Civil Infrastructure Researches, Vol. 6, Issue.1, Spring and Summer 2020, pp. 153-173

Analysis of Quality Factor Evaluation Methods in Optimization Time-Cost Trade-off Problem in Construction Projects

S.A. Banihashemi*

Department of Industrial Engineering, Payame Noor University, Iran.

e-mail: banihashemi1120@gmail.com

A.R. Shahraki

Department of Industrial Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

e-mail: shahrakiar@hamoon.usb.ac.ir

The purpose of optimizing the time-cost trade-off problem is to analyze the reduction of the original project time with the lowest cost. In these issues, the impact of project implementation quality on various activities has not been taken into account. Attention to the quality factor goes back to the midnineties. Many articles have been published since then. In the equilibrium discussion, the three objectives of time, cost and quality of the project are to perform a cost-sensitivity analysis of the variations in the duration of activities to obtain the best combination of reduction in activities. This is to minimize total project costs and maximize overall project quality. This paper classifies the issues of time, cost and quality trade-off and examines how to calculate the quality factor in research as well as the relationship between the three objectives of time, cost and quality in projects and project activities. The results of the analysis of the articles show that the evaluation of the quality factor in equilibrium problems can be divided into four categories. In the first case, quality is implicitly assessed through the tasks needed to modify the non-coordinated activities. In the latter case, the quality of each activity is expressed as a function of its duration and cost. In the third case, the quality of an activity in each of its possible execution modes is estimated by experts, and in the latter case, the quality of an activity is assessed by the set of indicators.

Keywords: Optimization, Time-cost-quality trade-off problem, Project Scheduling, Project Quality, Activity Quality.

* Corresponding author
Received 07 October 2020, Revised 09 January 2021, Accepted 26 January 2021.
DOI: 10.22091/cer.2021.6061.1215

تحلیل روش‌های ارزیابی عامل کیفیت در بهینه‌سازی مسئله موازنه زمان– هزینه در صنعت ساخت‌وساز

سید علی بنی‌هاشمی*
استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور.
پست الکترونیک:
banihashemi@pnu.ac.ir

علیرضا شهرکی
دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
پست الکترونیک:
shahrakiar@hamoon.usb.ac.ir

مسائل موازنه زمان و هزینه توجه ویژه‌ای را در ادبیات مسائل زمان‌بندی به خود اختصاص داده است. هدف از مسئله بهینه‌سازی موازنه زمان- هزینه، تجزیه‌وتحلیل کاهش زمان اصلی پروژه با کمترین هزینه است. در این مسائل، تأثیر کیفیت اجرای پروژه برای فعالیت‌های مختلف لحاظ نشده است. توجه به عامل کیفیت در این بین به اواسط دهه ۹۰ میلادی باز می‌گردد. از آن زمان تاکنون مقالات بسیاری در این زمینه منتشر گردیده است. در بحث تعادل و موازنه، بین سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت پروژه نسبت به انجام تحلیل حساسیت هزینه نسبت به تغییرات مدت زمان انجام فعالیت‌ها اقدام می‌شود که هدف آن به‌دست آوردن بهترین ترکیب کاهش زمانی فعالیت‌ها است، به‌گونه‌ای که مجموع هزینه‌های پروژه، کمینه و کیفیت کل پروژه، بیشینه شود. مقاله حاضر، به طبقه‌بندی مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت و بررسی نحوه محاسبه عامل کیفیت در پژوهش‌ها و همچنین رابطه بین سه هدف زمان، هزینه و کیفیت در پروژه‌ها و فعالیت‌های پروژه می‌پردازد. نتایج تحلیل مقالات نشان می‌دهد که ارزیابی عامل کیفیت در مسائل موازنه را می‌توان به چهار دسته تقسیم‌بندی نمود. در مورد اول، کیفیت از طریق کارهایی که برای اصلاح فعالیت‌های غیرهماهنگ موردنیاز است به‌طور ضمنی ارزیابی می‌شود. در مورد دوم، کیفیت هر فعالیت به‌عنوان تابعی از مدت زمان و هزینه آن بیان شده است. در مورد سوم، کیفیت یک فعالیت در هریک از حالت‌های اجرایی احتمالی آن، به‌صورت تخمینی براساس نظر خبرگان برآورد می‌گردد و در آخرین مورد نیز کیفیت یک فعالیت توسط شاخص‌های تعیین شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، مسئله موازنه زمان- هزینه- کیفیت، زمان‌بندی پروژه، کیفیت پروژه، کیفیت فعالیت.

۱- مقدمه

در زمان‌بندی پروژه، اغلب می‌توان زمان اتمام پروژه را به‌وسیله کاهش مدت زمان برخی از فعالیت‌های پروژه با صرف هزینه‌های بیشتر سرعت بخشید. در گذشته، تصمیمات مربوط به تسریع پروژه، تنها به موازنه و تعادل بین دو هدف زمان و هزینه بود؛ اما در سال‌های بعد، کیفیت پروژه به‌عنوان یک عامل سوم نیز مورد توجه قرار گرفت [۱]. مقوله کیفیت و توجه به آن، یکی از اهداف پروژه محسوب می‌شود که در بدنه دانش مدیریت پروژه به‌صراحت عنوان شده است [۲]. مثلث زمان- هزینه- کیفیت به‌طور مستمر در طول چرخه عمر پروژه، به‌وسیله مدیران پروژه دنبال می‌شود. انتظارات متفاوت ذی‌نفعان پروژه و اتفاقاتی که در طول اجرای پروژه رخ می‌دهد، مدیران پروژه را ناچار به تغییراتی در اهداف می‌کند. طبق مثلث زمان- هزینه- کیفیت، تغییر اعمال شده بر روی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۰۷/۱۶، بازنگری ۱۳۹۹/۱۰/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۰۷.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2021.6061.1215

زمان و فشرده کردن آن، قطعا منجر به تغییراتی بر هزینه و کیفیت انجام پروژه خواهد شد [۳]. چراکه کیفیت پروژه به‌عنوان یکی از معیارهای اساسی موفقیت پروژه در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین انجام پروژه با حداقل هزینه و زمان و مطابق با استانداردهای عملکردی برای به‌دست آوردن مزیت رقابتی، یکی از قابلیت‌های مدیریت پروژه محسوب می‌شود [۴].

موضوع کیفیت و ارزیابی آن در پروژه‌های عمرانی، همواره یک مقوله چالش‌برانگیز برای پیمانکاران و کارفرمایان است. یکی از مباحث مهم در اجرای پروژه‌ها و نظارت بر اجرای پروژه‌ها، تعریف حداقل کیفیت موردنیاز پروژه و اطمینان یافتن از برآورده شدن این سطح از کیفیت توسط مدیران و مجریان پروژه می‌باشد. در باب میزان اهمیت حفظ کیفیت خروجی پروژه‌ها باید به این نکته توجه داشت که در صورت بروز اختلالات در خروجی پروژه و ایجاد نارضایتی در مشتری، عملکرد کل سازمان و تیم مدیریتی آن با چالش مواجه شده و زیر سؤال قرار می‌گیرد؛ بنابراین پرداختن به مقوله کیفیت به‌عنوان یکی از اهداف پروژه و موازنه کیفیت و سایر اهداف پروژه مانند زمان و هزینه و همچنین تأثیر آن بر برنامه‌ریزی و به‌طور خاص، زمان‌بندی پروژه در قالب مسائل موازنه زمان- هزینه- کیفیت مورد توجه می‌باشد.

براساس نظر باکارینی[1] (۱۹۹۹) مدیریت پروژه موفق بر روی فرآیندهای پروژه مخصوصاً اجرای موفق زمان، هزینه و کیفیت تمرکز می‌کند و از آنجا که کیفیت، یکی از اهداف سه‌گانه مثلث مدیریت پروژه محسوب شده و هرگونه تغییر در محیط پروژه از ویژگی‌های کیفیت تأثیر می‌پذیرد؛ بنابراین ویژگی‌های کیفیت، سهم منحصربه‌فردی در موفقیت پروژه دارد. از این‌رو، نیاز به بررسی نقش، رفتار و نحوه ارزیابی عامل کیفیت در پروژه‌های عمرانی ضرورت دارد [۵]. از طرف دیگر، در مدیریت پروژه، سه عامل زمان، هزینه و کیفیت معمولاً با هم مورد تأکید قرار می‌گیرند؛ اما اغلب می‌توان دو مؤلفه از این موارد را در کنار هم قرار داد:

(الف) اگر پروژه را با زمان کم و هزینه کم تحویل دهیم، ممکن است از کیفیت کار کاسته شود.

(ب) اگر پروژه را با زمان کم و کیفیت بالا تحویل دهیم، احتمالاً هزینه بالاتری خواهد داشت.

(ج) اگر پروژه را با کیفیت بالا و هزینه کم تحویل دهیم، ممکن است منجر به‌صرف زمان بیشتری شود [۶ و ۷].

با توجه به اهمیت موضوع ارزیابی عامل کیفیت در پروژه‌های عمرانی و ساخت‌وساز، روش‌های متفاوت و مختلفی از نحوه اندازه‌گیری آن در پژوهش‌های محققان ارائه شده است. کیفیت هر فعالیت با یک شاخص بین صفر و یک اندازه‌گیری می‌شود و کیفیت کلی پروژه نیز تابعی از کیفیت تک‌تک فعالیت‌های پروژه است؛ بنابراین اندازه‌گیری عامل کیفیت فعالیت‌های پروژه در مسائل موازنه زمان- هزینه قبل از انجام فعالیت به یکی از موضوعات مهم مورد بحث توسط محققان تبدیل شده است. از این‌رو، در این مقاله به بررسی مسائل موازنه زمان- هزینه- کیفیت در تحقیقات پژوهشگران پرداخته شده است تا این مقالات از جنبه عامل کیفیت مقایسه گردند و در نهایت، روش‌هایی که برای پیش‌بینی کیفیت فعالیت‌های پروژه توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است، دسته‌بندی و تحلیل گردند.

