

مدل سازی و حل مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت پروژه در شرایط وابستگی کیفیت به زمان و هزینه

عباس شول*، اسماعیل کشاورز**

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۳

تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۷

چکیده

در پژوهش حاضر مسئله‌ی موازنه‌ی زمان-هزینه-کیفیت از یک منظر جدید فرمولبندی و حل می‌شود. بدین منظور، ابتدا کیفیت اجرای هر فعالیت به صورت تابعی از زمان و هزینه تعریف شد، سپس با تعریف کیفیت اجرای پروژه به صورت کمترین مقدار کیفیت اجرای فعالیت‌های آن و رعایت روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی سه هدفه برای موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت فرمولبندی گردید. برای حل مسئله، توابع هدف مربوط به زمان و هزینه به صورت آرمان‌هایی فازی توصیف شده و از یک رویکرد تصمیم‌گیری فازی برای بازنویسی مدل سه‌هدفه‌ی پیشنهادی به صورت مدلی تک هدفه استفاده گردیده است. تولید یک جواب نهایی، به جای مجموعه‌ای از جواب‌های کارای پارتو، از مزیت‌های روش پیشنهادی است، که مانع از سردرگمی تصمیم‌گیرنده می‌شود. به‌منظور توصیف عملکرد و کاربرد بالقوه‌ی روش پیشنهادی، مسئله‌ی موازنه‌ی زمان-هزینه-کیفیت برای یک پروژه با داده‌های واقعی مربوط به سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس استان کرمان حل گردید. در پایان نیز، به منظور اعتبارسنجی مدل و روش پیشنهادی از یک فرایند تحلیل پارامتری، که پارامترهای اصلی مدل را به صورت سیستماتیک تغییر می‌دهد، استفاده شد.

واژگان کلیدی: زمان‌بندی پروژه؛ موازنه‌ی زمان-هزینه-کیفیت؛ برنامه‌ریزی چندهدفه؛ آرمان فازی؛ تصمیم‌گیری فازی.

* استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران (نویسنده مسئول)

.shoul@vru.ac.ir

** استادیار گروه ریاضی کاربردی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران .ekeshavarz@iauirjan.ac.ir

مقدمه

یکی از وظایف مدیران پروژه، برنامه‌ریزی پروژه می‌باشد. مرحله‌ی برنامه‌ریزی پس از آنکه پروژه به درستی تعریف و تأیید شد، شروع می‌شود و طی آن، پروژه به چند فعالیت قابل مدیریت که برای رسیدن به اهداف مورد نظر باید اجرا شوند، تقسیم می‌گردد. در این مرحله باید مدت زمان فعالیت‌ها برآورد شده و نیازمندی‌ها و میزان دسترسی به منابع و همچنین روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها تعیین گردد. این موضوع که هر یک از فعالیت‌ها در چه زمانی شروع شود و در چه زمانی به پایان برسد به نحوی که اهداف پروژه، یعنی زمان و هزینه حداقل و سطح کیفیت پروژه حداکثر شود، در مرحله‌ی زمان‌بندی انجام می‌پذیرد. این موضوع، یعنی زمان‌بندی پروژه بطوری که در نهایت منجر به رعایت حد بهینه در اهداف پروژه گردد، در ادبیات موضوع مدیریت پروژه با عنوان مسایل زمان‌بندی پروژه مطرح شده است که از مسایل پرکاربرد در تحقیق در عملیات محسوب می‌شود و یکی از زمینه‌های آشنا در تازه‌ترین تکنیک‌های بهینه‌سازی است (بابتیس و دماسی، ۲۰۰۴).

هدف اصلی مرحله‌ی زمان‌بندی پروژه، ایجاد یک برنامه‌ی زمان‌بندی امکان‌پذیر و عملی است که در آن زمان شروع و پایان هر یک از فعالیت‌ها مشخص شده باشد، محدودیت منابع و روابط پیش‌نیازی رعایت شده باشد و تا حد امکان اهداف تعیین شده برآورده گردد (سینگ و ارنست، ۲۰۱۱).

در زمان‌بندی پروژه، اغلب می‌توان زمان اتمام پروژه را بوسیله‌ی کاهش زمان برخی فعالیت‌ها و اعمال هزینه‌های اضافی سرعت بخشید. در گذشته تصمیمات مربوط به تسریع پروژه، شامل ملاحظات مربوط به موازنه‌ی زمان و هزینه بود، اما اخیراً پیشنهاد می‌شود که کیفیت پروژه نیز مورد توجه قرار گیرد (ایرانمنش و همکاران، ۲۰۰۸). مقوله‌ی کیفیت و توجه به آن یکی از اهداف پروژه محسوب می‌شود که در بدنه‌ی دانش مدیریت پروژه^۱ به صراحت عنوان شده است (بابو و سورش، ۱۹۹۶). مثلث زمان-هزینه-کیفیت به طور مستمر در طول چرخه‌ی عمر پروژه، بوسیله‌ی مدیران پروژه، دنبال می‌شود. انتظارات متفاوت ذینفعان پروژه و اتفاقاتی که

در طول پروژه رخ می‌دهد، ممکن است مدیر را مجبور به ایجاد تغییراتی در این اهداف کند. طبق مثلث زمان-هزینه-کیفیت، تغییر اعمال شده بر روی زمان و فشرده کردن آن، قطعاً منجر به تغییراتی بر هزینه و کیفیت خواهد شد (کرزنر، ۲۰۱۱). چرا که کیفیت پروژه به عنوان یکی از معیارهای اساسی موفقیت پروژه- متأثر از فشرده‌سازی^۱ زمان و تحمل هزینه اضافی است (خانگ و ماینت، ۱۹۹۹). همچنین انجام پروژه با حداقل هزینه و زمان و مطابق با استانداردهای عملکردی برای به دست آوردن مزیت رقابتی یکی از قابلیت‌های مدیریت پروژه محسوب می‌شود (چن و تسای، ۲۰۱۱). بنابراین پرداختن به مقوله‌ی کیفیت به عنوان یکی از اهداف پروژه و موازنه‌ی کیفیت و سایر اهداف پروژه مانند هزینه و زمان و همچنین تأثیر آن بر برنامه‌ریزی و به طور خاص زمان‌بندی پروژه در قالب مسایل موازنه زمان-هزینه-کیفیت مورد توجه می‌باشد.

پیشینه تحقیق

اولین تحقیق در زمینه موازنه زمان، هزینه و کیفیت توسط بابو و سورش (۱۹۹۶) انجام شد، آنها سه مدل برنامه‌ریزی خطی با سه تابع هدف مجزا برای زمان، هزینه و کیفیت ارائه کردند؛ که هر یک از سه مدل تنها یکی از اهداف را با محدود کردن دو هدف دیگر بهینه می‌سازد. در سال ۱۹۹۹ خانگ و ماینت مدل پیشنهادی بابو و سورش را در یک پروژه ساخت کارخانه سیمان، پیاده‌سازی و مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها ارزیابی قابلیت پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی بابو و سورش با در نظر داشتن ملاحظات مدیریتی و همچنین شناسایی مشکلات و مسائل بکارگیری آن روش بوده است.

الریص و کندیل در سال ۲۰۰۵ مسئله‌ی موازنه زمان، هزینه و کیفیت را در حالت گسسته برای پروژه‌های راه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. در مسئله‌ی آنها فرض بر این بوده که ترکیبات متفاوت منابع و مواد، منجر به زمان، هزینه و کیفیت متفاوت اجرای فعالیت‌ها می‌شود؛ آنها مسئله‌ی مورد نظر را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل نمودند. طاریان و

طاهری در سال ۲۰۰۶ با استفاده از الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس به حل مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت که به صورت سه مدل برنامه‌ریزی صحیح مرتبط مدل‌سازی شده، پرداخته‌اند. همچنین افشار و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان به حل مسئله‌ای سه هدفه برای موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت پرداختند. در سال ۲۰۱۲ مهدی‌زاده و محسنیان مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت را با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی چند هدفه حل کردند. در مسئله‌ی آنها موازنه‌ی زمان-هزینه با در نظر گرفتن عامل کیفیت پروژه به عنوان یکی دیگر از توابع هدف با پارامتر تصادفی تأخیر در فعالیت‌های پروژه بررسی شد. آنها برای حل مدل تصادفی چند منظوره از روش برنامه‌ریزی سازشی مقید شده‌ی تصادفی استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که عدم قطعیت محیط تأثیر نامطلوبی بر جواب‌های بهینه دارد، به طوری که همه اهداف روند بدتر شدن را در پیش می‌گیرند.

کیم و همکاران (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ی خود به دنبال روشی برای زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن کیفیت در کنار زمان و هزینه بودند. آنها بر خلاف سایر تحقیقات که به دنبال بیشینه کردن کیفیت اجرای فعالیت‌ها بوده‌اند، هزینه تحمیلی به پروژه را به دلیل کاهش کیفیت کلی پروژه در مسئله‌ی موازنه زمان-هزینه دخیل کردند و با بکارگیری برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به ارایه‌ی مدل پرداختند، در نهایت برای آزمون کارایی مدل، از مطالعه موردی در یک کارخانه تولید محصولات بهداشتی استفاده کردند.

