



## Time-Cost-Quality Optimization using an Invasive Weed Algorithm with Activity Preemption in Construction Projects

M. J. Taheri Amiri <sup>1,\*</sup>, M. Hematian <sup>2</sup>, M.Jooj <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of civil engineering, Higher Education Institute of Pardisan, Mazandaran, Iran.

<sup>2</sup> Department of industrial engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.

<sup>3</sup> Department of civil engineering, Tabari University of Babol, Babol, Iran.

**ABSTRACT:** In the last decade, various methods are created to optimize time, cost, and quality. Solving such a problem on large scale is too hard using traditional methods in logical time. Recently, researchers are focused on a meta-heuristic algorithm to solve time-cost-quality tradeoff problems. How to make a balance among time, cost, and quality parameters is so critical in construction project management. In this study, an invasive weed optimization algorithm is applied to solve the problem. In the proposed model, activity time is changed so that maximum usage of resources is obtained. In other words, it is possible to perform some activity simultaneously if their duration is increased which causes to decrease time, cost and increase project quality. Obtained results indicate the advantages of the proposed algorithm. Finally, to validate the proposed model a small size instance problem is created and solved by GAMS software optimally and compared with proposed algorithm results in MATLAB software. Results show that both Pareto solution obtained is almost identical, then it validates the algorithms for large scale problem.

### Review History:

Received: Apr. 29, 2019

Revised: Feb. 25, 2020

Accepted: Apr. 15, 2020

Available Online: Jul. 13, 2020

### Keywords:

Time

Cost

Quality

Invasive weed algorithm

Construction projects

### 1. Introduction

According to the complexity of projects, it seems unlikely that project goals will be achieved without planning. Project planning and controlling is one the most important part of project management. Project scheduling to gain maximum quality and minimum cost in the least time is project management. Thus, the planning process is one the most significant principles in construction projects successful [1]. To generate a balance between time and cost of the project and increasing efficiency several ways to solve time-cost tradeoff problems and find an optimum combination of activity modes are developed such as mathematical programming models [2,3,4], heuristic methods [5,6], and meta-heuristic techniques [7,8].

In multi-objective and multi-mode project scheduling problems solution space is increased exponentially in medium and large-scale problems due to different execution modes that available for activities. These kinds of multi-objective problems are known as NP-hard [9]. Therefore, the meta-heuristic algorithm is used to solve the problem. Many meta-heuristic algorithms are developed to solve time-cost-quality trade-off problems optimally, for example, simulated annealing algorithm by Taheri Amiri, et al. [10], and genetic algorithm by Mungle, et al. [11].

In this study, time, cost, and quality with activity preemption are considered. Activity preemption, as the principle of the lean thinking approach, is considered to remove waste. The proposed model is solved by the invasive

weed optimization algorithm. Furthermore, to validate the proposed model a small size instance problem is created and solved by GAMS software optimally and compared with proposed algorithm results in MATLAB software.

### 2. Results and discussion

As said above, an invasive weed optimization algorithm is developed to solve the time, cost, and quality tradeoff problem. To do this end, a three-objective model considering activity preemption is developed. Then, two instance problems are solved by the proposed algorithm for performance evaluation. On the other hand, a small size problem is used to assess a meta-heuristic algorithm. Afterward, an e-constraint method is applied to solve the problem exactly due to the multi-objective model. Each objective is optimized separately and the best value is recorded as well as the upper bound of each one. Then, one main objective is considered and others are set as constraints.

In this study, the total cost is considered as the main objective function and two others are set as a constraint. To obtain the Pareto solution, different values of objectives are considered. It is possible some combination of objective points does not have a feasible solution. This problem is solved by GAMS software less than one minute on a dual-core system with CPU 3GHz and RAM 2GB. Moreover, the proposed algorithm able to find a Pareto solution in less than about 40 seconds. Results obtained from two methods are compared that indicate the suitable performance of the invasive weed

\*Corresponding author's email: jvd.taheri@gmail.com



optimization algorithm. Furthermore, the completion time and total cost of the project states the mathematical model validation.

### 3. Conclusions

In a construction project, time, cost and quality management are the most important goals of project management so that it performs in minimum completion time with the least cost and acceptable quality. By taking advantage of the systemic approach and using new management tools, faster steps can be taken to achieve these goals. A scheduling planning tried to reduce time, cost and maximize quality and decrease job preemption, then resource unemployment and cost is declined. The invasive weed optimization algorithm has presented a set of solutions that makes manager take decision more suitable.

