



Time-Cost-Resource Optimization of Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows using Multi-objective Gravitational Search Algorithm

Fatemeh Paidar, Bezad Ashtiani* & Reza Tavakkoli-Moghaddam

Fatemeh Paidar, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University.

Bezad Ashtiani, Department of Industrial Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University.

Reza Tavakkoli-Moghaddam, Professor of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran.

Keywords

**Resource-constrained
Project Scheduling,
Multi-objective
Optimization,
Resource Leveling,
Discounted Cash Flows,
Gravitational Search
Algorithm.**

ABSTRACT

Resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) is the basis of scheduling problems in operations research. In order to have more realistic model, the problem is studied with objectives of time, cost and a modified objective of resource leveling with discounted cash flows and several modes of execution for activities. Since the problem is an NP-hardness, various kinds of heuristic and meta-heuristic methods have been proposed by many researchers to present the more efficient solution. The gravitational search algorithm is one of meta-heuristics introduced in recent years. Due to single-objective and continuity of the decision space, this algorithm has not been used to the multi-objective discrete RCPSPs. In this paper, multi-objective gravitational search algorithm (MOGSA) is proposed for solving the given problem. The performance of the proposed MOGSA is compared with a well-known NSGA-II algorithm in terms of some indices for several small and large-sized PSPLIB test problems. The results show the proposed MOGSA outperforms the NSGA-II.

©2017 IUST Publication, IJIEPM Vol. 28, No. 1, All Rights Reserved



بهینه‌سازی زمان-هزینه-منبع مسأله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع و جریان‌های نقدی تنزیل‌یافته با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی چندهدفه

فاطمه پایدار، بهزاد آشتیانی* و رضا توکلی مقدم

چکیده:

مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود، مسأله پایه مسائل زمانبندی در زمینه تحقیق در عملیات می‌باشد. به منظور واقعی‌تر شدن مدل، مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود با توابع هدف در زمینه‌های زمان، هزینه و تابع هدف تعدیل شده‌ای در زمینه منابع با توجه به جریان‌های نقدی تنزیل‌یافته وجود چندین حالت اجرائی برای انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است. در پی ماهیت NP-hard بودن این مسائل، همواره روش‌های ابتکاری و فراابتکاری بسیاری توسط محققین این حوزه به منظور ارائه حل کارا تر پیشنهاد شده‌اند. الگوریتم جستجوی گرانشی، یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری است که در سال‌های اخیر معرفی شده است. این الگوریتم به علت تک‌هدفه بودن و پیوستگی فضای حل، تاکنون در مسائل چندهدفه گسسته زمانبندی پروژه با منابع محدود به کار برده نشده است. در این مقاله، الگوریتم جستجوی گرانشی چندهدفه (MOGSA) برای حل مسأله ارائه شده است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مسائل متعدد در اندازه‌های بزرگ و کوچک از مسائل PSPLIB، با الگوریتم شناخته شده NSGA-II در چند معیار مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی به نسبت الگوریتم NSGA-II می‌باشند.

کلمات کلیدی

زمانبندی پروژه با منابع محدود، بهینه‌سازی چند هدفه، تسطیح منابع، تنزیل جریان‌های نقدی، الگوریتم جستجوی گرانشی.

می‌شوند [۳]، به لحاظ خصوصیات مربوط به فعالیت‌ها، منابع و توابع هدف بسیار متنوع‌اند [۴]. از توابع هدف عمومی می‌توان به زمان اتمام پروژهⁱⁱ در این مسائل اشاره کرد. با این وجود در واقعیت این توابع هدف براساس نیاز سازمان و نظر خبرگان و مدیران ارشد تعیین می‌شوند. با توجه به شرایط متفاوت کاربردی، وجود اهداف متفاوت در این دسته از مسائل بدیهی است. بکارگیری هم‌زمان اهداف در بسیاری از تحقیقات این زمینه مورد نظر قرار گرفته است [۵]. در این تحقیق نیز به منظور کاربردی‌تر شدن مدل، مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود با توابع هدف در زمینه‌های زمان، هزینه و تابع هدف تعدیل شده‌ای در زمینه منابع با لحاظ کردن شرایط تنزیل جریان‌های نقدیⁱⁱⁱ وجود چندین حالت اجرائی برای انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است.

۱. مقدمه

مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود (RCPSP)، به دنبال تعیین توالی زمانی یا برنامه زمانبندی جهت انجام یکسری فعالیت‌های وابسته تشکیل‌دهنده پروژه با در نظر گرفتن تعدادی محدودیت می‌باشد [۱]. اولین فرمول‌بندی این مسائل که از دهه ۱۹۵۰ مورد توجه محققین این حوزه قرار گرفته‌اند، در سال ۱۹۶۹ ارائه شد [۲]. این نوع مسائل که از جمله مسائل NP-Hard تلقی

تاریخ وصول: ۹۳/۰۸/۰۳

تاریخ تصویب: ۹۴/۰۲/۰۹

فاطمه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی صنایع، f.paidar@srbiau.ac.ir
*نویسنده مسئول مقاله: بهزاد آشتیانی، استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی صنایع، b.ashtiani@srbiau.ac.ir
رضا توکلی مقدم، استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، tavakoli@ut.ac.ir

برای حل مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود چندحالتی با جریان‌های نقدی مثبت و منفی و توابع هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی و پایداری و کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه چندهدفه^x (MOPSO) ترکیب شده با اپرتورهای ژنتیکی ارائه شد که در مقایسه با الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری داشت [۱۳]. در مسأله دو هدفه‌زمانبندی پروژه با منابع محدود با توابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام و بیشینه‌سازی پایداریو زمان‌های اجرای تصادفی، الگوریتم تکاملی چندهدفه تلفیقی^{xi} (H-MOEA) بر مبنای الگوریتم NSGA-II ارائه شد [۱۴]. در این الگوریتم دو رویه با عنوان استخراج اطلاعات و استفاده از اطلاعات به طور یکپارچه در نظر گرفته شد به طوری که ابتدا اطلاعات هیوریستیک به طور دوره‌ای از جواب‌های نامغلوب تخمینی تولید شده، بدست آمد و سپس اطلاعات بدست آمده در فرآیند جستجوی محلی برای بهبود جواب‌های جمعیت استفاده شد. در مسأله موازنه هزینه- زمان گسسته چندحالتی، در حالت زمان فازی با توابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام و هزینه کل پروژه که در محاسبه آن هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم در نظر گرفته شد، الگوریتم ژنتیک تعدیل یافته AFDGAⁱ ارائه شد که با چهار الگوریتم NSGA-II، MOIWOⁱⁱⁱ،^{xv}NRGA و^{xvi}PAES در تعدادی معیار مقایسه و کارایی آن اثبات شد [۱۵].

