

یک مدل ریاضی برای انتخاب سبد پروژه با در نظر گرفتن وابستگی متقابل میان پروژه‌ها، قابلیت شکست پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری مجدد و روش‌های گوناگون تأمین منابع

فرشاد بویری^۱، سید میثم موسوی^{۲*}، بهنام وحدانی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۵، تاریخ روایت اصلاح‌شده: ۹۶/۰۵/۱۴، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۹/۲۹)

چکیده

مدیریت سبد (پورتفولیو) پروژه، فرایند تکرارشدنی ارزیابی، انتخاب و اجرای پروژه‌هاست و قلب آن انتخاب سبد پروژه است. طی این امر، سازمان پروژه‌هایی که بیشترین هم‌راستایی را با اهداف راهبردی دارند شناسایی و اولویت‌بندی می‌کند و با توجه به محدودیت‌ها و ملاحظات واقعی در زمان‌بندی پروژه‌ها و تخصیص منابع، با زمان‌بندی و تخصیص منابع صحیح و هدفمند هرچه بیشتر به اهداف خود می‌رسد. در این پژوهش، یک مدل ریاضی جامع جدید برای مسئله انتخاب سبد پروژه در طول دوره برنامه‌ریزی متشکل از چند دوره زمانی با هدف افزایش سود توسعه داده شده است که به‌طور هم‌زمان انتخاب، زمان‌بندی و تخصیص منابع پروژه‌ها را در نظر می‌گیرد. در مدل ریاضی پیشنهادی، وابستگی متقابل میان پروژه‌ها و راهبردهای قابلیت شکست پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری مجدد، سرمایه‌گذاری خارجی و در نظر گرفتن روش‌های گوناگون برای تأمین منابع پروژه‌ها که در مطالعات پیشین مدنظر نبود یا هم‌زمان بررسی نشده بود، برای کاربرد در شرایط واقعی پروژه‌ها هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، محدودیت‌ها و پارامترهایی از قبیل محدودیت‌های منابع و بودجه، محدودیت‌های عددی، محدودیت‌های زمان‌بندی، روابط پیش‌نیازی، هزینه‌های راه‌اندازی و تأمین منابع پروژه‌ها که در مطالعات پیشین به‌طور هم‌زمان بررسی نشده است، هم‌زمان مدنظر قرار گرفت. برای بررسی تأثیرات مفروضات و راهبردها، مدل جامع با هشت سناریو بررسی و در هر سناریو، نرخ‌های سرمایه‌گذاری خارجی گوناگون در نظر گرفته شد. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده کارایی مدل جامع است که همه مفروضات و راهبردها را در نظر می‌گیرد (سناریو ۸).

واژه‌های کلیدی: انتخاب سبد پروژه، روش‌های گوناگون تأمین منابع پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری مجدد، قابلیت شکست پروژه‌ها، وابستگی متقابل میان پروژه‌ها.

مقدمه

دیگر سازمان سود کمتری به دست می‌آورد. در صورتی که اگر پروژه‌های مناسب انتخاب شوند، سود بیشتری نصیب سازمان می‌شود [۲]. اولین گام سازمان‌های پروژه‌محور در مدیریت راهبردی و هدفمند سبد پروژه‌ها، انتخاب صحیح پروژه‌هاست [۳]. در مرحله بعد، برای اجرای راهبردها، باید پروژه‌ها به‌طور صحیح زمان‌بندی و تخصیص منابع شوند. با توجه به محدودیت‌های سازمان‌ها، به‌ویژه سطح بودجه،

سازمان‌های پروژه‌محور برای تضمین سوددهی و پیشرفت خود نیاز دارند تا در پروژه‌ها سرمایه‌گذاری کنند. با این حال، اغلب با تعدادی پروژه مواجه هستند که با توجه به محدودیت منابع، بودجه، زمان‌بندی و... باید پروژه‌هایی را انتخاب کنند که اهداف سازمان را هرچه بیشتر برآورده کنند [۱]. انتخاب اشتباه پروژه‌ها دو تأثیر منفی دارد. از یک‌سو، منابع صرف پروژه‌های نامناسب می‌شود و از سوی

بیشینه‌کردن سود یا کمینه‌کردن ریسک سرمایه‌گذاری بررسی شده است. برخی مطالعات نیز بیشتر بر توسعه روش‌های فراابتکاری و در نظر گرفتن عدم قطعیت در این مدل‌ها تمرکز کرده‌اند، اما آنچه در پژوهش حاضر به آن پرداخته می‌شود، توسعه مدل‌های ریاضی در این مرحله و ارائه مدل ریاضی جامع جدید است که در آن با توجه به محدودیت‌ها و ملاحظات واقعی در زمان‌بندی و روابط میان پروژه‌ها و تخصیص منابع و بودجه و در نظر گرفتن راهبردهای دنیای واقعی پروژه‌ها، پروژه‌هایی انتخاب، زمان‌بندی و تخصیص منابع می‌شوند که بیشترین سود را برای سازمان داشته باشند. با توجه به جدول ۱، مفروضات و راهبردهایی که مطالعات مرتبط در این مرحله در نظر گرفتند، در سه گروه دوره برنامه‌ریزی، پروژه‌ها و منابع مورد نیاز پروژه‌ها تقسیم‌بندی شده‌اند. پارامترها یا محدودیت‌های مرتبط با عنوان هر ستون براساس مستقل بودن از زمان، وابسته به زمان بودن و وابسته بودن به زمان شروع پروژه به ترتیب با TD، TI و STD نشان داده شده‌اند. برای جامعیت داشتن مدل پژوهش حاضر، پارامترهایی که می‌توانند وابسته به زمان (TD) یا وابسته به زمان شروع پروژه (STD) باشند، به همین صورت در نظر گرفته شدند.

منابع: یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها در مسئله PPS محدودیت منابع است که هر سازمانی در برنامه‌ریزی پروژه‌ها با آن روبه‌روست. کارازو و همکاران [۹] منابع را به چند دسته تقسیم می‌کنند.

• **منابع موقتی یا وابسته به زمان یا تجدیدپذیر:** منابعی که به زمان وابسته هستند و در هر دوره مقدار مشخصی از آن‌ها وجود دارد. این منابع براساس اینکه در صورت عدم استفاده کامل از آن‌ها غیرقابل انتقال به دوره بعد باشند (مثل نیروی کار، ساعت ماشین‌آلات در دسترس و...) یا به دوره بعد منتقل شوند (مثل بودجه هر دوره که در صورت استفاده نکردن کامل به دوره بعد انتقال می‌یابد) به دو گروه تقسیم می‌شوند.

• **منابع سراسری یا مستقل از زمان یا تجدیدناپذیر:** منابعی که در ابتدای دوره برنامه‌ریزی وجود دارند و تا زمانی که مصرف نشوند قابل استفاده هستند (مثل مواد مصرفی). این منابع را می‌توان مانند

یکی از مهم‌ترین مسائل این سازمان‌ها مدیریت سبد (پورتفولیو) پروژه^۱ (PPM) است [۴].

اصطلاح سبد در آغاز در جامعه مالی و سرمایه‌گذاری با عنوان مدیریت سبد ابداع شد [۵]. اولین بار مارکویتز در سال ۱۹۵۲ و ۱۹۵۹ دو مقاله در مورد سبد انتشار داد و نظریه سبد نوین را ارائه کرد [۶-۷]. بعد از ارائه این نظریه، پژوهشگران به توسعه تئوری انتخاب سبد پرداختند. این مفهوم به تدریج با تغییراتی وارد سایر زمینه‌های اقتصادی و صنعتی از جمله پروژه‌ها شد و کاربرد یافت [۵]. در سال ۱۹۹۹، آرچر و قاسم‌زاده چارچوبی برای انتخاب سبد پروژه ارائه کردند [۸] که در شکل ۱ قابل مشاهده است. از سال ۲۰۰۰ به بعد مرحله پیشرفت سریع و اوج گرفتن PPM و انتخاب سبد پروژه^۲ (PPS) است. در این دوران پژوهشگران، PPM و PPS را از جنبه‌های گوناگون و با رویکردهای متفاوتی بررسی کردند. با توجه به چارچوب پیشنهادی قاسم‌زاده و آرچر، در مرحله اول، پروژه‌های کاندید براساس برخی معیارهای ارزیابی شناسایی، بررسی، انتخاب، اولویت‌بندی و گروه‌بندی می‌شوند و پروژه‌هایی که با اهداف سازمان مغایر باشند، حذف می‌شوند. در این مرحله، معیارهای مدنظر و رویکرد عدم قطعیت، در سطح کلان و در ارتباط با راهبردهای سازمانی هستند. زمان‌بندی پروژه‌ها و برنامه‌ریزی منابع و بودجه در این مرحله بررسی نمی‌شود یا بررسی آن در سطح کلان صورت می‌گیرد. در این مرحله، رویکردهای مدل‌سازی برای بررسی هم‌راستایی راهبردی و انتخاب و اولویت‌بندی و گروه‌بندی پروژه‌ها معمولاً تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تصمیم‌گیری گروهی است [۳].

