



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

**Fatemeh Paidar, Beza Ashtiani \* & Reza Tavakkoli-Moghaddam**

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

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

*Reza Tavakkoli-Moghaddam, School of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University.*

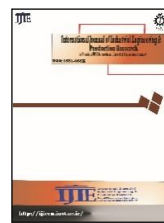
### **Keywords**

**Multi-objective Multi-mode  
Resource-constrained  
Project Scheduling  
Problem,  
Discounted Cash Flows,  
Net Present Value,  
Resource Leveling,  
Multi-objective  
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 توکلی‌مقدم

### 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 و 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 چند هدفه گسسته زمانبندی پروژه با منابع محدود به‌کاربرده 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

مسأله چندهدفه برای زمانبندی پروژه با منابع محدود چندحالتی، جریان‌های نقدی تنزیل‌یافته، ارزش خالص فعلی، تسطیح منابع، الگوریتم جستجوی گرانشی.

### 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، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران. [f.paidar@srbiau.ac.ir](mailto:f.paidar@srbiau.ac.ir)

رضا توکلی‌مقدم، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران. [tavakoli@ut.ac.ir](mailto:tavakoli@ut.ac.ir)

\*نویسنده مسئول مقاله: بهزاد آشتیانی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران. [b.ashtiani@srbiau.ac.ir](mailto:b.ashtiani@srbiau.ac.ir)

به لحاظ خصوصیات مربوط به فعالیت‌ها، منابع و توابع هدف بسیار متنوع‌اند [۳]. از توابع هدف عمومی می‌توان به زمان اتمام پروژه<sup>ii</sup> 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 موردنظر قرار گرفته است [۴]. 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 نقدی<sup>iii</sup> و وجود چندین حالت اجرائی برای انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است.

برای حل این مسائل تاکنون از روش‌های مختلفی استفاده شده است. در بعضی موارد، از انواع روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه از جمله برنامه‌ریزی آرمانی<sup>v</sup> استفاده شده [۵] و در مواردی یک تابع هدف گاهی به صورت مجموع وزنی اهداف در نظر گرفته شده است [۶]، اما به دلیل پیچیدگی این نوع مسائل در بسیاری از موارد استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرابابتکاری به چشم می‌خورد. تاکنون روش‌های ابتکاری و فرابابتکاری 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 [۷]. در مرحله اول از الگوریتم  $PSA^v$  برای ساختن زمانبندی‌های نامغلوب و در مرحله دوم از الگوریتم  $LBS^vi$  برای سازماندهی جستجو در اطراف جواب‌های تولید شده مرحله قبل استفاده شد. الگوریتم‌های چندهدفه  $PSA$  و  $MOTS^vi$  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 [۸]. 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 [۹]. الگوریتم فرا ابتکاری 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 [۱۰]. 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 فرابابتکاری بر مبنای همان الگوریتم اصلی که بهبود تسطیح منابع چندهدفه<sup>i</sup> (MORLI) به آن تخصیص یافته بود، پیشنهاد شد [۱۱].

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<sup>x</sup> (MOPSO) ترکیب شده با اپرتورهای ژنتیکی ارائه شد که در مقایسه با الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری داشت [۱۲]. در مسأله دو هدفه زمانبندی پروژه با منابع محدود با توابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام و بیشینه‌سازی پایداری و زمان‌های اجرای تصادفی، الگوریتم تکاملی چندهدفه تلفیقی<sup>xi</sup> (H-MOEA) بر مبنای الگوریتم NSGA-II ارائه شد [۱۳]. 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 هیوریستیکی 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  $AFDGA^xi$  ارائه شد که با چهار الگوریتم NSGA-II،  $MOIWO^xiii$ ،  $NRGA^xv$  و  $PAES^xv$  در تعدادی معیار مقایسه و کارایی آن اثبات شد [۱۴].

