



Multi-objective Project Scheduling Considering Discrete Resource Constraints Problem with Multiple Crashable Modes and Mode-identity Capabilities

Hiwa Farughi

*Corresponding author, Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, University of Kordestan, Sanandaj, Iran. E-mail: h.farughi@uok.ac.ir

Saadi Payandeh

MSc., Department of Industrial Engineering, University of Kordestan, Sanandaj, Iran. E-mail: s.payande1990@gmail.com

Farid Abdi

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Engineering, University of Kordestan, Sanandaj, Iran. E-mail: abdi.farid@yahoo.com

Abstract

Objective: The purpose of this paper is to provide a model to solve the problem of discrete resource constraints project scheduling with multi objectives of reliability, risk, time and cost of the project, taking into account the multiple crashable modes and mode-identity capabilities.

Methods: Studying the literature on the subject, a mathematical programming model for the problem is presented. Due to the NP-hardness of discrete project scheduling problems, the NSGA-II, NSGA-III and MODA, meta-heuristic algorithms are developed within different dimensions to solve the problem. After presenting the results, the comparison of these algorithms has been done using a number of multi-objective performance measures.

Results: Using multiple crashable modes concept and mode-identity in the subset of activities, and, consequently, choosing the best mode for executing activities in each subset and also determining the number of suitable units to reduce the time span, will lead to much better results in terms of project objectives. As a result, the reliability of the project will be maximized and the risk, the time and the cost of project completion will be minimized.

Conclusion: While most previous studies have mainly focused on the time and costs of the project objectives, considering the reliability and risk of the project can help projects to yield better results. In addition, the features such as multiple crashable modes and mode-identity will lead to the real world situations and also better solutions can be found.

Keywords: Project scheduling problem, Reliability and risk, Meta-heuristic algorithms, Multiple crashable modes, Mode-identity.

Citation: Farughi, H., Payandeh, S., & Abdi, F. (2019). Multi-objective Project Scheduling Considering Discrete Resource Constraints Problem with Multiple Crashable Modes and Mode-identity Capabilities. *Industrial Management Journal*, 11(2), 351- 379. (in Persian)



زمان بندی چندهدفه پروژه با قابلیت فشرده سازی چندگانه فعالیت های چندحالته و محدودیت منابع و حالت اجرای یکسان فعالیت های هم گروه

هیوا فاروقی

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: h.farughi@uok.ac.ir

سعدی پاینده

کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: s.payande1990@gmail.com

فرید عبدی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: abdi.farid@yahoo.com

چکیده

هدف: هدف این پژوهش ارائه مدل و حل مسئله زمان بندی پروژه با محدودیت منابع با اهداف چندگانه قابلیت اطمینان، ریسک، زمان و هزینه پروژه در حالت گسسته، با لحاظ کردن قابلیت فشرده سازی چندگانه و همچنین حالت های اجرای یکسان زیرمجموعه فعالیت هاست.

روش: با بررسی و مطالعه ادبیات موضوع، یک مدل برنامه ریزی ریاضی برای مسئله ارائه شد و به دلیل NP-hard بودن مسائل زمان بندی در حالت گسسته، برای حل مسئله، از الگوریتم های فراابتکاری NSGA-II، NSGA-III و MODA در ابعاد متفاوت، استفاده شده است. پس از ارائه نتایج، عملکرد الگوریتم های ذکر شده با استفاده از تعدادی معیارهای عملکردی ارزیابی شده است.

یافته ها: استفاده از مفاهیم فشرده سازی چندگانه و حالت های اجرای یکسان زیرمجموعه فعالیت ها و به تبع آن انتخاب بهترین حالت برای اجرای فعالیت ها در هر زیرمجموعه، با تعیین تعداد مناسب واحدهای زمانی فشرده سازی، سبب می شود در رابطه با اهداف پروژه به نتایج بسیار بهتری دست یافته و در نتیجه، قابلیت اطمینان پروژه حداکثر و ریسک، زمان و هزینه تکمیل پروژه حداقل شود.

نتیجه گیری: در نظر گرفتن مفاهیم قابلیت اطمینان و ریسک پروژه تا حد بسیار زیادی می تواند در هرچه بهتر انجام شدن پروژه ها کمک کند، در حالی که در بیشتر تحقیقات انجام شده، صرفاً به زمان و هزینه به عنوان اهداف پروژه توجه می کنند. علاوه بر آن با لحاظ کردن قابلیت هایی همچون فشرده سازی چندگانه و حالت های اجرای یکسان زیرمجموعه فعالیت ها، علاوه بر نزدیک کردن مسئله به دنیای واقعی، می توان به جواب های بهتری نیز دست یافت.

کلیدواژه ها: زمان بندی پروژه، قابلیت اطمینان و ریسک، الگوریتم فراابتکاری، حالت های اجرای یکسان، فشرده سازی چندگانه.

استناد: فاروقی، هیوا؛ پاینده، سعدی؛ عبدی، فریده (۱۳۹۸). زمان بندی چندهدفه پروژه با قابلیت فشرده سازی چندگانه فعالیت های چندحالته و محدودیت منابع و حالت اجرای یکسان فعالیت های هم گروه. مدیریت صنعتی، ۱۱(۲)، ۳۵۱-۳۷۹.

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۸، دوره ۱۱، شماره ۲، صص. ۳۷۹-۳۵۱

DOI: 10.22059/imj.2019.268307.1007514

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۳۱

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

در اواخر سال ۱۹۵۰ روش مسیر بحرانی^۱ به‌عنوان ابزاری سودمند در حل مسائل زمان‌بندی پروژه (PSPs)^۲ معرفی شد. در محاسبات این روش فرض بر این است که همه فعالیت‌ها در زمان پیش‌بینی شده و معمول خود قابل انجام هستند. اما در مواردی لازم می‌شود پروژه حتی زودتر از زمان برنامه‌ریزی شده به اتمام برسد. برای دستیابی به زمان تکمیل زودتر، بایستی زمان تعدادی از فعالیت‌ها را کاهش داد. این کاهش زمان، با افزایش منابع کاری و صرف هزینه توأم است که آن را انجام ضربتی یا فشردن‌سازی زمان فعالیت گویند. از طرف دیگر، انجام فعالیت‌ها در زمان کمتر، سبب ایجاد تغییراتی در میزان کیفیت انجام فعالیت‌ها، میزان ریسک و قابلیت اطمینان پروژه می‌شود. تصمیم جامع و دقیق در ارتباط با این منافع و جریمه‌ها برای مدیران چالشی سخت است. به همین دلیل به مسائل موازنه زمان - هزینه (TCTP)^۳ توجه شد. در حالت کلی مسائل موازنه زمان - هزینه بر اساس شکل تابع هزینه مستقیم فعالیت، به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود. در توابع پیوسته شکل تابع می‌تواند خطی، محدب یا مقعر باشد. در مسائل موازنه زمان - هزینه گسسته (DTCTP)^۴ که تحت عنوان مسائل با چندین حالت^۵ اجرا نیز شناخته می‌شوند، منابع در واحدهای گسسته‌ای در دسترس هستند و هدف از آن تخصیص بهترین حالت اجرا و منابع مورد نیاز به فعالیت‌های پروژه است، به‌طوری که زمان تکمیل پروژه به حداقل برسد.

در سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۸ درباره حالت خاصی از مسئله چندحالته بحث شد که در آن زمان یک فعالیت به‌عنوان تابعی از نیازمندی‌های منابع (انتخاب حالت) و مقدار تسریع انجام گرفته (کاهش زمان به‌وسیله افزایش هزینه‌های مستقیم) تلقی می‌شود. در واقع بعد از انتخاب یک حالت اجرا از بین چندین حالت و تخصیص آن به یک فعالیت، امکان کاهش زمان آن فعالیت با متقبل شدن هزینه‌های بیشتر امکان‌پذیر است. به بیان دیگر زمان و هزینه انجام فعالیت نه تنها به انتخاب حالت بلکه به انتخاب زمان طی یک حالت نیز بستگی دارد. این مسئله تحت عنوان مسائل با حالت‌های فشردن‌سازی چندگانه^۶ شناخته می‌شوند. برای شفاف شدن بیشتر موضوع مثالی ارائه می‌شود. فرض می‌کنیم برای اجرای یک فعالیت، دو حالت اجرای توسط ماشین‌های A و B وجود دارد که برای یک از این حالت‌ها، منابع و هزینه اجرا تعریف شده است. در حالت نخست با استفاده از ماشین A، فعالیت می‌تواند با تخصیص یک کارگر با ۸ ساعت کاری در روز در مدت زمان ۱۰ روز و با هزینه ۶۰۰ واحد پولی به اتمام برسد. در حالت دوم با ماشین B، همین فعالیت می‌تواند با ۸ ساعت کار در روز، با هزینه ۸۰۰ واحد پولی و با تخصیص یک کارگر در مدت ۸ روز خاتمه پیدا کند. فرض می‌کنیم زمان برای تصمیم‌گیر اهمیت بیشتری دارد و حالت دوم انتخاب می‌شود. علاوه بر این، می‌توان با تخصیص منابع یا شیفت‌های کاری بیشتر، زمان اجرای فعالیت را تسریع بخشید. برای مثال می‌توان با افزایش ساعت کاری از ۸ ساعت به ۱۰ ساعت در روز، فعالیت را در ۶/۵ روز به اتمام رساند. در این مقاله برخلاف پژوهش‌های پیشین که فقط یکی از وضعیت‌های نرمال یا فشردن‌سازی قابل انتخاب بود، از یک مجموعه واحدهای صحیح زمانی برای تعیین مقدار فشردن‌سازی

1. Critical Path Method
3. Time – Cost Trade-off Problem
5. Multi Mode

2. Project Scheduling Problems
4. Discrete Time – Cost Trade-off Problem
6. Multiple Crashable Modes

فعالیت‌ها استفاده شده است. اعداد این مجموعه از عدد صفر برای روش اجرای نرمال شروع شده و با اضافه شدن دوره‌های فشرده‌سازی یک واحدی به آن، تا مقدار مشخصی (حداکثر میزان فشرده‌سازی) برای روش اجرای فشرده خاتمه می‌یابد. در واقع با این کار، علی‌رغم تعیین شیوه اجرای نرمال یا فشرده در حالت تخصیص داده‌شده به هر فعالیت، میزان واحدهایی که زمان اجرای فعالیت تسریع پیدا می‌کند نیز تعیین خواهد شد.

در مسائل چندحالت‌های که تاکنون بحث شد، تمامی تخصیص حالت‌های فعالیت‌ها به صورت مستقل انجام می‌گیرد. به این معنا که تخصیص یک حالت به یک فعالیت در یک پروژه که شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌ها است، الزاماً هیچ فعالیت دیگری را مجبور نمی‌کند در یک حالت به خصوص انجام شود. اما در عمل، ممکن است شرایطی به وقوع بپیوندد که فعالیت‌های خاصی به همدیگر متعلق بوده و باید در یک حالت یکسان انجام شوند. این مسئله تحت عنوان مسائل با حالت‌های یکسان^۱ شناخته می‌شود. بنابراین در این مقاله، برای نزدیک‌تر کردن مدل پیشنهادی به پروژه‌های جهان واقعی، با افزایش فعالیت‌های پروژه به زیرمجموعه‌هایی مجزا و تعریف حالت‌های اجرای متعدد برای فعالیت‌های هر زیرمجموعه، آن دسته از فعالیت‌هایی که در یک زیرمجموعه واقع هستند، در یک حالت یکسان اجرا می‌شوند. همچنین برخلاف تحقیقات پیشین، در اینجا با لحاظ کردن قابلیت فشرده‌سازی چندگانه به حالت‌های اجرا، هیچ یک از فعالیت‌های هم‌گروه ملزم به اجرا شدن با شیوه نرمال یا فشرده نخواهند بود و فقط حالت اجرای یکسانی خواهند داشت.

به‌طور کلی، پروژه‌ها به‌منظور پاسخ‌گویی به مجموعه‌ای از نیازها شکل می‌گیرند و هدف مدیران پروژه هدایت و کنترل پروژه در مسیر اصلی آن به‌منظور رسیدن به اهداف از پیش تعیین‌شده است. اغلب در پروژه‌ها به دلایل مختلفی توابع هدف متعددی در نظر گرفته می‌شود یکی از مهم‌ترین علت‌های این موضوع، حضور گروه‌های متفاوت ذی‌نفع در پروژه است. از جمله مهم‌ترین اهدافی که در این حوزه به صورت‌های متفاوت در نظر گرفته شده است، می‌توان به بهینه ساختن زمان اتمام پروژه، هزینه پروژه، کیفیت، ارزش فعلی خالص، ایمنی، انعطاف‌پذیری در برنامه زمان‌بندی و ... اشاره کرد. در این مسائل محدودیت‌های متفاوتی در نظر گرفته می‌شود که از آن جمله می‌توان محدودیت منابع^۲ (تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر)، روابط پیش‌نیازی^۳ و پس‌نیازی^۴ و ... را نام برد.

