

Paper Type: Original Article



Designing Time-Cost-Quality Trade-Off Model in Multimodal PERT Network using Simulations and NSGA-II And MOPSO Algorithms

Ahmad Yousefi Hanoomarvar¹ , Maghsoud Amiri^{2,*}, Laya Olfat², Alireza Naser Sadrabadi³

¹Ph.D. Student in Operation Research, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran; ahmad.yousefi@atu.ac.ir

²Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran; mg_amiri@yahoo.com and layaolfat@gmail.com

³Department of Industrial Management, Faculty of Economics, Management and Accounting, Yazd University, Yazd, Iran; alireza_naser@yazd.ac.ir

Citation:



Yousefi Hanoomarvar, A., Amiri, M., Olfat, L., & Naser Sadrabadi, A. (2021). Designing time-cost-quality trade-off model in multimodal pert network using simulations and nsga-ii and mopso algorithms. *Journal of decisions and operations research*, 6(2), 146-173.

Received: 01/03/2021

Reviewed: 05/04/2021

Revised: 23/04/2021

Accept: 20/05/2021

Purpose: The proposed model is a time-cost-quality trade-off model with three objective functions: minimizing project completion time, minimizing total project cost, and maximizing total quality of activities in a PERT network with multi-mode activities.


Methodology: After presenting the appropriate mathematical model, based on the design of the experiments, the possible levels of each decision variable were determined. Then, using the simulation process, random values of decision variables and response variables were obtained each time, and by using neural networks, we established a neural network model. To solve this model, two algorithms NSGA-II and MOPSO were used.

Findings: To evaluate the efficiency of the model, the designed model was implemented in the maintenance department of Abtin Ardakan Steel Company. According to the results, it is found that the NSGA-II algorithm has better performance than the MOPSO algorithm.

Originality/Value: In this paper, a model was presented that by eliminating unrealistic assumptions and taking into account the realities of the project is closer to reality than the models presented in this field and has more application in practice.

Keywords: PERT network, Neural network, Design of experiments, Project management, Time-cost-quality trade-off.

Abstract

 Corresponding Author: mg_amiri@yahoo.com

 10.22105/DMOR.2021.265922.1296



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نوع مقاله: پژوهشی



طراحی مدلی برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت در یک شبکه PERT چندحالتی با استفاده از شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOPSO

احمد یوسفی هنومرور^۱، مقصود امیری^۲، لعیالفت^۲، علیرضا ناصر صدرآبادی^۳

^۱ دانشجوی دکتری تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

^۲ گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

^۳ گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

هدف: ارائه یک مدل موازنه زمان - هزینه - کیفیت با سه تابع هدف، کمینه کردن زمان ختم پروژه، کمینه کردن هزینه کل پروژه و بیشینه کردن کیفیت کل انجام فعالیت‌ها در یک شبکه PERT با فعالیت‌های چندحالتی می‌باشد.

روش‌شناسی پژوهش: بعد از ارائه مدل ریاضی مناسب، بر اساس طراحی آزمایشات، سطوح ممکن هر متغیر تصمیم تعیین شد. سپس با استفاده از فرایند شبیه‌سازی، مقادیر تصادفی متغیرهای تصمیم و متغیرهای پاسخ در هر بار اجرا حاصل و با به کارگیری شبکه‌های عصبی، یک مدل شبکه عصبی برقرار کردیم. برای حل این مدل، از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO استفاده شد.

یافته‌ها: برای ارزیابی کارایی مدل، مدل طراحی شده در بخش نگهداری و تعمیرات شرکت فولادسازی آبتین اردکان پیاده‌سازی و اجرا شد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شده که الگوریتم NSGA-II کارایی بهتری نسبت به الگوریتم MOPSO دارد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: در این مقاله مدلی ارائه شد که با حذف مفروضات غیرواقعی و لحاظ نمودن واقعیت‌های پروژه نسبت به مدل‌های ارائه شده در این زمینه به واقعیت نزدیک‌تر بوده و در عمل کاربرد بیشتری نیز داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: شبکه PERT، شبکه عصبی، طراحی آزمایشات، مدیریت پروژه، موازنه زمان-هزینه-کیفیت.

۱- مقدمه

در واقع سازماندهی فعالیت‌های مرتبط با هم در پروژه‌ها نوآوری مدیریتی بسیار قدیمی است که به بیش از ۴۶۰۰ سال پیش برمی‌گردد. تقریباً زمانی که فرعون‌های مصر پروژه ساخت‌وساز عظیم ساخت هرم سقرا را آغاز کردند. این پروژه نیاز به کنترل و برنامه‌ریزی هزاران فعالیت و حداکثر ۱۰۰۰۰۰ کارگر داشت. با این حال، توسعه تکنیک‌های مدرن مدیریت پروژه با توسعه مسیر بحرانی شناخته شده و به دهه ۱۹۵۰ برمی‌گردد. امروزه نیاز به مدیریت پروژه به طور چشمگیری افزایش یافته و مدیریت پروژه نقش مهمی را در مدیریت سازمان‌های

* نویسنده مسئول

mg_amiri@yahoo.com



10.22105/DMOR.2021.265922.1296

مدرن ایفا می‌نماید. مدیریت پروژه به عنوان کاربرد دانش، مهارت و تکنیک‌هایی برای فعالیت‌های پروژه به منظور دستیابی به نیازمندی‌های پروژه تعریف می‌شود (موسسه مدیریت پروژه، ۲۰۱۸).

زمان، هزینه و کیفیت سه معیار مهم یک پروژه هستند که همه مدیران پروژه برای کسب توفیق در اجرای پروژه‌های خود همواره به دنبال اتمام پروژه‌ها در کمترین زمان ممکن، با کمترین هزینه ممکن و در بالاترین سطح از کیفیت می‌باشند اما چگونه به این اهداف می‌توان دست یافت. چالش اصلی پیش روی مدیران پروژه، انتخاب رویکردی مناسب جهت یافتن ترکیب‌های بهینه زمان، هزینه و کیفیت فعالیت‌های پروژه، به منظور رسیدن به این سه هدف می‌باشد. برای مثال در صورتی که مدیر به دنبال انتخاب حالت‌های اجرایی باشد که منجر به کاهش زمان پروژه شوند، در همان حالت ممکن است مجبور به پرداخت هزینه بیشتر و همین‌طور انجام پروژه با سطح کیفیت پایین‌تر باشد. به بیان دیگر اهداف پیش گفته دارای نوعی تعارض با یکدیگر بوده و بنابراین نوعی موازنه بین آن‌ها وجود داد (امیری و همکاران، ۲۰۱۳).

مسئله موازنه بین ارکان مختلف محدوده پروژه به اشکال مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عنوان نمونه، موازنه بین زمان-هزینه، زمان-هزینه-کیفیت، کیفیت-هزینه و ... می‌باشد (عقدايي و حسين‌زاده كاشان، ۲۰۱۸). اخیراً مدیران پروژه توجه بیشتری را به بهبود کیفیت پروژه از طریق کاهش زمان و هزینه مورد نیاز پروژه داده‌اند که این امر منجر به ایجاد مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت گسسته شد (سیف و همکاران، ۲۰۱۵). در فضای گسسته، منابع مختلف در واحدهای گسسته در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت بر مبنای هزینه‌ای که برای اجرای هر فعالیت در نظر گرفته می‌شود، زمان مربوطه مشخص می‌شود. در نتیجه، برای انجام یک فعالیت چند حالت مختلف اجرایی وجود خواهد داشت. بنابراین این مسئله تبدیل به مسئله گسسته موازنه زمان-هزینه در زمان‌بندی پروژه با فعالیت‌های چندحالتی می‌گردد. در این گونه مسائل پژوهشگران به دنبال انتخاب یک حالت اجرایی مشخص برای هر یک از فعالیت‌های پروژه می‌باشند به نحوی که زمان و هزینه در کمترین مقدار خود قرار بگیرند. همچنین پژوهشگران دریافته‌اند که با تغییر هزینه در یک پروژه فقط زمان نیست که تحت تأثیر قرار می‌گیرد، بلکه کیفیت پروژه هم تغییر خواهد یافت که این موضوع منجر به ظهور مسائل موازنه زمان-هزینه-کیفیت شده است.

فرایند بعد از مدل‌سازی مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت استفاده از روش حل مناسب برای دستیابی به نتایج مطلوب می‌باشد. به طور کلی روش‌های حل مسائل موازنه در مدیریت پروژه به سه دسته الگوریتم‌های دقیق، الگوریتم‌های ابتکاری و الگوریتم‌های فراابتکاری تقسیم می‌شوند (کازا و همکاران، ۲۰۱۶). نخستین روش استفاده‌شده در حل مسائل زمان‌بندی و مدیریت پروژه روش‌های دقیق می‌باشند. روش‌های دقیق، روش‌هایی می‌باشند که جواب‌های بهینه را پیدا و شرط بهینگی را تضمین می‌کنند. ضمن اینکه پاسخ بهینه ارائه شده توسط این روش‌ها در مورد مسائل با ابعاد کوچک یک جواب بهینه سراسری (کلی) است. اما باید توجه داشت که در بسیاری از آن‌ها زمان حل مسئله برای مسائل بزرگ با ابعاد بسیار بالا، زیاد خواهد بود. بنابراین این روش‌ها به سرعت کارایی خود را از دست می‌دهند. به طوری که در مسائل مربوط به زمان‌بندی پروژه که اغلب از نوع مسائل NP سخت هستند، بهترین روش‌های دقیق تنها قادر به حل مسائل با تعداد فعالیت کم می‌باشند. برای نمونه‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر روش‌های ابتکاری و فراابتکاری جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهند (بولیمن و لکوکو، ۲۰۰۳). پس از روش‌های دقیق و اثبات کارایی پائین آن‌ها، محققان تلاش نمودند از الگوریتم‌های بهتری استفاده نمایند و تمایل به استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری در حل مسائل مدیریت پروژه افزایش یافت. روش‌های ابتکاری زیادی وجود دارند که ماهیت هر کدام با هم متفاوت است. بنابراین یک دسته‌بندی کامل از آن‌ها سخت می‌باشد. خیلی از آن‌ها برای مسائل خاصی طراحی شده‌اند که قابلیت استفاده عمومی یا برای مسائل مشابه را نیز ندارند. پس از روش‌های ابتکاری حل مسائل مدیریت پروژه،

^۱ Project Management Institute

^۲ Amiri et al.

^۳ Aghdaei and Husseinzadeh Kashaan

^۴ Saif et al.

^۵ Exact Algorithms

^۶ Heuristic Algorithms

^۷ Meta-heuristic Algorithms

^۸ Kaza et al.

^۹ Global Optimum Solution

^{۱۰} Bouleimen and Lecocq





الگوریتم‌های فراابتکاری کاربرد زیادی در این حوزه پیدا کرده‌اند. قابلیت حل مسائل پیچیده توسط روش‌های فراابتکاری و تنوع استفاده از آن‌ها در حل مسائل در مقایسه با روش‌های دقیق و ابتکاری، برتری است که موجب شده تا استفاده از آن‌ها افزایش یابد. بنابراین استفاده کارآمد از منابع محدود از جمله اهداف مدیریت کارآمد است و به کارگیری تکنیک‌های مدرن مدیریتی در این زمینه بسیار مؤثر است (جعفری و همکاران، ۲۰۱۴).

زمان‌بندی صحیح پروژه از ارکان اصلی و لازمه موفقیت و همچنین تطابق برنامه‌ریزی و اجرا، از اصلی‌ترین موضوعات مدیریت پروژه می‌باشد. با توجه به وجود عامل عدم قطعیت در اجرای مراحل مختلف یک پروژه، دستیابی به روش‌های نوینی که تأخیرها و مشکلات مربوط به عدم قطعیت را کاهش و برنامه‌ریزی را با اجرا هر چه بیشتر منطبق سازد، بسیار ارزشمند است. در زمینه اهداف کاربردی، به دنبال این هستیم تا مدل توسعه داده‌شده با مفروضاتی که به آن اضافه شده است را به محیط واقعی نزدیک‌تر و دامنه کاربردی آن را افزایش دهیم. این امر می‌تواند برای به دست آوردن بهترین کارایی در پروژه‌های عمرانی، دولتی، پتروشیمی و غیره برای رسیدن به اهداف مدنظر پروژه باشد. در زمینه اهداف علمی، در این تحقیق یک هدف اصلی وجود دارد که در راستای رسیدن به آن، چند هدف فرعی نیز محقق خواهند شد. هدف اصلی این تحقیق، طراحی مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای زمان‌بندی پروژه در شبکه‌های PERT با رویکرد تلفیقی چندهدفه موازنه اهداف چندگانه، فعالیت‌های چندحالتی و دارای روابط پیش‌نیازی عمومی می‌باشد. در این مدل هر فعالیت می‌تواند دارای چندین حالت اجرایی، دارای زمان احتمالی و همچنین به جای تنها در نظر گرفتن رابطه پایان به شروع (FS)، روابط پیش‌نیازی عمومی باشد. پس بنابراین در این پژوهش به دنبال ارائه مدلی هستیم که با حذف مفروضات غیرواقعی، مفروضاتی مانند در نظر گرفتن زمان قطعی برای هر فعالیت، داشتن تنها یک حالت اجرایی و وجود تنها رابطه پایان به شروع (FS) بین فعالیت‌ها و لحاظ نمودن واقعیت‌های پروژه نسبت به مدل‌های ارائه شده در این زمینه به واقعیت نزدیک‌تر بوده و در عمل کاربرد بیشتری نیز داشته باشد. بنابراین سؤال این است که چگونه به این مهم می‌توان دست یافت. در کل با توجه به ماهیت این تحقیق، در مراحل اولیه این تحقیق فاقد فرضیه بوده و تحقیق بر اساس سؤالات تحقیق، به شرح زیر آغاز می‌شود:

- مدل موازنه زمان، هزینه و کیفیت در یک شبکه PERT با فعالیت‌های چندحالتی به چه صورت می‌باشد؟
- چگونه می‌توان مدل موازنه معیارهای زمان، هزینه و کیفیت به دست آمده را با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری حل نمود؟
- با توجه به موازنه معیارهای هزینه، زمان و کیفیت زمان‌بندی کل پروژه و فعالیت‌های مربوط به آن به چه صورت باشد؟
- چگونه می‌توان از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده نمود تا کیفیت جواب‌های نزدیک به بهینه افزایش یابد؟

مقاله حاضر در بخش‌های اصلی زیر تنظیم شده است. در بخش دوم مرور اجمالی بر پیشینه تحقیقات انجام گرفته در زمینه موازنه زمان-هزینه-کیفیت بیان می‌شود. سپس به بررسی مدل ریاضی مربوط به موازنه اهداف زمان، هزینه و کیفیت پرداخته خواهد شد. در بخش بعدی به بررسی و تعریف روش‌های حل مسئله مورد استفاده شامل شبیه‌سازی، شبکه عصبی، الگوریتم‌های فراابتکاری تکاملی شامل الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات خواهیم پرداخت. در نهایت با استفاده از یک مثال عددی در دنیای واقعی نتایج به دست آمده مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- پیشینه تحقیق

بابو و سورش (۱۹۹۶) اولین مقاله را در ارتباط با تأثیر کیفیت پروژه بر زمان‌بندی پروژه ارائه دادند. آن‌ها سه مدل برنامه‌ریزی خطی مرتبط برای مطالعه موازنه بین زمان، هزینه و کیفیت در یک شبکه CPM قطعی را توسعه دادند. خانگ و مینت (۱۹۹۹) مدل پیشنهادی بابو و سورش (۱۹۹۶) را در یک پروژه واقعی ساخت کارخانه سیمان مورد استفاده قرار دادند. هدف از این کار ارزیابی قابلیت‌های این روش بر مبنای دیدگاه‌های مدیریتی، مسائل و مشکلاتی که با آن مواجه شده‌اند، می‌باشد. تعدادی از تحقیقات اخیر الگوریتم‌های مختلفی را برای

^۱ Jaferi et al.