توانا و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک مدل زمان‌بندی پروژه را با اهداف کمینه‌سازی زمان و هزینه و بیشینه‌سازی کیفیت با استفاده از الگوریتم تکاملی چندهدفه حل کردند و نتایج را با روش اپسیلون محدودیت مقایسه کردند. نتایج حاکی از تسلط نسبی الگوریتم تکاملی چند هدفه بر روش اپسیلون محدودیت بود. سیف و همکاران در سال ۲۰۱۵، مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت را در پروژه‌های نرم‌افزاری با هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه و بیشینه‌سازی کیفیت با یک الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل کردند، نتایج حاکی از دقت بالای جواب‌های به دست آمده بود.

در سال ۲۰۱۵ منقسمی و همکاران، برای حل مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت در پروژه‌های ساخت و ساز از یک مدل جدید تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده کردند. آنها برای به دست آوردن وزن اهداف، از تکنیک آنتروپی شانون استفاده کردند و مسئله را با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه و یک رویکرد رتبه‌بندی نامغلوب حل کردند و سپس برای رتبه‌بندی جواب‌های پارتو از رویکرد استدلال شواهد^۱ استفاده کردند.

جنبه‌ی دیگری که در ادبیات موضوع مسائل زمان‌بندی پروژه مورد توجه بوده است، بکارگیری مجموعه‌ها و منطق فازی در مدل‌سازی یا حل این مسائل می‌باشد. در این راستا پژوهش‌هایی انجام شده است، که جدول (۱) خلاصه‌ای از آنها را نشان می‌دهد.

مطالعاتی که تا کنون در زمینه مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت انجام گرفته با رویکردی غیر واقع‌بینانه، با فرض اینکه کیفیت هیچ وابستگی به زمان و هزینه‌ی انجام فعالیت ندارد، مدل‌سازی شده‌اند ((طارقیان و طاهری، ۲۰۰۶)، (سیف و همکاران، ۲۰۱۵)، (نبی‌پورافروزی، ۲۰۱۴)). اما باید توجه داشت که کاهش مدت زمان انجام فعالیت‌ها می‌تواند در کیفیت اجرای آنها و میزان نزدیکی ارقام قابل تحویل پروژه به سطح انتظارات کارفرما یا مشتری تأثیرگذار باشد و عملاً از سطح کیفیت فعالیت‌ها بکاهد، از طرفی می‌توان با اِعمال هزینه‌های بیشتر، کیفیت کاهش یافته را تا سطح مطلوب جبران نمود. بنابراین چالش اصلی پیش روی مدیران پروژه، انتخاب رویکرد مناسب جهت یافتن ترکیب‌های مناسب زمان، هزینه و کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه است.

جدول ۱. مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمان‌بندی پروژه بر مبنای تئوری فازی

ردیف	پژوهشگران (سال انتشار)	اهداف	روش حل	توضیحات
۱	شتهادریان و همکاران (۲۰۰۸)	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان	الگوریتم ژنتیک چندهدفه	ارائه‌ی یک ساختار فازی برای هزینه‌های مستقیم کل، مدل‌سازی بر مبنای منطق فازی و حل یک مثال عددی برای بررسی کارایی مدل
۲	شتهادریان و همکاران (۲۰۰۹)	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان	الگوریتم ژنتیک چندهدفه	مدل‌سازی با فرض فازی بودن زمان و هزینه‌های اجرا، تعریف ریسک به کمک آلفا برشها و حل دو مثال عددی برای سطوح مختلف ریسک
۳	ژانگ و زینگ (۲۰۱۰)	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان بیشینه‌سازی کیفیت	الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات	استفاده از اعداد فازی برای توصیف زمان، هزینه و کیفیت؛ بکارگیری رویکرد مطلوبیت چندشاخصه‌ی فازی و عملگرهای حسابی فازی برای حل مدل و استفاده از داده‌های واقعی ساخت پل برای بررسی قابلیت‌های مدل و روش حل پیشنهادی
۴	چن و تسای (۲۰۱۱)	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان	استفاده از مفهوم آلفا برش و تبدیل مسئله به دو مدل دو سطحی پارامتریک	استفاده از اصل گسترش زاده در منطق فازی برای مدل‌سازی مسئله با پارامترهای فازی و ارائه‌ی دو مدل برنامه‌ریزی دو سطحی بر پایه‌ی آلفا برشها به منظور یافتن کرانهای بالا و پایین برای هزینه‌ی فشرده‌سازی و حل یک مثال عددی.
۵	زو و همکاران (۲۰۱۲)	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان کمینه‌سازی اثرات محیطی	الگوریتم ژنتیک فازی ترکیبی	مدل‌سازی مسئله با فرض فازی بودن زمان اجرای پروژه، استفاده از عملگر مقادیر مورد انتظار با اندیس‌های خوشبینانه و بدبینانه برای غیرفازی‌سازی پارامترها و پیاده‌سازی و حل مدل برای یک پروژه‌ی

برق-آبی				
ارایه‌ی یک الگوی ژنتیک بر پایه‌ی خوشه‌بندی فازی برای حل مسئله و پیاده‌سازی مدل برای یک پروژه‌ی ساخت بزرگراه	الگوریتم ژنتیک	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان پیشینه‌سازی کیفیت	مانگل و همکاران (۲۰۱۳)	۶
مدل‌سازی بر مبنای اعداد فازی مثلثی و پیاده‌سازی در یک پروژه مورد کاوی در صنعت نفت.	الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان پیشینه‌سازی کیفیت	براهیم‌نژاد و همکاران (۲۰۱۳)	۷
در نظر گرفتن اعداد فازی تصادفی برای زمان اجرای فعالیت‌ها و مدل‌سازی سه نوع مسئله‌ی موازنه‌ی زمان هزینه، ارائه‌ی یک الگوریتم جستجو بر مبنای شبیه‌سازی تصادفی فازی برای یافتن جواب‌های شبه‌بهینه	الگوریتم ژنتیک	کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی زمان	کی و ما (۲۰۱۴)	۸

تعیین چگونگی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت در پروژه و اینکه فشردگی فعالیت‌های پروژه تا چه حد منجر به افزایش هزینه و کاهش عملکرد کیفی آن خواهد شد، موضوع اصلی این پژوهش است. بدین منظور در پژوهش حاضر، مدل‌سازی مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت با توجه به وابستگی کیفیت اجرای فعالیت‌ها به زمان و هزینه انجام می‌گردد. در این راستا، ابتدا سعی شده با رویکردی کاملاً جدید، کیفیت به عنوان تابعی از زمان و هزینه توصیف گردد، بطوری که از دو منظر به تغییرات کیفیت نگریسته شده است. اول اینکه فشردگی زمان اجرای فعالیت‌ها منجر به کاهش کیفیت اجرای آنها می‌گردد و دوم اینکه با اعمال هزینه‌های بیشتر می‌توان سطح کیفیت کاهش یافته، به دلیل فشردگی زمان، را به

سطح مطلوب رساند. پس از توصیف کیفیت فعالیت‌ها (وابسته به زمان و هزینه)، برای تعیین کیفیت کلی اجرای پروژه از یک الگوی ماکس-مین استفاده شده است. لازم به توضیح است که پژوهش‌های قبلی برای محاسبه‌ی کیفیت کلی پروژه از مجموع کیفیت فعالیت‌ها استفاده کرده‌اند (به عنوان مثال (طارقیان و طاهری، ۲۰۰۶)، (سیف و همکاران، ۲۰۱۵)، (نبی-پورافروزی، ۲۰۱۴)، (توانا و همکاران، ۲۰۱۴)، (ابراهیم نژاد و همکاران، ۲۰۱۳) را ببینید)، اما پارامتر کیفیت، ذاتاً جمع‌پذیر نبوده و منطقی‌اً باید از یک الگوی ماکس-مین و یا ضربی در توصیف آن استفاده نمود.

برای فرمول‌بندی مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت، از یک مدل سه هدفه استفاده شده و برای حل آن، به دلیل ساختار ویژه مدل پیشنهادی، از یک رویکرد تصمیم‌گیری فازی استفاده شده است. از جمله دلایل استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی، ایجاد سازگاری منطقی و تناسب بین اهداف و محدودیت‌هاست؛ چرا که این روش ابهامات مربوط به شناخت درست ترجیحات (وزن اهداف) توسط تصمیم‌گیرنده را از بین می‌برد. از طرفی بر خلاف اکثر روش‌های حل مسایل چند هدفه که مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو (با صرف زمان زیاد) ارائه می‌کنند و تصمیم‌گیرنده را به دلیل تعدد جواب دچار سردرگمی می‌نمایند، رویکرد پیشنهادی تنها یک جواب کارا به عنوان ارجح‌ترین جواب تولید می‌کند که موازنه‌ی منطقی بین سه هدف برقرار می‌سازد.

تعریف و مدل‌سازی مسئله

در این بخش ابتدا به تعریف مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت با رویکردی جدید پرداخته می‌شود و سپس مدل ریاضی آن فرمول‌بندی می‌گردد. در این راستا سعی شده به ارتباط کلیدی زمان و کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه اشاره شود.

