Archive of SID

ارائهٔ مدلی یکپارچه برای کنترل تأخیرات پروژه مبتنی بر رویکرد مدیریت بافرهای زمانی

سید اکبر غلامیان[۱،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳

واژگان کلیدی:
مدیریت زنجیرهٔ بحرانی،
ذخیره‌های زمانی،
کنترل پروژه،
مدیریت ارزش کسب‌شده.

چکیده

مدیریت ارزش کسب‌شده، روشی کارآمد در کنترل پروژه و شیوه‌ای برای اندازه‌گیری و ارزیابی پیشرفت واقعی پروژه بر اساس کار انجام‌شده، زمان سپری‌شده و هزینه‌ها است. در این تحقیق، یک مدل کنترل تأخیرات پروژه به‌منظور پایش پیشرفت فعالیت‌ها، مبتنی بر شاخص مصرف ذخیره احتیاطی و نیز شاخص عملکرد برنامه‌ای ارائه شده است. برتری روش تعیین ذخیره احتیاطی پیشنهادی نسبت به روش‌های نو و رایج مدیریت زنجیرهٔ بحرانی، روی مثال‌های عددی و مطالعه موردی نشان داده شده است. از جملهٔ این برتری‌ها می‌توان به بهبود قابلیت اطمینان برنامه زمان‌بندی از طریق تخصیص بهتر زمان‌های ذخیره احتیاطی و کاهش میانگین و واریانس تأخیرات زمان تکمیل برای برنامه زمان‌بندی پروژه حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با سایر رویکردهای متداول زنجیرهٔ بحرانی اشاره کرد. نتایج مدل کنترل پروژه مبتنی بر مدیریت ذخیره‌های زمانی، نشان داده است که زنجیره‌های غیربحرانی پروژه نیز در صورتی که میزان ذخیره احتیاطی مصرفشان در نقاط بحرانی قرار بگیرد، احتمال بروز تأخیرات را تشدید می‌کنند.

۱- مقدمه

امروزه علی‌رغم استفادهٔ گسترده از روش‌های مدیریت پروژه و بسته‌های نرم‌افزاری قدرتمند، هنوز هم بسیاری از پروژه‌های ساخت با تأخیر در هزینه و زمان پروژه روبه‌رو هستند. یکی از مهم‌ترین دلایل این موضوع، عدم قطعیت در پروژه است. رویکردهای عمومی مدیریت عدم قطعیت در پروژه، اغلب مبتنی بر استفاده از مفهوم ذخیره احتیاطی است [۱]. رویکرد مدیریت زنجیرهٔ بحرانی به‌منظور مدیریت ذخیره‌های زمانی در یک برنامه زمان‌بندی است تا در مقابله با اختلالات و تأخیرات آتی بتواند با صرف کمترین هزینه، زمان تکمیل پروژه را ایمن کند. زنجیرهٔ بحرانی مدیریت پروژه بر اساس روش‌ها و الگوریتم‌های حاصل از نظریه محدودیت‌ها بنا شده است. در زنجیرهٔ بحرانی، علاوه بر محدودیت‌ها و روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه، وابستگی منابع نیز لحاظ شده است.

به طورکلی، به‌کارگیری راهکارهای تسریع در تکمیل پروژه، مستلزم صرف هزینه‌ای بیشتر خواهد بود. در عمل باید با توجه به تسریع زمانی در زمان تکمیل فعالیت‌ها و در نظر گرفتن هزینه‌های مستقیم وغیرمستقیم فعالیت‌های پروژه، تعادلی بین زمان و هزینه کل پروژه برقرار شود. در این شرایط، مدل‌های بهینه‌سازی موازنه هزینه-زمان در پروژه‌ها به کار گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر، برای تلفیق رویکردهای موازنه هزینه-زمان و مدل‌های نظارتی در پروژه به‌منظور کنترل تأخیرات پروژه تلاش شده است. در این مقاله، یک مدل کنترل پروژه استوار مبتنی بر رویکرد مدیریت ذخیره‌های زمانی ارائه گردیده است. این مدل به‌صورت یک رویکرد پیشگیرانه برای جلوگیری از بروز تأخیر در زمان تکمیل پروژه، وضعیت پروژه را به‌صورت پیوسته از نظر درصد پیشرفت فیزیکی و نیز میزان مصرف ذخیره‌های زمانی در زنجیرهٔ بحرانی و زنجیره‌های غیر بحرانی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Gholamian@pnu.ac.ir
۱. مربی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور

www.SID.ir

Archive of SID

پایش کرده، در صورت لزوم (بروز سیگنال‌های هشداردهنده)، اقدامات اصلاحی را از طریق حل مدل موازنه هزینه-زمان مدنظر قرار می‌دهد.

امروزه علی‌رغم استفاده گسترده از روش‌های مدیریت پروژه و بسته‌های نرم‌افزاری قدرتمند، هنوز هم بسیاری از پروژه‌های ساخت با تأخیر در هزینه و زمان پروژه روبه‌رو هستند. در بررسی‌های میدانی صورت‌گرفته توسط اولاوال و مینگ سان [۲] بر روی تعداد زیادی سازمان پروژه محور عمرانی در انگلیس، مشخص شد ۸۹٪ از شرکت‌ها از ابزارها و نرم‌افزارهای کنترل زمان و ۱۰۰٪ آن‌ها از ابزارها و نرم‌افزارهای کنترل هزینه استفاده می‌کنند؛ ولی تمام پروژه‌ها به درجات مختلف، متحمّل تأخیرهای زمانی و هزینه‌های اضافی شده‌اند، به طوری که حدود نیمی از پروژه‌ها حداقل ۱۰٪ انحراف از عملکرد دارند.

تصمیم‌گیرندگان و مدیران پروژه می‌توانند به کمک مدل پیشنهادی در این تحقیق، آثار مستقیم وغیرمستقیم تغییرات تصادفی زمانی فعالیت‌ها و عوامل اختلال را بر روی عملکرد پروژه ارزیابی کنند و بدین طریق، واقع‌بینانه بودن برنامه‌ها را مورد بررسی قرار دهند. با استفاده از مدل پیشنهادی همچنین میتوان مؤثر بودن اقدامات کنترلی را در منطبق نگه داشتن پروژه با برنامه اولیه بررسی کرد. بدین منظور دو شبیه‌سازی با هم مقایسه می‌شوند: شبیه‌سازی پایه (یا شبیه‌سازی جاری پروژه) و یک شبیه‌سازی که در آن آثار مستقیم اختلالات تصادفی لحاظ شده است. شبیه‌سازی دوم، آثار غیرمستقیم، ثانویه و ثالثیه آثار مستقیم روی عملکرد پروژه را تعیین می‌کند. این نتایج به‌عنوان پایه‌ای برای مذاکره جبران‌های معقول یا برای طراحی اقداماتی جهت کاهش آثار هزینه‌ای/ زمان‌بندی تغییرات استفاده می‌شوند. در مجموع می‌توان گفت مدل پیشنهادی برای تعیین هزینه کل و تغییرات زمان‌بندی تحت تأثیر عوامل غیرقطعی قابل استفاده است و بدین ترتیب، طیف وسیعی از پروژه‌ها در صنعت ساخت، از جمله پروژه‌های ساخت پالایشگاه، نیروگاه و سد کاربرد دارد.

۲- مرور ادبیات

در یک دسته‌بندی، عدم قطعیت‌های موجود در مدیریت پروژه به عدم قطعیت در مورد برآوردها و تخمین‌ها، عدم قطعیت موجود در فعالیت‌های پروژه، عدم قطعیت در مورد اهداف و اولویت‌های پروژه و عدم قطعیت‌های موجود در روابط بین اعضا، ذی‌نفعان و طرفین درگیر در پروژه تقسیم‌بندی شده است [۳]. عدم‌قطعیت‌ها جزء عوامل مهم در بروز تأخیرات در پروژه‌های ساخت محسوب می‌شود. در مورد برخی از عدم قطعیت‌ها که از سابقه رخداد و اطلاعات تاریخی برخوردارند، می‌توان احتمالاتی را به‌عنوان توزیع وقوع، به آن پدیده نسبت داد. از طرفی در مورد برخی از اختلالات نادر که تبعاتی بسیار وخیم دارند (مانند از دست دادن نیروهای کلیدی در پروژه، بلایای طبیعی و...)، هیچ گونه اطلاعاتی در دست نیست و عملاً به‌سختی قابل پیش‌بینی و مدیریت است. مطالعه ویژگی‌های عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های ساخت، از اهمیت بسزایی برخوردار است. برای اثربخشی بهتر، باید مدیریت عدم قطعیت‌ها از همان مطالعه اولیه و طرح مفهومی، در نظر گرفته شود. به مرور زمان و در طول اجرای پروژه، هزینه اعمال تغییرات در فازهای عملیاتی و ساخت پروژه بسیار بالا خواهد رفت و به همین ترتیب، اثربخشی آن نیز به‌سرعت کاهش می‌یابد. در نتیجه شناسایی و لحاظ کردن عوامل بروز ریسک و عدم قطعیت‌های آتی در همان فازهای اولیه طراحی و نیز برآورد منابع کافی، می‌تواند بخشی از آثار سوء بروز آن را کنترل و محدود کند [۴]. تحقیقات پیشین در حوزه برنامه‌ریزی و کنترل پروژه مبتنی بر رویکرد زنجیره بحرانی در جدول ۱ آمده و جایگاه پژوهش حاضر مشخص شده است.

در تحقیقی از شفیعی نیک‌آبادی و همکاران [۵] یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی فرایند توسعه محصول ارائه شده است. در این تحقیق به‌منظور ایجاد تعادل بین مدت زمان و هزینه اجرای یک پروژه توسعه محصول، یک مدل ریاضی ارائه شده است. برای اعتبارسنجی مدل مذکور، یک نمونه در نرم‌افزار متلب حل و نتایج مربوط به محاسبه زمان و هزینه فرایند در حالات مختلف ارائه شده است. در تحقیقی از مارتنز و ون‌هوکه [۶] مدلی تلفیقی از رویکردهای مدیریت ارزش کسب‌شده و ارزش حاصله EVM/ES، برای بهبود کارایی و قابلیت اطمینان محدودیت‌های تحمل‌پذیری و استواری در پروژه ارائه شده است. برای بررسی عملکرد محدودیت‌ها، یک آزمایش محاسباتی انجام شده که در آن، نتایج مدل پیشنهادی با مدلی با محدودیت‌های تحلیلی، صرف‌نظر از دسترسی به منابع، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از اطلاعات منابع موجود، عملکرد محدودیت‌های استواری مدل، می‌تواند به طور قابل توجهی

www.SID.ir

Archive of SID

افزایش یابد.

در پژوهشی از هو و همکاران [۷] یک روش تجزیه و تحلیل ریسک مبتنی بر چارچوب PERT ارائه شده است که اطلاعاتی مهم در خصوص اهمیت نسبی فعالیت و رابطه آن با مدت زمان پروژه، به تصمیم‌گیرنده ارائه می‌دهد.

در این مقاله تلاش شده است نقص‌های روش رایج مدیریت زنجیرهٔ بحرانی را رفع شده، یک چارچوب نظارتی جدید مبتنی بر مصرف بافر توسعه داده شود. در روش پیشنهادی، آستانه‌های هشدار برای شروع اقدام اصلاحی به‌صورت پویا و بر اساس پیشرفت پروژه تعیین می‌شود. آزمایش محاسباتی، نشان‌دهندهٔ برتری نسبی روش پیشنهادی در مقایسه با رویکرد رایج مدیریت بافر از نظر زمان و هزینه است.