این مقاله در پنج بخش دسته‌بندی شده است. پس از بیان مقدمه در بخش اول مقاله، به بیان روش‌شناسی در بخش دوم پرداخته شده است. بخش سوم به تعریف و اندازه‌گیری عامل کیفیت می‌پردازد و تأثیر تسریع در پروژه را بر کیفیت تحلیل می‌کند. بخش چهارم طبقه‌بندی مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت را براساس فرضیه‌های مدل‌سازی و روش‌های حل ارائه می‌دهد که با بررسی عامل کیفیت در این مقالات، چهار رویکرد برای ارزیابی عامل کیفیت تفکیک شده است. در مورد اول، کیفیت از طریق کارهایی که برای اصلاح فعالیت‌های

[1]- Baccarini

غیرهماهنگ موردنیاز است به‌طور ضمنی ارزیابی می‌شود (بخش ۴-۱). در مورد دوم، کیفیت هر فعالیت به‌عنوان تابعی از مدت زمان و هزینه آن بیان شده است (بخش ۴-۲). در مورد سوم، کیفیت یک فعالیت در هریک از حالت‌های اجرایی احتمالی آن، به‌صورت ترکیب خاصی از منابعی که در انجام فعالیت با مدت زمان و هزینه مرتبط هستند، در نظر گرفته شده است و به‌صورت تخمینی براساس نظر خبرگان برآورد می‌گردد (بخش ۴-۳) و در آخرین بخش نیز کیفیت یک فعالیت توسط شاخص‌های تعیین شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (بخش ۴-۴). در بخش پنج نیز خلاصه‌ای از بررسی ادبیات پژوهش و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع پژوهش‌های مروری- توصیفی است که از نظر دامنه مطالعه، شامل مطالعات حوزه مدل‌سازی و زمان‌بندی پروژه بوده و از نظر منطق سازمان‌دهی محتوا، از نوع غیرتاریخی- روش‌شناختی است. بدین معنی که روش‌های مختلف ارزیابی عامل کیفیت و دیدگاه‌های محققان در این خصوص را بررسی و سازمان‌دهی می‌نماید. پژوهش‌های مروری- توصیفی برای بازبینی مفهومی دانش موجود به‌کار می‌روند و از طریق توصیف دقیق و دسته‌بندی خصوصیات یک پدیده یا جمعیت متکی به ادبیات مربوط، به توسعه دانش یا تسهیل تصمیم، کمک می‌کنند. روش جستجو و انتخاب منابع بدین صورت است که ابتدا طی یک جستجو در گوگل اسکالر، مقالات مرتبط با موضوع موازنه زمان- هزینه- کیفیت شناسایی شد. پس از مطالعه و بررسی این آثار، مقالات از نظر شیوه و روش بررسی عامل کیفیت در مسائل موازنه دسته‌بندی گردید. بازه زمانی مقالات مورد بررسی از سال ۱۹۹۶ می‌باشد که اولین مقاله موازنه زمان- هزینه- کیفیت ارائه شده است. با توجه به ارجاعات بیشتر به مقالات و ارائه مدل نوآورانه در بحث ارزیابی عامل کیفیت، بازه زمانی تا سال ۲۰۱۸ ادامه یافته است. در نهایت مقالات منتخب براساس نحوه محاسبه و دیدگاه نویسندگان به موضوع کیفیت در مدل‌سازی مسائل موازنه زمان- هزینه دسته‌بندی و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۳- تعریف و اندازه‌گیری کیفیت در پروژه

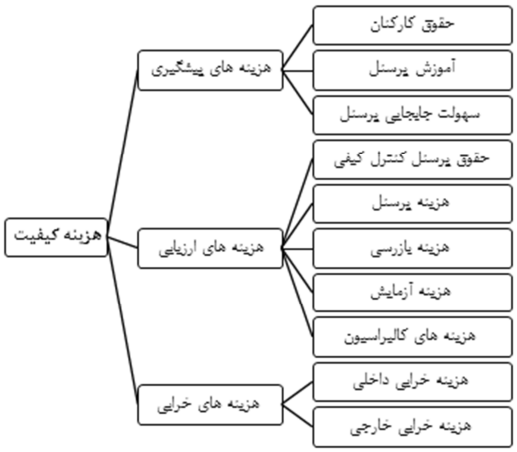
کیفیت به‌عنوان یک عملکرد یا نتیجه ارائه شده در استاندارد ISO9000 به‌صورت درجه‌ای است که مجموعه‌ای از ویژگی‌های ذاتی نیازها را برآورده می‌کند، تعریف شده است. مدیریت کیفیت پروژه، پنجمین حوزه دانشی در استاندارد PMBOK[۲] است. طبق استاندارد PMBOK ویرایش ششم در سال ۲۰۱۷، مدیریت کیفیت پروژه شامل فرآیندهایی برای در نظر گرفتن سیاست کیفیت سازمان در مورد برنامه‌ریزی، مدیریت و کنترل الزامات کیفیت پروژه و محصول به‌منظور دستیابی به اهداف ذی‌نفعان تعریف شده است. مدیر پروژه و تیم مدیریت پروژه مسئولیت مدیریت تعادل مرتبط با ارائه سطح مورد نیاز از نظر کیفیت و درجه کیفی را دارند [۸].

گاروین[۳] (۱۹۸۴) ابعاد مختلفی از کیفیت را ارائه می‌دهد که به‌صورت ذهنی، تطابق با مشخصات از پیش تعیین شده را مورد بررسی قرار می‌دهند. سازگاری کیفیت توسط یک متغیر اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که، کیفیت درک شده، یک مفهوم مفید در مراحل اولیه طراحی محصول جدید است. به‌عنوان مثال، شدت بوی داخلی خودرو جزو کیفیت درک شده است [۹]. در استاندارد PMBOK، هزینه کیفیت (COQ[۴]) شامل کل هزینه‌های انطباق (هزینه‌های دستیابی به کیفیت) و هزینه‌های عدم انطباق (هزینه‌های عدم دستیابی به کیفیت) است. هزینه‌های انطباق شامل هزینه‌های

[2]- Project Management Body Of Knowledge
[3]- Garvin
[4]- Cost of Quality

پیشگیرانه و هزینه‌های ارزیابی در جهت کیفیت محصول هستند. هزینه‌های عدم انطباق یا هزینه‌های شکست، شامل هزینه‌های صرف شده به دلیل خرابی محصول می‌باشند که به دو دسته هزینه‌های شکست داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌شوند [۸].

عبدالسلام و گاد[5] (۲۰۰۹) به ارائه طرحی برای برآورد هزینه کیفیت در پروژه‌های عمرانی دبی پرداخته‌اند. آنها در مقاله خود از مدل پیشگیری ارزیابی بهره برده‌اند تا بتوانند هزینه کیفیت را محاسبه کنند. همچنین برای یافتن سطح هزینه بهینه از پارامترهای عددی به‌صورت شکل ۱ استفاده کرده‌اند [۱۰].



شکل ۱- تفکیک موارد مؤثر بر هزینه کیفیت [۱۰]

تجزیه‌وتحلیل کیفیت ادراک شده در پژوهش استایلیدز[6] و همکاران (۲۰۱۵) مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. برای پروژه‌های غیرنوآورانه که تحت این بررسی قرار دارند، کیفیت به‌عنوان تطابق با مشخصات مشتری و الزامات فنی در نظر گرفته شده است. مشخصات مشتری شامل الزامات مرتبط با زیبایی‌شناسی یا استفاده از قطعات و مواد اولیه با کیفیت بالا برای اطمینان از ماندگاری محصول می‌باشد. این خصوصیات ممکن است برای کاهش مدت زمان پروژه به نیازهای پایین‌تر تغییر یابد. در مقابل، الزامات فنی به‌سختی می‌تواند اصلاح شود؛ زیرا آن‌ها عملکرد محصول، رضایت از محدودیت‌های زیست‌محیطی و سطح تعالی تعیین شده توسط شرکت را تضمین می‌کنند. به‌عنوان مثال، فعالیت رنگ‌کاری در یک پروژه ساخت‌وساز را در نظر بگیرید. برخی از نقص‌ها قابل قبول هستند، در حالی‌که، برخی دیگر اینگونه نیستند. الزامات فنی اجباری شامل رعایت یک ترکیب شیمیایی خاص از رنگ برای تحقق الزامات محیطی، یا رعایت نواحی از پیش تعیین‌شده برای رنگ‌کاری اجباری است. در صورت رعایت نکردن یک منطقه رنگ قابل مشاهده، شرکت تصمیم می‌گیرد که مجدداً فعالیت رنگ‌کاری را انجام دهند؛ زیرا زیبایی فعالیت پروژه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، حتی اگر این نقص، عملکرد یا دوام آن را زیر سؤال نبرد. در مقابل، نقص رنگ ممکن است برای شرکت قابل قبول باشد؛ اما برای مشتری قابل پذیرش نیست مگر آنکه مشتری بخواهد برای صرفه‌جویی در زمان پروژه، نیازهای خود را کاهش دهد. در این حالت، کیفیت پایین‌تر از حداکثر سطح خود خواهد بود. در این صورت می‌توان کیفیت یک فعالیت را به‌عنوان درصدی از موارد بررسی شده در لیست کنترل بازرسی کیفیت آن اندازه‌گیری کرد [۲ و ۱۲-۱۴].

بالاترین کیفیت ممکن برابر است با این معنی که ۱۰۰٪ موارد بررسی شده‌اند و ممکن است در شرایط عادی به‌دست آید که در آن پروژه، هیچگونه تسریعی در انجام نداشته باشد یا بدین صورت بیان شود که پروژه در یک حالت عادی با حداقل تخصیص منابع اجرا گردیده است [۱۵]. حداقل سطح کیفیت یک فعالیت می‌تواند متناسب با عیب‌های غیرقابل قبول در چک‌لیست ارزیابی باشد؛ بنابراین تحمیل چنین سطح کیفی در فعالیت‌ها ممکن است باعث تسریع در انجام پروژه بدون در نظر گرفتن کارایی شود. اگرچه در تمام مقالات مربوط به مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت (TCQTP[7])، حداقل سطح کیفی برای کل پروژه موردنیاز است که به‌عنوان

[5]- Abdelsalam and Gad
[6]- Stylidis
[7]- Time Cost Quality Trade-off Problem

میانگین کیفیت فعالیت‌ها تعریف می‌شود. چنین جمع‌بندی ممکن است به این معنا باشد که کیفیت پروژه می‌تواند سطح لازم را با کیفیت غیرقابل قبول برای برخی از فعالیت‌های پروژه به‌دست آورد. لازم به ذکر است، هنگامی که هیچ نقصی وجود نداشته باشد، ارزیابی کیفیت یک متغیر باینری (صفر و یک) است و اگر کیفیت به حداکثر سطح خود نرسد، دوباره‌کاری الزامی خواهد بود [۱۶].

اگر تاریخ اتمام عادی پروژه با تاریخ تکمیل موردنظر مشتری مطابقت نداشته باشد، یا اگر وقایع تصادفی باعث عقب‌افتادگی پروژه گردد، یا زمانی که انگیزه‌های مالی برای اتمام پروژه قبل از برنامه وجود دارد، نیاز به تسریع در انجام پروژه احساس خواهد شد. این به معنای تکمیل برخی فعالیت‌ها سریع‌تر از حالت معمول با اختصاص منابع اضافی مانند اضافه‌کاری، کارگران موقت یا تجهیزات قدرتمندتر و سریع‌تر است؛ بنابراین تسریع در یک فعالیت موجب صرفه‌جویی در وقت می‌شود؛ اما افزایش هزینه‌ها را در پی خواهد داشت. علاوه‌بر این، کاهش مدت زمان بر کیفیت نیز تأثیر منفی می‌گذارد؛ زیرا تسریع در فعالیت‌های پروژه، تقریباً همیشه به نیروی انسانی اضافی نیاز دارد. اگر از یک منبع اضافی مانند اضافه‌کاری برای تسریع در پروژه استفاده گردد، ممکن است کیفیت یک فعالیت به‌عنوان یک تابع پیوسته افزایشی از مدت زمان فعالیت بیان شود؛ زیرا:

۱) ساعت اضافه‌کاری به‌طور مداوم و پیوسته قابل تقسیم است و هر مقدار اضافه‌کاری به یک مدت زمان خاصی منجر می‌شود.
۲) کاهش بیشتر در مدت زمان با اضافه‌کاری بیشتر و کیفیت پایین‌تر حاصل می‌شود. استفاده زیاد از اضافه‌کاری در فعالیت‌ها، باعث خستگی و کاهش انگیزه می‌شود که بر کیفیت تأثیر منفی می‌گذارد [۱۷].

در بسیاری از پروژه‌های واقعی، منابع به‌طور جداگانه قابل تقسیم هستند، مانند ماشین‌ها، ابزارها و کارگران؛ بنابراین یک پروژه می‌تواند برای هر فعالیت، از منابع مختلفی جهت تسریع استفاده کند که منجر به حالت‌های اجرایی گسسته‌ای می‌گردد. هر حالت اجرایی دارای یک مدت زمان، یک هزینه برای استفاده از منابع و یک کیفیت برای هر فعالیت باشد. مجدداً قابل ذکر است که کیفیت یک فعالیت با کاهش مدت زمان به‌دلیل استفاده از اضافه‌کاری با کارگران موقت، کاهش می‌یابد و می‌تواند برای کیفیت کلی پروژه مضر باشد [۱۷].

