ارائه یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی در مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت در مدیریت پروژه

نیما همتا[۱،*]، محمد احسانی‌فر[۲]، جواد ساریخانی [۳]

[۱] استادیار، گروه مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران (عهده‌دار مکاتبات)

[۲] استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد اراک، دانشگاه آزاداسلامی، اراک، ایران

[۳]کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد اراک، دانشگاه آزاداسلامی، اراک، ایران

تاریخ دریافت: آذر ماه ۱۳۹۶، اصلاحیه: دی ماه ۱۳۹۶، پذیرش: بهمن ماه ۱۳۹۶

چکیده

زمان، هزینه و کیفیت اهداف مهم و اصلی هر پروژه‌ای می باشد که مدیران پروژه‌ها، برای کسب موفقیت در آنها، همواره به دنبال اتمام آن در کمترین زمان ممکن، با صرف کمترین هزینه و با بالاترین کیفیت می‌باشد. یکی از چالش‌های اصلی در این مورد انتخاب رویکردی مناسب به منظور رسیدن به اهداف مذکور می باشد. از رایج‌ترین رویکردها در این مورد، استفاده از تکنیک موازنه است. در واقع با استفاده از این تکنیک، می‌توان بهینه‌ترین حالت اجرای فعالیت‌های پروژه را که کمترین زمان اجرا، کمترین هزینه و بیشترین کیفیت را به دنبال دارد بدست آورد. در این تحقیق سعی گردیده است با ارائه مفهوم کامل‌تری از کیفیت، با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی راه تصمیم‌گیران را برای انتخاب بهتر گزینه هموار می‌کند و می‌توان با توجه به محدودیت‌های اجرائی که به طور معمول در پروژه‌ها وجود دارد به بهترین ترکیب سه فاکتور (هزینه، زمان و کیفیت) دست یافت. در نهایت، عملکرد مدل ارائه شده با یک مطالعه موردی در پروژه انجام گرفته در شرکت ماشین سازی اراک مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج، حاصل از حل مدل در اولویت‌های متفاوت سه فاکتور در این پروژه نشان می‌دهد در کمترین مقدار اولویت زمان، هر چه مقدار اولویت کیفیت کاهش و اولویت هزینه افزایش می‌یابد مقدار انحرافات سه فاکتور نسبت به هدف‌های هر کدام، به حداقل مقدار خود می‌رسد.

واژه‌های اصلی: برنامه‌ریزی آرمانی، موازنه زمان-هزینه-کیفیت، مدیریت پروژه، مدل تصمیم‌گیری چند هدفه

۱- مقدمه

انستیتو استاندارد آمریکا مدیریت پروژه را به‌کارگیری دانش، مهارت، ابزار و روش‌هایی در مدیریت فعالیت‌ها برای نیل به اهداف پروژه تعریف می‌کند. زمان‌بندی پروژه یک بخش‌جدایی‌ناپذیر از مدیریت پروژه می‌باشد که به ایجاد توازن میان اهداف رقابتی پروژه همچون زمان، هزینه، کیفیت و ... می پردازد. بنابراین مدیران پروژه که مسئول اصلی رساندن پروژه به اهداف آن می‌باشند، باید پروژه را با کمترین سطح ریسک، در زمان تعیین شده، با کمترین هزینه و بیشترین سطح کیفیت به اتمام رسانده و تحویل دهند. در این میان آنچه موضوع بسیار مهمی است، این است که به سبب وجود نوعی از تعارض[1] میان اهداف پروژه، رعایت حد بهینه برای همه این اهداف به طور همزمان کار ساده‌ای نیست. امروزه، از یک سو مدیران به دنبال کاهش هزینه‌های پروژه هستند و از سوی دیگر به دنبال فشرده‌سازی زمان انجام پروژه می‌باشند. اما فشرده‌سازی زمان پروژه که با افزایش منابع تخصیص یافته جهت سرعت بیشتر در اجرای فعالیت‌ها انجام می پذیرد، به ناچار باعث افزایش هزینه‌ها خواهد شد. پیش بینی این مطلب که نتیجه فشرده سازی زمان‌بندی پروژه تا چه حد منجر به افزایش یا کاهش هزینه کل پروژه (هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم) می‌شود دشوار است. در واقع اگرچه هزینه‌های مستقیم پروژه افزایش می‌یابند، ولی به دلیل کاهش زمان پروژه، هزینه‌های غیرمستقیم (بالاسری، هزینه‌های ثابت روزانه و ...) ممکن است کاهش یابند. این موضوع تأییدی است بر این مطلب که حتی کاهش زمان و هزینه پروژه به طور همزمان تنها در بعضی حالات ممکن است [۱،۲].

به علاوه با در نظر گرفتن این واقعیت که با فشرده‌سازی زمان انجام پروژه این فقط هزینه‌های پروژه نیستند که تحت تأثیر قرار می‌گیرند بلکه موضوعات دیگری چون کیفیت و همچنین ریسک پروژه نیز تأثیر می‌پذیرند، بر پیچیدگی برنامه‌ریزی پروژه می‌فزاید. با این اوصاف و با توجه به این موضوع که پروژه‌های امروزی از تعداد زیادی فعالیت تشکیل شده‌اند که بر اساس شرایط متفاوت هر کدام از این فعالیت‌ها در حالت‌های مختلف قابل اجرا هستند، چه روش یا روش‌هایی برای زمان‌بندی و انتخاب حالت اجرای هر کدام از فعالیت‌ها وجود دارد تا اهداف پروژه همچون زمان، هزینه، کیفیت و ... در بهترین و یا حداقل نزدیک به بهترین حالت خود باشند [۳].

کاهش زمان و هزینه در پروژه‌ها از زمان بیان مسیر بحرانی در اواخر ۱۹۵۰ مورد توجه مدیران پروژه می باشد و بدین ترتیب مسئله موازنه زمان-هزینه بوجود آمد. در سال‌های اخیر توجه مدیران پروژه به کاهش

1- Conflict

*n.hamta@arakut.ac.ir

زمان انجام پروژه همراه با بدست آوردن کیفیتی مطلوب برای پروژه افزایش یافته است. همین امر محققان را به سوی توسعه مدل‌های موازنه زمان-هزینه که در آن عامل کیفیت نیز منظور شده است، سوق داده است.

۲- مروری بر ادبیات

مساله موازنه بین ارکان مختلف پروژه به اشکال مختلفی مورد بررسی قرارگرفته است؛ به عنوان مثال موازنه «زمان- هزینه»؛ «کیفیت- هزینه»؛ «زمان- هزینه- کیفیت» و غیره.

مسأله موازنه زمان و هزینه، از جمله تکنیک‌های مدیریت هزینه در مرحله برنامه‌ریزی، محسوب می شود که در ادبیات موجود تحت عنوان «مسأله فشرده‌سازی پروژه[۲]» و «مسأله تسریع زمانی پروژه[۳]» نیز مطرح شده است. از اواخر دهه ۱۹۵۰ تکنیک‌هایی چون روش مسیر بحرانی (CPM[۴]) جهت محاسبه تاریخ تکمیل پروژه مورد استفاده قرارگرفته‌اند.

کلی[۵] اولین مدل را در سال ۱۹۶۱ تحت عنوان موازنه هزینه-زمان معرفی نمود. کلی با در نظر گرفتن رابطه خطی بین زمان و هزینه فعالیت‌ها، یک مدل ریاضی ارائه نمود و با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری مدل ارائه شده را حل نمود. از سوی دیگر در بسیاری از مدل-های برنامه‌ریزی شده برای حل مسأله موازنه زمان و هزینه تابع هدف صرفاً حداکثر نمودن سود یا حداقل نمودن هزینه است. در مسأله موازنه زمان و هزینه بهینه کردن اهداف چندگانه مورد نظر و واقعی‌تر خواهد بود [۴].

زیمنس و همکاران(۱۹۷۱) یک الگوریتم موثر برای کوتاه کردن زمان پروژه ارائه کرد بطوری که تاریخ تکمیل پروژه از قبل تعیین شده است. این الگوریتم یک رویکرد سیستماتیک برای کاهش زمان پروژه و کاهش هزینه است. در این مدل کیفیت فعالیت‌ها در نظر گرفته نشده است [۵].