To validate the proposed method, two examples as a case study are considered and solved by it which is obtained acceptable results. The results state that a proper and efficient solution is achieved. It can be inferred that a suitable combination of activity execution mode and its sequence-based on precedence relationships should be set to obtain a solution with balanced completion time, execution cost, and delay time in resources. Finally, after activity mode selection scheduling planning should be set so that preemption is minimized. Furthermore, the proposed problem is solved exactly with GAMS software on the small size and compared by the developed algorithm. Results indicate the appropriate performance of the proposed algorithm. For future work direction, resource-constrained, multi-mode activity, and multi-skilled one are suggested.

### References

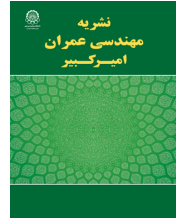
- [1] El-Rayes K., Kandil A., (2005), "Time-cost-quality trade off analysis for highway construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 131, No. 4, PP. 477-486.
- [2] Burns S., Liu L., Feng C., (1996), "The LP/IP hybrid method for construction time-cost trade-off analysis", *Construction Management and Economics*, Vol. 14, PP. 199-215.
- [3] Elmaghraby S.E., "Resource allocation via dynamic programming in activity networks", (1995), *European Journal of Operational Research*, Vol. 64, PP. 199-215.
- [4] De P., Dunne E.J., Gosh J.B., Wells C.E., (1995), "The discrete time-cost trade-off problem revisited", *European Journal of Operational*, Vol. 81, No. 2, PP. 225-238.
- [5] Siemens N., (1971), "A simple CPM time-cost trade-off algorithm", *Management Science*, Vol. 18, No. 3B, PP. 354-363.
- [6] Moselhi O., (1993), "Schedule compression using the direct stiffness method", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.20, PP. 65-72.
- [7] Hegazy T., (1999), "Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.26, PP. 685-697.
- [8] Zheng D.X.M., Ng S.T., Kumaraswamy M., (2005), "Applying Pareto ranking and niche formation to genetic algorithm-based multi objective time-cost optimization", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.131, No. 11, 2005, PP. 81-91.
- [9] De, P., Dunne, E., Ghosh, J., & Wells, C., (1997), "Complexity of the discrete time/cost trade-off problem for project networks", *Operations Research*, Vol. 45, PP. 302-306.
- [10] Taheri Amiri, M.J, Haghghi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2017), "Optimization of Time, Cost, and Quality in Critical Chain Method Using Simulated Annealing", *International Journal of Engineering*, Vol 30, No 5, pp. 705-713, Doi: 10.5829/idosi.ije.2017.30.05b.00.
- [11] Mungle, S, Benyoucef, L, Son, Y.J, Tiwari, M.K, (2013) "A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time-cost-quality trade-off problems: A case study of highway construction project", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol 26, 1953-1966.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. J. Taheri Amiri, M. Hematian, M. Jooj, *Time-Cost-Quality Optimization using an Invasive Weed Algorithm with Activity Preemption in Construction Projects*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 187-188.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16215.6163](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16215.6163)





## بهینه‌سازی زمان، هزینه، کیفیت با فعالیت‌های دارای انقطاع در پروژه‌های عمرانی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری علف‌های هرز

محمدجواد طاهری امیری<sup>۱\*</sup>، میلاد همتیان<sup>۲</sup>، مهدی جوج<sup>۳</sup>

- ۱- دانشکده عمران، موسسه آموزش عالی پردیسان، فریدونکنار، ایران.
- ۲- دانشکده صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.
- ۳- دانشکده عمران، موسسه آموزش عالی طبری، بابل، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹  
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۰۶  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