۴- انواع مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت

در پنج دهه گذشته، تحقیقات زیادی در مورد زمان‌بندی و مدیریت پروژه با هدف الگوبرداری از مشکلات عملی و توسعه رویکردهای راه‌حل کارآمد صورت گرفته است. در اینجا تمرکز بر زمان‌بندی یک پروژه واحد (برخلاف زمان‌بندی هم‌زمان چندین پروژه) است که در آن پروژه به‌عنوان مجموعه‌ای از فعالیت‌های غیرمنقطع با روابط پیش‌نیازی تعریف شده است. هدف اصلی در زمان‌بندی پروژه، به حداقل رساندن زمان اتمام پروژه با وجود محدودیت منابع یا محدودیت بودجه در یک محیط واقعی است. وگلارز[8] و همکاران (۲۰۱۱) مسائل موازنه زمان هزینه را بررسی کرده و در نهایت، یک روش مبتنی بر فرضیه‌ها را براساس تعداد منابع (تکی در مقابل چندگانه)، دسته‌بندی آنها (پیوسته یا گسسته، تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر)، اهداف مورد بررسی (تکی در مقابل چندگانه) و روش‌های حل (دقیق یا غیردقیق) به‌صورت جدول ۱ ارائه داده‌اند [۱۵].

از آنجاکه مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت در ادبیات تحقیق، فرضیات مشابهی را دنبال می‌کنند؛

[8]- Weglarz

بنابراین مهم است که آنها را براساس این نوع روش‌شناسی طبقه‌بندی کنیم تا نوع مسئله مورد بحث، بررسی شود.

جدول ۱- تقسیم‌بندی مسائل موازنه زمان- هزینه [۱۵]

عامل	نوع تفاوت
فعالیت‌ها	یک حالت اجرایی- چند حالت اجرایی
منابع	بدون محدودیت منابع- دارای محدودیت منابع (تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر، هر دو)
مدل‌سازی	گسسته- پیوسته یک‌هدفه- چندهدفه پویا- ایستا قطعی- غیرقطعی (احتمالی، فازی، استوار، واکنشی، تحلیل حساسیت)
روش حل	دقیق- غیردقیق (ابتکاری فراابتکاری)

اگر ارزیابی کیفیت به‌صورت یک متغیر باینری باشد، هدف مسئله، کاهش دادن هزینه دوباره‌کاری یا مدت زمان دوباره‌کاری است. در غیر این‌صورت، هدف مینیمم کردن مدت زمان پروژه یا هزینه آن و یا به حداکثر رساندن کیفیت پروژه خواهد بود. کیفیت کلی پروژه به‌عنوان اجتماع کیفیت فعالیت‌ها است که اغلب با میانگین حسابی محاسبه می‌گردد. فرمول‌بندی اهداف به‌صورت تکی، اغلب متداول است و در آن یک هدف در میان ۵ هدف (حداقل‌کردن هزینه دوباره‌کاری، حداقل‌کردن مدت زمان دوباره‌کاری، حداقل‌کردن مدت زمان پروژه، حداقل‌کردن هزینه پروژه، حداکثرکردن کیفیت پروژه) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اکثر منابع، مسئله با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی خطی یا غیرخطی (زمانی که کیفیت پروژه به‌صورت میانگین هندسی از کیفیت فعالیت‌ها است) حل می‌شود. مسئله آن است که یک روش اجرایی برای هر فعالیت انتخاب گردد تا تابع زمان، هزینه و کیفیت بهینه گردند. در این حالت رویکردهای مبتنی بر پاراتو قابل استفاده هستند [۱۶].

با توجه به توضیحات ارائه شده، ارزیابی عامل کیفیت (TCQTP[9]) در مسائل را می‌توان در چهار طبقه مورد بررسی قرار داد:

۱- دسته اول شامل مدل‌هایی است که کیفیت را با دوباره‌کاری ترکیب و بررسی می‌کنند.
۲- دسته دوم شامل مدل‌هایی است که کیفیت یک فعالیت را به‌عنوان یک تابع از مدت زمان آن به تنهایی، یا مدت زمان و هزینه آن الگوسازی می‌کنند.
۳- دسته سوم فرض می‌کنند که کیفیت فعالیت، یک پارامتر تخمینی در هر حالت اجرایی فعالیت‌ها است.
۴- دسته چهارم نیز کیفیت فعالیت را به‌وسیله شاخص‌های تعیین شده محاسبه می‌کنند.

۴-۱- دوباره‌کاری به عنوان ارزیابی ضمنی از کیفیت

در بررسی ادبیات پژوهش، برخی از محققان دوباره‌کاری را به‌عنوان یک ارزیابی ضمنی از کیفیت قرار داده بودند. در این مدل‌ها، ارزیابی کیفیت می‌تواند به‌صورت یک متغیر باینری در نظر گرفته شود: اگر یک فعالیت با کلیه الزامات مطابقت نداشته باشد، نیاز به کار مجدد دارد. هدف آن است که هزینه دوباره‌کاری یا مدت زمان دوباره‌کاری یا هر دو به حداقل ممکن برسد. حدود این رویکردها به عدم تحمل خطاها متکی است؛ اگرچه در عمل، بسیاری از نقص‌های جزئی قابل قبول هستند. نویسندگان به‌سادگی استدلال می‌کنند که اکثر پروژه‌ها حداقل یک فعالیت غیرتطبیقی دارند که نیاز به اصلاح

[9]- Time Cost Quality Trade-off Problems

دارد. در مدل توسعه یافته شده توسط اسمیل‌تاکل و رم [۱۰] (۱۹۹۷)، هدف به حداکثر رساندن کیفیت یک پروژه، با به حداقل رساندن مجموع نسبت کل زمان دوباره‌کاری استفاده شده و نسبت متناظر هزینه دوباره‌کاری اضافی استفاده شده است؛ بنابراین کیفیت یک پروژه با زمان و هزینه لازم برای انجام فعالیت‌هایی که مشخصات آنها برآورده نمی‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. هزینه دوباره‌کاری، یک تابع افزایشی از زمان دوباره‌کاری است و این زمان با تعداد پیش‌نیازهای یک فعالیت افزایش می‌یابد. هزینه‌ها و زمان دوباره‌کاری، پارامترهای تخمین‌زده شده‌ای بوده و بیشتر برای فعالیت‌های تکمیل شده بعدی در پروژه استفاده می‌شوند. در هر پروژه، منابع متعددی با تعداد محدود در دسترس هستند و هر فعالیت به تعداد مختلفی از منابع نیاز دارد؛ بنابراین مسئله به‌عنوان یک مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP [۱۱]) سنتی فرمول‌سازی می‌شود؛ به‌جز تابع هدف آن، که شامل تعیین زمان اتمام فعالیت‌ها به‌منظور به حداقل رساندن هزینه و زمان کل دوباره‌کاری است و محدودیت‌ها نیز شامل محدودیت‌های حداکثر بودجه و منابع در دسترس خواهند بود [۱۸].

از دیدگاه عملی، اجرای این روش نیاز به کار زیادی در برآورد هزینه و زمان دوباره‌کاری برای هر فعالیت تکمیل‌نشده دارد. علاوه‌بر این، استفاده از مجموع زمان و هزینه دوباره‌کاری به‌عنوان تابع هدف با وزن‌های برابر نیز جای سؤال و شبهه دارد.

کیم [۱۲] و همکاران (۲۰۱۲) استراتژی تسریع در اتمام پروژه را با یک منبع تجدیدناپذیر در نظر گرفته‌اند که هر فعالیت می‌تواند در یک حالت عادی یا فشرده (حداکثر تخصیص منابع) انجام شود و منجر به یک مسئله موازنه زمان- هزینه گسسته (DTCTP [۱۳]) با دو حالت اجرایی در هر فعالیت گردد. اگر هریک از فعالیت‌های پروژه به دلیلی شرایط را برآورده نکند، دوباره‌کاری با زمان و هزینه مرتبط انجام خواهد شد. نویسندگان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب را ارائه می‌دهند که هدف آن به حداقل رساندن کل هزینه از دست دادن کیفیت بالقوه (PQLC [۱۴]) مرتبط با هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های دوباره‌کاری است و به مدت زمان فعالیت بستگی دارد. متغیرهای تصمیم‌گیری، مدت زمان فعالیت‌ها و متغیرهای باینری برای بیان حالت اجرایی هر فعالیت (عادی یا فشرده) تعریف شده‌اند. اگر یک فعالیت به‌صورت فشرده انجام شود، PQLC (هزینه از دست دادن کیفیت بالقوه) تحمیل می‌شود و نشان‌دهنده هزینه اقدامات اصلاحی برای قابل قبول‌کردن کیفیت فعالیت است؛ بنابراین مسئله این است که تعیین کنیم کدام فعالیت‌ها به‌صورت فشرده انجام شوند، به‌طوری‌که هزینه‌های مستقیم و موضوع PQLC در بازه زمانی پروژه و محدودیت‌های پیش‌نیازی و همچنین محدودیت روی تعداد فعالیت‌های فشرده شده برای رسیدن به یک ریسک عدم انطباق قابل قبول برای پروژه به حداقل ممکن برسد [۱۹].

تیواری [۱۵] و همکاران (۲۰۰۹) منابع محدودشده چندگانه و چندین حالت اجرایی را برای هر فعالیت که به منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر نیاز داشته باشد، در نظر گرفته‌اند. این مسائل با عنوان مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندگانه (MRCPSP [۱۶]) شناخته می‌شوند. آنها سطوح مهارتی مختلف و ناهمگنی را در بین منابع تجدیدپذیر برای مدل‌سازی واگذاری کار در پروژه دوره آموزشی مشتریان شرکت فرض کرده‌اند. هر فعالیتی می‌تواند در چندین حالت متناسب با استفاده از کارگر با سطح مهارت خاصی انجام شود. اگر یک فرد با کارایی کم

[10]- Icmeli- Tukel and Rom
[11]- Resource- Constrained Project Scheduling Problem
[12]- Kim
[13]- Discrete Time- Cost Trade-off Problem

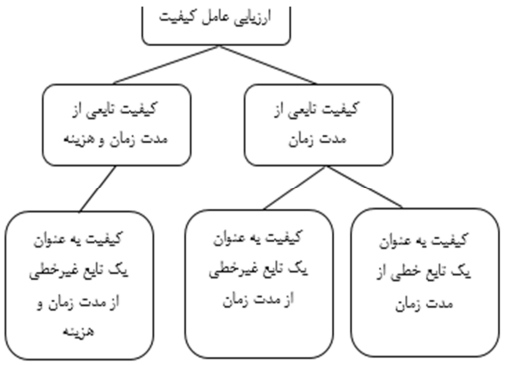
[14]- Potential Quality Loss Cost
[15]- Tiwari
[16]- Multi-mode Resource- Constrained Project Scheduling

به یک فعالیت اختصاص یابد؛ بنابراین دوباره‌کاری موردنیاز خواهد بود و باید فعالیت توسط یک سطح مهارت بالاتر انجام شود. دوباره‌کاری زمانی موردنیاز نخواهد بود که از ابتدا کارگر با سطح مهارت بالاتر به انجام فعالیت اختصاص یابد؛ اما این کارگر، مدت زمان طولانی‌تری از زمان دوباره‌کاری برای فعالیت در پی خواهد داشت. کیفیت نیز باینری بوده و به‌طور ضمنی از طریق دوباره‌کاری مورد توجه قرار می‌گیرد. مسئله شامل انتخاب حالت‌های اجرایی اولیه و حالت‌های دوباره‌کاری (در صورت لزوم) می‌باشد. تابع هدف نیز حداقل کردن مدت زمان پروژه تحت محدودیت‌های پیش‌نیازی و محدودیت منابع است. هر فعالیت به کیفیت خاصی از هر منبع در هر حالت اجرایی نیاز دارد. مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی خطی صفر و یک فرمول‌سازی شده و به‌وسیله چندین پروژه که به‌طور تصادفی تولید شده، با تغییر تعداد فعالیت‌ها (حداکثر ۴۰) و تعداد حالت‌های اجرایی اولیه و حالت‌های دوباره‌کاری بهینه شده است [۲۰].