رات و رینگراروت (۱۹۸۶) مسئله فشرده‌سازی با اهداف در تضاد زمان، هزینه و کیفیت را تحت یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی ارائه کردند که یک رابطه غیرخطی محدب زمان-هزینه که بوسیله تابع قطعه‌ای خطی تقریب زده می‌شود، است [۶].

بابو و سورش (۱۹۹۶) بیان کردند که کیفیت پروژه می‌تواند تحت تاثیر فشرده‌سازی پروژه قرار گیرد. مدل‌های برنامه‌ریزی خطی زمان-هزینه-کیفیت را بصورت همزمان در نظر گرفتند بطوریکه با تخصیص کران‌های مطلوبی برای دو عنصر(مانند زمان و هزینه) مقدار بهینه‌ای برای عنصر سوم (مانند کیفیت) بدست آوردند. این مدل به دلیل سادگی تاکنون مورد استفاده بسیاری محققان قرار گرفته است [۷].

اتکینسون (۱۹۹۹) بیان می‌کند که در مسائل توازن زمان-هزینه، پروژه‌ها معمولا براساس برنامه زمان‌بندی شده، انجام نمی‌شوند و احتیاج به دوباره‌کاری و اصلاح دارند. یک پروژه فعالیتی تک زمانه است که بوسیله زمان، هزینه وکیفیت محدود شده است و موفقیت آن وابسته به این است که این محدودیت‌ها چگونه با هم در تعادل هستند [۸].

خانگ و مینت (۱۹۹۹) با پذیرفتن مدل بابو و سورش برای یک پروژه واقعی و ارزیابی کابردی بودن مدل آنها، محدودیت‌هایی از استفاده مقیاس پیوسته در فرآیند بررسی کیفیت فعالیت را یافتند [۹].

حجازی(۱۹۹۹)، برای بهینه‌سازی موازنه زمان- هزینه، از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده است [۱۰].

لی و همکارانش (۱۹۹۹) برای حل مساله موازنه زمان- هزینه غیرخطی پیوسته، از سیستم کامپیوتری جدیدMLGAS[6] (سیستم بر پایه یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک) استفاده کرده‌اند. این سیستم جدید به دنبال بهبود کارایی در سیستم‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک از طریق، حذف نیاز به وجود کاربر در ایجاد منحنی زمان- هزینه برای فرموله کردن تابع هدف و نیز ایجاد امکان پشتیبانی از روابط زمان-هزینه غیر خطی است [۱۱].

فنگ و همکارانش (۲۰۰۰) یک رویکرد ترکیبی، با استفاده از روش شبیه سازی و الگوریتم ژنتیک برای حل مساله موازنه زمان- هزینه تحت عدم قطعیت ارائه داده اند [۱۲].

ال-رایز و کندیل (۲۰۰۵) یک مدل بهینه چندهدفه برای تبدیل تحلیل دوبعدی موازنه زمان-هزینه به تحلیل موازنه زمان-هزینه-کیفیت را بسط دادند. این مدل برای جستجوی طرح‌های استفاده بهینه از منابع، طراحی شد که زمان و هزینه را کمینه و کیفیت را بیشینه نماید [۱۳].

طارقیان و طاهری (۲۰۰۶) به بررسی روند حل موازنه زمان-هزینه-کیفیت در مدیریت پروژه پرداختند. سه مدل برنامه‌ریزی عددصحیح دوتایی را بسط دادند که هزینه وکیفیت توابع غیرافزایشی گسسته از زمان می‌باشند. این اثر در هم تنیده شده زمان، هزینه و کیفیت در مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت گسسته نشان داده شده است [۱۴].

طارقیان و طاهری (۲۰۰۷) یک روند حل فراابتکاری برای مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت پیشنهاد کرده‌اند. مسئله شامل زمانبندی فعالیت‌های پروژه با کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی کیفیت است بطوریکه پروژه در مهلت تعیین شده پایان پذیرد [۱۵].

شوکوآن وکُنگ گو (۲۰۰۸) در مسأله موازنه ارکان محدوده، مصرف منابع را نیز به عنوان یک رکن موازنه در نظر گرفته‌اند. با این توضیح، چهار رکن شامل زمان، هزینه، منابع و کیفیت در این تحلیل وارد شده-اند[۱۶].

هوئی‌مین و ژوفو (۲۰۰۹) برای حل مساله موازنه هزینه- زمان به صورت گسسته، از الگوریتم کلونی مورچگان خودتنظیم[7] استفاده نموده-اند. در این الگوریتم با استفاده از بررسی میزان بی نظمی، پارامترهای الگوریتم مورچگان کنترل شده و بدین طریق، از همگرایی زودهنگام الگوریتم مورچگان جلوگیری می‌شود [۱۷].

اشتهاردیان و همکارانش (۲۰۰۹) رویکرد جدیدی برای حل مساله موازنه زمان- هزینه در شرایط عدم قطعیت ارائه داده‌اند [۱۸].

2- Project Crashing Compression Problem
3- Project Speeding up Problem
4- Critical path method
5- Kelly

6- Machine Learning and Genetic Algorithms based System
7- Self-adaptive Ant Colony Optimization (SACO)

نینگ و ونگ (۲۰۰۹) از الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه به منظور حل مسأله موازنه کیفیت- هزینه پیوسته استفاده نموده‌اند. در این بررسی، هزینه‌ی کیفیت در مقابل قابلیت اطمینان تحلیل شده است. روش مزبور روی داده‌های ارایه شده در یکی از تحقیقات پیاده شده است [۱۹].

لی یو و همکارانش (۲۰۰۹) به مثلث زمان- هزینه–کیفیت، فاکتور امنیت را افزوده و برای بهینه سازی آن از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات پراکنده استفاده کرده‌اند. در این الگوریتم، تابع تناسب بهینه سازی شده، عکس تابع مطلوبیت چند شاخصه‌ای در نظر گرفته شده است و زمان، هزینه، کیفیت و امنیت متغییرهای چند شاخصه آن را تشکیل داده‌اند. نتایج حاصله از پیاده‌سازی این الگو برای پروژه ساخت یک ایستگاه فرعی ۲۲۰ کیلوولت بررسی شده است[۲۰].

یانگ (۲۰۰۹) از الگوریتم ذرات پراکنده برای حل مسأله موازنه هزینه- زمان- کیفیت استفاده نمودند. تابع هدف این الگوریتم به صورت تابع مطلوبیت چندشاخصه تعر یف شده و محاسبات شبکه توسط روش مسیر بحرانی صورت می‌پذیرد. در بخش انتهایی، روش مزبور بر روی داده های یک نمونه موردی اجرا شد ه و مقدار تابع هدف جواب گزارش شده است[۲۱].

ژِنگ و مائو (۲۰۱۰) به منظور بررسی مسأله موازنه زمان- هزینه- کیفیت از الگوریتم ژنتیک بهره جسته‌اند. در مدل مزبور برای هر فعالیت چندین حالت اجرا در نظر گرفته شده که زمان، هزینه و کیفیت متناظر با هر حالت اجرا برای تک تک فعالیت‌ها مشخص است. با توجه به میزان کاهش زمان کل پروژه، پاداشی به مجری تعلق می‌گیرد[۲۲].

ژَنگ و لی (۲۰۱۰) برای حل مساله موازنه زمان- هزینه و جستجوی جواب بهینه پارتویی، یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر بهینه‌سازی چند هدفه ذرات پراکنده (CSMOPSO[8]) ارائه داده‌اند [۲۳].

ژو (۲۰۱۱) از الگوریتم کلونی مورچگان برای موازنه هزینه و زمان بهره- گرفته است. مسأله بررسی شده به صورت گسسته چندحالته در نظر گرفته شده و تابع هدف به صورت مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم درنظر گرفته شده است که هزینه غیرمستقیم به صورت تابعی خطی از زمان انجام پروژه تعریف شده است [۲۴].