الگوریتم  $PAEDA^xvi$  برای حل مسأله زمانبندی پروژه با منابع محدود دو هدفه‌ای با در نظر گرفتن تابع هدف زمان اتمام پروژه و تابع هدف سرمایه‌گذاری منابع  $RI^xvii$  ارائه شد [۱۵]. 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 بروزرسانی 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 مسأله موازنه زمان - هزینه - منبع گسسته چندحالتی که به طور هم زمان مدل‌های چندحالتی، موازنه هزینه - زمان و

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 مساله 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 مساله ارائه می‌شود.

## ۲-۱. محاسبه جریان‌های نقدی مثبت و منفی

در محاسبه جریان‌های نقدی منفی توجه به مدهای اجرایی فعالیت‌ها لحاظ شده است، زیرا در هر مد اجرایی از هر منبع به میزان خاصی استفاده می‌شود، به طوری که مد اجرایی بهتر از زمان انجام کمتری برخوردار است. در نتیجه هزینه استفاده از منبع آن متفاوت از مد اجرایی 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 اجرایی برای انجام آن استفاده شده، میزان هزینه‌کرد نهایی متفاوت است به طوری که هزینه انجام فعالیت در مد اجرایی بهتر به لحاظ کمتر بودن زمان انجام به نسبت مد اجرایی 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.

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

به طوری که برای سه مد اجرایی 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 اجرایی فعالیت‌ها در نرخ سود<sup>xx</sup> توجیح‌پذیر  $IR = 1.5$  ضرب شده و در نهایت این مقادیر به صورت زیر محاسبه شده‌اند:

تسطیح منابع را در نظر گرفته، ارائه شد و توسط الگوریتم NSGA-II تعدیل یافته‌ای حل شد [۱۶]. در این میان تاکنون، استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی<sup>xi</sup> (GSA) صورت نگرفته است. این الگوریتم که در سال ۲۰۰۹ توسط راشدی و همکاران [۱۷] ارائه شد، بر اساس قانون گرانشی بین اجرام نیوتن استوار است. هر چند الگوریتم پیشنهادی آن‌ها برای مسأله تک‌هدفه طراحی شده، اما نسخه‌هایی از این الگوریتم در حالت چندهدفه نیز ارائه شده که در نهایت عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم NSGA-II داشته‌اند [۱۸-۲۶]. از آنجا که این الگوریتم ذاتاً از فضایی 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 [۱۹] 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 اجرایی 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 [۲۷]، در به کارگیری این تابع شیوه پرداختی که به منظور افزایش ارزش پول از دیدگاه پیمانکار پروژه لحاظ شده، در نظر گرفته شده است.

$$CF_i^+ = [Max\{CF_{im}^-\} \times IR] \quad (۳)$$

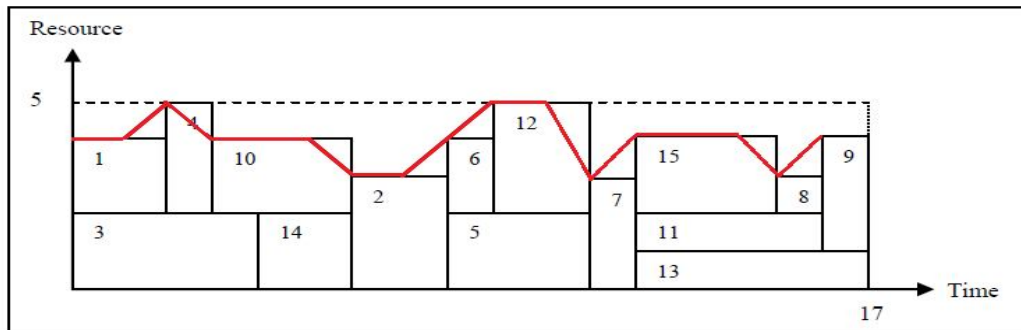
۲-۲. تابع هدف منابع

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:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K w_k \sum_{t \in A} |r_{kt} - \bar{r}_k| \quad (۴)$$

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،  $A$  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