سیف[17] و همکاران (۲۰۱۵) مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت را در پروژه‌های نرم‌افزاری با هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه و بیشینه‌سازی کیفیت با یک الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل کردند. آنها کیفیت را به‌صورت کمی و برابر تعداد نقص‌ها در نظر گرفتند. همچنین در مدل ریاضی، تابع هدف شامل کمینه‌سازی زمان و هزینه بوده و عامل کیفیت در محدودیت‌ها آورده شده است. این مدل به‌صورت یک مدل ساده از مسئله موازنه مورد بررسی قرار گرفت [۲۱].

۴-۲- کیفیت به‌عنوان یک تابع از مدت زمان یا مدت زمان و هزینه

برخی از محققان فرض می‌کنند که هزینه و کیفیت یک فعالیت، یک رابطه خطی با مدت زمان دارند. این بدان معنی است که بهره‌وری ثابت بوده و کاهش کیفیت مربوط به هر واحد زمانی از کاهش مدت زمان، نیز ثابت است [۲، ۱۴، ۲۲ و ۲۳]. استفاده از اضافه‌کاری برای تسریع در انجام یک پروژه ممکن است مؤید این مطلب نیز باشد؛ زیرا اضافه‌کاری به معنای خستگی است و بر کیفیت تأثیر می‌گذارد. ژانگ[18] و همکاران (۲۰۱۴) و ترن[19] و همکاران (۲۰۱۵) این رابطه را به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته‌اند [۲۴ و ۲۵]. دسته دیگری از محققان بر این عقیده هستند که کیفیت نه‌تنها بر مدت زمان، بلکه بر میزان پول (هزینه) اختصاص داده شده برای اجرای یک فعالیت نیز وابسته است؛ زیرا هزینه‌های بیشتر در پروژه برای افزایش کیفیت اختصاص می‌یابد [۱۳ و ۲۶]. شکل ۲، دسته‌بندی نظریات محققان در این حوزه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- طبقه‌بندی ارزیابی عامل کیفیت براساس مدت زمان و هزینه هر فعالیت

بابو و سروش[20] (۱۹۹۶) اولین نویسندگانی هستند که تأثیر تسریع در انجام پروژه را بر کیفیت مدل‌سازی کرده‌اند. آنها هزینه هر فعالیت را تابعی از مدت زمان آن بین حدود هزینه و مدت زمان فشرده و هزینه و مدت زمان عادی آن در نظر گرفته‌اند. این چهار پارامتر توسط متخصصان برآورد می‌شود. به‌طور مشابه، کیفیت یک فعالیت تابعی از مدت زمان آن است و پارامترهای کیفیت عادی و فشرده نیز توسط متخصصان تخمین زده می‌شود.

[17]- Saif

[18]- Zhang
[19]- Tran
[20]- Babu and Suresh

نویسندگان با استفاده از روش محدودیت اپسیلون، یک تابع هدف را بهینه می‌کنند درحالی‌که سایر اهداف به‌عنوان محدودیت بیان می‌شوند. برای محاسبه کیفیت پروژه، از میانگین هندسی کیفیت هر فعالیت استفاده می‌شود. علاوه بر این، کیفیت پروژه به‌عنوان حداقل کیفیت فعالیت‌ها برای پروژه تعریف می‌شود که می‌تواند مجموعه‌ای از فعالیت‌های یکپارچه تلقی شود [۲].

خانگ و مینت[21] (۱۹۹۹) مدل بابو و سروش را در یک پروژه ساخت‌وساز واقعی از یک شرکت سیمان با ۵۲ فعالیت توسعه دادند. مدت زمان، هزینه و کیفیت در دو حالت اجرایی فشرده و عادی توسط خبرگان تخمین زده شد. آنها همچنین فرض کردند که هزینه و کیفیت به‌عنوان توابعی وابسته به مدت زمان هر فعالیت هستند و میانگین (حسابی و هندسی) کیفیت فعالیت‌ها را برای تعریف کیفیت کلی پروژه در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که برای هر سطح کیفیت معین، آستانه بودجه وجود دارد که فراتر از آن بسیار گران و پرهزینه خواهد بود. علاوه بر این، نویسندگان به دشواری ارزیابی کاهش کیفیت در حالت اجرایی فشرده (حداکثر استفاده از اضافه‌کاری) اذعان کرده‌اند و ادعا می‌کنند فرض خطی بودن بین کیفیت و زمان سؤال‌برانگیز است [۱۴].

شنکار[22] و همکاران (۲۰۱۱) نیز طبق رابطه (۱)، برای مسئله موازنه زمان- هزینه و کیفیت فرض می‌کنند که اگر زمان انجام یک فعالیت در حالت اجرایی k از حالت اجرایی s کمتر باشد، آنگاه هزینه حالت اجرایی k از هزینه حالت اجرایی s بیشتر و کیفیت آن کمتر خواهد بود.

$$\begin{cases} t_{ijk} < t_{ijs} \rightarrow c_{ijk} > c_{ijs}, q_{ijk} < q_{ijs} \\ t_{ijk} > t_{ijs} \rightarrow c_{ijk} < c_{ijs}, q_{ijk} > q_{ijs} \end{cases} \quad (۱)$$

همچنین آنها حداقل سطح کیفی را برای هر فعالیت به‌عنوان محدودیت اضافه کرده و کیفیت کلی پروژه را به‌صورت میانگین هندسی کیفیت تک‌تک فعالیت‌ها در نظر گرفتند [۲۲].

رضوی حاجی‌آقا و همکاران (۲۰۱۴) از یک الگوریتم دومرحله‌ای برای حل مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت در حالت عدم قطعیت استفاده کردند. در مرحله اول، جواب بهینه مسئله از طریق بهترین و بدترین حالت اجرای هر فعالیت به‌دست آمد. سپس در مرحله دوم با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی، انحراف کل از جواب مرحله اول کمینه گردید. همچنین آن‌ها برای بیان عدم قطعیت داده‌ها از تئوری اعداد خاکستری استفاده کردند. آنها حدود بالا و پایین را برای سه هدف زمان، هزینه و کیفیت به‌دست آوردند. در بهترین شرایط، هر فعالیت از کمترین زمان، کمترین هزینه و بالاترین کیفیت تشکیل می‌شود. این مسئله مدل خوش‌بینانه نامیده می‌شود. با حل این مدل در مجموعه محدودیت‌های FS، مقادیر $\underline{C}^*$، $\underline{T}^*$ و $\overline{Q}^*$ به ترتیب حد بهینه پایین هزینه، حد بهینه پایین زمان و حد بهینه بالای کیفیت به‌دست می‌آید. در بدترین شرایط، هر فعالیت از بیشترین زمان، بیشترین هزینه و کمترین کیفیت تشکیل می‌شود. این مسئله مدل بدبینانه نامیده می‌شود. با حل این مدل در مجموعه محدودیت‌های 'FS، مقادیر $\overline{C}^*$، $\overline{T}^*$ و $\underline{Q}^*$ به ترتیب حد بهینه بالای هزینه، حد بهینه بالای زمان و حد بهینه پایین کیفیت به‌دست می‌آید. در نهایت، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی، مسئله موردنظر حل شد. این محققان دو فرض اساسی را برای حل مدل مطرح کردند:

۱) مدت زمان فعالیت‌های پروژه یک متغیر مثبت پیوسته بین زمان نرمال و زمان فشرده است.

۲) روابط بین زمان، هزینه و کیفیت خطی است [۲۳].

مهدی‌زاده و محسنیان (۲۰۱۳) نیز در مسئله موازنه زمان- هزینه و کیفیت فرض کرده‌اند که هم‌زمان با

[21]- Khang and Myint
[22]- Shankar

کاهش مدت زمان اجرای فعالیت‌ها، از کیفیت آنها کاسته خواهد شد؛ بنابراین آنها تابع هدف کیفیت را بیشینه و به‌صورت رابطه (۲) تعریف کردند.

$$\max \sum_{i} \sum_{j} q_{ij} \left(D_{ij}^{N} - \left(d_{ij} + \tilde{l}_{ij}\right)\right)$$
$$q_{ij} = \frac{Q_C - Q_N}{D_{ij}^{C} - D_{ij}^{N}} \qquad (۲)$$

که در آن، q_{ij} بیانگر ضریب میزان کیفیت تعریف می‌شود، Q_N و Q_C به ترتیب میزان کیفیت انجام فعالیت در حالت نرمال (که ۱۰۰٪ در نظر گرفته می‌شود) و فشرده هستند، D_{ij}^{N} و D_{ij}^{C} به ترتیب زمان نرمال و زمان فشرده فعالیت i-j بوده و $\tilde{l}_{ij}$ مقدار تأخیر تصادفی در نظر گرفته شده برای فعالیت i-j است [۲۷].

برخلاف نظر چهار محقق بیان شده در بالا، ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) این فرض را مطرح می‌کنند که زمان پردازش طولانی‌تر همیشه منجر به کیفیت بهتر نمی‌شود. اول، فراتر از یک آستانه مدت زمان، کیفیت ممکن است کاهش یابد. به‌عنوان مثال در ساخت‌وساز برای کارهای بتن‌ریزی و تراکم. دوم، آخرین واحد کاهش مدت زمان با کاهش کیفیت، بیشتر از واحد مربوط به اولین کاهش مدت زمان خواهد بود. این مسئله برای اضافه‌کاری‌ها نیز می‌تواند صادق باشد؛ بنابراین کیفیت یک فعالیت به‌عنوان یک تابع درجه‌دو از مدت زمان آن تعریف می‌شود و نویسندگان پیشنهاد می‌کنند که پارامترهای این تابع توسط مهندسی پروژه قابل ارائه است. کیفیت پروژه نیز با مجموع کیفیت فعالیت‌ها اندازه‌گیری می‌شود. هزینه کل پروژه نیز شامل هزینه‌های مرتبط با مدت زمان هر فعالیت و هزینه‌های تأخیر است. هزینه یک فعالیت نیز به‌صورت یک تابع درجه‌دو از مدت زمان آن فعالیت تعریف می‌گردد. هزینه نهایی پروژه از کاهش مجموع وزنی انحرافات بین هزینه، مدت زمان و کیفیت پروژه و مقادیر قراردادی آن‌ها به‌دست می‌آید [۲۴].

ترن و همکاران (۲۰۱۵) تعریف کیفیت هر فعالیت را به همان صورت ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) در نظر می‌گیرند؛ یعنی کیفیت یک تابع درجه‌دو از مدت زمان هر فعالیت است و کیفیت پروژه از میانگین کیفیت فعالیت‌ها به‌دست می‌آید؛ اما هزینه در اینجا یک تابع کاهشی خطی از مدت زمان است. نویسندگان برای هر فعالیت چندین حالت اجرایی را با تخمین مدت زمان در نظر گرفته‌اند و هزینه و کیفیت را با توجه به توابع در دست محاسبه نموده‌اند [۲۵].