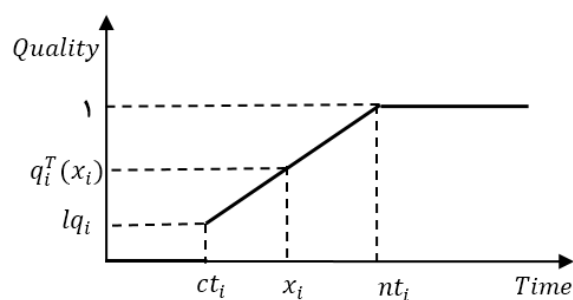
تعریف مسئله

پروژه‌ای با n فعالیت مد نظر است که هر فعالیت آن دارای یک زمان اجرای نرمال و یک زمان اجرای فشرده می‌باشد، متناظر با این زمان‌ها برای هر فعالیت به ترتیب یک هزینه نرمال و

یک هزینه فشرده‌سازی پیش‌بینی شده است. هدف از حل مسئله‌ی موازنه‌ی زمان-هزینه، انجام پروژه در تاریخ از پیش تعیین شده است به نحوی که هزینه‌های ناشی از فشرده‌سازی زمان انجام فعالیت‌ها در حداقل ممکن باشد. پر واضح است که انجام یک فعالیت در زمانی کوتاه‌تر از زمان نرمال، باعث کاهش کیفیت انجام آن می‌شود، بنابراین لازم است کیفیت به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در فرایند موازنه‌ی زمان-هزینه لحاظ گردد. در حالت کلی، کیفیت به صورت میزان انطباق ویژگی‌های کیفی یک فعالیت با سطوح استاندارد تعریف شده برای آن فعالیت تعریف می‌شود که معمولاً به صورت درصد بیان می‌گردد. در این پژوهش فرض بر این است که کیفیت انجام فعالیت‌ها به زمان انجام آنها وابسته است. برای نشان دادن این وابستگی، زمان بصورت یک عدد فازی توصیف شده است، که درجه‌ی عضویت آن، کیفیت انجام فعالیت را نشان می‌دهد. بدین ترتیب، چنانچه فعالیت مورد نظر در زمان نرمال انجام شود، کیفیت اجرای آن در بالاترین سطح ممکن (درجه عضویت یک) خواهد بود؛ از طرف دیگر انجام فعالیت در کوتاه‌ترین زمان ممکن، کیفیت اجرای فعالیت را تا پایین‌ترین سطح ممکن (درجه عضویت کمتر از یک) کاهش می‌دهد. در کنار تأثیر منفی‌ای که فشرده‌سازی زمان اجرای فعالیت بر کیفیت اجرای آن دارد، ممکن است فعالیت‌ها به گونه‌ای باشند که بتوان با پرداخت هزینه‌های بیشتر، از کاهش کیفیت اجرای آنها ممانعت کرد. به عنوان مثال ممکن است در اجرای یک فعالیت بتوان از تجهیزات پیشرفته‌ای استفاده نمود، که باعث بهبود کیفیت اجرا شود. استفاده از چنین تجهیزات پیشرفته‌ای هزینه‌های جدیدی به پروژه تحمیل خواهد کرد که ما این هزینه‌ها را "هزینه‌های ایجاد کیفیت" می‌نامیم. بنابراین کیفیت نهایی به زمان اجرا و هزینه‌ی ایجاد کیفیت وابسته است، که هرچه زمان اجرا کوتاه‌تر گردد؛ سطح کیفیت اجرای فعالیت کاهش می‌یابد، از سوی دیگر با افزایش هزینه‌های ایجاد کیفیت، سطح کیفی اجرای فعالیت افزایش می‌یابد. با این اوصاف اگر زمان‌های نرمال و فشرده‌ی فعالیت t_i به ترتیب برابر با nt_i و ct_i باشد زمان اجرای این فعالیت با یک عدد فازی \tilde{x}_i که درجه‌ی عضویت آن متناظر با کیفیت اجرا می‌باشد، قابل توصیف است. بدین ترتیب اگر x_i متغیر فازی مربوط به عدد فازی \tilde{x}_i باشد تابع عضویت این عدد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_i^T(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < ct_i \\ lq_i + \frac{(x_i - ct_i)(1 - lq_i)}{nt_i - ct_i} & ct_i \leq x_i \leq nt_i \\ 1 & x_i > nt_i \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، x_i متغیر متناظر با زمان اجرای فعالیت، lq_i پایین‌ترین سطح کیفیت اجرای فعالیت (در حالت فشرده‌سازی کامل) و $q_i^T(x_i)$ کیفیت اجرای فعالیت i با زمان x_i می‌باشد. واضح است که اگر فعالیت در زمان نرمال خود انجام شود (فشرده نشود) سطح کیفیت اجرا کاهش نمی‌یابد و فعالیت کیفیت نرمال خود (یعنی یک) را دارا خواهد بود. نمودار (۱) تابع عضویت عدد فازی توصیف‌کننده‌ی زمان اجرا و کیفیت متناظر را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است، که در مسائل دنیای واقعی، ارتباط بین کیفیت اجرا و زمان انجام یک فعالیت غیرخطی است، اما از آنجا که بازه‌ی زمانی فشرده‌سازی هر فعالیت در مقایسه با زمان اجرای پروژه کوتاه است، لذا می‌توان با اندکی اغماض از تقریب خطی برای توصیف ارتباط بین زمان فشرده‌سازی انجام فعالیت و کیفیت انجام آن استفاده کرد. بر این اساس تابع عضویت پیشنهادی در فرمول (۱) خطی تعریف شده است.

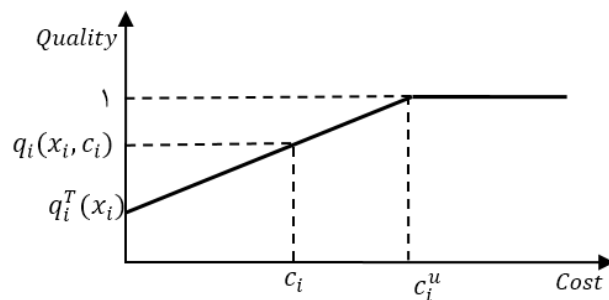


نمودار ۱. تابع کیفیت اجرای فعالیت i وابسته به زمان اجرا

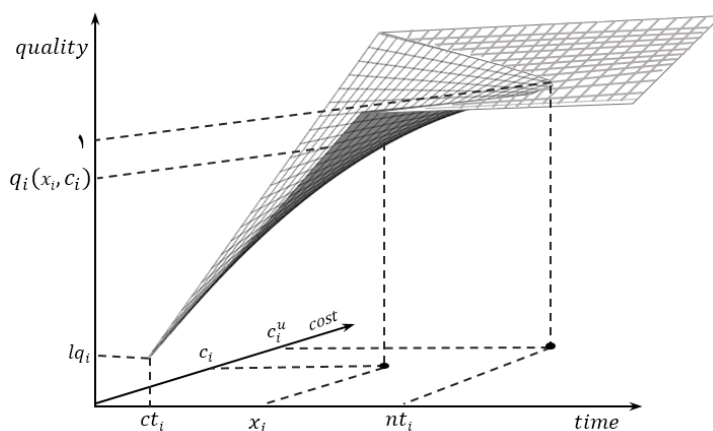
با کاهش زمان اجرای فعالیت، کیفیت انجام آن کاهش می‌یابد و به سطح $q_i^T(x_i)$ می‌رسد، در این صورت می‌توان با اعمال هزینه‌های بیشتر، سطح کیفیت حاصل از فشردن زمان اجرا (یعنی $q_i^T(x_i)$) را افزایش داد. بدین منظور اگر cc_i^u نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی لازم برای افزایش سطح کیفیت به بالاترین مقدار ممکن (یعنی یک) و c_i متغیر مربوط به هزینه‌ی لازم جهت ارتقاء کیفیت باشد، آنگاه می‌توان تابع کیفیت وابسته به هزینه و زمان را به صورت زیر تعریف نمود.

$$q_i(x_i, c_i) = \begin{cases} 0 & c_i < 0, x_i < ct_i \\ q_i^T(x_i) + \frac{c_i(1 - q_i^T(x_i))}{c_i^u} & 0 \leq c_i \leq c_i^u, ct_i \leq x_i \leq nt_i \\ 1 & c_i > c_i^u \text{ OR } x_i > nt_i \end{cases} \quad (2)$$

اگر زمان اجرای فعالیت (یعنی x_i) یک مقدار مشخص و ثابت باشد، آنگاه $q_i^T(x_i)$ ثابت بوده و تابع کیفیت فقط وابسته به هزینه خواهد شد، در این وضعیت نمودار (۲) تابع کیفیت q_i را توصیف می‌کند. اما واقعیت آن است که x_i ها متغیرند و بنابراین $q_i(x_i, c_i)$ به عنوان یک تابع دو متغیره به صورت نمودار (۳) قابل نمایش است.



نمودار ۲. تابع کیفیت اجرای فعالیت i وابسته به هزینه‌ی ارتقاء کیفیت، با فرض ثابت بودن x_i



نمودار ۳. تابع کیفیت اجرای فعالیت i وابسته به زمان اجرا و هزینه ارتقاء کیفیت

همانطور که در نمودار (۳) مشاهده می‌شود، کیفیت انجام فعالیت، که در رابطه‌ی (۲) تعریف شده، به زمان اجرا (x_i) و مقدار هزینه‌ی ایجاد کیفیت (c_i) وابسته است و این وابستگی به دلیل حضور عبارت $c_i(1 - q_i^T(x_i))$ غیر خطی است.

