance Correction Index
6. Kalman Filter
7. Kalman Gain
8. Logistic Model
9. Completion Factor
10. Time of Forecasting
11. Confidence Level
12. Prior Probability Distribution
13. Posterior Probability Distribution
14. Critical Path Method