لیبریتور و پولاک‌جانسون[۲۳] (۲۰۱۳) برای نزدیک شدن به واقعیت، کیفیت یک فعالیت را به‌عنوان یک تابع غیرخطی از مدت زمان و هزینه آن فعالیت در نظر گرفته‌اند با این فرض که خصوصیات زیر را دارا باشد:

۱) اگر مدت زمان ثابت باشد، هزینه بیشتری جهت افزایش کیفیت صرف می‌شود.

۲) اگر هزینه ثابت باشد، کیفیت با افزایش مدت زمان، افزایش می‌یابد.

نویسندگان همچنین فرض می‌کنند که برای حفظ همان سطح کیفیت، باید به ازای هر واحد کاهش مدت زمان، به‌طور فزاینده‌ای پول بیشتری پرداخت کرد. از آنجا که توزیع نرمال دومتغیره به‌احتمال‌زیاد این فرضیات را منعکس می‌کند، کیفیت یک فعالیت به‌عنوان یک توزیع نرمال دومتغیره از هزینه و مدت زمان آن بیان شده است. پارامترهای این تابع می‌تواند با استفاده از تخمین کمترین مربعات غیرخطی در چند مشاهده از مدت زمان، هزینه و کیفیت تعیین شود. هدف اصلی به‌حداکثررساندن کیفیت پروژه است که به‌عنوان حداقل کیفیت فعالیت‌ها با محدودیت‌های بودجه و مهلت انجام پروژه تعریف می‌شود. متغیرهای تصمیم‌گیری نیز مدت زمان و هزینه هر فعالیت هستند که کیفیت را تعیین می‌کنند [۲۶].

فو[۲۴] و ژانگ (۲۰۱۶) فرض مستقل بودن مدت زمان فعالیت از هزینه را در نظر نمی‌گیرند و برای توصیف کیفیت فعالیت، یک تابع اصلاحی غیرخطی را بیان می‌کنند. آنها مدل توسعه‌ای مسئله موازنه زمان- هزینه و

[23]- Liberatore and Pollack-Johnson
[24]- Fu

کیفیت را بر مبنای دو فرض ارائه می‌دهند. اول آن‌که کیفیت یک فعالیت یک تابع اصلاح‌شده غیرخطی از مدت زمان فعالیت و هزینه‌های آن توصیف می‌شود. دوم آن‌که رخداد و وقوع کار اصلاحی به کیفیت تجمعی بستگی دارد، یعنی کیفیت مجموعه مشخصی از فعالیت‌های پایان‌یافته. علاوه بر این، مدل بهینه‌سازی چندمحدودیتی، هزینه‌های کیفیت پروژه را منظور دستیابی به کیفیت پروژه و تخصیص منابع مناسب با توجه به تحلیل کیفیت-هزینه، به حداقل می‌رساند. آنها در مقاله خود دو نوع کیفیت را تعریف می‌کنند. کیفیت فعالیت، به‌عنوان یک کیفیت کار، درجه‌ای است که یک فعالیت از کیفیت محصول محافظت می‌کند. کیفیت تجمعی، به‌عنوان کیفیت محصول، درجه‌ای است که مجموعه‌ای از فعالیت‌های پایان‌یافته، الزامات را برآورده می‌کند و به‌وسیله کیفیت‌های فعالیت بیان می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، کیفیت تجمعی به‌صورت فعالیت‌های زنجیروار در پروژه و به‌عنوان بخش خاصی از کیفیت پروژه جهت ترمیم یا دوباره‌کاری ردیابی می‌شود. اندازه‌گیری و بازرسی در مراحل مختلف ساخت‌وساز انجام شده و در صورت عدم نتیجه در برآوردن الزامات اصلی، اصلاح یا کار مجدد برای رفع نقص انجام می‌شود؛ بنابراین کیفیت تجمعی، برای بیان کیفیت فعالیت‌های تمام‌شده تحت شرایط موجود طراحی شده است. با این حال، سهم فعالیت‌ها در کیفیت پروژه متفاوت است. به‌عنوان مثال، هر دو فعالیت فونداسیون و گچ‌کاری بر کیفیت ساختمان تأثیر می‌گذارند؛ اما فونداسیون برای تعیین کیفیت پروژه از فعالیت گچ‌کاری مهم‌تر است؛ زیرا برای اطمینان و پایداری ساختمان بسیار ضروری است. تابع کیفیت فعالیت به‌طور معمول یک تابع افزایشی از مدت زمان فعالیت و هزینه مستقیم آن است و مدت زمان فعالیت مستقل از هزینه مستقیم آن نیست؛ زیرا مدت زمان می‌تواند تحت تأثیر منابع مختلف و هزینه مستقیم باشد؛ بنابراین دو تابع نرمال دودویی و تابع منطقی دودویی، نیازمندی کیفیت فعالیت را برآورده می‌کنند؛ بنابراین این محققان کیفیت فعالیت q را به‌صورت یک تابع غیرخطی طبق رابطه (۳) در نظر می‌گیرند.

$$q = \rho e^{-\frac{1}{2(1-\eta^2)}\left[\left(\frac{t-\mu_t}{\sigma_t}\right)^2 - 2\eta\left(\frac{t-\mu_t}{\sigma_t}\right)\left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c}\right)+\left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c}\right)^2\right]} \qquad (۳)$$

η یک پارامتر در بازه صفر تا یک برای تنظیم شکل سطح است و ρ برای ساده‌تر کردن محاسبه محدوده کیفیت فعالیت به‌کار می‌رود. این ۶ پارامتر در تابع نرمال دومتغیره با استفاده از برآورد حداقل مربعات غیرخطی در نرم‌افزار متلب تعیین می‌گردند [۱۳].

۴-۳- کیفیت به‌عنوان یک پارامتر تخمینی در هر حالت اجرایی

در برخی پژوهش‌ها توسط محققان، کیفیت یک فعالیت به‌صورت یک پارامتر برآورد شده در هر حالت اجرایی فرض می‌شود که هیچ متدلوژی خاصی برای برآورد کیفیت ارائه نداده‌اند.

طارقیان و طاهری (۲۰۰۶) عامل کیفیت را در مسئله موازنه زمان هزینه گسسته وارد کردند. هر فعالیت می‌تواند در یک حالت اجرایی از میان چندین حالت اجرایی ممکن برای هر فعالیت انجام شود. این حالات اجرایی شامل مدت زمان، هزینه و کیفیت هستند که توسط خبرگان برآورد شده است به‌طوری‌که به ازای هر فعالیت (i,j) در حالت اجرایی M طبق رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$t_{ijr} > t_{ijr+1} \rightarrow c_{ijr} < c_{ijr+1}, \quad q_{ijr} > q_{ijr+1} \qquad (۴)$$

به عبارتی دیگر، با افزایش مدت زمان، هزینه کاهش و کیفیت افزایش می‌یابد. مسئله به‌صورت مدل استاندارد DTCTP با هدف اضافی حداکثرسازی کیفیت فرموله شده است و متغیرهای تصمیم شامل متغیرهای باینری هستند که برای هر فعالیت تنها یک حالت اجرایی قابل انجام است. همانند مدل بابو و سروش (۱۹۹۹)، کیفیت کل پروژه از میانگین کیفیت تک‌تک فعالیت‌ها

به‌دست آمده و برای حل نیز از روش محدودیت اپسیلون استفاده گردیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با بودجه بالاتر، فاصله زمانی کوتاه‌تر می‌تواند سطوح کیفیت کل پروژه را ارتقا دهد. سطوح بالاتر کیفیت پروژه در مدت زمان کوتاه‌تر پروژه با بودجه بالاتر می‌تواند به‌دست آید. آن‌ها از میانگین هندسی کیفیت فعالیت‌ها برای محاسبه کیفیت کل پروژه استفاده کرده‌اند [۲۸].

نبی‌پور افروزی و همکاران (۲۰۱۴) عامل کیفیت را در مسئله MRCPSP وارد کردند، به‌طوری‌که حالت‌های اجرایی به هم وابسته‌اند. اگر یک فعالیت در یک حالت خاص انجام شود، باید فعالیت جانشین در حالت سازگار و موافق با آن انجام گیرد؛ بنابراین مجموعه فعالیت‌های ممکن برای این فعالیت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، برای هر حالت اجرایی، هر فعالیت می‌تواند به دو روش فشرده (حداکثر تخصیص منابع) یا به روش عادی انجام شود. برای هر فعالیت به روش عادی، مدت زمان نرمال (حداکثر)، حداکثر کیفیت و یک بردار از مصرف منابع تجدیدپذیر مرتبط با هزینه‌ها تعریف می‌شود. روش فشرده بیانگر آن است که یک فعالیت در کمترین زمان ممکن به انجام رسانده شود. با کاهش زمان و انجام سریع فعالیت که نیاز به منابع زیادی دارد، کیفیت فعالیت کاهش می‌یابد؛ بنابراین، روش فشرده شامل حداقل مدت زمان، حداقل کیفیت و مصرف بیشتر منابع وجود دارد. این پارامترها در هر حالت اجرایی و هر روش (فشرده و عادی) تخمین زده می‌شود. کیفیت کل پروژه نیز میانگین وزنی کیفیت فعالیت‌های پروژه است که وزن فعالیت‌ها نیز توسط خبرگان برآورد می‌گردد. مسئله انتخاب حالت اجرایی و روش اجرایی هر فعالیت است به‌طوری‌که بین اهداف مدت زمان، هزینه و کیفیت تعادل ایجاد گردد. مسئله با الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه حل گردید به‌طوری‌که هر جواب با ۳ بردار به شرح ذیل کدگذاری می‌شود: ترتیب پردازش فعالیت‌ها، حالت‌های اجرایی انتخاب شده و روش اجرای انتخاب شده [۲۹].

محمدی‌پور و سجادی (۲۰۱۶) از مدل DTCQTP استفاده کرده‌اند به‌طوری‌که کیفیت در هر حالت اجرایی فعالیت، با کاهش مدت زمان بررسی می‌گردد. متغیرهای تصمیم‌گیری، متغیرهای باینری (صفر و یک) هستند به‌طوری‌که اگر مدت زمان فعالیت‌ها با تعداد معینی از دوره‌ها کاهش یابد، مقدار یک و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد. کاهش مدت زمان به معنی افزایش هزینه و کاهش کیفیت است که توسط کارشناسان تخمین زده می‌شود؛ اما کاهش زمان همچنین می‌تواند منجر به تأثیر ریسک در اهداف مختلف پروژه مانند هزینه، مدت زمان، کیفیت و دامنه پروژه شود؛ بنابراین نویسندگان سه هدف را به حداقل می‌رسانند: کل هزینه اضافی ایجاد شده در پروژه با کاهش یک واحد زمانی هر فعالیت، ریسک کل پروژه با کاهش یک واحد زمانی در هر فعالیت، تغییرات کیفیت کل پروژه با کاهش یک واحد زمانی در هر فعالیت [۱۲].