اما در میان توابع هدف ذکرشده، به اهدافی مانند قابلیت اطمینان و ریسک در زمینه مسائل مدیریت پروژه توجه کمتری شده است. برای افزایش قابلیت اطمینان پروژه سعی می‌شود حالت‌های اجرای فعالیت‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شود که بتوان آن فعالیت را در موعد مقرر و به‌طور کامل به اتمام رساند. برای مثال فرض می‌شود برای انجام یک فعالیت، سطوح مختلفی از تکنولوژی مانند ابزار دستی، نیمه اتوماتیک و تمام اتوماتیک در دسترس بوده و از طرفی قابلیت اطمینان استفاده از هر سطح از تکنولوژی نیز متفاوت است. عواملی مثل خستگی و خطای نیروی انسانی، عدم حضور به‌موقع نیروی انسانی در محل کار، حمل‌ونقل نادرست، بارگذاری و تخلیه اشتباه، خرابی دستگاه و نگهداری و تعمیرات نادرست می‌توانند سبب کاهش قابلیت اطمینان شوند. بنابراین نوع حالت اجرای انتخاب‌شده می‌تواند بر زمان و هزینه تمام‌شده و همچنین قابلیت اطمینان آن فعالیت اثر داشته باشد. از طرفی، ریسک انجام فعالیت‌های پروژه، می‌تواند روی

1. Mode-Identity Problem
3. Precedence Relations

2. Resource Constraint
4. Successive Relations

یک یا بیش از یکی از اهداف پروژه تأثیرگذار باشد. ریسک ممکن است یک یا بیش از یک علت داشته باشد، به طور مثال نیاز به یک مجوز و منابع محدود یا سایر جوانب محیطی پروژه همچون شیوه‌های ضعیف مدیریت پروژه یا وابستگی به متخصص‌های خارجی که قابل کنترل نیستند. بنابراین نوع حالت اجرای انتخاب شده می‌تواند بر زمان، هزینه تمام‌شده، قابلیت اطمینان و میزان ریسک آن فعالیت تأثیرگذار باشد.

با توجه به موارد ذکر شده، در این پژوهش سعی بر این است که برای نخستین بار به صورت هم‌زمان به بهینه‌سازی اهداف زمان، هزینه، قابلیت اطمینان و ریسک اجرای پروژه، با توجه به اهمیت انکارناپذیر آنها در پروژه‌های امروزی، بپردازیم. علاوه بر این، همان‌طور که در ادبیات موضوع نیز به روشنی مشخص است، به بحث حالت‌های فشردن‌سازی چندگانه و همچنین مسائل با حالت‌های یکسان، با توجه به ایجاد پیچیدگی‌های زیاد در مسئله، به ندرت توجه شده است. بنابراین در این مقاله، برای نخستین بار، در رابطه با مسئله موازنه زمان - هزینه - قابلیت اطمینان - ریسک پروژه با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر و اجرای فعالیت‌های چندحالت‌ه هم‌گروه در حالت‌های یکسان و با امکان قابلیت فشردن‌سازی چندگانه فعالیت‌ها پژوهش شده که هدف از آن، انتخاب بهترین حالت برای اجرای فعالیت‌ها در هر زیرمجموعه و یافتن بهترین روش اجرا با تعیین تعداد واحدهای زمانی فشردن‌سازی فعالیت‌ها به منظور حداکثرسازی قابلیت اطمینان پروژه و حداقل‌سازی ریسک، زمان و هزینه تکمیل پروژه است.

با توجه به اینکه مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و همچنین مسائل DTCTP در دسته مسائل NP-hard^۱ قرار دارند (بلازویچ، لنسترا و کان^۲، ۱۹۸۳)، بنابراین برای حل مسئله در ابعاد بزرگ، بایستی از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده کرد. در این پژوهش، برای حل مسئله، نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)^۳، الگوریتم چندهدفه سنجاقک (MODA)^۴ و نسخه سوم بهینه‌سازی ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) توسعه داده شده‌اند و در نهایت جواب‌های نامغلوب به دست آمده با استفاده از شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های چندهدفه، مقایسه شده‌اند.

در ادامه بخش‌های مقاله به صورت زیر است. در بخش دوم، پیشینه تحقیق بررسی شده است. در بخش سوم نمادگذاری و مدل ریاضی مسئله ارائه شده و در بخش چهارم، روش‌های حل مسئله بیان شده است. سپس در بخش پنجم، نتایج محاسباتی شامل اعتبارسنجی الگوریتم‌های ارائه شده، حل مثال‌های نمونه و همچنین مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های چندهدفه گزارش شده است. در نهایت، در بخش ششم نتیجه‌گیری پژوهش و زمینه تحقیقات آتی ارائه شده است.

پیشینه پژوهش

مسائل PSPs، به دلیل کاربردهای فراوانی که در مدیریت پروژه‌ها دارند، نزد پژوهشگران این حوزه اهمیت بسیار زیادی داشته‌اند و در صورت وجود محدودیت منابع، با نام مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP)^۵ شناخته

1. Non-deterministic Polynomial-time
3. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
5. Resource – Constrained Project Scheduling Problem

2. Blazewicz, Lenstra & Kan
4. Multi-Objective Dragonfly Algorithm

می‌شوند که در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرند (بلازویچ و همکاران، ۱۹۸۳). در مسائل زمان‌بندی پروژه، به دلیل اهمیت بالایی که در ایجاد توازن بین اهدافی مانند زمان و هزینه احساس می‌شود، مسئله موازنه زمان - هزینه توسط کلی^۱ (۱۹۶۱) و فولکرسون^۲ (۱۹۶۱) بررسی شد. در ادامه، مسائل موازنه زمان - هزینه توسط پژوهشگران بیشتری مطالعه شد، اما برخلاف حالت پیوسته (چوی و پارک^۳، ۲۰۱۵)، مسئله موازنه زمان - هزینه در حالت گسسته که برای نخستین بار توسط هیندلانگ و ماث^۴ (۱۹۷۹) مطرح شد، دارای تحقیقات گسترده‌ای است و ثابت شد که این مسئله در دسته مسائل NP-hard قرار دارد (دی، دان، گوش و ولز^۵، ۱۹۹۷). برای حل چنین مسائلی در سال‌های اخیر، رویکردهای متعددی از جمله الگوریتم‌های دقیق (اسزمرکوفسکی و ونکاتشان^۶، ۲۰۱۲)، الگوریتم‌های ابتکاری (وانهاک و دیبلز^۷، ۲۰۰۷) و الگوریتم‌های فراابتکاری (هی، هی، لیو و وانگ^۸، ۲۰۱۷ و زارعی و حسن‌پور، ۱۳۹۴) توسط پژوهشگران ارائه و استفاده شده است. تالبوت^۹ (۱۹۸۲) نخستین مدل‌سازی را برای مسائل چندحالتی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (MRCPSPP)^{۱۰} ارائه داد و از آنجا که مسئله MRCPSPP تعمیم‌یافته مسئله RCPSPP است، بنابراین این مسئله نیز در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد (بلازویچ و همکاران، ۱۹۸۳). صفری و فقیه (۱۳۹۴)، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع را بررسی کرده و برای حل آن، از الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده (DICA) استفاده کردند. در مسائل MRCPSPP، هر فعالیت می‌تواند در یکی از حالات اجرای تعریف‌شده و با تخصیص انواع منابع مورد نیاز از جمله منابع تجدیدپذیر^{۱۱}، تجدیدناپذیر^{۱۲} و تجدیدپذیر مضاعف^{۱۳} به آن فعالیت، اجرا شود (اسلووینسکی، سونوویچکی و وگلارز^{۱۴}، ۱۹۹۴). در سال‌های اخیر روش‌های حل متعددی از جمله روش‌های دقیق، ابتکاری و فراابتکاری برای حل مسائل MRCPSPP با محدودیت منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ارائه شده‌اند (جو، بارد و تو^{۱۵}، ۲۰۰۶؛ لووا، تورموس و باربر^{۱۶}، ۲۰۰۶ و موریتیبیا، رادریگس و کوستا^{۱۷}، ۲۰۱۸). برای نخستین بار سالوسکی، شیرمر و درکسل^{۱۸} (۱۹۷۹) فعالیت‌های پروژه را به زیرمجموعه‌های مشخصی افزایش کردند. در هر زیرمجموعه، تعداد حالات اجرای مشخصی تعریف شد که بایستی تمامی فعالیت‌های هم‌گروه (متعلق به یک زیرمجموعه)، در یک حالت یکسان اجرا شوند (MIRCPSP)^{۱۹}. همچنین در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی، ارنگوک، آن و کانوی^{۲۰} (۲۰۰۱) حالت خاصی از مسئله چندحالتی را مطرح کردند که در آن، زمان (هزینه) یک فعالیت به‌عنوان تابعی از نیازمندی‌های منابع (انتخاب حالت) و مقدار تسریع انجام‌گرفته در اجرای فعالیت تلقی می‌شد که با عنوان مسئله زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع و قابلیت فشرده‌سازی چندگانه فعالیت‌ها (MRCPSPPMCM)^{۲۱} از آن یاد می‌شود.

از طرفی، بالا بردن قابلیت اطمینان در یک پروژه، پیام‌های گوناگونی برای ذی‌نفعان از جمله احتمال بازگشت

1. Kelly
2. Fulkerson
3. Choi & Park
4. Hindelang & Muth
5. De, Dunne, Ghosh & Wells
6. Szmerekovsky & Venkateshan
7. Vanhouck & Debels
8. He, He, Liu & Wang
9. Talbot
10. Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem
11. Renewable resource
12. Non-renewable resource
13. Doubly-constrained resources
14. Slowinsky, Soniewicki & Weglarz
15. Zhu, Bard & Tu
16. Lova, Tormos & Barber
17. Muritiba, Rodrigues & Costa
18. Salewski, Schirmer & Drexel
19. Mode-Identity Resource Constrained Project Scheduling Problem
20. Erenguc, Ahn & Conway
21. Resource - Constrained Project Scheduling Problem with Multiple Crashable Modes

سرمایه در زمان کمتر و سود بیشتر را به‌همراه دارد. با توجه به وجود روابط پیش‌نیازی^۱ بین فعالیت‌ها و عدم امکان تبدیل شبکه‌های کنترل پروژه به شبکه‌های سری و موازی، محاسبه قابلیت اطمینان شبکه‌های کنترل پروژه در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد (گری و جانسون^۲، ۱۹۷۹). ساپوترا و لتیفیانتی^۳ (۲۰۱۵) مسئله قابلیت اطمینان پروژه را با در نظر گرفتن موازنه بین زمان، هزینه و منابع در شرایط عدم قطعیت بررسی کرده و با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو به تخمین قابلیت اطمینان پروژه پرداختند. گونگ و جو^۴ (۲۰۱۷) برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌های سری، رویکرد عنصر معادل^۵ را بهبود بخشیدند. شهرخی (۱۳۹۷)، از یک رویکرد ابتکاری برای محاسبه قابلیت اطمینان قطعات در شرایط فازی و عدم قطعیت استفاده می‌کند. وانگ، دوان و جو^۶ (۲۰۱۸) قابلیت اطمینان سیستم‌های سری چندحالت‌ه را در شرایطی که امکان تقسیم عملکرد بین عناصر سیستم وجود دارد، ارزیابی کردند. جی، پنگ، هوتم و عدن^۷ (۲۰۱۸) قابلیت اطمینان یک سیستم سری را بررسی کردند که در آن نرخ خرابی عناصر سیستم، تعداد نقص‌ها و تعداد دفعات تعمیر در حالت عدم قطعیت قرار داشتند.

همانند قابلیت اطمینان، ریسک اجرای پروژه نیز، جزء عوامل حیاتی پروژه است، اما در ادبیات حوزه زمان‌بندی پروژه، تحقیقات بسیار کمی در این زمینه به چشم می‌خورد. نوانریو آنیاچه^۸ (۲۰۱۴) مسئله موازنه زمان - هزینه - ریسک را مطرح کرده و از آن برای فرایندهای نصب ماشین اشعه ایکس استفاده کردند. افشار و ذوالفقار دولابی^۹ (۲۰۱۴) به بررسی مسئله موازنه زمان - هزینه - ریسک ایمنی پرداختند و در مرحله برنامه‌ریزی، از روش ابتکاری ریسک ایمنی بر اساس فعالیت^{۱۰} (QASR) استفاده کرده و الگوریتم ژنتیک را برای حل مسئله به‌کار بردند. گلاذیتز، اسکروپکا، کوچتا و دوچازک^{۱۱} (۲۰۱۵) با ارائه یک مدل که دربرگیرنده مدیریت ریسک و زمان پروژه است، تمایز بین ریسک‌هایی را که بایستی پذیرفته یا حذف شوند، تعیین کردند. عالم‌تبریز، خالدیان و مهدی‌پور (۱۳۹۵)، زمان تکمیل پروژه را با در نظر گرفتن طول زمان کسب‌شده و مدیریت ریسک و بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه کردند. پریزاد و شهسوارپور^{۱۲} (۲۰۱۶) برای پروژه‌های بسیار عظیم، مسئله موازنه زمان - هزینه - کیفیت - ریسک را مطرح کرده و برای حل مدل ریاضی، از الگوریتم دلفین‌های شکارچی (STHD)^{۱۳} استفاده کردند و نتایج آن، با الگوریتم علف‌های هرز مهاجم (IWGA)^{۱۴} مقایسه شد. شی، جی، جو و هوانگ^{۱۵} (۲۰۱۷) برای تجزیه و تحلیل اثرهای زیست‌محیطی منابع و مدیریت تنظیم ساختار انرژی منطقه‌ای، از یک مدل تقریبی موازنه هزینه - ریسک استفاده کردند. موریانا و ویزی^{۱۶} (۲۰۱۷) با تعیین ریسک وضعیت پیشرفت کار، یک رویکرد کمی در حالت قطعی را برای ارزیابی و کاهش ریسک‌های پروژه توسعه دادند.