با توجه به اینکه صنعت ساخت و ساز، یکی از بخش‌های اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای است، بهشتی‌نیا و همکاران [۸] یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت با در نظر گرفتن هزینه های زیست محیطی ارائه کرده‌اند. برای نشان دادن قابلیت اطمینان الگوریتم پیشنهادی، نتایج آن با نتایج الگوریتم ژنتیک رایج برای ۱۰۸ مسئله نمونه با اندازه‌های مختلف مقایسه شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادشده در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، بهبود قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. در تحقیقی از ژانگ و همکاران [۹] یک رویکرد جدید برای تعیین اندازه بافر پروژه بر اساس شاخص فشردگی مصرف منابع ارائه شده است. شاخص منابع که در این مقاله پیشنهاد شده، منعکس‌کننده روابط بین فعالیت‌ها و بهبود دقت تعیین مقدار بافر پروژه است. برای این منظور، از ماتریس تحلیل ساختار طراحی (DSM) برای تجزیه و تحلیل جریان اطلاعات بین فعالیت‌ها استفاده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی تأثیر منابع بر بافر پروژه را به طور مؤثری در نظر می‌گیرد و از این طریق نقاط ضعف روش‌های سنتی مرتفع شده است.

در تحقیقی از هو و همکاران [۱۰] چارچوب مدیریت زنجیرهٔ بحرانی با توجه به هزینه‌های منابع و ثبات برنامه توسعه داده شده است. در این چارچوب بهبودیافته CC/BM امکان تخصیص منابع اضافی فراهم شده است تا ثبات زمان شروع فعالیت‌های برنامه را تضمین کند.

در تحقیقی از روغنیان و همکاران [۱۱] یک رویکرد فازی برای تعیین اندازه بافرهای زمانی در زنجیرهٔ بحرانی، به‌منظور کنترل شرایط عدم قطعیت در برنامه‌ریزی پروژه ارائه شده است. هدف مسئله، به حداقل رساندن مدت زمان پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع و محدودیت‌های دیگر است. خروجی این مدل، برنامه زمان‌بندی پروژه را تعیین می‌کند. رویکرد پیشنهادی برای تعیین اندازه بافر بر اساس روش ریشه مجموع مربعات خطا است که توسط ضرایب اصلاح‌شده برای غلبه بر برنامه ریسک توسعه داده شده است.

۲-۱- رویکرد مدیریت زنجیرهٔ بحرانی پروژه (CC/PM)

زنجیرهٔ بحرانی به‌عنوان طولانی‌ترین زنجیره فعالیت‌ها و با توجه به وابستگی فعالیت‌ها و منابع تعریف می‌شود. این تعریف با تعریف مسیر بحرانی که به‌عنوان طولانی‌ترین زنجیره از فعالیت‌ها که تنها بر اساس وابستگی فعالیت‌ها تعریف می‌شود، تفاوت دارد. در واقع، زنجیرهٔ بحرانی مدّعی است که تأخیر در دسترسی به منابع نیز مانند تأخیر در فعالیت‌های پیش‌نیاز، باعث تأخیر در پروژه می‌شود. در رویکرد CC/PM سه نوع ذخیره احتیاطی تعریف می‌شود: ۱. ذخیره تغذیه‌کننده (FB[1])؛ ۲. ذخیره پروژه (PB[2])؛ ۳. ذخیره منبع (RB[3]). ذخیره‌های تغذیه‌کننده، زمان‌های بافر چندگانه برای محافظت از زنجیره‌های بحرانی پروژه هستند. به عبارت دقیق‌تر، یک ذخیره تغذیه از زنجیرهٔ بحرانی در برابر تأخیر در زنجیره تغذیه‌کننده محافظت می‌کند. ذخیره پروژه در انتهای زنجیرهٔ بحرانی، با ادغام زمان اطمینان مربوط به فعالیت‌های زنجیره تعیین می‌شود. هنگامی که فعالیتی از یک مسیر غیربحرانی به زنجیرهٔ بحرانی متصل شود، از ذخیره تغذیه‌کننده استفاده می‌شود. ذخایر منابع نیز بافرهای چندگانه مصنوعی هستند که به‌عنوان هشداردهنده برای اطمینان از در دسترس بودن منابع عمل می‌کنند. یک بافر منبع به‌عنوان یک سیگنال هشداردهنده هنگامی که یک تغییر در منابع موجود در زنجیرهٔ بحرانی رخ می دهد، عمل می کند. از جمله دلایل استفاده از ذخیره‌های تغذیه و ذخیره پروژه این است که از ذخیره احتیاطی پروژه برای محافظت آن از تأخیر و از ذخیره احتیاطی تغذیه برای استوارسازی زمان شروع فعالیت‌های زنجیرهٔ بحرانی استفاده می‌شود [۱۲]. در رویکرد مدیریت زنجیرهٔ بحرانی پروژه، اندازه ذخیره پروژه و تخصیص آن‌ها باید قبل از ذخیره‌های احتیاطی

[1] Feeding buffer
[2] Project buffer
[3] Resource buffer

www.SID.ir

Archive of SID

تغذیه صورت گیرد. معمولاً ذخیره پروژه ۵۰ درصد زمان کل پروژه و اندازه ذخیره‌های احتیاطی تغذیه نیمی از زمان بلندترین زنجیرهٔ غیربحرانی پروژه است. سومین نوع ذخیره احتیاطی مورد استفاده در رویکرد زنجیرهٔ بحرانی، ذخیره احتیاطی منبع است. هنگامی که منبعی در حال انجام یک کار روی زنجیرهٔ بحرانی است و فعالیت قبلی زنجیرهٔ بحرانی از طریق منابعی دیگر انجام شود، از ذخیره احتیاطی منبع استفاده می‌گردد. با در نظر گرفتن ذخیره‌های احتیاطی تغذیه، منبع و پروژه از تأخیر پروژه جلوگیری کرده، سعی می‌شود پروژه زودتر از موعد تحویل یا در تاریخ تعیین‌شده به اتمام برسد. اندازهٔ ذخیره احتیاطی و چگونگی نظارت بر آن، به طور مستقیم روی تعیین زمان اتمام پروژه و همچنین ریسک برنامه مؤثر است؛ از این رو نقش بسیار مهمی در پیاده‌سازی موفق رویکرد CC/BM ایفا می‌کند [۱۳]. اکثریت قریب به اتفاق تلاش‌های تحقیقاتی در زمینه مدیریت ذخیره احتیاطی (BM)، بر تعیین اندازه ذخیره احتیاطی متمرکز شده است. با این حال، مطالعه تکنیک‌های نظارت و کنترل ذخیره احتیاطی، موضوعی است که علی‌رغم اهمیت آن، پژوهش‌های فعلی برای آن کافی نیست. مکانیسم نظارت ذخیره احتیاطی توسط گلدرات (۱۹۹۷) به این صورت است که عملاً ذخیره احتیاطی به سه منطقه (سیستم «سبز-زرد-قرمز») تقسیم شده و سطح اقدام صریح و روشن برای تصمیم‌گیری در شرایط مصرف ذخیره احتیاطی همراه با پیشرفت پروژه تعریف شده است. لیچ [۲۳] توسعه‌ای بر مکانیزم اولیه مدیریت ذخیره احتیاطی ارائه کرده است، به طوری که هدف آن، به حداقل رساندن سیگنال‌های هشداردهندهٔ نادرست و حصول اطمینان از اقدامات مورد نیاز اصلاحی در برنامه است. در روش پیشنهادی، دو خط انتقال وضعیت مصرف ذخیره احتیاطی (یعنی انتقال سبز به زرد و انتقال زرد به قرمز) در طول مدت پروژه برنامه‌ریزی شده است که به منظور نظارت دقیق‌تر یا پاسخ سریع‌تر به انحراف از برنامه به کار گرفته می‌شود. در حال حاضر، این روش به‌عنوان روش مدیریت ذخیره احتیاطی نسبی (RBMA[1]) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴].

در تحقیقی از هورولن و لئوس [۱۶] که ادعای بیان‌شده توسط گلدرات را تصدیق و کامل می‌کند، اذعان شده است که روش مدیریت ذخیره احتیاطی، یک مکانیسم بازخورد/هشدار برای شروع اقدامات اصلاحی مدیریت، ارائه می‌کند. نادرپور و مفید[۱۷] یک مدل بهینه‌سازی تخصیص منابع به فعالیت‌های پروژه با استفاده از مدل دیاگرام منابع بحرانی ارائه کرده‌اند. این مدل به‌منظور برنامه‌ریزی و کنترل بهینه و مؤثر جهت مدیریت و رهبری یک پروژه و رفع نواقص شیوه‌های مرسوم برنامه‌ریزی و کنترل پروژه مانند CPM، PERT ارائه شده است. این رویکرد تخصیص بهینه منابع در راستای کنترل زمان‌بندی و استفاده از منابع محدود پروژه قادر به توزیع مؤثر و متناسب منابع به فعالیت‌ها در سطوح مختلف پروژه است و موجب دسترسی متعادل فعالیت‌ها به منابع در طول اجرای پروژه می‌شود.

در تحقیقی از پاراجس و لوپز پارادز [۱۸] ساختاری مبتنی بر تجزیه و تحلیل مدیریت ارزش کسب‌شده EVM[2] جهت نظارت بر پروژه ارائه شده که هم‌زمان شاخص‌های کنترل هزینه و شاخص کنترل زمان‌بندی را مدنظر قرار داده است. شاخص‌های جدید نظارتی شامل شاخص کنترل هزینه و شاخص کنترل زمان‌بندی هستند. این دو معیار جدید در یک رویکرد ترکیبی از مدیریت ارزش کسب‌شده (EVM) و مدیریت ریسک به‌منظور کنترل و نظارت بر پروژه ارائه شده‌اند. در رویکرد پیشنهادی، واریانس هزینه و برنامه حاصل از EVM با انحراف پروژه حاصل از تجزیه و تحلیل ریسک تحت شرایط مورد انتظار، مقایسه شده‌اند.

در تحقیقی از راسل و همکاران [۱۹] از رویکرد تخصیص ذخیره‌های زمانی به فعالیت‌های پروژه به‌منظور مقاوم‌سازی زمان اتمام پروژه با توجه به تغییرات و عدم قطعیت‌های نیروی انسانی، استفاده شده است. مقدار کل زمان‌های اضافی ذخیره احتیاطی و نیز دلایل استفاده از این رویکرد بر اساس یک مطالعهٔ کاربردی از پروژه ساخت، بررسی شده است. در مقاله‌ای از ژانگ و همکاران [۲۰] به موضوع تعیین اندازه ذخیره احتیاطی با رویکرد زنجیرهٔ بحرانی بر اساس بهینه‌سازی ویژگی‌های پروژه پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو نشان داده است که ذخیره احتیاطی به‌دست‌آمده با استفاده از این روش، کمتر از روش‌های رایج (از جمله روش قطع و برش C&P[3])، اما بیشتر از روش ریشه مربعات خطا است. در تحقیقی از سایپال و سینگ [۲۱] استراتژی جدیدی برای تعیین اندازه ذخیره‌های احتیاطی در زنجیرهٔ بحرانی ارائه شده است. روش پیشنهادی،

[1] Relative Buffer Management Approach
[2] Earned Value Management
[3] Cut and Paste

www.SID.ir

Archive of SID

مدت زمان پروژه را کاهش می‌دهد، در حالی که ثبات پروژه را در برابر عدم قطعیت‌های آتی حفظ می‌کند. حسامی و مولایی [۲۲] یک بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه بر اساس تفکر ناب ارائه کرده‌اند. این مدل بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی پروژه‌های راه‌سازی استفاده می‌شود. این پروژه‌ها به دلیل تکرار متناوب فعالیت‌ها به‌عنوان پروژه‌های خطی-تکراری شناخته می‌شوند. با توجه به اینکه در بسیاری از موارد به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در شرایط اجرای پروژه، نمی‌توان زمان و هزینه فعالیت‌ها را به طور قطعی تعیین کرد، از دیدگاه فازی به مسئله پرداخته شده است. در پژوهش فوق، از الگوریتم ژنتیک و رویکرد NSGAII برای حل مسئله زمان‌بندی استفاده شده است.