کاهش زمان فعالیت می‌تواند باعث کاهش کیفیت فعالیت‌هایی شود که زمان اتمام آنها کوتاه شده است. فرض بر این است که اگر هر فعالیت فردی مطابق با برنامه‌ریزی اولیه تکمیل شود، می‌توان ۱۰۰٪ از کیفیت آن اطمینان داشت؛ اما اگر زمان اتمام فعالیت کوتاه شود، کیفیت آن کاهش می‌یابد و به‌تبع آن، کلیه نیازهای کیفیت پروژه برآورده نمی‌شود. همچنین محققان بیان می‌کنند که هر فعالیت واحد، تأثیر متفاوتی در کل نیازهای کیفیت پروژه دارد؛ بنابراین، ضرب تأثیر کیفیت یک فعالیت خاص و کاهش کیفیت فعالیت ذکر شده برای محاسبه کاهش کیفیت پروژه در نظر گرفته شده است. برای محاسبه کاهش کیفیت پروژه طبق رابطه (۵)، هم تأثیر کیفیت و هم‌سطح کاهش کیفیت هر فعالیت باید اندازه‌گیری شود. در این حالت، از روش مقایسه زوجی ساعتی[۲۵] می‌توان تأثیر کیفیت یک فعالیت خاص را به‌دست آورد [۳۰].

[25]- Saaty

$$\text{کاهش کیفیت فعالیت} = \frac{\text{تعداد اجزای کیفیت موجود در «چک‌لیست کیفیت فعالیت»}}{\text{تعداد کل اجزای کیفیت در «چک‌لیست کیفیت فعالیت»}} \quad (۵)$$

مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تدوین و با یک پروژه ساخت‌وساز ساختمان ۲ طبقه با ۱۸ فعالیت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هو و هی[۲۶] (۲۰۱۴) مدل موازنه زمان- هزینه- کیفیت در پروژه‌های ساختمانی را با رویکرد تخصیص منابع مدنظر قرار دادند. نکته حائز اهمیت در مقاله این محققان تعریف مناسب‌تر از کیفیت در پروژه‌های ساختمانی است. آن‌ها عملیات اجرایی یک پروژه عمرانی را ازلحاظ اجرایی با توجه به هزینه کیفیت و زمان فعالیت از چهار منظر مواد اولیه، تجهیزات، نیروی کار و مدیریت اجرا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مقاله خود برای ارائه مثالی از کارایی مدل خود از طرح ساخت یک خانه ۳ طبقه با ۲۰ فعالیت اجرایی و چهار گروه از نوع عملیات بهره برده‌اند. کیفیت کل پروژه در مدل این دو پژوهشگر به‌صورت میانگین وزن‌دار کیفیت هر فعالیت محاسبه می‌شود. وزن هر فعالیت به‌لحاظ کیفیت و نقش آن به‌عنوان بخشی از کیفیت کل پروژه در ضریب آن ضرب می‌گردد. از سوی دیگر کیفیت هر فعالیت به‌صورت میانگین وزنی کیفیت مواد اولیه، تجهیزات، نیروی کار و مدیریت محاسبه می‌گردد [۳۱].

۴-۴- ارزیابی کیفیت به‌وسیله شاخص‌های ارزیابی کیفیت

در مقالات زیر که به آن اشاره می‌گردد، تلاش‌های زیادی صورت گرفته تا با استفاده از بانک اطلاعاتی شاخص‌های قابل اندازه‌گیری کیفیت، این مشکل حل گردد؛ اما این شاخص‌ها فقط مربوط به ساخت بزرگراه‌ها شده است که کیفیت یک فعالیت در هر حالت اجرایی با استفاده از این شاخص‌ها تخمین زده می‌شود. با این وجود، این متدولوژی می‌تواند بر روی هر پروژه‌ای که دارای یک پایگاه داده در دسترس از شاخص‌های کیفیت است، اجرا شود. در تمام این مقالات، کیفیت فعالیت در هر حالت اجرا از مجموع وزنی مقادیر شاخص‌های کیفیت بدون تعیین اینکه این وزن‌ها چگونه محاسبه شده‌اند، بیان می‌شود.

الرایس و کندیل[۲۷] (۲۰۰۵) مسئله DTCQTP را برای یک پروژه ساخت‌وساز بزرگراه انجام داده است که در آن هر فعالیت می‌تواند در چندین حالت اجرایی متناسب با ترکیب خاصی از منابع مختلف (مانند مواد، نیروی انسانی، اضافه‌کاری) اجرا شود. بازهم این خصوصیت وجود دارد که اگر مدت زمان ثابت باشد، صرف هزینه بیشتر (به‌طور مثال، با استفاده از قطعات با کیفیت بالاتر یا ماشین‌آلات پیشرفته‌تر) کیفیت را افزایش می‌دهد. اگر هزینه ثابت باشد، کیفیت با مدت زمان افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، اگر فرض شود که دو حالت اجرایی در یک فعالیت دارای هزینه یکسان باشند. اگر حالت اجرایی اول از عناصر کم کیفیت و اضافه‌کاری استفاده کند و روش اجرایی دوم شامل عناصر با کیفیت بالاتر و بدون اضافه‌کاری باشد، کیفیت و مدت زمان در حالت اجرایی اول نسبت به حالت اجرایی دوم پایین‌تر خواهند بود. برای هر حالت اجرایی، هزینه منابع مورداستفاده و مدت زمان مرتبط شده است. برای هر فعالیت لیستی از چندین شاخص کیفیت وجود دارد و هر شاخص در هنگام پردازش فعالیت در یک حالت اجرایی، مقدار خاصی را می‌گیرد. به‌عنوان مثال، فعالیت آسفالت بتونی با استفاده از ماشین سنگ‌فرز قدرتمند و مواد بتنی مختلف که به چندین حالت اجرایی منتهی می‌شوند، شاخص‌های

[26]- Hu and He

[27]- El-Rayes and Kandil

کیفیت مانند حفره هوا یا ضخامت آسفالت، نیز مقادیر مختلفی را به خود اختصاص می‌دهند. هر شاخص کیفیت دارای وزنی است که می‌تواند سهم خود را از کیفیت فعالیت منعکس کند؛ اما نویسندگان توضیح نمی‌دهند که چگونه وزن‌ها تعیین شده‌اند. کیفیت کلی پروژه به‌عنوان مجموعه وزنی از کیفیت‌های فعالیت‌ها بیان شده است؛ اما بازهم هیچ اطلاعاتی در مورد نحوه تعیین این وزن‌ها ارائه نشده است. نویسندگان با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه‌سازی چندهدفه را برای حل پروژه ساخت‌وساز بزرگراه با ۱۸ فعالیت و حداکثر ۵ حالت اجرایی در هر فعالیت اتخاذ می‌کنند [۳۲]. افشار و همکاران (۲۰۰۷) نیز از مدل‌های DTCQTP براساس تعریف یکسان کیفیت هر فعالیت و کیفیت کل پروژه بر طبق مدل الرایس و کندیل (۲۰۰۵) استفاده نمودند. آن‌ها الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه را برای حل مسئله انتخاب کردند که یک کلونی برای هر هدف وجود دارد. اولین هدف حداقل کردن مدت زمان پروژه، سپس حداقل کردن هزینه و درنهایت حداکثر کردن کیفیت می‌باشد؛ بنابراین مورچه‌های اولین کلونی به دنبال یافتن راه‌حل‌هایی جهت حداقل کردن مدت زمان هستند. این راه‌حل‌ها به کلونی دوم منتقل می‌شوند که از نظر هزینه ارزیابی می‌شوند و درنهایت راه‌حل‌های جدید به کلونی سوم انتقال می‌یابند و عامل کیفیت بررسی و محاسبه می‌شود. این روند تکرارشونده از انتقال راه‌حل‌های پیاپی ادامه می‌یابد تا تعداد محدودی از تکرارها با نام چرخه حاصل شود. در پایان هر چرخه، راه‌حل‌ها در کلونی سوم نیز از نظر مدت زمان و هزینه ارزیابی می‌شوند و راه‌حل‌های غیرغالب در بایگانی ثبت می‌شود [۳۳].

مونگل[28] و همکاران (۲۰۱۳) همچنین یک پروژه ساخت‌وساز بزرگراه را در نظر گرفته‌اند که حالت‌های پردازش فعالیت‌ها با گزینه‌های قراردادهای فرعی بیان شده است. همانند الرایس و کندیل (۲۰۰۵)، آنها از یک پایگاه داده شاخص‌های کیفیت، مدت زمان و هزینه برای پروژه‌های ساختمانی یکسان استفاده نمودند. محققان بیان کرده‌اند که برای تعیین کیفیت پروژه ساخت بزرگراه، به شناسایی شاخص‌های کیفیت برای ارزیابی کیفیت فعالیت‌های پروژه نیازمندیم. به همین منظور، از شاخص‌های کیفیت و روش اندازه‌گیری آنکه توسط اندرسون و راسل[29] (۲۰۰۱) طبق جدول ۲ ارائه شده، استفاده نمودند. آنها از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای ارزیابی کیفیت پیمانکاران فرعی برای هر فعالیت پروژه استفاده می‌کنند: شاخص‌های کیفیت رتبه‌بندی شده و در هر حالت اجرایی، وزنی به آنها تعلق می‌گیرد تا کیفیت هر فعالیت برای هر پیمانکار فرعی (حالت اجرایی) به‌دست آید. کیفیت پروژه به‌عنوان مجموع وزنی حداقل کیفیت تکی فعالیت‌ها و میانگین تمام کیفیت‌های تکی تعریف شده است که در آن وزن بالا روی حداقل، تضمین می‌کند که هیچ فعالیت تکی دارای سطح کیفیت خیلی پایینی نباشد، درحالی‌که وزن کمتر نشان می‌دهد که تمرکز بیشتر بر میانگین کلی فعالیت‌های پروژه است [۳۴].

$$
\begin{aligned}
&Max Q_a = \alpha Q_{\min} + (1-\alpha) Q_{avg} \\
&s.t \\
&Q_{\min} = \min\{q_{ij} : x_{ij} = 1\} \quad 1 \le i \le N \quad 1 \le j \le m_i \\
&Q_{\min} \le q_{ij}.x_{ij} + M(1-x_{ij}) \quad 1 \le i \le N \quad 1 \le j \le m_i \qquad (۶) \\
&Q_{avg} = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{m_i} q_{ij}.x_{ij}\right) \quad 1 \le i \le N \quad 1 \le j \le m_i
\end{aligned}
$$

در رابطه (۶)، تابع هدف کیفیت که کیفیت کل پروژه (Q_a) را برآورد می‌کند، به کمینه کیفیت همه گزینه‌های فعالیت انتخاب‌شده (Q_{min}) و میانگین کیفیت همه گزینه‌های قراردادهای فرعی انتخاب شده پروژه (Q_{avg}) بستگی دارد. α نیز انحراف بین Q_{min} و Q_{avg} را نشان می‌دهد.

[28]- Mungle

[29]- Anderson and. Russell

محدودیت اول بیان می‌کند که کمینه کیفیت از مینیمم کیفیت همه فعالیت‌های انتخاب‌شده به‌دست می‌آید. محدودیت دوم نیز رابطه بین کمینه کیفیت و کیفیت فعالیت i در قرارداد فرعی j را نشان می‌دهد. در اینجا M یک عدد بسیار بزرگ است (x_{ij} مقدار صفر یا یک می‌گیرد). محدودیت سوم نحوه محاسبه میانگین کیفیت را بیان می‌کند.

هزینه پروژه نیز شامل هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم قراردادهای فرعی، هزینه جریمه تأخیر منهای پاداش اتمام زودتر پروژه است. مسئله این است که حالت‌های اجرایی (پیمانکاران فرعی) برای هر فعالیت انتخاب شود تا مجموعه بهینه پاراتو به‌دست آید. این مجموعه شامل راه‌حل‌های بهینه در توازن بین مدت زمان، هزینه و کیفیت پروژه است. نویسندگان بیان می‌کنند که مجموعه راه‌حل‌های پاراتو می‌تواند بزرگ و درنتیجه تحلیل و درک آن دشوار باشد؛ بنابراین آن‌ها یک روش الگوریتم ژنتیک خوشه‌بندی فازی را پیشنهاد می‌دهند تا مجموعه پاراتو را به‌اندازه مطلوب کاهش دهد.