مختاری و همکارانش (۲۰۱۲) در مدل‌سازی مساله زمان- هزینه، از متغیرهای پیوسته استفاده نموده‌اند [۲۵].

کیم و همکاران (۲۰۱۲) مدل و روند برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح را برحسب هزینه بالقوه کیفیت از دست رفته در (MILP) مختلط مسئله موازنه زمان-هزینه ارائه کردند. این مدل امکان حل یک مسئله برای بیان α واقعی در پروژه را ایجاد می کند. در این مدل ضریبی بنام نرخ ریسک عدم انطباق فعالیت در مدل استفاده شده است که توسط مدیر پروژه تعیین می شود [۲۶].

سعد الله ابراهیم نژاد (۱۳۹۲) جهت موازنه معیارهای هزینه، زمان و کیفیت در یک شبکه CPM با استفاده از منطق فازی و الگوریتم ژنتیک استفاده نمود. وی در این مقاله یک مدل ریاضی فازی برای شبکه‌ای از فعالیت‌ها پیشنهاد می‌شودکه هریک دارای چندین شیوه اجرا هستند تا از میان شیوه‌های ممکن وموازنه معیارهای آنها، بهترین شیوه‌ی اجرا انتخاب شود به گونه‌ای که اهداف تحقیق را تأمین نماید[۲۸].

ونفا هو و ژینوا هی (۲۰۱۴) به ارائه مدل موازنه هزینه کیفیت و زمان در پروژه‌های ساختمانی با رویکرد تخصیص منابع پرداختند، نکته حائز اهمیت در مقاله آن ارائه تعریف مناسب‌تری از کیفیت در پروژه‌های ساختمانی بود [۲۷].

علی خانزاده (۱۳۹۴) مقاله‌ای تحت عنوان "بهینه سازی موازنه هزینه، زمان و کیفیت در پروژه‌های عمرانی با رویکرد بررسی تأثیر انتخاب مواد و نیروی کار " ارائه نمود و در این مقاله نیز با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی به دنبال یافتن پاسخ‌های کمی برای مدیریت هزینه، زمان و کیفیت پروژه است با این تفاوت که در این تحقیق قصد دارد کیفیت پروژه را با توجه به کیفیت مواد اولیه و مصالح و کیفیت اجرا تفکیک نموده و کیفیت مواد با توجه به نوع کالا و تأمین کننده آن می‌تواند انتخاب شود و کیفیت اجرای پروژه نیز با توجه به فشردگی زمان و اجرای هر فعالیت می‌تواند با توجه به نوع فعالیت تغییر یابد[۲۹].

برنامه‌ریزی آرمانی (GP[9]) یکی از پرکاربردترین و کارآمدترین تکنیک‌های برنامه‌ریزی چند معیاری و چند هدفی است که در این مقاله با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی به موازنه زمان، هزینه و کیفیت پرداخته شده است.

۳- مدل تحقیق

باتوجه به آنچه در مرور ادبیات گفته شد، می‌توان دریافت که تاکنون مدل‌های متعددی در زمینه موازنه زمان-هزینه و موازنه زمان هزینه- کیفیت ارائه شده است که تک هدفه و یا چندهدفه هستند و با استفاده از آنها می‌توان مقادیر بهینه‌ای برای زمان، هزینه و کیفیت بدست آورد. این مدل در ابتدا کاربردی و برخلاف مدل‌های دیگر که از روش‌ها و تکنیک‌های پیچیده‌ای مانند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچگان استفاده می‌شود، برای بدست آوردن جواب‌های بهینه و یا نزدیک به هدف از مدل برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شده است. بنابراین مدیران پروژه تمایلی بیشتری برای استفاده از آنها ندارند. از طرف دیگر تاکنون در هیچ یک از مدل های موازنه زمان-هزینه-کیفیت موجود، هزینه‌های کیفیت در نظرگرفته نشده است. علاوه بر آنچه گفته شد، در هر پروژه باید هزینه‌های بالاسری نیز در نظر گرفته شوند یعنی باید مواردی چون اجاره محل، آب، برق و ... را نیز در نظر گرفت تا تخمین درستی از هزینه پروژه بدست آورد.

هزینه‌های بالاسری به زمان کل پروژه وابسته می‌باشند و تاخیر در تحویل به موقع پروژه باعث پرداخت جریمه و تحمیل هزینه‌های بالاسری می شود.

باتوجه به محدودیت های منطقی حاکم بر پروژه نظیر محدودیت‌های زمان، هزینه و کیفیت ما برای بدست آوردن مدل مورد نظر کلیه این محدودیت های را در قالب ریاضی نوشته تا بتوان به وسیله آن به اهداف

8- A combined scheme-based multi-objective particle swarm optimization

9- Goal programming

مورد نظر تحت بررسی رسیده شود. با بررسی مدل های برنامه ریزی شده نزدیک ترین مدل به این مسئله مدل برنامه‌ریزی آرمانی می باشد. اگر پارامترها و متغیرهای این مدل بصورت زیر باشد:

N : تعداد فعالیت‌ها پروژه

P_1 : اولویت دستیابی به برنامه زمان بندی تکمیل پروژه فشرده‌سازی شده

P_2 : اولویت دستیابی به حداقل هزینه‌های کل پروژه ناشی از فشرده سازی

P_3 : اولویت دستیابی به حداقل رضایت مدیر پروژه از اقدامات که برای بهبود کیفیت پروژه انجام می‌شود.

TF_i : شناوری کل فعالیت i

t_i : زمان فعالیت i درحالت نرمال

t'_i : زمان فعالیت i در حالت فشرده

t''_i : زمان انجام اقدام اصلاحی مورد نیاز فعالیت i

T_{cpm} : زمان کل انجام پروژه که توسط زمان فعالیتهای بحرانی تعیین می شود.

C_i : هزینه فعالیت i در حالت نرمال

C'_i : هزینه فعالیت i در حالت فشرده

C''_i : هزینه انجام اقدام اصلاحی فعالیت i

C_o : هزینه بالاسری به ازای واحد زمان پروژه

Q_i : کیفیت فعالیت i در حالت نرمال

Q'_i : کیفیت فعالیت i در حالت فشرده

α_i : حداقل مقدار کیفیت برای فعالیت i

C_g : مقدار هزینه مورد انتظار برای اتمام پروژه

T_g : زمان مورد انتظار برای اتمام پروژه

Q_g : نرخ رضایت از اقدامات بهبود کیفیت پروژه انجام گردد

M : ارزش مثبت بزرگ

T : میزان انحراف زمان، زمانی که در تابع هدف فقط آرمان زمان قرار گیرد به عبارت دیگر $T = d_t^{-*} + d_t^{+*}$

C : میزان انحراف هزینه، زمانی که در تابع هدف فقط آرمان هزینه قرار گیرد به عبارت دیگر $C = d_c^{-*} + d_c^{+*}$

Q : میزان انحراف کیفیت، زمانی که در تابع هدف فقط آرمان کیفیت قرار گیرد به عبارت دیگر $Q = d_q^{-*} + d_q^{+*}$

متغیرهای تصمیم :

X_i : متغیر (۱و۰) – ۱ برای زمانی که فعالیت i در حالت نرمال انجام گردد و در غیر این صورت ۰ است.

Y_i : متغیر (۱و۰) – ۱ برای زمانی که فعالیت i در حالت فشرده انجام گردد و در غیر این صورت ۰ است.

Z_i : متغیر (۱و۰) – ۱ برای زمانی که اقدام اصلاحی انجام گردد و در غیر این صورت ۰ است.