1. Precedence relations

3. Saputra & Latiffianti

5. Equivalent Component Approach

7. Ge, Peng, Houtum & Adan

9. Afshar & Zolfaghar Dollabi

11. Gladysz, Skorupka, Kuchta & Duchaczek

13. Specific Techniques of Hunting Dolphins

15. Xie, Xia, Ji, Zho & Huang

2. Garey & Johnson

4. Gong & Zhou

6. Wang, Duan & Zhou

8. Nwaneri & Anyaeche

10. Qualitative Activity-based Safety Risk

12. Paryzad & Shahsavari Pour

14. Invasive Weeds Growth Algorithm

16. Muriana & Vizzini

بیان مسئله

فرض می‌شود پروژه به‌عنوان یک گراف جهت‌دار غیرحلقه‌ای به‌صورت $G = (V, E)$ تعریف شود که در آن V مجموعه گره‌ها و E مجموعه کمان‌های آن است. پروژه با استفاده از یک شبکه گرهی (AON) نمایش داده می‌شود و گره‌ها و کمان‌های آن به‌ترتیب نماینده فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی بین آنها از نوع پایان به شروع (FS_{ij}) با زمان وقفه صفر هستند. هر یک از فعالیت‌های پروژه $i \in V$ دارای تعداد M_i حالت اجرا و در هر حالت، دو روش نرمال و فشرده برای اجرای فعالیت‌ها وجود دارد. به این ترتیب برای هر حالت اجرا، اهداف چهارگانه قابلیت اطمینان، ریسک، زمان و هزینه، متفاوت با سایر حالات و به فرم $(R, Risk, T, C)$ در نظر گرفته می‌شوند و هر یک از اهداف در نظر گرفته شده، متأثر از روش‌های اجرای نرمال و فشرده هستند. در این مقاله، از یک مجموعه واحدهای صحیح زمانی برای تعیین روش اجرای فعالیت‌ها و میزان فشرده‌سازی هر یک از آنها استفاده شده است که عدد صفر نشان‌دهنده روش اجرای نرمال و اعداد بزرگ‌تر از صفر، نشان‌دهنده روش اجرای فشرده و تعیین تعداد واحدهای فشرده‌سازی است. همچنین به‌دلیل اهمیت بالای رضایت مشتریان و افزایش اطمینان از اجرای صحیح و به‌موقع پروژه، محاسبه و ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه پروژه و برخلاف پژوهش‌های پیشین، با در نظر گرفتن تأثیر فشرده‌سازی زمان اجرای هر فعالیت بر احتمال تکمیل پروژه مطابق با الزامات آن، لحاظ شده است. به این ترتیب در صورت اجرای فعالیتی با روش فشرده، قابلیت اطمینان اجرای آن، متناسب با تعداد واحدهای صحیح زمانی فشرده‌سازی، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، از آنجا که ممکن است اجرای فعالیت‌های پروژه با وقوع ریسک همراه باشند، برای مدیریت اثرهای احتمالی وقوع ریسک، محاسبه و ارزیابی وقوع ریسک پروژه نیز برخلاف پژوهش‌های پیشین، با در نظر گرفتن تأثیر فشرده‌سازی زمان اجرای هر فعالیت روی اهداف قابلیت اطمینان، زمان و هزینه تکمیل پروژه بررسی شده است. بنابراین در صورت اجرای فعالیتی با روش فشرده، احتمال وقوع و شدت وقوع ریسک آن فعالیت روی اهداف پروژه، متناسب با تعداد واحدهای صحیح زمانی فشرده‌سازی افزایش می‌یابد. با توجه به در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر برای فعالیت‌های پروژه، زمان اجرای هر فعالیت، تابعی از نیازمندی‌های منابع (تخصیص و انتخاب حالت اجرا) و مقدار تسریع صورت‌گرفته در نظر گرفته شده است. در واقع حالت‌های اجرا، دارای قابلیت فشرده‌سازی به‌صورت چندگانه هستند و برای کاهش زمان اجرای یک فعالیت، می‌توان از منابع چندگانه (نیروی انسانی، تجهیزات و غیره) متناسب با افزایش تعداد دوره‌های فشرده‌سازی استفاده کرد. همچنین همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، فعالیت‌های متعلق به یک زیرمجموعه، در یک حالت یکسان اجرا می‌شوند، اما با لحاظ کردن قابلیت فشرده‌سازی چندگانه، هیچ یک از فعالیت‌های متعلق به یک زیرمجموعه، ملزم به داشتن یک روش نرمال یا فشرده نیستند و فقط حالت اجرای یکسانی دارند. در انتها با توجه به مفروضات بیان شده، با ارائه مدلی که متشکل از چهار هدف قابلیت اطمینان، ریسک، زمان و هزینه و تعدادی محدودیت است، به‌دنبال انتخاب بهترین حالت برای اجرای فعالیت‌ها در هر زیرمجموعه و یافتن بهترین روش (نرمال یا فشرده) برای اجرای فعالیت‌ها و همچنین تعیین تعداد واحدهای فشرده‌سازی پس از زمان‌بندی فعالیت‌ها و تخصیص منابع مورد نیاز تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به آنها هستیم، به‌طوری که قابلیت اطمینان اجرای پروژه، به حداکثر و ریسک، زمان و هزینه تکمیل آن به حداقل برسد. جدول ۱، نمادگذاری مدل ریاضی مسئله را نشان می‌دهد و پس از آن مدل ریاضی ارائه شده است.

جدول ۱. نمادگذاری مدل ریاضی مسئله

اندیس‌ها و مجموعه‌ها	
V : مجموعه گره‌ها (فعالیت‌ها); $V = \{1, 2, \dots, n\}$	i : اندیس فعالیت‌های پروژه
m_i : حالت‌های اجرای فعالیت i ام پروژه	q : اندیس منابع از نوع تجدیدناپذیر
k : اندیس منابع از نوع تجدیدپذیر	t : واحدهای صحیح فشرده‌سازی زمان اجرای فعالیت‌ها
t' : دوره‌های زمانی اجرای فعالیت‌ها	g : اندیس تعداد اهداف پروژه
b : مسیرهای شبکه پروژه	$P_b = \{P_1, P_2, \dots, P_B\}$: ام b ام؛ مجموعه فعالیت‌های واقع در مسیر b ام
CPS : مجموعه کل مسیرهای بحرانی شبکه پروژه؛ $CPS = \{P_b \mid T_{P_b} = s_n + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{max}} d_{nmt} \cdot X_{nmt}\}$	
$E_{FS_{ij}}$: مجموعه حاصل از روابط پیش‌نیازی از نوع FS	a : زیرمجموعه‌های مجزای فعالیت‌ها
$SA_{t'}$: مجموعه فعالیت‌های در حال اجرا در دوره زمانی t' ؛ $SA_{t'} = \{i \mid s_i \leq t' \leq s_i + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{max}} d_{imt} \cdot X_{imt}, \forall i \in V\}$	
H_a : مجموعه غیرتهی مشخص فعالیت‌های هم‌گروه متعلق به زیرمجموعه a ؛ $H_a = \{H_1, H_2, \dots, H_A\}$	
f_a : فعالیت با کوچک‌ترین شماره اندیس در مجموعه H_a	m_a : حالت اجرای فعالیت‌ها در زیرمجموعه‌ای با اندیس a
پارامترها	
T_{P_b} : مدت زمان اجرای مجموعه فعالیت‌های واقع در مسیر b ام	
R_{imt} : قابلیت اطمینان فعالیت i زمانی که در حالت m اجرا و به اندازه t واحد زمانی فشرده‌سازی می‌شود.	
Pr_{imt} : احتمال وقوع ریسک برای فعالیت i زمانی که در حالت m اجرا و به اندازه t واحد زمانی فشرده‌سازی می‌شود.	
NI_{gimt} : میزان شدت وقوع ریسک نرمالایزه‌شده فعالیت i روی هدف g -ام پروژه، زمانی که فعالیت i در حالت m اجرا و به اندازه t واحد زمانی فشرده‌سازی می‌شود.	
d_{imt} : مدت زمان اجرای فعالیت i زمانی که در حالت m اجرا و به اندازه t واحد زمانی فشرده‌سازی می‌شود.	
T_d : تاریخ تحویل (ضرب‌الاجل) مطلوب پروژه	θ_{max} : حد بالای هزینه اجرای پروژه
OC : هزینه بالاسری پروژه	λ : هزینه جریمه تأخیر یا پاداش زودکرد پروژه به‌ازای هر واحد کاهش یا افزایش در زمان اجرای پروژه
TC_i^{max} : حداکثر تعداد واحدهای صحیح زمانی فشرده‌سازی، $(d_{imo} - (\min\{d_{imt}\}, \forall t \geq 1))$	
c_k : هزینه هر واحد منبع تجدیدپذیر نوع k به‌ازای هر واحد منبع	
c_q : هزینه هر واحد منبع تجدیدناپذیر نوع q به‌ازای هر واحد منبع	
i_{imkt} : مقدار مورد نیاز منبع تجدیدپذیر نوع k برای فعالیت i زمانی که در حالت m اجرا و به اندازه t واحد فشرده‌سازی می‌شود.	
w_{imq} : مقدار مورد نیاز منبع تجدیدناپذیر نوع q برای فعالیت i زمانی که در حالت m اجرا می‌شود.	
R_k : کل مقدار قابل دسترس منبع تجدیدپذیر نوع k در هر دوره زمانی	
W_q : کل مقدار قابل دسترس منبع تجدیدناپذیر نوع q برای کل پروژه	
$Risk_{CPS}^{max}$: حداکثر سطح ریسک قابل قبول هر یک از مسیرهای بحرانی شبکه پروژه	
متغیرها	
s_i : متغیر عدد صحیح زمان شروع فعالیت i ؛ $\forall i \in V$	
X_{imt} : متغیر تصمیم‌گیری اجرا یا عدم اجرای فعالیت‌های پروژه، زمانی که فعالیت i در حالت m اجرا و زمان اجرای آن به‌اندازه t واحد صحیح زمانی فشرده‌سازی شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.	

$$\text{Max } Z_1 = 1 - \prod_{P_b \in \text{CPS}} \left(1 - \prod_{i \in P_b} \left(\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} R_{imt} \cdot X_{imt} \right) \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} Pr_{imt} \cdot NI_{gimt} \cdot X_{imt} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{Min } Z_3 = s_n + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_n^{\max}} d_{nmt} \cdot X_{nmt} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_4 = & OC \left(s_n + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_n^{\max}} d_{nmt} \cdot X_{nmt} \right) + \lambda \left(s_n + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_n^{\max}} d_{nmt} \cdot X_{nmt} - T_d \right) \\ & + \sum_{k=1}^K c_k \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} r_{imkt} \cdot X_{imt} + \sum_{q=1}^Q c_q \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} w_{imq} \cdot X_{imt} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{m=1}^{M_a} \sum_{t=0}^{TC_{fa}^{\max}} X_{famt} = 1 \quad , 1 \leq a \leq A, f_a = \min(i \mid i \in H_a) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{t=0}^{TC_{fa}^{\max}} X_{famt} = \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} X_{imt} \quad , 1 \leq a \leq A, \forall i \in H_a \setminus \{f_a\}, 1 \leq m \leq M_a \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$s_i + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} d_{imt} \cdot X_{imt} \leq s_j \quad , \forall (i, j) \in E_{FS} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} w_{imq} \cdot X_{imt} \leq W_q \quad , \forall q \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_{i \in SA_{t'}} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} r_{imkt} \cdot X_{imt} \leq R_k \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$, \forall k, \forall t', SA_{t'} = \left\{ i \mid s_i \leq t' \leq s_i + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} d_{imt} \cdot X_{imt} , \forall i \in V \right\}$$

$$\sum_{g=1}^G \sum_{i \in P_b} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{\max}} Pr_{imt} \cdot NI_{gimt} \cdot X_{imt} \leq Risk_{CPS}^{\max} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$, \forall P_b \in CPS, CPS = \left\{ P_b \mid T_{P_b} = s_n + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_n^{max}} d_{nmt} \cdot X_{nmt} \right\}$$

$$Z_4 \leq \theta_{max} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$s_i \geq 0, \quad \forall i, \text{ integer} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$X_{imt} \in \{0,1\}, \quad \forall i, t, m \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

روابط ۱ تا ۴ به ترتیب بیانگر حداکثرسازی قابلیت اطمینان و حداقل‌سازی ریسک، زمان اتمام پروژه و هزینه تکمیل پروژه هستند. در رابطه ۲، برای تعیین احتمال و شدت اثر وقوع ریسک مطابق با استاندارد PMBOK 2017 (۲۰۱۷)، ویرایش ششم) و جدول‌های ۲ و ۳ عمل می‌شود. برای تجزیه و تحلیل ریسک‌ها می‌توان از دو روش کیفی و کمی استفاده کرد. در فرایند ارزیابی به روش کیفی، ریسک‌ها از نظر میزان اثرهای بالقوه هر یک از آنها بر اهداف پروژه، با معیارهای کیفی و الفاظی مانند کم، متوسط و زیاد اولویت‌بندی می‌شوند. حال می‌توان به دو روش یا با نظر کارشناسی، اولویت ریسک‌ها را بر اساس این دو پارامتر مشخص کرد یا با استفاده از موقعیت هر یک از ریسک‌ها در ماتریس ارزیابی کیفی مطابق جدول ۲، اولویت ریسک‌ها را تعیین کرد. در فرایند ارزیابی کمی ریسک‌ها، به جای به‌کارگیری الفاظ کیفی برای احتمال وقوع، از همان مقادیر احتمال یا مقادیر به‌دست‌آمده از اطلاعات پروژه‌های مشابه انجام‌شده، استفاده می‌شود. همچنین می‌توان برای شدت اثر نیز مقادیر نرمالایز شده الفاظ کیفی را که اعدادی در بازه (۰ و ۱) هستند، به‌کار برد. سپس از ضرب احتمال در شدت اثر، عدد کمی هر ریسک به دست می‌آید. به‌طور نمونه، جدول ۳، ماتریس ارزیابی کمی احتمال در شدت اثر نرمالایز شده را نشان می‌دهد. به این ترتیب تأثیر وقوع ریسک انجام هر فعالیت روی هر یک از اهداف پروژه و همچنین احتمال وقوع ریسک مشخص می‌شود. محدودیت ۵، حالت و روش اجرای نرمال یا فشرده هر فعالیت را نشان می‌دهد. محدودیت ۶ نشان می‌دهد که فعالیت‌های هم‌گروه بایستی در یک حالت اجرای یکسان اجرا شوند، اما لزومی به یکسان بودن روش اجرای نرمال یا فشرده در یک زیرمجموعه نیست. محدودیت ۷، روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه را نشان می‌دهد. روابط ۸ و ۹، به ترتیب بیانگر محدودیت منابع تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر هستند.