زمان  
هزینه  
کیفیت  
الگوریتم علف‌های هرز  
پروژه‌های ساخت

**خلاصه:** در چند دهه اخیر روش‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت ساخت، ارائه شده است. با افزایش ابعاد و نیز پیچیده‌تر شدن مسائل، حل این مسائل با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی در زمان مناسب، بسیار مشکل است. در سالیان اخیر، توسعه همه جانبه الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی، توجه محققین را برای بررسی امکان کاربرد این الگوریتم‌ها در حل تبادلات زمان-هزینه-کیفیت به خود جلب کرده است. چگونگی ایجاد تعادل میان پارامترهای هزینه، زمان و کیفیت در مدیریت پروژه‌های ساخت بسیار مهم است. در این تحقیق، از یک الگوریتم فرا ابتکاری بهبود یافته علف‌های هرز برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت پروژه استفاده شده است. در مدل ارائه شده، زمان فعالیت‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کند که بتوان حداکثر استفاده را از منابع برد. به عبارت دیگر با افزایش زمان بعضی از فعالیت‌ها، می‌توان آنها را به طور همزمان با فعالیت‌های دیگر اجرا کرد که در نهایت باعث کاهش هزینه، زمان و افزایش کیفیت پروژه خواهد شد. نتایج حاصل از گزارشات جواب‌های پارتو، مزایا و اثربخشی الگوریتم بهینه‌سازی مذکور را نشان می‌دهند. در نهایت به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده مدل پیشنهادی در ابعاد کوچک به صورت دقیق با استفاده از نرم افزار گمز و به صورت فراابتکاری با نرم‌افزار متلب حل شده و نتایج به دست آمده در دو حالت با هم مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که جواب‌های دو حالت به هم بسیار نزدیک بوده، بنابراین می‌توان به نتایج به دست آمده در ابعاد بزرگ نیز اعتماد کرد.

### ۱- مقدمه

پروژه، نیازمند تحلیل‌های متنوعی است که یکی از آنها، مدل سازی جهت انتخاب صحیح هزینه، زمان و کیفیت انجام پروژه و میزان و زمان لازم برای استفاده از منابع است. این مسأله کمک شایانی به مدیریت بهینه پروژه و تصمیم گیری در شرایط بحرانی خواهد نمود. در فضایی که رقابت شرکت‌ها روز به روز نزدیک تر می‌شود و تفاوت‌های کوچک در ارائه قیمت در مناقصه‌ها منجر به توفیق یا شکست در مناقصه می‌شود، ارائه برنامه‌ای که منطبق با واقعیت باشد و بتواند تمام واقعیت‌های اقتصادی را در مدل یک پروژه منظور کند، حائز اهمیت زیادی است. این اهمیت نه تنها در ارائه قیمت برای یک پروژه پیش از شروع اجراست، بلکه پس از شروع به کار نیز،

امروزه با توجه به وسعت و پیچیدگی پروژه‌ها، بدون داشتن برنامه‌ریزی، امکان رسیدن به اهداف پروژه امری بعید به نظر می‌رسد. یکی از بخش‌های مهم مدیریت پروژه، هنر ارزیابی، برنامه‌ریزی و نظارت بر پروژه‌هاست. هدف از مدیریت پروژه، زمان‌بندی عملکردی و فنی پروژه به منظور کسب بهترین کیفیت با کمترین هزینه در کوتاه ترین زمان است. لذا روند برنامه‌ریزی یکی از مهم ترین اصول در موفقیت پروژه‌های ساخت می‌باشد [۱]. به طور کلی مدیریت و برنامه ریزی اجرای فعالیت‌ها و استفاده از منابع مورد نیاز در یک

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jvd.taheri@heip.ac.ir



[۶و۵] و تکنیک‌های فراابتکاری [۸و۷] می‌باشند. در مسائل زمان بندی پروژه چندهدفه و چند حالتی از آنجایی که حالات اجرایی مختلفی برای هر یک از فعالیت‌ها وجود دارد، بنابراین فضای حل مسأله به صورت نمایی در مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ افزایش می‌یابد. این نوع مسائل موازنه چند هدفه به صورت مسائل NP-hard شناخته می‌شوند [۹]. بدین منظور از الگوریتم‌های فراابتکاری به منظور حل مسأله استفاده شده است. در زمینه حل مسائل موازنه زمان-هزینه-کیفیت، الگوریتم‌های فراابتکاری بسیاری به منظور بهینه‌سازی آنها توسعه داده شده است، مانند الگوریتم شبیه‌سازی تبرید توسط طاهری امیری و همکاران [۱۰]، الگوریتم ژنتیک توسط مونگله<sup>۱</sup> و همکاران [۱۱]. در مطالعه حاضر نیز سه هدف زمان، هزینه و کیفیت با در نظر گرفتن انقطاع میان فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است. انقطاع میان فعالیت‌ها، به منظور حذف اتلاف‌های میان فعالیت‌ها که یکی از مباحث رویکرد تفکر ناب می‌باشد، لحاظ شده است. مدل پیشنهادی این تحقیق با استفاده از الگوریتم فراابتکاری علف‌های هرز حل شده است. همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از این تحقیق، مدل پیشنهادی در ابعاد کوچک در دو حالت دقیق و فراابتکاری حل شده و نتایج به دست آمده از این دو حالت با هم مورد مقایسه قرار گرفت.