آنگاه مدل بصورت زیر است:

$$\text{Min } z = \{P_1\left(\frac{d_t^- + d_t^+}{T}\right) + P_2\left(\frac{d_c^- + d_c^+}{C}\right) + P_3\left(\frac{d_q^- + d_q^+}{Q}\right)\} \quad (۱)$$

System Constraints:

$$\sum_i (t_i X_i + t'_i Y_i + t''_i Z_i) + d_t^- - d_t^+ = T_g \quad (۲)$$

$$\sum_i (C_i X_i + C'_i Y_i + C''_i Z_i) + T_{cpm} C_o + d_c^- - d_c^+ = C_g \quad (۳)$$

$$\sum_i Z_i + d_q^- - d_q^+ = N Q_g \quad (۴)$$

$$TF_i \le M X_i \quad (۵)$$

$$X_i + Y_i = 1 \quad (۶)$$

$$\forall i : (Q_i X_i + Q'_i Y_i) \ge \alpha_i \quad (۷)$$

$$Z_i = 0 \qquad \forall i \in \omega = \{i \mid (Q_i X_i + Q'_i Y_i) \ge \alpha_i\} \quad (۸)$$

$$Z_i = 1 \qquad \forall i \in \omega = \{i \mid (Q_i X_i + Q'_i Y_i) \le \alpha_i\} \quad (۹)$$

$$d_q^- . d_q^+ = 0 \quad (۱۰)$$

$$d_t^- . d_t^+ = 0 \quad (۱۱)$$

$$d_c^- . d_c^+ = 0 \quad (۱۲)$$

$$X_i, Y_i, Z_i \in (0,1) \quad (۱۳)$$

$$d_t^-, d_t^+, d_c^-, d_c^+, d_q^-, d_q^+ \ge 0 \quad (۱۴)$$

در این مدل رابطه (۱) تابع هدف مسئله است جهت به حداقل رساندن انحراف از اهداف پروژه با اولویت به ترتیب زمان- هزینه- رضایت مدیر پروژه یا کارفرما از اقدامات که برای بهبود کیفیت پروژه انجام می‌نمائید. رابطه (۲) محدودیت جهت دستیابی به زمان مورد انتظار برای اتمام پروژه می‌باشد. رابطه (۳) محدودیت جهت دستیابی به هزینه مورد انتظار برای اتمام پروژه می‌باشد. رابطه (۴) محدودیت جهت دستیابی به رضایت مدیر پروژه از اقدامات که برای بهبود کیفیت پروژه می‌باشد.

باید توجه کرد که در این مدل برای هر فعالیت اقدامات اصلاحی توسط مدیر پروژه و کارشناسان پیش‌بینی شده است. اما این اقدامات در صورتی اجرا و وارد شبکه پروژه می‌شوند که کیفیت فعالیت، از حداقل مقدار کیفیت تعیین شده (α) کمتر باشد . همچنین در این حالت هزینه اقدام اصلاحی و ضریب Q_g (که با توجه به آن حداقل تعداد اقدامات اصلاحی می‌شود) نیز در نظر گرفته می‌شود و با توجه به همه این عوامل اقدام اصلاحی وارد شبکه پروژه می‌شود رابطه‌های (۷ الی ۹) نشان دهنده این محدودیت می‌باشد. هر فعالیت می‌تواند در یکی از دو حالت نرمال و یا فشرده انجام شود که رابطه (۶) نشان دهنده این محدودیت می‌باشد. در صورتی که فعالیت در حالت نرمال انجام شود، زمان انجام فعالیت بیشتر از زمان آن در حالت فشرده می‌باشد و هزینه فعالیت، کمتر از میزان آن در حالت فشرده

است. در حالت نرمال ، کیفیت فعالیت نیز بیشتر از کیفیت در حالت فشرده خواهد بود. بنابراین در حالتی که فعالیت فشرده انجام شود، زمان انجام فعالیت و کیفیت فعالیت کاهش می‌یابد و میزان هزینه انجام آن نیز افزایش خواهد یافت. در این حالت (فشرده) ممکن است کیفیت انجام فعالیت از حد کمینه‌ای که توسط مدیر پروژه تعیین شده کمتر باشد، که بدین منظور در مدل پروژه اقدامات اصلاحی، باتوجه به محدودیت‌های زمان و هزینه، می تواند وارد شبکه پروژه شوند که رابطه (۳ و۹) بازگو کننده این مسئله می‌باشد. این اقدامات نیز هزینه و زمانی را در برخواهد داشت که با توجه به محدودیت‌ها ممکن است برای تمامی فعالیت‌های با کیفیت کم مورد اجرا در نیاید، ولی حداقل این اقدامات توسط مدیرپروژه یا کارفرما تعیین می‌شود تا بهبود کیفیت در پروژه رعایت و رضایت مدیر را در برداشته باشد. در واقع با ضریب (Q_g) که نرخ حداقل رضایت مدیر پروژه است و نیز با توجه به تعداد کل فعالیت‌های موجود در شبکه پروژه، تعداد حداقل این اقدامات مشخص خواهند شد. با توجه به اولویت کوتاه نمودن زمان پروژه، جهت انجام این اقدام، می بایست بر روی مسیر بحرانی پروژه فشرده‌سازی انجام، تا نهایت زمان کل پروژه کوتاه شود بنابراین رابطه (۵) محدودیت انتخاب فعالیت‌های واقع در مسیر بحرانی جهت فشرده‌سازی زمان می باشد. رابطه (۷) نشان‌دهنده شرطی که کلیه فعالیت‌ها بایستی کیفیتی بالاتر از حد مینیمم را داشته باشند می باشد. رابطه‌های (۱۰ الی ۱۲) نشان دهنده این موضوع می‌باشد که انحرافات زمان ، هزینه و کیفیت مدل تنها می‌تواند یکی از حالت متغیر مازاد یا کمبود را داشته باشد.

۴- مطالعه موردی

در این بخش موازنه‌ی زمان هزینه و کیفیت بر روی یکی از پروژه‌های اجرا شده در شرکت ماشین سازی اراک به نام طراحی و اجرای پل بزرگ زیر قوسی کارون ۴ در مدل‌ها ارائه شده در قسمت قبل به کار گرفته شده است.

پروژه شامل ساخت این پل، اتصال جاده شهرکرد به ایذه بوده که بر روی مخزن (دریاچه) سد کارون ۴ ساخته می‌شود. پل بزرگ کارون ۴ پس از ساخت، بزرگترین پل زیر قوسی خاورمیانه می‌باشد. عملیات طراحی و خدمات مهندسی، تأمین مواد خام، ساخت و نصب قطعات، انجام کارهای ساختمان و راه اندازی توسط شرکت ماشین سازی اراک و با مشارکت شرکت سامان محیط (در بخش سیویل، زیر سازه) در مدت زمان۲۰ ماه انجام شد. پروژه به صورت EPC بوده و شرکت ماشین سازی اراک که ساخت پل‌های عظیم کارون ۳ را در مجموعه افتخارات خود دارد به عنوان سر گروه مشارکت این طرح انتخاب گردید. کارفرمای پروژه شرکت توسعهٔ منابع آب و نیروی ایران بود. لازم به ذکر است که تکنولوژی طراحی و اجرای پل قوسی، بویژه پل‌های سازه فلزی تنها در انحصار چند کشور دنیاست که یکی از آنها ایران و شرکت ماشین سازی اراک پیشرو این صنعت در کشور می‌باشد.