نمادها و متغیرهای مدل پیشنهادی

نمادهایی که در مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در ادامه بیان می‌شوند.

مجموعه‌ها و پارامترها:

V : مجموعه تمام فعالیت‌ها (گره‌ها).

E : مجموعه تمام کمان‌ها جهت لحاظ کردن روابط پیش‌نیازی.

E_{FS} : مجموعه‌ی کمان‌هایی مثل $(i, j) \in E$ که در آنها لازم است فعالیت j -ام با یک حداقل تأخیر مشخص پس از پایان فعالیت i -ام آغاز شود.

E_{SS} : مجموعه‌ی کمان‌هایی مثل $(i, j) \in E$ که در آنها لازم است فعالیت j -ام با یک حداقل تأخیر مشخص پس از آغاز فعالیت i -ام آغاز شود.

E_{SF} : مجموعه‌ی کمان‌هایی مثل $(i, j) \in E$ که در آنها لازم است فعالیت j -ام با یک حداقل تأخیر مشخص پس از آغاز فعالیت i -ام به اتمام رسد.

E_{FF} : مجموعه‌ی کمان‌هایی مثل $(i, j) \in E$ که در آنها لازم است فعالیت j -ام با یک حداقل تأخیر مشخص پس از پایان فعالیت i -ام به اتمام رسد.

FS_{ij} : حداقل مدت زمان لازم از پایان فعالیت i تا شروع فعالیت j .

SS_{ij} : حداقل مدت زمان لازم از شروع فعالیت i تا شروع فعالیت j .

SF_{ij} : حداقل مدت زمان لازم از شروع فعالیت i تا پایان فعالیت j .

FF_{ij} : حداقل مدت زمان لازم از پایان فعالیت i تا پایان فعالیت j .

nt_i : زمان نرمال انجام فعالیت $i \in V$.

ct_i : زمان فشرده انجام فعالیت $i \in V$.

nc_i : هزینه‌ی مربوط به انجام فعالیت $i \in V$ در زمان نرمال.

cc_i : هزینه‌ی مربوط به انجام فعالیت $i \in V$ در زمان فشرده.

$$: CS_i^T = \frac{cc_i - nc_i}{nt_i - ct_i}$$

ضریب هزینه‌ی وابسته به فشرده‌سازی زمان انجام فعالیت $i \in V$ (میزان افزایش هزینه به ازای یک واحد کاهش در زمان).

lq_i : پایین‌ترین سطح کیفیت اجرای فعالیت $i \in V$ در مواقعی که زمان اجرای فعالیت به‌طور کامل فشرده‌سازی شده است.

c_i^u : هزینه‌ی مازاد بر cc_i که جهت ارتقای کیفیت اجرای فعالیت $i \in V$ به سطح یک پرداخت می‌شود.

$$: CS_i^Q = \frac{c_i^u}{(1 - lq_i)}$$

ضریب هزینه‌ی وابسته به ارتقاء کیفیت برای فعالیت $i \in V$ (میزان افزایش هزینه به ازای یک درصد افزایش در کیفیت).

T_p : زمان از پیش تعیین شده برای اتمام پروژه که توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود.

متغیرهای تصمیم:

x_i : زمان انجام فعالیت $i \in V$.

s_i : زمان شروع فعالیت $i \in V$.

c_i : هزینه ارتقاء کیفیت فعالیت $i \in V$.

$q_i^T(x_i)$: کیفیت انجام فعالیت $i \in V$ برحسب زمان انجام آن یعنی x_i (بدون اینکه هزینه ارتقاء کیفیت پرداخت شود).

$q_i(x_i, c_i)$: کیفیت نهایی انجام فعالیت $i \in V$ برحسب زمان انجام و هزینه ارتقاء کیفیت.

C = هزینه کل مربوط به فشرده سازی زمان اجرا و ارتقاء کیفیت فعالیت های پروژه.

T = زمان کل اجرای پروژه.

Q = کیفیت کلی اجرای پروژه.

مدل ریاضی مسئله ی پیشنهادی

فرض کنید شبکه ی مربوط به پروژه، یک گراف جهت دار بدون حلقه به صورت $G = (V, E)$ تعریف شود، که در آن V مجموعه ی گره ها (شامل n گره مربوط به فعالیت های اصلی و یک گره انتهایی مجازی) و E مجموعه ی کمان های توصیف کننده ی روابط پیش نیازی بین فعالیت ها می باشد. مدل ریاضی مربوط به مسأله ی موازنه ی زمان، هزینه و کیفیت، به صورت برنامه ریزی سه هدفه ی زیر فرمول بندی می شود:

$\min T = s_{n+1}$	(a)
$\min C = \sum_{i \in V} CS_i^T (nt_i - x_i) + \sum_{i \in V} CS_i^Q [q_i(x_i, c_i) - q_i^T(x_i)]$	(b)
$\max Q = \min_{i \in V} \{q_i(x_i, c_i)\}$	(c)
$s.t. \quad s_i + SS_{ij} \leq s_j$	$\forall (i, j) \in E_{SS}$ (d)
$s_i + SF_{ij} - x_j \leq s_j$	$\forall (i, j) \in E_{SF}$ (e)
$s_i + x_i + FS_{ij} \leq s_j$	$\forall (i, j) \in E_{FS}$ (f)
$s_i + x_i + FF_{ij} - x_j \leq s_j$	$\forall (i, j) \in E_{FF}$ (g)
$ct_i \leq x_i \leq nt_i$	$\forall i \in V$ (h)
$s_{n+1} \leq T_p$	(i)
$x_i \geq 0, s_i \geq 0$	$\forall i \in V$ (j)

در مدل فوق (۳.a) تابع هدف متناظر با زمان اجرای پروژه است، که به دنبال حداقل‌سازی آن هستیم، (۳.b) تابع هدف هزینه است؛ که شامل دو قسمت مجزا می‌باشد. قسمت اول مربوط به هزینه‌ی فشرده‌سازی زمان اجرای فعالیت‌هاست، که به صورت مجموع هزینه‌ی فشرده‌سازی تک‌تک فعالیت‌ها تعریف شده است و قسمت دوم مربوط به هزینه‌های ارتقاء کیفیت فعالیت‌ها پس از فشرده‌سازی می‌باشد. لازم به توضیح است که عبارت $q_i(x_i, c_i) - q_i^T(x_i)$ در قسمت دوم نشان دهنده‌ی میزان ارتقاء کیفیت فعالیت i ام (برحسب درصد) پس از فشرده‌سازی است، که این مقدار در ضریب هزینه‌ی وابسته به ارتقاء کیفیت (یعنی CS_i^Q) ضرب می‌شود. (۳.c) تابع هدف مربوط به کیفیت اجرای پروژه می‌باشد. در این مقاله کیفیت کلی اجرای پروژه برابر با کمینه‌ی کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه در نظر گرفته می‌شود، که بدنبال حداکثرسازی آن هستیم. محدودیت‌های (۳.d) تا (۳.g) مربوط به رعایت روابط پیش‌نیازی عمومی می‌باشند. محدودیت (۳.h) نشان می‌دهد که زمان اجرای فعالیت i ام باید بین زمان نرمال و زمان فشرده باشد. محدودیت (۳.i) تضمین‌کننده‌ی اتمام پروژه پیش از زمان تعیین شده توسط تصمیم‌گیرنده (T_p) می‌باشد.

رویکرد حل مسئله

در این بخش مدل پیشنهادی مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت (مدل (۳))، با یک رویکرد تصمیم‌گیری فازی حل می‌گردد. بدین منظور ابتدا مروری بر رویکرد تصمیم‌گیری فازی داشته و سپس توابع هدف زمان و هزینه به صورت آرمان‌های فازی توصیف می‌شود. بعد از آن، مدل تحقیق با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی، به صورت یک مدل برنامه‌ریزی تک‌هدفه‌ی قابل حل، فرموله می‌شود.

تصمیم‌گیری فازی

هنگامی که فرایند تصمیم‌گیری در یک محیط فازی انجام می‌شود، سازگاری و تناسب بین آرمان‌ها و محدودیت‌ها یک ویژگی بسیار مهم است. این سازگاری تفاوت‌های بین آنها را از بین برده و یک راه نسبتاً ساده برای بیان مفهوم تصمیم بر اساس اهداف، آرمان‌ها و محدودیت‌های یک فرایند تصمیم‌گیری به دست می‌دهد. بر اساس این خاصیت سازگاری و تناسب، بلمن و زاده پیشنهاد کردند که یک تصمیم فازی به صورت یک مجموعه فازی از انتخاب‌های ناشی از اشتراک اهداف (آرمان‌ها) و محدودیت‌ها تعریف شود (بلمن و زاده، ۱۹۷۰). بدین منظور آنها سه مفهوم اصلی را معرفی کردند: آرمان یا هدف فازی^۱، محدودیت فازی^۲ و تصمیم فازی^۳، سپس کاربرد این مفاهیم را در فرایندهای تصمیم‌گیری تحت شرایط فازی در یک محیط فازی ارائه نمودند.