## ۲- ادبیات موضوع

لی<sup>۲</sup> و ژانگ<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۳، به بررسی برنامه‌ریزی چندحالتی منابع محدود با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان پرداختند. در این روش، برای حل برنامه‌ریزی پروژه‌ها با منابع محدود چند حالتی، از منابع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر استفاده شده است. در این تحقیق، برای بروزرسانی فرمون از استراتژی نخبه‌گرا استفاده شده است. نتایج به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان با الگوریتم‌های ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و بهینه‌سازی ازدحام ذرات و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی چندهدفه مورد مقایسه قرار گرفته است. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده به جز روش ازدحام ذرات ترکیبی از بقیه روش‌ها جواب بهتری داده است [۱۲].

وجود یک برنامه زمان بندی انعطاف پذیر می‌تواند به یک شرکت در مواجهه با انواع مشکلات که بسیاری اوقات، خارج از حیطه اختیار آن است، یاری برساند. یک برنامه انعطاف پذیر این قابلیت را دارد که با استفاده از ارتباط بین هزینه، زمان و کیفیت در یک پروژه، تغییرات لازم را در هزینه، زمان و کیفیت و منابع در نظر بگیرد و راه‌حل‌های مناسب گوناگون را در اختیار کاربران قرار دهد تا بتوانند قبل از اجرای پروژه، برآورد مناسبی از هزینه، زمان و کیفیت اجرایی و میزان منابع مورد نیاز در پروژه داشته باشند. در مسائل موازنه زمان-هزینه-کیفیت، هر فعالیت چندین حالت اجرای مختلف دارد و در واقع این مسأله، تصمیم‌گیری برای ترکیب بهینه از روش‌های اجرایی با هدف کمینه کردن هزینه و زمان در شرایط بیشینه کیفیت است. در انجام یک پروژه ممکن است زمان، هزینه و کیفیت هر فعالیت به روش اجرایی آن مربوط می‌شود. بطوری‌که منابع یا تکنیک‌های کم هزینه، دوره طولانی‌تر تکمیل یک فعالیت را منجر می‌شوند. برای مثال استفاده از منابع پربارتر (استفاده از تجهیزات کارتر، کرایه کارگران بیشتر یا اضافه کاری) منجر به ذخیره زمان می‌گردد، اما هزینه را افزایش می‌دهد. از طرفی کاستن زمان یا هزینه احتمالاً باعث کیفیت پایین پروژه خواهد شد. زمان کلی پروژه براساس روش مسیر بحرانی محاسبه می‌شود. هزینه کل پروژه، مجموع هزینه تک‌تک فعالیت‌ها است و کیفیت کلی پروژه از طریق مجموع وزنی کیفیت هر یک از فعالیت‌ها به دست می‌آید. وزن مشخصه کیفی هر فعالیت، اهمیت و سهم کیفیت آن فعالیت را در کیفیت کل نشان می‌دهد که باید توسط مدیران پروژه تعیین گردد. به طوری‌که مجموع وزن‌های تخصیص داده شده باید برابر یک باشد. ساختارهای ترکیبی متفاوت فعالیت‌ها منجر به زمان، هزینه و کیفیت کل منحصر به آن ساختار می‌شوند. در واقع تصمیم‌گیری برای یک ترکیب بهینه از روش‌های اجرایی شامل طرح‌های به کارگیری منابع و تکنولوژی‌های ساخت مناسب برای کمینه کردن زمان و هزینه و در عین حال بیشینه نمودن کیفیت که مسأله موازنه زمان-هزینه-کیفیت نامیده می‌شود، بخش مهمی برای برنامه‌ریزان پروژه است. در راستای ایجاد تعادل در زمان و هزینه پروژه و به منظور افزایش کارایی و بهره‌وری یک پروژه، روش‌های فراوانی برای حل مسائل موازنه زمان-هزینه و یافتن یک ترکیب بهینه از روش‌های اجرای فعالیت‌ها پیشنهاد شده است. این روش‌ها شامل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی [۲و۳و۴]، روش ابتکاری