الگوریتم^{xvi} PAEDA برای حل مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود و هدف‌های با در نظر گرفتن تابع هدف زمان اتمام پروژه و تابع هدف سرمایه‌گذاری منابع^{xvi} (RI) ارائه شد [۱۶]. روند تکاملی در نظر گرفته شده برای این الگوریتم شناسایی نواحی امیدبخشی از فضای جستجو را در پی داشت که مشتمل بر سه بخش بود: (۱) ارائه رویه نمایش لیست فعالیت-منبع با ترکیب لیست فعالیت و لیست منبع، (۲) طراحی مدل ترکیبی احتمالی جدیدی برای پیش‌بینی امیدبخش‌ترین جایگشت فعالیت‌ها و ظرفیت منابع و (۳) توسعه مکانیزم نمونه‌گیری و روزرسانی جدیدی برای مدل احتمالی به منظور جستجوی ناحیه جواب‌های امیدبخش. همچنین در این الگوریتم، یک آرشیو پارتو برای نگهداری جواب‌های نامغلوب یافته شده و آرشیو دیگری برای نگهداری جواب‌ها به منظور بروز رسانی مدل احتمالی در نظر گرفته شدند. در نهایت این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های NSGA-II و RAND^{xviii} نتایج بهتری در پی داشت. مدلی برای یک

برای حل این مسائل تاکنون از روش‌های مختلفی استفاده شده است. در بعضی موارد، از انواع روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه از جمله برنامه‌ریزی آرمانی^v استفاده شده [۶] و در مواردی یک تابع هدف گاهی به صورت مجموع وزنی اهداف در نظر گرفته شده است [۷]، اما به دلیل پیچیدگی این نوع مسائل در بسیاری از موارد استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری به چشم می‌خورد. تاکنون روش‌های ابتکاری و فراابتکاری متعددی برای حل این مسائل پیشنهاد شده است. علاوه بر آن، محققین همواره به دنبال بهبود در این روش‌ها به منظور ارائه حل کارا تر با معیارهای مختلف از جمله زمان حل و کیفیت جواب بوده‌اند. در مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود چندحالتی با توابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه، میزان انحرافات از میانگین میزان استفاده از منابع تجدیدپذیر و کل هزینه منابع تجدید ناپذیر، حل پیشنهادی شامل دو مرحله بود [۸]. در مرحله اول از الگوریتم^v PSA برای ساختن زمانبندی‌های نامغلوب و در مرحله دوم از الگوریتم^{vi} LBS برای سازماندهی جستجو در اطراف جواب‌های تولید شده مرحله قبل استفاده شد. الگوریتم‌های چندهدفه PSA و^{vi} MOTS برای حل مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود چندحالتی با توابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه، میانگین میزان مصرف بیشتر از میانگین منابع تجدیدناپذیر و میانگین تأخیرهای وزنی به کار برده شدند [۹]. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) در مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود چندحالتی برای بهینه‌سازی اهداف کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه و همواری میزان مصرف منابع به کار گرفته شد [۱۰]. الگوریتم فراابتکاری بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل چهار مدل پرداخت متفاوت برای جریان‌های نقدی مثبت که در مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود چندحالتی با توابع هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی و کمینه‌سازی هزینه‌های نگهداری از فعالیت‌های اتمام یافته تا زمان اتمام پروژه در نظر گرفته شدند، ارائه شد [۱۱]. الگوریتم ژنتیکی دو مرحله‌ای برای حل یک مسأله تسطیح منابع پیشنهاد شد به طوری که در مرحله اول، یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه به عنوان مکانیزم اصلی حل ارائه شد و در مرحله دوم، یک روش فراابتکاری بر مبنای همان الگوریتم اصلی که بهبود تسطیح منابع چندهدفه^x (MORLI) به آن تخصیص یافته بود، پیشنهاد شد [۱۲].

به کارگیری این تابع شیوه پرداختی که به منظور افزایش ارزش پول از دیدگاه پیمانکار پروژه لحاظ شده، در نظر گرفته شده است. در این شیوه پرداخت، جریان‌های نقدی مثبت از طریق کارفرما در زمان شروع فعالیت‌ها وارد پروژه شده و جریان‌های نقدی منفی از جانب پیمانکار با عنوان هزینه در زمان اتمام فعالیت‌ها از پروژه خارج می‌شوند. در محاسبه جریان‌های نقدی، تنزیل ارزش پول نیز به منظور نزدیک شدن هر چه بیشتر به شرایط کاربردی در مدل مسأله در نظر گرفته شده است. در ادامه این بخش، چگونگی محاسبه جریان‌های نقدی پروژه و تابع هدف در نظر گرفته شده منابع تشریح شده و در آخر مدل مفهومی مسأله ارائه می‌شود.

۲-۱. محاسبه جریان‌های نقدی مثبت و منفی

در محاسبه جریان‌های نقدی منفی توجه به مدهای اجرائی فعالیت‌ها لحاظ شده است، زیرا در هر مد اجرائی از هر منبع به میزان خاصی استفاده می‌شود، به طوری که مد اجرائی بهتر از زمان انجام کمتری برخوردار است. در نتیجه هزینه استفاده از منبع آن متفاوت از مد اجرائی بدتر فعالیت خواهد بود. هزینه هر فعالیت، مجموع هزینه‌های استفاده از منابع مورد استفاده آن است که از ضرب میزان استفاده از منبع توسط آن فعالیت و ضریب هزینه استفاده از هر واحد منبع به دست می‌آید. ضریب واحد هزینه برای منبع اول ۰.۵ و برای منبع دوم ۱.۵ در نظر گرفته شده است. پس از تعیین هزینه هر فعالیت با توجه به اینکه از کدام مد اجرائی برای انجام آن استفاده شده، میزان هزینه‌کرد نهائی متفاوت است به طوری که هزینه انجام فعالیت در مد اجرائی بهتر به لحاظ کمتر بودن زمان انجام به نسبت مد اجرائی بدتر یعنی افزایش زمان انجام آن بیشتر خواهد بود. بنابراین اعداد تولید شده در ضریب هزینه (IC_m) که براساس مد اجرائی تعیین کننده است طبق فرمول زیر محاسبه می‌شوند.

$$CF_{jm}^- = IC_m \times \text{هزینه هر فعالیت} \quad (1)$$

به طوری که برای سه مد اجرائی این ضرایب به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{cases} IC_1 = 1.75 \\ IC_2 = 1.25 \\ IC_3 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

از آنجا که برای محاسبه جریان‌های نقدی مثبت اگر مقدار پرداخت شده کارفرما از هزینه انجام پروژه بیشتر باشد، پیمانکار توجیه اقتصادی برای قبول و انجام پروژه نخواهد داشت، در تولید اعداد مربوطه بیشترین هزینه مربوط به مدهای اجرائی فعالیت‌ها

مسأله موازنه زمان-هزینه-منبع گسسته چندحالتی که به طور هم زمان مدل‌های چندحالتی، موازنه هزینه-زمان و تسطیح منابع را در نظر گرفته، ارائه شد و توسط الگوریتم NSGA-II تعدیل-یافته‌ای حل شد [۱۷]. در این میان تاکنون، استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی xi^x (GSA) صورت نگرفته است. این الگوریتم که در سال ۲۰۰۹ توسط راشدی و همکاران [۱۸] ارائه شد، بر اساس قانون گرانشی بین اجرام نیوتن استوار است. هر چند الگوریتم پیشنهادی آن‌ها برای مسأله تک‌هدفه طراحی شده، اما نسخه هائی از این الگوریتم در حالت چندهدفه نیز ارائه شده که در نهایت عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم NSGA-II داشته اند [۱۹، ۲۷]. از آنجا که این الگوریتم ذاتاً از فضای پیوسته برخوردار است، در حل مسأله حاضر در پی آنیم که شبیه‌سازی از مکانیزم آن از این فضا در فضای حل گسسته صورت گیرد. همچنین برای بررسی چگونگی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم NSGA-II که در سال ۲۰۰۲ توسط دب [۲۰] ارائه شد، استفاده شده است.

در تحقیق حاضر، مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود با سه تابع هدف در زمینه زمان، هزینه و تابع هدف تعدیل شده‌ای در زمینه منابع در نظر گرفته شده است. در ابتدا در بخش ۲، مدل مسأله با تشریح تمامی مفروضات حاکم بر آن مطرح شده و سپس در بخش ۳، با اشاره‌ای بر مکانیزم حل الگوریتم جستجوی گرانشی، روش حل پیشنهادی مسأله ارائه می‌شود. در بخش ۴، پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های حل مسأله توسط روش تاگوچی، به ارائه نتایج محاسباتی حل مسائل متعدد در نظر گرفته شده در شرایط مختلف پرداخت می‌شود و در نهایت نتایج حاصل به کمک چندین معیار مقایسه الگوریتم‌های چندهدفه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین بخش ۵، به نتیجه‌گیری کلی اختصاص یافته است.