فرض کنید X مجموعه‌ای از گزینه‌های مختلف برای یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری تحت شرایطی خاص باشد. یک آرمان فازی G ، مجموعه‌ای فازی روی X با تابع عضویت μ_G و یک محدودیت یا قید فازی C ، مجموعه‌ای فازی روی X با تابع عضویت μ_C می‌باشد. پر واضح است که هر دوی آرمان و محدودیت‌های فازی میل دارند همزمان در بهترین وضعیت خود برقرار باشند، بلمن و زاده (۱۹۷۰) تصمیم D ، حاصل از آرمان فازی G و محدودیت

1-Fuzzy Goal

2-Fuzzy Constraint

3-Fuzzy Decision

فازی C را به صورت اشتراک G و C تعریف کردند. در واقع مجموعه‌ی فازی D به صورت $D = G \cap C$ با تابع عضویت زیر مشخص می‌گردد:

$$\mu_D(x) = \min\{\mu_G(x), \mu_C(x)\} \quad (4)$$

که در آن $x \in X$ یک گزینه‌ی مشخص می‌باشد. بر این اساس گزینه‌ی بهینه، گزینه‌ای است که درجه‌ی عضویت آن در مجموعه‌ی D دارای بالاترین مقدار ممکن باشد. به زبان ریاضی، x^* بهترین گزینه بر اساس تصمیم فازی D است اگر:

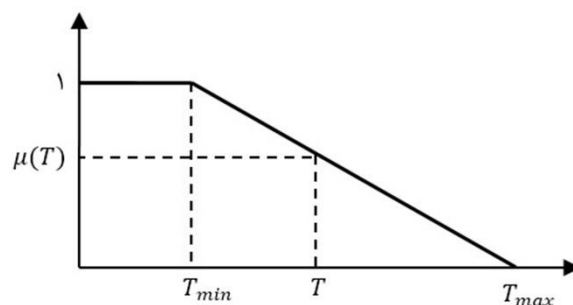
$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x) = \max_{x \in X} \min\{\mu_G(x), \mu_C(x)\} \quad (5)$$

در ادامه به حل مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا اهداف مربوط به زمان و هزینه در قالب آرمان‌هایی فازی توصیف خواهند شد و با توجه به ساختار فازی که قبلاً برای کیفیت تعریف گردید، معیار تصمیم‌گیری بلمن-زاده برای یافتن جواب بهینه‌ی مسئله استفاده می‌شود.

فازی سازی توابع هدف مسئله‌ی پیشنهادی

برای توصیف تابع هدف کمینه‌سازی زمان اجرای پروژه به صورت یک آرمان فازی از محدودیت مربوط به کران‌های پایین و بالای مجاز برای زمان اجرای پروژه استفاده می‌شود. کران بالا برای زمان انجام پروژه همان زمان نرمال اجرای پروژه (T_{\max}) است و کران پایین را می‌توان برابر با زمان اجرای پروژه در حالت فشرده‌گی کامل زمان اجرای فعالیت‌ها (T_{\min}) در نظر گرفت. بنابراین تابع عضویت مربوط به آرمان فازی زمان اجرای پروژه به صورت رابطه‌ی (۶) و نمودار (۴) توصیف می‌گردد.

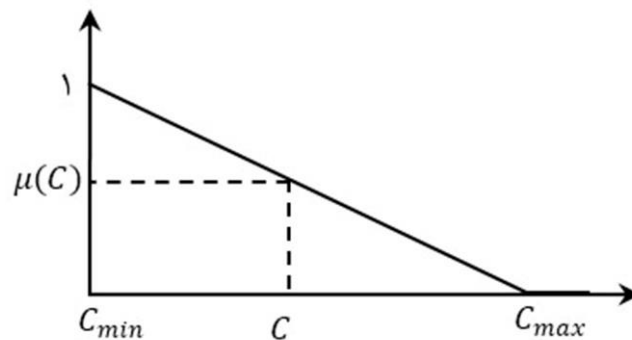
$$\mu(T) = \begin{cases} 1 & T < T_{\min} \\ \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}} & T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ 0 & T > T_{\max} \end{cases} \quad (۶)$$



نمودار ۴. تابع عضویت مربوط به زمان اجرای پروژه

برای توصیف تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی انجام پروژه، به صورت یک آرمان فازی، از هزینه‌های مربوط به فشردگی‌سازی زمان و ارتقاء کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه استفاده می‌کنیم. در این صورت حد پایین هزینه مربوط به وضعیتی است که فشردگی‌سازی انجام نشود و هیچ هزینه‌ای پرداخت نگردد. حد بالای هزینه‌ی فشردگی‌سازی مربوط به زمانی است که پروژه در حداقل زمان ممکن انجام شود و مجبور باشیم کیفیت تمام فعالیت‌ها را، که به دلیل فشردگی‌سازی کاهش یافته‌اند، به سطح یک ارتقاء دهیم؛ بنابراین تابع عضویت مربوط به آرمان فازی هزینه‌ی فشردگی‌سازی اجرای پروژه در رابطه‌ی (۷) و نمودار (۵) توصیف می‌شود.

$$\pi(C) = \begin{cases} 1 & C < C_{\min} \\ \frac{C_{\max} - C}{C_{\max} - C_{\min}} & C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ 0 & C > C_{\max} \end{cases} \quad (۷)$$



نمودار ۵. تابع عضویت هزینه‌ی فشرده‌سازی اجرای پروژه

بازنویسی مسئله با استفاده از رویکرد تصمیم‌فازی

با توجه به مطالب فوق و اینکه هدف اصلی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت، اجرای فعالیت‌های پروژه در حداقل زمان، حداقل هزینه با حداکثر کیفیت است، لذا با استفاده از معیار تصمیم‌گیری بلمن-زاده مسأله‌ی تصمیم‌گیری نهایی به صورت زیر قابل توصیف است.

$$\max_{x \in X} - \min_{i \in V} \{ \mu(T), \pi(C), q_i(x_i, c_i) \} \quad (8)$$

با فرض $\alpha = \min_{i \in V} \{ \mu(T), \pi(C), q_i(x_i, c_i) \}$ و با توجه به اهداف و محدودیت‌های مسأله‌ی (۳) مدل (۸) به صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$\begin{aligned}
& \max \quad \alpha \\
& s.t. \quad (T_{\max} - T_{\min})\alpha + s_{n+1} \leq T_{\max} \\
& \quad (C_{\max} - C_{\min})\alpha + \sum_{i \in V} CS_i^T (nt_i - x_i) + \sum_{i \in V} CS_i^Q [q_i(x_i, c_i) - q_i^T(x_i)] \leq C_{\max} \\
& \quad \alpha \leq q_i(x_i, c_i) = q_i^T(x_i) + \frac{c_i(1 - q_i^T(x_i))}{c_i^u} \quad i \in V \\
& \quad s_i + x_i + FS_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{FS} \quad (9) \\
& \quad s_i + SS_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{SS} \\
& \quad s_i + SF_{ij} - x_j \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{SF} \\
& \quad s_i + x_i + FF_{ij} - x_j \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{FF} \\
& \quad ct_i \leq x_i \leq nt_i \quad \forall i \in V \\
& \quad s_{n+1} \leq T_p \\
& \quad x_i \geq 0, s_i \geq 0 \quad \forall i \in V
\end{aligned}$$

سه محدودیت اول، به ترتیب متناظر با آرمان‌های فازی زمان اجرای پروژه، هزینه‌ی فشرده‌سازی زمان انجام پروژه و کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه می‌باشند، که فرم‌های ساده شده‌ی $\alpha \leq \mu(T)$ ، $\alpha \leq \pi(C)$ و $\alpha \leq q_i(x_i, c_i)$ هستند. بقیه‌ی محدودیت‌ها، همان محدودیت‌های مدل اصلی تحقیق (مدل (۳)) می‌باشند. با توجه به فرمول‌های مربوط به $q_i(x_i, c_i)$ و $q_i^T(x_i)$ مدل (۹) به صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$\begin{aligned}
\max \quad & \alpha \\
s.t. \quad & (T_{\max} - T_{\min})\alpha + s_{n+1} \leq T_{\max} \\
& (C_{\max} - C_{\min})\alpha + \sum_{i \in V} CS_i^T (nt_i - x_i) + \sum_{i \in V} CS_i^Q \left[\frac{c_i}{c_i^u} (1 - lq_i) \left(\frac{nt_i - x_i}{nt_i - ct_i} \right) \right] \leq C_{\max} \\
& (nt_i - ct_i)\alpha \leq lq_i (nt_i - ct_i) + (1 - lq_i) \left[x_i - ct_i + \frac{c_i}{c_i^u} (nt_i - x_i) \right] \quad i \in V \\
& s_i + x_i + FS_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{FS} \\
& s_i + SS_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{SS} \\
& s_i + SF_{ij} - x_j \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{SF} \\
& s_i + x_i + FF_{ij} - x_j \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{FF} \\
& ct_i \leq x_i \leq nt_i \quad \forall i \in V \\
& s_{n+1} \leq T_p \\
& x_i \geq 0, s_i \geq 0 \quad \forall i \in V
\end{aligned} \tag{10}$$

مدل (۱۰) یک مدل جامع برای موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت در حالت پیوسته است که علاوه بر رعایت محدودیت‌های پیش‌نیازی عمومی و محدودیت فشردگی زمان اجرای پروژه، وابستگی کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه به زمان فشردگی و هزینه‌ی ایجاد کیفیت نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که این مدل به دلیل حضور عبارت $\frac{c_i}{c_i^u} (nt_i - x_i)$ در محدودیت‌های دوم و سوم، یک مدل غیرخطی است، که در بخش ۴ آن را برای حل یک مسئله‌ی واقعی بکار می‌بریم. پر واضح است که جواب حاصل از حل مدل فوق در بردارنده‌ی زمان انجام فعالیت‌ها، زمان اجرای پروژه، هزینه‌های فشردگی، هزینه‌های ایجاد کیفیت و کیفیت نهایی اجرای فعالیت‌ها می‌باشد. این جواب یک موازنه‌ی منطقی بین زمان، هزینه و کیفیت برقرار می‌کند.