^۲ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)

^۳ Multi-Objective Particle Swarm Optimization (PSO)

^۴ Babu and Suresh

^۵ Khang and Myint



مسائل زمان‌بندی پروژه ارائه داده‌اند. اما تعداد بسیار کمی از آن‌ها الگوریتم‌هایی برای پروژه‌های شبکه‌های احتمالی مثل شبکه‌های PERT ارائه کرده‌اند. یک مسئله اساسی در شبکه‌های احتمالی زمان اتمام پروژه می‌باشد. در این راستا و برای حل این مسئله، چارلز و همکاران (۱۹۶۴) یک رویکرد برنامه‌ریزی با فرصت محدود برای مسائل PERT ارائه داده‌اند. مارتین (۱۹۶۵) یک روش سیستماتیک^۱ از تحلیل شبکه‌های PERT از طریق کاهش‌های سری-موازی ارائه داد. محققان زیادی نیز از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تخمین $F(T)$ در شبکه‌های PERT استفاده کرده‌اند. کولکارنی و آدلکھا (۱۹۸۶) با فرض نمایی بودن فعالیت‌ها، شبکه PERT را به یک زنجیره مارکوفی با تعداد حالات محدود و زمان پیوسته که دارای حالت جذب‌کننده‌ای می‌باشد، تبدیل نمودند و به کمک آن تابع توزیع تکمیل پروژه را محاسبه نمودند. چو و یوم (۱۹۹۷) یک روش جدید برای ارزیابی "معیار اهمیت عدم اطمینان" ارائه کرده‌اند. برادران و همکاران (۲۰۱۰) یک فرمول درجه دو گوسی برای محاسبه $F(T)$ ارائه کردند.

همچنین در زمینه حل مسائل موازنه بین اهداف مختلف پروژه در شبکه‌های PERT، تحقیقات اندکی انجام شده است. هاگا و مارولد (۲۰۰۴) با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی به موازنه زمان-هزینه در شبکه‌های PERT پرداختند. این مقاله تحقیقاتی با استفاده از روش شبیه‌سازی، به بهبود روش‌های فشرده‌سازی سنتی می‌پردازد. یک برنامه شبیه‌سازی به زبان برنامه‌نویسی ++C نوشته شده است و از یک تابع جریمه خطی برای تعیین جریمه تأخیر در اتمام پروژه‌ها استفاده می‌کند. روش شبیه‌سازی یکی از ابزارهای متنوعی است که می‌توانیم برای کنترل مجدد پروژه‌ها و تقویت استفاده از مدیریت پروژه در سازمان‌ها از آن استفاده کنیم. آذرون و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یک مدل چندهدفه را برای مسئله موازنه زمان-هزینه در شبکه‌های PERT با توزیع ارلانگ برای زمان فعالیت‌ها ایجاد کردند.

در این مقاله فرض بر این است که مقدار منابع اختصاص یافته به هر فعالیت قابل کنترل است، جایی که میانگین مدت زمان هر فعالیت تابع غیر افزایشی از این متغیر کنترل است. آذرون و توکلی مقدم (۲۰۰۷) مسئله تخصیص منابع را با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه احتمالی در شبکه‌های PERT پویا مطرح کردند. در مرحله اول، شبکه PERT پویا را به یک شبکه تصادفی مناسب تبدیل کرده و سپس با ساخت یک زنجیره مارکوف با زمان پیوسته، توزیع زمان اتمام پروژه را محاسبه و سپس آن را حل کردند. در مرحله دوم، مسئله موازنه هزینه - زمان را به صورت یک مسئله کنترل بهینه چندهدفه که شامل چهار تابع هدف متناقض است حل کردند. آذرون و همکاران (۲۰۰۷) یک تکنیک تقریبی زمان گسسته برای موازنه زمان-هزینه در شبکه PERT ارائه کردند. در این پژوهش فرض بر این است که مدت زمان فعالیت متغیرهای تصادفی مستقلی با توزیع ارلانگ تعمیم یافته هستند، که در آن‌ها میانگین مدت زمان هر فعالیت یک تابع بدون افزایش مقدار منبع اختصاص یافته به آن است. برای نشان دادن مزایای روش پیشنهادی، یک الگوریتم شبیه‌سازی تیرید برای حل مسئله ایجاد نمودند و نتایج به دست آمده را با الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند.

حسنی و الباسونی (۲۰۱۸) به آنالیز موازنه زمان-هزینه-کیفیت تصادفی با رویکرد PERT پرداختند. برای این آنالیز، یک مدل تصادفی برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت پروژه‌های ساختمانی با توجه به عدم اطمینان با استفاده از تکنیک ارزیابی و بازنگری پروژه ایجاد شده است. هدف اصلی این مدل توسعه یافته، بهینه‌سازی استفاده از گزینه‌های اجرا به منظور انتخاب گزینه‌ای برای هر فعالیت در پروژه برای برآوردن اهداف تصمیم‌گیرندگان است. مراد و همکاران (۲۰۱۹) یک مسئله موازنه گسسته تصادفی زمان-هزینه-کیفیت را با رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مدل‌سازی و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو حل نمودند. این مقاله با هدف ایجاد یک ابزار برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مبتنی بر شبیه‌سازی انجام شده که به مدیران پروژه کمک می‌کند، در مراحل اولیه، ریسک‌های مربوط به امکان‌سنجی و سودآوری پروژه‌ها را در چارچوب یک مسئله مبادله کیفیت زمان-هزینه گسسته تصادفی ارزیابی کنند. روش پیشنهادی قادر است تأثیر رفتار تصادفی طول مدت و کیفیت فعالیت‌ها را بر هزینه، مدت زمان و کیفیت کل پروژه ارزیابی کند. علاوه بر این،

^۱ Charnes et al.

^۲ Martin

^۳ Kulkarni and Adlakh

^۴ Cho and Yum

^۵ Baradaran et al.

^۶ Haga and Marold

^۷ Azaron et al.

^۸ Azaron and Tavakkoli-Moghaddam

^۹ Azaron et al.

^{۱۰} Hosny and Elbassuony

^{۱۱} Mrad et al.

سادگی و زمان کاهش یافته برای محاسبه شبکه‌هایی با اندازه بزرگ برای ارائه یک راه حل عملی برای پروژه‌های واقعی در این تحقیق بسیار امیدوارکننده است.



با توجه به اینکه تحقیقات فراوانی در حوزه‌های مختلف مدیریت پروژه صورت گرفته است، اما هنوز حوزه‌های گسترده‌ای برای انجام تحقیقات دیگر در این زمینه وجود دارد. کمبودهای موجود در این مسائل از دو جنبه "ایجاد و توسعه مدل‌های نزدیک‌تر به دنیای واقعی" و "توسعه و بهبود روش‌های حل مسائل موازنه" مطرح است. اگرچه در تحقیقات گذشته، موازنه اهداف چندگانه مدیریت پروژه مورد توجه قرار گرفته شده و از ابزارها و رویکردهای مختلفی جهت حل مسائل آن استفاده شده است اما در این تحقیق تلاش می‌شود تا با تعریف مسئله جدیدی از موازنه اهداف چندگانه و همچنین ارائه رویکردهایی برای حل این مسئله مدلی نزدیک‌تر به دنیای واقعی ارائه داد و روش حل آن را توسعه و بهبود بخشید. در این راستا در این پژوهش زمان به صورت احتمالی در نظر گرفته شده و تابع هدف کیفیت که تحقیقات کمتری به آن پرداخته‌اند به مسائل پایه زمان بندی اضافه شده است. با توجه به داشتن یک تابع هدف احتمالی و جلوگیری از تخمین‌های غیرواقعی از شبیه‌سازی برای حل مسئله استفاده شده است و به دلیل زیاد بودن تعداد متغیرهای مورد بررسی از شبکه عصبی برای برازش تابع هدف استفاده شده است. علاوه بر این از الگوریتم‌های فراابتکاری به دلیل NP سخت بودن مسئله استفاده گردید. همچنین چندحالتی بودن فعالیت‌ها و از سوی دیگر روابط پیش‌نیازی عمومی میان فعالیت‌های پروژه روابط مختلف پیش‌نیازی اعم از پایان به شروع، شروع به شروع، پایان به پایان و شروع به پایان در نظر گرفته شده تا زمان بندی پروژه به دنیای واقعی نزدیک‌تر شود. بعد از حل هر مسئله با توجه به مدل ریاضی تعریف شده و روش‌های مختلف برای حل مسئله، مشخص خواهد شد که هر فعالیت در چه حالت اجرایی انجام گردد تا زمان و هزینه پروژه کمینه و کیفیت کل پروژه بیشینه گردد. لازم به ذکر است با ارائه یک روش حل جدید، جواب‌های حاصل شده به واقعیت نزدیک‌تر و از کیفیت بالاتری نیز برخوردار خواهند بود. مطالعات انجام شده به طور خلاصه در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در مسائل موازنه در شبکه‌ها PERT.

Table 1- Summary of trade off problems studies in PERT networks.

مدل‌سازی پایه	پژوهشگر	روش حل	توضیحات (نوآوری)
مدل ریاضی چندهدفه	آذرون و همکاران (۲۰۰۵)	الگوریتم ژنتیک، روش دستیابی به هدف	توسعه یک مدل چندهدفه برای موازنه زمان-هزینه در شبکه‌های PERT با در نظر گرفتن توزیع ارلانگ برای زمان انجام فعالیت‌ها.
مدل ریاضی چندهدفه	آذرون و توکلی مقدم (۲۰۰۷)	روش گام (STEM)	توسعه یک مدل چندهدفه برای موازنه زمان-هزینه در شبکه‌های PERT پویا با استفاده از رویکرد تعاملی.
مدل ریاضی چندهدفه	آذرون و همکاران (۲۰۰۷)	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید	تکنیک تقریبی زمان گسسته برای موازنه زمان-هزینه در شبکه PERT.
مدل ریاضی چندهدفه	حسینی و الباسونی (۲۰۱۸)	شبیه‌سازی	بهینه‌سازی استفاده از گزینه‌های اجرا به منظور انتخاب گزینه‌ای برای هر فعالیت در پروژه برای برآوردن اهداف تصمیم‌گیرندگان.
برنامه‌ریزی عدد صحیح	مراد و همکاران (۲۰۱۹)	شبیه‌سازی مونت کارلو	ارزیابی ریسک‌های مربوط به امکان‌سنجی و سودآوری پروژه‌ها در چارچوب یک مسئله مبادله کیفیت-زمان - هزینه گسسته تصادفی.
مدل ریاضی چندهدفه	پژوهش حاضر	شبیه‌سازی و الگوریتم‌های تکاملی NSGA-II و MOPSO	موازنه زمان-هزینه-کیفیت چندحالتی و چندهدفه با روابط پیش‌نیازی عمومی در یک شبکه PERT.

۳- تشریح مدل و مدل‌سازی ریاضی

در رابطه با مدل نهایی طراحی شده باید گفت، پس از بررسی منابع موجود در این زمینه اعم از مقالات، پایان‌نامه‌ها و کتاب‌های مرتبط با موضوع، عمده محدودیت‌های این پژوهش از مقالات و ادبیات موجود در ارتباط با موضوع، جمع‌آوری شده و در قالب یک مدل کلی ارائه



شد. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش مانگل و همکاران (۲۰۱۳)، طارقیان و طاهری (۲۰۰۶) و شهسواری پور و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. در این بخش به بررسی و تعریف مدل برنامه‌ریزی مورد استفاده شده در این مقاله خواهیم پرداخت. به منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی پیشنهادی، نخست نظر خبرگان و اهل فن در این رابطه مورد بررسی قرار گرفت. سپس با در نظر گرفتن یک سری پارامتر پیش‌فرض برای مثال زمان قطعی، تعداد فعالیت و روابط محدود، یک شبکه فرضی در نظر گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار لینگو مسئله حل گردید. در این قسمت مدل به صورت توابع تک هدفه حل گردید. همچنین برای تحلیل حساسیت، حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای مثال با تغییر زمان هر فعالیت و حالت‌های پیش‌نیازی مربوط به آن‌ها، مقدار تابع هدف زمان و با تغییر کیفیت مربوط به هر یک از حالت‌های اجرایی هر فعالیت مقدار تابع هدف کیفیت متناظر و هم‌سو با آن‌ها تغییر کرد. در نهایت مدل استخراجی به شرح ذیل می‌باشد. این بخش شامل تعیین و تعریف پارامترها، اندیس‌ها، توابع هدف و محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی ریاضی می‌باشد.