شایان ذکر است، برای منابع تجدیدپذیر، از یک مجموعه با نام $SA_{it'}$ استفاده می‌شود. این مجموعه بیانگر مجموعه فعالیت‌هایی است که در دور t' در حال اجرا هستند و به منبع تجدیدپذیر نیاز دارند. اما در عمل استفاده از این مجموعه امکان‌پذیر نیست، زیرا نمی‌توان به راحتی اعضای این مجموعه را تعیین کرد. برای حل این مشکل، برای شناسایی فعالیت‌هایی که در محدوده زمانی شروع و ختم هستند، از یک روش جدید استفاده می‌شود. به این ترتیب، دو متغیر صفر و ۱ تحت عناوین $Y_{it'}$ و $Z_{it'}$ برای تعیین قرارگیری دوره زمانی اجرای فعالیت‌ها در محدوده زمان‌های شروع و ختم آنها، به کار گرفته می‌شوند. بنابراین مطابق روابط ۱۴ و ۱۵، به ترتیب، در صورتی که شرط ارائه‌شده در این روابط برقرار باشد، مقدار متغیرهای $Y_{it'}$ و $Z_{it'}$ برابر با ۱ خواهد شد و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرند. به این ترتیب

هنگامی که هم‌زمان متغیرهای $y_{it'}$ و $Z_{it'}$ مقدار ۱ می‌گیرند، مشخص می‌شود فعالیت‌های پروژه در کدام بازه زمانی به منبع نیاز خواهند داشت. بنابراین محدودیت ۹، به صورت رابطه ۱۶ تغییر می‌کند.

$$y_{it'} = \begin{cases} 1 & \text{if } t' \leq s_i + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{max}} d_{imt} \cdot X_{imt} \quad \forall i, t' \\ 0 & \text{, otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$Z_{it'} = \begin{cases} 1 & \text{if } t' \geq s_i \quad \forall i, t' \\ 0 & \text{, otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{TC_i^{max}} r_{imkt} \cdot X_{imt} \cdot y_{it'} \cdot Z_{it'} \leq R_k \quad , \forall k, t' \quad \text{رابطه ۱۶}$$

محدودیت ۱۰ بیانگر حد بالای ریسک مسیر یا مسیرهای بحرانی شبکه پروژه و محدودیت ۱۱ حد پایین هزینه تکمیل پروژه هستند. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ نیز به ترتیب متغیر عدد صحیح زمان شروع فعالیت‌های پروژه و متغیر باینری اجرا یا عدم اجرای آنها را در یک حالت و با یک روش نرمال یا فشرده را نشان می‌دهند. مجموعه CPS که معرف مسیرهای بحرانی شبکه پروژه است، با این رویکرد مشخص می‌شود که در ابتدا زمان تمامی مسیرهای شبکه پروژه محاسبه می‌شوند و مسیرهایی که زمان اجرای آنها برابر با زمان تکمیل پروژه باشد، به‌عنوان مسیر بحرانی به این مجموعه تعلق می‌گیرد.

جدول ۲. ماتریس ارزیابی احتمال در شدت اثر سه سطحی (PMBOK 2017، ویرایش ششم)

شدت وقوع		احتمال		
زیاد (۰/۷۰)	متوسط (۰/۵۰)	کم (۰/۳۰)		
متوسط	کم	کم	کم (۰/۳۰)	
زیاد	متوسط	کم	متوسط (۰/۵۰)	
زیاد	زیاد	متوسط	زیاد (۰/۷۰)	

جدول ۳. ماتریس ارزیابی کمی احتمال در شدت اثر نرمال‌ایز شده (PMBOK 2017، ویرایش ششم)

شدت وقوع		احتمال				
۰/۹۰	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۳۰	۰/۱۰		
۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۰/۰۵	
۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۰	
۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۲۰	
۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۴۰	
۰/۷۲	۰/۵۶	۰/۴۰	۰/۲۴	۰/۰۸	۰/۸۰	

روش‌های حل مسئله

در چند دهه اخیر به دلیل عدم کارایی رویکردهای سنتی در حل مسائل چندهدفه مانند روش‌های اپسیلون – محدودیت (به علت لزوم تخمین‌های مناسب برای مقادیر اپسیلون در به دست آوردن جواب‌های پارتویی و همچنین زمان‌بر بودن حل مسائل چندهدفه با ابعاد بزرگ) و مجموع وزنی (WS)^۱ (به دلیل عدم توانایی این رویکرد در دستیابی به قسمت غیرمحدب فضای جواب)، تعداد زیادی الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه (MOEAs)^۲ ارائه شده‌اند. بنابراین در این تحقیق، برای حل مسئله چندهدفه، از الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، و NSGA-III ارائه شده استفاده می‌شود که در ادامه به اختصار در خصوص آنها توضیحاتی ارائه می‌شود.

الگوریتم NSGA-II

در سال ۲۰۰۲ نسخه دوم الگوریتم ژنتیک بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) توسط دب، پراتاپ، آگراوال و میاریوان^۳ (۲۰۰۲) ارائه شد. در این الگوریتم، ابتدا به صورت تصادفی جمعیت اولیه‌ای از والدین P_t به اندازه N_p تولید می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای تقاطع، جهش و مکانیزم انتخاب والد، جمعیت فرزندان Q_t نیز به اندازه N_p تولید می‌شود. در مرحله بعد، جمعیت والدین و فرزندان، با هم ترکیب شده و مجموعه جدید $R_t = P_t \cup Q_t$ به اندازه $2N_p$ تشکیل می‌شود و با استفاده از عملگر رتبه‌بندی و الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب، به سطوح پارتویی F_1, F_2, \dots, F_L مرتب‌سازی می‌شود. اکنون تا زمانی که اندازه جمعیت P_{t+1} برابر با اندازه N_p شود، اعضای جبهه‌های F_1, F_2, \dots, F_L الی آخر وارد جمعیت P_{t+1} می‌شوند. در صورتی که در فرایند انتخاب اعضای جبهه‌های نامغلوب، اعضای با رتبه برابر وجود داشته باشند، از معیار فاصله ازدحامی^۴ استفاده می‌شود و جوابی که دارای مقدار فاصله ازدحامی بیشتری باشد، برگزیده خواهد شد. اکنون با داشتن جمعیت P_{t+1} می‌توان با استفاده از عملگرهای تقاطع، جهش و مکانیزم انتخاب والد، جمعیت جدید فرزندان در نسل بعدی P_{t+1} را تولید کرد. فرایند بالا به‌زای نسل‌های بعدی تا برقراری شرط توقف تکرار می‌شود و در انتها جواب‌های پارتویی مسئله به‌عنوان خروجی الگوریتم ارائه خواهند شد.

الگوریتم NSGA-III

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی با استفاده از رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب بر اساس نقاط مرجع (NSGA-III)، توسط دب و جین^۵ (۲۰۱۴) ارائه شد. برخلاف الگوریتم NSGA-II، که عملگر فاصله ازدحامی را برای انتخاب جواب‌هایی با رتبه برابر به کار می‌گیرد، الگوریتم NSGA-III، از یک عملگر انتخاب، بر اساس ارائه و به‌روز رسانی تعداد مشخصی از نقاط مرجع که می‌توانند سطوح پارتویی را به‌خوبی در فضای اهداف مسئله گسترش دهند، استفاده می‌کند و تنوع جواب‌ها را نیز بهبود می‌بخشد. این نقاط با استفاده از نظر کارشناسان یا استفاده از روش سیستماتیک داس و دنیس^۶ (۱۹۹۸) تعیین می‌شوند. در واقع در یک مسئله با تعداد m تابع هدف، نقاط مرجع روی یک ابرصفحه نرمال‌سازی شده با

1. Weighted Sum
2. Multi – Objective Evolutionary Algorithms
3. Deb, Pratap, Agrawal & Meyarivan
4. Crowding Distance
5. Deb & Jain
6. Das & Dennis

تعداد $m-1$ بعد واقع می‌شوند. در این ابرصفحه، نقاط مرجع، روی هر محور از توابع هدف، دارای یک نقطه با عنوان عرض از مبدأ مختصات هستند و نحوه محاسبه آنها توسط توانا و همکاران^۱ (۲۰۱۶) ارائه شده است. در صورتی که تعداد P قسمت مساوی در امتداد هر بعد از توابع هدف در نظر گرفته شوند، تعداد کل نقاط مرجع H در یک مسئله با تعداد m تابع هدف، به صورت رابطه ۱۷ تعیین می‌شود.

$$H = \binom{m + P - 1}{P} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

الگوریتم MODA

الگوریتم سنجاک‌ها (DA) و حالت چندهدفه آن (MODA) برای نخستین بار در سال توسط میرجلیلی^۲ (۲۰۱۶) ارائه و مطرح شد. نکته جالب توجه درباره سنجاک‌ها، رفتار دسته‌جمعی آنها است که به رفتارهای ازدحامی ساکن و پویا معروف هستند و به مراحل اصلی الگوریتم‌های فراابتکاری، یعنی مراحل جست‌وجو و بهره‌برداری بسیار شبیه هستند. ایده اصلی در الگوریتم DA، برگرفته از رفتارهای دسته‌جمعی سنجاک‌ها به صورت ایستا و پویا است که به ترتیب به دو مرحله اصلی در الگوریتم‌های فراابتکاری یعنی جست‌وجو و بهره‌برداری، بسیار شبیه هستند. از آنجا که معمولاً هدف عمده هر ازدحامی بقا است و موجودات به سمت غذا جذب می‌شوند یا از تهدید دشمن فرار می‌کنند، بنابراین با توجه به این دو رفتار، برای به‌روزرسانی موقعیت سنجاک‌ها پنج عملگر اصلی تعریف می‌شود. برای حل مسائل چندهدفه با استفاده از الگوریتم MODA از یک آرشیو برای نگهداری و بازبایی بهترین تقریب‌ها از جواب‌های پارتویی طی فرایند بهینه‌سازی استفاده می‌شود. به‌روزرسانی موقعیت سنجاک‌ها در الگوریتم چندهدفه سنجاک‌ها، دقیقاً مشابه با حالت تک‌هدفه آن است، با این تفاوت که منبع غذا از آرشیو انتخاب می‌شود. به‌منظور یافتن یک جبهه پارتویی که تا حد ممکن به‌خوبی گسترش یافته باشد، منابع غذا و دشمن، به ترتیب از کم‌جمعیت‌ترین و پرجمعیت‌ترین نواحی جبهه پارتویی تقریبی به‌دست‌آمده، انتخاب می‌شوند. برای یافتن کم‌جمعیت‌ترین و پرجمعیت‌ترین نواحی جبهه پارتویی تقریبی، بایستی فضای جست‌وجو را تقسیم‌بندی کنیم و این کار، با محاسبه بهترین و بدترین مقادیر توابع هدف و با تعریف یک ابرکره برای پوشش‌دهی به تمامی جواب‌ها و تقسیم ابرکره به زیرابکره‌های مساوی در هر تکرار انجام می‌شود. پس از تشکیل قطعات، انتخاب با استفاده از سازوکار چرخ رولت صورت می‌گیرد. به این ترتیب مطابق با رابطه ۱۸، مکانیزم چرخ رولت، احتمال بیشتری برای انتخاب منبع غذا از قطعات کم‌جمعیت‌تر (بهترین ابرکره) تخصیص می‌دهد. این در حالی است که مطابق رابطه ۱۹، احتمال بیشتری برای انتخاب دشمن از قطعات پرجمعیت‌تر (بدترین ابرکره) جبهه پارتویی تقریبی تخصیص داده می‌شود. در روابط ۲۰ و ۲۱، N_i و C به ترتیب تعداد جواب‌های پارتویی در قطعه λ م و یک عدد ثابت بزرگ‌تر از ۱ هستند. در حالی که P_i احتمال انتخاب قطعه λ م را نشان می‌دهد.

$$P_i = \frac{c}{N_i} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$P_i = \frac{N_i}{c} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