$j$ : شاخص فعالیت

$m$ : شاخص مد

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

$P_j$ : مجموعه پیشنهادی‌های 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)

$\alpha$ : 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،  $k = 1, \dots, R$

$r_{mk}^p$ : میزان موردنیاز فعالیت  $j$  ام در مد  $m$  ام، از منبع

تجدیدپذیر  $k$  ام

با توجه به علائم اختصاری ارائه شده مدل مفهومی مسأله به صورت زیر قابل بیان است:

$$x_{jm} = \begin{cases} 1, & \text{اگر فعالیت } j \text{ در مد } m \text{ انجام شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Min } C_{max} \quad (5)$$

$$\text{Max } \sum_{j=1}^n \frac{CF_j^+}{(1+\alpha)^{S_j}} - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} \frac{CF_{jm}^-}{(1+\alpha)^{C_j}} x_{jm} \quad (6)$$

$$\text{Min } \sum_{k=1}^K w_k \sum_{t \in A} |r_{kt} - \bar{r}_k| \quad (7)$$

s.t.

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jt} = 1, \forall j \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_w}^{LF_w} t \cdot x_{wmt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_{jm}) \cdot x_{jmt}, \forall j, \forall w \in P_j \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_n}^{LF_n} t \cdot x_{nmt} \leq T \quad (10)$$

$$T \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{j=1}^n \max\{d_{jm}\} \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} r_{jmk}^\rho \sum_{b=t}^{t+d_{jm}-1} x_{jmb} \leq R_k^\rho, \forall k, t \quad (12)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\}, \forall j, m, t$$

الگوریتم‌های حل مسأله پرداخته و در نهایت ساختار الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌گردد.

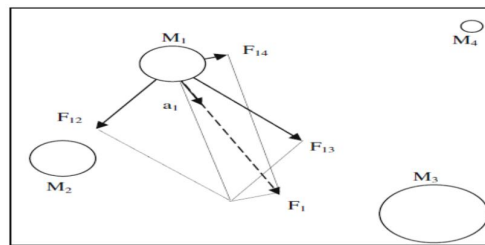
### ۳-۱. الگوریتم جستجوی گرانشی

این الگوریتم توسط راشدی و همکاران [۱۷]، 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) [۱۷]، 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 اجرایی و در زمانی بین زودترین زمان اتمام و دیرترین زمان اتمام آن انجام گردد. محدودیت‌های (۹)، ارضا کننده روابط پیشنیازی بین فعالیت‌های پروژه‌اند. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱)، الزام می‌نمایند که پروژه در افق زمانبندی آن اتمام یابد و مجموعه محدودیت‌های (۱۲)، محدودیت‌های مربوط به منابع تجدیدپذیرند.

### ۳. رویکرد حل مسأله

در این بخش، در ابتدا مکانیزم کار الگوریتم جستجوی گرانشی تشریح می‌شود. در ادامه به بیان نحوه تولید جمعیت اولیه



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

زمان معین  $t$ ، نیروی وارده 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 موقعیت آن در بعد  $d$  ام است، نشان داده شود. در یک

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

از فضای 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 [۲۰]. سطر اول جواب که توالی فعالیت‌هاست با رعایت روابط پیشین‌سازی بین آن‌ها به کمک روشی ابتکاری  $RBRs^{xxiii}$  تولید می‌شود [۲۱]. در این روش انتخاب فعالیت  $J$  ام برای وارد شدن به لیست زمانبندی از میان مجموعه فعالیت‌های مجموعه  $E$  که شرط روابط پیشین‌سازی 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  $\pi_j = \max_{k \in E} v(k) - v(j)$  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 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 [۲۲]. یکی از این روش‌ها که در مسأله زمانبندی کارکارگاهی برای

که  $M_{aj}(t)$  جرم گرانشی فعال  $^{xxi}$  مربوط به عامل  $J$  ام در زمان  $t$ ،  $M_{pi}(t)$  جرم گرانشی غیرفعال  $^{xxii}$  مربوط به عامل  $i$  ام در زمان  $t$ ،  $G(t)$  ثابت گرانش در زمان  $t$ ،  $\mathcal{E}$  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.