هوو همکاران [۲۸]، روش نظارتی جدید بر اساس رویکرد CC/BM ابداع کرده‌اند که با کنترل ذخیره‌های زمانی، سعی در ارزیابی احتمال اتمام به‌موقع پروژه نسبت به هزینه‌های تسریع اجرای فعالیت‌ها و تعیین زمانی می‌پردازد که برای تسریع فعالیت‌ها مقرون به صرفه است.

رستمی و همکاران [۳۱]، مسئله بهینه‌سازی پورتفولیوی چندهدفه با اهداف حداکثر کردن بازده، حداقل کردن ریسک و تعداد دارایی را مدنظر قرار داده‌اند. در مقاله مذکور، یک مدل چندهدفه با محدودیت‌های مناسب برای ارضای نیازهای سرمایه‌گذار در نظر گرفته شده است. برای مسائل با ابعاد بزرگ کارایی از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است.

در تحقیقی از هو و همکاران [۲۹] رویکردی مبتنی بر ترکیب شاخص‌های حساسیت و تغییرپذیری فعالیت‌ها[1] با متدولوژی مدیریت ذخیره احتیاطی برای مدیریت ریسک پروژه ارائه شده است. روش پیشنهادی تجزیه و تحلیل ریسک برنامه (SRA[2]) در چارچوب سنتی PERT[3]، اطلاعات مهمی در مورد اهمیت نسبی فعالیت‌ها در رابطه با مدت زمان پروژه فراهم می‌کند؛ با این حال، اقدامات کنترلی مستقل از عملکرد برنامه پروژه‌های فعلی است.

۲-۲- رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده (EVPM[4])

مدیریت ارزش کسب‌شده، روشی کارآمد در کنترل یکپارچه

جدول ۱- دسته‌بندی تحقیقات پیشین

مرجع	نام اختصاری روش	تعیین اندازه بافر	کنترل بافر	موازنه زمان- هزینه	معیارهای هزینه
[۱۵]	روش مدیریت ذخیره احتیاطی نسبی (RBMA)	-	√	-	√
[۲۳]	روش ضریب شناوری وابسته به فعالیت (ADFF[5])	√	-	-	-
	روش ضریب تطبیقی فشردگی منابع (APRT[6])	√	-	-	
	روش ضریب چگالی تطبیقی (APD[7])	√	-	-	
[۲۴]	روش انعطاف‌پذیر تعیین ذخیره احتیاطی (FBS[8])	√	-	-	-
[۲۵]	روش تطبیقی با فرض وابستگی بین فعالیت‌ها (APAD[9])	√	-	-	-
[۲۶]	بهینه‌سازی زنجیرهٔ بحرانی	√	√	-	-
[۲۰]	بهینه‌سازی مشخصه‌ها[10]	√	-	-	-
[۲۷]	ساختار بهبودیافته مدیریت زنجیرهٔ بحرانی[11]	√	-	-	-
[۲۸]	تسریع پروژه با مدیریت ذخیره‌های زمانی (C-BMA[12])	-	√	-	√
[۲۹]	ترکیب متدولوژی مدیریت ذخیره احتیاطی و مدیریت ریسک پروژه	-	√	-	√
[۳۰]	ترکیب EVM و متدولوژی CC/BM	-	√	-	√
[۱۰]	مدیریت ذخیره زمانی	-	√	-	√
تحقیق حاضر	مدل نظارتی استوار پروژه	√	√	√	√

پروژه است. این روش، یکی اساسی‌ترین تکنیک‌های کنترل هزینه و روشی برای اندازه‌گیری و ارزیابی پیشرفت واقعی

[1] Activity Sensitivity Measures
[2] Schedule Risk Analysis
[3] Program evaluation and review technique
[4] Earned Value Project Management
[5] Activity-dependent float factor
[6] Adaptive procedure with resource tightness
[7] Adaptive procedure with density
[8] Flexible buffer sizing
[9] .Adaptive procedureWith activity dependence
[10] Attribute Optimization
[11] Improved Critical Chain Project Management Framework
[12] Buffer Management Approach With Cost Considerations

www.SID.ir

Archive of SID

پروژه بر اساس کار انجام‌شده، زمان سپری‌شده و هزینه‌ها است. مقولهٔ انحراف از برنامه و اطلاع به‌موقع از روند آن، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران و ذی‌نفعان پروژه است. اطلاع دقیق از پیشرفت واقعی و مقایسه میزان کار انجام‌شده با میزان کار پیش‌بینی‌شده و محاسبهٔ مغایرت‌های هزینه‌ای و زمانی با عملکرد واقعی، از نکات مهم و اصلی در EVPM است [۳۲]. در تحقیقی از فیاد و همکاران [۳۳] مدلی برای پایش وضعیت جاری پروژه و پیش‌بینی وضعیت آتی برای زمان‌بندی مجدد فعالیت‌ها ارائه شده است. در تحقیقی از پونز تیندا و همکاران [۳۴] مدلی برای زمان‌بندی و کنترل پروژه مبتنی بر مفاهیم ارزش کسب‌شده و ترکیب آن با منطق فازی ارائه شده است. در تحقیق فوق، برآوردهای زمانی و هزینه‌ای در قالب تئوری اعداد فازی انجام گرفته است. زمان‌بندی فازی پروژه بر اساس زودترین و دیرترین زمان شروع فعالیت‌ها تعیین می‌شود. در تحقیقی از آکبس [۳۵] رویکرد و متدولوژی جدیدی برای کنترل پروژه در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. رویکرد پیشنهادی ترکیب متدلوژی EVM و تحلیل ریسک پروژه است. این رویکرد در شرایط وجود عدم قطعیت، به مدیران پروژه در شناسایی اینکه آیا انحرافات در پروژه از مقادیر برنامه‌ریزی شده، در داخل محدوده تغییرات مورد انتظار قرار می‌گیرد یا خیر، کمک می‌کند.

۳- ضرورت تحقیق

به طور کلی، منطق نظارت بر ذخیره احتیاطی به‌خوبی نشان می‌دهد که پیشرفت برنامه پروژه به‌عنوان یک شاخص اصلی، چگونه در حال تغییر است و اطلاعات لازم را برای تصمیم‌گیری در مورد اینکه آیا به اقدام کنترل نیاز است یا خیر، ارائه می‌کند. با این حال، به‌کارگیری رویکرد کلاسیک CC/BM در مسائل واقعی، دارای مشکلات متعددی است که نمی‌توان نادیده گرفت:

(. رویکرد کلاسیک CC/BM هیچ اطلاعاتی در سطح فعالیت در شاخص‌های اندازه‌گیری عملکرد مرتبط با ذخیره احتیاطی ارائه نمی‌دهد. در واقع، آثار گوناگون از تغییرات در فعالیت‌های پروژه، مانند نوسانات مدت زمان اجرا که در زمان اتمام پروژه مؤثر است، تجزیه و تحلیل نشده است که این موضوع ممکن است منجر به سیگنال‌های هشداردهندهٔ نادرست گردد؛ از این رو به اقدامات کنترلی ناکارآمدی نیز می‌تواند منجر شود.

۲. در رویکرد کلاسیک CC/BM، به طور صریح، فعالیت‌هایی که نیازمند نظارت و مدیریت زمانی بیشتری هستند (از جمله در سطوح مختلف ساختار شکست کار WBS[1]) شناسایی نشده، سطح اقدامات اصلاحی مناسبی نیز برای آن در نظر گرفته نمی‌شود. برای مقابله با این مشکلات در مسائل عملی، از روش تجزیه و تحلیل ریسک برنامه برای فعالیت‌های بحرانی جهت مقاصد کنترلی استفاده می‌شود که تصمیم‌گیرنده را در مدیریت مؤثرتر پروژه، قادر می‌سازد.

۴- بیان مسئله

در این بخش، رویکرد پیشنهادی برای مدل‌های برنامه‌ریزی در حین اجرای پروژه، قبل و بعد از رخداد اختلال به تفضیل بیان می‌شود. ابتدا مدل مفهومی مسئله تشریح می‌شود. این مدل مفهومی در برگیرنده چارچوب اصلی و کلیدی در تعریف مسئله تحقیق و خروجی‌های مورد انتظار است. نوآوری‌های مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

۱. توسعهٔ یک مدل کنترلی استوار برای نظارت بر عملکرد پروژه در طول اجرا و پیش‌بینی روندهای انحرافی در برنامه از طریق نظارت مستمر بر شاخص‌های مصرف ذخایر زمانی؛
۲. به‌روزرسانی زنجیره‌های بحرانی پروژه بر اساس درصد پیشرفت فیزیکی فعالیت‌های پروژه در طول فرآیند نظارت؛
۳. توسعه یک مدل موازنه هزینه-زمان برای بهینه‌سازی استراتژی تسریع زمان فعالیت‌ها با حداقل هزینه؛
۴. توسعه معیارها و شاخص‌های جدید برای پیش‌بینی میزان انحراف هزینه-زمان از برنامه بر اساس میزان مصرف ذخیره‌های زنجیره‌های بحرانی و غیربحرانی و درصد پیشرفت آن‌ها.

۵- الگوریتم کنترل پروژه

مدل کنترل پروژه، مبتنی بر پایش شاخص‌های عملکرد برنامه‌ای زنجیره‌های بحرانی و غیربحرانی و میزان مصرف ذخیره احتیاطی در این زنجیره‌ها است. گام‌های روش مدیریت ذخیره احتیاطی پیشنهادی بر اساس شاخص‌های کنترل زمان پروژه و هزینه در شکل ۱ (۱) خلاصه شده است. مدل کنترل پروژه مبتنی بر تکنیک شبیه‌سازی گسسته-

[1] Work Breakdown Structure

www.SID.ir

Archive of SID

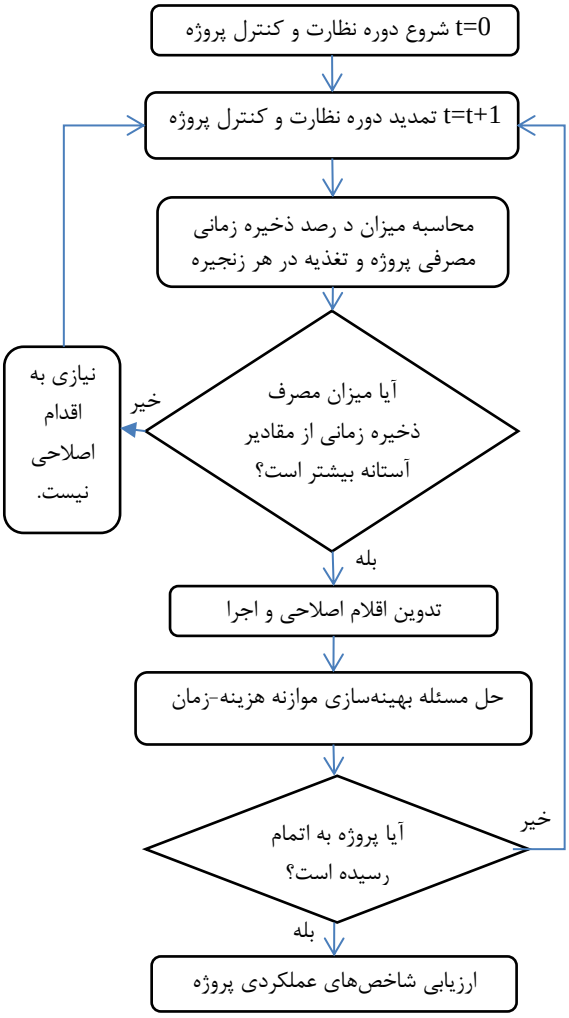
پیشامد با در نظر گرفتن معیارهای EVM که شامل یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین بهترین گزینه‌های تسریع فعالیت‌ها پروژه و نیز شاخص‌هایی برای ارزیابی عملکرد پروژه در طی به‌روزرسانی برنامه است. ابزار اصلی سنجش اعتبار مدل پیشنهادی، روش شبیه‌سازی است که به کمک آن، میزان دقت شاخص‌های پیش‌بینی انحراف از برنامه و ارزیابی متوسط و واریانس هزینه صرف‌شده برای اقدامات کنترلی، برآورد می‌شود.