در حالت چندهدفه، در هر تکرار بایستی اعضای آرشیو به‌طور منظم به‌روزرسانی شدند. به این ترتیب در صورتی که یک جواب توسط حداقل یکی از اعضای آرشیو مغلوب شود، از ورود آن به داخل آرشیو جلوگیری می‌شود. اگر یک جواب بعضی از جواب‌های داخل آرشیو را مغلوب می‌کند، باید تمامی آن جواب‌ها از آرشیو حذف و جواب جدید وارد آرشیو شود. اگر یک جواب توسط هیچ یک از جواب‌های داخل آرشیو مغلوب نمی‌شود، بایستی وارد آرشیو شود. در نهایت به‌عنوان نحوه کار الگوریتم می‌توان گفت، فرایند بهینه‌سازی با تولید جمعیت اولیه‌ای از سنجاک‌ها به‌صورت تصادفی شروع می‌شود و بردار سرعت اولیه، ظرفیت آرشیو و حداکثر تعداد ابرکره‌ها تعیین می‌شوند. در مرحله بعد، پس از ارزیابی توابع هدف مربوط به هر سنجاک، جواب‌های پارتویی تعیین و آرشیو به‌روزرسانی می‌شود. در این مرحله اگر ظرفیت آرشیو تکمیل باشد، فرایند نگهداری یا حذف جواب‌ها از آرشیو اجرا می‌شود. در غیر این صورت بررسی می‌شود که جواب‌های آرشیو در داخل ابرکره‌ها قرار دارند یا خیر. در صورتی که جواب‌ها خارج از ابرکره‌ها قرار داشته باشند، موقعیت تمامی ابرکره‌ها برای پوشش‌دهی به تمامی جواب‌ها تغییر کرده و به روزرسانی می‌شود. در غیر این صورت منابع غذا و دشمن از آرشیو انتخاب و سرعت و موقعیت سنجاک‌ها به‌روزرسانی می‌شود. در انتها اگر شرط توقف (تعداد تکرارهای الگوریتم، حد نصاب ظرفیت آرشیو و غیره) برقرار باشد، جواب‌های پارتویی به‌عنوان خروجی الگوریتم ارائه می‌شوند. در غیر این صورت، الگوریتم به مرحله ارزیابی توابع هدف باز می‌گردد و تا برقراری شرط توقف، الگوریتم ادامه پیدا می‌کند.

ساختار نمایش جواب

ساختار نمایش جواب به‌وسیله یک ماتریس با ابعاد $n \times 3$ مطابق با شکل ۱ ارائه می‌شود. سطر نخست، شماره فعالیت‌های پروژه، سطر دوم، حالت‌های اجرای ممکن و در نهایت سطر سوم نشان‌دهنده روش اجرای نرمال (عدد صفر) و فشردگی (اعداد بزرگ‌تر از صفر) و در نتیجه تعداد واحدهای صحیح فشردگی‌سازی زمان اجرای فعالیت‌ها خواهد بود. تعداد فعالیت‌های پروژه نیز برابر با n است. در شکل ۱، ساختار نمایش جواب برای شبکه پروژه‌ای با تعداد ۸ فعالیت، ۴ حالت اجرا و حداکثر ۳ واحد فشردگی‌سازی برای فعالیت‌ها نشان داده شده است. در این مسئله، فعالیت‌های اول و چهارم، دوم و سوم و پنجم و همچنین ششم الی هشتم، هم‌گروه هستند و مطابق با محدودیت ۶ مدل، حالت اجرای یکسانی نیز خواهند داشت.

نحوه زمان‌بندی فعالیت‌ها در تولید جواب اولیه به این صورت است که ابتدا یک ترتیب تصادفی از فعالیت‌های پروژه تشکیل می‌شود. در مرحله بعد، یک بردار خالی در نظر می‌گیریم. مقادیر به‌ترتیب از ترتیب تصادفی تولیدشده انتخاب می‌شوند. در این حالت اگر تمامی پیش‌نیازهای فعالیتی در بردار خالی موجود باشد، در نخستین جایگاه خالی از بردار خالی در نظر گرفته‌شده، قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، از فعالیت انتخاب‌شده در ترتیب تصادفی عبور کرده و فعالیت بعدی را انتخاب می‌کند. پس از انتخاب شدن یک فعالیت از ترتیب تصادفی و قرارگیری در بردار خالی، برای شروع دوباره این فرایند، فعالیت انتخاب‌شده از ترتیب تصادفی را حذف کرده و دوباره از ابتدای فعالیت‌های باقی‌مانده شروع می‌شود و این فرایند تا اتمام ترتیب زمان‌بندی فعالیت‌ها تکرار می‌شود. برای سطرهای دوم و سوم ساختار نمایش جواب نیز از یک

فرایند تصادفی استفاده شده است. شایان ذکر است، با توجه به نوع نمایش ساختار جواب در این مقاله، از روش‌های تقاطع یکنواخت و جهش جایگزین تصادفی به عنوان عملگرهای تقاطع و جهش در الگوریتم‌های NSGA-II و NSGA-III استفاده شده است.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۳	۱	۱	۳	۱	۲	۲	۲
۲	۱	۳	۰	۲	۰	۳	۱

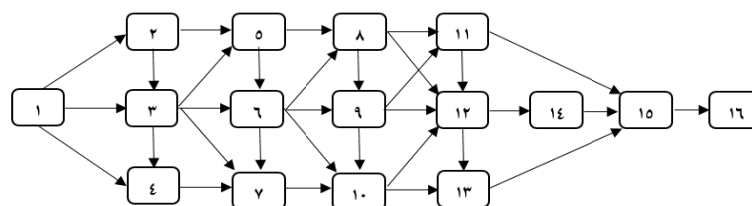
شکل ۱. ساختار نمایش جواب

نتایج محاسباتی

برای استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده در حل مسئله، ابتدا باید از صحت عملکرد این الگوریتم‌ها اطمینان حاصل کرد. بنابراین قبل از ارائه و حل مسائل نمونه به اعتبارسنجی الگوریتم‌ها خواهیم پرداخت.

اعتبارسنجی الگوریتم‌های NSGA-II، NSGA-III و MODA

برای اعتبارسنجی الگوریتم‌های استفاده شده در این مقاله، از سه مسئله نمونه در ابعاد کوچک با تعداد فعالیت‌های ۶، ۱۰ و ۱۶ استفاده می‌شود که به‌طور نمونه، شکل ۲ شبکه پروژه‌ای مسئله با تعداد ۱۶ فعالیت و جدول ۴، داده‌های آن را نشان می‌دهد. برای سنجش عملکرد الگوریتم‌ها، در ابتدا با استفاده از روش شمارش کامل و جست‌وجوی تمام نقاط فضای ممکن در هر سه مسئله، جنبه واقعی آنها شناسایی شده و با نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها مقایسه می‌شوند. جدول ۵، اطلاعات مسائل نمونه تولیدی را به‌همراه نتایج مربوط به جست‌وجوی کامل فضای جواب و حل آنها برای اعتبارسنجی الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. برای نمونه، برای حل مسئله شماره ۳، الگوریتم NSGA-II با زمان ۱۰۲ ثانیه، الگوریتم MODA با زمان ۷۶ ثانیه و الگوریتم NSGA-III با مدت زمان ۱۳۵ ثانیه به ترتیب تعداد ۴۳، ۴۲ و ۳۸ نقطه از کل نقاط نامغلوب فضای حل که در مدت زمان ۲۵۸۲۰ ثانیه با استفاده از روش شمارش کامل به دست آمد، را کشف کردند. به این ترتیب با مشاهده نتایج حاصل از هر سه الگوریتم، می‌توان نتیجه گرفت که توانایی الگوریتم‌ها در دستیابی به جواب‌های پارتویی در ابعاد کوچک و متوسط قابل قبول بوده و انتظار داریم در مسائل با ابعاد بزرگ‌تر، عملکرد مشابهی را نیز شاهد باشیم.



شکل ۲. شبکه پروژه با تعداد ۱۶ فعالیت (مسئله شماره ۳)

جدول ۴. اطلاعات فعالیت های شبکه شکل ۲

داده های زمان، قابلیت اطمینان، هزینه های غیرمستقیم و ریسک							
زمان	قابلیت اطمینان	هزینه بالاسری	هزینه تأخیر (زودکرد)	احتمال وقوع ریسک	شدت تأثیر وقوع ریسک		
[۲,۱۲]	[۰/۹۳,۰/۹۹]	۲۵۰۰	۴۵۰	[۰/۰۵,۰/۳۰]	[۰/۰۲,۰/۲۵]		
داده ها و هزینه منابع							
مقادیر نوع منابع	میزان منابع	حداکثر منابع نوع			هزینه منابع نوع		
		اول	دوم	سوم	اول	دوم	
منابع تجدیدپذیر	[۵,۱۵]	۷۱	۷۵	۷۶	۱۲۰	۸۰	۱۱۵
منابع تجدیدنناپذیر	[۱۵,۴۰]	۴۵۱	۴۶۳	۴۶۲	۵۰۰	۶۵۰	۵۵۰
اطلاعات افزایش فعالیت ها به زیرمجموعه ها، تعداد حالات اجرای و حداکثر فشرده سازی آنها							
شماره زیرمجموعه ها (a)	مجموعه فعالیت ها (H _a)	مجموعه حالت های اجرای	حداکثر میزان فشرده سازی				
۱	{۹,۱۵,۸,۴}	{۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸}	[۰,۵]				
۲	{۱,۳,۶,۱۶}	{۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷}	[۰,۵]				
۳	{۷,۲,۱۰}	{۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۹,۱۰}	[۰,۵]				
۴	{۵,۱۱,۱۳}	{۱,۲,۳,۴,۵,۶}	[۰,۵]				
۵	{۱۲,۱۴}	{۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸}	[۰,۵]				

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی الگوریتم های NSGA-II، NSGA-III و MODA

شماره مسئله	تعداد فعالیت ها	تعداد حالات اجرا	تعداد کل نقاط نامغلوب	مجموع زمان حل (ثانیه)	تعداد جواب های نامغلوب در هر الگوریتم	حداکثر زمان اجرای الگوریتم ها (ثانیه)
۱	۶	[۳,۴]	۳۵	۲۴۴	NSGA-II	۱۳
					MODA	
					NSGA-III	
۲	۱۰	[۴,۷]	۲۸	۲۴۹۷	NSGA-II	۲۵
					MODA	
					NSGA-III	
۳	۱۶	[۶,۱۰]	۴۵	۲۵۸۲۰	NSGA-II	۱۳۵
					MODA	
					NSGA-III	

آزمایش‌های مدل، تنظیم پارامترهای مسئله و الگوریتم‌های NSGA-II، NSGA-III و MODA

به‌منظور یافتن جواب‌های مناسب از مسئله، در ابتدا بایستی پارامترهای الگوریتم‌ها تنظیم شوند. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها، از دو مثال نمونه در ابعاد کوچک و نسبتاً بزرگ استفاده شده است. برای تعیین مقادیر مناسب پارامترهای دو الگوریتم NSGA-II و NSGA-III به این صورت عمل می‌شود که در تکرارهای مختلف اجرای دو الگوریتم، با در نظر گرفتن پارامترها و تعداد جمعیت‌های متفاوت، تعداد جواب‌های پارتویی مختلفی به دست می‌آید که در آن با ثابت نگه داشتن یکی از پارامترها و تغییر پارامتر دیگر، مقادیر پارامترها بر اساس تعداد نقاط نامغلوب شناسایی شده در تعداد تکرار مشخصی، تنظیم شده‌اند. نتایج تنظیم پارامترهای دو الگوریتم NSGA-II و NSGA-III مطابق با جدول ۶ است که در آن n بیانگر تعداد فعالیت‌های پروژه است. شایان ذکر است، برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری از نرم‌افزار MATLAB 2017a روی رایانه‌ای با پردازنده Core i7 2.6 GHz و حافظه داخلی ۸ GB استفاده شده است.

جدول ۶. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و NSGA-III

حداکثر اندازه جمعیت اولیه	نرخ جهش	نرخ تقاطع	نوع الگوریتم	تعداد فعالیت	اندازه مسئله
۱۰n	[۰/۲, ۰/۳]	۰/۵	NSGA-II	۱۶	کوچک
			NSGA-III		
۷n	۰/۷	۰/۴	NSGA-II	۳۰	متوسط الی بزرگ
			NSGA-III		

جدول ۷. مقادیر تنظیم پارامترهای الگوریتم MODA

مقادیر پارامترهای ضرایب عملگرها					پارامتر
مقدار پیشنهادی					
$0.9 - \left(Iter \left((0.9 - 0.2) / \maxIter \right) \right)$					
$0.1 - Iter \left((0.1) / \left(\frac{\maxIter}{2} \right) \right)$					
e	f	c	a	s	مقادیر ضرایب عملگرها شرایط
۰	۲r	۰	۰	۰	$\delta < 0$
δ	۲r	δ	δ	δ	$\frac{3}{4} \maxIter > Iter$
$\delta / Iter$	۲r	$\delta / Iter$	$\delta / Iter$	$\delta / Iter$	$\frac{3}{4} \maxIter \leq Iter$
مقادیر پارامترهای حداکثر ظرفیت آرشیو و تعداد جمعیت اولیه در مسائل با ابعاد کوچک					
مقادیر پیشنهادی					پارامتر
۰/۹Npop	۰/۸۵Npop	۰/۸Npop			حداکثر ظرفیت آرشیو
۱۰n	۸n	۶n			حداکثر تعداد جمعیت اولیه
مقادیر پارامترهای حداکثر ظرفیت آرشیو و تعداد جمعیت اولیه در مسائل با ابعاد متوسط الی بزرگ					
مقادیر پیشنهادی					پارامتر
۰/۹۵Npop	۰/۹۵Npop	۰/۹Npop			حداکثر ظرفیت آرشیو
۱۲n	۱۱n	۱۰n			حداکثر تعداد جمعیت اولیه

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم MODA نیز همانند رویکردی که برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و NSGA-III در پیش گرفته شد، عمل خواهد شد. اما از آنجا که پارامترهای مربوط به ضرایب عملگرها به تعداد (Iter) و حداکثر تکرارهای اجرای الگوریتم ($maxIter$) وابسته هستند، تحلیل حساسیت فقط روی حداکثر ظرفیت آرشیو و تعداد جمعیت اولیه سنجاقک‌ها انجام شده است. نتایج تنظیم پارامترهای الگوریتم MODA مطابق جدول ۷ است که در آن r یک عدد تصادفی در بازه [۰، ۱] است.