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (16)$$

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

که  $rand_i$  یک متغیر تصادفی یکنواخت در بازه (۰-۱) است.

با فرض 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 پیشینه-سازی با روابط (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آیند، محاسبه شده و توسط فرمول‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) بروز می‌شوند:

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

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

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

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

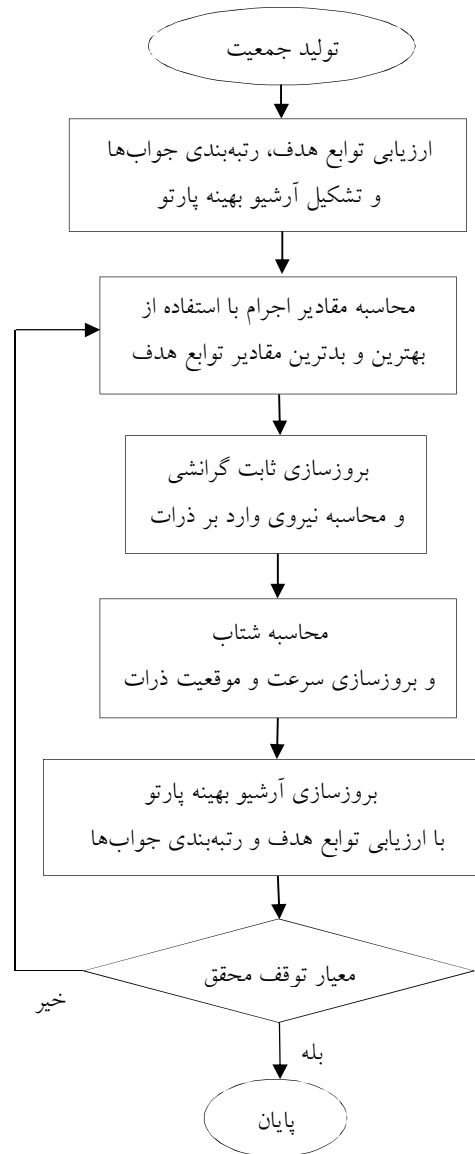
$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (22)$$

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

الگوریتم PSO استفاده شده، بکارگیری اپراتورهای ژنتیکی در فرآیند تولید جواب‌های جدید و پیشبرد تکامل نسل‌هاست [۲۳].



شکل ۳. فلوچارت 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.

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

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

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<sup>xxi v</sup> (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 [۲۴]، استفاده شده است. در این روش از یک آرایه عمودی<sup>xxv</sup> 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)<sup>xxvi</sup> 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.

تکرارهای بخش اول این تعداد مساوی اندازه آرشیو، بخش دوم مساوی ۳/۴ اندازه آرشیو، بخش سوم ۲/۴ سایز آرشیو و بخش چهارم ۱/۴ اندازه آرشیو است.

۱- ۱. محاسبه فاصله بین دو جرم:

برای جرم پسیو  $i$  ام و جرم اکتیو  $j$  ام، فرضیاتی به صورت زیر برقرار است:

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

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

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

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

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

که  $C_q^{best}$  هزینه بهترین مد اجرایی فعالیت  $q$  ام،  $C_{iq}$  هزینه فعالیت  $q$  ام در جرم  $i$  ام،  $F_{Max}$  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 بروزشده مکان ذرات، جمعیت بعدی الگوریتم نمی‌باشند. در این مرحله دو عدد  $A$  و  $B$  که اولی ۲۰ 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(1) – 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(1) – 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)

۲-۴-۲. شاخص فاصله<sup>xxvii</sup> (SM)

این معیار یکنواختی توزیع نقاط پارتو را در منحنی پارتو بدست آمده، نشان می‌دهد که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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 [۲۵].