در اولین گام، زمان‌بندی توسط روش تولید زمان‌بندی سری (SGS[1]) انجام می‌شود. به طور کلی پس از تعیین اولویت تخصیص فعالیت‌های پروژه، باید نحوهٔ تخصیص منابع و زمان شروع هر فعالیت را تعیین کرد. برای این کار دو روش تولید زمان‌بندی وجود دارد: طرح تولید زمان‌بندی سری و طرح تولید زمان‌بندی موازی[2]. در SGS سری در هر مرحله، یک فعالیت اضافه می‌شود؛ در حالی که در روش SGS موازی در هر مرحله چند واحد به زمان افزوده می‌گردد. به همین دلیل، روش سری، روش افزایش فعالیت[3] و روش موازی، روش افزایش زمان[4] نیز نامیده می‌شوند.

در صورت وجود منابع کافی برای فعالیت با بالاترین اولویت، آن فعالیت در زودترین زمان ممکن، زمان‌بندی می‌شود. این روش شامل n مرحله است و در هر مرحله یک فعالیت از مجموعه فعالیت‌های پروژه انتخاب و در زودترین زمانی که از نظر رعایت محدودیت‌های پیش‌نیازی و منابع موجه باشد، برنامه‌ریزی می‌شود. برای مثال، اگر فرض شود فعالیت‌های ۱ و ۲ از یک منبع استفاده کنند و طبق اعداد تصادفی تخصیص داده شده ابتدا فعالیت ۲ در زمان صفر شروع شود، در SGS سری، برای تخصیص زمان به فعالیت ۱ (که فعالیت ۲ پیش‌نیاز آن نیست)، ابتدا در زمان صفر چک می‌شود که آیا منبع به اندازه کافی وجود دارد یا خیر. اگر وجود داشت، در این صورت، فعالیت ۱ هم در زمان صفر آغاز می‌شود. در غیر این صورت، در زودترین زمانی که منبع برای آن آزاد شود، شروع خواهد شد.

۵-۱- تعیین زنجیره‌های بحرانی پروژه

روش‌های شناسایی زنجیره‌های بحرانی و غیربحرانی، بر اساس قواعد ابتکاری یا اولویت، تعیین و دسته‌بندی می‌شوند [36]. الگوریتم پیشنهادی برای تعیین زنجیرهٔ بحرانی، ابتدا با تعیین زودترین (ES_j) و دیرترین (LS_j) زمان‌های شروع فعالیت‌ها آغاز و سپس میزان شناوری برای هر فعالیت محاسبه می‌شود.



شکل ۱- گام‌های روش پیشنهادی برای کنترل پروژه مبتنی بر مدیریت ذخیره احتیاطی

فعالیت‌هایی که زمان شناوری صفر داشته باشند، روی زنجیرهٔ بحرانی قرار دارند؛ چراکه از نظر محدودیت‌های پیش‌نیازی و منابع، طولانی‌ترین زنجیره از فعالیت‌ها هستند. الگوریتم تعیین زنجیرهٔ بحرانی پروژه (c=1) به شرح زیر است:

فرض کنید متغیر مربوط به زمان با نماد e_t نمایش داده شود. در اینجا منظور از d_j، مدت فعالیت jام است. برای محاسبات مربوط به زنجیرهٔ بحرانی، چند مجموعه تعریف می‌شود. مجموعه C_t برابر با مجموعه فعالیت‌هایی است که طبق برنامه اولیه قرار است در زمان e_t یا بعد از آن شروع شوند.

[1] Schedule Generation Scheme
[2] Parallel Schedule Generation Scheme
[3] Activity-Increment
[4] Time-Increment

www.SID.ir

Archive of SID

$$C_t = \{j \in J | LS_j \geq e_t\} \quad (۱)$$

مجموعه فعالیت‌های فعال (Δ_t) نیز برابر با فعالیت‌هایی است که قبل از زمان e_t شروع شده، هنوز در زمان e_t فعال است.

$$\Delta_t = \{j \in J | LS_j < e_t \leq LS_j + d_j\} \quad (۲)$$

ظرفیت باقی‌مانده از منبع q در زمان t برابر است با $\bar{R}_q(t)$ که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{R}_q(e_t) = A_q - \sum_{j \in \Delta_t} r_{jq} \quad (۳)$$

منظور از A_q سطح منبع در دسترس از نوع qام است. در نتیجه، مجموعه فعالیت‌های در دسترس (E)[1] شامل فعالیت‌هایی هستند که یا هنوز زمان‌بندی نشده یا در زمان e_t غیرفعال هستند، ولی فعالیت‌های پس‌نیاز آن‌ها در زمانی بعد از e_t زمان‌بندی می‌شوند. محدودیت منابع نه‌تنها در زمان e_t، بلکه برای کل دوره زمان‌بندی بررسی می‌شود. در نتیجه می‌توان تمام فعالیت‌های مجموعه E را بدون مشکل غیرموجه شدن، به تأخیر انداخت تا در زمان e_t به اتمام برسند.

$$E_t = \{j \in J \backslash (E_t \cup \Delta_t) \mid (S_j \subseteq C_t) \ and \left(\sum_j r_{jq} \leq \bar{R}_q(e_t), \ q \in Q \ and \ (\bar{R}_q(t) \geq 0 \ \forall t)\right)\} \quad (۴)$$

بعد از بیان مقدمات و نمادگذاری مجموعه‌ها و پارامترهای روش تعیین زنجیرهٔ بحرانی، گام‌های الگوریتم به شرح زیر ارائه می‌شود:

گام پیش‌پردازش: $LS_j = ES_j \ \ \forall j, \ \ \Delta_0 = \{m+1\}, C_0 = \emptyset, \ t = 1$

گام ۱: While $|\Delta_{t-1} \cup C_{t-1}| \leq m+1$

گام ۱,۱ $e_t = max_{j \in \Delta_{t-1}}\{LS_j\}$

Update $C_t, \Delta_t, \bar{R}_q(e_t), E_t$

گام ۱,۲ While $E_t \neq \emptyset$

Select one $i \in E_t$

$LF_j = e_t$

$LS_j = e_t - d_j$

$\Delta_t = \Delta_t \cup \{j\}$

$E_t = E_t \backslash \{j\}$

گام ۱,۳ $t = t + 1$

گام ۲: **For** $j = 1 \ to \ m+1$

If $(LS_j = ES_j)$ then $j \in CC$

برای تولید زمان‌بندی کاندیدا برای تخصیص ذخیره احتیاطی، از رویکرد زمان‌بندی موازی SGS استفاده می‌شود [۳۷]. این رویکرد مبتنی بر یک مکانیزم رو به جلو و بر اساس زمان‌بندی فعالیت‌های در دسترس از زمان t=0 عمل می‌کند. تغییر در زمان‌بندی بر اساس اولویتی است که فعالیت‌های روی زنجیرهٔ بحرانی به خود اختصاص داده‌اند. این فعالیت‌ها در زودترین زمان ممکن اجرا می‌شوند. فعالیت‌هایی که روی زنجیرهٔ بحرانی نیستند، بر اساس برنامه مصوب (از قبل تعیین شده) انجام می‌شوند. برای شرح بیشتر روش تولید برنامه زمان‌بندی از نمادهای C_t و Δ_t استفاده شده است.

$$C_t = \{j \in J | F_j \leq e_t\} \quad (۵)$$

$$\Delta_t = \{j \in J | F_j - d_j \leq e_t < F_j\} \quad (۶)$$

فعالیت‌هایی که روی زنجیرهٔ بحرانی قرار ندارند، اما عضو مجموعه E باشند، می‌توانند مطابق با برنامه اولیه برنامه‌ریزی شوند. لیست فعالیت‌های اولویت‌بندی شده (E_t^+) به‌صورت زیر است:

$$E_t^+ = \{j \in J \backslash (E_t \cup \Delta_t) \mid (P_j \subseteq C_t) \ and \left(\sum_j r_{jq} \leq \bar{R}_q(e_t), \ q \in Q \ \ and \ \ (j \in CC)\right)\} \quad (۷)$$

لیست فعالیت‌های اولویت‌بندی نشده (E_t^-) نیز به شکل مکمل مجموعه E_t^+ به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$E_t^- = \{j \in J \backslash (E_t \cup \Delta_t) \mid (P_j \subseteq C_t) \ and \left(\sum_j r_{jq} \leq \bar{R}_q(e_t), \ q \in Q \ \ and \ \ (j \notin CC)\right)\} \quad (۸)$$

از نماد F_j برای نمایش مجموعه زمان‌های تکمیل فعالیت‌های پروژه استفاده شده است. الگوریتم بر اساس تخصیص اولویت به فعالیت‌های زنجیرهٔ بحرانی عمل می‌کند؛ در نتیجه، در حین فرایند تخصیص منابع، فعالیت‌هایی که محدودیت‌های پیش‌نیازی را رعایت می‌کنند، دارای اولویت هستند.

[1] Eligible

www.SID.ir

Archive of SID

گام‌های مقدماتی: $\Delta_0 = \{0\}, C_0 = \emptyset,\ F_0 = 0,\ g = 1$

گام ۱: While $|\Delta_{t-1} \cup C_{t-1}| \leq m + 1$

گام ۱,۱ $e_t = min_{j \in \Delta_{t-1}}\{F_j\}$

Update $C_t, \Delta_t, \bar{R}_q\ (e_t), E_t^+, E_t^-$

گام ۱,۲ While $E_t^+ \neq \emptyset$

Select one $j \in E_t^+$

$F_j = e_t + d_j$

$\Delta_t = \Delta_t \cup \{j\}$

$E_t^+ = E_t^+ \backslash \{j\}$

Update $\bar{R}_q\ (e_t), E_t^-$

گام ۱,۳ While $E_t^- \neq \emptyset$

Select one $j \in E_t^-$

$F_j = e_t + d_j$

$\Delta_t = \Delta_t \cup \{j\}$

$E_t^- = E_t^- \backslash \{j\}$

گام ۱,۴ $t = t + 1$

توقف الگوریتم و بازگرداندن F_{m+1} به‌عنوان زمان تکمیل پروژه

۵-۲- مدل توسعه‌یافتهٔ کنترل ذخیره‌های زمانی

زنجیره‌های غیربحرانی (c =۱،۲،۳،...،L) مطابق با الگوریتم بالا تعیین و همچنین ذخیره‌های زمانی پروژه و تغذیه تعیین اندازه می‌شوند. در حین اجرای پروژه، مدیران، پیگیری لازم را در خصوص میزان مصرف ذخیره‌های زمانی و نیز تکمیل فعالیت‌های پروژه انجام می‌دهند. در مقایسهٔ اجرای واقعی پروژه با مقادیر برنامه پایه در زمان t از طریق سیستم هشداردهنده، به‌راحتی میزان انحراف از مصرف ذخیره احتیاطی و درصد تکمیل فعالیت‌های پروژه محاسبه می‌شود که رابطه آن در فرمول زیر ارائه شده است:

$$bc_{ic} = (\hat{x}_{ic} + \hat{a}_{ic}) - (\hat{s}_{ic} + \hat{d}_{ic}) \qquad (۹)$$

از مقایسه بالا می‌توان تعیین کرد که پروژه چگونه در حال پیشرفت است یا چه درجه‌ای از انحراف از برنامه اولیه وجود دارد. به‌منظور بهبود عملکرد، مقادیر آستانه ذخیره احتیاطی که به دنبال آن اقدامات کنترلی و اصلاحی پروژه انجام می‌شود، تابعی از زمان اجرای پروژه و درصد اتمام زنجیره‌های بحرانی پروژه است و در طول زمان تغییر می‌کند.

$$PBC_i\% = \frac{bc_{ic}}{b_c}\% \qquad i \in A_c \qquad (۱۰)$$

نسبت ذخیره احتیاطی صرف‌شده برای زنجیره cام به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PBC_c\% = \sum_{i \in A_c} \beta_i * PBC_i \qquad c = 1,2,\dots,L \qquad (۱۱)$$