در بخش بعد با اعمال مفروضات ساده‌تری به مسئله، یک حالت خاص از مدل (۱۰) ارائه می‌شود.

یک حالت خاص از مسئله‌ی پیشنهادی

در مدل (۱۰) تلاش می‌شود که یک موازنه‌ی منطقی بین زمان، هزینه و کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه بدست آید. گاهی اوقات ممکن است جستجوی جوابی مد نظر باشد که در آن زمان انجام پروژه، به گونه‌ای حداقل شود که درجه‌ی تحقق اهداف هزینه و کیفیت از یک سطح حداقلی مشخص، مثل λ ، برخوردار باشد. با چنین فرضی، می‌توان مدل زیر را پیشنهاد کرد که در آن تابع هدف، مینیمم سازی زمان اجرای پروژه است و در مقایسه با مدل (۱۰)، محدودیت مربوط به تابع عضویت زمان اجرا و محدودیت زمان ازپیش تعیین شده، حذف و محدودیت حداقل درجه‌ی تحقق اهداف هزینه و کیفیت اضافه گردیده است.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & s_{n+1} \\
 \text{s.t.} \quad & \alpha \geq \lambda \\
 & (C_{\max} - C_{\min})\alpha + \sum_{i \in V} CS_i^T (nt_i - x_i) + \sum_{i \in V} CS_i^Q \left[\frac{c_i}{c_i^u} (1 - lq_i) \left(\frac{nt_i - x_i}{nt_i - ct_i} \right) \right] \leq C_{\max} \\
 & (nt_i - ct_i)\alpha \leq lq_i(nt_i - ct_i) + (1 - lq_i) \left[x_i - ct_i + \frac{c_i}{c_i^u} (nt_i - x_i) \right] \quad i \in V \\
 & s_i + x_i + FS_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{FS} \quad (11) \\
 & s_i + SS_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{SS} \\
 & s_i + SF_{ij} - x_j \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{SF} \\
 & s_i + x_i + FF_{ij} - x_j \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{FF} \\
 & ct_i \leq x_i \leq nt_i \quad \forall i \in V \\
 & x_i \geq 0, s_i \geq 0 \quad \forall i \in V
 \end{aligned}$$

پیشنهاد مقدار مناسب پارامتر λ می‌تواند توسط تصمیم‌گیرنده و با توجه به اولویت اهداف انجام شود. همچنین می‌توان با تغییر پارامتر λ ، در بازه‌ی صفر تا یک، مجموعه‌ای از جوابها را بدست آورد که با پیشنهاد آنها، تصمیم‌گیرنده بتواند گزینه‌ی مطلوب خود را انتخاب نماید.

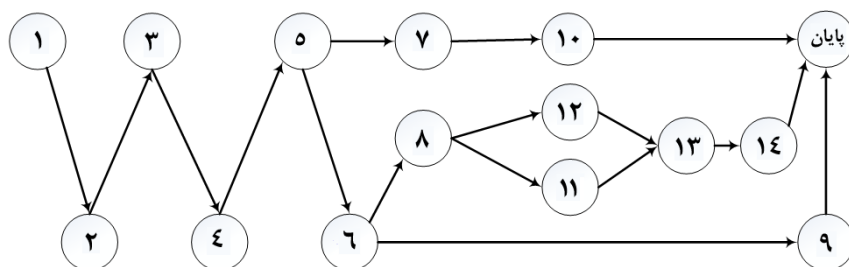
در ادامه، کاربردی از مدل‌ها و رویکرد حل پیشنهادی برای یک مسأله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت با داده‌های واقعی ارایه می‌گردد.

مطالعه‌ی موردی

طبق قانون تأسیس سازمان نوسازی-توسعه و تجهیز مدارس کشور ساخت، توسعه و تجهیز فضاهای آموزشی و پرورشی استاندارد و مقاوم، از وظایف اصلی این سازمان محسوب می‌شود. از آنجا که پروژه‌های این سازمان، معمولاً باید قبل از شروع سال تحصیلی و نیز در راستای تحقق مأموریت این سازمان، مطابق با استانداردهای کیفی انجام شوند؛ بحث موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت در اجرای پروژه‌های سازمان نوسازی مدارس اهمیت یافته و قسمت قابل توجهی از برنامه‌ریزی‌های این سازمان را به خود اختصاص داده است.

در این بخش مسأله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت پروژه‌ی ساخت مدرسه‌ای توسط اداره کل نوسازی مدارس استان کرمان با استفاده از مدل‌ها و رویکرد حل پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پروژه دارای ۱۴ فعالیت می‌باشد که شبکه‌ی گره‌ای متناظر با آن در شکل (۱) و داده‌های آن در جدول (۲) آمده است.

لازم به توضیح است که کیفیت هر فعالیت براساس میزان انطباق ویژگی‌های آن فعالیت با ویژگی‌های استاندارد تعریف می‌شود و به صورت درصد (گاهی نیز عددی بین صفر و یک، که صفر متناظر با صفر درصد و یک متناظر با صد درصد است) بیان می‌شود. در این پژوهش برای برآورد پارامترهای مسئله از اجماع نظرات خبرگان (مهندسين مشاور، ناظر و پیمانکاران پروژه‌های نوسازی مدارس) استفاده شده است. بدین منظور ابتدا پرسشنامه‌ای برای برآورد پارامترها در اختیار خبرگان قرار داده شد، سپس مقدار نهایی پارامترهای کیفیت از طریق محاسبه‌ی میانگین هندسی نظرات خبرگان و پارامترهای نهایی زمان و هزینه با گرد کردن مقادیر میانگین حسابی پیشنهادات بدست آمد.



شکل ۱. شبکه برداری مربوط به پروژه

جدول ۲. داده‌های مسئله، مربوط به مطالعه موردی

c_i^u	lq_i	cc_i (میلیون ریال)	nc_i (میلیون ریال)	ct_i (روز)	nt_i (روز)	نوع رابطه / پیشنیاز	شرح فعالیت	فعالیت
۵۰	۰/۷	۶۰۰	۳۰۰	۱۵	۳۰	-	گودبرداری و شفته (پی‌سازی)	۱
۴۰	۰/۶	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۲۵	۴۰	۱ / FS(۵)	اجرای فونداسیون	۲
۷۰	۰/۵	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۲۰	۴۰	۲ / FS(۱۰)	نصب اسکلت	۳
۲۰	۰/۸	۸۰۰	۶۰۰	۸	۱۵	۳ / FS(۰)	اجرای سقف	۴
۱۰	۰/۶	۴۰۰	۳۰۰	۲۰	۳۰	۴ / SS(۵)	دیوار چینی، کرسی و شن‌ریزی	۵
۴۰	۰/۳	۶۰۰	۵۰۰	۱۰	۲۰	۵ / SS(۵)	اجرای تأسیسات اولیه	۶
۵۰	۰/۴	۵۵۰	۴۵۰	۲۵	۴۰	۵ / FS(۰)	نماسازی	۷
۳۰	۰/۵	۵۰۰	۴۰۰	۱۸	۳۰	۶ / FS(۰)	سنگ‌کاری داخلی	۸
۵۰	۰/۶	۳۳۰	۲۸۰	۸	۱۵	۶ / SS(۱۰)	محوطه‌سازی	۹
۱۰	۰/۸	۲۷۰	۱۵۰	۸	۱۵	۷ / FF(۵)	نصب درب و پنجره	۱۰
۳۰	۰/۵	۳۵۰	۲۵۰	۲۵	۴۰	۸ / FS(۰)	سقف کاذب و گچ‌کاری	۱۱
۳۰	۰/۶	۴۰۰	۳۰۰	۱۵	۲۵	۸ / FS(۰)	کف‌سازی	۱۲
۲۰	۰/۴	۲۵۰	۱۸۰	۲۰	۴۰	۱۱ / FS(۱۰) ۱۲ / FS(۱۰)	نقاشی	۱۳
۴۰	۰/۸	۲۰۰	۱۵۰	۱۰	۲۰	۱۳ / FS(۱۰)	اجرای تأسیسات نهایی	۱۴

ارائه‌ی نتایج

قبل از حل مسئله‌ی (۱۰) برای پروژه‌ی مدنظر، لازم است مقادیر T_{min} (سریعترین زمان ممکن برای اتمام پروژه) (این مقدار در حالتی بدست می‌آید که زمان اجرای همه‌ی فعالیت‌ها در حالت فشردگی کامل باشد)، T_{max} (زمان نرمال انجام پروژه بدون هیچ فشرده‌سازی)، T_p (زمان از پیش تعیین شده برای اتمام پروژه)، C_{min} (مربوط به حالتی است که هیچ فشرده‌سازی انجام نشود، بنابراین هیچ هزینه‌ای نیز پرداخت نگردد) و C_{max} (مربوط به وضعیتی است که پروژه در حداقل زمان ممکن انجام شود و مجبور باشیم کیفیت تمام فعالیت‌ها، که به دلیل فشرده‌سازی کاهش یافته‌اند، را به سطح مطلوب (یک) ارتقاء دهیم) تعیین گردند. بعد از انجام محاسبات لازم و لحاظ کردن زمان از پیش تعیین شده که مد نظر مدیران پروژه بوده است؛ مقادیر $T_{min}=188$ ، $T_{max}=305$ ، $C_{min}=0$ و $C_{max}=2880$ برای مسئله‌ی مذکور بدست آمد و زمان از پیش تعیین شده برای اتمام پروژه $T_p=260$ در نظر گرفته شد. لازم به توضیح است که کلیه‌ی مدل‌های این مقاله در نرم‌افزار لینگو (نسخه 8.5) کدنویسی و حل شده است. نتایج حاصل از حل مدل (۱۰) با اعمال مقادیر فوق در جدول (۳) خلاصه شده است.