۲. مسأله تحقیق

مسأله تحقیق حاضر مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود با در نظر گرفتن چند مد اجرائی برای انجام هر فعالیت، با سه تابع هدف زمان اتمام پروژه، ارزش خالص فعلی و تابع هدفی در راستای هدف کمینه‌سازی مجموع قدر مطلق انحرافات از میانگین منابع که در مسائل تسطیح منابع مطرح است، در نظر گرفته شده است. به منظور کاربردی‌تر شدن مدل با توجه به محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه بر مبنای شیوه‌های پرداخت مختلف در عمل [۲۸]، در

در نرخ سود^{xx} توجیح‌پذیر $IR = 1.5$ ضرب شده و در نهایت این مقادیر به صورت زیر محاسبه شده‌اند:

$$CF_i^+ = [Max\{CF_{im}^-\} \times IR] \quad (3)$$

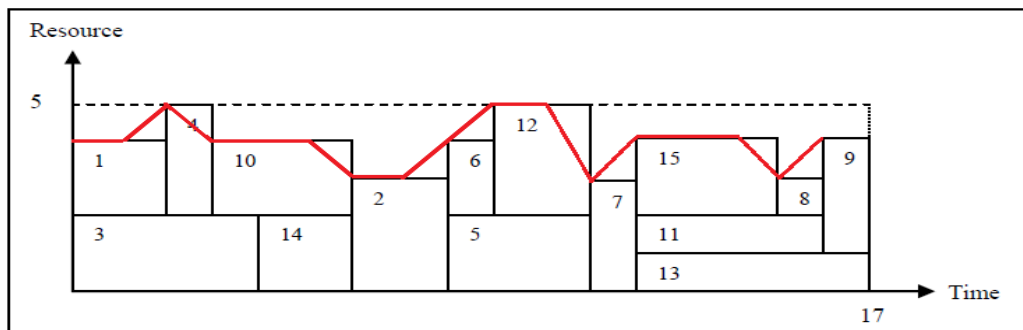
۲-۲. تابع هدف منابع

تابع هدف ارائه شده در زمینه منابع با هدف استفاده بیشتر منابع در هر بازه زمانی به منظور کاهش زمان اتمام پروژه در کنار هدف تسطیح منابع، پیشنهاد شده است. در شکل (۱) که فعالیت‌های یک پروژه با محدودیت منبع تجدیدپذیر را نشان می‌دهد، با متصل شدن نقاط میزان استفاده تجمعی فعالیت‌های فعال در هر لحظه از منبع به هم، یک منحنی فرضی حاصل شده است. نزدیک‌تر شدن این نقاط به خط میانگین، تضمینی بر هموارسازی سطوح استفاده از منبع در کل زمان اجرای پروژه و نزدیک‌تر شدن خط میانگین به خط محدودیت منبع، تضمینی بر استفاده بیشتر از منبع

موردنظر خواهد بود. بنابراین محاسبه نقاط کمینه و بیشینه منحنی فرضی به منظور دستیابی به هدف تسطیح منابع به جای تمامی نقاط میزان استفاده از منابع در هر لحظه کافی به نظر می‌رسد. همچنین تضمین شرط استفاده بیشتر از منابع، مستلزم اضافه‌شدن ضریبی با عنوان تفاضل مقدار محدودیت منبع از مقدار میانگین نقاط استفاده از منبع است. در نهایت تابع هدف تعدیلی منابع به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{K}{\sqrt{\quad}} \quad (4)$$

و $W_k = RC_k - \bar{R}_k$ فاصله خط میانگین از خط محدودیت منبع k است. همچنین K تعداد منابع، RC_k مقدار محدودیت منبع k مجموعه نقاط کمینه و بیشینه منحنی فرضی، \bar{R}_k میزان استفاده از منبع در نقاط موردنظر (مجموعه A) و \bar{R}_k میانگین استفاده از منبع k در کل زمان اجرای پروژه می‌باشند.



شکل ۱. منحنی فرضی میزان استفاده تجمعی فعالیت‌های فعال در هر لحظه از منبع

۲-۳. مدل مسأله

با توجه به مفروضات ارائه شده، متغیرها، اندیس‌ها و پارامترهای مدل مفهومی مسأله به صورت زیر ارائه می‌شوند:

n : تعداد فعالیت‌ها

z : شاخص فعالیت

m : شاخص مد

M_j : مجموعه مدهای اجرائی فعالیت j ام، $j = 1, \dots, n$

P_j : مجموعه پیشنیازهای مستقیم فعالیت j ام، $j = 1, \dots, n$

t : شاخص زمان

d_{jm} : زمان انجام فعالیت j ام در مد m ام، $j = 1, \dots, n$ و

$M_j = 1, \dots, m$

EF_j : زودترین زمان اتمام فعالیت j ام

LF_j : دیرترین زمان اتمام فعالیت j ام

T : افق زمانبندی پروژه (حد بالای افق زمانبندی برابر با مجموع حداکثر زمان انجام فعالیت‌هاست)

α : نرخ تنزیل

S_j : زمان شروع فعالیت j

CF_{jm}^- : پرداختی پیمانکار (هزینه فعالیت j) در مد m ام

C_j : زمان اتمام فعالیت j

CF_j^+ : پرداختی کارفرما (عایدی حاصل از انجام فعالیت)

R : تعداد انواع منابع تجدیدپذیر

k : شاخص منابع

R_k^p : میزان در دسترس منبع تجدیدپذیر k ام، $k = 1, \dots, R$

میزان موردنیاز فعالیت z امدر m از منبع تجدیدپذیر k x_{jmk}^p با توجه به علائم اختصاری ارائه شده مدل مفهومی مسأله به صورت زیر قابل بیان است:

$$x_{jmk} = \begin{cases} 1, & \text{فعالیت } z \text{ در مد } m \text{ انجام شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

Min C_{max}	(۵)
$\text{Max} \sum_{j=1}^n \frac{CF_j^+}{(1+\alpha)^{S_j}} - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} \frac{CF_{jm}^-}{(1+\alpha)^{C_j}} x_{jmk}$	(۶)
$\text{Min} \sum_{k=1}^K w_k \sum r_{kt} - \bar{r}_k $	(۷)
s.t.	
$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} = 1, \forall j$	(۸)
$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_w}^{LF_w} t \cdot x_{wmt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_{jm}) \cdot x_{jmt}, \forall j, \forall w \in P_j$	(۹)
$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_n}^{LF_n} t \cdot x_{nmt} \leq T$	(۱۰)
$T \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{j=1}^n \max\{d_{jm}\}$	(۱۱)
$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} r_{jmk}^p \sum_{b=t}^{t+d_{jm}-1} x_{jmb} \leq R_k^p, \forall k, t$	(۱۲)
$x_{jmt} \in \{0,1\}, \forall j, m, t$	

فعال در آن زمان، کمتر یا مساوی مقدار در دسترس در نظر گرفته شده R_k^p برای آن‌ها می‌باشد.

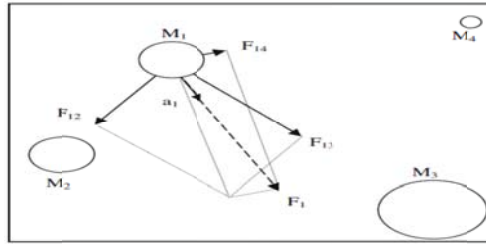
۳. رویکرد حل مسأله

در این بخش، در ابتدا مکانیزم کار الگوریتم جستجوی گرانشی تشریح می‌شود. در ادامه به بیان نحوه تولید جمعیت اولیه الگوریتم‌های حل مسأله پرداخته و در نهایت ساختار الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌گردد.

۳-۱. الگوریتم جستجوی گرانشی

این الگوریتم توسط راشدی و همکاران [۱۸]، بر مبنای قانون گرانشی نیوتن بین اجرام بیان شده است. در این الگوریتم موقعیت هر جرم منطبق با پاسخ مسأله می‌باشد. به هر جرم با توجه به شکل (۲) [۱۸]، نیروهایی از طرف دیگر اجرام فضا وارد شده که با شتابی حاصل از برآیند این نیروها تغییر مکان می‌یابد. به این طریق جستجوی اجرام در فضای جستجو صورت می‌گیرد. در ادامه ساختار این الگوریتم تشریح می‌شود.

در مدل فوق روابط (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب توابع هدف زمان، هزینه و منابع تجدیدپذیرند. محدودیت‌های (۸)، تضمین می‌کنند که هر فعالیت تنها در یک مد اجرائی و در زمانی بین زودترین زمان اتمام و دیرترین زمان اتمام آن انجام گردد. محدودیت‌های (۹)، ارضاکنده روابط پیشنیازی بین فعالیت‌های پروژه‌اند. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که زمان شروع هر فعالیت z ، پس از زمان اتمام تمامی فعالیت‌های پیشنیازش که در مجموعه W قرار دارند، باشد. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱)، الزام می‌نمایند که پروژه در افق زمانبندی آن اتمام یابد. از آنجا که هر فعالیت توسط چند مد قابل انجام است، حد بالایی به عنوان افق زمانبندی که برابر با مجموع حداکثر زمان انجام فعالیت‌ها براساس مدهای اجرائی آنهاست، در نظر گرفته شده است. به موجب این مجموعه محدودیت‌ها زمانبندی فعالیت‌ها به گونه‌ای صورت می‌گیرد که در نهایت پروژه در زمانی کمتر یا مساوی این زمان پایان یابد. همچنین مجموعه محدودیت‌های (۱۲)، مربوط به منابع تجدیدپذیرند. براساس این محدودیت‌ها، مجموع استفاده از این منابع در هر بازه زمانی از انجام پروژه توسط تمامی فعالیت‌های



شکل ۲. نیروی گرانشی وارد بر اجرام و شتاب حاصل از آن

معین t ، نیروی وارد از جرم i ام به جرم j ام در بعد d ام با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

فرض می‌کنیم جرم i ام با بردار $X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n)$ که x_i^d موقعیت آن در بعد d ام است، نشان داده شود. در یک زمان

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (13)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1, 2, \dots, N\}} (fit_j(t)) \quad (19)$$

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (20)$$

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (21)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (22)$$

همچنین برای بهبود عملکرد این الگوریتم تنها K جرم از بهترین اجرام (تابع برازش بهتر)، برای اعمال نیرو بر اجرام دیگر در نظر گرفته می‌شوند که مقدار K ، تابعی از زمان با مقدار اولیه k_0 است و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در نتیجه فرمول (۱۴) به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K, j \neq i} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (23)$$

فلوچارت این الگوریتم در شکل (۳) ارائه شده است. از آنجا که الگوریتم جستجوی گرانشی برای مسائل تک هدفه طراحی شده و از فضایی پیوسته برخوردار است، به منظور حل مسأله تحقیق حاضر در پی آنیم که شبیه‌سازی از مکانیزم آن از این فضا در فضای حل گسسته صورت گیرد. در ادامه نحوه تولید جمعیت اولیه الگوریتم‌ها بیان می‌شود.

۳-۲. نحوه تولید جمعیت اولیه الگوریتم‌ها

در این تحقیق، در کدگذاری جواب‌های الگوریتم‌ها، هر جواب شامل دو سطر است. سطر اول نمایانگر توالی فعالیت‌ها و سطر دوم بیانگر مد اجرایی مربوط به آن‌هاست [۲۱]. سطر اول جواب که توالی فعالیت‌هاست با رعایت روابط پیشینازی بین آن‌ها به کمک روشی ابتکاری RBRS^{xxi} تولید می‌شود [۲۲]. در این روش

که $M_{aj}(t)$ جرم گرانشی فعال^{xxi} مربوط به عامل j ام در زمان t ، $M_{pi}(t)$ جرم گرانشی غیرفعال^{xxi} مربوط به عامل i ام در زمان t ، $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t ، ε یک ثابت کوچک و $R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_2$ فاصله اقلیدسی بین دو عامل i ام و j ام در زمان t است. بنابراین نیروی برآیند وارد بر عامل i ام در بعد d ام، یک جمع وزن‌دهی شده به صورت تصادفی از بعد d ام نیروی وارد از سوی دیگر عامل‌هاست که از طریق فرمول (۱۴) محاسبه شده که در نهایت شتابی معادل (۱۵) به وجود می‌آورد.

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (14)$$

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (15)$$

که $M_{ii}(t)$ جرم سکون ذره i ام است. در نتیجه این شتاب، سرعت و موقعیت بعدی (در زمان $t + 1$) جرم i ام در بعد d ام با روابط (۱۶) و (۱۷) قابل محاسبه‌اند.

$$v_i^d(t + 1) \quad (16)$$

$$x_i^d(t + 1) = x_i^d(t) + v_i^d(t + 1) \quad (17)$$

که $rand_i$ یک متغیر تصادفی یکنواخت در بازه $(0-1)$ است.

بافرض مساوی بودن جرم سکون و گرانشی مقادیر جرم‌ها با استفاده از تابع برازش $fit_i(t)$ که مقدار برازش عامل i ام در زمان t است و مقادیر $best(t)$ و $worst(t)$ آن برای مسأله بیشینه‌سازی با روابط (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آیند، محاسبه شده و توسط فرمول‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) بروزمی‌شوند:

$$best(t) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, N\}} (fit_j(t)) \quad (18)$$

پس از تغییر موقعیت ذرات یعنی اتمام کار یک تکرار الگوریتم و اضافه شدن ذرات نامغلوب جدید، بهنگام می‌شود. همچنین علاوه بر این آرشیو، آرشیو محدودی که مکان نگهداری ذرات اکتیو است، به اندازه K در نظر گرفته شده که شامل تعدادی از همان ذرات نامغلوب آرشیو نامحدود پیشین است. قابل ذکر است جواب‌های نهایی الگوریتم، جواب‌های نامغلوب آرشیو نامحدود آن در تکرار نهایی می‌باشند.

از آنجا که کدگذاری مسأله مورد بررسی به شیوه لیست جایگشتی صورت گرفته و الگوریتم جستجوی گرانشی یک الگوریتم پیوسته محسوب می‌شود، بنابراین می‌بایست بین فضای جستجوی الگوریتم با فضای جواب در نظر گرفته شده انطباقی صورت گیرد [۲۳]. یکی از این روش‌ها که در مسأله زمانبندی کارکارگاهی برای الگوریتم PSO استفاده شده، بکارگیری اپراتورهای ژنتیکی در فرآیند تولید جواب‌های جدید و پیشبرد تکامل نسل‌هاست [۲۴].