جدول ۲- نمادگذاری مدل کنترل پروژه

نمادگذاری	شرح
N	مجموعه فعالیت‌های اصلی پروژه
L	تعداد زنجیره‌های (بحرانی و غیربحرانی) پروژه
A_c	مجموعه فعالیت‌های متعلق به زنجیره cام
l_c	تعداد فعالیت‌های عضو در زنجیره cام
b_c	ذخیره احتیاطی زنجیره cام
$\hat{d}_{ic}$	مدت زمان از قبل برنامه‌ریزی شده فعالیت iام در زنجیره cام
$\hat{a}_{ic}$	مدت زمان واقعی فعالیت iام در زنجیره cام
$\hat{x}_{ic}$	زمان شروع برنامه‌ریزی شده فعالیت iام در زنجیره cام
$\hat{s}_{ic}$	زمان شروع واقعی فعالیت iام در زنجیره cام
$Slack_c^*$	زمان شناوری آخرین فعالیت روی زنجیره cام
PD_c	زمان برنامه‌ریزی شده زنجیره cام
RD_c	زمان واقعی زنجیره cام
$\overline{RD_c}$	متوسط زمان واقعی زنجیره cام
$\overline{BP_c}$	متوسط ذخیره احتیاطی مصرفی در زنجیره cام

جدول ۳- نمادگذاری مدل ریاضی تسریع پروژه

نمادگذاری	شرح
E	مجموعه تمام فعالیت‌های متعلق به زنجیره cام که واجد شرایط برای انجام اقدامات تسریع هستند.
CE_i	هزینه تسریع برای فعالیت jام در واحد زمان (با استفاده از یک تابع خطی هزینه-زمان)
ET_i	زمان تسریع موجه برای فعالیت jام
n	تعداد اجراهای مدل شبیه‌سازی
d_{ir}	مدت زمان تخمینی (با توجه به توزیع احتمال زمان اجرای فعالیت) برای فعالیت jام در تکرار r
β_i	ضریب وزنی فعالیت iام
d^*	موعد تکمیل پروژه
δ_r^+	انحراف مثبت از موعد تکمیل پروژه در تکرار r
δ_r^-	انحراف منفی از موعد تکمیل پروژه در تکرار r
U_r	متغیر رخداد تأخیر در تکرار rام شبیه‌سازی
α	قابلیت اطمینان زمان‌بندی
v_i	حداکثر تعداد منابع که برای تسریع فعالیت iام استفاده می‌شود.

نسبت ذخیره احتیاطی صرف‌شده برای زنجیره cام به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PBC_c\% = \sum_{i \in A_c} \beta_i * PBC_i \qquad c = 1,2,\dots,L \qquad (۱۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

نسبت تکمیل‌شده (درصد پیشرفت) فعالیت iام روی زنجیره c نیز به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$PCC_i\% = \frac{\sum_{i=1}^{j} \hat{d}_{ic}}{\sum_{i=1}^{l_c} \hat{d}_{ic}} \quad (۱۲)$$

درصد تکمیل‌شده زنجیره cام به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PCC_c\% = \sum_{i \in A_c} PCC_i \quad c = 1,2,\dots,L \quad (۱۳)$$

فرمول‌بندی ریاضی برای انتقال از ناحیه سبز به زرد (آستانه ذخیره احتیاطی ۱) و گذار از منطقه زرد به قرمز (آستانه ۲ ذخیره احتیاطی) به شرح زیر است:

$$PBC_i > A_{i1} * PCC_i + B_{i1} \quad (۱۴)$$

$$PBC_i > A_{i2} * PCC_i + B_{i2} \quad (۱۵)$$

در معادلات بالا مقادیر A_{i1} (و A_{i2}) نشان‌دهندهٔ شیب‌خط هشدار مصرف ذخیره احتیاطی است و مقادیر A_{i1} (و A_{i2}) محل تقاطع نقاط نظارت هستند. اگر مقدار مصرف ذخیره احتیاطی زنجیره‌ها منفی یا در منطقه سبز است، نیاز به اقدام اصلاحی وجود ندارد. اگر تغییرات زمانی فعالیت، منجر به مصرف مقدار آستانه ۱ ذخیره احتیاطی می‌شود، باید اقداماتی برای سرعت بخشیدن به اجرای وظایف باقی‌مانده روی زنجیره‌های بحرانی و غیربحرانی و نیز برنامه‌ریزی مجدّد انجام شود. اگر تأخیرات، باعث نفوذ میزان مصرف ذخیره احتیاطی فراتر از مقدار آستانه ۲ شود، گروه مدیریت پروژه باید اقدام به تعیین مجدد اندازه ذخیره‌های زمانی پروژه و تغذیه برای زنجیره‌های بحرانی و غیربحرانی کند. اگر ذخیره احتیاطی زنجیرهٔ بحرانی پروژه مصرف شود، فعالیت‌های بعدی در زنجیرهٔ بحرانی واجد شرایط برای تسریع می‌شوند و مدل بهینه‌سازی حل خواهد شد و از خروجی‌های مربوط استفاده می‌شود. همچنین برای ترکیب روش کنترل مصرف ذخیره احتیاطی با شاخص‌های EVM فرض کنید در هر زمان مقادیر شاخص‌های مدیریت ارزش کسب‌شده در ۰ تعریف شده‌اند.

هدف، تعیین بهترین گزینه جهت تسریع فعالیت‌ها است. مدل ریاضی توسعه‌یافته در روابط (۱۶) الی (۲۳) آمده است. در مدل زیرمجموعه زنجیره‌های بحرانی و غیربحرانی در نظر گرفته، ارائه شده است.

$$\text{Minimize} \quad z = \sum_i w_i * EC_i * ET_i \quad (۱۶)$$

$$\text{s.t.} \quad (۱۷)$$

جدول ۴- معیارهای عملکردی رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده برای زنجیره‌های بحرانی و غیربحرانی

نمادگذاری	شرح
BAC_c	بودجه در زمان تکمیل برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c
PV_t^c	ارزش برنامه‌ریزی شده برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c در زمان t
EV_t^c	ارزش کسب‌شده برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c در زمان t
ES_t^c	ارزش زمان‌بندی حاصل برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c در زمان t
$SV_t^c = EV_t^c - PV_t^c$	شاخص واریانس برنامه‌ای برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c در زمان t
$SPI_t^c = EV_t^c / PV_t^c$	شاخص عملکرد برنامه‌ای برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c در زمان t
$SV(t)_t^c = ES_t^c - t$	شاخص واریانس برنامه با استفاده از رویکرد ارزش زمان‌بندی حاصل (ES) برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c در زمان t
$SPI(t)_t^c = ES_t^c / t$	شاخص عملکرد برنامه با استفاده از رویکرد ارزش زمان‌بندی حاصل (ES) برای مجموعه فعالیت‌های عضو زنجیره c در زمان t

$$t + \hat{a}_{ic} - \hat{d}_{ic} + \sum_k \hat{d}_{kq} - \left(ET_j + \sum_k ET_k\right) - \delta_r^+ + \delta_r^- = d^* \quad \forall r \quad (۱۸)$$

$$M * U_r \geq \delta_r^+ \quad r = 1,2,\dots,n \quad (۱۹)$$

$$1 - \frac{1}{n}\sum_{r=1}^{n} U_r \geq \alpha \quad (۲۰)$$

$$ET_i \leq v_i, \quad i = 1,2,\dots,N \quad (۲۱)$$

$$v_i = \hat{a}_{ic} - \gamma * \hat{d}_{ic} \quad i = 1,2,\dots,N, \quad c = 1,2,\dots,L \quad (۲۲)$$

$$\sum_i EC_i * ET_i \leq EB \quad (۲۳)$$

تابع هدف مدل فوق برای تعیین بهترین شرایط تسریع مجموعه‌ای از فعالیت‌ها (فعالیت‌های فعلی و آینده) که برآورده کننده مقادیر مورد نیاز از قابلیت اطمینان برنامه زمان‌بندی باشد، تعریف شده است. محدودیت ۱۸، ارتباط بین زمان تسریع فعالیت و موعد تکمیل پروژه را نشان می‌دهد. زمان‌های اجرای فعالیت‌ها می‌تواند به‌عنوان اقدام اصلاحی با توجه به ترکیبات ممکن از گزینه‌های تسریع زمانی فعالیت‌ها برای پاسخ‌گویی به تغییرات و عدم تأخیر از موعد تکمیل پروژه کاهش یابد. محدودیت ۱۹، عملکرد مربوط به عدم تخطی از موعد تکمیل پروژه را به‌عنوان یک

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه ۰-۱ برای همه تکرار تعریف می‌کند. محدودیت ۲۰ به احتمال مطلوب برای تکمیل به‌موقع پروژه اشاره دارد. محدودیت ۲۱ یک کران بالا برای زمان لازم جهت تسریع برای هر فعالیت برقرار می‌سازد. محدودیت ۲۲ مربوط به درصد پایه برای زمان فعالیت‌ها جهت تسریع است. محدودیت ۲۳ حداکثر بودجه را برای تسریع فعالیت‌ها و به‌کارگیری منابع اضافی بیان می‌کند.

۶- نتایج و یافته‌های تحقیق

در این بخش، مدل پیشنهادی کنترل استوار پروژه مبتنی بر مدیریت ذخیره‌های زمانی در این تحقیق با مدل کنترل ذخیره احتیاطی مبتنی بر تحلیل ریسک فعالیت‌ها در مقاله [۲۹] مقایسه می‌شود. این روش با عنوان روش CRI-BMA[1] نام‌گذاری شده است. در تحقیق مذکور رویکردی مبتنی بر ترکیب شاخص‌های حساسیت و تغییرپذیری فعالیت‌ها با متدولوژی مدیریت ذخیره احتیاطی برای مدیریت ریسک پروژه ارائه گردیده است. گام‌های اجرایی روش CRI-BMA به شرح زیر است:

مرحله ۱ (تولید برنامه زمان‌بندی اولیه): در مرحله اول، هدف، تولید یک برنامه اولیه با توجه به هر دو محدودیت پیش‌نیازی و محدودیت منابع، با استفاده از یک الگوریتم تولید برنامه زمان‌بندی است. سپس باید زنجیرهٔ بحرانی و غیربحرانی شناسایی شده، اندازه ذخیره احتیاطی پروژه با استفاده از روش ریشه مربعات خطا (RSEM) محاسبه شود.

مرحله ۲: شروع زمان‌بندی و نظارت بر عملکرد پروژه در زمان $t = 0$.

مرحله ۳: تمدید دوره بررسی و نظرات بر پروژه، $t=t+1$. همچنین بررسی می‌شود که فعالیت‌ها نباید زودتر از موعد برنامه‌ریزی شده آغاز شوند.

مرحله ۴: اول، تعیین می‌شود که آیا زمان اجرای فعلی یک نقطه نظارت است یا خیر. شرایط یک نقطه نظارتی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- یک فعالیت تکمیل شده است؛
- فعالیت جدیدی به پروژه اضافه شده است.

مدیریت می‌تواند از یک سیاست نظارت مستمر با محاسبه نقطه هشدار مصرف ذخیره احتیاطی به‌صورت پویا بر اساس زمان واقعی یا در زمان‌های مناسب استفاده کند. سپس مصرف ذخیره احتیاطی بررسی و شاخص نسبی مصرف ذخیره احتیاطی RBCI به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$RBCI = \frac{PBC}{PCC} \qquad (۲۴)$$

روش‌های مختلفی برای تنظیم آستانه CRI و شروع اقدامات اصلاحی وجود دارد.

۱. اگر RBCI کوچک‌تر از ۱ باشد، به مرحله ۵ می‌رویم و نیازی به اقدام اصلاحی نیست.
۲. اگر RBCI بزرگ‌تر از ۱ است، به این معنی است که به احتمال زیاد این پروژه به تأخیر خواهد افتاد و مدیریت باید اقدامات اصلاحی را جلوتر از برنامه انجام دهد. در نتیجه، در ادامه به مرحله ۶ می‌رویم.

مرحله ۵: هیچ اقدام مدیریتی مورد نیاز نیست.