حداقل درجه‌ی تحقق اهداف مدل تحقیق $\alpha^*=0/71$ بوده و در این سطح، مقادیر تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت کل انجام پروژه به ترتیب ۲۲۱ روز، ۸۳۱/۱۷ میلیون ریال و ۷۱ درصد می‌باشد.

جدول ۳. نتایج حل مدل (۱۰) برای داده‌های واقعی تحقیق

هزینه‌ی ارتقاء کیفیت فعالیت i (میلیون ریال)	هزینه‌ی فشرده سازی فعالیت i (میلیون ریال)	$q_i^*(x_i^*, c_i^*)$	$q_i^{T*}(x_i^*)$	x_i^*	فعالیت
۱/۹	۳۰۰	۰/۷۱	۰/۷	۱۵	۱
۰	۰	۱/۰	۱/۰	۴۰	۲
۰	۵۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۳۸	۳
۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱۵	۴
۰	۰	۱/۰	۱/۰	۳۰	۵
۲۳/۵۱	۱۰۰	۰/۷۱	۰/۳	۱۰	۶
۰	۰	۱/۰	۱/۰	۴۰	۷
۱۲/۶۸	۱۰۰	۰/۷۱	۰/۵	۱۸	۸
۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱۵	۹
۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱۵	۱۰
۱۲/۶۸	۱۰۰	۰/۷۱	۰/۵	۲۵	۱۱
۰	۰	۱/۰	۱/۰	۲۵	۱۲
۱۰/۳۸	۷۰	۰/۷۱	۰/۴	۲۰	۱۳
۰	۵۰	۰/۸	۰/۸	۱۰	۱۴

همانطور که انتظار می‌رود، برای فعالیت‌هایی که در زمان نرمال خود انجام می‌شوند هزینه‌ی فشرده‌سازی و هزینه‌ی ایجاد کیفیت صفر است، زیرا انجام فعالیت در زمان نرمال خود باعث کاهش کیفیت فعالیت و به تبع آن اعمال هزینه‌های ایجاد کیفیت نمی‌شود. از سوی دیگر، زمان اجرای فعالیت‌های اول، سوم و چهاردهم فشرده شده اما هزینه‌ای جهت ارتقاء کیفیت آنها اعمال نشده است، چرا که کاهش کیفیت ناشی از فشرده‌سازی که مدل بدست داده، آنقدر زیاد نبوده که نیاز به ارتقاء آن باشد. نتایج بدست آمده برای فعالیت‌های شش، هشت،

یازده و سیزده نشان می‌دهد که برای این فعالیت‌ها، هم هزینه‌ی فشرده‌سازی و هم هزینه‌ی ارتقاء کیفیت پرداخت می‌شود.

اکنون با فرض اینکه یک مقدار حداقلی برای تحقق اهداف هزینه و کیفیت اجرای فعالیت‌ها مد نظر است، می‌توان با حل مدل (۱۱) حداقل زمان ممکن برای انجام پروژه را بدست آورد. به عنوان مثال، اگر بخواهیم حداقل درجه‌ی تحقق اهداف هزینه و کیفیت $\lambda = 0/85$ باشد، حل مدل (۱۱) نتایج ارائه شده در جدول (۴) را بدست می‌دهد. زمان بدست آمده برای اجرای پروژه در این وضعیت ۲۴۵ روز و هزینه‌ی ناشی از فشرده‌سازی و ارتقاء کیفیت فعالیت‌ها $420/4$ میلیون ریال می‌باشد که 350 میلیون ریال آن مربوط به فشرده‌سازی فعالیتها و $70/4$ میلیون ریال مربوط به ارتقاء کیفیت فعالیت‌ها، به سطح حداقل 85 درصد، است.

جدول ۴. نتایج حل مدل (۱۱) برای داده‌های واقعی تحقیق با فرض $\lambda = 0/85$

فعالیت	x_i^*	$q_i^{T*}(x_i^*)$	$q_i^*(x_i^*, c_i^*)$	هزینه‌ی فشرده سازی فعالیت i (میلیون ریال)	هزینه‌ی ارتقاء کیفیت فعالیت i (میلیون ریال)
۱	۳۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۲	۴۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۳	۴۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۴	۱۵	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۵	۳۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۶	۱۷	۰/۷۹	۰/۸۵	۳۰	۳/۴۲
۷	۴۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۸	۱۸	۰/۵	۰/۸۵	۱۰۰	۲۱
۹	۱۵	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۱۰	۱۵	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۱۱	۲۵	۰/۵	۰/۸۵	۱۰۰	۲۱
۱۲	۲۵	۱/۰	۱/۰	۰	۰
۱۳	۲۰	۰/۴	۰/۸۵	۷۰	۱۵
۱۴	۱۰	۰/۸	۰/۸۵	۵۰	۱۰

پر واضح است که سطح λ بسته به اهمیت تحقق اهداف، توسط تصمیم گیرنده، مشخص می شود. اگر بخواهیم مقایسه‌ای بین نتایج مدل (۱۰) و مدل (۱۱) داشته باشیم باید به این نکته اشاره شود که در مدل (۱۰) حداکثرسازیِ حداقلِ درجه‌ی تحقق اهداف زمان، هزینه و کیفیت مدنظر است در حالی که مدل (۱۱) زمان اجرای پروژه را به نحوی حداقل می کند که درجه‌ی تحقق اهداف هزینه و کیفیت از یک سطح از پیش تعیین شده λ بیشتر باشد. بر این اساس، مدل (۱۰) حداقل درجه‌ی تحقق اهداف را ۷۱ درصد با زمان اجرای ۲۲۱ روزی تعیین کرده و مدل (۱۱) برای رعایت محدودیت ۸۵ درصدی تحقق اهداف هزینه و کیفیت، زمان اجرای پروژه را به ۲۴۵ روز افزایش داده است.

تحلیل پارامتری مدل‌ها

در ادامه جهت اعتبارسنجی مدل‌های تحقیق، وضعیت جواب‌های آنها در قبال تغییرات سیستماتیک پارامترهای کلیدی بررسی شده است، تا بتوان بررسی کرد که آیا رفتار مدل در قبال تغییرات منطقی است یا خیر. بدین منظور برای ارزیابی مدل (۱۰) از آنجا که زمان اجرا با فرض $T_p = 260$ برابر با ۲۲۱ روز بدست آمد، با تغییر سیستماتیک زمان از پیش تعیین شده به مقادیری کمتر از ۲۲۱، حداقل درجه‌ی تحقق اهداف به همراه زمان اجرا، هزینه و کیفیت اجرای پروژه قابل محاسبه هستند، نتایج حاصل در جدول (۵) ارائه شده است. همانطور که از نتایج این جدول برمی آید، با کاهش زمان از پیش تعیین شده، برای اتمام پروژه، حداقل درجه‌ی تحقق اهداف و کیفیت اجرای پروژه، کاهش یافته و هزینه‌های ناشی از فشردگی‌سازی و ارتقاء کیفیت افزایش یافته اند. این تغییرات منطقی به نظر می‌رسند، چرا که کوتاه شدن زمان اجرای پروژه کاهش کیفیت و افزایش هزینه‌های ناشی از فشردگی‌سازی را به دنبال دارد.

جدول ۵. نتایج حل مدل (۱۰) به ازای مقادیر مختلف پارامتر T_p

کیفیت	هزینه (میلیون ریال)	زمان اجرا	حداقل درجه‌ی تحقق اهداف (α)	T_p
۰/۷۰۴	۸۵۳/۲۶	۲۲۰	۰/۷۰۴	۲۲۰
۰/۶۶۴	۹۶۹/۱۷	۲۱۵	۰/۶۶۴	۲۱۵
۰/۶۲۳	۱۰۸۵/۶۶	۱۲۰	۰/۶۲۳	۲۱۰
۰/۵۸۱	۱۲۰۶/۲۱	۲۰۵	۰/۵۸۱	۲۰۵
۰/۵۳۳	۱۳۴۶/۱۸	۲۰۰	۰/۵۳۳	۲۰۰
۰/۴۸۰	۱۴۹۹/۵۶	۱۹۵	۰/۴۸۰	۱۹۵
۰/۴۲۳	۱۶۶۱/۱۵	۱۹۰	۰/۴۲۳	۱۹۰

به منظور ارزیابی عملکرد مدل (۱۱) با تغییر دادن پارامتر λ ، که نشان‌دهنده‌ی حداقل درجه‌ی تحقق اهداف هزینه و کیفیت است، در جدول (۶) نتایج مربوط به زمان، هزینه و کیفیت اجرای پروژه خلاصه شده است.