معیارهای ارزیابی الگوریتم‌ها

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی، از معیارهای مقایسه‌ای الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه استفاده می‌شود که در حالت کلی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته نخست بر هم‌گرایی و کیفیت و دسته دوم بر پراکندگی و گسترش جواب‌های نامغلوب در فضای حل تأکید دارند. در این مقاله برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از پنج معیار استفاده شده است که در ادامه ارائه خواهند شد:

۱. معیار تعداد جواب‌های پارتویی (NOPS): این معیار، برای مقایسه تعداد جواب‌های نامغلوب حاصل از الگوریتم به کار می‌رود (زیتزلر، دب و تیله^۲، ۲۰۰۰).
۲. معیار بیشترین گسترش (MS)^۳: این معیار برای اندازه‌گیری طول قطر مکعب فضایی که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود، استفاده می‌شود و نحوه محاسبه آن، مطابق رابطه ۲۰ است (زیتزلر^۴، ۱۹۹۹).
۳. معیار میانگین فاصله از جواب ایده‌آل (MID)^۵: این معیار به‌منظور محاسبه میانگین فاصله جواب‌های پارتویی از مبدأ مختصات مطابق رابطه ۲۱ استفاده می‌شود. مقادیر m و n نیز به ترتیب تعداد توابع هدف و تعداد جواب‌های پارتویی را نشان می‌دهند (زیتزلر و تیله^۶، ۱۹۹۸).
۴. معیار تنوع (DM)^۷: این معیار، پراکندگی در بین مجموعه جواب‌های نامغلوب را اندازه‌گیری می‌کند و مطابق رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود. در این رابطه عبارت $\|x_i - y_i\|$ ، فاصله مستقیم بین جواب‌های نامغلوب x_i و y_i را نشان می‌دهد (زیتزلر و تیله^۸، ۱۹۹۸).
۵. معیار ضریب تغییرات چندهدفه (MOCV)^۹: این معیار از تقسیم معیار MID بر معیار DM به دست می‌آید (رحمتی، حاجی‌پور و اخوان نیاکی^۹، ۲۰۱۳).

$$MS = \left(\sum_{j=1}^m (\max f_i^j - \min f_i^j)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \forall i, j \quad \text{رابطه ۲۰}$$

1. Number of Pareto Solution
3. Maximum Spread
5. Mean Ideal Distance
7. Diversification Metric
9. Rahmati, Hajipour & Akhavan Niaki

2. Zitzler, Deb & Thiele
4. Zitzler
6. Zitzler & Thiele
8. Multi Objective Coefficient Variations

$$MID = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_{ji} - f_j^{best})^2} \quad , \forall i, j \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$DM = \left(\sum_{i=1}^n \max (\|x_i - y_i\|) \right)^{\frac{1}{2}} \quad , \forall i \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، NSGA-III و MODA

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها، تعدادی هشت مسئله نمونه با استفاده از مسائل نمونه رایج در حوزه زمان‌بندی پروژه و در ابعاد مختلف طراحی شده‌اند. در تولید داده‌های مسائل، برای آن دسته از پارامترها که نمونه ارائه‌شده آنها در پیشینه پژوهش موجود است (مانند انواع هزینه‌ها، مقادیر انواع منابع و غیره)، از داده‌های مرجع PSPLIB استفاده شده است. اما تولید داده‌ها برای سایر پارامترها (مانند قابلیت اطمینان، احتمال وقوع ریسک و غیره)، بر اساس یک فرایند تصادفی و با رعایت منطق بین آنها انجام گرفته است. برای نمونه مقادیر قابلیت اطمینان، احتمال و شدت تأثیر وقوع ریسک هر فعالیت به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه (۰ و ۱) به طوری تولید شده‌اند که در آنها حالت‌های اجرای غیر منطقی با توجه به مقادیر زمان، هزینه، قابلیت اطمینان و ریسک ایجاد نشود.

نتایج محاسباتی حاصل از حل مسائل تولیدشده با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II، NSGA-III و MODA در جدول ۸ و نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها با معیارهای مقایسه‌ای، در جدول ۹ ارائه شده است. همچنین از نمودار شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای نمایش عملکرد سه الگوریتم در خصوص معیار MOCV و زمان اجرای الگوریتم‌ها در برابر تعداد جمعیت اولیه هر مسئله استفاده شده است. مطابق با جدول ۹، الگوریتم MODA در ارتباط با معیارهای تنوع، بیشترین گسترش و زمان حل، برتری محسوسی در مقایسه با دو الگوریتم دیگر دارد. در حالی که الگوریتم NSGA-III در ارتباط با معیار میانگین فاصله از جواب ایده‌آل، دارای رتبه نخست است و الگوریتم NSGA-II در مسائل با ابعاد بزرگ، در مقایسه با دو الگوریتم دیگر، تعداد جواب‌های پارتویی بیشتری پیدا کرده است. بنابراین اگر تصمیم‌گیرنده به دنبال الگوریتمی است که دارای سرعت هم‌گرایی بالا بوده و قادر به یافتن جواب‌های متنوع و گسترده در جبهه پارتویی باشد، MODA گزینه برتر است. از سوی دیگر، در صورتی که برای تصمیم‌گیرنده، انتخاب جواب‌های باکیفیت مطرح باشد، الگوریتم NSGA-III، گزینه برتر است. در نهایت اگر تصمیم‌گیرنده به دنبال تعداد انتخاب‌های بیشتری در مقایسه با عوامل چهارگانه‌ای همچون هزینه، زمان، ریسک و قابلیت اطمینان باشد، الگوریتم NSGA-II گزینه مناسب‌تری در ابعاد بزرگ و در نتیجه در دنیای واقعی نیز است. همچنین از روی شکل ۷ می‌توان گفت ضریب تغییرات چندهدفه در الگوریتم MODA از دو الگوریتم دیگر کمتر بوده و الگوریتم NSGA-III نیز، در مقایسه با این معیار برتر از الگوریتم NSGA-II، در رتبه دوم است.

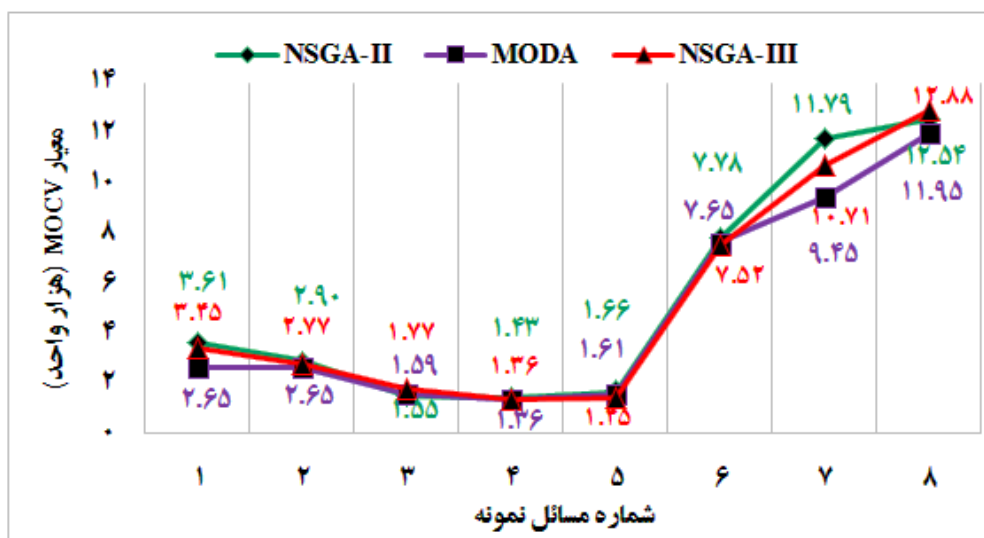
جدول ۸. نتایج محاسباتی الگوریتم های NSGA-II، NSGA-III و MODA

نتایج محاسباتی الگوریتم های NSGA-II، NSGA-III و MODA در ابعاد کوچک، متوسط و نسبتاً بزرگ

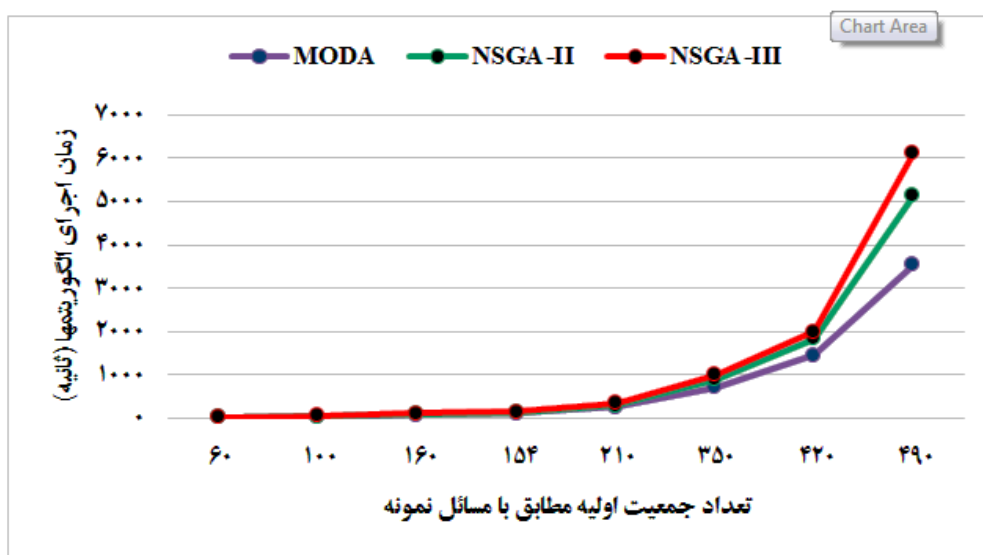
میانگین جواب های پارتویی			بهترین جواب های پارتویی				نوع الگوریتم	شماره مسئله و تعداد فعالیت	
ریسک	هزینه (هزار واحد)	زمان	قابلیت اطمینان	ریسک	هزینه (هزار واحد)	زمان			قابلیت اطمینان
۰/۳۹۸	۳۳۰/۶	۲۷/۸	۰/۸۰۳	۰/۳۸	۳۲۴	۲۶	۰/۸۲	NSGA-II	۱
۰/۳۷۶	۳۲۱/۲	۲۹/۵	۰/۸۲	۰/۳۶	۳۱۸	۲۸	۰/۸۴	MODA	۶ فعالیت
۰/۴۰۱	۳۰۹/۷	۳۱/۴	۰/۸۱۶	۰/۳۷	۳۰۱	۲۹	۰/۸۲	NSGA-III	
۰/۴۶۸	۳۶۳/۲	۶۱/۲	۰/۷۰۲	۰/۴۸	۳۶۶	۵۹	۰/۷۱	NSGA-II	۲
۰/۴۳۱	۳۵۴/۵	۶۳/۸	۰/۷۳۴	۰/۴۵	۳۵۹	۶۳	۰/۷۴	MODA	۱۰ فعالیت
۰/۵۰۶	۳۳۵/۸	۶۵/۳	۰/۷۱۵	۰/۴۹	۳۲۴	۶۴	۰/۷۲	NSGA-III	
۰/۵۶۹	۶۳۱/۷	۸۳/۹	۰/۷۴	۰/۵۶	۶۴۴	۸۳	۰/۷۳	NSGA-II	۳
۰/۵۷۵	۶۴۸/۳	۸۱/۱	۰/۷۰۳	۰/۵۹	۶۶۰	۷۴	۰/۷۱	MODA	۱۶ فعالیت
۰/۶۱۵	۶۲۷/۴	۸۸/۶	۰/۷۲۷	۰/۵۹	۶۲۲	۸۵	۰/۷۳	NSGA-III	
۰/۵۸۲	۵۳۹/۴	۹۹/۷	۰/۶۹۷	۰/۶۰	۵۴۹	۹۵	۰/۶۷	NSGA-II	۴
۰/۶۱۹	۵۳۳/۲	۱۰۰/۱	۰/۷۱۵	۰/۵۹	۵۳۸	۹۶	۰/۶۹	MODA	۲۲ فعالیت
۰/۶۲۳	۵۲۴/۵	۱۰۴/۲	۰/۷۰۴	۰/۶۱	۵۱۷	۱۰۳	۰/۷۰	NSGA-III	
۰/۶۳۸	۱۰۰۱/۴	۱۲۵/۲	۰/۶۹۷	۰/۶۱	۱۰۲۱	۱۲۶	۰/۷۰	NSGA-II	۵
۰/۶۴۹	۱۱۰۶/۹	۱۲۴/۵	۰/۶۸۹	۰/۶۳	۱۱۲۳	۱۲۲	۰/۶۷	MODA	۳۰ فعالیت
۰/۶۷۱	۱۲۲۹/۵	۱۲۰/۳	۰/۶۷۱	۰/۶۶	۱۲۰۸	۱۱۷	۰/۶۸	NSGA-III	
نتایج محاسباتی الگوریتم های NSGA-II، NSGA-III و MODA در ابعاد بزرگ									
میانگین جواب های پارتویی			بهترین جواب های پارتویی				نوع الگوریتم	شماره مسئله و تعداد فعالیت	
ریسک	هزینه (هزار واحد)	زمان	قابلیت اطمینان	ریسک	هزینه (هزار واحد)	زمان			قابلیت اطمینان
۰/۶۸۴	۶۸۹۸/۲	۳۰۱/۳	۰/۶۸۸	۰/۶۶	۶۹۷۰	۲۹۹	۰/۶۷	NSGA-II	۶
۰/۷۰۸	۶۹۱۵/۷	۲۹۸/۵	۰/۶۷۱	۰/۶۸	۷۰۱۰	۲۹۵	۰/۶۵	MODA	۵۰ فعالیت
۰/۷۴۵	۷۱۰۵/۴	۲۸۹/۶	۰/۶۴۳	۰/۷۳	۷۰۶۸	۲۸۳	۰/۶۲	NSGA-III	
۰/۷۱۸	۱۲۸۸۵/۳	۳۵۶/۵	۰/۶۵۸	۰/۷۱	۱۲۹۸۴	۳۵۳	۰/۶۳	NSGA-II	۷
۰/۷۴۶	۱۲۹۸۹/۴	۳۵۳/۲	۰/۶۴۲	۰/۷۳	۱۳۰۷۲	۳۴۹	۰/۵۹	MODA	۶۰ فعالیت
۰/۷۵۸	۱۳۱۰۵/۶	۳۶۳/۸	۰/۵۹۵	۰/۷۴	۱۳۰۲۴	۳۶۰	۰/۵۷	NSGA-III	
۰/۷۸۹	۱۹۴۳۵/۶	۴۱۵/۵	۰/۵۳۵	۰/۸۲	۱۹۴۲۳	۴۱۱	۰/۵۲	NSGA-II	۸
۰/۸۰۸	۱۹۵۶۴/۳	۴۱۰/۶	۰/۴۹۸	۰/۸۴	۱۹۵۸۷	۴۰۵	۰/۴۸	MODA	۷۰ فعالیت
۰/۸۸۹	۱۹۵۹۴/۹	۴۰۱/۴	۰/۴۸۳	۰/۸۷	۱۹۵۹۷	۳۹۲	۰/۴۷	NSGA-III	