1 Mungle  
2 Li  
3 Zhang

بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالتی توسط بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی پرداخته‌اند. بهینه‌سازی ازدحام ذرات به طور گسترده در حل مسائل زمان بندی استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب الگوریتم ازدحام ذرات ترکیبی و توانایی در دست یابی به جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه دارد [۱۶].

فان پتقم<sup>۳</sup> و فان‌هوک<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۰، به بررسی روش‌های مختلف الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله برنامه‌ریزی پروژه با محدودیت منابع چند حالتی با استفاده از داده‌های استاندارد پرداخته‌اند. در این مقاله، مقایسه‌ای بین الگوریتم فراابتکاری ساخته شده و الگوریتم‌های موجود بر روی مجموعه‌ای از داده‌ها و بررسی مجموعه داده‌های تولید شده جدید صورت گرفته است. الگوریتم‌های مورد استفاده شامل الگوریتم ژنتیک، استراتژی جستجو، شبیه‌سازی تبرید، ازدحام ذرات و مورچگان، دیفرانسیل تکاملی بوده است. نتایج محاسباتی، ارائه و برای تحقیقات آینده فرموله شده‌اند [۱۷].

طاهری امیری و همکاران در سال ۲۰۱۷ مسئله برنامه‌ریزی پروژه موازنه زمان-هزینه را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک حل نموده است. در این تحقیق، تابع هدف زمان با استفاده از روش زنجیره بحرانی محاسبه شده و بافر پروژه از طریق روش بریدن و چسباندن به دست آمده است. همچنین به منظور محاسبه تابع هدف هزینه، از مجموع هزینه‌های مربوط به منابع مصرفی و غیر مصرفی استفاده شده است. اهداف زمان و هزینه با استفاده از تابع مطلوبیت به یک هدف تبدیل شده و مسئله به صورت تک هدفه حل شده است [۱۸].

طاهری امیری و همکاران در سال ۲۰۱۸، مسئله موازنه زمان-هزینه را در شرایط محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب در شرایط چندپروژه‌ای حل نموده است. در این تحقیق سه پروژه با تعداد فعالیت‌های ۷، ۸ و ۱۰ به طور همزمان مورد برنامه‌ریزی تحت محدودیت منابع قرار گرفته است، همچنین روش زمانبندی پروژه در این تحقیق روش زنجیره بحرانی بوده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم ارائه شده عملکرد مناسبی به منظور حل مسئله زمان-هزینه در شرایط محدودیت منابع داشته است [۱۹].

کریمرز<sup>۵</sup> (۲۰۱۹) مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع

افشار نجفی در سال ۲۰۱۴، به بررسی مسئله هزینه با وجود منابع چند حالتی با بکارگیری و زمان در دسترس بودن منابع پرداخته است. این مسئله، مدل واقعی‌تر و توسعه یافته نسبت به محدودیت منابع تک حالتی می‌باشد. در این پروژه، فعالیت‌ها به صورت پایان به شروع بدون در نظر گرفتن تأخیر می‌باشد، همچنین منابع در نظر گرفته شده برای فعالیت‌ها از نوع منابع تجدیدپذیر می‌باشد. ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده و سپس روش الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای به دست آوردن جواب قابل قبول توسعه داده شده که اثربخشی آن در ۳۰۰ نمونه مسئله بررسی شده است. نتایج محاسباتی حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم فراابتکاری ارائه شده برای مسئله محدودیت منابع چندحالتی با به کارگیری زمان در دسترس منابع می‌باشد [۱۳].

کوجلان<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی الگوریتم شاخه و برش هزینه برای تسطیح منابع چند حالتی پرداخته‌اند. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و برنامه‌نویسی الگوریتم برای برنامه‌ریزی پروژه‌ها با محدودیت منابع چندحالتی، با قابلیت محدودیت زمان و با هدف به حداقل رساندن هزینه در دسترس به منابع پیشنهاد شده است. جواب‌های بهینه صحیح، از طریق الگوریتم شاخه و برش هزینه به دست آمده است. همچنین در این تحقیق، با فرمول بندی مجدد مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط که قابلیت حل تا ۳۰ فعالیت را داشتند، مدل اصلاحی توانست تا ۵۰ فعالیت را حل نماید [۱۴].