جدول ۲- شاخص‌های کیفیت و روش‌های اندازه‌گیری آن [۳۵]

فعالیت ساختمانی	شاخص‌های کیفیت	روش‌های اندازه‌گیری شاخص‌ها
روبنای قیردار جاده	محتوای آسفالت	اندازه‌گیری از طریق استفاده از کوره حرارتی
	حفره هوا	تست غلتک‌زنی چرخشی
	حفره در مواد معدنی	تست غلتک‌زنی چرخشی
	کیفیت سواری	اندازه‌گیری به‌وسیله نیمرخ سنج
	حفره هوا در محل	اندازه‌گیری از طریق هسته
روسازی بتنی	قدرت فشاری	آزمایش فشاری
	استحکام خمشی	آزمایش استوانه شکاف
	کیفیت سواری	اندازه‌گیری به‌وسیله نیمرخ سنج
	ضخامت	اندازه‌گیری از طریق هسته
نشانه‌گذاری راه	طراحی انعکاس	اندازه‌گیری شدت نور و درخشندگی (کاندلا)
	انعکاس	اندازه‌گیری شدت نور (کاندلا)
	رنگ	اندازه‌گیری شاخص زرد
رنگ‌کاری پل	ضخامت پوشش	اندازه‌گیری در مقابل مشخصات
	اکسید قابل مشاهده	تصادفی
	لایه‌برداری	تصادفی

منقسمی[۳۰] و همکاران (۲۰۱۵) برای حل مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت در پروژه‌های ساخت‌وساز از یک مدل جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کردند. مدل ریاضی موازنه این محققان برگرفته از مدل ارائه شده توسط مونگل و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد. آنها برای به‌دست آوردن وزن اهداف، از تکنیک آنتروپی شانون استفاده کردند و مسئله را با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه و یک رویکرد رتبه‌بندی نامغلوب حل کردند. سپس برای رتبه‌بندی جواب‌های پارتو از رویکرد استدلال شواهد[۳۱] استفاده کردند. نتایج نشان داد که رویکرد

[30]- Monghasemi

[31]- Evidence Reasoning (ER)

استدلال شواهد در رتبه‌بندی جواب‌های پارتو، زمانی که با جواب‌های مونگل و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه می‌شود، کاراتر است [۳۶].

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به پیچیده‌تر شدن اجرای پروژه‌ها در سال‌های اخیر و همچنین رقابتی شدن فضای کسب‌وکار، عامل کیفیت علاوه بر دو عامل زمان و هزینه در مدیریت پروژه، اهمیت زیادی پیدا کرده است. از این‌رو، بالا بردن کیفیت اجرای پروژه‌ها در کنار کاهش زمان و هزینه‌های آن جزو اهداف اصلی مدیران پروژه‌ها شده است. زمانی که در هر حالت اجرایی، کیفیت فعالیت‌ها توسط خبرگان تخمین زده نشود، فرض می‌شود که کیفیت یک تابع پیوسته از مدت زمان یا مدت زمان و هزینه است. کیفیت حالت‌های اجرایی فعالیت‌های پروژه، در برخی از پژوهش‌ها به‌صورت یک تابع افزایشی خطی از مدت زمان، یا به‌صورت یک تابع درجه دوم از مدت زمان و یا یک تابع غیرخطی از مدت زمان و هزینه فرض شده است. در پژوهش‌های گذشته نشان داده شده است که زمانی که از نیروی انسانی اضافی برای تسریع در پروژه به جهت اضافه‌کاری استفاده می‌کنیم، کیفیت کاهش می‌یابد. این موضوع از نظر نگارندگان نمی‌تواند همیشه صادق باشد. از طرفی، کیفیت به هزینه بستگی دارد که خود به منابع وابسته است. افزایش هزینه به چندین طریق می‌تواند خود را نشان دهد. افزایش هزینه می‌تواند ناشی از افزایش کیفیت منابع ورودی هر فعالیت، افزایش منابع در جهت تسریع فعالیت‌های پروژه و یا افزایش مدت زمان انجام هر فعالیت با منابع یکسان و ثابت باشد. در حالت اول و سوم بیان شده، می‌تواند کیفیت کار افزایش یابد. جایگزینی منابع باکیفیت به‌جای منابع بی‌کیفیت، افزایش هزینه را به دنبال دارد که این افزایش هزینه نیز افزایش کیفیت فعالیت را در پی خواهد داشت. در حالت سوم، با منابع یکسان و ثابت، مدت زمان انجام فعالیت را افزایش می‌دهیم. این افزایش باعث دقت بیشتر در کار شده و درنهایت افزایش کیفیت فعالیت را به دنبال خواهد داشت.

در بیشتر مقالات بررسی شده، در ادبیات پژوهش کیفیت پروژه به‌عنوان یک میانگین حسابی از کیفیت تک‌تک فعالیت‌ها یا میانگین هندسی هنگام پراکندگی کیفیت، استفاده شده است. این‌چنین تجمیعی دارای نقص عمده است. کیفیت پروژه می‌تواند با کیفیت‌های تکی زیر سطح قابل قبول، به یک سطح مطلوب برسد؛ به عبارت دیگر، چون کیفیت پروژه از کیفیت تک‌تک فعالیت‌ها به‌دست می‌آید، کیفیت پایین برخی از فعالیت‌ها با کیفیت بالای برخی دیگر هم‌پوشانی شده و در کیفیت کل پروژه خود را نشان نمی‌دهند. برای مقابله با این مشکل، برخی محققان کیفیت پروژه را به‌صورت ترکیبی از حداقل و متوسط فعالیت‌ها یا فقط به‌عنوان حداقل کیفیت فعالیت‌ها محاسبه کرده‌اند. این موضوع از نظر نگارندگان نیز نمی‌تواند همیشه صحیح باشد. کیفیت پروژه به‌عنوان حداقل کیفیت فعالیت‌ها نیز دارای مشکل است؛ زیرا سهم مشارکت فعالیت‌ها در کیفیت پروژه با یکدیگر متفاوت است. به‌عنوان مثال در ساخت‌وساز یک ساختمان، فونداسیون برای پایداری ساختمان بسیار ضروری است و اگر کیفیت فعالیت گچ‌کاری حداقل باشد، در نظر گرفتن آن به‌عنوان کیفیت کل پروژه معنی نخواهد داشت. کیفیت عملیات فونداسیون در ساختمان و کیفیت عملیات گچ‌کاری و یا سایر فعالیت‌های پروژه با یکدیگر یکسان نیست. برخی از محققان، از حداقل سطح برای کیفیت تجمعی در زیرمجموعه‌ای از فعالیت‌های مرتبط استفاده می‌کنند تا از کار مجدد (دوباره‌کاری) جلوگیری شود.

به‌عنوان نتیجه کلی انجام این پژوهش، می‌توان گفت که عامل کیفیت در مسائل موازنه در پروژه‌های عمرانی از دو جنبه مورد بررسی قرار می‌گیرد و اهمیت خود را نشان می‌دهد. اول در نحوه محاسبه کیفیت تک‌تک حالت‌های اجرایی در هر فعالیت. دوم محاسبه کیفیت کلی پروژه از روی کیفیت تک‌تک فعالیت‌ها.

به‌طورکلی، می‌توان گفت که کیفیت حالت‌های اجرایی هر فعالیت، به دو عامل اساسی وابسته است. مدت زمان انجام هر فعالیت و منابع ورودی هر فعالیت. اگر مسئله موازنه از نوع مسائل TCQTP و بدون محدودیت منابع باشد، به دلیل عدم وجود محدودیت در منابع، به‌جای تأثیر منابع می‌توان از عامل هزینه استفاده کرد. در مسائل TCQTP از نوع MRCPSP باید علاوه‌بر مدت زمان، میزان تأثیر منابع بر کیفیت هر حالت اجرایی در فعالیت‌های تکی را مورد بررسی قرار داد. اگر فرض کنیم کیفیت یک حالت اجرایی برای انجام فعالیت پروژه با منابع مشخص و مدت زمان تعیین شده، مقدار $q_1\%$ باشد، با جایگزین کردن یک کارگر ماهر با یک کارگر نیمه ماهر و ثابت بودن سایر متغیرها، کیفیت فعالیت در حالت اجرایی جدید چه تغییراتی خواهد داشت. از این‌رو، ارزیابی عامل کیفیت در مسائل موازنه زمان- منبع می‌تواند یک خلأ تحقیقاتی در مسائل موازنه مطرح شود.

دومین جنبه در بحث ارزیابی عامل کیفیت، نحوه محاسبه کیفیت کلی پروژه از روی کیفیت تک‌تک فعالیت‌های پروژه است. این موضوع می‌تواند با تعیین حداقل سطح کیفیت قابل قبول برای هر فعالیت و در نهایت، میانگین وزنی فعالیت‌های کل پروژه مورد بررسی قرار گیرد. وزن هر فعالیت از روش‌های متفاوتی می‌تواند اندازه‌گیری و تعیین شود. هریک از فعالیت‌های پروژه به‌لحاظ اهمیتی که در پروژه دارند، دارای وزن خاصی هستند که این وزن با توجه به سطح مورد نظر ساختار شکست کار یا کل پروژه محاسبه می‌شود. این ارزش وزنی می‌تواند با توجه به مدت زمان هر فعالیت، هزینه، حجم کاری، روابط پیش‌نیازی، روابط پس‌نیازی یا نظرات خبرگان که ترکیبی از همه عوامل است، تعیین گردد.

مراجع

[1] Iranmanesh, H., Skandari, M. R., & Allahverdiloo, M. (2008). “Finding Pareto optimal front for the multi-mode time, cost quality trade-off in project scheduling”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *40*(1), 346-350.

[2] Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). “Project management with time, cost, and quality considerations”, *European journal of operational research*, *88*(2), 320-327.

[3] Kerzner, H. (2017). *Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling*. John Wiley & Sons.

[4] Chen, S. P., & Tsai, M. J. (2011). “Time–cost trade-off analysis of project networks in fuzzy environments”, *European Journal of Operational Research*, *212*(2), 386-397.

[5] Baccarini, D. (1999). “The logical framework method for defining project success”, *Project management journal*, *30*(4), 25-32.

[6] Fineman, M., Fenton, N., & Radlinski, L. (2009). “Modelling project trade-off using Bayesian networks”, In *2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, IEEE, 1-4, 10.1109/CISE.2009.5364789.

[7] Shoul, A., & Keshavarz, E. (2018). “Modelling and Solving the Project Time-Cost-quality trade off Problem on Condition of the Dependence of Quality on Time and Cost”, *Industrial Management Studies*, *16*(50), 125-157.

[8] Project Management Institute. (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. PMBOK® Guide, 6th Edition, Project Management Institute.

[9] Garvin, D. (1984). “What does product quality really mean?”, *MIT Sloan Management Review 26*, 25-43.

[10] Abdelsalam, H. M., & Gad, M. M. (2009). “Cost of quality in Dubai: An analytical case study of residential construction projects”, *International journal of project management*, *27*(5), 501-511.

[11] Stylidis, K., Wickman, C., & Söderberg, R. (2015). “Defining perceived quality in the automotive industry: An engineering approach”, *Procedia CIRP*, *36*, 165-170.