در مرحله بعد، باید از میان پروژه‌های انتخاب شده مرحله اول، پروژه‌های نهایی انتخاب، زمان‌بندی و تخصیص منابع شوند. از آنجا که برای کارکردن به استفاده از مدل‌های ریاضی نیاز است، بیشتر مطالعات مرتبط با این مرحله، مدل‌های ریاضی گوناگونی را ارائه دادند و تلاش کردند تا با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و ملاحظات واقعی در زمان‌بندی و روابط میان پروژه‌ها و تخصیص منابع و بودجه، پروژه‌هایی را انتخاب، زمان‌بندی و تخصیص منابع کنند و در نتیجه اهداف سازمان را هرچه بیشتر برآورد کنند. در این باره، بیشتر اهداف اقتصادی مانند

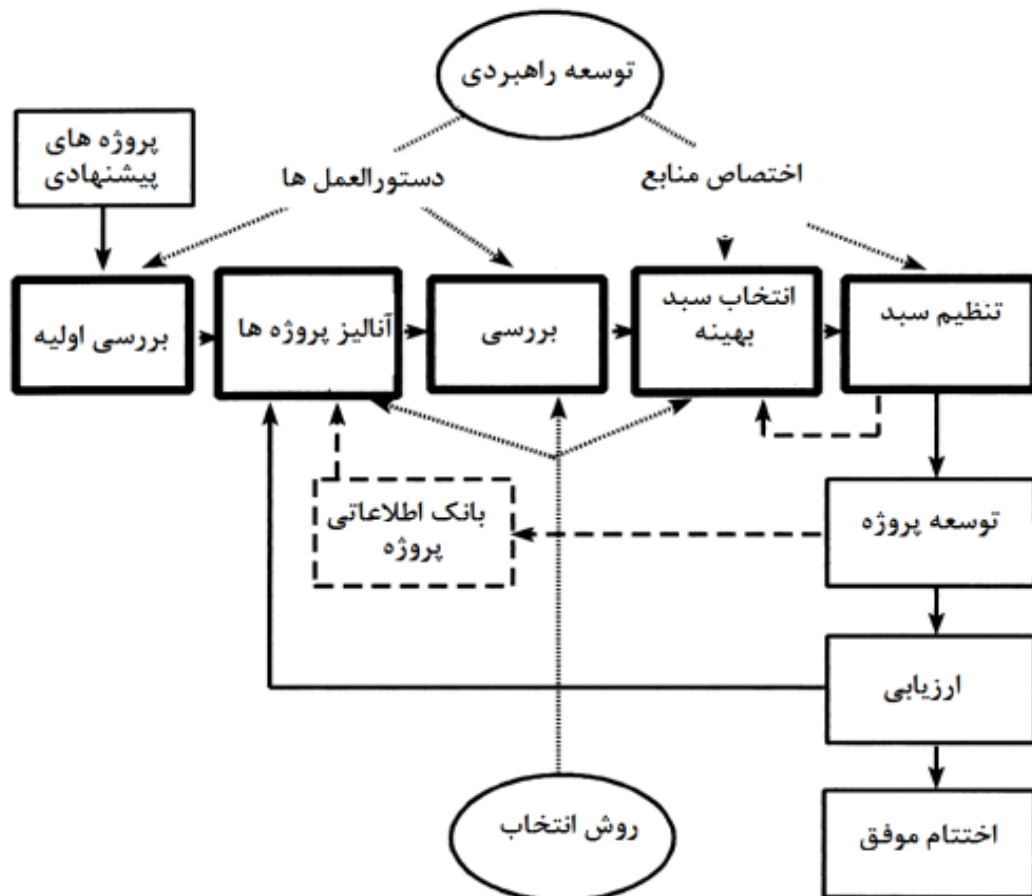
دارد [۱۹]. شناخت و مدل‌سازی وابستگی متقابل میان پروژه‌ها ممکن است صرفه‌جویی و سودهای باارزشی برای مدیران پروژه در شرایط واقعی پروژه‌ها داشته باشد. در مطالعات گوناگون در مسئله انتخاب سبد پروژه بر اهمیت و توسعه مدل‌های ریاضی برای در نظر گرفتن سودها و ضررهای حاصل از وابستگی متقابل میان پروژه‌ها تأکید شده است [۱۵]؛ بنابراین در پژوهش حاضر، وابستگی متقابل میان پروژه‌ها بر اساس تأثیرگذاری آن‌ها در سود (سود همکارانه و ضرر رقابتی) در نظر گرفته می‌شود.

قابلیت شکست^۶ پروژه‌ها: در اجرای مجموعه‌ای از پروژه‌ها ممکن است در عمل به دلیل رویدادهای ناخواسته در فرایند اجرای پروژه‌ها بعضی محدودیت‌ها مانند کسری بودجه، مشکلات فنی و دسترسی مالی به وجود بیاید. این نوع از وقفه‌ها^۷ بیشتر به عنوان رویدادهای ناخوشایند در نظر گرفته می‌شوند [۲۰].

منابع وابسته به زمان و قابل انتقال به دوره بعد در نظر گرفت که تنها در ابتدای دوره برنامه‌ریزی مقدار مشخصی از آن‌ها وجود دارد.

منبع بودجه ویژگی‌های خاص خود را دارد و در نتیجه با محدودیت‌های متمایزی مواجه است که در جدول ۱ با عنوان سرمایه از منابع عمومی متمایز شده است. با توجه به انواع منابع در شرایط واقعی پروژه‌ها، در پژوهش حاضر این منابع مدنظر نیستند.

وابستگی متقابل^۳ میان پروژه‌ها: هنگامی که دو یا چند پروژه وابسته به هم در دوره‌ای زمانی انتخاب و اجرا شوند، یک سازمان ممکن است سود بیشتر یا کمتری از مجموع سود حاصل از پروژه‌ها در حالت تکی به دست بیاورد. این پدیده وابستگی متقابل میان پروژه‌ها نامیده می‌شود [۱۵]. سود اضافه از مجموع سودهای تکی، سود همکارانه^۴ نامیده می‌شود [۱۸]. در حالی که بخشی از سود که کمتر از مجموع سودهای تکی است، ضرر رقابتی^۵ نام



شکل ۱. چارچوب پیشنهادی آرچر و قاسم‌زاده، ۱۹۹۹

جدول ۱. بررسی مطالعات درباره موضوع

محدودیت‌ها و ملاحظات واقعی در زمان‌بندی پروژه‌ها و تخصیص منابع											پژوهشگر	
منابع					پروژه‌ها				دوره برنامه‌ریزی			
سرمایه			منابع عمومی		محدودیت‌های عددی	روابط پیش‌نیازی میان پروژه‌ها	در نظر گرفتن سود حاصل از پروژه‌ها	وابستگی متقابل پروژه‌ها	قابلیت شکست پروژه‌ها	انعطاف‌پذیری دوره برنامه‌ریزی		چنددوره‌ای بودن
سرمایه‌گذاری خارجی (نرخ)	سرمایه‌گذاری مجدد	هزینه راه‌اندازی پروژه (سرمایه اولیه)	محدودیت سرمایه	نرخ انتقال منابع							تسطیح منابع	
✓ TD			✓ TD	✓ TD				✓ TD			✓	کارازو و همکاران [۹] ۲۰۱۰
	✓		✓ TI					✓ STD		✓	✓	بلنکی [۱۰] ۲۰۱۲
						✓ TI	✓	✓ TI	✓ TI			گوتجارو و فراوسچل [۱۱] ۲۰۱۳
✓ TI	✓		✓ TD			✓ TD		✓ TD			✓	ابراهیم‌نژاد و همکاران [۱۲] ۲۰۱۳
	✓	✓ TI	✓ TI					✓ STD		✓	✓	جعفرزاده و همکاران [۱۳] ۲۰۱۵
			✓ TD		✓			✓ TD	✓		✓	توفیقیان و نادری [۱۴] ۲۰۱۵
✓ TI		✓ TI	✓ TD					✓ TI	✓	✓	✓	لی و همکاران [۱۵] ۲۰۱۶
	✓		✓ TD					✓ TD			✓	وانگ و سانگ [۱۶] ۲۰۱۶
✓ TI	✓	✓ TI	✓ TD					✓ TI		✓	✓	لی و همکاران [۱۷] ۲۰۱۷
✓ TD	✓	✓ STD	✓ TD	✓ TD		✓ TD	✓	✓ STD	✓ TD	✓	✓	پژوهش حاضر

کمینه‌ای برای بخش‌بندی پروژه‌ها در نظر گرفته شود تا از به‌وجود آمدن بخش‌های کوچک در سبد جلوگیری شود و متغیر تصمیم، درصد تکمیل هر پروژه در هر دوره باشد. البته این رویکرد برای نشان‌دادن قابلیت شکست پروژه‌ها، همه جوانب را در نظر نمی‌گیرد و در شرایط واقعی پروژه‌ها به تأثیراتی که در اثر شکست پروژه‌ها به‌وجود می‌آید، توجه نمی‌کند. در پژوهش حاضر، به‌منظور اینکه از راهبرد قابلیت شکست پروژه‌ها برای برنامه‌ریزی بهتر با

بلنکی [۱۰] و لی و همکاران [۱۵] و [۱۷] وقفه‌های پروژه‌ها را راهبردی در انتخاب بهترین برنامه زمان‌بندی برای پروژه‌ها می‌دانند. آن‌ها تلاش کردند تا زمان‌بندی پروژه‌ها را با در نظر گرفتن شکست پروژه‌ها بهینه کنند. لی و همکاران [۱۷] این نوع وقفه‌ها را قابلیت شکست یا تقسیم نامیدند و فرض کردند که می‌توان هر پروژه را به هر بخش کوچکی تقسیم کرد، اما در برخی مواقع در شرایط واقعی پروژه‌ها این امر منطقی است که حد

برنامه‌ریزی در پروژه‌های دیگر سرمایه‌گذاری کرد [۱۶]. در پژوهش حاضر، از این راهبرد برای رسیدن به پاسخ بهتر استفاده می‌شود.

سرمایه‌گذاری خارجی^{۱۰}: سازمان می‌تواند از بودجه و سود پروژه‌های تکمیل‌شده، برای کسب سود بیشتر علاوه بر سرمایه‌گذاری در پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری خارجی نیز انجام دهد. در پژوهش حاضر از این راهبرد به صورت نرخ سرمایه‌گذاری خارجی استفاده شده است.