۳-۱- مفروضات مدل برنامه‌ریزی ریاضی

به طور کلی برای حل این مدل برنامه‌ریزی ریاضی، مفروضات زیر در نظر گرفته شد:

- روش نمایش شبکه به صورت یک شبکه گره‌ای (AON) مربوط به یک پروژه به صورت یک گراف بدون دور (غیر حلقه‌ای)، همبند و جهت‌دار به صورت $G=(N,A)$ می‌باشد.
- هر فعالیت می‌توان دارای چند حالت اجرایی باشد.
- روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها به صورت روابط پیش‌نیازی عمومی تعریف می‌شود.
- مدت زمان اجرای یک فعالیت احتمالی و دارای یک تابع توزیع آماری می‌باشد.
- در طول انجام فعالیت حالت اجرایی انجام آن ثابت است.
- توقف فعالیت‌ها زمانی که شروع می‌شوند امکان‌پذیر نیست.
- سه هدف متعارض با هم شامل زمان، هزینه و کیفیت وجود دارند.
- حدود بالا و پایین مشخصی برای زمان، هزینه و کیفیت پروژه تعریف می‌گردد.

۳-۲- اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل

اندیس‌ها (شمارنده‌ها)، پارامترها، متغیرهای مدل و توضیحات مربوط به آن به صورت زیر می‌باشند.

اندیس‌ها.

- i : اندیس فعالیت‌ها $i=1, 2, \dots, n$
- j : اندیس فعالیت‌ها $j=1, 2, \dots, n$
- k : اندیس حالت‌ها یا مدهای اجرایی $k=1, 2, \dots, r(i)$
- r : اندیس تعداد توابع هدف $r=1, 2, \dots, m$

پارامترها.

- $G=(N,A)$: شبکه نمایش گره‌ای (AON) برای پروژه.
- $N=n_1, n_2, \dots, n_n$: مجموعه فعالیت‌ها.
- $A=a_1, a_2, \dots, a_m$: مجموعه روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها.
- $r(i)$: تعداد حالت‌های اجرایی فعالیت i .
- C_{ik} : هزینه مستقیم فعالیت i در حالت اجرایی k .

^۱ Mungle et al.

^۲ Tareghian and Taheri

^۳ Shahsavari Pour et al.



- \tilde{t}_{ik} : زمان احتمالی انجام فعالیت i در حالت اجرایی k .
- q_{ik} : کیفیت انجام فعالیت i در حالت اجرایی k .
- d_{ij} : تأخیر یا تعجیل زمانی بین فعالیت‌های پیش‌نیاز i و j .
- D : زمان تعیین شده برای اتمام پروژه در موعد مقرر.
- w_i : وزن تخصیص داده شده به کیفیت هر فعالیت.

متغیرها.

- x_{ik} : انجام فعالیت i در حالت اجرایی k .
- s_{ik} : زمان شروع فعالیت i در حالت اجرایی k .
- s_{jk} : زمان شروع فعالیت j در حالت اجرایی k .

۳-۲-۱- طراحی مدل نهایی برنامه‌ریزی ریاضی

در نهایت با توجه به اندیس‌ها، پارامترها، توابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم که در بالا به آن پرداخته شد، مدل نهایی مسئله موازنه زمان، هزینه، کیفیت با فرضیات تعریف شده برای آن به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود.

$$\text{Minimize } T = C_{\max} = \text{Max} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{ik} x_{ik} \right) = S_{n+1}. \quad (1)$$

$$\text{Minimize } C = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} c_{ik} x_{ik}. \quad (2)$$

$$\text{Maximize } Q = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} w_i q_{ik} x_{ik} \right) / \sum_{i=1}^n w_i. \quad (3)$$

Subject to:

$$\sum_{k=1}^{r(i)} x_{ik} = 1, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

$$s_{ik} \leq x_{ik}. \quad (5)$$

$$s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

$$s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk} + \sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{jk} x_{jk}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{ik} x_{ik} + s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{ik} x_{ik} + s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk} + \sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{jk} x_{jk}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

$$T \leq D. \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} c_{ik} x_{ik} \leq B. \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} q_{ik} x_{ik} \geq Q. \quad (12)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}. \quad (13)$$

$$s_{ik} \geq 0. \quad (14)$$

در این مدل روابط تعریف شده به صورت زیر می‌باشند:



روابط (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب تابع هدف حداقل کردن زمان، تابع هدف حداقل کردن هزینه و تابع حداکثر کردن کیفیت پروژه را نشان می‌دهند. رابطه (۴) بیانگر این است که هر فعالیت پروژه تنها باید یک حالت اجرا داشته باشد. رابطه (۵) بیانگر این است که فعالیت در صورتی می‌تواند در یک حالت اجرایی شروع شود که فعالیت موردنظر به آن حالت اجرایی تخصیص داده شده باشد.

رابطه (۶)، این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{SS} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{SS} و تأخیر یا تعجیل زمانی مشخص، بایستی کوچک‌تر مساوی با زمان شروع فعالیت پس‌نیازی z باشد تا رابطه پیش‌نیازی شروع به شروع (SS) محقق شود. رابطه (۷)، این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{SF} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{SF} و تأخیر یا تعجیل زمانی مشخص، بایستی کوچک‌تر مساوی با مجموع زمان شروع فعالیت پس‌نیازی z و مدت زمان نیاز برای انجام فعالیت z باشد تا رابطه پیش‌نیازی شروع به پایان (SF) محقق شود. این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{FS} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{FS} ، زمان مورد نیاز برای اتمام آن فعالیت و تأخیر یا تعجیل زمانی معین بایستی کوچک‌تر مساوی با زمان شروع فعالیت پس‌نیازی z باشد تا رابطه پیش‌نیازی پایان به شروع (FS) محقق شود.

رابطه (۹)، این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{FF} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{FF} ، زمان مورد نیاز برای اتمام آن فعالیت و تأخیر یا تعجیل زمانی مشخص بایستی کوچک‌تر مساوی با مجموع زمان شروع فعالیت پس‌نیاز z و مدت زمان نیاز برای انجام فعالیت z باشد تا رابطه پیش‌نیازی پایان به پایان (FF) محقق گردد.

رابطه (۱۰)، این رابطه تضمین‌کننده اتمام پروژه در موعد مقرر می‌باشد. رابطه (۱۱) این رابطه تضمین می‌شود، کل هزینه (بودجه) تخصیص گرفته شده برای فعالیت‌ها برای اتمام پروژه از مقدار مشخص شده یعنی مقدار B تجاوز نکند. رابطه (۱۲) این رابطه نمایش‌دهنده پایین‌ترین مقدار مجاز برای کیفیت پروژه می‌باشد. رابطه (۱۳) نشان‌دهنده این است که x_{ik} یک متغیر صفر و یک می‌باشد. به عبارتی اگر فعالیت i در حالت k انجام شود مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر را خواهد گرفت. رابطه (۱۴) نشان‌دهنده زمان‌های شروع غیر منفی برای فعالیت‌های پروژه است.

۴- روش‌شناسی پژوهش

از منظر اعتبار نتیجه و خروجی پژوهش این پژوهش از نوع توسعه‌ای و کاربردی است. از نظر روش انجام پژوهش، با توجه به توسعه مدل ریاضی و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، روش انجام پژوهش شبه آزمایشی می‌باشد. از منظر اعتبار متغیرهای پژوهش، می‌توان این پژوهش را از نوع کمی قلمداد نمود. از طرف دیگر از نظر استراتژی تحقیق و زمان گردآوری می‌توان این پژوهش را از نوع پیمایشی و مقطعی دانست. همچنین ابزار آزمایش نیز نرم‌افزار شبیه‌سازی ای دی است که با شبکه‌های عصبی و الگوریتم فراابتکاری ترکیب شده و توسط محقق طراحی و پیاده‌سازی می‌شود. ترکیب شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری به محقق این امکان را می‌دهد که کیفیت جواب‌ها و زمان مورد نیاز رسیدن به جواب مطلوب را در الگوریتم‌های مختلف با یکدیگر مقایسه نماید. مراحل انجام پژوهش هم به صورت خلاصه عبارتند از:

گام اول. بعد از تعیین چارچوب کلی مسئله تحقیق، اولین گام مطالعه ادبیات تحقیق به منظور شناسایی کلید واژه‌های اصلی تحقیق به منظور کسب دانایی و مشخص شدن جایگاه تحقیق در میان مطالعات انجام شده قبلی می‌باشد که در بخش پیشینه تحقیق محقق گردید.

گام دوم. مدل‌سازی مسئله در قالب یک مدل ریاضی می‌باشد. که این مدل ریاضی در بخش ۳ مقاله مورد بررسی قرار گرفت.



گام سوم. بعد از مدل‌سازی و تأیید مدل نهایی، از آنجایی که مسائل مدیریت پروژه دارای تعداد متنوعی فعالیت می‌باشد و هر فعالیت خود شامل چند روش است که سعی شده تا از میان مدهای مختلف اجرایی برای هر فعالیت چند مد را به منظور بررسی و شناسایی بهینه‌ترین حالت انتخاب نماییم که به این منظور از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شد.

گام چهارم. بعد از انتخاب طرح تاگوچی مناسب از آنجا که زمان انجام فعالیت‌ها احتمالی می‌باشد و می‌بایست زمان دقیق انجام فعالیت‌ها را تخمین زد، برای جلوگیری از تخمین‌های غیرواقعی از شبیه‌سازی استفاده شده است.

گام پنجم. پس از تخمین زمان دقیق انجام فعالیت‌ها به دلیل این که تعداد متغیرهای مورد بررسی زیاد بوده و هر یک از این متغیرها نیز سطوح چندگانه‌ای دارند به طراحی تعداد بالایی آزمایش نیاز است که برای شبکه‌های بسیار پیچیده با تعداد بالای فعالیت و حالت‌های مختلف اجرایی این کار یا بسیار وقت‌گیر خواهد شد یا از لحاظ زمانی و هزینه مقدور نخواهد بود. بدین منظور در این پژوهش از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و شبکه عصبی استفاده شده است.

گام ششم. حل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری *NSGA-II* و *MOPSO* است.

گام هفتم. گام نهایی در این پژوهش، مقایسه عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد. در این مرحله جهت ایجاد مبنایی برای مقایسه کارایی و عملکرد روش‌های حل الگوریتم‌های فراابتکاری، از چندین شاخص کاربردی استفاده گردید.

۵- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی علم و هنر ایجاد مدلی از یک فرایند یا سیستم، به منظور ارزیابی و آزمایش راهبردها آن فرایند یا سیستم می‌باشد، به عبارتی روشی برای آگاهی از نتایج ایده‌های پیشنهادی قبل از اجرای آن‌ها محسوب می‌گردد. شبیه‌سازی تقلیدی از عملکرد فرایند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. برخی مدل‌ها چنان ساده هستند که با روش‌های ریاضی قابل حل هستند. اما از جهتی بسیاری سیستم‌های واقعی چنان پیچیده می‌باشند که حل ریاضی مدل‌هایشان در عمل ناممکن است، در این گونه موارد به منظور تقلید رفتار سیستم با گذشت زمان می‌توان از شبیه‌سازی استفاده کرد. شبیه‌سازی داده‌هایی را فراهم می‌آورد گویی که سیستم واقعی را مشاهده می‌کنیم. از داده‌های به وجود آمده از شبیه‌سازی برای برآورده کردن معیارهای سنجش عملکرد سیستم استفاده می‌گردد (امیری و همکاران، ۲۰۱۷). در این پژوهش، ساخت مدل کامپیوتری مناسب، یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش کار است. بنابراین برای ساخت مدل کارا و مناسب از نرم‌افزار بسیار قدرتمند و کاربردی *ED. 8* استفاده گردید. این نرم‌افزار، یکی از نرم‌افزارهای مورد استفاده برای امر شبیه‌سازی در سیستم‌ها پیچیده و مدل‌های مختلف می‌باشد (عظیمی و همکاران، ۲۰۱۳). برای ساخت مدل مناسب از اتم‌های تعریف شده در این نرم‌افزار به صورت زیر استفاده گردید:

اتم *Product*: این اتم قابلیت حرکت درون اتم‌های دیگر را دارا می‌باشد. این اتم در مدل‌های مختلف توانایی ایفای نقش‌های مختلفی را دارد. برای مثال در یک سیستم تولیدی نقش قطعات تولیدی که درون ماشین‌آلات مختلف حرکت می‌کنند را دارد. به طور خلاصه این اتم نهادی است که وارد سیستم می‌شود. در امر شبیه‌سازی در این مقاله برای شروع شبیه‌سازی و طی نمودن مراحل مربوط به آن به این اتم نیاز می‌باشد.

اتم *Source*: این اتم بر اساس یک تابع مشخص شده، اتم‌های *Product* را تولید می‌کند. در این مقاله از این اتم برای ایجاد و تولید اتم *Product* برای شروع تولید نهادی که باید وارد سیستم شود، استفاده می‌گردد.

^۱ Amiri et al.

^۲ Azimi et al.



اتم *Server*: به طور کلی در هر بخش از فرایند شبیه‌سازی که فعالیتی انجام می‌شود و برای آن زمان صرف می‌گردد از اتم *Server* استفاده می‌شود. به عبارتی این اتم برای اتم *Product* خدمت ارائه می‌دهد. در این مقاله به جای هر یک از فعالیت‌های پروژه از این اتم استفاده می‌شود.

اتم *Queue*: این اتم محلی است که موجودیت‌های در یک سیستم تحت مطالعه برای شروع فرایند ارائه خدمت، در انتظار هستند. به عبارتی هر کجا که نیاز به تشکیل صف می‌باشد از این اتم استفاده می‌شود. در این پژوهش از اتم *Queue* در شبکه پروژه در هر قسمت که فعالیتی نیاز به تأخیر زمانی دارد و یا جایی که چندین فعالیت پیش نیاز یک فعالیت باشد استفاده می‌شود.

اتم *Sink*: به طور کلی در یک مدل اتم‌های *Product* از طریق اتم *Source* وارد مدل شده و از اتم *Sink* خارج می‌شوند. در این پژوهش از اتم *Sink* به منظور پایان شبیه‌سازی در یک بار اجرا و شروع دوباره شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

اتم *Table*: این اتم به عنوان یک پایگاه داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق برای ذخیره‌سازی اطلاعات مورد نیاز مدل از این اتم استفاده می‌شود.