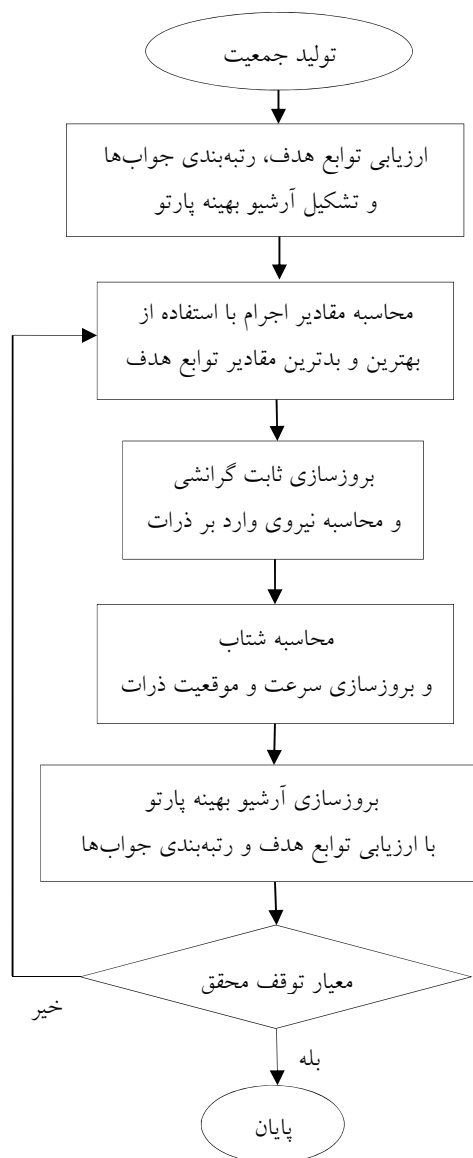
انتخاب فعالیت j ام برای وارد شدن به لیست زمانبندی از میان مجموعه فعالیت‌های مجموعه E که شرط روابط پیشنهادی برای ورود آن‌ها به لیست رعایت شده، وابسته به عدد احتمال p_j است که برای هر یک با توجه به فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$p_j = \frac{(\pi_j+1)^\alpha}{\sum_{k \in E} (\pi_k+1)^\alpha} \quad (24)$$

به طوری که $v(j) = \max_{k \in E} v(k) - v(j)$ و $\alpha = 1$ مقدار اولویت فعالیت j ام است. در این تحقیق $\alpha = 1$ و قانون اولویت در نظر گرفته شده دیرترین زمان اتمام (LFT) فعالیت-هاست. همچنین سطر دوم که بیانگر مدهای اجرایی متناظر با هر یک از فعالیت‌های سطر اول است، به طور تصادفی از میان مجموعه مدهای مجاز انتخاب شده و در ستون متناظر با آن فعالیت در سطر مربوطه قرار می‌گیرد.

۳-۳. ساختار الگوریتم پیشنهادی

برای حفظ کلیه جواب‌های پارتو بدست آمده در پی نسل‌های مختلف الگوریتم از آرشیو نامحدودی استفاده می‌شود که همواره



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم GSA

اما بدست آوردن بردار شتاب وابسته به مقدار برآیند نیروهای وارد بر آن است که طبق الگوریتم زیر صورت می‌گیرد:

محاسبه نیروی بین ذره مذکور و هر یک از اجرام اکتیو با استفاده از فرمول زیر.

$$F_{ij}(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} \quad (25)$$

که در صورت کسر جرم ذره برابر یک و جرم ذره فعال همان فاصله ازدحامی‌اش در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد (حداکثر) عامل‌های موثر بر ذره در طی زمان متغیر در نظر گرفته شده، به طوری که با تقسیم تعداد تکرار الگوریتم به ۴ قسمت مساوی، برای تکرارهای بخش اول این تعداد مساوی اندازه آرشیو، بخش دوم

در این تحقیق، نیز از مکانیزمی مشابه آن در جستجوی گرانشی استفاده شده است. در ادامه چگونگی استفاده از این اپراتورها برای شبیه‌سازی فرآیند الگوریتم جستجوی گرانشی توضیح داده می‌شود.

در این الگوریتم مکان هر ذره با استفاده از لیست جایگشتی فعالیت‌ها بیان شده و عامل تاثیرگذار بر آن سرعت ذره است. سرعت هر ذره بنا به فرمول (۱۶)، به دو عامل سرعت قبلی ذره و شتاب حاصل از برآیند نیروهای وارده به آن بستگی دارد. سرعت قبلی ذره با اعمال اپراتور جهش بر بردار مکان ذره ساخته می‌شود

۴. نتایج محاسباتی

مسائل تست در نظر گرفته شده گروهی از مسائل کتابخانه مسائل زمانبندی پروژه^{xxi} (PSPLIB) می‌باشند. برای تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها، با توجه به اینکه مسائل مورد بررسی با دو اندازه متفاوت کوچک و بزرگ در نظر گرفته شده‌اند، از هر دو گروه مسائل یک مسأله به عنوان نمونه برای هر ترکیب پارامتر الگوریتم‌ها انتخاب شده و ۵ بار اجرا می‌شود. از آنجا که در هر اندازه مسأله برای هر الگوریتم دو جمعیت اولیه (Initial Pop.) در نظر گرفته شده، در واقع تنظیم پارامتر برای هر الگوریتم در چهار حالت مختلف انجام شده است. همچنین جهت یکسان‌سازی شرایط آزمایش، زمان جستجو برای هر اجرای الگوریتم، ۵ ثانیه برای مسائل کوچک و ۲۵ ثانیه برای مسائل بزرگ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که تمامی محاسبات این بخش توسط کامپیوتری با مشخصات پردازنده Core i7، 2GHz، و 8GB RAM صورت گرفته است.

۴-۱. تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها

در این تحقیق، جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های توسعه داده شده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی [۲۵]، استفاده شده است. در این روش از یک آرایه عمودی^{xxv} به منظور سازماندهی نتایج آزمایش استفاده می‌شود. ابتدا یکسری از سطوح مختلف پارامترهای مؤثر بر الگوریتم بر مبنای شاخصی مورد بررسی قرار گرفته و بهترین ترکیب پارامترها بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر اساس سطرهای آرایه عمودی مذکور، به عنوان مقادیر مطلوب پارامترها پیشنهاد می‌شود. پارامترهای مؤثر بر الگوریتم‌ها به همراه سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها در جداول (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

برای مقایسه و تحلیل نتایج حاصله الگوریتم‌ها طبق طرح تاگوچی از شاخص کیفیت (QM)^{xxvi} که از مهم‌ترین معیارهای مقایسه الگوریتم‌های چندهدفه است، استفاده می‌شود. نتایج حاصل از تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها بر اساس روش تاگوچی برای تمامی چهار گروه مربوطه در جداول (۳) و (۴) ارائه شده‌اند.

مساوی ۳/۴ اندازه آرشیو، بخش سوم ۲/۴ سایز آرشیو و بخش چهارم ۱/۴ اندازه آرشیو است.

۱- محاسبه فاصله بین دو جرم:

برای جرم پسیو λ_m و جرم اکتیو λ_n ، فرضیاتی به صورت زیر برقرار است:

$$(1) \text{ بردار هزینه جرم } \lambda_m (C_i)$$

$$(2) \text{ بردار هزینه جرم } \lambda_n (C_j)$$

(۳) بردار هزینه بهترین مد اجرایی فعالیت‌های ۱ تا n (C^{best})

با در نظر گرفتن این فرضیات فرمول فاصله به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$(26) \quad R_{ij} + \varepsilon = \sum_{q=1}^n (C_q^{best})^{-1} \times \left(\frac{C_{iq} - C_{jq}^{best}}{F^{Max} - F^{Min}} \right)$$

که C_q^{best} هزینه بهترین مد اجرایی فعالیت q ، C_{iq} هزینه فعالیت q در جرم λ_m ، F^{Max} و F^{Min} بیشترین مقدار و کمترین مقدار بین مقادیر بردارهای هزینه برای هر فعالیت می‌باشند.