محدودیت‌های عددی^{۱۱}: محدودیت ظرفیت سازمان در تعداد پروژه‌های انتخاب‌شده در هر دوره یا کل دوره برنامه‌ریزی هستند [۱۵]. در پژوهش حاضر این محدودیت‌ها در نظر گرفته نشده است.

همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است در مطالعات، تأثیرات هم‌زمان مفروضات و راهبردها مدنظر نیست. از این میان، تنها جعفرزاده و همکاران [۱۳] به صورت مستقیم به تأثیر راهبرد سرمایه‌گذاری مجدد اشاره کردند. همچنین لی و همکاران [۱۵] مدل ریاضی خود را براساس راهبرد قابلیت شکست پروژه‌ها و در نظر گرفتن وابستگی متقابل پروژه‌ها تحت ۳ سناریو بررسی کردند.

در ادامه، مدل ریاضی جامع جدیدی برای مسئله انتخاب سبد پروژه در طول دوره برنامه‌ریزی متشکل از چند دوره زمانی با هدف افزایش سود توسعه داده شده است که هم‌زمان انتخاب، زمان‌بندی و تخصیص منابع پروژه‌ها را در نظر می‌گیرد. در این مدل، وابستگی متقابل میان پروژه‌ها و راهبردهای قابلیت شکست پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری مجدد، سرمایه‌گذاری خارجی و در نظر گرفتن روش‌های مختلف برای تأمین منابع که در مطالعات پیشین در نظر گرفته نشدند یا هم‌زمان به بررسی آن‌ها پرداخته نشده است، هم‌زمان برای کاربرد در شرایط واقعی پروژه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. همچنین محدودیت‌ها و پارامترهایی مانند محدودیت‌های منابع و بودجه، محدودیت‌های عددی، محدودیت‌های زمان‌بندی، روابط پیش‌نیازی، هزینه‌های راه‌اندازی و تأمین منابع پروژه‌ها که در مطالعات پیشین هم‌زمان بررسی نشدند، در پژوهش حاضر هم‌زمان در نظر گرفته شدند.

در نظر گرفتن تأثیراتی که در اثر شکست در شرایط واقعی پروژه‌ها به وجود می‌آید استفاده شود، فرض بر این است که هر پروژه می‌تواند به فازهای گوناگونی تقسیم شود و هر فاز پروژه، پروژه‌ای جدید باشد. فازهای پروژه‌ها براساس نظر خبرگان هر پروژه به گونه‌ای تعیین می‌شوند که روابط پیش‌نیازی و وابستگی متقابل میان فازهای هر پروژه و سایر پروژه‌ها و ویژگی‌های مخصوص هر فاز در نظر گرفته شوند. بدین صورت بستر اینکه زمان انجام‌دادن فازهای یک پروژه با هم تداخل داشته باشد یا وابستگی متقابل میان فازهای مشابه یک یا چند پروژه در نظر گرفته شود و برنامه تخصیص منابع بهتری صورت گیرد فراهم می‌شود.

روش‌های گوناگون تأمین منابع: در بیشتر مطالعات

فرض بر این است که سازمان براساس منابع داخلی خود برنامه‌ریزی می‌کند، اما گوتجار و فرواسچل [۱۱] در مسئله برنامه‌ریزی و تخصیص کارکنان، فرض کردند که در صورت کمبود منابع داخلی می‌توان از فرصت‌های برون‌سپاری^۸، قرارداد فرعی یا استخدام موقتی کارکنان متخصص از بیرون با هزینه‌های مشخص استفاده کرد و این راهبرد را تنها در مورد منابع انسانی به کار بردند. در پژوهش حاضر، این راهبرد به صورت جامع برای انواع منابع در نظر گرفته و فرض می‌شود که روش‌ها یا مکان‌های گوناگونی برای تأمین منابع پروژه‌ها در هر دوره وجود دارد که تأمین منابع از هر روش یا مکان در هر دوره و برای هر پروژه، هزینه مخصوص به خود را دارد؛ از جمله تأمین منابع به کمک منابع داخلی سازمان، برون‌سپاری، اضافه‌کاری یا مکان‌های گوناگون جغرافیایی که هزینه تأمین منابع از آن‌ها متأثر از موقعیت جغرافیایی آن مکان‌ها یا دوره‌ای است که در آن دوره، منابع تأمین می‌شود. بدین صورت می‌توان به بررسی دقیق‌تر مدل پرداخت و در شرایط واقعی پروژه‌ها، از فرصت‌های برون‌سپاری یا اضافه‌کاری برای انتخاب بهتر پروژه‌ها استفاده کرد. همچنین می‌توان هزینه‌های حمل‌ونقل از انبارها یا شهرهای مختلف را برای هر یک از پروژه‌ها در نظر گرفت و شرایط آب و هوایی در دوره‌های گوناگون را به صورت هزینه‌ای مدنظر قرار داد.

سرمایه‌گذاری مجدد^۹: در این سرمایه‌گذاری، فرض می‌شود که می‌توان سود حاصل از پروژه‌ها را در طول دوره

مدل سازی ریاضی پیشنهادی

مجموعه‌ها

$$(i, p_i) \quad i = 1, \dots, N, p_i = 1, \dots, P_i$$

فاز p_i ام پروژه بزرگ i

$$I_i = \{(i, 1), (i, 2), \dots, (i, P_i)\}$$

مجموعه فازهای پروژه بزرگ i

$$I = I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_N \quad (\text{فازها})$$

مجموعه دوره‌های زمانی $t, k, k' = 1, \dots, T$

$$u = 1, \dots, U, U + 1, \dots, \hat{U}$$

مجموعه منابع مورد نیاز $u = 1, \dots, U$

غیرقابل انتقال و $u = U + 1, \dots, \hat{U} - 1$ منابع قابل انتقال

به دوره بعد و \hat{U} بودجه و قابل انتقال به دوره بعد است.

$$m = 1, \dots, M, M + 1, \dots, \hat{M}$$

مجموعه روش‌های تأمین منابع غیرقابل انتقال به دوره بعد

$(m = 1, \dots, M)$ و منابع قابل انتقال به دوره بعد

$(m = M + 1, \dots, \hat{M})$

$$A_j \quad j = 1, \dots, S$$

همه مجموعه پروژه‌های دارای وابستگی متقابل

$$NR_k, NR$$

تعداد محدودیت‌های عددی سبد در هر دوره و در کل

دوره برنامه‌ریزی

$$E_{sp} \quad sp = 1, \dots, SP$$

مجموعه پروژه‌هایی با زمان شروع محدود به بازه زمانی

مجموعه پروژه‌های دارای پیش‌نیاز L

$$pr_{(l, p_l)} \quad (l, p_l) \in L$$

مجموعه پروژه‌های پیش‌نیاز پروژه (l, p_l)

پارامترها

$$c_{(i, p_i)}^{t, k} \quad (i, p_i) \in I, t, k = 1, \dots, T$$

سود پروژه (i, p_i) که در دوره t شروع می‌شود، در انتهای

دوره k (در ابتدای دوره $k+1$) لحاظ می‌شود. (ممکن است

یک پروژه پیش از شروع هم سود داشته باشد؛ بنابراین

دوره k به صورت تمام دوره‌ها تعریف می‌شود).

$$a_j^k \quad j = 1, \dots, S, k = 1, \dots, T$$

میزان سود یا ضرر حاصل از وابستگی متقابل میان

پروژه‌های مجموعه j که هم‌زمان در دوره k فعال هستند،

در انتهای دوره k (در ابتدای دوره $k+1$) لحاظ می‌شود.

$$r_{(i, p_i), u}^{t, k} \quad (i, p_i) \in I, u = 1, \dots, U, U + 1, \dots, \hat{U}$$

$$t, k = 1, \dots, T$$

میزان منبع نوع u مورد نیاز پروژه (i, p_i) که در دوره t

شروع می‌شود در دوره k بررسی می‌شود (ممکن است

پروژه‌ای قبل از شروع هم به منبع نیاز داشته باشد؛

بنابراین دوره k به صورت تمام دوره‌ها تعریف می‌شود).

$$\bar{R}_{m, u}^k \quad m = 1, \dots, M, M + 1, \dots, \hat{M}$$

$$u = 1, \dots, U, U + 1, \dots, \hat{U} - 1, k = 1, \dots, T$$

حداکثر ظرفیت روش m برای تأمین منبع u در دوره k

حداکثر بودجه در دسترس دوره k $\bar{R}_0^k \quad k = 1, \dots, T$

$$Rate_{\hat{U}}^{k', k} \quad k' = 1, \dots, k, k = 1, \dots, T$$

رخ انتقال بودجه از ابتدای دوره k' به انتهای دوره k

$$co_{u, m, (i, p_i)}^k \quad u = 1, \dots, U, U + 1, \dots, \hat{U} - 1, m = 1,$$

$$\dots, M, M + 1, \dots, \hat{M}, (i, p_i) \in I, k = 1, \dots, T$$

هزینه تأمین منبع نوع u (بودجه \hat{U}) در نظر گرفته

نمی‌شود) از روش m برای پروژه (i, p_i) در دوره k

$$(i, p_i) \in I \quad d_{(i, p_i)}$$

مدت زمان پروژه (i, p_i)

$$E_{NR_k, NP}^k \quad k = 1, \dots, T$$

ماتریس ضرایب محدودیت‌های عددی در هر دوره که به

تعداد محدودیت‌ها در هر دوره (NR_k) سطر و به تعداد

پروژه‌ها (NP) ستون دارد.

$$\underline{e}_{NR_k}^k, \bar{e}_{NR_k}^k \quad k = 1, \dots, T$$

بردار ستونی ضرایب حداقلی و حداکثری برای

محدودیت‌های عددی در هر دوره که به تعداد

محدودیت‌های هر دوره (NR_k) سطر دارند.

$$E_{NR, NP}$$

ماتریس ضرایب محدودیت‌های عددی در کل دوره

برنامه‌ریزی سبد که به تعداد محدودیت‌ها در کل دوره

همزمان فعال باشند، متغیر $\bar{z}_j^k(x)$ مقدار یک و اگر حداکثر \bar{A}_j تا از آن‌ها در دوره k همزمان فعال باشند، متغیر $\bar{z}_j^k(x)$ مقدار یک و اگر حداکثر \bar{A}_j تا از آن‌ها در دوره k همزمان فعال باشند، متغیر $\bar{z}_j^k(x)$ مقدار می‌گیرد.