اتم *Splitter*: زمانی که لازم باشد یک محصول و یا اطلاعات به چندین قسمت مختلف ارسال گردد از این اتم استفاده می‌شود. در مسئله زمان‌بندی پروژه، زمان شروع پروژه به دلیل این که ممکن است چند فعالیت همزمان انجام شوند و از آنجایی که زمان انجام فعالیت در دو سرور مجزا آورده می‌شود، اتم *Product* را توسط اتم *Splitter* به چند اتم تقسیم خواهد کرد.

کانال *Channel*: کانال‌های اتصال برای نمایش نحوه ارتباط بین عملیات و انتقال اطلاعات در نرم‌افزار *ED* می‌باشد. هر اتم دارای کانال ورود، خروج و مرکزی است. کانال سمت چپ هر اتم، کانال ورودی، کانال سمت راست آن، کانال خروجی و کانال در مرکز، کانال مرکزی می‌باشند. تعداد کانال‌های ورودی و خروجی را می‌توان در هر اتم افزایش داد. در مدل موجود در این مقاله، اتم *Product* تنها یک کانال مرکزی دارد و اتم *Sink* نیز تنها دارای کانال ورودی است. قبل از طراحی مدل شبیه‌سازی با استفاده از طراحی آزمایشات، سطوح ممکن برای هر متغیر تصمیم تعیین شد. به طور کلی فرایند شبیه‌سازی به صورت زیر تعریف گردید:

مرحله اول، تعیین ورودی‌های شبیه‌سازی (پارامترهای مؤثر). در این مرحله توزیع زمان‌های مربوط به هر فعالیت، تعداد حالات اجرایی و نتایج حاصل شده از طراحی آزمایشات برای شبکه مورد نظر تعیین می‌شود.

مرحله دوم، طراحی شبکه مورد نظر در بستر نرم‌افزار شبیه‌سازی. در این مرحله برای شبکه مورد نظریک مدل مناسب در نرم افزار شبیه‌سازی با استفاده از ابزارهای توضیح داده شده در این بخش طراحی می‌گردد.

مرحله سوم، استفاده از طراحی آزمایشات تاگوتچی. در این مرحله تعداد حالت‌های اجرایی برای هر فعالیت و روابط پیش‌نیازی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مرحله چهارم، انجام آزمایشات طراحی شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی. در این مرحله مدت زمان هر آزمایش شبیه‌سازی ۵۰۰/۰۰۰ واحد زمانی در نظر گرفته و اجرا خواهد گردید.

مرحله پنجم، تعیین خروجی مدل طراحی شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی. در نهایت بعد از انجام شبیه‌سازی میانگین زمان انجام هر فعالیت، مسیر بحرانی و در نتیجه زمان ختم پروژه حاصل خواهد شد.

مرحله ششم، اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده. برای اعتبارسنجی مدل طراحی شده از رویکرد ارائه شده توسط دوریوکس و پیروال (۲۰۰۳) استفاده خواهد شد. برای این کار تعدادی از ترکیب‌های مختلف از متغیرهای تصمیم مربوط به الگوریتم‌های فراابتکاری



NSGA-II و MOPSO چند جواب را به طور تصادفی انتخاب و سپس این ترکیب‌های مختلف در نرم‌افزار شبیه‌سازی، مدل‌سازی و اجرا خواهند شد. خروجی‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی با خروجی‌های حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری با استفاده از رابطه (۱۵) مقایسه خواهند شد.

$$(15) \quad \frac{100 \times | \text{خروجی شبیه‌سازی} - \text{خروجی مدل توسعه داده شده} |}{\text{خروجی شبیه‌سازی}} = \text{خطا مطلق}$$

این رابطه میزان خطای مطلق برای مقایسه جواب‌ها می‌باشد. مبنای تصمیم‌گیری مقدار خطای مطلق کمتر از ۳ درصد می‌باشد که میزان دقت مدل شبیه‌سازی شده را تأیید می‌نماید.

۶- شبکه‌های عصبی

به‌طور معمول از رویکرد طراحی آزمایشات و رگرسیون می‌توان به‌منظور برآورد رابطه بین متغیرها در قالب یک رابطه صریح ریاضی استفاده کرد. ولی زمانی که تعداد متغیرهای مورد بررسی زیاد شود و هر یک از این متغیرها نیز سطوح چندگانه‌ای داشته باشند به طراحی تعداد بالایی آزمایش نیاز است که برای شبکه‌های بسیار پیچیده با تعداد بالای فعالیت و حالت‌های مختلف اجرایی این کار یا بسیار وقت‌گیر خواهد شد یا از لحاظ زمانی و هزینه مقدور نخواهد بود. بدین منظور در این پژوهش از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و شبکه عصبی استفاده شده است. بدین صورت که با طراحی و اجرای تعداد کمتری آزمایش بر اساس طرح تاگوچی، خروجی حاصل از شبیه‌سازی بر اساس متغیرهای مورد بررسی، وارد شبکه عصبی شده و شبکه عصبی بر اساس فرایند آموزش به یافتن بهترین رابطه بین متغیرهای مورد بررسی (حالت‌های اجرای هر فعالیت) و خروجی ناشی از آن‌ها (زمان ختم پروژه) اقدام می‌کند و رابطه تخمین زده شده به‌عنوان تابع هدف مدنظر وارد الگوریتم ابتکاری خواهد شد. با این روش، به بررسی شبکه‌های پیچیده با تعداد زیادی فعالیت و حالت‌های اجرایی مختلف تأثیرگذار قادر خواهیم بود. هر شبکه عصبی با توجه ساختار درونی خود در برخورد با مسائل مختلف، عملکرد متفاوتی خواهد داشت. بنابراین انتخاب ساختار شبکه متناسب با مسئله مورد بررسی در هر تحقیق و انتخاب مناسب مقادیر اولیه پارامترهای شبکه در نتیجه آموزش آن دارای اهمیت بسیاری است (رشیدی و همکاران، ۲۰۱۲). هدف از این بخش از تحقیق ارائه شبکه عصبی مناسب است تا از طریق آن بتوان زمان پروژه را با دقت قابل قبولی برآورد نمود. یکی از شبکه‌های عصبی پرکاربرد شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با روش یادگیری پس انتشار (انتشار برگشتی) است که اگر ساختار داخلی صحیح برای آن انتخاب شود، قادر است هر نوع سیستم غیرخطی را مدل‌یابی نماید. بنابراین برای این عمل پرسپترون چندلایه با روش یادگیری پس انتشار (انتشار برگشتی) استفاده خواهیم کرد. این نوع از شبکه‌های عصبی دارای یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک چند لایه پنهان است. لایه ورودی معرف تعداد عناصر موجود در بخش ورودی شبکه که در اینجا همان میانگین زمان انجام هر فعالیت است، می‌باشد. لایه یا لایه‌های پنهان، هر کدام تعدادی نورون و نوع توابع فعالیت به کار رفته در هر لایه بر رفتار شبکه مورد نظر تأثیر می‌گذارد. لایه خروجی نیز ساختاری شبیه به لایه‌های پنهان دارد، با این تفاوت که خروجی آن ورودی لایه بعدی نیست. در واقع تعداد نورون‌های لایه خروجی بیانگر تعداد مجهولاتی است که شبکه بایستی پاسخ قابل قبول برای آن‌ها ارائه کند.

برای تنظیم پارامترهای شبکه عصبی، پارامترهای مورد نظر در این بخش شامل تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نورون‌های لایه پنهان و نرخ یادگیری می‌باشد. برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شد که نتایج آن در جدول (۲) آمده است. معیار تنظیم پارامتر شاخص ترکیبی میانگین مربع خطا (MSE) و ضریب تعیین یا مجذور ضریب همبستگی (R^2) بوده که به صورت $\frac{MSE}{R^2}$ محاسبه می‌شود. سپس با توجه به سه پارامتر و داشتن سه سطح برای هر کدام از طرح $L9$ تاگوچی استفاده شد. به عنوان رویکرد در طراحی آزمایشات، روش تاگوچی قصد دارد کیفیت فرایندهای تولید شده را بهبود ببخشد (ربانی و همکاران، ۲۰۱۷). جدول (۳) خلاصه مشخصات و پارامترهای شبکه‌های عصبی بکار گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



جدول ۲- سطوح پارامترهای شبکه عصبی.

Table 2- Neural network parameter levels.

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
تعداد لایه‌های پنهان	1	2	3
تعداد نورون‌های لایه پنهان	5	10	15
نرخ یادگیری	0.1	0.2	0.3

جدول ۳- پارامترها و مشخصات شبکه عصبی بکار گرفته شده در این تحقیق.

Table 3- Parameters and characteristics of the neural network used in this study.

پارامتر	توضیحات
ساختار شبکه عصبی	پرسترون چند لایه (MLP)
نوع شبکه عصبی	پیشرو (Feed Forward)
الگوریتم آموزشی	TrainLM
تابع یادگیری تطبیقی	LearnGMD
تابع عملکرد خطا	مجذور میانگین خطا (MSE)
الگوریتم خطایابی	انتشار برگشتی (Back Propagation)
تابع بهینه‌سازی	لونیگ-مارکواردت ((Levenberg – Marquardt(LM)
تعداد لایه‌های پنهان	2
تعداد نورون‌های لایه پنهان	5-5
نرخ یادگیری	0.1
تابع فعالیت لایه‌های پنهان	تانزانگ سیگموند (Tansig)
تابع فعالیت لایه خروجی	خطی (Purelin)
تعداد داده‌های آموزش	70 درصد داده‌ها
تعداد داده‌های آزمایش	20 درصد داده‌ها
تعداد داده‌ها برای اعتبارسنجی آموزش	10 درصد داده‌ها

۷- الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب

مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت با یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، بهینه‌سازی می‌شود و از آن جهت که در این روش‌ها، امکان انتخاب ترکیبی از گزینه‌های مختلف، برای انجام فعالیت‌ها در هر زمان شدنی برای انجام پروژه وجود دارد، از نوع روش‌های بهینه‌سازی ترکیباتی و در زمره مسائل سخت‌در بهینه‌سازی می‌باشند (ترن و همکاران ، ۲۰۱۵؛ شهسواری‌پور و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده در این پژوهش با توجه به زمان و دشواری‌های حل در زمره مسائل NP سخت قرار می‌گیرد. از این رو برای حل این مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک جزء الگوریتم‌های اکتشافی برای حل مسائل مختلف می‌باشد. این الگوریتم از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانوران به وجود آمده است. در الگوریتم ژنتیک خصوصیات نسل جانوران به مقدار تابع و یا توابع هدف و بهبود در خصوصیات یک نسل در گذشت زمان تشبیه و پیدایش نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف تشبیه شده است (روگرس و پروگل بنت ، ۱۹۹۹). در بین روش‌های فراابتکاری، رویه‌های محاسبات تکاملی عملکرد مناسبی را برای حل مسائل چندهدفه در دهه‌های اخیر نمایش داده‌اند (کوئلو و همکاران ، ۲۰۰۷). الگوریتم ژنتیک

^۱ Combinatorial optimization

^۲ Tran et al.

^۳ Rogers and Prügel-Bennett

^۴ Coello et al.



چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب اولین بار توسط دب و همکاران (۲۰۰۰) ارائه شد. از زمان معرفی الگوریتم‌های ژنتیک، انواع مختلفی از الگوریتم‌های ژنتیک برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است. در بین آن‌ها ویرایش دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب یکی از کاربردی‌ترین انواع الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه می‌باشد. *NSGA-II* دارای ویژگی‌های مناسبی مانند نخبه‌گرایی، مرتب‌سازی سریع غیر مسلط و نگهداری متنوع جبهه بهینه پارتو^۱ می‌باشد که به همین دلیل کاربرد موفقی در حوزه گسترده‌ای از مهندسی، مدیریت و مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی دارد (امیری و همکاران، ۲۰۱۳).

۸- الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه

اولین دیدگاه‌ها از الگوریتم ازدحام ذرات توسط کندی و ابرهارت (۱۹۹۵) بر مبنای اصول هوشمندلی ذرات توسعه داده شد و بعد از آن یک نسخه باینری از این الگوریتم برای مسائل با فضای جستجوی گسسته نیز معرفی شد. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ریشه در تقلید از حرکات دسته جمعی پرندگان در هنگام پرواز گروهی دارد. جمعیت آن‌ها ازدحام (*Swarm*) و جواب‌های بالقوه ذرات (*Particles*) نامیده می‌شوند (امین بخش و سانمز، ۲۰۱۶). به طور کلی قوانین منطقی خاصی بر نحوه رفتار و عملکرد موجودات اجتماعی از جمله پرندگان حاکم است. پرندگان تنها با تنظیم حرکات فیزیکی خودشان با اجتناب از تصادف با یکدیگر به دنبال غذا می‌گردند. از نظر تئوری هر پرنده به عنوان یکی از اعضای گروه از تجربه‌های قبلی خود و یا تجربیات سایر پرندگان برای یافتن غذا بهره می‌برد. در نتیجه ایده اصلی این الگوریتم، تسهیم اطلاعات بین اعضای گروه است (پولی و همکاران، ۲۰۰۷). به طور کلی بر مبنای^۲ مقاله کونلو و لچوگا (۲۰۰۲) الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (کونلو و لچوگا، ۲۰۰۲).