جدول ۶. نتایج حل مدل (۱۱) به ازای مقادیر مختلف پارامتر λ

کیفیت	هزینه (میلیون ریال)	زمان اجرا	λ
۱/۰	۰/۰۰	۳۰۵	۱/۰
۰/۹	۲۸۶/۶۷	۲۶۰	۰/۹
۰/۸	۵۷۱/۲۴	۲۳۵	۰/۸
۰/۷	۸۵۱/۸۶	۲۲۰	۰/۷
۰/۶	۱۱۴۷/۴۸	۲۰۸	۰/۶
۰/۵	۱۴۳۴/۷۶	۱۹۷	۰/۵
۰/۴	۱۷۲۵/۷۸	۱۸۸	۰/۴
۰/۴	۱۷۲۵/۷۸	۱۸۸	۰/۳

همانطور که می‌دانیم با کاهش پارامتر λ حداقل سطح مورد انتظار برای تحقق اهداف هزینه و کیفیت کاهش می‌یابد، همچنین زمان اجرای پروژه، که کمینه کردن آن هدف اصلی مدل

(۱۱) است، با کاهش پارامتر λ بهبود می‌یابد. به بیان دیگر با کاهش پارامتر λ ناحیه‌ی شدنی مدل (۱۱) گسترش یافته و در نتیجه مقدار بهینه‌ی تابع هدف بهبود می‌یابد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، مسئله‌ی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت، با فرض وابستگی کیفیت انجام فعالیت‌های پروژه به زمان و هزینه، مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی سه هدفه، با در نظر گرفتن زمان، هزینه و کیفیت به عنوان توابع هدف و لحاظ کردن روابط پیش‌نیازی فرموله شد. برای حل مسئله از یک رویکرد تصمیم‌گیری فازی استفاده گردید. به منظور اجرایی کردن این رویکرد، زمان اجرا و هزینه‌ی ناشی از فشردگی‌سازی زمان و ارتقاء کیفیت فعالیت‌ها به صورت آرمان‌هایی فازی توصیف گردیدند، تا بتوان در موازنه‌ی آنها با کیفیت، از رویکرد تصمیم‌گیری فازی استفاده نمود. در کنار هم قراردادن توابع عضویت مربوط به زمان اجرای تک تک فعالیت‌ها و توابع عضویت آرمان‌های فازی مربوط به زمان اجرای پروژه و هزینه‌ی فشردگی‌سازی، در راستای رویکرد تصمیم‌گیری فازی، منجر به یک مدل برنامه‌ریزی تک‌هدفه گردید. برای نشان دادن کارایی مدل و رویکرد حل پیشنهادی یک مسئله‌ی واقعی موازنه‌ی زمان، هزینه و کیفیت مربوط به سازمان نوسازی و تجهیز مدارس استان کرمان، حل شد و نتایج آن مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از تحلیل پارامتری، اعتبار مدل‌ها ارزیابی گردید.

برای انطباق بیشتر مدل و الگوی حل پیشنهادی با واقعیت می‌توان به جای توابع عضویت خطی، از توابع عضویت غیرخطی برای توصیف وابستگی کیفیت به زمان و حتی آرمان‌های فازی مربوط به زمان اجرا و هزینه فشردگی‌سازی استفاده نمود. همچنین به منظور گسترش مدل و رویکرد پیشنهادی می‌توان محدودیت منابع و یا اهدافی مثل ارزش کسب‌شده را به مدل اضافه کرد. از سوی دیگر در پژوهش‌های بعدی می‌توان مدل را در حالتی فرمول‌بندی و حل کرد که یک حداکثر هزینه‌ی مشخص (یک بودجه‌ی مشخص جهت حداقل سازی زمان و با بهترین کیفیت ممکن) برای اجرای پروژه مدنظر باشد.

منابع

Afshar, A., A. Kaveh, and O. Shoghli, "*Multi-Objective Optimization of Time-Cost-Quality Using Multi-Colony Ant Algorithm*", ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING). 8(2), pp. 113-124 (2007).

Babu, A.J.G. and N. Suresh, "*Project management with time, cost, and quality considerations*", European Journal of Operational Research. 88(2), pp. 320-327 (1996).

Baptiste, P. and S. Demasse, "*Tight LP bounds for resource constrained project scheduling*", OR Spectrum. 26(2), pp. 251-262 (2004).

Bellman, R.E. and L.A. Zadeh, "*Decision making in a fuzzy environment*", Management Science. 17(4), pp. 141-164 (1970)

Chen, S.-P. and M.-J. Tsai, "*Time-cost trade-off analysis of project networks in fuzzy environments*", European Journal of Operational Research. 212(2), pp. 386-397 (2011).

Correia, I., L.L. Lourenço, and F. Saldanha-da-Gama, "*Project scheduling with flexible resources: formulation and inequalities*", OR Spectrum. 34(3), pp. 635-663 (2012).

Ebrahimnezhad, S., V. Ahmadi, and H. Javanshir, "*Time-Cost-Quality Trade-off in a CPM Network Using*", International Journal of Industrial Engineering & Production Management. 24(3), pp. 361-376 (2013).

El-Rayes, K. and A. Kandil, "*Time-Cost-Quality Trade-Off Analysis for Highway Construction*", Journal of Construction Engineering and Management. 131(4), pp. 477-486 (2005).

Eshtehardian, E., A. Afshar, and R. Abbasnia, "*Time-cost optimization: using GA and fuzzy sets theory for uncertainties in cost*", Construction Management and Economics, 26(7), pp. 679-691 (2008).

Eshtehardian, E., A. Afshar, and R. Abbasnia, "*Fuzzy-based MOGA approach to stochastic time-cost trade-off problem*" Automation in construction, 18(5), pp. 692-701 (2009).

Iranmanesh, H., M.R. Skandari, and M. Allahverdilloo, "*Finding Pareto Optimal Front for the Multi-Mode Time, Cost, Quality Trade-off in Project Scheduling*", International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering. 2(4), pp. 397-401 (2008).

Ke, H., and J. Ma, "*Modeling project time-cost trade-off in fuzzy random environment*", Applied Soft Computing, 19, pp. 80-85(2014).

Kerzner H., "*Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling*", John Wiley & Sons (2013).

Khang, D.B. and Y.M. Myint, "*Time, cost and quality trade-off in project management: a case study*", International Journal of Project Management. 17(4), pp. 249-256 (1999).

Kim, J., C. Kang, and I. Hwang, "*A practical approach to project scheduling: considering the potential quality loss cost in the time-cost tradeoff problem*", International Journal of Project Management, 30(2), pp. 264-272 (2012).

Mehdizadeh, E. and O. Mohsenian, "*Solving time cost and quality trade off project problem using multi objective stochastic programming*", Sharif Scientific Journal. 28-1(2), pp. 103-111 (2012).

Mohammadipour, F., and S. J. Sadjadi, "*Project cost-quality-risk tradeoff analysis in a time-constrained problem*", Computers & Industrial Engineering, 95, pp. 111-121(2016).

Monghasemi, S., M.R. Nikoo, M.A. Khaksar Fasaee, and J. Adamowski, "*A novel multi criteria decision making model for optimizing time-cost-quality trade-off problems in construction projects*", Expert Systems with Applications. 42(6), pp. 3089-3104 (2015).

Mungle, S., L. Benyoucef, Y. J. Son, and M. K. Tiwari, "*A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time-cost-quality trade-off problems: A case study of highway construction project*", Engineering Applications of Artificial Intelligence, 26(8), pp. 1953-1966 (2013).

Nabipoor Afruzi, E., A.A. Najafi, E. Roghanian, and M. Mazinani, "*A Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm for solving discrete*

time, cost and quality trade-off problems with mode-identity and resource-constrained situations", Computers & Operations Research. 50, pp. 80-96 (2014).

Saif, A., S. Abbas, and Z. Fayed, "*The PDBO Algorithm for Discrete Time, Cost and Quality Trade -off in Software Projects with Expressing Quality by Defects*", Procedia Computer Science. 65, pp. 930-939 (2015).

Singh, G. and A.T. Ernst, "*Resource constraint scheduling with a fractional shared resource*", Operations Research Letters. 39(5), pp. 363-368 (2011).

Tareghian, H.R. and S.H. Taheri, "*On the discrete time, cost and quality trade-off problem*", Applied Mathematics and Computation. 181(2), pp. 1305-1312 (2006).

Tavana, M., A.-R. Abtahi, and K. Khalili-Damghani, "*A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time-cost-quality trade-off project scheduling problems*", Expert Systems with Applications. 41(4, Part 2), pp. 1830-1846 (2014).

Xu, J., H. Zheng, Z. Zeng, S. Wu, and M. Shen, "*Discrete time-cost-environment trade-off problem for large-scale construction systems with multiple modes under fuzzy uncertainty and its application to Jinping-II Hydroelectric Project*", International Journal of Project Management, 30(8), pp. 950-966, (2012).

Zhang, H., and F. Xing, "*Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time-cost-quality tradeoff in construction*", Automation in Construction, 19(8), pp. 1067-1075 (2010).