مدل ریاضی

تابع هدف با فرض سرمایه‌گذاری مجدد

$$F(x) = \left[I_{\hat{U}}^T(x) - \left(\sum_{(i,p_i) \in I} \sum_{t=1}^T r_{(i,p_i),\hat{U}}^{t,T} \cdot x_{(i,p_i)}^t \right) + C^T(x) \right] \cdot (1 + Rate_{\hat{U}}^{T,T}) + B^T(x) \quad (1)$$

تابع هدف بدون فرض سرمایه‌گذاری مجدد

$$F(x) = \left[I_{\hat{U}}^T(x) - \left(\sum_{(i,p_i) \in I} \sum_{t=1}^T r_{(i,p_i),\hat{U}}^{t,T} \cdot x_{(i,p_i)}^t \right) + C^T(x) \right] \cdot (1 + Rate_{\hat{U}}^{T,T}) + B^T(x) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{T-1} B^k(x) \cdot (1 + Rate_{\hat{U}}^{k+1,T})$$

محدودیت منابع غیرقابل انتقال به دوره بعد

$$\sum_{m=1}^M v_{u,m,(i,p_i)}^k = \sum_{t=1}^T r_{(i,p_i),u}^{t,k} \cdot x_{(i,p_i)}^t \quad (3)$$

$$(i, p_i) \in I, u = 1, \dots, U, k = 1, \dots, T$$

$$\sum_{(i,p_i) \in I} v_{u,m,(i,p_i)}^k \leq \bar{R}_{m,u}^k \quad m = 1, \dots, M, \quad (4)$$

$$u = 1, \dots, U, k = 1, \dots, T$$

محدودیت منابع قابل انتقال به دوره بعد

$$\sum_{k'=1}^k \sum_{m=M+1}^{\hat{M}} \hat{v}_{u,m,(i,p_i)}^{k',k} \cdot (1 + Rate_{u,m}^{k',k}) = \sum_{t=1}^T r_{(i,p_i),u}^{t,k} \cdot x_{(i,p_i)}^t \quad (i, p_i) \in I, \quad (5)$$

$$u = U + 1, \dots, \hat{U} - 1, k = 1, \dots, T$$

$$\sum_{(i,p_i) \in I} \sum_{k'=k}^T \hat{v}_{u,m,(i,p_i)}^{k',k} \leq \bar{R}_{m,u}^k \quad m = M + 1, \quad (6)$$

$$\dots, \hat{M}, u = U + 1, \dots, \hat{U} - 1, k = 1, \dots, T$$

(NR) سطر و به تعداد پروژه‌ها (NP) ستون دارد.

$\underline{e}_{NR}, \bar{e}_{NR}$ بردار ستونی ضرایب حداقلی و حداکثری برای محدودیت‌های عددی کل دوره برنامه‌ریزی سبد که به تعداد محدودیت‌ها در کل دوره (NR) سطر دارند.

$$CL_i \quad i = 1, \dots, N$$

اگر پروژه i بزرگ i باید در طول دوره برنامه‌ریزی انتخاب شود، این پارامتر مقدار یک و در غیر این صورت صفر می‌گیرد.

$$\alpha_{sp}, \beta_{sp} \quad sp = 1, \dots, SP$$

حد بالا و پایین زمان شروع پروژه‌های مجموعه E_{sp}

$\underline{h}_{(i,p_i),(l,p_l)}, \bar{h}_{(i,p_i),(l,p_l)} \quad (l, p_l) \in L, (i, p_i) \in pr_{(l,p_l)}$ حداقل و حداکثر فاصله زمانی بین زمان شروع

پروژه (l, p_l) و زمان پایان پروژه‌های پیش‌نیاز

تعداد کل پروژه‌ها (کل فازها) NP

تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی MS

متغیرهای تصمیم

$$x_{(i,p_i)}^t = 1, 0 \quad (i, p_i) \in I, t = 1, \dots, T$$

اگر پروژه (i, p_i) در دوره t شروع شود، مقدار آن یک و در غیر این صورت صفر است.

$$v_{u,m,(i,p_i)}^k \quad u = 1, \dots, U, m = 1, \dots, M,$$

$$(i, p_i) \in I, k = 1, \dots, T$$

متغیر مثبت مربوط به مقدار تأمین منبع u (غیرقابل انتقال) به

روش m برای پروژه (i, p_i) در دوره k

$$\hat{v}_{u,m,(i,p_i)}^{k',k} \quad u = U + 1, \dots, \hat{U} - 1, m = M + 1,$$

$$\dots, \hat{M}, (i, p_i) \in I, k' = 1, \dots, k, k = 1, \dots, T$$

متغیر مثبت مربوط به میزان تأمین منبع نوع u

(قابل انتقال) موردنیاز پروژه (i, p_i) از روش m در

دوره k' برای مصرف در دوره k .

$$\underline{z}_j^k(x), \bar{z}_j^k(x), z_j^k(x) = 1, 0$$

$$j = 1, \dots, S, k = 1, \dots, T$$

متغیر صفر و یک مربوط به وابستگی متقابل بین پروژه‌ها. اگر از

پروژه‌های مجموعه A_j ، حداقل \underline{A}_j تا از آن‌ها در دوره k

محدودیت‌های عددی دوره‌ای و کلی سبد

$$\underline{e}_{NR_k}^k \leq E_{NR_k.NP}^k \cdot \begin{pmatrix} \sum_{t=k-d_{(1,1)}+1}^k x_{(1,1)}^t \\ \vdots \\ \sum_{t=k-d_{(N,P_N)}+1}^k x_{(N,P_N)}^t \end{pmatrix} \leq \bar{e}_{NR_k}^k \quad (15)$$

$j = 1, \dots, S, k = 1, \dots, T$

$$\underline{e}_{NR} \leq E_{NR.NP} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{t=1}^T x_{(1,1)}^t \\ \vdots \\ \sum_{t=1}^T x_{(N,P_N)}^t \end{pmatrix} \leq \bar{e}_{NR} \quad (16)$$

$nr = 1, \dots, NR$

محدودیت یگانگی پروژه‌ها

$$CL_i \leq \sum_{t=1}^T x_{(i,1)}^t \leq 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{(i,p_i)}^t = \sum_{t=1}^T x_{(i,p_i-1)}^t \quad (18)$$

$i = 1, \dots, N, p_i = 2, \dots, P_i$

محدودیت‌های مربوط به نقطه شروع پروژه‌ها

$$\alpha_{sp} \sum_{t=1}^T x_{(i,p_i)}^t \leq \sum_{t=1}^T t \cdot x_{(i,p_i)}^t \leq \beta_{sp} \quad (19)$$

$(i, p_i) \in E_{sp}, sp = 1, \dots, SP$

$$\sum_{t=1}^T t \cdot x_{(i,p_i)}^t \leq MS - d_{(i,p_i)} + 1 \quad (i, p_i) \in I \quad (20)$$

محدودیت‌های روابط پیش‌نیازی پروژه‌ها

$$\sum_{t=1}^T x_{(l,p_l)}^t \leq \sum_{t=1}^T x_{(i,p_i)}^t \quad (21)$$

$(l, p_l) \in L, (i, p_i) \in pr_{(l,p_l)}$

$$\sum_{t=1}^T x_{(l,p_l)}^t \left(\sum_{t=1}^T t \cdot x_{(i,p_i)}^t + h_{(i,p_i),(l,p_l)} \right) \leq$$

$$\sum_{t=1}^T t \cdot x_{(l,p_l)}^t \leq \sum_{t=1}^T t \cdot x_{(i,p_i)}^t + \bar{h}_{(i,p_i),(l,p_l)} \quad (22)$$

$(l, p_l) \in L, (i, p_i) \in pr_{(l,p_l)}$

محدودیت‌های سرمایه

$$B^k(x) = \sum_{(i,p_i) \in I} \sum_{t=1}^T c_{(i,p_i)}^{t,k} \cdot x_{(i,p_i)}^t + \sum_{j=1}^S z_j^k(x) \cdot a_j^k \quad k = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$C^k(x) = \sum_{(i,p_i) \in I} \left(\sum_{u=1}^U \sum_{m=1}^M co_{u,m,(i,p_i)}^k \cdot v_{u,m,(i,p_i)}^k + \sum_{u=U+1}^{\hat{U}-1} \sum_{m=M+1}^{\hat{M}} \sum_{k'=k}^T co_{u,m,(i,p_i)}^k \cdot \hat{v}_{u,m,(i,p_i)}^{k,k'} \right) \quad (8)$$

$k = 1, \dots, T$

$$I_{\hat{U}}^k(x) = B^{k-1}(x) + \bar{R}_{\hat{U}}^k + \left(I_{\hat{U}}^{k-1}(x) - \left(\sum_{(i,p_i) \in I} \sum_{t=1}^T r_{(i,p_i),\hat{U}}^{t,k-1} \cdot x_{(i,p_i)}^t + C^{k-1}(x) \right) \right) \quad (9)$$