[12] Mohammadipour, F., & Sadjadi, S. J. (2016). “Project cost–quality–risk tradeoff analysis in a time-constrained problem”, *Computers & Industrial Engineering*, *95*, 111-121.

[13] Fu, F., & Zhang, T. (2016). “A new model for solving time-cost-quality trade-off problems in construction”, *PloS one*, *11*(12), 1-15.

[14] 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.

[15] Węglarz, J., Józefowska, J., Mika, M., & Waligóra, G. (2011). "Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes–A survey", *European Journal of operational research*, *208*(3), 177-205.
[16] Orm, M. B., & Jeunet, J. (2018). "Time cost quality trade-off problems: A survey exploring the assessment of quality", *Computers & Industrial Engineering*, *118*, 319-328.
[17] Li, H., Love, P. E. D., & Drew, D. S. (2000). "Effects of overtime work and additional resources on project cost and quality", *Engineering Construction and Architectural Management*, *7*(3), 211-220.
[18] Icmeli-Tukel, O., & Rom, W. O. (1997). "Ensuring quality in resource constrained project scheduling", *European journal of operational research*, *103*(3), 483-496.
[19] 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.
[20] Tiwari, V., Patterson, J. H., & Mabert, V. A. (2009). "Scheduling projects with heterogeneous resources to meet time and quality objectives", *European Journal of Operational Research*, *193*(3), 780-790.
[21] Saif, A., Abbas, S., & Fayed, Z. (2015). "The PDBO algorithm for discrete time, cost and quality trade-off in software projects with expressing quality by defects", *Procedia Computer Science*, *65*, 930-939.
[22] Shankar, N. R., Raju, M. M. K., Srikanth, G., & Bindu, P. H. (2011). "Time, cost and quality trade-off analysis in construction of projects", *Contemporary Engineering Sciences*, *4*(6), 289-299.
[23] Hajiagha, S. H. R., Mahdiraji, H. A., & Hashemi, S. S. (2014). "A hybrid model of fuzzy goal programming and grey numbers in continuous project time, cost, and quality tradeoff", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *71*(1), 117-126.
[24] Zhang, L., Du, J., & Zhang, S. (2014). "Solution to the time-cost-quality trade-off problem in construction projects based on immune genetic particle swarm optimization", *Journal of Management in Engineering*, *30*(2), 163-172.
[25] Tran, D. H., Cheng, M. Y., & Cao, M. T. (2015). "Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time–cost–quality tradeoff problem", *Knowledge-Based Systems*, *74*, 176-186.
[26] Liberatore, M. J., & Pollack-Johnson, B. (2013). "Improving project management decision making by modeling quality, time, and cost continuously", *IEEE Transactions on Engineering Management*, *60*(3), 518-528.
[27] Mehdizadeh, E., & Mohsenian, O. (2013). "Solving Time Cost and Quality Trade-off project problem using multi-objective stochastic programming", *Industrial Engineering and Management Journal 28-1*(2). 103-111.
[28] 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.
[29] Afruzi, E. N., Najafi, A. A., Roghanian, E., & Mazinani, M. (2014). "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*, 80-96.
[30] Yoon, K. P., & Hwang, C. L. (1981). *Multiple attribute decision making: an introduction*. Sage publications.
[31] 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*. 1-11.
[32] 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.
[33] Afshar, A., Kaveh, A., & Shoghli, O. R. (2007). "Multi-objective optimization of time-cost-quality using multi-colony ant algorithm", *Asian Journal of Civil Engineering*, *8*, 113-124.
[34] Mungle, S., Benyoucef, L., Son, Y. J., & Tiwari, M. K. (2013). "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), 1953-1966.
[35] Anderson, S. D., & Russell, J. S. (2001). *Guidelines for warranty, multi-parameter, and best value contracting* (No. Project 10-49 FY'96).
[36] Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., & Adamowski, J. (2015). "A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects", *Expert systems with applications*, *42*(6), 3089-3104.

پیوست

جدول ۱- خلاصه پژوهش‌های بررسی شده در خصوص ارزیابی کیفیت در مسائل TCQTP

نویسندگان	طبقه‌بندی مدل	منابع	هزینه فعالیت	کیفیت فعالیت	کیفیت پروژه	هدف (اهداف)	طبقه‌بندی در این مقاله
اسمیل‌تاکل و رم (۱۹۹۷)	RCPSP	تجدیدپذیر، چندگانه	هزینه اضافه‌کاری	ارزیابی باینری (تخمینی از هزینه دوباره-کاری)	-	تک هدفه (حداقل-کردن مجموع وزنی هزینه و زمان دوباره-کاری)	بخش ۴-۱
کیم و همکاران (۲۰۱۲)	DTCTP	تجدیدناپذیر، تکی	برآورد شده در هر حالت اجرایی	ارزیابی باینری (کیفیت تخمینی از هزینه بالقوه کیفیت از دست رفته)	-	تک هدفه (حداقل-کردن زمان‌های فشرده و ریسک عدم انطباق فعالیت‌ها)	بخش ۴-۱
تیواری و همکاران (۲۰۰۹)	MRCPSP	تجدیدپذیر، چندگانه	هزینه دوباره‌کاری	ارزیابی باینری	-	تک هدفه (حداقل-کردن زمان اتمام پروژه Makespan)	بخش ۴-۱
بابو و سروش (۱۹۹۶)	CTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی	تابع کاهشی خطی از مدت زمان	تابع افزایشی خطی از مدت زمان	میانگین هندسی و حسابی از کیفیت فعالیت‌ها	تک هدفه (حداقل-کردن زمان اتمام پروژه یا حداقل‌کردن هزینه پروژه یا حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۲
خانگ و مینت (۱۹۹۹)	CTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی (هزینه اضافه‌کاری)	تابع کاهشی خطی از مدت زمان	تابع افزایشی خطی از مدت زمان	میانگین هندسی و حسابی از کیفیت فعالیت‌ها	تک هدفه (حداقل-کردن زمان اتمام پروژه یا حداقل‌کردن هزینه پروژه یا حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۲
شنکار و همکاران (۲۰۱۰)	DTCQTP	تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر	تابع کاهشی خطی از مدت زمان	تابع افزایشی خطی از مدت زمان	میانگین هندسی کیفیت فعالیت‌ها	تک هدفه (حداقل-کردن زمان اتمام پروژه یا حداقل‌کردن هزینه پروژه یا حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۲
رضوی حاجی‌آقا و همکاران (۲۰۱۵)	CTCQTP	بدون محدودیت منابع	تابع کاهشی خطی از مدت زمان	تابع افزایشی خطی از مدت زمان	میانگین حسابی کیفیت فعالیت‌ها	چندهدفه (حداقل-کردن زمان پروژه و حداقل‌کردن هزینه پروژه و حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۲

جدول ۱- ادامه

نویسندگان	طبقه‌بندی مدل	منابع	هزینه فعالیت	کیفیت فعالیت	کیفیت پروژه	هدف (اهداف)	طبقه‌بندی در این مقاله
ژانگ و همکاران (۲۰۱۴)	CTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی	تابع درجه دو از مدت زمان	تابع درجه دو از مدت زمان	میانگین حسابی از کیفیت فعالیت‌ها	تک هدفه (حداقل-کردن مجموع وزنی زمان، هزینه و کیفیت) تغییرات مختلف در مقایسه ارزش‌ها	بخش ۴-۲
ترن و همکاران (۲۰۱۵)	DTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی	تابع کاهشی خطی از مدت زمان	تابع درجه‌دو از مدت زمان	میانگین حسابی از کیفیت فعالیت‌ها	چندهدفه (حداقل-کردن تاریخ پایان پروژه و حداقل‌کردن هزینه پروژه و حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۲
لیبریتور و پولاک‌جانسون (۲۰۱۳)	DTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی		تابع غیرخطی از مدت زمان و هزینه	حداقل کیفیت فعالیت‌ها	تک هدفه (حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۲
فو و ژانگ (۲۰۱۶)	MRCPSP + Quality	تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر	هزینه پیشگیری و هزینه اضافه-کاری، هزینه مستقیم تابعی کاهشی خطی از مدت زمان	تابع غیرخطی از مدت زمان و هزینه	کیفیت تجمعی به‌عنوان تابع گسسته از کیفیت فعالیت‌ها در یک گروه	تک هدفه (حداقل-کردن هزینه پروژه)	بخش ۴-۲
طارقیان و طاهری (۲۰۰۶)	DTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی	برآورد شده در هر حالت اجرایی (کاهشی با مدت زمان)	برآورد شده در هر حالت اجرایی	میانگین هندسی و حسابی از کیفیت فعالیت‌ها	تک هدفه (حداقل-کردن زمان پایان پروژه یا هزینه پروژه یا حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۳
نبی‌پور افروزی و همکاران (۲۰۱۴)	MRCPSP + Quality	تجدیدپذیر، چندگانه	هزینه منابع استفاده شده در هر حالت	برآورد شده در هر حالت	میانگین وزنی کیفیت فعالیت‌ها	چندهدفه (حداقل-کردن زمان پایان پروژه و هزینه پروژه و حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۳
محمدی‌پور و سجادی (۲۰۱۶)	DTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی	برآورد هزینه مرتبط با کاهش مدت زمان	برآورد کیفیت مرتبط با کاهش مدت زمان	مجموع کیفیت فعالیت‌ها	تک هدفه (حداقل-کردن هزینه پروژه یا حداقل‌کردن ریسک یا حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۳

جدول ۱- ادامه

نویسندگان	طبقه‌بندی مدل	منابع	هزینه فعالیت	کیفیت فعالیت	کیفیت پروژه	هدف (اهداف)	طبقه‌بندی در این مقاله
الرایس و کندیل (۲۰۰۵)	DTCQTP	منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ادغامی از طریق هزینه در هر حالت، چندگانه	برآورد شده در هر حالت	برآورد شده در هر حالت به‌عنوان مجموع وزنی شاخص‌های کیفیت اندازه-گیری شده	میانگین وزنی کیفیت فعالیت‌ها	چندهدفه (حداقل-کردن زمان پایان پروژه و هزینه پروژه و حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۴
افشار و همکاران (۲۰۰۷)	DTCQTP	منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ادغامی از طریق هزینه در هر حالت، چندگانه	هزینه مستقیم و غیرمستقیم برآورد شده در هر حالت	برآورد شده در هر حالت به‌عنوان مجموع وزنی شاخص‌های کیفیت اندازه-گیری شده	میانگین وزنی کیفیت فعالیت‌ها	چندهدفه (حداقل-کردن زمان پایان پروژه و هزینه پروژه و حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۴
مونگل و همکاران (۲۰۱۳)	DTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی	هزینه پیمانکاری فرعی و هزینه جریمه تأخیر	برآورد شده در هر حالت به‌عنوان مجموع وزنی شاخص‌های کیفیت اندازه-گیری شده	مجموع وزنی حداقل و میانگین کیفیت فعالیت‌ها	چندهدفه (حداقل-کردن زمان پایان پروژه و هزینه پروژه و حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۴
منقسمی و همکاران (۲۰۱۵)	DTCQTP	تجدیدناپذیر، تکی	هزینه پیمانکاری فرعی و هزینه جریمه تأخیر	برآورد شده در هر حالت به‌عنوان مجموع وزنی شاخص‌های کیفیت اندازه-گیری شده	مجموع وزنی حداقل و میانگین کیفیت فعالیت‌ها	چندهدفه (حداقل-کردن زمان پایان پروژه و هزینه پروژه و حداکثرکردن کیفیت پروژه)	بخش ۴-۴