۹- مثال عددی

برای بررسی نتایج حاصل از این تحقیق، مدل طراحی شده در بخش نگهداری و تعمیرات شرکت فولادسازی آبتین اردکان پیاده‌سازی و اجرا شد. برای این امر ابتدا فعالیت‌های مربوط به بخش کوره در زمان *overhaul* کارخانه شناسایی شد. سپس داده‌های مربوط به زمان انجام فعالیت‌ها وارد نرم‌افزار *Input Analyzer* گردید تا توزیع آماری مناسب برآورد گردد. با توجه به ابعاد سه عامل اصلی زمان، کیفیت و هزینه جهت تدوین مدل موازنه، هزینه اجرای فعالیت‌ها بر اساس برآورد دفتر مدیریت پروژه جهت اجرا برای هر فعالیت بر اساس واحد ریال بر اساس فهرست‌بها مشخص شده است. از سوی دیگر با توجه به احتمالی بودن زمان اجرای فعالیت‌های پروژه، ابتدا با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی اجرای فرآیند فعالیت پروژه در نرم‌افزار *Input Analyzer*، توابع توزیع احتمال فعالیت‌ها با *FIT* کردن به دست آمد. در نهایت سطح کیفیت مورد انتظار ذینفعان از اجرای فعالیت‌های پروژه مشخص و معرفی شدند که برای هر فعالیت این مقادیر مشخص و درج شد. در نرم‌افزار *Input Analyzer* که از محصولات جانبی نرم‌افزار *Arena* می‌باشد می‌توان برای هر فعالیت توزیع مناسب را برآورد نمود. برای انتخاب توزیع آماری مناسب برای هر فعالیت در این نرم‌افزار معیارهای ارزیابی زیر وجود دارد:

میانگین مربع خطا : این معیار میانگین مربع خطا برای هر ستون هیستوگرام می‌باشد که خطای تفاضل بین فراوانی نسبی مشاهدات هر خانه با فراوانی نسبی تابع توزیع برآورد شده می‌باشد. هر چه این عدد کوچک‌تر باشد نشان‌دهنده این است که توزیع برازنده توزیع مناسب‌تری می‌باشد.

^۱ Deb et al.

^۲ Multi-Objective Evolutionary Algorithms (MOEAs)

^۳ Elitism

^۴ Fast Non-Dominated Sorting

^۵ Diversity Maintenance Along the Pareto-Optimal Front

^۶ Kennedy and Eberhart

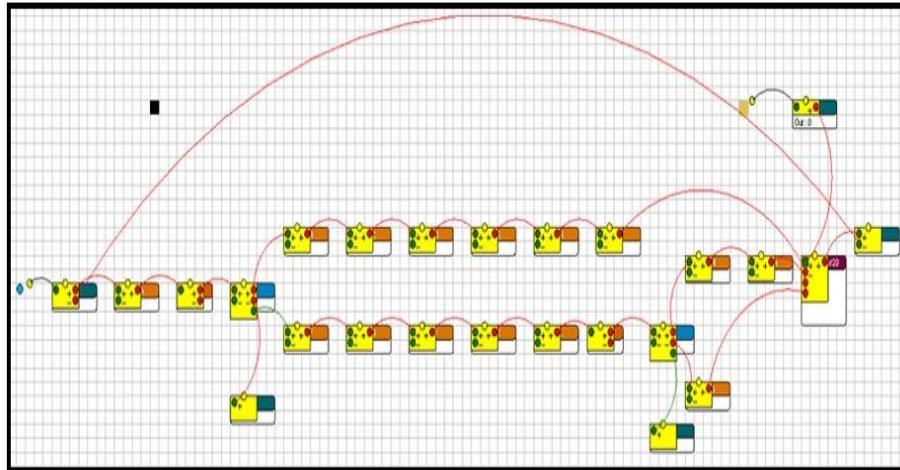
^۷ Aminbakhsh and Sonmez

^۸ Poli et al.

^۹ Coello and Lechuga

^{۱۰} Mean Square Error

آزمون فرض زیبندگی: این آزمون شامل کای مربع و کولموگروف - اسمیرنوف ($K-S$) می باشد. برای این معیار یگ مقدار P -value محاسبه می شود که مقداری بین ۰ تا ۱ می باشد. هر چه این مقدار بزرگتر باشد نشان دهنده برازندگی بهتر برای توزیع مدنظر می باشد. لازم به ذکر است با مراجعه به آرشیو اطلاعات این واحد، داده های مربوط به شش دوره زمانی مبنای انجام پروژه قرار گرفت. همچنین با استفاده از نظرسنجی از کارشناسان و داده های قبلی تعداد حالت های اجرایی برای هر فعالیت و کیفیت اجرای هر فعالیت شناسایی شد. همچنین اهمیت هر یک از فعالیت ها در رابطه با کیفیت پروژه برابر در نظر گرفته شد. حداکثر سطح بودجه ۱۲۰۰، حداکثر زمان ختم پروژه ۸۰ و حداقل سطح کیفیت پروژه ۰/۷ در نظر گرفته شد. شکل (۱) شبکه مربوط به فعالیت ها و مدل ایجاد شده در بستر نرم افزار شبیه سازی ED را نشان می دهد. همچنین اطلاعات مربوط به این بخش در جدول های (۴) و (۵) قرار گرفته شده است.



شکل ۱- شبکه پروژه به همراه مدل شبیه سازی شده در نرم افزار ED.
Figure 1- Project network with simulated model in ED software.

جدول ۴- فعالیت های مربوط به پروژه نت.

Table 4- Activities related to the maintenance project.

کد فعالیت	شرح فعالیت	پیش نیاز	رابطه پیش نیازی
Act 1	اصلاح لاجیک اتومات ماشین پرس و حذف لاجیک های BQ-MK20	-	-
Act 2	اصلاح لاجیک اتومات میکسر	Act 1	FS
Act 3	بهینه کردن صفحات بریکت سازی	Act 2	FS
Act 4	بررسی کانال های فعال Spare و غیر فعال کردن آن در ناحیه بریکت سازی	Act 3	FS
Act 5	نوشتن لاجیک رک کلاریفایر جهت توقف آن به صورت اتومات	Act 4	SS
Act 6	تمیزکاری کابینت های DCS مارشالینگ	Act 1	FS
Act 7	تمیزکاری کابینت و کامپیوترهای اتاق کنترل	Act 6	SS
Act 8	آنالیز و دفرگ کردن کامپیوترهای سیستم DCS	Act 5	FS
Act 9	رفع مشکل شبکه های سیستم DCS اتاق کنترل	Act 8	FS
Act 10	بک آپ گیری (دیتابیس + لاجیک + گرافیک + هارد) از تمامی سیستم های DCS	Act 7	FS
Act 11	تست ریداندانت ماژول های سیستم DCS	Act 10	FS
Act 12	تست ریداندانت، Fail Safe و Auto config برای تمامی کنترل گرها	Act 11	FS
Act 13	چک کامل فیبر نوری و ریداندانت آن	Act 12	FS
Act 14	تست ریداندانت تمامی پاورهای سیستم DCS	Act 13	FS
Act 15	جایگزینی هارد سیستم EWS با هارد SSD و راه اندازی مجدد سیستم با بک آپ گرفته شده	Act 12	SS
Finish	پایان پروژه	Act 9, 14, 15	-

^۱ Goodness-of-Fit Hypothesis Testing

^۲ Chi-Square

^۳ Kolmogorov-Simov





از آنجا که هر فعالیت مجاز به داشتن ۲ حالت اجرایی مختلف باشد، سطوح آزمایش به صورت اعداد ۱ تا ۲ مشخص خواهند شد. همچنین با توجه به تعداد ۱۵ فعالیت برای انجام این پروژه تعداد عوامل ما نیز ۱۵ خواهد بود. با توجه به تعداد عوامل و سطوح تعریف شده طرح تاکوچی مناسب برای این شبکه طرح *L16* می‌باشد. همچنان که قبلاً اشاره شد بعد از طراحی آزمایشات با طراحی مدل مناسب در نرم‌افزار شبیه‌سازی، میانگین زمان انجام هر فعالیت بعد از انجام تعداد مناسب شبیه‌سازی حاصل شد **جدول (۶)** نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مدت زمان هر آزمایش، ۵۰۰۰۰۰ واحد زمانی در نظر گرفته شد.

جدول ۵- برآورد توزیع آماری و پارامترهای شبکه نت.

Table 5- Estimation of statistical distribution and parameters of maintenance network.

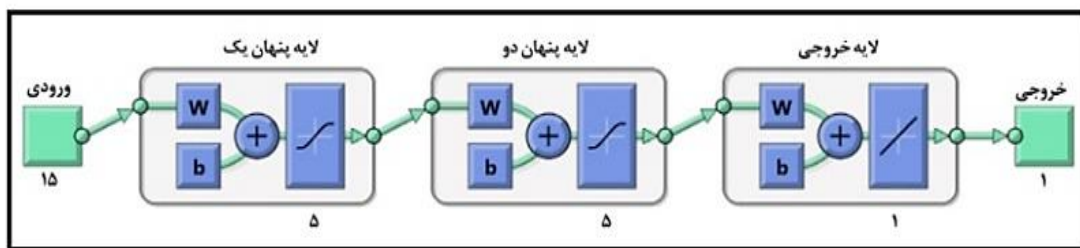
ردیف فعالیت	تاریخ فعالیت	حالت اجرایی ۱			حالت اجرایی ۲			میانگین مربع خطا	کای مربع	(K-S)
		زمان	هزینه (هزار)	کیفیت (درصد)	زمان	هزینه (هزار)	کیفیت (درصد)			
Act 1	-	Uniform(20,40)	300	90	Uniform(30,40)	280	95	0.00371	0.604	> 0.15
Act 2	Act 1	Lognormal(10,2)	100	95	Lognormal(9,1.5)	110	92	0.0152	0.45	> 0.15
Act 3	Act 2	Normal(11,1)	100	85	Normal(10,2)	110	80	0.018	0.42	> 0.15
Act 4	Act 3	Normal(12,1)	100	85	Normal(10,2.2)	110	80	0.0195	0.299	> 0.15
Act 5	Act 4	Tria(4.2,5,7)	50	75	Tria(5,6,8)	48	85	0.0632	0.323	> 0.15
Act 6	Act 1	Negexp(10)	100	80	Negexp(8)	120	75	0.0306	0.389	> 0.15
Act 7	Act 6	Uniform(2,4)	30	80	Uniform(1.5,4)	28	78	0.0294	0.601	> 0.15
Act 8	Act 5	Uniform(2,4)	15	85	Uniform(2,5)	14	90	0.0017	0.526	> 0.15
Act 9	Act 8	Uniform(3,5)	40	80	Uniform(2,4)	50	70	0.0012	0.489	> 0.15
Act 10	Act 7	Normal(12,1)	60	95	Normal(۱۰,۲)	80	80	0.0026	0.456	> 0.15
Act 11	Act 10	Normal(3,1)	30	90	Normal(5,1)	20	85	0.0022	0.325	> 0.15
Act 12	Act 11	Negexp(4)	40	90	Negexp(6)	35	95	0.0012	0.356	> 0.15
Act 13	Act 12	Negexp(3)	30	90	Negexp(4)	25	95	0.0013	0.456	> 0.15
Act 14	Act 13	Negexp(3)	30	90	Negexp(4)	25	95	0.0061	0.375	> 0.15
Act 15	Act 12	Normal(10,1)	100	80	Normal(8,1,5)	120	75	0.0019	0.651	> 0.15

با توجه به اطلاعات ارائه شده در **جدول (۳)**، شبکه عصبی مناسب طراحی گردید. شرط توقف آموزش شبکه رسیدن به آزمون‌های اعتبارسنجی به سقف معین آن یعنی ۶ مرتبه است. در این مسئله آموزش شبکه در تکرار دوم متوقف شد. ضریب همبستگی برای تمامی داده‌ها برابر با ۰/۹۹۵ به دست آمد. همچنین میانگین توان دوم خطا (*MSE*) برابر با ۰/۰۰۵۱۵ حاصل شد. شکل‌های (۲) و (۳) نتایج حاصل شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی.

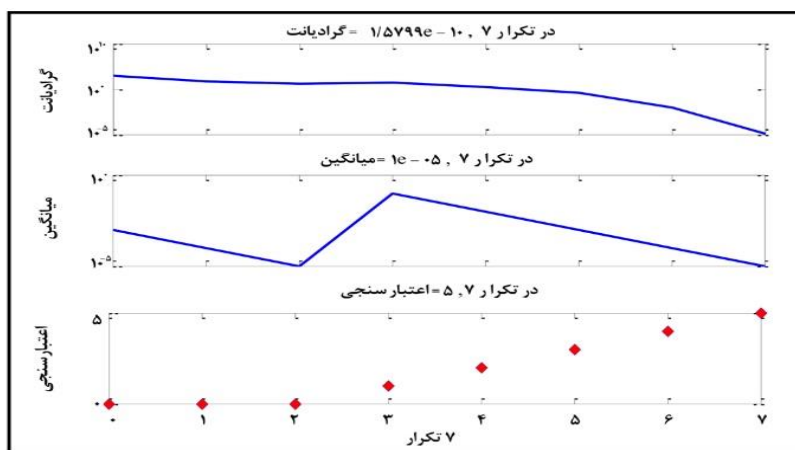
Table 6- Simulation results.