این پروژه مطابق برنامه زمان بندی ارائه شده در شرکت ماشین سازی اراک دارای ۹۹ فعالیت است. از این رو، در این مقاله در گام اول ، در طی جلسات حضوری با مدیر پروژه و صاحب نظران خبره در آن شرکت پیرامون اطلاعات مورد نیاز جهت پارامترهای مورد نیاز در مدل نظیر مدت زمان فشرده هر فعالیت و هزینه‌های اضافی ناشی از فشرده سازی و همچنین حداقل کیفیت مورد قبول و در صورت بروز اشکال کیفیتی، هزینه‌های اضافی جهت انجام اقدامات اصلاحی آن فعالیت برگزار گردید و نتایج جمع بندی شده این جلسات در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱) : مقادیر و پارامترها پروژه

ردیف	شرح فعالیت	زمان نرمال	زمان فشرده	زمان انجام اقدام اصلاحی	شناوری کل	هزینه نرمال	هزینه فشرده	هزینه انجام اقدام اصلاحی	حداقل کیفیت	کیفیت فشرده
۱	محاسبات و طراحی اولیه،general view	۱۳۱	۹۰	۹	۰	۲۵۰	۵۰۰	۷۵	۰.۹۵	۰.۹۶
۲	طراحی نقشه های اجرایی و جنرال	۱۸۴	۱۲۰	۱۲	۰	۵۰۰	۱،۰۰۰	۱۲۳	۰.۹۵	۰.۹۶
۳	تایید محاسبات و نقشه های اجرایی و جنرال	۱۸۸	۱۲۰	۱۲	۰	۷۵۰	۱،۵۰۰	۲۴۸	۰.۹۵	۰.۹۰
۴	نقشه های کارگاهی	۲۵۵	۱۸	۲	۱۰۴	۵۰۰	۷۵۰	۱۱۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۵	روش های جوشکاری	۱۰۶	۶۰	۶	۹۵	۵۰۰	۷۵۰	۹۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۶	برنامه کنترل کیفی سازه	۱۰۶	۶۰	۶	۸۶	۵۰۰	۷۵۰	۱۲۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۷	روش های نصب	۲۵۵	۱۸۰	۱۸	۱۰۴	۷۵۰	۱،۱۲۵	۱۶۹	۰.۹۰	۰.۸۵
۸	برنامه کنترل کیفی زیرسازه	۸۰	۶۰	۶	۴۱	۵۰۰	۷۵۰	۹۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۹	روش های اجرایی عملیات ساختمانی	۱۳۳	۶۰	۶	۲۹۸	۵۰۰	۷۵۰	۱۲۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۰	استعلام مواد خام	۳۰۰	۳۰	۲	۱۶	۹۹۹	۱،۰۴۹	۳۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۱	سفارش گذاری مواد خام	۳۱۰	۳۰	۲	۱۶	۳،۹۹۵	۴،۱۹۵	۱۲۶	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۲	ساخت و بازرسی مواد خام	۳۶۰	۱۰۰	۷	۱۶	۱۴،۵۸۲	۱۵،۳۱۱	۴۵۹	۰.۸۰	۰.۷۰
۱۳	حمل به کارگاه ماشین سازی اراک مواد خام	۳۴۰	۹۰	۶	۱۶	۳۹۹	۴۱۹	۱۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۴	استعلام پروفیل	۱۴۵	۶۰	۱۳	۲۸	۲۱۲	۲۳۴	۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۵	سفارش گذاری پروفیل	۱۴۰	۶۰	۱۳	۲۸	۴۲۵	۴۶۷	۱۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۶	گشایش اعتبار پروفیل	۱۴۰	۶۰	۱۳	۲۸	۴۲۵	۴۶۷	۱۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۷	ساخت پروفیل	۱۷۵	۱۰۰	۲۱	۲۸	۲،۳۳۷	۲،۵۷۱	۷۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۸	بازرسی پروفیل	۱۳۰	۷۰	۱۵	۲۸	۲۱۲	۲۳۴	۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۱۹	حمل به گمرک پروفیل	۱۵۵	۷۰	۱۵	۲۸	۱۰۶	۱۱۷	۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۰	ترخیص از گمرک پروفیل	۱۳۰	۷۰	۱۵	۲۸	۱،۱۹۵	۱،۳۱۵	۳۹	۰.۹۰	۰.۹۱

ردیف	شرح فعالیت	زمان نرمال	زمان فشرده	زمان انجام اقدام اصلاحی	شناوری کل	هزینه نرمال	هزینه فشرده	هزینه انجام اقدام اصلاحی	حداقل کیفیت	کیفیت فشرده
۲۱	حمل به کارگاه ماشین سازی اراک پروفیل	۱۳۰	۷۵	۱۶	۲۸	۳۹۸	۴۳۸	۱۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۲	استعلام ورق	۱۴۵	۶۰	۱۳	۲۸	۲،۶۲۰	۲،۸۸۲	۸۶	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۳	سفارش گذاری ورق	۱۴۰	۶۰	۱۳	۲۸	۵،۲۴۱	۵،۷۶۵	۱۷۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۴	گشایش اعتبار ورق	۱۴۰	۶۰	۱۳	۲۸	۵،۲۴۱	۵،۷۶۵	۱۷۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۵	ساخت ورق	۱۷۵	۱۰۰	۲۱	۲۸	۲۸،۸۲۴	۳۱،۷۰۶	۹۵۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۶	بازرسی ورق	۱۳۰	۷۰	۱۵	۲۸	۲،۶۲۰	۲،۸۸۲	۸۶	۰.۹۰	۰.۸۵
۲۷	حمل به گمرک ورق	۱۵۵	۷۰	۱۵	۲۸	۱،۳۱۰	۱،۴۴۱	۴۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۸	ترخیص از گمرک ورق	۱۳۰	۷۰	۱۵	۲۸	۱۴،۷۳۹	۱۶،۲۱۳	۴۸۶	۰.۹۰	۰.۹۱
۲۹	حمل به کارگاه ماشین سازی اراک ورق	۱۳۰	۷۵	۱۶	۲۸	۴،۹۱۳	۵،۴۰۴	۱۶۲	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۰	ساخت قطعات مرتبط به زیر سازه	۱۲۶	۹۰	۳	۲۶	۲،۴۴۴	۲،۹۳۳	۴۴۰	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۱	ساخت دهانه جنوبی	۶۵	۶۰	۴	۲۸	۱،۹۵۶	۲،۴۰۵	۹۶	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۲	ساخت پانل ۰۱ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۳۸	۱،۸۰۲	۲،۲۱۷	۸۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۳	ساخت پانل ۰۲ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۳،۱۶۶	۳،۸۹۴	۱۵۶	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۴	ساخت پانل ۰۳ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۲،۵۸۱	۳،۱۷۵	۱۲۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۵	ساخت پانل ۰٤ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۲،۱۶۵	۲،۶۶۳	۱۰۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۶	ساخت پانل ۰۵ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۲،۰۱۶	۲،۴۸۰	۹۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۷	ساخت پانل ۰٦ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۱،۷۹۸	۲،۲۱۲	۸۸	۰.۸۵	۰.۸۶
۳۸	ساخت پانل ۰۷ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۱،۶۳۷	۲،۰۱۳	۸۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۳۹	ساخت پانل ۰۸ جنوبی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۱،۵۹۷	۱،۹۶۴	۷۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۰	ساخت پانل ۰۹ جنوبی	۸۵	۶۰	۴	۴۲	۱،۴۹۰	۱،۸۳۳	۷۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۱	ساخت پانل ۱۰ جنوبی	۷۵	۶۰	۴	۴۲	۱،۴۵۹	۱،۷۹۵	۷۲	۰.۹۰	۰.۹۱