۱. مرتب کردن نیروها به صورت نزولی

۲. اعمال تقاطع بین ذره و اجرام مذکور به ترتیب اولویت

در میزان نیروهای بینشان

در واقع بردار شتاب بدست آمده حاصل اعمال چندین عملگر تقاطع به ترتیب اولویت بر حسب مقادیر نیروها، به‌طور پی‌درپی است. در پایان، از تقاطع دو لیست سرعت و شتاب ذره مکان بعدی آن بدست می‌آید. اما همچنان لیست بروز شده مکان ذرات، جمعیت بعدی الگوریتم نمی‌باشند. در این مرحله دو عدد A و B که اولی

۰.۲ درصد آرشیو نامحدود اصلی و دومی ۰.۲ درصد جمعیت اصلی است، محاسبه می‌شوند. در ادامه کوچک‌ترین این اعداد در نظر گرفته شده و به آن تعداد، ذراتی به طور تصادفی از آرشیو اصلی انتخاب شده و جایگزین ذراتی از جمعیت جاری می‌گردند. به این ترتیب جمعیت بعدی الگوریتم ساخته می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم NSGA-II و سطوح آن‌ها

Factors	Symbols	Levels
Crossover rate	A	A(1) – 0.7
		A(2) – 0.8
		A(3) – 0.9
Mutation rate	B	B(1) – 0.01
		B(2) – 0.05
		B(3) – 0.1
Crossover	C	C(1) – One point
		C(2) – Two point

		C(3) – MCOOX
Mutation	D	D(1) – Hartmann 2001 D(2) – Ulsoy& Cebelli2000
Selection	E	E(1) – Ranking E(2) – Roulette wheel E(3) – Tournament

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم MOGSA و سطوح آنها

Factors	Symbols	Levels
Mutation rate	B	B(1) – 0.01
		B(2) – 0.05
		B(3) – 0.1
Mutation	D	D(1) – Hartmann 2001
		D(2) – Ulsoy& Cebelli2000
Archive size	F	F(1) – 10
		F(2) – 20
		F(3) – 30

جدول ۳. پارامترهای تنظیم شده الگوریتم NSGA-II

Prob. Size	Initial pop.	Factors				
		A	B	C	D	E
<i>Small</i>	10	A(3)	B(3)	C(1)	D(1)	E(1)
	20	A(3)	B(3)	C(3)	D(1)	E(2)
<i>Large</i>	20	A(3)	B(2)	C(1)	D(1)	E(2)
	40	A(2)	B(2)	C(1)	D(1)	E(3)

جدول ۴. پارامترهای تنظیم شده الگوریتم MOGSA

Prob. Size	Initial pop.	Factors		
		B	D	F
<i>Small</i>	10	B(2)	D(2)	F(3)
	20	B(3)	D(2)	F(2)
<i>Large</i>	20	B(3)	D(2)	F(3)
	40	B(2)	D(2)	F(2)

۲-۴. شاخص‌های مقایسه نتایج الگوریتم‌ها
برای مقایسه نتایج الگوریتم‌های حل مسأله از شاخص‌هایی استفاده شده که در ادامه به شرح مختصری از آنها می‌پردازیم [۲۶].
۱-۲-۴. شاخص کیفیت
توسط این شاخص همه جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط تمامی الگوریتم‌ها با هم سطح‌بندی شده و نهایتاً درصدی از جواب-های سطح یک متعلق به هر الگوریتم تعیین می‌شوند. بیشتر بودن این درصد بیانگر کیفیت بالای الگوریتم‌هاست.
۲-۲-۴. شاخص فاصله^{xxvii} (SM)
این معیار یکنواختی توزیع نقاط پارتو را در منحنی پارتو بدست آمده، نشان می‌دهد که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

۲-۴. شاخص‌های مقایسه نتایج الگوریتم‌ها
برای مقایسه نتایج الگوریتم‌های حل مسأله از شاخص‌هایی استفاده شده که در ادامه به شرح مختصری از آنها می‌پردازیم [۲۶].
۱-۲-۴. شاخص کیفیت
توسط این شاخص همه جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط تمامی الگوریتم‌ها با هم سطح‌بندی شده و نهایتاً درصدی از جواب-

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |\bar{d} - d_i|}{(N-1) \times \bar{d}} \quad (27)$$

تعداد جواب‌های مجموعه پارتو، d_i فاصله اقلیدسی جواب i ام با نزدیک‌ترین جواب مجموعه پارتو و \bar{d} میانگین این فواصل اقلیدسی است. کمتر بودن مقدار این شاخص بیانگر یکنواختی بهتر جواب‌ها در منحنی پارتو است.

۳-۲-۴. شاخص تنوع^{xxviii} (DM)

این معیار که با نام معیار پراکندگی نیز شناخته شده است، پراکندگی و یا تنوع توزیع جواب‌ها را در مجموعه جواب پارتو تولید شده اندازه‌گیری می‌کند که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^N \max(\|x_i - y_j\|)} \quad (28)$$

$N \times 6$ تعداد جواب‌های مجموعه پارتو و $\|x_i - y_j\|$ فاصله اقلیدسی بین دو جواب پارتو x_i و y_j است. بیشتر بودن مقدار تنوع جواب‌ها بیانگر کارایی بالاتر الگوریتم‌ها خواهد بود.

۳-۴. تحلیل نتایج محاسباتی

در این بخش به مقایسه الگوریتم‌های حل مسأله با توجه به معیارهای ذکر شده می‌پردازیم. نتایج ارائه شده در جدول (۵)، برای ۴۰ مسأله از میان مسائل نمونه اندازه کوچک و ۴۰ مسأله از میان مسائل نمونه اندازه بزرگ گروه n0، به طوری که از هر گروه مسائل، پنج مسأله انتخاب شده و میانگین حاصل از پنج بار اجرای هر یک محاسبه شده، می‌باشند.

جدول ۵. معیارهای کیفیت، فاصله و تنوع الگوریتم‌ها برای مسائل با اندازه مختلف

Prob. Size	Activity	Initial Pop.	NSGA-II			MOGSA		
			QM	SM	DM	QM	SM	DM
Small	10	10	15.36628	0.585603	71.97373	50.82692	0.705658	114.989
		20	32.57975	0.63483	90.45153	46.16321	0.695665	117.9089
Large	20	20	18.69032	0.63539	167.4851	27.47107	0.677815	234.0348

به منظور آنالیز آماری نتایج حاصل شده از الگوریتم‌های حل مسأله، آزمون‌های فرضی برای مقایسه میانگین سه معیار (QM, SM, DM) الگوریتم‌ها با فرض برابری واریانس‌ها و ضریب اطمینان ۰.۹۵ انجام شده‌اند. این آزمون‌ها برای هر گروه از مسائل در اندازه کوچک و بزرگ با اندازه جمعیت‌های اولیه مختلف، براساس توزیع t به شرح ذیل صورت گرفته‌اند:

$$H_0: \mu_{QM_NSGA-II} \geq \mu_{QM_MOGSA} \\ H_1: \mu_{QM_NSGA-II} < \mu_{QM_MOGSA} \quad (29)$$

$$H_0: \mu_{SM_NSGA-II} \leq \mu_{SM_MOGSA} \\ H_1: \mu_{SM_NSGA-II} > \mu_{SM_MOGSA} \quad (30)$$

$$H_0: \mu_{DM_NSGA-II} \geq \mu_{DM_MOGSA} \\ H_1: \mu_{DM_NSGA-II} < \mu_{DM_MOGSA} \quad (31)$$

با فرض انجام این آزمون‌ها برای مسائل سائز کوچک با جمعیت اولیه ۱۰، آماره‌های آزمون هر یک به ترتیب طبق فرمول‌های (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) قابل محاسبه‌اند. همچنین، در ادامه مقادیر تقریبی p -value هر یک با توجه به جدول مقادیر توزیع t ارائه شده‌اند.