مرحله ۶ (کنترل روند مصرف ذخیره احتیاطی): این نشان می‌دهد که ممکن است با پیشرفت اجرای پروژه تأخیراتی در پروژه به وجود آید. در اینجا لازم است میزان حساسیت فعالیت‌های پروژه بر اساس شاخص CRI اندازه‌گیری و از آن به‌عنوان یک راهنما برای کنترل روند مصرف ذخیره احتیاطی استفاده شود.

مرحله ۷ (محاسبه شاخص CRI): برآوردگر CRI مبتنی بر شبیه‌سازی برای هر فعالیت که هنوز به اتمام نرسیده است، به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\widehat{CRI}_i = \frac{\sum_{k=1}^{m}\left(a_i^k - \bar{a}_i\right)*\left(c_{max}^k - \bar{c}_{max}\right)}{(m-1)*S_{d_i}*S_{c_{max}}} \qquad (۲۵)$$

S_{di} و S_{Cmax} به‌ترتیب معرف انحراف استاندارد نمونه از متغیرهای d_i و C_{max} هستند. m تعداد تکرارهایی را نشان می‌دهد که شبیه‌سازی مونت‌کارلو اجرا می‌شود. اندیس k نیز به تکرار kام شبیه‌سازی مونت‌کارلو اشاره دارد که در آن، متغیرهای d_i و C_{max} محاسبه می‌شوند. برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی از روش SGS استفاده شده، اولویت فعالیت‌ها بر اساس زودترین زمان شروع در نظر گرفته می‌شود. سپس مقادیر CRI محاسبه‌شده برای فعالیت‌های در حال انجام، با مقادیر آستانه CRI مقایسه می‌شوند. با توجه به حساسیت فعالیت‌ها اگر در منطقه هشدار قرار داشته باشیم، به مرحله ۸ رفته، در غیر این صورت به مرحله ۳ می‌رویم.

[1] Activity crucially index CRI based buffer monitoring approach

www.SID.ir

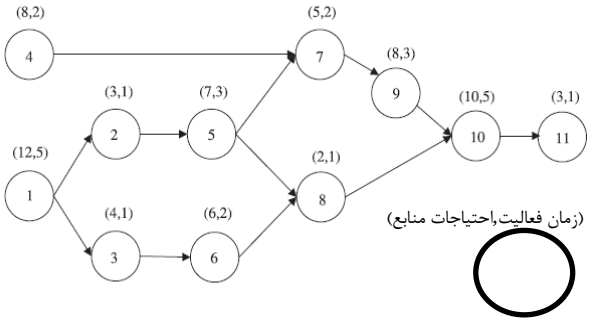
Archive of SID

مرحله ۸ (اقدام اصلاحی برای تسریع فعالیت‌های پروژه): در صورت نیاز به اقدام اصلاحی، مدت زمان برخی از فعالیت‌های پروژه جهت تسریع انتخاب می‌شوند.

برای مقایسه رویکرد پیشنهادی با روش، از یک مثال عددی استفاده می‌شود. اطلاعات این مثال عددی در ادامه آمده است. این شبکه پروژه ساده متشکل از ۱۱ فعالیت بوده، تنها از یک نوع از منابع با در دسترس بودن مقدار ثابت ۷ واحد مورد نیاز است. شبکه پروژه در شکل (۲) نمایش داده شده است. عدد اول بالای هر گروه نشان‌دهنده متوسط مدت زمان هر فعالیت (برآورد ۵۰ درصد) است که معمولاً فرض می‌شود این تخمین نیمی از برآورد ایمن[1] (۹۰ درصد) است. عدد دوم نشان‌دهنده میزان احتیاجات مورد نیاز هر فعالیت برای یک منبع تجدیدپذیر در هر دوره زمانی است. قبل از اجرای واقعی پروژه، مقدار شاخص CRI برای هر فعالیت در جدول ۵ آمده است که با توجه به معادله ۲۵ محاسبه می‌شود. اگر m تعداد دفعات شبیه‌سازی، $\overline{X}$ میانگین نمونه و s انحراف استاندارد نمونه باشد و مقدار بحرانی تابع توزیع t نیز به‌ازای α-1٪ اطمینان برابر با $t_{m-1,1-\alpha/2}$ باشد. در این صورت فاصله اطمینان برابر است با $\bar{X} + t_{m-1,1-\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{m}}$. اگر نصف فاصله اطمینان مطلوب با h نمایش داده شود، تعداد تکرارهای مناسب شبیه‌سازی m از رابطه $m = t^2_{m-1,1-\alpha/2} \frac{s^2}{h^2}$ به دست می‌آید. یکی از راه‌های تقریبی محاسبه اندازه نمونه استفاده از تابع توزیع احتمال نرمال به جای تابع t است. برای این منظور مقدار s را از طریق یک نمونه اولیه مانند m_0 محاسبه و سپس از رابطه $m \cong z^2_{1-\alpha/2} \frac{s^2}{h^2}$ برای محاسبه تعداد تکرار شبیه‌سازی (m) استفاده می‌شود. با توجه به مقادیر m_0=۱۰۰، α =۰,۰۱ و h=۰,۲ تعداد تکرارهای شبیه‌سازی به طور تقریبی برابر با m = ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- مقدار شاخص درجه حساسیت فعالیت‌هاCRI

فعالیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
CRI	۰,۵۰۱	۰,۱۱۸	۰,۰۱۱	۰,۱۸۱	۰,۳۴	۰,۰۷۵	۰,۲۰۷	-۰,۰۷۵	۰,۴۸۳	۰,۴۹۷	۰,۱۵۵



شکل ۲- شبکه فعالیت‌ها در مثال مورد بررسی

در تکرارهای مختلف شبیه‌سازی، میزان مصرف ذخیره احتیاطی در زمان تکمیل یک فعالیت بررسی می‌شود. این بررسی از طریق مقایسه زمان اجرای واقعی با زمان اجرای برنامه‌ریزی شده انجام می‌گیرد. اگر ذخیره احتیاطی پروژه حداکثر به اندازه تعیین‌شده (به عنوان مثال آستانه ذخیره احتیاطی) مصرف شود، فعالیت‌های روی زنجیرهٔ بحرانی واجد شرایط برای اقدامات تسریع می‌شوند. اگر میزان مصرف ذخیره احتیاطی تغذیه بین ۶۶ درصد و ۱۰۰ درصد اندازه ذخیره احتیاطی تغذیه باشد، فعالیت‌های واجد شرایط برای اقدامات تسریع روی همان زنجیره غیربحرانی قرار داشته، این فعالیت‌ها هنوز به پایان نرسیده‌اند. علاوه بر این، هر زمان که یک ذخیره احتیاطی تغذیه به طور کامل مصرف شود، فعالیت بحرانی پس از آن واجد شرایط برای اقدامات تسریع است. در مدل CRI-BMA شروع اقدامات اصلاحی با در نظر گرفتن آستانه ذخیره احتیاطی و نیز اطلاعات شاخص CRI انجام می‌شود. فرض شده است که کاهش مدت زمان فعالیت‌ها با درجه حساسیت فعالیت‌ها CRI در ارتباط است. به عبارتی فعالیت‌های با ریسک بالا احتمالاً بیشتر از سایر فعالیت‌ها با تأخیر مواجه می‌شوند. به منظور مقایسه روش‌های موجود باید شاخص‌های عملکردی به‌صورت زیر تعریف شود:

۱. **درصد فعالیت‌هایی که به اقدامات اصلاحی جهت تسریع نیاز دارند، CA%[2]:** این شاخص تعداد دفعاتی را نشان می‌دهد که لازم است اقدامات اصلاحی در طول پروژه اجرا شود. هرچه مقدار CA بزرگ‌تر باشد، به این معنی است که فعالیت‌های بیشتری در معرض اقدامات اصلاحی هستند که این موضوع باعث افزایش پیچیدگی‌های مدیریت پروژه و همچنین احتمال تغییرات برنامه در آینده خواهد شد.

[1] Safe estimate

[2] Number of crashing activities

www.SID.ir

Archive of SID

۲. **کل زمان تسریع‌شده فعالیت‌ها CT**[1]: این شاخص برای تمام فعالیت‌های یک پروژه محاسبه می‌شود. به طور معمول، افزایش این زمان به معنی بالاتر رفتن هزینه‌های کل تسریع فعالیت‌های پروژه است.

۳. **احتمال اتمام به‌موقع پروژه در مهلت پیش‌بینی‌شده TPCP**.

۴. **مدت زمان پروژه واقعی RPD**[2]: این شاخص به زمان اتمام شبیه‌سازی‌شده پروژه با بدون در نظر گرفتن مقادیر آستانه برای اقدامات اصلاحی، اشاره دارد.

مقدار آستانه برای کنترل پروژه به‌صورت یک تابع خطی از مصرف ذخیره احتیاطی تعریف شده است:

$$\alpha = \tilde{\alpha} - b * PCC \quad b > 0, \quad PCC \in [0,1] \qquad (۲۶)$$

در رابطه بالا منظور از $\tilde{\alpha}$ سطح اولیه هشدار برای میزان مصرف ذخیره احتیاطی، مقدار b برابر با شیب خط کنترلی و PCC درصد تکمیل زنجیره است. با افزایش پیشرفت پروژه، از مقدار آستانه کنترلی به‌صورت خطی کاسته می‌شود. اثر آستانه اقدام اصلاحی (α) بر اساس شاخص CRI بر عملکرد رویکردهای پیشنهادی و روش CRI-BMA تحت سه سطح مختلف از عدم قطعیت در مدت زمان فعالیت‌ها در ۰و ۰ آمده است. نمادهای H، M و L به‌ترتیب بیانگر مقادیر بالا، متوسط و پایین برای عدم قطعیت در مدت زمان فعالیت‌ها هستند.

برای اندازه‌گیری سطح عدم قطعیت از ضریب تغییرات (cv[3]) استفاده شده است. این ضریب برای هر فعالیت از پروژه مانند j به‌صورت نسبت به انحراف استاندارد مدت اجرا به میانگین زمان اجرای فعالیت ($\frac{\sigma_j}{\mu_j}$) تعریف می‌شود. ضریب تغییرات از این دید مفید است که انحراف استاندارد داده‌ها باید همیشه در کنار میانگین داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. به عبارت دیگر، ضریب تغییرات، میزان پراکندگی را به‌ازای یک واحد از میانگین بیان می‌کند. این مقدار هنگامی تعریف می‌شود که میانگین صفر نباشد. در مسئله مورد بررسی، مقادیر cv=۰,۴، cv=۰,۸ و cv=۱,۲ به‌ترتیب بیانگر حالات عدم قطعیت پایین (L)، عدم قطعیت متوسط (M) و عدم قطعیت بالا (H) هستند.

مقایسه شاخص احتمال اتمام به‌موقع پروژه در مهلت پیش‌بینی شده برای رویکرد پیشنهادی و روش CRI-BMA در شرایط عدم قطعیت بالا در جدول ۶ آورده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، در شرایطی که عدم قطعیت در مدت زمان اجرای فعالیت‌ها بالا باشد (cv=1.2)، قابلیت اطمینان رویکرد کنترل ذخیره احتیاطی پیشنهادی در سناریوهای مختلف مربوط به تنظیم خط هشدار کنترلی، نسبت به رویکرد CRI-BMA بالاتر است. این نتایج برتری روش پیشنهادی را در مقایسه با روش CRI-BMA نشان می‌دهد.