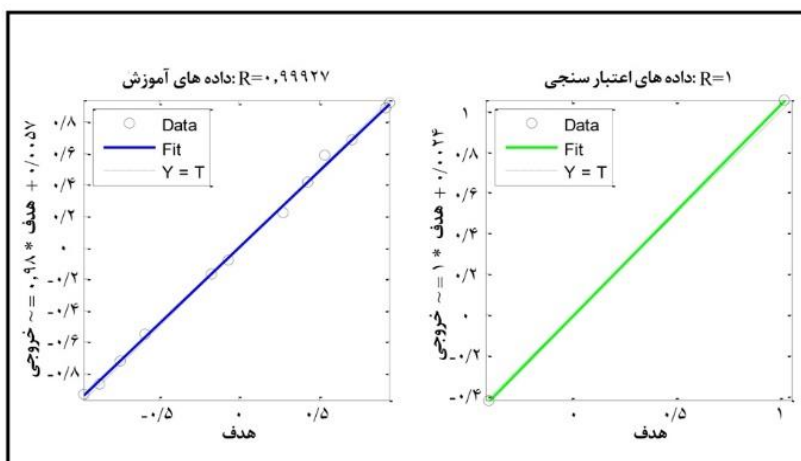
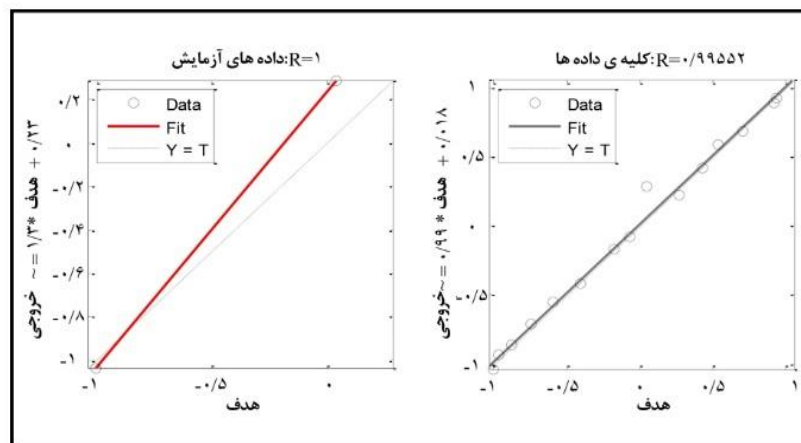
آزمایش	ACT 1	ACT 2	ACT 3	ACT 4	ACT 5	ACT 6	ACT 7	ACT 8	ACT 9	ACT 10	ACT 11	ACT 12	ACT 13	ACT 14	ACT 15
test 1	29.67	12.15	11.51	12.96	5.4	10	3.84	2.38	3.71	12.41	2.25	4	3	3	10.60
test 2	37.93	10.71	11.37	11.82	5.4	10	2.08	2.14	3.83	10.39	3.93	6	4	4	9.90
test 3	33.09	9.68	11.50	13.66	6.33	8	2.51	3.67	4.06	11.27	2.91	6	4	4	9.46
test 4	33.04	13.11	11.97	12.06	6.33	8	3.82	2.50	3.09	11.04	4.69	4	3	3	11.30
test 5	31.06	6.77	8.80	11.34	5	8	3.54	3.26	4.59	12.06	3.24	4	3	4	7.99
test 6	30.75	9.00	11.37	11.47	5	8	2.65	3.70	3.15	11.29	2.81	6	4	3	10.36
test 7	38.30	10.22	8.30	9.63	6	10	3.80	3.95	3.88	9.15	5.15	6	4	3	11.05
test 8	22.19	8.45	8.91	12.08	6	10	3.17	2.15	2.94	11.00	2.79	4	3	4	6.60
test 9	35.45	9.84	4.48	9.84	5.5	8	2.15	2.71	4.32	11.58	3.53	4	4	3	6.51
test 10	34.39	8.03	10.19	11.04	5.5	8	3.97	2.68	2.91	9.55	3.69	6	3	4	10.13
test 11	33.96	10.88	9.96	8.90	5.2	10	2.67	3.38	3.90	12.05	5.25	6	3	4	11.17
test 12	31.49	8.62	11.45	7.34	5.2	10	2.81	3.73	2.63	11.70	3.30	4	4	3	10.86
test 13	39.02	8.39	10.33	11.01	6.1	10	2.29	3.47	3.67	7.79	2.73	4	4	4	10.75
test 14	34.58	7.82	10.91	12.18	6.1	10	3.00	2.50	3.72	12.15	5.31	6	3	3	6.83
test 15	33.07	11.03	13.46	3.97	5.4	8	3.15	3.74	4.79	12.14	3.27	6	3	3	8.12
test 16	38.31	6.56	9.71	9.33	5.4	8	1.77	2.72	2.50	10.59	3.19	4	4	4	9.03



شکل ۲- شبکه عصبی آموزش داده شده برای تخمین تابع هدف.

Figure 2- Neural network trained to estimate the objective function.





شکل ۳- اعتبار سنجی و تأیید داده‌ها.

Figure 3- Validation and verification of data.

شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده به عنوان زمان ختم پروژه در تابع هدف الگوریتم‌های فراابتکاری در نظر گرفته می‌شود.

۱۰- تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی

مسئله حاضر در نرم‌افزار *MATLAB 2013a* کدنویسی و در یک سیستم کامپیوتری با مشخصات *CPU- 2.3 GHZ* و *RAM- 4GB* پیاده‌سازی شد. نتایج تمام تکنیک‌های فراابتکاری به پارامترهایشان حساس می‌باشند. از این رو در تنظیم پارامترها، نیاز به شبیه‌سازی طولانی برای پیدا کردن مقادیر مناسب برای پارامترهای مختلف است (دب و همکاران، ۲۰۰۲). در این بخش^۱ به تنظیم پارامترهای مربوط به الگوریتم‌های پیشنهادی در این مقاله پرداخته می‌شود. در این مقاله، از درصد انحراف نسبی به عنوان متغیر پاسخ با «مقدار کمتر بهتر» استفاده می‌شود. این معیار طبق رابطه (۱۶) قابل محاسبه است:

$$RDI = \frac{|Alg_{sol} - Best_{sol}|}{|Max_{sol} - Min_{sol}|} \quad (16)$$

که در آن Alg_{sol} مقدار بدست آمده برای هر شاخص مورد نظر در هر آزمایش، $Best_{sol}$ بهترین مقدار بدست آمده برای شاخص مورد نظر در کل آزمایشات، Max_{sol} و Min_{sol} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار بدست آمده برای شاخص مورد نظر در کل آزمایشات می‌باشد. در این تحقیق در راستای روش تاگوچی پارامترهای الگوریتم‌های مورد استفاده در طی سه مرحله کلی زیر تعیین خواهند شد:

^۱ Deb et al.

^۲ Relative Percentage Deviation

– تعیین پارامترها و سطوح هر یک.

– تعداد آزمایشات مورد نیاز

– محاسبه SNR و RDI و تحلیل پاسخ‌ها جهت تعیین سطوح پارامترهای مورد نظر. پارامترهای مورد نظر و سطوح مختلف آن‌ها که بر اساس نرم‌های مشابه موجود در ادبیات و تست‌های اولیه که حاکی از نتایج بهتری در مقایسه با سایر سطوح می‌باشد، در جدول (۱۷) آورده شده و به عنوان گام اول مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری مقدار (S/N) از رابطه استاندارد (۱۷) استفاده خواهد شد.

$$SB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \rightarrow S/N = -10 \log(RDI)^2 \quad (17)$$

در رابطه بالا n بیانگر تعداد تکرارها یا تعداد اجرای هر آزمایش، y_i بیانگر خروجی اندازه‌گیری شده یا مقدار پاسخ فرایند و مقدار S واریانس را نشان می‌دهد و مشخصه اندازه‌گیری شده کوچک‌تر باشد، بهتر است (کوچک‌تر - بهتر). در نهایت برای الگوریتم $NSGA-II$ با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آن‌ها طرح $L9$ و برای الگوریتم $MOPSO$ با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آن‌ها طرح $L27$ طراحی گردید.

$$D_i = \frac{w_1 \times \overline{RDI}_{i1} + w_2 \times \overline{RDI}_{i2} + \dots + w_m \times \overline{RDI}_{im}}{w_1 + w_2 + \dots + w_m} \quad (18)$$

در ادامه مسئله حاضر به تعداد ۵ مرتبه حل گردید و نتایج حاصله ثبت شد. بهترین جواب در بین ۵ بار اجرا به عنوان نتایج مسائل در نظر گرفته خواهد شد. برای اندازه‌گیری عملکرد هر آزمایش تاگویی، شاخص‌های DM ، MID و QM در نظر گرفته شد. برای هر آزمایش، نتایج این اندازه‌گیری عملکرد با استفاده از رابطه (۱۸) تبدیل به درصد انحراف نسبی شد. سپس، میانگین درصد انحراف نسبی برای هر مسئله محاسبه شد. در نهایت میانگین موزون برای هر آزمایش طبق رابطه محاسبه و به عنوان تابع هدف در طراحی آزمایشات تاگویی در نظر گرفته شد.

در این رابطه w_j وزن شاخص z_j بر اساس اهمیت آن و m تعداد شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی است. در نتیجه $z=1,2,\dots,m$ و در این تحقیق $m=3$ خواهد بود. همچنین به خاطر اهمیت شاخص QM وزن آن ۳ و برای مابقی شاخص‌ها یعنی DM و MID وزن ۱ در نظر گرفته خواهد شد.

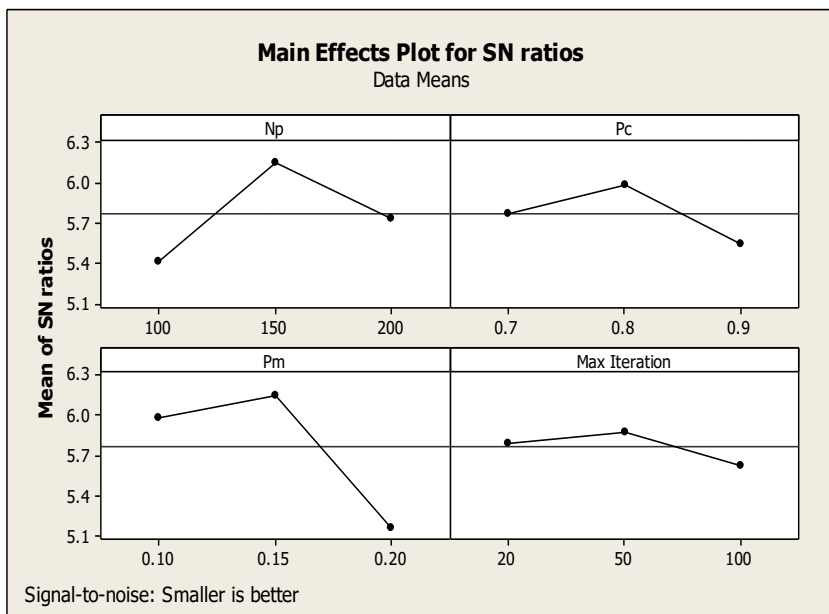
جدول ۷- پارامترهای مربوط به الگوریتم فراابتکاری $NSGA-II$ و $MOPSO$.

Table 7- Parameters related to $NSGA-II$ and $MOPSO$ metaheuristic algorithms.

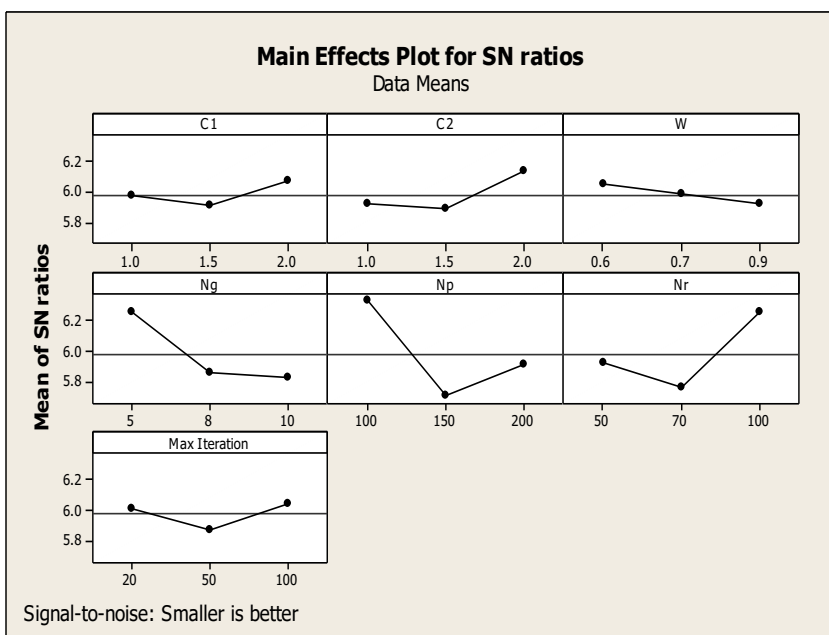
الگوریتم	نام پارامتر	نماد پارامتر	سطوح پارامتر		
			سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
NSGA - II	اندازه جمعیت	N_p	100	150	200
	احتمال تقاطع	P_c	0.7	0.8	0.9
	احتمال جهش	P_m	0.1	0.15	0.2
	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم	Max Iteration	20	50	100
MOPSO	ضریب بهترین حافظه شخصی	c_1	1	1.5	2
	ضریب بهترین حافظه جمعی	c_2	1	1.5	2
	وزن اینرسی	w	0.6	0.7	0.9
	تعداد بخش‌بندی	N_g	5	8	10
	تعداد جمعیت	N_p	100	150	200
	حداکثر عضو مخزن جواب‌ها	N_f	50	70	100
	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم	Max Iteration	20	50	100

^۲ Smaller-the-Better (SB)



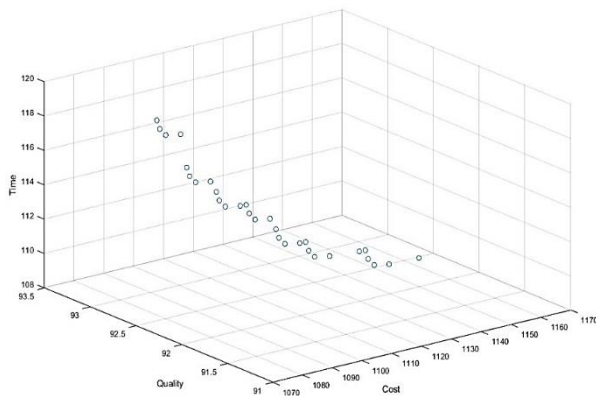


شکل ۴- نقاط نسبت (S / N) برای NSGA-II.
Figure 4- Ratio points (S / N) for NSGA-II.

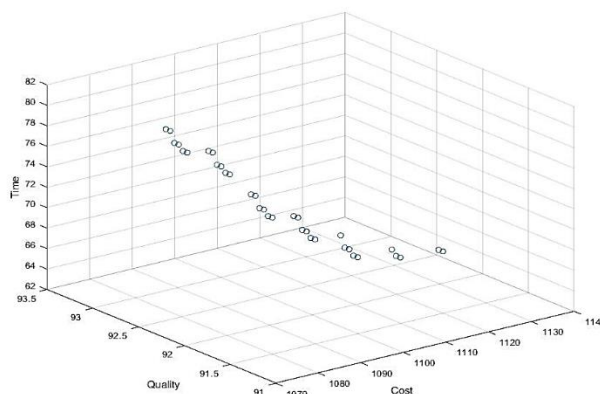


شکل ۵- نقاط نسبت (S / N) برای MOPSO.
Figure 5- Ratio points (S / N) for MOPSO.

بعد از حل مسئله طراحی شده که یک مسئله عملیاتی می باشد، نتایج حاصل از این دو الگوریتم در شکل های (۶) و (۷) نشان داده شده است. این دو شکل جواب های به دست آمده برای سه تابع هدف را نشان می دهد.



شکل ۶- جواب جبهه پارتو توسط الگوریتم NSGA-II.
Figure 6- Pareto front solution by NSGA-II algorithm.



شکل ۷- جواب جبهه پارتو توسط الگوریتم MOPSO.
Figure 7- Pareto front solution by MOPSO algorithm.