جدول ۹. نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، NSGA-III و نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، NSGA-III در ابعاد کوچک، متوسط و نسبتاً بزرگ

نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، NSGA-III و نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، NSGA-III در ابعاد کوچک، متوسط و نسبتاً بزرگ						
شماره مسئله و تعداد فعالیت	نوع الگوریتم	بیشترین گسترش (هزار واحد)	میانگین فاصله از جواب ایده‌آل (هزار واحد)	تنوع	تعداد جواب‌های پارتویی	
۱	NSGA-II	۱۴۹/۹	۳۰۷/۸	۸۵/۲	۲۶	
	MODA	۱۶۱/۳	۳۱۵/۶	۱۱۹/۱	۳۵	
	NSGA-III	۱۳۵/۷	۲۹۸/۲	۸۶/۴	۲۱	
۲	NSGA-II	۱۲۰/۳	۳۶۰/۸	۱۲۴/۴	۲۴	
	MODA	۱۳۹/۴	۳۷۱/۴	۱۴۰/۲	۲۵	
	NSGA-III	۱۰۹/۵	۳۲۵/۸	۱۱۷/۶	۱۹	
۳	NSGA-II	۲۴۰/۱	۶۲۹/۱	۴۰۶/۸	۴۸	
	MODA	۲۵۶/۳	۶۴۱/۲	۴۰۴/۴	۴۱	
	NSGA-III	۲۱۵/۵	۶۱۴/۸	۳۴۷/۳	۴۵	
۴	NSGA-II	۲۴۹/۳	۵۸۹/۳	۴۱۲/۷	۶۷	
	MODA	۲۴۰/۱	۵۸۴/۶	۴۲۹/۵	۷۶	
	NSGA-III	۲۲۰/۱	۵۴۴/۷	۴۰۰/۲	۶۵	
۵	NSGA-II	۴۸۶/۲	۹۹۲/۴	۵۹۹/۱	۹۸	
	MODA	۴۹۹/۷	۹۹۸/۷	۶۱۹/۳	۱۰۹	
	NSGA-III	۴۶۷/۴	۹۴۵/۸	۶۵۱/۸	۱۰۳	
نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، NSGA-III و نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، NSGA-III در ابعاد بزرگ						
شماره مسئله و تعداد فعالیت	نوع الگوریتم	بیشترین گسترش (هزار واحد)	میانگین فاصله از جواب ایده‌آل (هزار واحد)	تنوع	متوسط زمان اجرا (ثانیه)	تعداد جواب‌های پارتویی
۶	NSGA-II	۱۳۱۷	۶۱۳۴	۷۸۸	۹۰۱	۱۳۱
	MODA	۱۴۸۴	۶۱۸۵	۸۰۹	۷۱۵	۱۰۱
	NSGA-III	۱۴۹۸	۶۲۰۴	۸۲۵	۱۰۱۴	۱۳۸
۷	NSGA-II	۲۱۹۳	۱۰۸۷۹	۹۲۳	۱۸۵۲	۱۴۶
	MODA	۲۵۲۱	۱۰۶۵۷	۱۱۲۸	۱۴۳۹	۱۲۸
	NSGA-III	۲۱۲۱	۱۱۰۵۲	۱۰۳۳	۲۰۰۶	۱۲۲
۸	NSGA-II	۲۸۷۶	۱۷۶۵۱	۱۴۰۹	۵۱۲۴	۲۰۵
	MODA	۲۹۰۹	۱۷۶۶۵	۱۴۷۸	۳۵۳۳	۱۸۳
	NSGA-III	۲۸۱۴	۱۷۸۹۴	۱۳۸۹	۶۰۹۴	۱۷۵



شکل ۳. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، MODA، NSGA-III با معیار MOCV



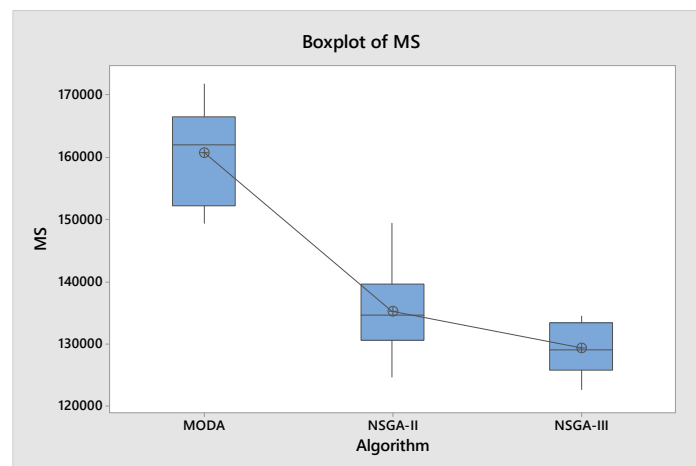
شکل ۴. نمودار مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها در برابر جمعیت اولیه مطابق با مسائل نمونه

با توجه به نتایج حاصل از مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری، ممکن است عملکرد سه الگوریتم در برخی از معیارها و در اندازه‌های مختلف از مسائل نمونه نزدیک به هم به نظر برسد. برای اطمینان از معنادار بودن تفاوت عملکرد الگوریتم‌ها در برخی از معیارهای ارائه‌شده و برخی اندازه‌های مسائل نمونه، با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد بهره گرفته شده است. نتایج در جدول‌های ۱۰ الی ۱۳ و شکل‌های ۵ الی ۸ به ترتیب برای معیارهای MS (در اندازه کوچک)، MID (در اندازه متوسط)، DM (در اندازه بزرگ) و NOPS (در اندازه بزرگ) ارائه شده است که مشاهده می‌شود ادعای برتری هر الگوریتم در معیار معرفی‌شده در قسمت ارزیابی

عملکرد الگوریتم‌ها با نتایج ارائه شده در بخش نتایج تحلیل واریانس مطابق است. همچنین به دلیل کمتر بودن مقدار P-Value از سطح ۰/۰۵ معناداری تفاوت میانگین معیارهای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در تمامی موارد بررسی شده، اثبات می‌شود.

جدول ۱۰. جدول تحلیل واریانس یک طرفه برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها در معیار MS

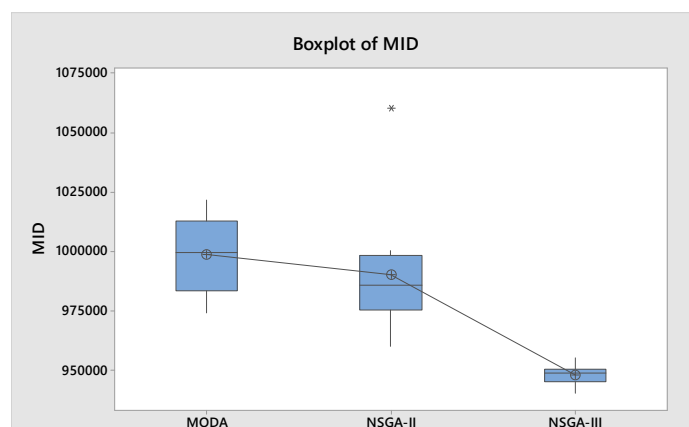
الگوریتم	میانگین (هزار واحد)	انحراف استاندارد (هزار واحد)	F	P-Value
NSGA-II	۱۳۵/۳	۷/۲۳۲	۶۴/۱۸	p<۰/۰۰۱
MODA	۱۶۰/۸۴	۷/۷۸۴		
NSGA-III	۱۲۹/۴	۴/۰۲۹		



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای میانگین مقادیر معیار MS برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

جدول ۱۱. جدول تحلیل واریانس یک طرفه برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها در معیار MID

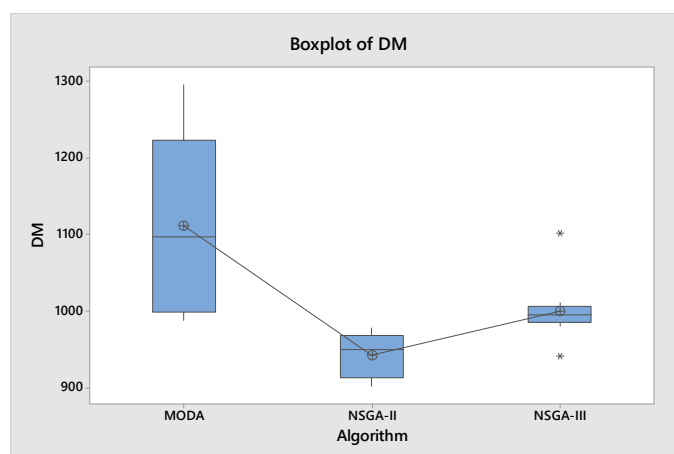
الگوریتم	میانگین (هزار واحد)	انحراف استاندارد (هزار واحد)	F	P-Value
NSGA-II	۹۹۰/۳۴	۲۸/۱۴۲	۲۰/۶۰	p<۰/۰۰۱
MODA	۹۹۸/۷۱	۱۶/۱۰۸		
NSGA-III	۹۴۸/۱۱	۴/۴۶۸		



شکل ۶. نمودار جعبه‌ای میانگین مقادیر معیار MID برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

جدول ۱۲. جدول تحلیل واریانس یک‌طرفه برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها در معیار DM

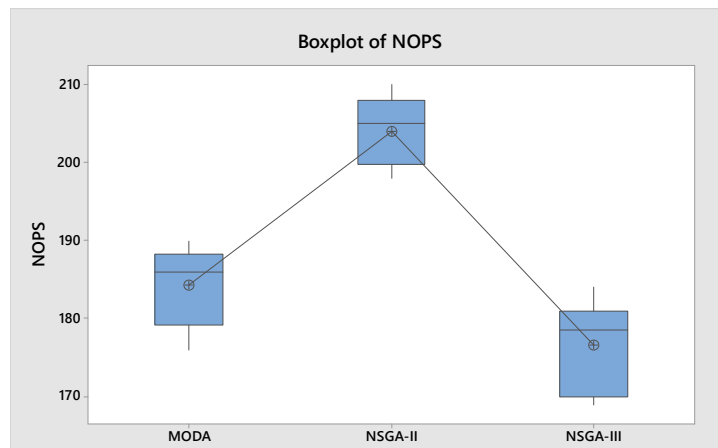
الگوریتم	میانگین	انحراف استاندارد	F	P-Value
NSGA-II	۹۴۳/۱۰	۲۸/۴۳	۱۴/۹۴	p<۰/۰۰۱
MODA	۱۱۱۲/۲۰	۱۱۱/۳۰		
NSGA-III	۱۰۰۰/۸۰	۴۰/۴۰		



شکل ۷. نمودار جعبه‌ای میانگین مقادیر معیار DM برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

جدول ۱۳. جدول تحلیل واریانس یک‌طرفه برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها در معیار NOPS