۲-۴-۱. شاخص کیفیت

توسط این شاخص همه جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط تمامی الگوریتم‌ها با هم سطح‌بندی شده و نهایتاً درصدی از جواب‌های سطح یک متعلق به هر الگوریتم تعیین می‌شوند. بیشتر بودن این درصد بیانگر کیفیت بالای الگوریتم‌هاست.

$N$  تعداد جواب‌های مجموعه پارتو و  $\|x_i - y_j\|$  فاصله اقلیدسی بین دو جواب پارتوی  $x_i$  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.

$N$  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 پارتوست.

#### ۳-۲-۴. شاخص تنوع<sup>xxviii</sup> (DM)

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

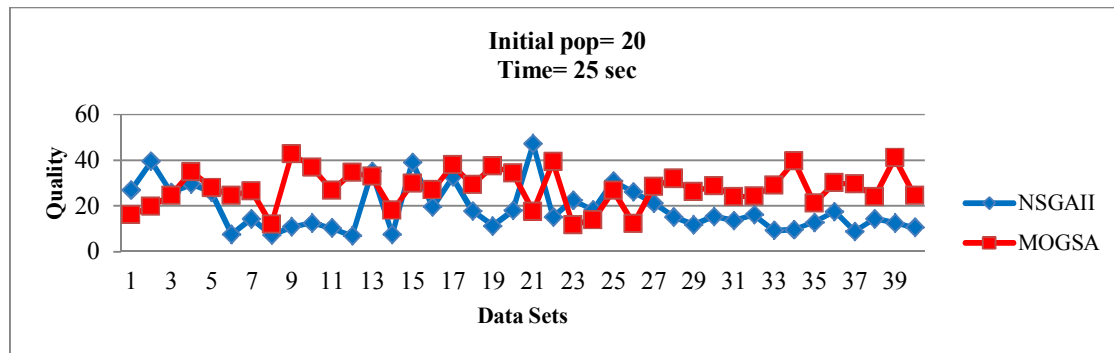
$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^N \max(\|x_i - y_j\|)} \quad (28)$$

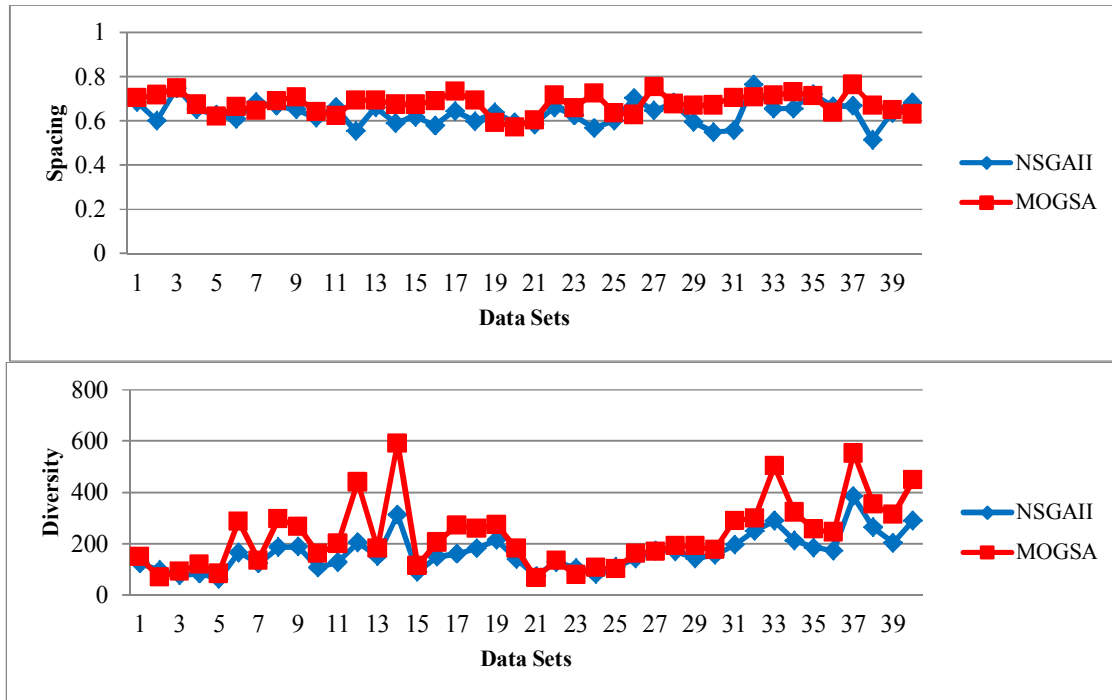
#### جدول ۵. معیارهای کیفیت، فاصله و تنوع الگوریتم‌ها برای مسائل با اندازه مختلف