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های عملکردی برای رویکرد پیشنهادی و روش CRI-BMA (بخش اول)

A	روش CRI-BMA						رویکرد پیشنهادی					
	CA%			CT			CA%			CT		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
۰	۰,۷۸۰	۱,۱۲۰	۰,۹۴۷	۱,۲۷۶	۱,۹۸۸	۱,۷۴۳	۰,۴۵۷	۱,۰۶۷	۰,۶۲۵	۱,۰۲۲	۲,۱۱۲	۱,۹۱۸
۰,۰۵	۰,۷۸۱	۱,۱۱۷	۰,۹۴۰	۱,۳۱۳	۲,۰۱۳	۱,۷۳۸	۰,۵۵۶	۰,۷۹۱	۰,۸۱۴	۰,۹۹۳	۱,۶۵۳	۱,۶۱۶
۰,۱	۰,۶۹۸	۰,۹۷۸	۰,۸۴۴	۱,۲۵۸	۱,۸۸۱	۱,۵۶۹	۰,۵۵۲	۰,۷۱۴	۰,۷۷۳	۰,۹۸۹	۱,۹۱۶	۱,۵۳۶
۰,۱۵	۰,۶۴۴	۰,۹۰۵	۰,۷۸۷	۱,۲۰۲	۱,۸۴۹	۱,۶۱۲	۰,۳۸۷	۰,۸۲۶	۰,۷۴۶	۱,۰۴۳	۱,۷۹۱	۱,۸۸۳
۰,۲	۰,۵۹۵	۰,۸۳۵	۰,۷۱۹	۱,۱۸۹	۱,۷۸۳	۱,۵۴۱	۰,۲۸۶	۰,۶۴۷	۰,۶۱۰	۱,۰۳۳	۱,۷۳۵	۱,۱۹۳
۰,۲۵	۰,۴۷۸	۰,۶۶۹	۰,۵۶۲	۱,۰۸۲	۱,۵۸۴	۱,۳۸۲	۰,۳۷۶	۰,۳۷۰	۰,۲۴۱	۰,۹۹۷	۱,۴۲۲	۱,۲۵۱
۰,۳	۰,۴۸۴	۰,۶۷۶	۰,۵۶۲	۱,۰۵	۱,۶۱۴	۱,۳۸۲	۰,۱۹۳	۰,۵۰۳	۰,۴۴۹	۰,۹۳۲	۱,۷۱۹	۱,۳۱۳
۰,۳۵	۰,۳۰۳	۰,۴۷	۰,۴۱۸	۰,۸	۱,۲۷۴	۱,۱۵۹	۰,۰۶۵	۰,۳۶۲	۰,۲۲۹	۰,۷۷۱	۱,۲۴۹	۱,۰۲۱
۰,۴	۰,۳۰۶	۰,۴۷	۰,۴۱۴	۰,۸۱	۱,۳۰۸	۱,۱۳۹	۰,۰۰۹	۰,۱۱۶	۰,۲۸۸	۰,۵۲۰	۱,۰۹۸	۱,۲۶۱
۰,۴۵	۰,۳۰۶	۰,۴۶۹	۰,۴۲۱	۰,۸۴۵	۱,۲۸	۱,۱۴۵	۰,۰۲۲	۰,۱۶۰	۰,۳۵۵	۰,۸۷۹	۱,۴۶۶	۱,۰۶۷
۰,۵	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰

به عنوان نمونه، تحلیل مربوط به شاخص قابلیت اطمینان برنامه زمان‌بندی (احتمال تکمیل به‌موقع پروژه) در شرایط

[1] Crashing time
[2] Real project duration
[3] Coefficient of variation

www.SID.ir

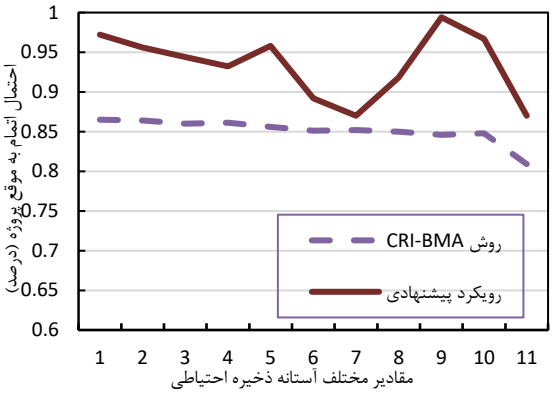
Archive of SID

عدم قطعیت بالا برای مدت زمان اجرای فعالیت‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۷ مشاهده می‌شود که مستقل از اینکه مقدار آستانه هشدار مصرف ذخیره احتیاطی چه میزان است، همواره رویکرد پیشنهادی دارای احتمال موفقیت بیشتری در زمینه برآورده کردن مهلت تکمیل پروژه است. در نتیجه، عملاً خطاهای نوع ۱ و ۲ مدل کنترل ذخیره احتیاطی پیشنهادی در مقایسه با رویکرد CRI-BMA کمتر است.

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های عملکردی برای رویکرد پیشنهادی و روش CRI-BMA (بخش دوم)

A	روش CRI-BMA						رویکرد پیشنهادی					
	TPCP			RPD			TPCP			RPD		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
۰	۰,۹۵۸	۰,۸۷۴	۰,۸۶۵	۵۱,۱۱۲	۵۰,۹۱۹	۴۹,۵۴۰	۰,۹۷۱	۰,۹۰۲	۰,۹۷۲	۴۹,۱۱۰	۴۵,۱۲۸	۴۸,۴۴۳
۰.۰۵	۰,۹۵۶	۰,۸۷۶	۰,۸۶۴	۵۱,۰۸۲	۵۰,۹۰۹	۴۹,۵۵۹	۰,۹۸۱	۰,۹۴۴	۰,۹۵۶	۵۰,۰۹۳	۴۵,۷۳۴	۴۷,۰۶۲
۰.۱	۰,۹۵۵	۰,۸۷۴	۰,۸۶۰	۵۱,۰۷۳	۵۰,۹۶۴	۴۶,۶۶۴	۰,۹۸۱	۰,۸۸۵	۰,۹۴۴	۴۸,۳۲۸	۴۶,۵۱۲	۴۸,۱۲۱
۰.۱۵	۰,۹۵۷	۰,۸۶۹	۰,۸۶۱	۵۱,۱۱۴	۵۰,۹۶۶	۴۹,۶۳۰	۱,۰۰۰	۰,۹۰۶	۰,۹۳۲	۴۷,۶۸۵	۴۷,۸۴۴	۴۶,۸۲۸
۰.۲	۰,۹۴۸	۰,۸۶۸	۰,۸۵۶	۵۱,۱۲۹	۵۱,۰۳۸	۴۹,۷۰۰	۱,۰۰۰	۰,۹۵۶	۰,۹۵۸	۴۹,۳۷۶	۴۸,۱۶۰	۴۹,۵۳۰
۰.۲۵	۰,۹۴۴	۰,۸۶۳	۰,۸۵۱	۵۱,۲۴۲	۵۱,۲۱۶	۴۹,۸۴۵	۰,۹۸۹	۰,۸۸۵	۰,۸۹۲	۵۰,۵۲۱	۴۹,۳۶۹	۴۹,۴۲۵
۰.۳	۰,۹۴۳	۰,۸۶۴	۰,۸۵۲	۵۱,۲۶۹	۵۱,۱۸۳	۴۹,۸۴۶	۱,۰۰۰	۰,۸۶۹	۰,۸۷۰	۴۸,۷۵۸	۴۷,۷۶۷	۴۷,۸۸۰
۰.۳۵	۰,۹۴۳	۰,۸۵۸	۰,۸۵۰	۵۱,۴۹۲	۵۱,۴۶۲	۵۰,۰۲۱	۱,۰۰۰	۰,۸۶۰	۰,۹۱۸	۴۸,۲۴۴	۴۸,۱۱۰	۴۹,۸۵۴
۰.۴	۰,۹۳۶	۰,۸۵۷	۰,۸۴۶	۵۱,۴۸۶	۵۱,۴۴۹	۵۰,۰۴۷	۰,۹۶۰	۰,۸۷۴	۰,۹۹۴	۴۷,۰۳۵	۴۶,۷۸۲	۴۷,۷۱۰
۰.۴۵	۰,۹۴۱	۰,۸۵۶	۰,۸۴۸	۵۱,۴۴۶	۵۱,۴۷۶	۵۰,۰۳۵	۰,۹۹۰	۰,۹۳۳	۰,۹۶۷	۴۸,۴۷۱	۵۱,۱۲۶	۴۸,۶۵۸
۰.۵	۰,۹۱۰	۰,۸۱۲	۰,۸۰۹	۵۲,۲۸۹	۵۲,۶۸۸	۵۱,۱۲۷	۰,۹۵۷	۰,۸۲۱	۰,۸۷۰	۴۷,۹۷۰	۵۰,۵۳۷	۴۹,۷۴۷

همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق از نظر مقدار متوسط شاخص‌های عملکردی، نسبت به روش CRI-BMA برتری دارد.



شکل ۳- احتمال اتمام به‌موقع پروژه در رویکرد کنترل ذخیره احتیاطی پیشنهادی و روش CRI-BMA

جدول ۸- خلاصه نتایج مقایسه شاخص‌های عملکردی برای رویکرد پیشنهادی و روش CRI-BMA

شاخص	روش پیشنهادی	روش CRI-BMA	متوسط میزان بهبود
درصد فعالیت‌هایی که به اقدامات اصلاحی برای تسریع نیاز دارند	۰,۴۱۲	۰,۵۹۷	۳۶,۸٪
کل زمان تسریع‌شده فعالیت‌ها	۱,۱۹۴	۱,۲۶۷	۶,۵۶٪
احتمال اتمام به‌موقع پروژه در مهلت پیش‌بینی شده	۰,۹۳۷	۰,۸۸۶	۶,۰۶٪
مدت زمان پروژه واقعی (روز)	۴۸,۳۶	۵۰,۸۵	۴,۸۶٪

متوسط میزان بهبود در شاخص‌های CA%، CT، TPCP و PD در مدل پیشنهادی در مقایسه با روش CRI-BMA به‌ترتیب برابر با ۳۶,۸٪، ۶,۵۶٪، ۶,۰۶٪ و ۴,۸۶٪ به دست آمده است. بیشترین مقدار بهبود برای شاخص درصد فعالیت‌هایی است که بعد از رخداد اختلال به اقدامات اصلاحی جهت تسریع نیاز دارند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با پیاده‌سازی رویکرد کنترل پروژه، مدت زمان واقعی اجرای پروژه به طور متوسط حدود ۵٪ کاهش داشته است.

مدل پیشنهادی کنترل پروژه، به‌صورت دوره‌ای روند پیشرفت برنامه‌ای و عملکردی پروژه را پایش کرده، در صورت بروز سیگنال‌های هشداردهنده، اقدامات کنترلی را

www.SID.ir

Archive of SID

توصیه می‌کند. این اقدامات کنترل در قالب مدل موازنه هزینه-زمان، برنامه زمان‌بندی جدیدی به مدیر پروژه پیشنهاد می‌کند که بر روی مجموعه فعالیت‌های باقی‌ماندهٔ پروژه اجرا می‌شود. الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق از نظر شاخص‌های عملکردی مختلف، نسبت به یک روش کنترل پروژه مبتنی بر ریسک، مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، متوسط میزان بهبود در شاخص‌های درصد فعالیت‌های انتخاب‌شده برای اقدامات اصلاحی، کل زمان تسریع فعالیت‌ها، احتمال اتمام به‌موقع پروژه درمهلت پیش‌بینی شده و مدت زمان پروژه واقعی به‌ترتیب برابر با ۳۶,۸٪، ۶,۵۶٪، ۶,۰۶٪ و ۴,۸۶٪ به دست آمده است. نتایج حاصل از مدل‌های تعیین اندازه ذخیره احتیاطی و نیز کنترل پروژه، بر روی نمونه مسائل واقعی و کاربردی در تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که بسیاری از کاستی‌ها و نواقص مدل‌های قبلی رفع شده، کارایی رویکرد مدیریت اختلال به‌صورت قابل ملاحظه‌ای از نظر شاخص‌ها و اهداف عملکردی پروژه بهبود یافته است.