۱۱- مقایسه کارایی الگوریتم ها

برای مقایسه الگوریتم های فراابتکاری چندهدفه چندین شاخص استفاده می شود. این شاخص ها عمدتاً به دو دسته تقسیم می شوند: شاخص هایی که بر همگرایی و کیفیت جواب ها تأکید دارند و شاخص هایی که بر پراکندگی و گسترش جواب ها در فضای حل توجه دارند. این شاخص ها از سویی به سنجش میزان همگرایی پاسخ های تولید شده پرداخته و از سویی دیگر نحوه توزیع این پاسخ ها را در گستره مرز پارتو ارزیابی می کنند. اگر تنوع و نحوه توزیع جواب های پارتو مدنظر قرار نگیرد، بیشتر بودن تعداد جواب های پارتو می توان به عنوان معیار برتری یک الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم ها در نظر گرفت (زیتلر و همکاران، ۲۰۰۰). در نهایت از شاخص های زیر برای مقایسه عملکرد الگوریتم های فراابتکاری استفاده خواهد شد.





شاخص تعداد جواب‌های پارتو: این شاخص نشان‌دهنده تعداد جواب‌های پارتو حاصل شده از الگوریتم می‌باشد. هر چه تعداد جواب‌ها بیشتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم مورد استفاده شده است.

شاخص میانگین فاصله از جواب ایده‌آل: این شاخص بیانگر میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده‌آل است. مقدار ایده‌آل برابر با بهترین مقدار ممکن برای هر یک از توابع هدف در تمام الگوریتم‌های استفاده شده است (سوزاکا و جازکیوسکی، ۱۹۹۸). این شاخص از رابطه (۱۹) محاسبه می‌گردد.

$$MID = \frac{\sum_i^m \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{f_i^j - f_{best}^j}{f_{max}^j - f_{min}^j} \right)^2}}{n} \quad (19)$$

در این رابطه m نشان‌دهنده تعداد توابع هدف، n بیانگر تعداد نقاط پارتو، f_i^j مقدار i امین هدف از i امین جواب پارتو، f_{min}^j و f_{max}^j به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مقدار i امین هدف از i امین جواب پارتو است. کمتر بودن این شاخص به معنای بهتر بودن کارایی الگوریتم مدنظر می‌باشد (کریمی و همکاران، ۲۰۱۰).

شاخص سطح پوشش مجموعه‌ها: شاخص سطح پوشش، نسبت جواب‌هایی از هر الگوریتم است که توسط جواب‌های الگوریتم دیگر به صورت ضعیف مغلوب می‌شوند. این شاخص از طریق رابطه محاسبه می‌شود.

$$C(A,B) = \frac{|\{b \in B \mid a \in A : a \leq b\}|}{|B|}, \quad 0 \leq C(A,B) \leq 1. \quad (20)$$

در این رابطه اگر $C(A,B)$ برابر ۱ باشد، تمام اعضای مجموعه B به صورت ضعیف توسط اعضای مجموعه A مغلوب می‌شوند. زمانی که $C(A,B)$ از $C(B,A)$ بزرگ‌تر باشد، جواب‌های مجموعه A نسبت به جواب‌های مجموعه B بهتر می‌باشند (کونلو و همکاران، ۲۰۰۷).

شاخص فاصله‌گذاری: این شاخص بیانگر انحراف معیار فاصله جواب‌های نامغلوب است. به عبارتی این شاخص میزان فاصله نسبی جواب‌های متوالی پارتو را محاسبه می‌کند (چمبری و همکاران، ۲۰۱۲). شاخص فاصله‌گذاری را می‌توان از رابطه (۲۱) به دست آورد.

$$SM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}{n-1}}, \quad \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad d_i = \min_{m \neq i} |f_m^i - f_m^i|, \quad k \in n, \quad k \neq i. \quad (21)$$

در این رابطه d_i نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین جواب‌های پشت سر هم در مجموعه جواب‌های نامغلوب حاصل شده است و \bar{d} بیانگر میانگین این فاصله‌ها می‌باشد. هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، جواب‌ها به طور یکنواخت‌تری توزیع شده و الگوریتم مربوطه از کارایی بالاتری برخوردار است.

شاخص تنوع (گسترش): این شاخص فاصله اقلیدسی بین جواب ابتدایی و انتهایی مجموعه جواب‌های پارتو را نشان می‌دهد. هر چه این شاخص بزرگ‌تر باشد الگوریتم مربوطه کارایی بیشتری دارد (جولای و همکاران، ۲۰۱۳). این شاخص از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

^۱ Number of Pareto Solution (NPS)

^۲ Mean Ideal Distance (MID)

^۳ Czyżżak and Jaskiewicz

^۴ Karimi et al.

^۵ Cover Surface (CS)

^۶ Spacing Metric (SM)

^۷ Chambari et al.

^۸ Diversification Metric (DM)

^۹ Jolai et al.

$$DM = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_{max}^j - f_{min}^j)^2} \quad (22)$$

شاخص زمان اجرای الگوریتم: این شاخص بیانگر زمان اجرای هر الگوریتم است. در صورتی که سایر شاخص‌های مرود استفاده جهت مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری با یکدیگر برابر باشند، هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، الگوریتم مربوطه از کارایی بالاتری برخوردار است.

نتایج مقایسه الگوریتم‌ها: به منظور مقایسه الگوریتم‌های طراحی شده و شناسایی الگوریتم کارتر، هر یک از این الگوریتم‌ها ۳۰ بار اجرا شده و مقدار هر یک از معیارهای مورد نظر برای ارزیابی در هر اجرا شده و در نهایت از آن‌ها میانگین گرفته شد، نتایج حاصل از این تعداد اجرا در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول ۸- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های تکاملی NSGA-II و MOPSO.

Table 8- Results from the implementation of NSGA-II and MOPSO evolutionary algorithms.

معیار ارزیابی	نماد مترادف با شاخص‌ها	الگوریتم NSGA-II	الگوریتم MOPSO
شاخص تعداد جواب‌های پارتو	NPS	30	34
شاخص میانگین فاصله از جواب ایده‌آل	MID	13.91	7.5
شاخص سطح پوشش مجموعه‌ها	CS	0.072	0.031
شاخص فاصله‌گذاری	SM	14.85	16.35
شاخص تنوع (گسترش)	DM	83.46	54.13
زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)	CPU Time	43	21

۱۲- آزمون نرمال بودن مقادیر شاخص‌ها

برای بررسی نرمال بودن داده‌های به دست آمده از اجرای الگوریتم‌ها از تست کولموگروف - اسمیرنوف استفاده شد. تمامی داده‌ها نرمال بوده و مقدار P -Value به دست آمده از ۰/۰۵ بزرگ‌تر می‌باشند، بنابراین در سطح اطمینان ۰/۹۵ دلیلی بر رد فرض صفر یعنی فرض نرمال بودن داده‌ها وجود ندارد. بنابراین در این حالت می‌توان از آزمون‌های پارامتریک جهت مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده نمود. نتایج به دست آمده از این آزمون‌های آماری در جدول (۹) نشان داده شده است.

جدول ۹- نتایج حاصل از مقایسات زوجی.

Table 9- Results from pairwise comparisons.

الگوریتم انتخابی	توضیحات	مقدار P-Value	شاخص مورد ارزیابی
الگوریتم NSGA-II	مقدار بزرگ‌تر، بهتر	> 0.15	NPS
الگوریتم MOPSO	مقدار کوچک‌تر، بهتر	> 0.15	MID
الگوریتم NSGA-II	مقدار بزرگ‌تر، بهتر	> 0.15	CS
الگوریتم NSGA-II	مقدار کوچک‌تر، بهتر	> 0.15	SM
الگوریتم NSGA-II	مقدار بزرگ‌تر، بهتر	> 0.15	DM
الگوریتم MOPSO	مقدار کوچک‌تر، بهتر	> 0.15	CPU Time

۱۳- مقایسه نتایج الگوریتم‌ها بر اساس شاخص RDI

با توجه به نتایج به دست آمد از آزمون‌های انجام شده و با توجه به این که در برخی از شاخص‌های الگوریتم NSGA-II و در برخی دیگر الگوریتم MOPSO کارایی بهتری دارد، برای انتخاب الگوریتم برتر از روش تصمیم‌گیری چند معیاره ترکیبی به نام AHP-TOPSIS





استفاده خواهد شد (مقصود لو و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش^۱ الگوریتم‌ها و شاخص‌های ارزیابی آن‌ها به ترتیب به عنوان گزینه‌ها و معیارها در نظر گرفته می‌شوند. در این روش، تکنیک *AHP* برای شناسایی وزن‌های معیاره استفاده می‌شود. وزن‌ها هر کدام از معیارها بر مبنای گام‌های زیر انجام می‌شود.

گام ۱. ایجاد ماتریس مقایسات زوجی: این ماتریس بر مبنای تجمیع نظرات خبرگان مختلف در این زمینه ایجاد می‌شود. عناصر این ماتریس بر مبنای اهمیتی هر معیار نسبت به سایر معیارها تشکیل می‌شود. جدول (۱۰) نتایج این مقایسات را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰- ماتریس مقایسات زوجی.
Table 10- Paired comparison matrix.

شاخص‌های ارزیابی	NPS	MID	CS	SM	DM	CPU Time
NPS	1	2	1	2	0.5	2
MID	0.5	1	0.5	1	1	2
CS	1	2	1	2	2	4
SM	0.5	1	0.5	1	1	4
DM	2	1	0.5	1	1	2
CPU Time	0.5	0.5	0.25	0.25	0.5	1

گام ۲. محاسبه وزن نسبی هر معیار: این اوزان با استفاده از رابطه (۲۳) زیر بدست می‌آید.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n f_{ij}}{n} \quad (23)$$

در این رابطه w_i وزن نسبی معیار i ام، n تعداد معیارها و f_{ij} یک عنصر از ماتریس تصمیم می‌باشد.

گام ۳. نرمالایز کردن اوزان نسبی با استفاده از رابطه (۲۴) زیر:

$$v_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (24)$$

اوزان نرمالایز شده در جدول (۱۱) نشان داده شده است.

جدول ۱۱- وزن‌های بدست آمده از روش *AHP*.
Table 11- Weights obtained by *AHP* method.

شاخص‌های ارزیابی	وزن
NPS	0.189
MID	0.133
CS	0.267
SM	0.178
DM	0.167
CPU Time	0.067

بعد از به دست آوردن اوزان نرمالایز شده برای اولویت‌بندی الگوریتم‌های پیشنهادی در این مقاله از روش *TOPSIS* استفاده می‌کنیم. برای این کار گام‌های زیر را انجام می‌دهیم:

گام ۱. تشکیل ماتریس تصمیم: این ماتریس در جدول (۸) نشان داده شده است.

گام ۲. محاسبه ماتریس تصمیم نرمالایز شده با استفاده از فرمول زیر:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^n f_{ij}^2} \quad (25)$$

در این رابطه f_{ij} یک عنصر از ماتریس تصمیم و r_{ij} یک عنصر از ماتریس تصمیم نرمالایز شده می باشد.

گام ۳. محاسبه ماتریس تصمیم نرمالایز شده موزون با استفاده از فرمول زیر:

$$v_{ij} = r_{ij} \times w_{nm} \quad (26)$$

در این رابطه v_{ij} عنصر ماتریس تصمیم نرمالایز شده موزون و w_{nm} وزن نهایی به دست آمده از روش AHP است.

گام ۴. تعیین راه حل ایده آل مثبت و منفی.

$$A^+ = \left\{ \left(\max_i v_{ij} | j \in J \right), \left(\min_i v_{ij} | j \in J \right) \mid i=1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}.$$

$$A^- = \left\{ \left(\min_i v_{ij} | j \in J \right), \left(\max_i v_{ij} | j \in J \right) \mid i=1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}.$$

در این روابط A^+ به شاخص سود وابسته و A^- به شاخص هزینه است.

گام ۵. محاسبه فاصله هر گزینه از راه حل ایده آل مثبت و منفی. فاصله هر گزینه از راه حل ایده آل مثبت به صورت زیر بدست می آید:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (27)$$

همین طور، فاصله از راه حل ایده آل منفی به صورت زیر بدست می آید:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (28)$$

گام ۶. محاسبه نزدیکی نسبی گزینه i ام به راه حل ایده آل مثبت با توجه به رابطه زیر:

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (29)$$

C_i^+ مقداری بین ۰ تا ۱ می باشد.

گام ۷. تعیین رتبه هر گزینه بر مبنای C_i^+ .



جدول ۱۲- نتایج حاصل از روش TOPSIS.
Table 12- Results from TOPSIS method.

ماتریس تصمیم						
شاخص‌های ارزیابی	NPS	MID	CS	SM	DM	CPU Time
الگوریتم NSGA-II	30	13.91	0.072	14.85	83.46	43
الگوریتم MOPSO	30	7.5	0.031	16.35	54.13	21
ماتریس تصمیم نرمالایز شده						
	NPS	MID	CS	SM	DM	CPU Time
الگوریتم NSGA-II	0.662	0.880	0.918	0.672	0.839	0.899
الگوریتم MOPSO	0.750	0.475	0.395	0.740	0.544	0.439
ماتریس تصمیم نرمالایز شده موزون						
	NPS	MID	CS	SM	DM	CPU Time
الگوریتم NSGA-II	0.1250	0.1171	0.2452	0.1197	0.1401	0.0602
الگوریتم MOPSO	0.1417	0.0631	0.1056	0.1318	0.0909	0.0294



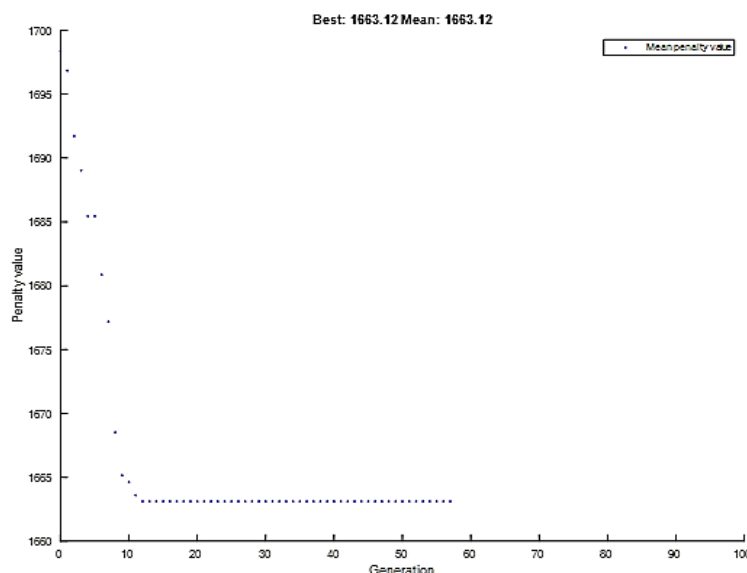
جدول ۱۳- وزن نهایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری.
Table 13- The final weight of metaheuristic algorithms.