$\cdot (1 + Rate_{\hat{U}}^{k-1,k}) \quad k = 1, \dots, T$

$$I_{\hat{U}}^k(x) = \bar{R}_{\hat{U}}^k + \left(I_{\hat{U}}^{k-1}(x) - \left(\sum_{(i,p_i) \in I} \sum_{t=1}^T r_{(i,p_i),\hat{U}}^{t,k-1} \cdot x_{(i,p_i)}^t + C^{k-1}(x) \right) \right) \quad (10)$$

$\cdot (1 + Rate_{\hat{U}}^{k-1,k}) \quad k = 1, \dots, T$

$$\sum_{(i,p_i) \in I} \sum_{t=1}^T r_{(i,p_i),\hat{U}}^{t,k} \cdot x_{(i,p_i)}^t + C^k(x) \leq I_{\hat{U}}^k(x) \quad (11)$$

$k = 1, \dots, T$

محدودیت‌های وابستگی متقابل پروژه‌ها

$$\left(\sum_{(i,p_i) \in A_j} \sum_{t=k-d_{(i,p_i)}+1}^k x_{(i,p_i)}^t \right) - \underline{A}_j + 1 \leq NP \cdot \underline{z}_j^k(x) \leq \left(\sum_{(i,p_i) \in A_j} \sum_{t=k-d_{(i,p_i)}+1}^k x_{(i,p_i)}^t \right) - \underline{A}_j + NP \quad (12)$$

$j = 1, \dots, S, k = 1, \dots, T$

$$\bar{A}_j - \left(\sum_{(i,p_i) \in A_j} \sum_{t=k-d_{(i,p_i)}+1}^k x_{(i,p_i)}^t \right) + 1 \leq NP \cdot \bar{z}_j^k(x) \leq \bar{A}_j - \left(\sum_{(i,p_i) \in A_j} \sum_{t=k-d_{(i,p_i)}+1}^k x_{(i,p_i)}^t \right) + NP \quad (13)$$

$j = 1, \dots, S, k = 1, \dots, T$

$$z_j^k(x) = \underline{z}_j^k(x) + \bar{z}_j^k(x) - 1 \quad (14)$$

$j = 1, \dots, S, k = 1, \dots, T$

عبارت ۱ نشان دهنده سود حاصل از سبد در کل دوره برنامه ریزی با فرض سرمایه گذاری مجدد است که با مجموع کل سرمایه موجود در ابتدای دوره T منهای هزینه ها و بودجه مورد نیاز در دوره T برابر است و با نرخ سرمایه گذاری به انتهای دوره T انتقال می یابد، به علاوه سود به دست آمده در انتهای دوره T .

عبارت ۲ مانند رابطه ۱ است، اما بدون فرض سرمایه گذاری مجدد و فرض می شود سودهای به دست آمده از پروژه های تکمیل شده در دیگر پروژه ها سرمایه گذاری نمی شود و با نرخ سرمایه گذاری خارجی به انتهای دوره برنامه ریزی انتقال می یابد. محدودیت ۳ به تأمین منابع غیرقابل انتقال به دوره بعد از روش های مختلف مربوط است. محدودیت ۴ نیز محدودیت ظرفیت روش های تأمین منابع برای منابع غیرقابل انتقال به دوره بعد در هر دوره است. محدودیت های ۵ و ۶ مانند محدودیت های ۳ و ۴ و مربوط به منابع قابل انتقال به دوره بعد است. عبارت ۷ بیانگر سود به دست آمده از همه پروژه ها در انتهای دوره k است که برابر سود انفرادی به دست آمده از همه پروژه ها در انتهای دوره k و سود حاصل از وابستگی متقابل میان پروژه ها در دوره k است. عبارت ۸ بیانگر هزینه کل مورد نیاز برای تأمین منابع غیرقابل انتقال و قابل انتقال همه پروژه ها در ابتدای دوره k است. رابطه های ۹ و ۱۰ به ترتیب موجودی سرمایه را در ابتدای هر دوره با فرض راهبردی سرمایه گذاری مجدد و بدون در نظر گرفتن این راهبرد نشان می دهند. در رابطه ۱۰، سود به دست آمده از پروژه ها در آن در نظر گرفته نمی شود. فرض بر این است که سود به دست آمده در هر دوره، در آخر آن دوره یا ابتدای دوره بعد است. محدودیت ۱۱ نشان دهنده محدودیت سرمایه در هر دوره است. محدودیت های ۱۲ و ۱۳ نشان می دهد که اگر از پروژه های مجموعه A_j حداقل A_j یا حداکثر \bar{A}_j تا از آن ها در دوره k هم زمان فعال باشند، متغیر $\underline{z}_j^k(x)$ و $\bar{z}_j^k(x)$ مقدار یک و در غیر این صورت صفر می گیرد. سرانجام زمانی که حداقل A_j تا و حداکثر \bar{A}_j تا از پروژه های مجموعه A_j در دوره k هم زمان فعال باشند، متغیرهای $\underline{z}_j^k(x)$ و $\bar{z}_j^k(x)$ هر دو مقدار یک می گیرند و در غیر این صورت برابر صفر هستند. از آنجا که متغیرهای $\underline{z}_j^k(x)$

و $\bar{z}_j^k(x)$ هم زمان صفر نمی شوند، متغیر $\bar{z}_j^k(x)$ را که نشان دهنده وقوع یا عدم وقوع همکاری میان پروژه ها است، به صورت رابطه ۱۴ تعریف می شود. مجموعه محدودیت های ۱۵ نشان دهنده محدودیت های عددی در هر دوره است و به ازای هر رابطه ای که بین مجموعه مستقلی از پروژه ها در یک دوره است، یک سطر تعریف می شود. ضرایب ماتریس $E_{NR_k}^k$ و $\underline{E}_{NR_k}^k$ در هر سطر نیز با توجه به رابطه بین پروژه های هر مجموعه در آن دوره تعریف می شود. در هر سطر بردار ستونی که ماتریس $E_{NR_k}^k$ در آن ضرب می شود، اگر پروژه (i, p_i) در دوره k فعال باشد، رابطه $\sum_{t=k-d(i, p_i)+1}^k x'_{(i, p_i)} = 1$ برقرار خواهد بود، در غیر این صورت مقدار صفر می گیرد. مجموعه محدودیت های ۱۶ مانند مجموعه محدودیت های ۱۵، اما در مجموع دوره برنامه ریزی است. محدودیت ۱۷ نشان می دهد هر پروژه منحصر به فرد است و حداکثر یک بار می تواند در دوره برنامه ریزی شروع شود. همان طور که پیش از این بیان شد، تمام روابط براساس فازهای پروژه ها خواهد بود؛ بنابراین اگر باید پروژه بزرگ i انتخاب شود، ضروری است پارامتر CL_i ، مقدار یک بگیرد و این محدودیت تنها برای فاز اول آن یعنی پروژه $(i, 1)$ اعمال می شود. در این صورت با توجه به محدودیت ۱۸ که بیانگر وابسته بودن همه فازهای پروژه است، سایر فازهای آن پروژه هم انتخاب می شوند. محدودیت ۱۹ نشان دهنده محدودیت زمانی برای شروع پروژه بین یک بازه زمانی است. محدودیت ۲۰ نشان می دهد که هر پروژه حداکثر باید تا آخر دوره برنامه ریزی تکمیل شود. محدودیت ۲۱ نشان دهنده این است که در تمام دوره برنامه ریزی، یک پروژه در صورتی می تواند انتخاب شود که پیش نیازهایش انتخاب شده باشند. محدودیت ۲۲ حداقل و حداکثر فاصله زمانی بین زمان شروع پروژه و زمان پایان پروژه های پیش نیازش را نشان می دهد.

نتایج محاسباتی

برای بررسی تأثیرات انفرادی و هم زمان وابستگی متقابل میان پروژه ها و راهبردهای قابلیت شکست پروژه ها، سرمایه گذاری مجدد، سرمایه گذاری خارجی و در نظر گرفتن

به دست آمده از این سناریوها با پاسخ‌های به دست آمده از سناریوهای ۲، ۳ و ۵ این موضوع را نشان می‌دهند. سرانجام در سناریوی آخر همه موارد هم‌زمان در نظر گرفته شدند و پاسخ‌های به دست آمده کارایی مدل را نشان می‌دهند.

برای بررسی دقیق‌تر کارایی مدل و نمایش پاسخ‌های آن، پارامترهای اولین مثال جدول ۲ در جدول ۳ آمده است. این مثال شامل ۶ پروژه بزرگ است که پروژه اول از سه فاز، پروژه دوم از دو فاز، پروژه سوم و چهارم از یک فاز، پروژه پنجم از دو فاز و پروژه ششم از دو فاز تشکیل شده‌اند. فرض بر این است که دو منبع غیرقابل انتقال به دوره بعد (منبع ۱ و ۲)، منبع قابل انتقال به دوره بعد (منبع ۳) و منبع بودجه (منبع ۴) هم که قابل انتقال به دوره بعد است، نیاز دارند. هریک از منابع ۱ و ۲ از دو روش ۱ و ۲ و منبع ۳ هم از دو روش ۳ و ۴ قابل تأمین است. روش‌های ۱ و ۳ در واقع یک روش و آن هم منابع خود سازمان هستند و هزینه تأمین آن‌ها صفر در نظر گرفته شده است. روش‌های ۲ و ۴ نیز در واقع یک روش و آن هم منابع بیرون سازمان هستند و هزینه خرید آن‌ها در نظر گرفته شده است. برنامه انتخاب، زمان‌بندی، سرمایه‌گذاری و تخصیص منابع پروژه‌های سناریوی هشتم این مثال در شکل ۲ آمده است. همچنین برای مقایسه برنامه زمان‌بندی سایر سناریوها، در شکل ۳ برنامه زمان‌بندی همه سناریوها آمده است. با توجه به شکل ۳، در سناریوی دوم با در نظر گرفتن قابلیت شکست پروژه‌ها، پروژه بزرگ ۲ که سوددهی بیشتری دارد، جایگزین پروژه بزرگ ۱ در سناریوی اول می‌شود. از سوی دیگر چون منابع بیشتری نیاز است، به گونه‌ای بین فاز اول و دوم آن شکست رخ می‌دهد که دچار کمبود منبع نشود و در نهایت سود بیشتری به دست بیاید. همین‌طور در سناریوی ۳ با استفاده از سرمایه‌گذاری سود حاصل از پروژه‌های تکمیل شده در سایر پروژه‌ها، پروژه بزرگ ۶ هم قابلیت اجرا می‌یابد و سرانجام سود بیشتری در مقایسه با سناریوی ۱ حاصل می‌شود. سناریوی ۴ در واقع همان سناریوی ۱ است که تأثیر حاصل از وابستگی متقابل پروژه ۲ و ۵ و پروژه ۱ و ۱ به صورت سود (صرفه‌جویی در هزینه) در آن مدنظر قرار گرفته است.