ردیف	شرح فعالیت	زمان نرمال	زمان فشرده	زمان انجام اقدام اصلاحی	شناوری کل	هزینه نرمال	هزینه فشرده	هزینه انجام اقدام اصلاحی	حداقل کیفیت	کیفیت فشرده
۴۲	ساخت پانل میانی ۱۱	۶۵	۵۰	۴	۴۲	۱،۱۵۵	۱،۴۲۱	۵۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۳	ساخت پانل ۱۰ شمالی	۷۵	۶۰	۴	۴۲	۱،۴۵۹	۱،۷۹۵	۷۲	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۴	ساخت پانل ۰۹ شمالی	۸۵	۶۰	۴	۴۲	۱،۴۹۰	۱،۸۳۳	۷۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۵	ساخت پانل ۰۸ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۱،۵۹۷	۱،۹۶۴	۷۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۶	ساخت پانل ۰۷ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۱،۶۳۷	۲،۰۱۳	۸۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۷	ساخت پانل ۰٦ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۱،۷۹۸	۲،۲۱۲	۸۸	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۸	ساخت پانل ۰۵ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۲،۰۱۶	۲،۴۸۰	۹۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۴۹	ساخت پانل ۰٤ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۲،۱۶۵	۲،۶۶۳	۱۰۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۵۰	ساخت پانل ۰۳ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۲،۵۸۱	۳،۱۷۵	۱۲۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۵۱	ساخت پانل ۰۲ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۳،۱۶۶	۳،۸۹۴	۱۵۶	۰.۹۰	۰.۹۱
۵۲	ساخت پانل ۰۱ شمالی	۸۰	۶۰	۴	۴۲	۱،۸۰۲	۲،۲۱۷	۸۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۵۳	ساخت دهانه شمالی ۰۲	۵۵	۴۰	۳	۴۲	۲،۲۲۴	۲،۷۳۶	۱۰۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۵۴	ساخت دهانه شمالی ۰۱	۵۵	۴۰	۳	۳۰	۱،۱۹۸	۱،۴۷۳	۵۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۵۵	ساخت متعلقات و یاتاقانها	۲۶۸	۱۵۰	۱۰	۱۶	۴۸۹	۶۰۱	۲۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۵۶	اخذ مجوزهای مورد نیاز جهت شروع کار پس از تحویل زمین در سمت جنوبی و شمالی	۶۰	۳۰	۰	۱۵	۰	۰	۰	۰.۹۵	۱
۵۷	تحویل کوله جنوبی و مسیر دسترسی از تونل روی سد تا خروجی تونل کوله جنوبی	۰	۰	۰	۵	۰	۰	۰	۰.۹۵	۱
۵۸	تحویل کوله شمالی و مسیر دسترسی به آن	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰.۹۵	۱
۵۹	تجهیز کارگاه	۲۶۰	۱۲۰	۳۰	۰	۳،۸۴۸	۶،۱۵۶	۹۲۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۶۰	برچیدن کارگاه	۱۰	۹	۰	۰	۴۲۸	۴۲۸	۰	۰.۷۰	۰.۷۵
۶۱	ایجاد امکان دسترسی از محل کوله ها به پاتاقها	۱۲۷	۹۰	۱۰	۰	۱۱،۴۵۶	۱۷،۱۸۴	۱۷	۰.۷۰	۰.۷۱

ردیف	شرح فعالیت	زمان نرمال	زمان فشرده	زمان انجام اقدام اصلاحی	شناوری کل	هزینه نرمال	هزینه فشرده	هزینه انجام اقدام اصلاحی	حداقل کیفیت	کیفیت فشرده
۶۲	اجرای پلت فرم جنوبی	۱۲۳	۹۰	۳	۱	۱،۳۲۱	۱،۸۴۹	۴۶	۰.۹۰	۰.۹۱
۶۳	اجرای مطالعات و کاوشهای ژئوتکنیک سمت جنوبی	۲۲۵	۱۵۰	۱	۴	۲،۱۱۳	۲،۹۵۸	۷۴	۰.۹۵	۰.۹۶
۶۴	اجرای پلت فرم شمالی	۱۲۳	۹۰	۳	۰	۲،۶۴۱	۳،۶۹۸	۹۲	۰.۸۰	۰.۸۱
۶۵	اجرای مطالعات و کاوشهای ژئوتکنیک سمت شمالی	۲۶۵	۱۸۰	۴	۰	۱،۳۲۱	۱،۸۴۹	۴۶	۰.۹۵	۰.۹۶
۶۶	اجرای کوله جنوبی	۹۳	۶۰	۲	۱	۲،۱۱۳	۲،۹۵۸	۷۴	۰.۹۵	۰.۹۶
۶۷	اجرای پایه ستون و ستون جنوبی	۹۳	۶۰	۲	۱	۲،۶۴۱	۳،۶۹۸	۹۲	۰.۹۰	۰.۹۱
۶۸	اجرای پاطاق جنوبی	۹۳	۶۰	۲	۲	۴،۷۵۴	۶،۶۵۶	۱۶۶	۰.۹۵	۰.۹۶
۶۹	اجرای پاطاق شمالی	۱۶	۱۶	۱	۰	۴،۷۵۴	۶،۶۵۶	۱۶۶	۰.۹۵	۰.۹۶
۷۰	اجرای پایه ستون دوم شمالی	۵	۵	۱	۰	۱،۳۲۱	۱،۸۴۹	۴۶	۰.۹۵	۰.۹۶
۷۱	اجرای پایه ستون اول شمالی	۹۲	۶۰	۵	۰	۱،۳۲۱	۱،۸۴۹	۴۶	۰.۹۵	۰.۹۶
۷۲	اجرای کوله شمالی	۹۲	۶۰	۵	۰	۲،۱۱۳	۲،۹۵۸	۷۴	۰.۹۵	۰.۹۰
۷۳	نصب دهانه جنوبی	۱۰۵	۷۰	۲	۱	۲،۶۷۹	۳،۸۸۵	۸۰	۰.۹۰	۰.۸۵
۷۴	نصب پانل جنوبی۱	۱۰۵	۷۰	۲	۰	۲،۶۱۷	۳،۷۹۴	۷۸	۰.۹۰	۰.۹۱
۷۵	نصب پانل جنوبی ۲	۹۵	۶۰	۲	۰	۴،۵۹۷	۶،۶۶۶	۱۳۷	۰.۸۰	۰.۸۱
۷۶	نصب پانل جنوبی ۳	۸۵	۶۰	۲	۰	۳،۷۴۸	۵،۴۳۵	۱۱۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۷۷	نصب پانل جنوبی ٤	۷۶	۵۰	۲	۰	۳،۱۴۷	۴،۵۶۴	۹۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۷۸	نصب پانل جنوبی ۵	۶۷	۴۵	۲	۰	۲،۹۲۹	۴،۲۴۷	۸۷	۰.۹۰	۰.۸۵
۷۹	نصب پانل جنوبی ٦	۵۸	۴۰	۲	۰	۲،۶۱۱	۳،۷۸۶	۷۸	۰.۹۰	۰.۹۱
۸۰	نصب پانل جنوبی ۷	۵۰	۳۵	۲	۰	۲،۳۷۵	۳،۴۴۴	۷۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۸۱	نصب پانل جنوبی ۸	۴۳	۳۰	۲	۰	۲،۳۲۲	۳،۳۶۷	۶۹	۰.۹۰	۰.۹۱

ردیف	شرح فعالیت	زمان نرمال	زمان فشرده	زمان انجام اقدام اصلاحی	شناوری کل	هزینه نرمال	هزینه فشرده	هزینه انجام اقدام اصلاحی	حداقل کیفیت	کیفیت فشرده
۸۲	نصب پانل جنوبی ۹	۳۵	۲۵	۲	۰	۲،۱۶۳	۳،۱۳۶	۶۴	۰.۸۰	۰.۸۱
۸۳	نصب پانل جنوبی۱۰	۲۵	۱۵	۲	۰	۲،۱۲۲	۳،۰۷۷	۶۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۸۴	نصب پانل شمالی ۱۰	۲۵	۱۵	۲	۰	۲،۱۲۲	۳،۰۷۷	۶۳	۰.۹۰	۰.۹۱
۸۵	نصب پانل شمالی ۰۹	۳۵	۲۵	۲	۰	۲،۱۶۳	۳،۱۳۶	۶۴	۰.۹۰	۰.۹۵
۸۶	نصب پانل شمالی ۰۸	۴۳	۳۰	۲	۰	۲،۳۲۲	۳،۳۶۷	۶۹	۰.۹۰	۰.۹۱
۸۷	نصب پانل شمالی ۰۷	۵۰	۳۵	۲	۰	۲،۳۷۵	۳،۴۴۴	۷۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۸۸	نصب پانل شمالی ۰٦	۵۸	۴۰	۲	۰	۲،۶۱۱	۳،۷۸۶	۷۸	۰.۹۰	۰.۹۱
۸۹	نصب پانل شمالی ۰۵	۶۷	۴۵	۲	۰	۲،۹۲۹	۴،۲۴۷	۸۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۹۰	نصب پانل شمالی ۰٤	۷۶	۵۰	۲	۰	۳،۱۴۷	۴،۵۶۴	۹۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۹۱	نصب پانل شمالی ۰۳	۸۵	۶۰	۲	۰	۳،۷۴۸	۵،۴۳۵	۱۱۱	۰.۹۰	۰.۹۱
۹۲	نصب پانل شمالی ۰۲	۹۵	۶۰	۲	۰	۴،۵۹۷	۶،۶۶۶	۱۳۷	۰.۹۰	۰.۹۱
۹۳	نصب پانل شمالی ۰۱	۱۰۵	۷۰	۲	۰	۲،۶۱۷	۳،۷۹۴	۷۸	۰.۹۰	۰.۹۱
۹۴	نصب دهانه دوم شمالی	۹۵	۶۰	۲	۰	۳،۰۴۱	۴،۴۰۹	۹۰	۰.۹۰	۰.۸۵
۹۵	نصب دهانه اول شمالی	۷۰	۴۵	۲	۰	۱،۹۸۲	۲،۸۷۵	۵۹	۰.۹۰	۰.۸۰
۹۶	نصب پانل میانی ۱۱	۱۸	۱۵	۲	۰	۱،۶۷۴	۲،۴۲۷	۵۰	۰.۹۰	۰.۸۵
۹۷	نصب متعلقات شامل یاتاقان ها ،درز اتبساط ها ،هندریل هاو غیره	۲۹۰	۱۸۰	۱۰	۰	۳۳۵	۴۸۶	۱۰	۰.۹۰	۰.۹۱
۹۸	روشنایی و آسفالت	۳۰	۲۹	۳	۰	۱،۵۰۰	۱،۶۵۰	۳۴	۰.۹۰	۰.۹۱
۹۹	راه اندازی	۱۵	۱۴	۲	۰	۱،۵۰۰	۱،۸۷۵	۳۸	۰.۹۰	۰.۹۱