$$t_1 = \frac{\mu_{QM_NSGA-II} - \mu_{QM_MOGSA}}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_{NSGA-II}} + \frac{1}{n_{MOGSA}}}} \\ = \frac{15.36628 - 50.82692}{12.737675 \sqrt{\frac{1}{40} + \frac{1}{40}}} = -12.450455 \quad (32)$$

$$p\text{-value} = p(t < t_1) \\ = p(t < -12.450455) \sim \leq 0.025$$

$$t_2 = \frac{\mu_{SM_MOGSA} - \mu_{SM_NSGA-II}}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_{NSGA-II}} + \frac{1}{n_{MOGSA}}}} \\ = \frac{0.705658 - 0.585603}{12.737675 \sqrt{\frac{1}{40} + \frac{1}{40}}} = 0.04215 \quad (33)$$

$$p\text{-value} = p(t > t_2) \\ = p(t > 0.04215) \sim \geq 0.4$$

$$t_3 = \frac{\mu_{DM_NSGA-II} - \mu_{DM_MOGSA}}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_{NSGA-II}} + \frac{1}{n_{MOGSA}}}} \\ = \frac{71.97373 - 114.989}{12.737675 \sqrt{\frac{1}{40} + \frac{1}{40}}} = -15.10293 \quad (34)$$

$$p\text{-value} = p(t < t_3) = p(t < -15.10293) \\ \rightarrow 0.025 < p\text{-value} < 0.01$$

این مقادیر با توجه به $S_{NSGA-II}^2 = 119.07336$ و $S_{MOGSA}^2 = 205.42339$ محاسبه شده برای این گروه مسائل به دست آمده‌اند. براساس مقادیر

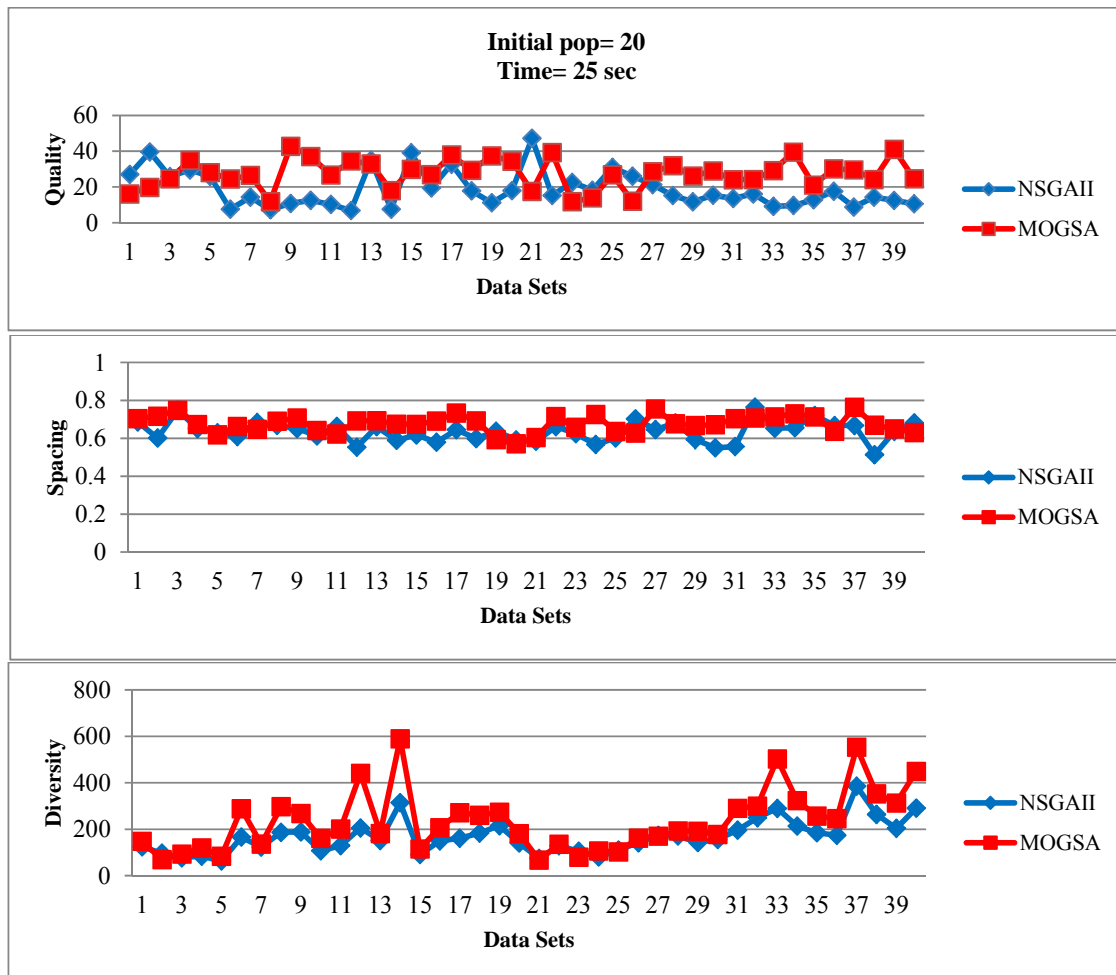
اولیه بزرگتر نسبت به الگوریتم NSGA-II بهتر عمل کرده است. این الگوریتم در مسائل اندازه کوچک نیز با افزایش اندازه جمعیت اولیه تا حدودی کاهش در معیار کیفیت خود داشته است. در واقع این اتفاق حاکی از آن است که الگوریتم MOGSA پیشنهادی در هر اندازه جمعیت اولیه خود احتیاج به تعداد تکرار بیشتری برای همگرایی به سمت جواب دارد. از اینرو با جمعیت اولیه کوچک‌تر در هر دو حالت، عملکردی بسیار بهتری به نسبت الگوریتم NSGA-II داشته است. در معیار تنوع، الگوریتم MOGSA با اختلاف قابل ملاحظه‌ای از الگوریتم NSGA-II در همه موارد بهتر عمل کرده است. همچنین در معیار فاصله جواب به نظر می‌رسد عملکرد الگوریتم NSGA-II با اختلاف کمی بهتر از الگوریتم پیشنهادی است، در حالی که به دلیل یکسان نبودن مقادیر شاخص کیفیت الگوریتم‌ها مقایسه مقادیر شاخص فاصله‌شان به طور قطعی امکانپذیر نمی‌باشد. در ادامه، نمودارهای مقایسه شاخص‌های کیفیت، فاصله و تنوع الگوریتم‌ها برای مسائل اندازه بزرگ با جمعیت اولیه ۲۰ در شکل (۴) ارائه شده‌اند.

p - value، فرض H_0 در آزمون‌های اول و سوم رد شده و در آزمون دوم پذیرفته می‌شود. به عبارت دیگر، کیفیت و تنوع جواب الگوریتم MOGSA از الگوریتم NSGA-II بهتر و یکنواختی توزیع جواب‌های پارتو آن به نسبت این الگوریتم بیشتر بوده است.