روش‌های مختلف برای تأمین منابع پروژه‌ها مدل ارائه شده تحت ۸ سناریو بررسی شده است و در هر سناریو نرخ‌های سرمایه‌گذاری متفاوت است. نتایج به دست آمده (سود) برای مثال‌های مختلف که با نرم‌افزار GAMS24.7.3، حل شده است، در جدول ۲ به ترتیب نتایج برای مثال‌هایی با اندازه کوچک و متوسط و بزرگ آمده است.

در همه سناریوهایی که برقرار بودن یا نبودن فرض سرمایه‌گذاری مجدد مدنظر بوده است، برای تابع هدف از رابطه ۱ یا ۲ و برای محدودیت سرمایه از رابطه ۹ یا ۱۰ استفاده شده است.

همچنین از آنجا که مدل براساس فازهای پروژه‌ها بیان شده است، برای در نظر گرفتن یا در نظر نگرفتن قابلیت شکست پروژه‌ها، پارامترهای $\bar{h}_{(i,p_i),(l,p_l)}$ و $h_{(i,p_i),(l,p_l)}$ در محدودیت ۲۲ به گونه‌ای تعریف می‌شوند که شرایط دلخواه برقرار شود. برای در نظر نگرفتن وابستگی متقابل پروژه‌ها، پارامتر a_j^k مقدار صفر می‌گیرد. همچنین برای سناریوهایی که به راهبرد در نظر گرفتن روش‌های مختلف برای تأمین منابع توجه نکردند، تنها یک روش (منابع سازمان) مدنظر قرار می‌گیرد. پارامتر (\bar{R}_{mu}^k) مربوط به سایر روش‌ها صفر در نظر گرفته می‌شوند. در مثال‌های حل شده فرض می‌شود که می‌توان از دو روش منابع پروژه‌ها را تأمین کرد. یکی استفاده از منابع سازمان و دیگری تأمین منابع از بیرون سازمان که هزینه بیشتری دارند. بدین صورت می‌توان مدل ارائه شده را تحت ۸ سناریو بررسی کرد.

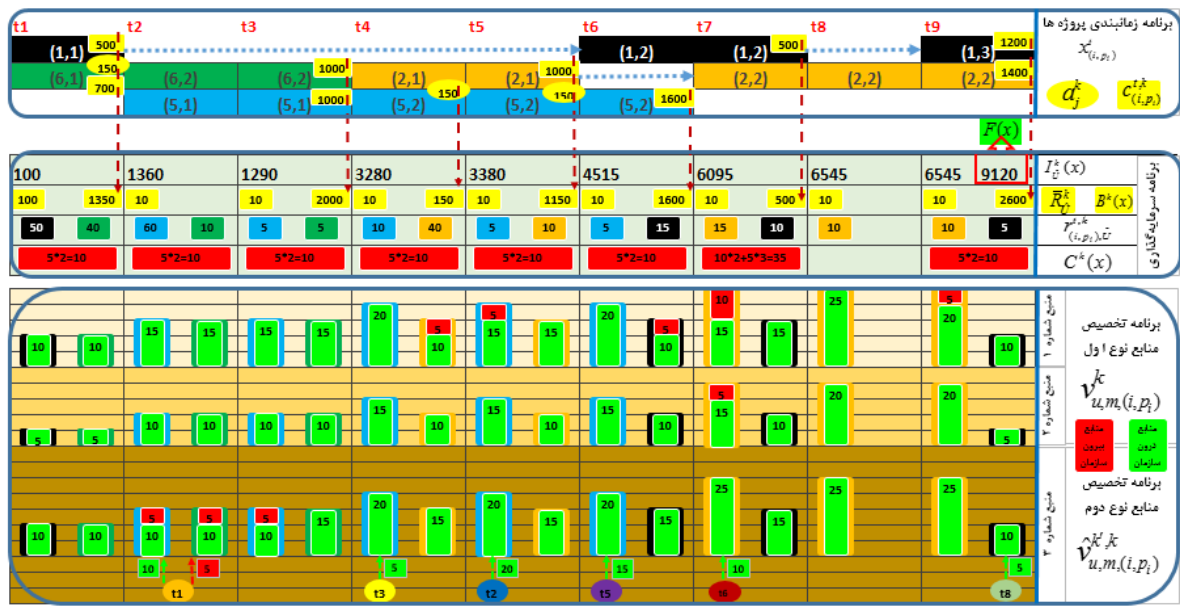
در سناریوی اول هیچ‌یک از موارد ذکر شده در نظر گرفته نشدند. در سناریوهای ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب قابلیت شکست پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری مجدد، وابستگی متقابل پروژه‌ها و در نظر گرفتن روش‌های مختلف برای تأمین منابع در نظر گرفته شدند. همان‌طور که انتظار می‌رود با در نظر گرفتن این موارد، مدل منعطف‌تر می‌شود و پاسخ بهتری به دست می‌آید که نتایج این موضوع را به درستی نشان می‌دهد. همچنین از آنجا که انتظار می‌رود با در نظر گرفتن راهبرد سرمایه‌گذاری مجدد با راهبردهای قابلیت شکست پروژه‌ها و توجه به روش‌های مختلف برای تأمین منابع، پاسخ‌های بهتری به دست می‌آید، در سناریوهای ۶ و ۷ تأثیرات هم‌زمان این راهبردها در نظر گرفته شده است و مقایسه پاسخ‌های

جدول ۲. نتایج محاسباتی مثال‌های مختلف در اندازه‌های گوناگون از مدل ارائه شده تحت ۸ سناریو