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

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.

در مقایسه اعداد این جدول در معیار کیفیت، الگوریتم MOGSA بجز در مسائل اندازه بزرگ در حالت جمعیت 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





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

5. Makespan
6. Discounted Cash Flows
7. Goal Programming
8. Pareto Simulated Annealing
9. Light Beam Search
10. Multi-Objective Tabu Search Algorithm
11. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
12. Multi-Objective Resource Leveling Improvement
13. Multi-Objective Particle Swarm Optimization
14. Hybrid Multi-Objective Evolutionary Algorithm
15. Adjusted Fuzzy Dominance Genetic Algorithm
16. Multi-Objective Invasive Weed Optimization
17. Non-dominated Ranking Genetic Algorithm
18. Pareto Archived Evolution Strategy
19. Pareto-Archive Estimation-of-Distribution Algorithm
20. Resource Investment
21. Random Search Algorithm
22. Gravitational Search Algorithm
23. Income Rate
24. Active
25. Passive
26. Regret-based Biased Random Sampling

#### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسأله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با جریان‌های نقدی تنزیل‌یافته 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 به‌دست 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.

#### پی‌نوشت

1. Transfer points location problem
2. The multiple location of transfer point
3. Facility and transfer point location problem
4. Resource-Constrained Project Scheduling Problem

- [8] Viana A., & Sousa J., "Using metaheuristics in multi objective resource constrained project scheduling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 120, (2000), pp. 359- 374.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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).
- [14] 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.
- [15] 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.
27. <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/data.html>
28. Orthogonal Array
29. Quality Metric
30. Spacing Metric
31. Diversity Metric

#### 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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Hapke M., Jaszkiwicz A., & Slowinski R., "Interactive analysis of multiple criteria project scheduling problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 107, (1998), pp. 315–324,

- [25] Coello Coello C.A., Dhaenens C., & Jourdan L., "Advances in Multi-Objective Nature Inspired Computing", Springer, (2010).
- [26] 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).
- [27] مسعود سیفی، رضا توکلی مقدم و فریبرز جولای، بکارگیری  
الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل مساله  
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.
- [16] 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.
- [17] Rashedi E., Nezamabadi-pour H., & Saryazdi S., "GSA: A gravitational search algorithm", Information Sciences, Vol. 179, (2009), pp. 2232-2248.
- [18] Hassanzadeh H.R., & Rouhani M., "A MULTI-OBJECTIVE GRAVITATIONAL SEARCH ALGORITHM", IEEE, 2ed International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, (2010), pp. 7-12.
- [19] 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.
- [20] Hartmann S., "Project scheduling with multiple modes: a genetic algorithm", Annals of Operations Research, Vol. 102, (2001), pp. 111-135.
- [21] Drexl A., "Scheduling of project networks by job assignment", Management Science, Vol. 37, (1991), pp. 1590-1602.
- [22] 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.
- [23] Niu Q., Jiao B., & Gu X., "Particle swarm optimization combined with genetic operators for job shop scheduling problem with fuzzy processing time", Applied Mathematics and Computation, Vol. 205, (2008), pp. 148-158.
- [24] Taguchi G., "Introduction to quality engineering". White Plains: Asian Productivity Organization/UNIPUB, (1986).