جدول ۶. نتایج آزمون فرض معیارهای در نظر گرفته شده الگوریتم‌ها

Prob. Size	Initial Pop.	نتایج آزمون فرض		
		QM	SM	DM
Small	10	رد H_0	پذیرش H_0	رد H_0
	20	رد H_0	پذیرش H_0	رد H_0
Large	20	رد H_0	پذیرش H_0	رد H_0
	40	پذیرش H_0	پذیرش H_0	رد H_0

با توجه به نتایج موجود در جدول (۵) و (۶)، در معیار کیفیت، الگوریتم MOGSA بجز در مسائل اندازه بزرگ در حالت جمعیت



شکل ۴. نمودارهای مقایسه شاخص‌های کیفیت، فاصله و تنوع الگوریتم‌ها

22. Passive
23. Regret-based Biased Random Sampling
24. <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/data.html>
25. Orthogonal Array
26. Quality Metric
27. Spacing Metric
28. Diversity Metric

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، مسأله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با جریان‌های نقدی تنزیل یافته و وجود چندین حالت اجرایی در فعالیت‌ها با توابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه، بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی از دیدگاه پیمانکار پروژه و همچنین تابع هدف جدیدی در زمینه تسطیح منابع به منظور استفاده بیشتر از منابع در دسترس در نظر گرفته شده است. در ادامه، الگوریتم جستجوی گرانشی چندهدفه‌ای برای حل مدل پیشنهاد شد و نتایج حاصل از این الگوریتم با نتایج به دست آمده از الگوریتم NSGA-II در تعدادی شاخص مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل به‌طور کلی حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با این الگوریتم بوده‌اند. به منظور انجام تحقیقات آتی در این زمینه در نظر گرفتن هر یک از پارامترهای مسائل زمانبندی پروژه در شرایط عدم قطعیت از جمله میزان استفاده از منابع توسط هر یک از آن‌ها برای توسعه مدل و همچنین بکارگیری روش‌های دیگری برای تبدیل فضای جواب پیوسته الگوریتم جستجوی گرانشی به فضای گسسته حل مسأله پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] Artigues Ch., Demassey S., & Neron E., "Resource-Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions and Applications", WILEY, (2008).
- [2] Pritsker A., Watters L., & Wolfe P., "Multi-project scheduling with limited resources: A zero-one programming approach", Management Science, Vol. 16, No. 1, (1969), pp. 93-108.
- [3] J. Blazewicz, J. Lenstra, A. Rinnooy Kan. "Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity", Discrete Applied Mathematics, vol. 5, (1983), pp. 11-24.
- [4] Hartmann S., & Briskorn D., "Invited Review: A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem", European Journal of Operational Research, Vol. 207, No. 1, (2010), pp. 1-14.
- [5] Odedairo B.O., & Oladokun V., "Relevance and Applicability of Multi-objective Resource Constrained Project Scheduling Problem: Review Article", ETASR-Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 1, No. 6, (2011), pp. 144-150.
- [6] Nudtasomboon N., & Randhawa S.U., "Resource-constrained project scheduling with renewable and non-renewable resources and time-resource tradeoffs", Computers and Industrial Engineering, Vol. 32, No. 1, (1997), pp. 227-242.
- [7] Al-Fawzan M., & Haouari M., "A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling", International Journal of Production Economics, Vol. 96, No. 2, (2005), pp. 175 - 187.

پی نوشت

1. Resource-Constrained Project Scheduling Problem
2. Makespan
3. Discounted Cash Flows
4. Goal Programming
5. Pareto Simulated Annealing
6. Light Beam Search
7. Multi-Objective Tabu Search Algorithm
8. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
9. Multi-Objective Resource Leveling Improvement
10. Multi-Objective Particle Swarm Optimization
11. Hybrid Multi-Objective Evolutionary Algorithm
12. Adjusted Fuzzy Dominance Genetic Algorithm
13. Multi-Objective Invasive Weed Optimization
14. Non-dominated Ranking Genetic Algorithm
15. Pareto Archived Evolution Strategy
16. Pareto-Archive Estimation-of-Distribution Algorithm
17. Resource Investment
18. Random Search Algorithm
19. Gravitational Search Algorithm
20. Income Rate
21. Active

- [16] Wang L., Fang Ch., Mu ChD., & Liu M., "A Pareto-Archived Estimation-of-Distribution Algorithm for Multiobjective Resource-Constrained Project Scheduling Problem", IEEE transactions on engineering management, Vol. 60, No. 3, (2013), pp. 617- 626.
- [17] Ghoddousi P., Eshtehardian E., Jooybanpour Sh., & Javanmardi A., "Multi-mode resource-constrained discrete time-cost-resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm", Automation in Construction, Vol. 30, (2013), pp. 216-227.
- [18] Rashedi E., Nezamabadi-pour H., & Saryazdi S., "GSA: A gravitational search algorithm", Information Sciences, Vol. 179, (2009), pp. 2232-2248.
- [19] Hassanzadeh H.R., & Rouhani M., "A MULTI-OBJECTIVE GRAVITATIONL SEARCH ALGORITHM", IEEE, 2ed International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, (2010), pp. 7-12.
- [20] Deb K., Pratap A., Agarwal S., & Meyarivan T., "A fast elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No.2, (2002), pp. 182-197.
- [21] Hartmann S., "Project scheduling with multiple modes: a genetic algorithm", Annals of Operations Research, Vol. 102, (2001), pp. 111-135.
- [22] Drexl A., "Scheduling of project networks by job assignment", Management Science, Vol. 37, (1991), pp. 1590-1602.
- [23] Krause J., Cordeiro J., Parpinelli R.S., & Lopes H.S., "A Survey of Swarm Algorithms applied to Discrete Optimization Problems", Swarm Intelligence and Bio-inspired Computation: Theory and Applications, Elsevier Science & Technology Books, (2013), pp. 169-191.
- [24] Niu Q., Jiao B., & Gu X., "Particle swarm optimization combined with genetic operators for job shop scheduling problem with fuzzy processing time", Applied
- [8] Hapke M., Jaszkievicz A., & Slowinski R., "Interactive analysis of multiple criteria project scheduling problems", European Journal of Operational Research, Vol. 107, (1998), pp. 315-324,
- [9] Viana A., & Sousa J., "Using metaheuristics in multi objective resource constrained project scheduling", European Journal of Operational Research, Vol. 120, (2000), pp. 359- 374.
- [10] Wang H., Lin D., & Li MQ., "A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling problem", IEEE-Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Vol. 5, (2005), pp. 2945- 2949.
- [11] Seifi M., & Tavakkoli-Moghaddam R., "A new bi-objective model for a multi-mode resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows and four payment models", IJE Transactions, Vol. 21, No. 4, (2008), pp. 347-360.
- [12] Roca J., Pugnaghi E., & Libert G., "Solving an Extended Resource Leveling Problem with Multiobjective Evolutionary Algorithms", World Academy of Science, Engineering and Technology, (2008), Vol. 46.
- [13] Kazemi F., & Tavakkoli-Moghaddam R., "Solving a multi-objective multi-mode Resource-constrained project scheduling problem with particle swarm optimization", International Journal of Academic Research, Vol. 3, (2011), pp. 103-110.
- [14] Xiong J., Chen YW., Yang KW., Zhao QS., & Xing LN., "A Hybrid Multiobjective Genetic Algorithm for Robust Resource-Constrained Project Scheduling with Stochastic Durations", Hindawi Publishing Corporation-Mathematical Problems in Engineering, (2012).
- [15] Nabipoor Afruzi E., Roghanian E., Najafi A. A., & Mazinani M., "A multi-mode resource-constrained discrete time-cost tradeoff problem solving using an adjusted fuzzy dominance", Scientia Iranica, Vol. 20, No. 3, (2013), pp. 931-944.

Mathematics and Computation, Vol. 205,
(2008), pp. 148-158.

[25] Taguchi G., "Introduction to quality engineering". White Plains: Asian Productivity Organization/UNIPUB, (1986).

[26] CoelloCoello C.A., Dhaenens C., & Jourdan L., "Advances in Multi-Objective Nature Inspired Computing", Springer, (2010).

[۲۷] رضا توکلی مقدم، بهناز جعفرمزده و صابر ملاعلیزاده -
زواردهی، طراحی شبکه خرید - تولید - توزیع چند هدفه در
زنجیره تأمین سبز با الگوریتم جستجوی گرانشی چند
هدفه، مجله بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید،
پذیرش چاپ، (۱۳۹۲).

[۲۸] مسعود سیفی، رضا توکلی مقدم و فریبرز جولای، بکارگیری
الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسأله
زمانبندی پروژه با محدودیت منابع در حالت چند مد و با
جریان‌های نقدی تنزیل یافته، نشریه بین‌المللی مهندسی
صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۷۸)، جلد ۱۹، شماره ۴،
صفحات ۸۵-۹۱.