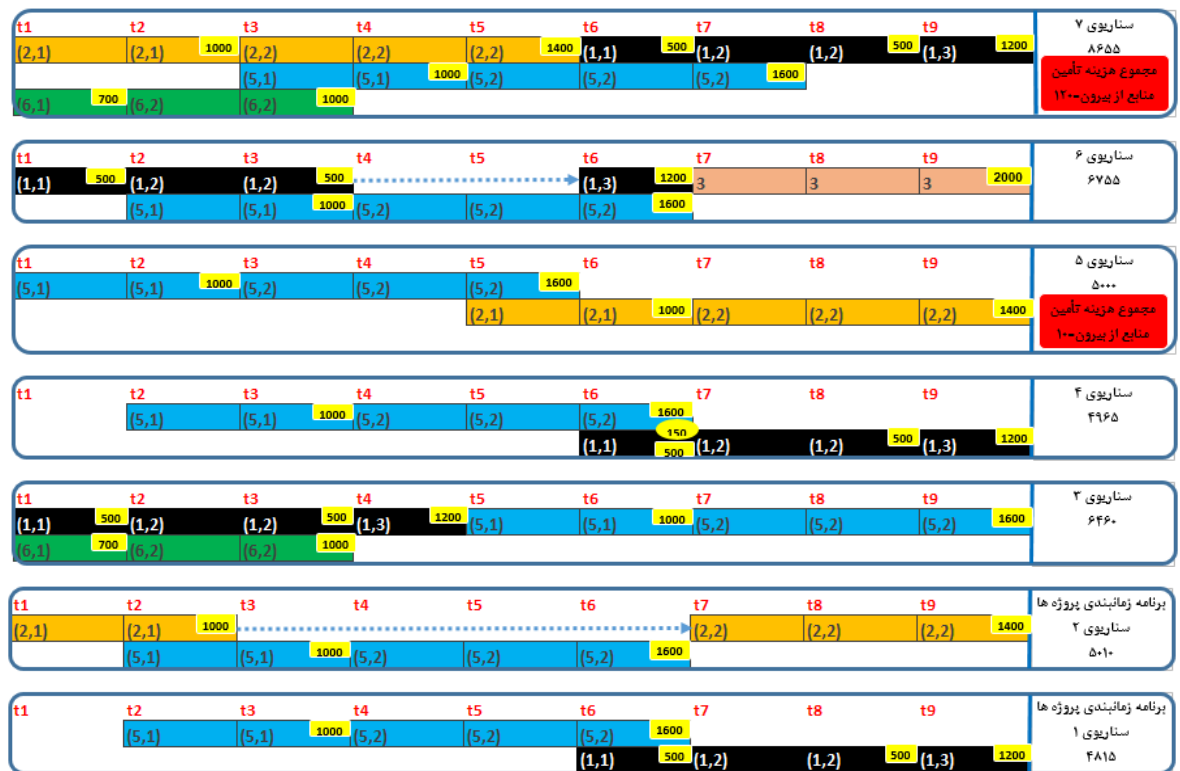
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	سناریوها				
								نرخ سرمایه‌گذاری خارجی هر دوره	کل تعداد فازهای پروژه‌های بزرگ	تعداد پروژه‌های بزرگ	تعداد دوره‌های زمانی	
مدل جامع	سرمایه‌گذاری مجدد و روش‌های گوناگون تأمین منابع	سرمایه‌گذاری مجدد و قابلیت شکست پروژهها	روش‌های گوناگون تأمین منابع	وابستگی متقابل پروژهها	سرمایه‌گذاری مجدد	قابلیت شکست پروژهها	مدل پایه	تعداد دوره‌های زمانی	تعداد پروژه‌های بزرگ	اندازه مثال‌ها		
۹۱۲۰	۸۶۵۵	۶۷۵۵	۵۰۰۰	۴۹۶۵	۶۴۶۰	۵۰۱۰	۴۸۱۵	%۰	۱۱	۶	۹	کوچک
۱۳۵۳۶	۱۳۰۵۳	۷۷۸۸	۶۵۷۰	۶۷۳۴	۷۷۶۲	۶۵۹۰	۶۵۷۰	%۵				
۱۵۸۰۷	۱۵۱۲۳	۹۳۶۵	۷۷۸۹	۷۸۲۸	۹۳۶۵	۷۸۸۱	۷۷۸۹	%۱۰				
۲۱۶۰۰	۲۰۵۵۰	۱۰۷۱۰	۷۶۲۰	۸۱۶۵	۱۰۳۱۵	۸۰۱۵	۷۶۲۰	%۰	۲۲	۱۲	۱۲	متوسط
۲۳۵۹۶	۲۱۰۲۶	۱۱۵۶۶	۹۲۶۷	۹۴۳۲	۱۰۲۲۲	۹۳۸۵	۹۲۶۷	%۵				
۲۶۶۵۸	۲۳۷۷۸	۱۳۷۸۸	۱۰۸۲۵	۱۱۰۸۰	۱۲۰۸۲	۱۰۸۲۵	۱۰۸۲۵	%۱۰				
۶۴۹۰	۶۴۹۰	۶۴۹۰	۴۸۴۵	۴۸۴۵	۶۴۹۰	۴۸۴۵	۴۸۴۵	%۰	۱۱	۶	۱۲	بزرگ
۸۲۵۵	۸۲۵۵	۸۲۵۵	۷۸۴۹	۷۸۴۹	۸۲۵۵	۷۸۴۹	۷۸۴۹	%۵				
۱۰۶۲۴	۱۰۶۲۴	۱۰۶۲۴	۹۴۵۳	۹۴۵۳	۱۰۶۲۴	۹۴۵۳	۹۴۵۳	%۱۰				
۹۶۴۵	۸۰۱۰	۶۹۸۰	۵۴۱۵	۶۴۵۳	۶۸۹۰	۶۳۳۵	۵۰۴۰	%۰	۲۲	۱۲	۲۴	
۱۲۰۳۰۷	۱۰۳۹۷	۶۷۲۲	۷۳۶۸	۶۲۵۶	۶۴۵۸	۶۲۵۶	۶۲۵۶	%۵				
۱۶۰۹۹	۱۳۱۳۱	۹۱۶۹	۸۷۶۴	۷۵۰۳	۸۳۹۰	۷۵۰۳	۷۵۰۳	%۱۰				
۲۴۲۵۵	۲۳۲۰۵	۱۵۳۷۰	۱۳۹۱۰	۱۳۷۲۵	۱۵۳۷۰	۱۳۹۲۰	۱۳۷۲۵	%۰	۲۲	۱۲	۲۴	
۵۰۲۱۳	۴۷۵۴۱	۲۹۸۰۳	۲۳۶۳۲	۲۳۶۰۴	۲۸۵۸۸	۲۳۷۷۳	۲۳۶۰۴	%۵				
۱۱۰۰۰۲	۱۰۴۴۳۴	۶۱۲۴۷	۳۵۳۳۵	۳۳۳۸۱	۵۶۳۶۹	۳۳۴۳۷	۳۳۳۸۱	%۱۰				
۴۲۹۰۰	۴۰۸۰۰	۱۹۱۰۵	۳۰۱۱۰	۱۸۲۳۵	۱۸۲۳۵	۱۸۶۳۰	۱۸۲۳۵	%۰	۴۴	۲۴		
۹۴۸۵۲	۹۰۸۳۱	۶۲۴۹۹	۴۳۳۹۵	۴۴۷۶۲	۵۸۲۵۱	۴۳۳۳۸	۴۲۵۴۲	%۵				
۱۹۸۱۵۳	۱۹۰۷۴۶	۱۲۵۹۷۳	۶۵۸۵۰	۶۵۶۵۵	۱۱۶۰۴۷	۶۴۷۱۸	۶۳۰۳۳	%۱۰				

جدول ۳. پارامترهای اولین مثال جدول ۲

فازهای پروژه ۶		فازهای پروژه ۵		پروژه ۴	پروژه ۳	فازهای پروژه ۲		فازهای پروژه ۱			پروژه‌ها
(۶ و ۲)	(۶ و ۱)	(۵ و ۲)	(۵ و ۱)	۴	۳	(۲ و ۲)	(۲ و ۱)	(۱ و ۳)	(۱ و ۲)	(۱ و ۱)	
۲	۱	۳	۲	۴	۳	۳	۲	۱	۲	۱	$d_{(i,p_i)}$
۱۰۰۰	۷۰۰	۱۶۰۰	۱۰۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۴۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۵۰۰	۵۰۰	$c_{(i,p_i)}^{t,k}$ سود مستقل، از زمان شروع و در انتهای هر پروژه است.
۱۰۱۵	۵۱۰	۱۵۲۰	۱۰۱۵	۲۵۳۰	۲۵۳۰	۲۰۲۵	۱۰۱۵	۵۱۰	۱۰۱۵	۵۱۰	$r_{(i,p_i),u}^{t,k}$ هر پروژه در هر دوره‌ای که فعال است، به منبع نیاز دارد و مستقل از زمان شروع است.
۱۰۱۵		۱۵۲۰	۱۰۱۵	۲۵۳۰	۲۵۳۰	۲۰۲۵	۱۰۱۵		۱۰۱۵		
۱۰۱۵	۴۰۱۰	۱۰۲۰	۶۰۱۵	۴۵۳۰	۴۰۳۰	۱۵۲۵	۴۰۱۵	۵۱۰	۱۵۱۵	۵۰۱۰	$m_{(i,p_i)}^{t,k}$ منبع ۲ و ۳
۵۱۵		۵۲۰	۵۱۵	۱۵۳۰	۱۰۳۰	۱۰۲۵	۱۰۱۵		۱۰۱۵		$m_{(i,p_i)}^{t,k}$ منبع ۱ و ۴
فرض می‌شود در هر دوره ظرفیت روش اول از منبع ۱، ۳۰، ۱ و از منبع ۲، ۲۵، ۲ و از منبع ۳، ۲۵، ۲ و از منبع ۴، ۲۵، ۲ و از منبع ۵، ۲۵، ۲ و از منبع ۶، ۲۵، ۲ و از منبع ۷، ۲۵، ۲ و از منبع ۸، ۲۵، ۲ واحد است.											$R_{m,u}^k, R_{ij}^k$
فرض می‌شود هزینه تأمین هر واحد از سه منبع ۱ و ۲ و ۳ برای هر پروژه از سازمان صفر، و از بیرون سازمان به ترتیب ۲، ۳ و ۴ واحد است.											$CO_{u,m,(i,p_i)}^k$
فرض می‌شود هر فاز پروژه به صورت متوالی پیش‌نیاز فاز بعدی آن است. همچنین پروژه ۳ پیش‌نیاز پروژه ۴ است. همچنین فرض می‌شود پروژه حداقل باید پس از اتمام پروژه پیش‌نیازش شروع شود و محدودیتی برای حداکثر زمان شروع آن بعد از اتمام پروژه پیش‌نیازش نباشد.											روابط پیش‌نیازی
فرض می‌شود اگر حداقل ۲ و حداکثر ۴ پروژه از مجموعه پروژه‌های ۱ و ۱، ۱ و ۲، ۲ و ۵ و ۱ و ۶ و اگر هر ۴ پروژه از مجموعه پروژه‌های ۲ و ۱، ۲ و ۴، ۲ و ۶ هم‌زمان در هر دوره‌ای فعال باشند، به ترتیب ۱۵۰ واحد سود و ۲۰ واحد ضرر در انتهای آن دوره به دست می‌آید.											روابط وابستگی متقابل
نرخ انتقال منابع قابل انتقال به دوره بعد و نرخ انتقال سرمایه، صفر در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود در هر دوره، حداکثر دو پروژه باید فعال باشد؛ بنابراین ماتریس ضرایب محدودیت‌های عددی در هر دوره، یک سطر و به تعداد پروژه‌ها ستون دارد. همه درایه‌های آن نیز عدد ۱ می‌گیرند. همچنین بردار ستونی ضرایب حداقلی و حداکثری برای محدودیت‌های عددی در هر دوره، یک درایه دارند و به ترتیب ۰ و ۲ می‌گیرند.											سایر پارامترها



شکل ۲. برنامه انتخاب، زمان بندی، سرمایه گذاری و تخصیص منابع سناریوی هشتم اولین مثال جدول ۲



شکل ۳. برنامه انتخاب و زمان بندی سناریوهای اول تا هفتم اولین مثال جدول ۲

بیشتری حاصل می شود. در سناریوی ششم با هم زمان در نظر گرفتن راهبرد سرمایه گذاری مجدد و راهبردهای قابلیت شکست پروژهها، پروژه بزرگ ۳ با استفاده از سرمایه گذاری سود حاصل از پروژههای تکمیل شده در آن قابلیت اجرایی پیدا می کند و پروژه بزرگ ۱ هم با شکست