در مدل کنترل پروژه، از شاخص عملکرد برنامه‌ای SPI(t) در تکرارهای مختلف شبیه‌سازی به‌منظور بررسی شناسایی زودهنگام روندهای انحرافی در پروژه استفاده شد. اعتبار الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق از نظر شاخص‌های عملکردی مختلف نسبت به یک روش کنترل پروژه مبتنی بر تحلیل ریسک فعالیت‌ها (CRI-BMA) مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، متوسط میزان بهبود در شاخص‌های درصد اقدامات اصلاحی، کل زمان تسریع فعالیت‌ها، احتمال اتمام به‌موقع پروژه و همچنین مدت زمان پروژه، به‌ترتیب حدوداً برابر با ۳۷٪، ۷٪، ۶٪ و ۵٪ حاصل شده است.

برای اندازه‌گیری سطح عدم قطعیت فعالیت‌های پروژه، از مفهوم آماری ضریب تغییرات استفاده شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، با فرض تغییرپذیری بالا در مدت زمان اجرای فعالیت‌ها، قابلیت اطمینان رویکرد کنترل ذخیره احتیاطی پیشنهادی در سناریوهای مختلف، نسبت به رویکرد CRI-BMA بالاتر است. این نتایج به وضوح برتری روش پیشنهادی را در مقایسه با روش CRI-BMA نشان می‌دهد. بر اساس یافته‌های تحقیق، مستقل از مقدار آستانه هشدار مصرف ذخیره احتیاطی، همواره رویکرد پیشنهادی دارای احتمال موفقیت بیشتری در زمینه برآورده کردن مهلت تکمیل پروژه است. در نتیجه، عملاً خطاهای نوع ۱ و ۲ مدل کنترل ذخیره احتیاطی پیشنهادی در مقایسه با رویکرد CRI-BMA کمتر است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد مدل پیشنهادی توانسته است با خطای کمتر، تأخیرات را در زمان مناسب شناسایی کرده، راهکارهایی بهینه بر مبنای حل مسئله موازنه هزینه-زمان ارائه کند.

در مجموع می‌توان گفت بر اساس نتایج حاصل از مدل‌های زمان‌بندی استوار، مدل تعیین اندازه ذخیره احتیاطی و نیز رویکرد کنترل پروژه بر روی نمونه مسائل واقعی و کاربردی در تحقیقات پیشین، بسیاری از کاستی‌ها و نواقص مدل‌های قبلی رفع شده، کارایی رویکرد مدیریت اختلال در فرایندهای مختلف برنامه‌ریزی و کنترل پروژه به‌صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

نتیجه‌گیری

یکی از راهکارهای مؤثر مدیریت عدم قطعیت‌های پروژه، استفاده از تکنیک‌های نظارت و کنترل ذخیره‌های زمانی احتیاطی پروژه است. 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 غیربحرانی و درصد پیشرفت آن‌ها، سیگنال‌های هشداردهنده صادر می‌شوند. در نتیجه، نوآوری در تحقیق حاضر، ارائه الگوریتمی جدید برای کنترل مؤثر پروژه مبتنی بر رویکرد مدیریت ارزش کسب‌شده و نیز موازنه هزینه- زمان در فضای غیرقطعی است. با این حال، مدیریت ذخیره احتیاطی در عمل، با مشکل عدم پیش‌بینی به‌موقع تغییرات

www.SID.ir

Archive of SID

هزینه (یا عدم لحاظ کردن آن در برنامه‌ریزی پاسخ به تغییرات) در هنگام لزوم اقدام برای تسریع فعالیت‌ها، مواجه است. از این نظر، یک روش کنترلی جدید بر اساس منطق CC/BM ارائه شده است که احتمال اتمام به‌موقع پروژه را افزایش داده، همچنین قابلیت ارزیابی برنامه‌های شتاب‌دهنده اجرای فعالیت‌ها و آنالیز هزینه/سود را دارا است. نتایج آزمایش‌ها روی مسائل نمونه نشان داده است که روش فوق با توجه به معیار زمان و عملکرد هزینه پروژه از برتری نسبی نسبت به روش‌های رایج مدیریت ذخیره احتیاطی که در حال حاضر به طور گسترده پذیرفته شده‌اند، برخوردار است. نتایج مدل پیشنهادی برای کنترل زنجیرهٔ بحرانی و مدیریت ذخیره‌های زمانی (CC/BM) نشان داده است که این مدل، رویکردی کارا برای مدیریت تأخیرات و ابزار کنترلی ارزشمندی برای مقابله با عدم قطعیت‌ها است.

در پایان می‌توان به برخی از ضعف‌ها و قوت‌ها و نیز محدودیت‌های رویکرد پیشنهادشده اشاره کرد. بر این اساس، موارد زیر برای تکمیل این مطالعه پیشنهاد می‌شود: استفاده از الگوریتم‌های تسطیح منابع نیز می‌تواند باعث تولید برنامه‌های زمان‌بندی شود که به‌عنوان ورودی مناسبی برای مدل‌های تعیین اندازه ذخیره احتیاطی مدنظر قرار بگیرد. همچنین دشواری حل مدل کنترل پروژه و زمان محاسباتی لازم برای اجرای الگوریتم مربوط با افزایش دوره‌های زمانی مرور و نظارت بر پروژه، افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، لازم است روشی برای تعیین تعداد دوره‌های نظارت بر شاخص‌های عملکردی پروژه با توجه به اهداف مسئله تعیین شود.

مراجع

[1] N. Fu, H.C. Lau and P. Varakantham, "Robust execution strategies for project scheduling with unreliable resources and stochastic durations", Journal of Scheduling, 2015, pp. 1-16.

[2] Y.A. Olawale and M. Sun, "Cost and time control of constructionprojects: inhibiting factors and mitigating measures in practice", Construction management and economics, Vol. 28, 2010, pp. 509-526.

[3] S. Ward and C. Chapman, "Transforming project risk management into project uncertainty management", International Journal of Project Management, Vol. 21, 2003, pp. 97-105.

[4] D. Migilinskas and L. Ustinovičius, “Methodology of risk and uncertainty management in construction’s technological and economical problems”, 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2008.

[5] M. Shafiei Nikabadi, M.A. Beheshti nia, R. Rafiei Pour, "A Mathematical Model for optimization of Product Development Process", mathematical modeling in engineering, Vol. 14. No. 45, 2016.

[6] A. Martens and M. Vanhoucke, "The integration of constrained resources into top-down project control", Computers & Industrial Engineering, Vol. 110, 2017, pp. 277-288.

[7] X. Hu, N. Cui, E. Demeulemeester and L. Bie, "Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk", European Journal of Operational Research, Vol. 249, 2016, pp. 717-727.

[8] M.A. Beheshtinia, and N. Farazmand, "A novel decision support system for discrete cost-CO2 emission trade-off in construction projects: the usage of Imitate Genetic Algorithm", Journal of information technology management, Vol. 7, No. 1, 2015, pp. 23-48.

[9] J. Zhang, X. Song and E. Díaz, "Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness", European Journal of Operational Research, Vol. 248, 2016, pp. 174-182.

[10] X. Hu, E. Demeulemeester, N. Cui, J. Wang and W. Tian, "Improved critical chain buffer management framework considering resource costs and schedule stability", Flexible Services and Manufacturing Journal, Vol. 29, 2017, pp. 159-183.

[11] E. Roghanian, M. Alipour and M. Rezaei, "An improved fuzzy critical chain approach in order to face uncertainty in project scheduling", International Journal of Construction Management, Vol. 18, 2018, pp. 1-13.

[12] Z. Y. Zhao, W. Y. You and J. Zuo, "Application of innovative critical chain method for project planning and control under resource constraints and uncertainty", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 136, 2010, pp. 1056-1060.

www.SID.ir

Archive of SID

[13] M.A. Khemakhem and H. Chtourou, "Efficient robustness measures for the resource-constrained project scheduling problem", International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 14, 2013, pp. 245-267.

[14] B. Li and C. Nan-fang, "Research on dynamic buffer monitoring in critical chain project management", Chinese Journal of Management Science, Vol. 18, 2010, pp. 97-103.

[15] L. P. Leach, Critical chain project management, ARTECH HOUSE, Inc., Norwood, MA, 2005.

[16] W. Herroelen and R. Leus, "On the merits and pitfalls of critical chain scheduling", Journal of operations management, Vol. 19, 2001, pp. 559-577.

[۱۷] ع. نادرپور و م. مفید، «بهینه‌سازی تخصیص منابع به فعالیت‌های پروژه با استفاده از مدل دیاگرام منابع بحرانی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی, دوره ۵، شماره ۱۹، زمستان ۱۳۸۸، صفحه ۳۷-۴۶.

[18] J. Pajares and A. Lopez-Paredes, "An extension of the EVM analysis for project monitoring: The Cost Control Index and the Schedule Control Index", International Journal of ProjectManagement, Vol. 29, 2011, pp. 615-621.

[19] M.M. Russell, G. Howell, S.M. Hsiang and M. Liu, "The Application of Time Buffers to Construction Project Task Durations", Journal of Construction Engineering and Management, 2013.

[20] J. Zhang, X. Song and E. Díaz, "Buffer sizing of critical chain based on attribute optimization", Concurrent Engineering, Vol. 22, 2014, pp. 253-264.

[21] V. Saihjpal and S. Singh, “New Placement Strategy for Buffers in Critical Chain”,in Proceedings of the Second International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2012), December 28-30, 2012, 2014, pp. 429-436.

[۲۲] س. حسامی و ز. مولایی، «بهینه‌سازی زمان‌بندی در پروژه‌های راه‌سازی بر اساس تفکر ناب»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۰، بهار ۱۳۹۴، صفحه ۳۳-۴۲.

[23] O.I. Tukel, W.O. Rom and S.D. Eksioglu, "An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 172, 2006, pp. 401-416.

[24] G. Ma, L. Li and Z. Chen, "Research on the buffer sizing approach in critical chain scheduling in perspective of flexible management", in Business, Economics, Financial Sciences, and Management, ed: Springer, 2012, pp. 61-68.

[25] L. Bie, N. Cui and X. Zhang, "Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling", International Journal of Production Research, Vol. 50, 2012, pp. 7343-7356.

[26] W. Peng and M. Huang, "A critical chain project scheduling method based on a differential evolution algorithm", InternationalJournal of Production Research, 2013, pp. 1-10.

[27] G. Ma, A. Wang, N. Li, L. Gu and Q. Ai, "Improved Critical Chain Project Management Framework for Scheduling Construction Projects", Journal of Construction Engineering and Management, 2014.

[28] X. Hu ,N. Cui and E. Demeulemeester, "Effective expediting to improve project due date and cost performance through buffer management", International Journal of Production Research, Vol. 53, 2015, pp. 1460-1471.

[29] X. Hu, N. Cui, E. Demeulemeester and L. Bie, "Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk", European Journal of Operational Research, 2015.

[30] J. Colin and M. Vanhoucke, "A comparison of the performance of various project control methods using earned value management systems", Expert Systems with Applications, Vol. 42, 2015, pp. 3159-3175.

[۳۱] ع. رستمی، ا. نوروزی، ه. مختاری و ی. نعمتی، «مسئله بهینه‌سازی پورتفولیوی چندهدفه با اهداف حداکثر کردن بازده، حداقل کردن ریسک و حداقل کردن تعداد دارایی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۹۹-۱۰۹.

[32] P. M. Institute, Practice Standard for Earned Value Management, 2011.

[33] A. Fayad, O. Hosny, A. Elhakeem and K. Zahran, "Continuous rescheduling optimization approach for successful realestate projects", Engineering Project Organization Journal, 2012, pp. 1-16.

www.SID.ir

Archive of SID

[34] J.L. Ponz-Tienda, E. Pellicer and V. Yepes, "Complete fuzzy scheduling and fuzzy earned value management in construction projects", Journal of Zhejiang University SCIENCE A ,Vol. 13, 2012, pp. 56-68.

[35] F. Acebes, J. Pajares, J.M. Galán and A. López-Paredes, "A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics", International Journal of Project Management, 2013.

[36] S. Xiangyuan, "Identifyingthe Critical Chain in the Critical Chain Project Management", in Future Computing, Communication, Control and Management, ed: Springer, 2012, pp. 387-393.

[37] R. Kolisch and S. Hartmann, "Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis", Springer, 1999.

www.SID.ir