۵- ارائه نتایج

در این تحقیق به ارائه مدل و همچنین تحلیل نتایج حاصل از حل مساله مورد مطالعه و پارامترهای تصمیم‌گیری آن می‌پردازیم. با توجه به اهمیت دست یابی به جواب‌های دقیق مساله را در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی LINGO 11 کدنویسی و اجرا شده است. با توجه به مدل ارائه شده می‌بایست مقدار بهینه هر یک از اهداف شامل زمان و هزینه و کیفیت را با قرار دادن آن به عنوان تابع هدف محاسبه نمود که نتایج آن به شرح ذیل می‌باشد.

۵-۱- *جواب بهینه هر یک از تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت به تنهایی*

با توجه به اطلاعات جدول ۱ و قرار دادن آن در مدل ارائه شده با فرض اینکه هر یک از اهداف پروژه به تنهایی بهینه گردد، جواب بهینه هر هدف (زمان- هزینه-کیفیت) مطابق جدول ۲ به ترتیب برابر ۱۲، ۰/۳۲۱ ، ۰/۵ می‌باشد.

جدول (۲) : جواب بهینه هر کدام از توابع هدف به تنهایی

متغییر	مقدار
N	۹۹
CO	۵
CGOAL	۲۹۶۵۰۰
TGOAL	۹۷۷۰
QGOAL	۰/۰۵
M	۱۰۰۰۰۰
QUALITY	۱
TCPM	۶۰۹
T	۱۲
C	۰/۰۳۲۱
Q	۰/۰۵

۵-۲- *جواب بهینه مدل با توجه به ضرایب وزنی متفاوت بین هر هدف*

با در نظر گرفتن مقدار هزینه مورد انتظار (C_g) ۵.۲۹۶ میلیون ریال و زمان مورد انتظار (T_g) ۹۷۷۰ روز و نرخ رضایت از اقدامات بهبود کیفیت (Q_g) ۵ درصد از تعداد فعالیت‌های پروژه و طولانی‌ترین مسیر پروژه (T_{cpm}) ۶۰۹ روز و هزینه بالاسری به ازای هر واحد زمان پروژه (C_0) ۵ میلیون ریال و حل مدل با ضریب وزنی متفاوت برای هر هدف، مقدار تابع هدف متفاوتی بدست می‌آید که به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول (۳) : نتایج تابع هدف برای ضرایب وزنی متفاوت اهداف

P1(ضرایب وزنی زمان)																	
۰.۱		۰.۲		۰.۳		۰.۴		۰.۵		۰.۶		۰.۷		۰.۸			
P2 (ضرایب وزنی هزینه) و P3 (ضرایب وزنی کیفیت)	P2	۰.۱	۱.۴۳۹	۰.۱	۱.۷۸۱	۰.۱	۲.۱۲۳	۰.۱	۲.۴۶۴	۰.۱	۲.۸۰۶	۰.۱	۳.۱۴۸	۰.۱	۳.۴۸۹	۰.۱	۳.۸۳۱
	P3	۰.۸		۰.۷		۰.۶		۰.۵		۰.۴		۰.۳		۰.۲		۰.۱	
	P2	۰.۲	۱.۵۳۱	۰.۲	۱.۸۷۹	۰.۲	۲.۲۲۰	۰.۲	۲.۵۶۲	۰.۲	۲.۹۰۴	۰.۲	۳.۲۴۵	۰.۲	۳.۵۸۷		
	P3	۰.۷		۰.۶		۰.۵		۰.۴		۰.۳		۰.۲		۰.۱			
	P2	۰.۳	۱.۴۶۵	۰.۳	۱.۹۷۶	۰.۳	۲.۳۱۸	۰.۳	۲.۶۶۰	۰.۳	۳.۰۰۱	۰.۳	۳.۳۴۳				
	P3	۰.۶		۰.۵		۰.۴		۰.۳		۰.۲		۰.۱					
	P2	۰.۴	۱.۳۷۳	۰.۴	۲.۰۶۳	۰.۴	۲.۴۱۶	۰.۴	۲.۷۵۷	۰.۴	۳.۰۹۹						
	P3	۰.۵		۰.۴		۰.۳		۰.۲		۰.۱							
	P2	۰.۵	۱.۲۸۰	۰.۵	۲.۰۲۲	۰.۵	۲.۵۱۳	۰.۵	۲.۸۵۵								
	P3	۰.۴		۰.۳		۰.۲		۰.۱									
	P2	۰.۶	۱.۱۸۸	۰.۶	۱.۹۳۰	۰.۶	۲.۵۹۴										
	P3	۰.۳		۰.۲		۰.۱											
	P2	۰.۷	۱.۰۹۶	۰.۷	۱.۸۳۸												
	P3	۰.۲		۰.۱													
	P2	۰.۸	۱.۰۰۴														
	P3	۰.۱															

۶- نتیجه‌گیری

با قراردادن جدول ۳ در اختیار تصمیم‌گیرندگان پروژه، این امکان به آنها داده می‌شودکه با انتخاب اولویت‌های زمان و هزینه و کیفیت در خصوص پروژه تصمیمات مناسبی را بگیرند.

به عنوان مثال با توجه به اطلاعات دریافتی از نخبگان و کارشناسان این پروژه و دقت در جدول فوق، با کاهش اولویت زمان، مقدار تابع هدف کم و باعث نزدیک شدن به مقدار بهینه مدل می‌گردد. به عبارت دیگر هرچه مقدار ضریب وزنی زمان کمتر، جواب مدل بهینه می‌گردد. بنابراین با قراردادن کمترین مقدار ضریب وزنی زمان، هرچه ضریب وزنی هزینه افزایش می‌نماید به جواب بهینه نزدیک‌تر می‌گردد. به عبارت دیگر همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در این پروژه حساسیت ضریب وزنی هزینه از دو هدف دیگر بیشتر و بعد از آن کیفیت می‌باشد.

با قراردادن جواب‌های مختلف حل شده مدل (تغییر اولویت‌های مورد نظر)، در اختیار نخبگان و کارشناسان پروژه، صحت عملکرد مدل را تایید نموده است.