ترکیب پروژههای انتخاب در سناریوی ۵ مشابه سناریوی ۲ است، اما در اینجا برای جبران کمبود منبع (تنها پنج واحد منبع ۱) از منابع بیرونی سازمان استفاده می شود. پروژه بزرگ ۲ که سوددهی بیشتری دارد جایگزین پروژه بزرگ ۱ در سناریوی اول و در نهایت سود

پروژه‌ها و راهبردهای قابلیت شکست پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری مجدد، سرمایه‌گذاری خارجی و در نظر گرفتن روش‌های گوناگون برای تأمین منابع پروژه‌ها که در مطالعات پیشین در نظر گرفته نشدند یا هم‌زمان بررسی نشدند، هم‌زمان برای کاربردها در شرایط واقعی پروژه‌ها مدنظر قرار گرفتند. همچنین محدودیت‌ها و پارامترهایی مانند محدودیت‌های منابع و بودجه، محدودیت‌های عددی، محدودیت‌های زمان‌بندی، روابط پیش‌نیازی، هزینه‌های راه‌اندازی و تأمین منابع پروژه‌ها که در مطالعات پیشین هم‌زمان بررسی نشدند، در پژوهش حاضر هم‌زمان در نظر گرفته شدند. نتایج محاسباتی به‌دست‌آمده، تأثیر مثبت هریک از راهبردها را به‌صورت انفرادی و توأم نشان می‌دهد. همچنین کارایی مدل جامع پیشنهادی را که همه مفروضات و راهبردها را در نظر می‌گیرد (سناریوی ۸) نشان داده شده است. پیشنهاد می‌شود در کارهای آتی، برای حل مدل ریاضی پیشنهادی از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند کلونی مورچگان، رقابت استعماری و جست‌وجوی حریمانه برای حل این مسائل در اندازه‌های بزرگ استفاده کرد. همچنین برای مواجهه با عدم قطعیت می‌توان رویکرد فازی برای پارامترهایی از قبیل سود، منابع و بودجه در دسترس یا مورد نیاز، نرخ انتقال منابع و بودجه و سایر پارامترهایی استفاده کرد که در شرایط واقعی پروژه‌ها، مقدار دقیق و قطعی ندارند. سرانجام برای مدل‌سازی می‌توان ملاحظات مربوط به هزینه شکست و هزینه طولانی‌تر شدن پروژه‌ها را بررسی کرد. علاوه‌براین می‌توان فازهای پروژه‌ها را براساس میزان منابع مورد نیاز و زمان تکمیل آن به‌صورت چندحالتی (چندین مد) در نظر گرفت و به این صورت حالت‌هایی مانند فشرده یا برون‌سپاری را برای انعطاف بیشتر مدل و رسیدن به برنامه بهتر در نظر گرفت.

مواجه می‌شود و در نهایت سود بیشتری نسبت به هریک از سناریوهای ۱، ۲ و ۳ حاصل می‌شود. همچنین در سناریوی ۷ با هم‌زمان در نظر گرفتن راهبردهای سرمایه‌گذاری مجدد و توجه به روش‌های مختلف برای تأمین منابع، همانند سناریوی ۵ پروژه بزرگ ۲ که منابع بیشتر و از طرفی سوددهی بیشتری نسبت به پروژه بزرگ ۱ دارد با تأمین منابع آن از بیرون، قابلیت اجرایی می‌یابد. از سوی دیگر، با استفاده از سرمایه‌گذاری سود حاصل از پروژه‌های تکمیل‌شده در پروژه ۱، این پروژه هم قابلیت اجرا شدن می‌یابد و در نهایت سود بیشتری نسبت به هر کدام از سناریوهای ۱، ۲ و ۳ حاصل می‌شود. همچنین می‌شود سناریوهای دیگری نیز تعریف کرد که تأثیر هم‌زمان دو یا سه راهبرد را بررسی کند، اما از آنجا که سناریوهای ۶ و ۷ ملموس‌تر بودند، بررسی شدند. از سوی دیگر، در مدل جامع سناریوی آخر تأثیر هم‌زمان همه موارد در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۲، ترکیب پروژه‌های انتخابی مانند سناریوی ۷ است، اما به دلیل مجاز بودن شکست پروژه‌ها، مدل پروژه‌ها به‌گونه‌ای زمان‌بندی می‌شود که با حفظ اینکه حداکثر دو پروژه در هر دوره فعال باشند، حداکثر استفاده از منابع خود سازمان شود و هزینه کمتری برای تأمین منابع از بیرون صورت بگیرد (هزینه تأمین منابع از بیرون در سناریوی هفتم ۱۲۰ واحد و در سناریوی هشتم ۱۰۵ واحد). همچنین حداکثر سود حاصل از وابستگی متقابل بین پروژه‌ها حاصل شود و سرانجام سود بیشتری به‌دست بیاید.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل خطی عدد صحیح مختلط جدید برای مسئله انتخاب سبد پروژه در افق برنامه‌ریزی متشکل از چندین دوره زمانی با هدف افزایش سود توسعه داده شد که هم‌زمان انتخاب، زمان‌بندی و تخصیص منابع پروژه‌ها را در نظر می‌گیرد. در مدل مدنظر، وابستگی متقابل

منابع

1. Ghasemzadeh, F., Archer, N., And Iyogun, P. (1999). "A Zero-One Model for Project Portfolio Selection and Scheduling", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50, No. 7, PP. 745-755.
2. Martino, J. P. (1995). *Research and Development Project Selection*. 1 Edition, Wiley, ISBN-13: 978-0471595373.
3. Mohagheghi, V., Mousavi, S. M., Vahdani, B. (2016). "Sustainable Construction Project Portfolio Selection Under Interval-Valued Type-2 Fuzzy Sets", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 50, No. 2, PP. 327-340.
4. Hatefi, M. A. (2016). "Introducing an Applicable Technique for Ranking and Selecting Project Portfolio, Based on Qualitative Risk Assessment", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 50, No. 1, PP. 133-145.
5. Guo, N., and Xiao, S. R. (2014). "Review of the Development of Project Portfolio Management", *In Advanced Materials Research*, Vol. 838, PP. 3131-3134.
6. Markowitz, H. (1952). "Portfolio Selection." *The Journal of Finance*, Vol. 7, No. 1, PP. 77-91.
7. Markowitz, H., and Selection, P. (1959). "Efficient Diversification of Investments." *John Wiley and Sons*, Vol. 16, No. 12, PP. 26-31.
8. Archer, N. P., and Ghasemzadeh, F. (1999). "An Integrated Framework for Project Portfolio Selection." *International Journal of Project Management*, Vol. 17, No. 4, PP. 207-216.
9. Carazo, A. F. et al. (2010). "Solving a Comprehensive Model for Multiobjective Project Portfolio Selection", *Computers and Operations Research*, Vol. 37, No. 4, PP. 630-639.
10. Belenky, A. S. (2012). "A Boolean Programming Problem of Choosing an Optimal Portfolio Of Projects and Optimal Schedules for Them by Reinvesting Within the Portfolio the Profit from Project Implementation", *Applied Mathematics Letters*, Vol. 25, No. 10, PP. 1279-1284.
11. Gutjahr, W. J., and Froeschl, K. A. (2013). "Project Portfolio Selection Under Uncertainty with Outsourcing Opportunities", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 25, No. 2, PP. 255-281.
12. Ebrahimnejad, S., Hosseinpour, M. H., and Nasrabadi, A. M. (2013). "A Fuzzy Bi-Objective Mathematical Model for Optimum Portfolio Selection by Considering Inflation Rate Effects", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 1 and 4, PP. 595-616.
13. Jafarzadeh, M. et al. (2015). "Optimal Selection of Project Portfolios Using Reinvestment Strategy Within a Flexible Time Horizon", *European Journal of Operational Research*, Vol. 243, No. 2, PP. 658-664.
14. Tofighian, A. A., and Naderi, B. (2015). "Modeling and Solving the Project Selection and Scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 83, No. 1, PP. 30-38.
15. Li, X. et al. (2016). "An Extended Model for Project Portfolio Selection with Project Divisibility and Interdependency", *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, Vol. 25, No. 1, PP. 119-138.
16. Wang, B., and Song, Y. (2016). "Reinvestment Strategy-Based Project Portfolio Selection and Scheduling with Time-Dependent Budget Limit Considering Time Value of Capital", *In Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation*, Vol. 378, PP. 373-381.
17. Li, X. et al. (2017). "Uncertain Mean-Variance Model for Project Portfolio Selection Problem with Divisibility", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Vol. 32, No. 6, PP. 4513-4522.
18. Santhanam, R., and Kyparisis, G. J. (1996). "A Decision Model for Interdependent Information System Project Selection", *European Journal of Operational Research*, Vol. 89, No. 2, PP. 380-399.
19. Fox, G. E., Baker, N. R., and Bryant, J. L. (1984). "Economic Models for R and D Project Selection in the Presence of Project Interactions", *Management Science*, Vol. 30, No. 7, PP. 890-902.
20. Zhu, G., Bard, J. F., and Yu, G. (2005). "Disruption Management for Resource-Constrained Project Scheduling", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, No. 4, PP. 365-381.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Project Portfolio Management (PPM)
 2. Project Portfolio Selection (PPS)
 3. Interdependency
 4. Synergistic Benefit
 5. Competitive Loss
 6. Divisibility
 7. Interruptions
 8. Outsourcing Opportunities
 9. Reinvestment
 10. External Investment
 11. Cardinality Constraints
-