الگوریتم	S_i^+	S_i^-	C_i^+	رتبه نهایی
الگوریتم NSGA-II	0.064	0.149	0.698	1
الگوریتم MOPSO	0.149	0.064	0.302	2

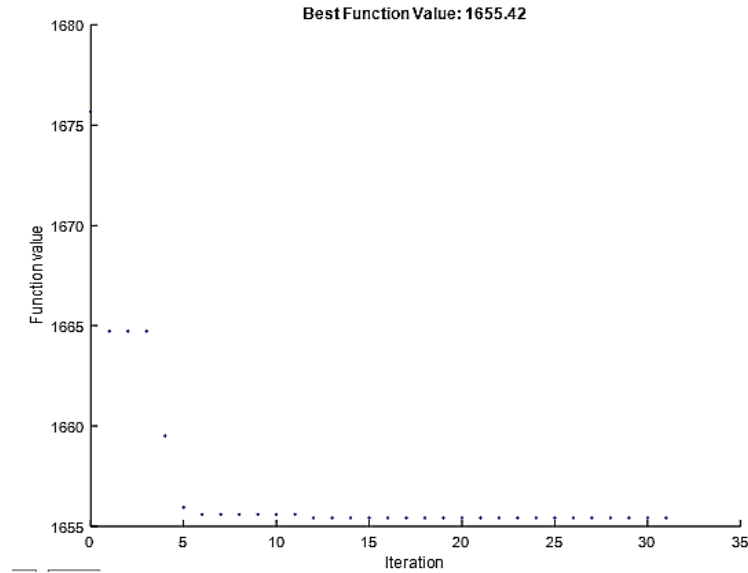
همان‌طور که از نتایج مشخص است، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II نسبت به الگوریتم MOPSO دارای عملکرد بهتری می‌باشد. در نهایت برای کمک به امر تصمیم‌گیری بهتر برای مدیران در انتخاب جواب نهایی برای هر سه تابع هدف وزن یکسان در نظر گرفته شد و با یک تابع هدف، مسئله بار دیگر مورد بررسی و حل قرار گرفت. شکل‌های (۸) و (۹) تابع همگرایی را برای این دو الگوریتم نشان می‌دهند. همچنین نتیجه نهایی به دست آمده به نشان می‌دهد که جواب بهینه حاصل شده جزء یکی از جواب‌های پارتو ما می‌باشد.

$$out = 1000 * \left(\frac{ki(1)}{Tmax(1)} * Ti + ki(2) * \frac{Ci}{Cmax(1)} + ki(3) * Qi \right) / 100. \quad (30)$$

در این رابطه متغیر ki ضریب هر شاخص را مشخص می‌نماید.



شکل ۸- تابع همگرایی برای الگوریتم NSGA-II.
Figure 8- Convergence function for NSGA-II algorithm.



شکل ۹- تابع همگرایی برای الگوریتم MOPSO.
Figure 9- Convergence function for MOPSO algorithm.

در نهایت جواب‌های حاصل شده در جدول (۱۴) نشان داده شد.

جدول ۱۴- نتایج حاصل بهینه‌سازی با یک هدف.
Table 14- Optimization results with one goal.

کد فعالیت	Act 1	Act 2	Act 3	Act 4	Act 5	Act 6	Act 7	Act 8	Act 9	Act 10	Act 11	Act 12	Act 13	Act 14	Act 15	زمان	هزینه	کیفیت	Fval
Best Act (NSGA-II)	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	78.09	1093	0.924	1663.12
Best Act (MOPSO)	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	79.52	1077	0.924	1655.42

۱۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله مدلی ارائه شد که با حذف مفروضات غیرواقعی و لحاظ نمودن واقعیت‌های پروژه نسبت به مدل‌های ارائه شده در این زمینه به واقعیت نزدیک‌تر بوده و در عمل کاربرد بیشتری نیز داشته باشد. مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای شبکه‌های PERT با در نظر گرفتن چندین حالت اجرایی برای هر فعالیت و بررسی تمام روابط پیش‌نیازی عمومی می‌باشد. برای حل این مدل، از آنجا که مسئله مورد نظر در مقوله *NP-hard* قرار می‌گیرد، از دو الگوریتم فراابتکاری چندهدفه *NSGA-II* و *MOPSO* استفاده شد. برای مشخص کردن کارایی مدل ارائه شده، از یک شبکه PERT در مقیاس متوسط آزمایش شد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شده که الگوریتم فراابتکاری *NSGA-II* کارایی بهتری نسبت به الگوریتم فراابتکاری *MOPSO* دارد. به طور کلی این پژوهش به دنبال توسعه مدل‌های پایه موازنه در مبحث زمان‌بندی پروژه و ارائه روش‌های جدیدی برای حل مسئله می‌باشد. راه‌حلی که ارائه شد باعث حاصل شدن جواب‌های بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت خواهد گردید. بر اساس یافته‌های پژوهش و نتایج حاصل شده می‌توان پیشنهادهایی را برای مدیران اجرایی و ذی‌نفعان پروژه و همچنین تحقیقات آتی ارائه نمود. بنابراین با توجه به این که ریسک انجام هر فعالیت در حالت‌های اجرایی مختلف می‌تواند اهداف مختلف پروژه را تحت تأثیر قرار دهد، این امر باعث می‌شود تخمین‌های که صاحبان پروژه در زمینه زمان، هزینه و کیفیت در ذهن دارند دور از انتظار باشد. بنابراین در نظر گرفتن ریسک در زمان‌بندی پروژه برای



دقت و صحت بیشتر برای رسیدن به اهداف کمینه کردن زمان و هزینه و بیشینه کردن کیفیت از اهداف اصلی مدیران پروژه می‌باشد. همچنین برای انجام برخی از پروژه‌ها گاهی انجام یک فعالیت نیز احتمالی است. بنابراین پیشنهاد می‌شود این فرض را به مسائل مطرح شده در این پژوهش اضافه نمود. روش اجرایی در این تحقیق کدنویسی و شبیه‌سازی کامپیوتری بوده است. یکی از محدودیت‌های این اجرا زمان‌بر بودن این روش و تکرارهای آزمایش کامپیوتری برای دستیابی به پاسخ ایده‌آل می‌باشد.

منابع

- Aghdaee, E., & Husseinzadeh Kashan, A. (2018). An approach based on Leagues Championship Algorithm (LCA) and Kalman Filter for multi-objective project scheduling problem and predicting the time progress. *Journal of decisions and operations research*, 3(2), 99-113. (In Persian). http://www.journal-dmor.ir/article_65519.html?lang=en
- Aminbakhsh, S., & Sonmez, R. (2016). Discrete particle swarm optimization method for the large-scale discrete time-cost trade-off problem. *Expert systems with applications*, 51, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.041>
- Amiri, M., Abtahi, A. R., & Khalili-Damghani, K. (2013). Solving a generalised precedence multi-objective multi-mode time-cost-quality trade-off project scheduling problem using a modified NSGA-II algorithm. *International journal of services and operations management*, 14(3), 355-372.
- Amiri, M., Azimi, P., Zandieh, M., & Hadi Nejad, F. (2017). Optimizing the reliability of military equipment and weapons with a hybrid approach of simulation and meta-algorithms. *Military management quarterly*, 16(64), 125-164. (In Persian). http://jmm.iranjournals.ir/article_26719.html
- Azaron, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2007). Multi-objective time-cost trade-off in dynamic PERT networks using an interactive approach. *European journal of operational research*, 180(3), 1186-1200. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.05.014>
- Azaron, A., Katagiri, H., & Sakawa, M. (2007). Time-cost trade-off via optimal control theory in Markov PERT networks. *Annals of operations research*, 150(1), 47-64. <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0149-x>
- Azaron, A., Perkgoz, C., & Sakawa, M. (2005). A genetic algorithm approach for the time-cost trade-off in PERT networks. *Applied mathematics and computation*, 168(2), 1317-1339. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2004.10.021>
- Azimi, P., Ismat, A., Farajpour, M., & Farzin, E. (2013). *Optimization via simulation with ED Software Comprehensive Training*. Qazvin Branch, Islamic Azad University. (In Persian). <https://www.qiau.ac.ir/PublicationCenter/publishCenter.aspx?key=book>
- Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). Project management with time, cost, and quality considerations. *European journal of operational research*, 88(2), 320-327. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00202-9](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00202-9)
- Baradaran, S., Ghomi, S. F., Mobini, M., & Hashemin, S. S. (2010). A hybrid scatter search approach for resource-constrained project scheduling problem in PERT-type networks. *Advances in engineering software*, 41(7-8), 966-975. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.05.010>
- Bouleimen, K. L. E. I. N., & Lecocq, H. O. U. S. N. I. (2003). A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version. *European journal of operational research*, 149(2), 268-281. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00761-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00761-0)
- Chambari, A., Rahmati, S. H. A., & Najafi, A. A. (2012). A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies. *Computers & industrial engineering*, 63(1), 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.004>
- Charnes, A. C. O. O. P., Cooper, W. W., & Thompson, G. L. (1964). Critical path analyses via chance constrained and stochastic programming. *Operations research*, 12(3), 460-470. <https://doi.org/10.1287/opre.12.3.460>
- Cho, J. G., & Yum, B. J. (1997). An uncertainty importance measure of activities in PERT networks. *International journal of production research*, 35(10), 2737-2758. <https://doi.org/10.1080/002075497194426>
- Coello, C. A. C., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems (Vol. 5, pp. 79-104)*. New York: Springer.
- Coello, C. C., & Lechuga, M. S. (2002, May). MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. *Proceedings of the 2002 congress on evolutionary computation. CEC'02 (Cat. No. 02TH8600)* (Vol. 2, pp. 1051-1056). IEEE. DOI: 10.1109/CEC.2002.1004388
- Czyżak, P., & Jaskiewicz, A. (1998). Pareto simulated annealing—a metaheuristic technique for multiple-objective combinatorial optimization. *Journal of multi-criteria decision analysis*, 7(1), 34-47. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199801\)7:1<34::AID-MCDA161>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199801)7:1<34::AID-MCDA161>3.0.CO;2-6)
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000, September). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *International conference on parallel problem solving from nature* (pp. 849-858). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017
- Durieux, S., & Pierrel, H. (2004). Regression metamodeling for the design of automated manufacturing system composed of parallel machines sharing a material handling resource. *International journal of production economics*, 89(1), 21-30. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00199-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00199-3)
- Haga, W. A., & Marold, K. A. (2004). A simulation approach to the PERT/CPM time-cost trade-off problem. *Project management journal*, 35(2), 31-37. <https://doi.org/10.1177/875697280403500205>
- Hosny, O., & Elbassuony, M. (2018). Stochastic time-cost-quality trade-off analysis: the PERT approach. *Construction research congress 2018* (pp. 346-355). <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784481271.034>
- Jaferi, F., Sajadi, S. M., Alinaghian, M., & Beyranvand, M. (2014). Investigation of project communication management in project-based organizations using the PMBOK guideline. *Journal of applied research on industrial engineering*, 1(3), 130-135.



- Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., & Ramezani, P. (2013). Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem. *Scientia Iranica*, 20(3), 861-872. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.10.044>
- Karimi, N., Zandieh, M., & Karamooz, H. R. (2010). Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: a multi-phase approach. *Expert systems with applications*, 37(6), 4024-4032. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.005>
- Kazaz, A., Ulubeyli, S., Er, B., & Acikara, T. (2016). Construction materials-based methodology for time-cost-quality trade-off problems. *Procedia engineering*, 164, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.589>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00043-X)
- Kulkarni, V. G., & Adlakha, V. G. (1986). Markov and Markov-regenerative PERT networks. *Operations research*, 34(5), 769-781. <https://doi.org/10.1287/opre.34.5.769>
- Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., & Niaki, S. T. A. (2016). A multi-objective invasive weeds optimization algorithm for solving multi-skill multi-mode resource constrained project scheduling problem. *Computers & chemical engineering*, 88, 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.018>
- Martin, J. J. (1965). Distribution of the time through a directed, acyclic network. *Operations research*, 13(1), 46-66. <https://doi.org/10.1287/opre.13.1.46>
- Mrad, M., Al-Gahtani, K. S., Hulchafo, R., Souayah, N., & Bamatraf, K. (2019). Risk assessment for discrete stochastic time-cost-quality trade-off problem using simulation-based integer linear programming approach. *IEEE access*, 7, 32453-32463. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2903229](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903229)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.05.006>
- Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33-57. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>
- Project Management Institute. (2018). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)-(JAPANESE)*. Project management institute.
- Rabbani, M., Aghamohamadi, S., Farrokhi-Asl, H., & Alavi Mofrad, M. (2017). A taghuchi based multi objective time-cost constrained scheduling for resource availability cost problem: a case study. *International journal of research in industrial engineering*, 6(4), 269-282.
- Rogers, A., & Prügell-Bennett, A. (1999). Modelling the dynamics of a steady-state genetic algorithm. *Foundations of genetic algorithms*, 5, 57-68.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.065>
- Sajjadi, S. H., Rashidi Baghi, M., & Shiralizadeh, M. (2014). Predicting the relationship between stock returns and information asymmetry using artificial neural networks. *Accounting and auditing research* 24. <http://ensani.ir/fa/article/350467/>
- Shahsavari Pour, N., Modarres, M., Aryanejad, M., & Moghadam, R. T. (2010). The discrete time-cost-quality trade-off problem using a novel hybrid genetic algorithm. *Applied mathematical sciences*, 4(42), 2081-2094.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.02.029>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.11.018>
- Zitzler, E., Deb, K., & Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary computation*, 8(2), 173-195. DOI: [10.1162/106365600568202](https://doi.org/10.1162/106365600568202)