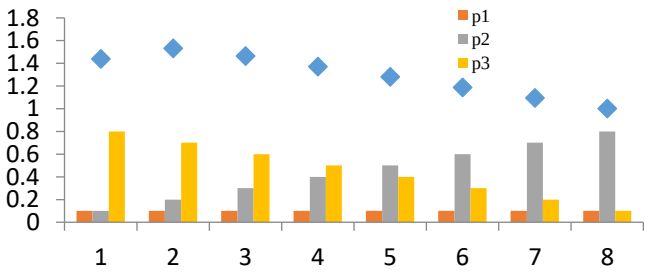
همانطور که اشاره شد می توان با محدود ساختن هر قسمت از تابع هدف بر روی بهبود مقادیر سایر بخش ها کار نمود و به این ترتیب با دخالت مدل در تصمیم گیری ها به کسب بهترین نتایج در پروژه امیدوار بود. به طورخلاصه ویژگی ها و نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر خلاصه می شود.

۱- ارائه تصویری روشن از کیفیت و نحوه دستیابی به آن با توجه به نتایج مدل

۲- تصمیم گیری در انتخاب گزینه ها در مورد هر فعالیت.

۳- کاهش هزینه ها و زمان پروژه و افزایش کیفیت آن به صورت بهینه و قابل دستیابی

با توجه به توضیحات داده شده در این مقاله، بکارگیری این روش به منظور یافتن بهترین ترکیب هزینه زمان و کیفیت پیشنهاد می‌شود و با ارائه مفهوم کامل‌تری از کیفیت، راه تصمیم‌گیران را برای انتخاب بهتر گزینه هموار می‌کند و می‌توان با توجه به محدودیت‌های اجرائی که به طور معمول در پروژه‌ها وجود دارد به بهترین ترکیب سه فاکتور دست یافت.



شکل (۱) : نمودار تاثیر ضرایب وزنی بر روی تابع هدف

برای تحقیقات آتی در این زمینه می‌توان به مسائل زیر پرداخت:

۱- بررسی توازن هزینه، زمان و کیفیت در شرایطی تغییر مقدار هدف آنها

۲- اضافه نمودن مسائل ریسک پروژه به همراه سه هدف مورد بحث.

۳- استفاده از سایر رویکردهای مدل سازی چندهدفه.

۴- در نظر گرفتن پارامترهای تصادفی و غیرقطعی در مدل.

منابع و ماخذ

[۱] ابراهیم نژاد، س. احمدی، و. جوانشیر ، ح. (۱۳۹۲). **موازنه معیارهای هزینه، زمان و کیفیت در یک شبکه CPM با استفاده از منطق فازی و الگوریتم ژنتیک. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید**. صفحه ۳۷۶-۳۶۱.

[۲] علیخانزاده، و. کاظمی، م. لگزیان، م. (۱۳۹٤). **بهینه سازی موازنه هزینه، زمان و کیفیت در پروژه¬های عمرانی با رویکرد بررسی تأثیر انتخاب مواد و نیروی کار**. دهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. ۱۰ صفحه.

[3] Project Management Institute. (1987). Pr**oject Management Body of Knowledge (PMBOK)**. Project Management Institute.

[4] Demeuleme

[5] Ester, E. L., & Herroelen, W. S. (2006). **Project Scheduling: a Research Handbook (Vol. 49).** Springer Science & Business Media.

[6] Demeulemeester, E. L., & Herroelen, W. S. (1996). **Modelling Setup Times, Process Batches and Transfer Batches Using Activity Network Logic.** European Journal of Operational Research, 89(2), 355-365.

[7] Kelley Jr, J. E. (1961). **Critical-Path Planning and Scheduling: Mathematical basis. Operations Research**, 9(3), 296-320.

[8] Siemens, N., A **Simple CPM Time-Cost Tradeoff Algorithm**. Management science, 1971. 17(6): p. B-354-B-363.

[9] Vrat, P., & Kriengkrairut, C. (1986). A **Goal Programming Model for Project Crashing With Piecewise Linear Time-Cost Trade-off.** Engineering Costs and Production Economics, 10(2), 161-172.

[10] Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). **Project Management With Time, Cost, and Quality Considerations**. European Journal of Operational Research, 88(2), 320-327.

[11] Atkinson, R. (1999). **Project Management: Cost, Time and Quality, two Best Guesses and a Phenomenon, its time to Accept Other Success Criteria**. International journal of project Management, 17(6), 337-342.

[12] Khang, D. B., & Myint, Y. M. (1999). **Time, Cost and Quality Trade-off in Project Management: a Case study**. International Journal of Project Management, 17(4), 249-256.

[13] Hegazy, T. (1999). **Optimization of Construction Time-Cost Trade-off Analysis Using Genetic Algorithms**. Canadian Journal of Civil Engineering, 26(6), 685-697

[14] Li, H., Cao, J. N., & Love, P. E. D. (1999). **Using Machine Learning and GA to Solve time-Cost Trade-off Problems**. Journal of Construction Engineering and Management, 125(5), 347-353.

[15] Feng, C. W., Liu, L., & Burns, S. A. (2000). **Stochastic Construction Time-Cost Trade-off Analysis.** Journal of Computing in Civil Engineering, 14(2), 117-126.

[16] El-Rayes, K., & Kandil, A. (2005). **Time-Cost-Quality Trade-off Analysis for Highway Construction**. Journal of construction Engineering and Management, 131(4), 477-486.

[17] Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2006). **On the Discrete time, Cost and Quality Trade-off Problem.** Applied Mathematics and Computation, 181(2), 1305-1312.

[18] Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2007). **A Solution Procedure for the Discrete Time, Cost and Quality Tradeoff Problem**

Using Electromagnetic Scatter Search. Applied Mathematics and Computation, 190(2), 1136-1145.

[19] Li, S., & Zhu, K. (2008). **Research on Multi-Objective Optimization of Lean Construction Project. In MultiMedia and Information Technology, 2008**. MMIT'08. International Conference on (pp. 480-483). IEEE.

[20] Li, H. M., & Wang, Z. F. (2009, September). **Applying self-Adaptive ant Colony Optimization for Construction Time-Cost Optimization**. In Management Science and Engineering, 2009. ICMSE 2009. International Conference on (pp. 283-289). IEEE

[21] Eshtehardian, E., Afshar, A., & Abbasnia, R. (2009). **Fuzzy-Based MOGA Approach to Stochastic Time–Cost Trade-off Problem.** Automation in Construction, 18(5), 692-701.

[22] Ning, X., & Wang, L. G. (2009). **Construction Quality-Cost Trade-off Using the Pareto-Based ant Colony Optimization Algorithm. In Management and Service Science, 2009. MASS'09**. International Conference on (pp. 1-4). IEEE

[23] Liu, C. F., Rubenstein, L. V., Kirchner, J. E., Fortney, J. C., Perkins, M. W., Ober, S. K., & Chaney, E. F. (2009). **Organizational Cost of Quality Improvement for Depression Care.** Health Services Research, 44(1), 225-244.

[24] Yang, Q. (2009, July). **Application of Time-Cost-Quality Trade off Optimization Model Based on Improved PSO Algorithm to Construction Project**. In Information Processing, 2009. APCIP 2009. Asia-Pacific Conference on (Vol. 2, pp. 298-301). IEEE

[25] Zhang, H., & Xing, F. (2010). **Fuzzy-Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Time–Cost–Quality Tradeoff in Construction**. Automation in Construction, 19(8), 1067-1075.

[26] Zhang, H., & Li, H. (2010). **Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Construction Time-Cost Tradeoff Problems.** Construction Management and Economics, 28(1), 75-88

[27] Xiong, C., Li, G. Y., Zhang, S., Chen, Y., & Xu, S. (2011). **Energy-and Spectral-Efficiency Tradeoff in Downlink OFDMA Networks**. IEEE Transactions on Wireless Communications, 10(11), 3874-3886.

[28] Mokhtari, H., Salmasnia, A., & Bastan, M. (2012). **Three Dimensional Time, Cost and Quality Tradeoff Optimization in Project Decision Making**. In Advanced Materials Research (Vol. 433, pp. 5746-5752). Trans Tech Publications.

[29] Kim, J., Kang, C., & Hwang, I. (2012). **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), 264-272

[30] Hu, W., & He, X. (2014). **An Innovative Time-Cost-Quality Tradeoff Modeling of Building Construction Project Based on Resource Allocation**. The Scientific World Journal, 2014.