الگوریتم	میانگین	انحراف استاندارد	F	P-Value
NSGA-II	۲۰/۴	۴/۴۰	۸۱/۴۴	p<۰/۰۰۱
MODA	۱۸۴/۳۰	۴/۹۹		
NSGA-III	۱۷۶/۷۰	۵/۳۸		



شکل ۸. نمودار جعبه‌ای میانگین مقادیر معیار NOPS برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، با لحاظ کردن قابلیت فشرده‌سازی چندگانه به حالت‌های اجرای فعالیت‌های پروژه، به مسئله زمان‌بندی پروژه با اهداف چندگانه قابلیت اطمینان، ریسک، زمان و هزینه در حالت گسسته برای فعالیت‌های چندحالتی پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر توجه شد. همچنین بنا بر شرایطی که ممکن است در دنیای واقعی به وقوع بپیوندد، فعالیت‌هایی که دارای عملیات مشابه اجرا بودند، در زیرمجموعه مشخصی قرار داده شدند و در هر زیرمجموعه، حالات اجرای متعددی برای فعالیت‌های متعلق به آن زیرمجموعه تعریف شد، تا در انتها فعالیت‌های واقع در یک زیرمجموعه، در یک حالت یکسان اجرا شوند. مسئله پیشنهادی به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و ۱ مختلط مدل‌سازی شد که در آن به‌دنبال بهینه‌سازی توابع هدف قابلیت اطمینان، ریسک، زمان و هزینه تکمیل پروژه، در کنار تعدادی محدودیت بودیم. به‌دلیل NP-hard بودن مسئله، از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II، MODA و NSGA-III برای دستیابی به جواب‌های مناسب در زمان منطقی و در ابعاد مختلف استفاده شد و برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها، از تعداد پنج معیار مقایسه‌ای که در مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه به کار می‌روند، استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که لحاظ کردن قابلیت فشرده‌سازی چندگانه در فعالیت‌های پروژه، علاوه بر کنترل تأثیر فشرده‌سازی زمان اجرای فعالیت‌ها بر اهداف پروژه و نظارت بر نحوه و میزان فشرده‌سازی، باعث بهبود در نحوه تخصیص منابع به فعالیت‌های پروژه می‌شود. همچنین اجرای فعالیت‌های متعلق به یک زیرمجموعه در یک حالت یکسان نیز، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل‌ونقل، به‌کارگیری منابع در مناطق مختلف و غیره شد. لحاظ کردن اهداف قابلیت اطمینان و ریسک اجرای پروژه نیز، باعث بهبود در کنترل شرایط غیرقابل پیش‌بینی دنیای واقعی شد. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در حل مدل پیشنهادی، الگوریتم MODA برای یافتن جواب‌های متنوع و گسترده و سرعت هم‌گرایی بالا، الگوریتم NSGA-III برای یافتن جواب‌های با کیفیت بالا و در نهایت الگوریتم NSGA-II در یافتن جواب‌های پارتویی بیشتر در مسائل با ابعاد بالا، برای تصمیم‌گیرنده، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

به‌عنوان مسیرهای تحقیقاتی در آینده می‌توان با در نظر گرفتن پیشامد وقوع ریسک به‌عنوان یک متغیر تصادفی و تعریف یک توزیع احتمالی مناسب و در نظر گرفتن شدت وقوع ریسک در حالت فازی، شرایط ارزیابی و محاسبه ریسک پروژه را به دنیای واقعی نزدیک‌تر کرد. همچنین می‌توان با وابسته کردن قابلیت اطمینان هر فعالیت به اجرا کردن آن در بازه زمانی شروع و ختم فعالیت و نیز در محدوده منابع تخصیص داده‌شده، قابلیت اطمینان هر فعالیت را مبتنی بر برآورده شدن محدودیت‌های زمان، هزینه و منابع محاسبه کرد و سپس برای محاسبه قابلیت اطمینان کل پروژه، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بهره برد. از آنجا که در این مقاله اهداف قابلیت اطمینان و ریسک اجرای پروژه به‌نوعی در راستای کنترل شرایط غیرقابل پیش‌بینی دنیای واقعی لحاظ شده‌اند، بنابراین در نظر گرفتن مسئله در شرایط تصادفی، استوار یا فازی، جالب توجه است. به‌عنوان مسیرهای تحقیقاتی دیگر، در نظر گرفتن دسترسی‌پذیری به منابع در شرایط عدم اطمینان و متغیر بودن سطح دسترسی‌پذیری به منابع می‌تواند مسئله را به شرایط جهان واقعی نزدیک‌تر کند. در نهایت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه برای انتخاب راحت‌تر جواب‌های نامغلوب و به‌کارگیری الگوریتم‌های چندهدفه دیگر که بتواند جواب‌های با کیفیت بالا را در زمان منطقی بیابند، می‌تواند مسیر تحقیقاتی مناسبی برای پژوهشگران باشد.

منابع

- زارعی، مصطفی؛ حسن‌پور، حسینعلی (۱۳۹۴). موازنه زمان - هزینه برای بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پیمانکار با الگوهای پرداخت هزینه و محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی (مطالعه موردی: بخش محدودی از پروژه احداث پالایشگاه میعانات گازی بندرعباس). *مدیریت صنعتی*، ۷(۱)، ۴۳-۶۴.
- شهرخی، محمود (۱۳۹۷). ارائه رویکردی برای محاسبه قابلیت اطمینان فازی بر پایه آهنگ خرابی فازی. *مدیریت صنعتی*، ۱۰(۲)، ۱۸۳-۲۰۰.
- صفری، حسین؛ فقیه، علیرضا (۱۳۹۴). حل مسائل زمان بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده (DICA). *مدیریت صنعتی*، ۷(۲)، ۳۳۳-۳۶۴.
- عالم‌تبریز، اکبر؛ خالدیان، فرنوش؛ مهدی‌پور، مصطفی (۱۳۹۵). پیش‌بینی زمان پروژه از طریق طول زمان کسب‌شده و مدیریت ریسک. *مدیریت صنعتی*، ۸(۲)، ۲۱۷-۲۴۰.

References

- Afshar, A., Zolfaghar Dollabi, H.R. (2014). Multi-objective optimization of time-cost-safety using genetic algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 4 (4), 433-450.
- Alamtabriz, A., Khaledian, F., & Mehdipour, M. (2016). Forecasting project duration by Earned Duration Management and Risk Management. *Journal of Industrial Management*, 8(2), 217-240. (in Persian)
- Blazewicz, J., Lenstra, JK. Rinnoy Kan, A., (1983). Scheduling subject to resource constraints: Classification and Complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5, 11-24.

- Choi, B. Ch., & Park, M.J. (2015). A continuous time-cost trade-off problem with multiple milestones and completely ordered jobs. *European Journal of Operational Research*, 244 (3), 748-752.
- Das, I., Dennis, J. (1998). Normal-boundary intersection: A new method for generating Pareto surface in nonlinear multicriterion optimization problems. *SIAM Journal on Optimization*, 8 (3), 631-657.
- De, P., Dunne, E.J., Ghosh, & J.B., Wells, C.E. (1997). Complexity of the discrete time-cost trade-off problem for project network. *Operations Research*, 45 (2), 302-306.
- Deb, K., & Jain, H. (2014). An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, Part I: Solving problems with box constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18 (4), 577-601.
- Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE*, 6 (2), 182-197.
- Erenguc, SS., Ahn, T., & Conway, DG. (2001). The resource - constrained project scheduling problem with multiple crashable modes: An exact solution method. *Naval Research Logistics*, 48 (2), 107-27.
- Fulkerson, D.R. (1961). A network flow computation for project cost curves. *Management Science*, 7 (2), 167-178.
- Garey, MR., & Johnson, DS. (1979). *Computers and intractability*. San Francisco Freeman.
- Ge, Q., Peng, H., Houtum, G., & Adan, I. (2018). Reliability optimization for series systems under uncertain component failure rates in the design phase. *International Journal of Production Economics*, 196, 163-175.
- Gladysz, B., Skorupka, D., Kuchta, D., & Duchaczek, A. (2015). Project risk time management- a proposed model and a case study in the construction industry. *Procedia Computer Science*, 64, 24-31.
- Gong, C., Zhou, W., (2017). Improvement of equivalent component approach for reliability analyses of series systems. *Structural Safety*, 68, 65-72.
- He, Zh., He, H., Liu, R., & Wang, N. (2017). Variable neighbourhood search and tabu search for a discrete time-cost trade-off problem to minimize the maximal cash flow gap. *Computers and Operations Research*, 78, 564-577.
- Hindelang, T.J., & Muth, J.F. (1979). A dynamic programming algorithm for decision CPM networks. *Operations Research*, 27 (2), 225-241.
- Kelly, J.E. Jr, (1961). Critical path planning and scheduling: Mathematical basis. *Operations Research*, 9 (3), 296-320.
- Lova, A., Tormos, P., & Barber, F. (2006). Multi mode resource - constrained project scheduling: scheduling schemes, priority rules and mode selection rules. *Intelinencia Artificial*, 30, 69-86.
- Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural Computing and Applications*, 27 (4), 1053-1073.

- Muriana, C., & Vizzini, G. (2017). Project risk management: A deterministic quantitative technique for assessment and mitigation. *International Journal of Project Management*, 35 (3), 320-340.
- Muritiba, A., Rodrigues, C., & Costa, F., (2018). A path - relinking algorithm for the multi-mode resource - constrained project scheduling problem. *Computer and Operations Research*, 92, 145-154.
- Nwaneri, S.C., Anyaeche, C.O. (2014). An investigation of time-cost-risk trade-off in the installation of X-Ray machine using response surface methodology. *Nigerian Journal of Technology*, 33 (4), 482-489.
- Paryzad, B., & Shahsavari Pour, N. (2016). Time-cost-quality-risk trade-off in GIGA projects using specific techniques of hunting dolphins. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 22 (4), 484-499.
- PMI Project Management Institute. A Guide to Project Management Body of Knowledge, (*PMBOK Guide*) - Sixth Edition, (2017).
- Rahmati, S.H.A., Hajipour, V., & Akhavan Niaki, S.T. (2013). A soft-computing pareto-based meta-heuristic for a multi-objective multi-server facility location problem. *Applied Soft Computing*, 13 (4), 1728-1740.
- Safari, H., & Faghih, A. (2015). Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) Using Developed Imperialistic Competition Algorithm (DICA). *Journal of Industrial Management*, 7(2), 333-364. (in Persian)
- Salewski, F., Schirmer, A., & Drexel, A. (1997). Project scheduling under resource and Mode - Identity constraints: Model, Complexity, *Methods and Application*. *European Journal of Operational Research*, 102, 88-110.
- Saputra, YA., & Latiffianti, E. (2015). Project reliability model considering time-cost-resource relationship under uncertainty. *Procedia Computer Science*, 72, 561-568.
- Shahrokhi, M. (2018). Developing an Approach to Calculate Fuzzy Reliability Based on Fuzzy Failure Rate. *Journal of Industrial Management*, 10(2), 183-200. (in Persian)
- Slowinsky, R., Soniewicki, B., & Weglarz, J. (1994). DSS for multi objective project scheduling. *European Journal of Operational Research*, 79, 220-229.
- Szmerekovsky, J.G., & Venkateshan, P., (2012). An integer programming formulation for the project scheduling problem with irregular time-cost trade-offs. *Computers and Operations Research*, 39 (7), 1402-1410.
- Talbot, F.B. (1982). Resource-constrained scheduling with time-resource trade-offs: The nonpreemptive case. *Management Science*, 28 (10), 1197-1210 .
- Tavana, M., Li, ZH., Mobin, M., Komaki, M., & Teymourian, E. (2016). Multi-objective control chart design optimization using NSGA-III and MOPSO enhanced with DEA and TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 50, 17-39.
- Vanhouck, M., & Debels, D. (2007). The discrete time-cost trade off problem: extensions and heuristic procedures. *Journal of Scheduling*, 10 (4-5), 311-326.
- Wang, G., Duan, F., & Zhou, Y. (2018). Reliability evaluation of multi-state series systems with performance sharing. *Reliability Engineering and System Safety*, 173, 58-63.

- Xie, Y.L., Xia, D.H., Ji, L., Zho, W.N., & Huang, G.H. (2017). An inexact cost-risk balanced model for regional energy structure adjustment management and resources environmental effect analyses- a case study of Shandong province, China. *Energy*, 126, 374-391.
- Zarei, M., & Hasanpour, H. (2015). Time-cost trade-off to maximization the net present value of contractor using evolutionary algorithms with patterns of payment and resource constraints. *Journal of Industrial Management*, 7(1), 43-64. (in Persian)
- Zhu, G., Bard, J., & Tu, G. (2006). A branch and cut procedure for the multi mode resource – constrained project scheduling problem. *Journal of Computing*, 18 (3), 377-390.
- Zitzler, E. (1999). Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications. *Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Diss. ETH No. 13398*.
- Zitzler, E., Deb, K., & Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary Computation*, 8 (2), 172-195.
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). An evolutionary algorithm for Multiobjective optimization: The strength Pareto approach. Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), *Swiss Federal Institute of Technology (ETK), TIK Report*, 43.
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). Multiobjective optimization using evolutionary algorithms – A comparative case study. In: Eiben A.E., Back, T., Schoenauer, M., Schwefel, HP. (eds) *Parallel problem solving from nature – PPSN V. PPSN 1998 Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg*, 1498, 292-301.