افروزی و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی مسئله موازنه زمان-هزینه گسسته محدودیت منابع چندحالتی و حل آن به وسیله الگوریتم ژنتیک مغلوب فازی پرداخته‌اند. یکی از مهمترین مشکلات در برنامه‌ریزی پروژه، موازنه زمان-هزینه گسسته می‌باشد. در این تحقیق، منابع مورد نیاز برای انجام فعالیت‌ها در حالت‌های متفاوت است. هزینه‌ها، شامل هزینه مستقیم و هزینه غیرمستقیم می‌باشد. در این مقاله، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مغلوب فازی، به حل برخی از مشکلات ایجاد شده برای این مدل اقدام نموده و نتایج به دست آمده از این تحقیق، با نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است [۱۵].

جابویی<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸، به بررسی حل مسئله زمان

3 Van Peteghem

4 Vanhoucke

5 Creemers

1 Coughlan

2 Jaboui

یکی از ویژگی‌های مهم علف‌های هرز، پایداری و تطابق پذیری بسیار بالای آنها در طبیعت می‌باشد که این ویژگی مبنای بهینه‌سازی در الگوریتم علف‌های هرز قرار گرفته است. علف هرز پدیده‌ای است که در جستجوی بهینگی و یافتن بهترین محیط برای زندگی بوده و به سرعت خود را با شرایط محیطی وفق داده و در مقابل تغییرات مقاوم می‌باشد. در ابتدا علف هرز به دنبال تولید تعداد زیاد فرزندان بوده که موجب افزایش کمیت و همچنین پوشش محیط در دسترس خود می‌شود، سپس به دلیل محدودیت ظرفیت، با افزایش کیفیت به رشد به صورت رقابتی ادامه می‌دهد. به طور کلی هدف علف‌های هرز یافتن بهترین محیط برای زندگی می‌باشد.

### ۳-۱- اکولوژی تولید مثل علف‌های هرز

علف‌های هرز، گیاهانی هستند که در یک منطقه جغرافیایی مشخص به شکل سراسری و برجسته رشد می‌کنند، به طوری که توسط بشر قابل حذف و کنترل نیستند. یک ادعایی که در مورد علف‌های هرز وجود دارد این است که علف‌های هرز همیشه برنده هستند. به طور کلی دلایل این ادعا را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

- ۱- وجود علف‌های هرز بعد از هزاران سال از کشاورزی
- ۲- وجود علف‌های هرز حتی بعد از استفاده از سموم مختلف
- ۳- ظاهر شدن گونه‌های جدید علف‌های هرز به صورت گسترده روی زمین

ویژگی‌های فوق نشان می‌دهد که علف‌های هرز، گیاهانی قوی و مزاحم در کشاورزی هستند. همچنین نشان دهنده این واقعیت است که علف‌های هرز خود را با محیط تطبیق می‌دهند و برای رشد رفتار خود را تغییر می‌دهند. موفقیت علف‌های هرز، وابسته به اکولوژی و زیست‌شناسی آنها است [۲۲].

### ۳-۲- شبیه‌سازی رفتار علف‌های هرز

مراحل شبیه‌سازی رفتار علف‌های هرز شامل موارد زیر می‌باشد:

مرحله اول: پخش دانه در فضای مورد نظر

مرحله دوم: رشد دانه‌ها با توجه به مطلوبیت (زاد و ولد) و پراکندگی محیطی

مرحله سوم: ادامه حیات علف‌هایی با مطلوبیت بیشتر (حذف رقابتی)

تصادفی و با انقطاع را مورد مطالعه قرار داده است. در این مطالعه فرض شده زمان انجام فعالیت‌ها دارای توزیع نمایی می‌باشند. در این راستا یک مدل زنجیره مارکوف برای به دست آمدن زمان‌بندی بهینه ارائه شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل حداقل سازی زمان تکمیل پروژه بوده است [۲۰].

فن هوکه<sup>۱</sup> و کوئلو<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) مسأله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با در نظر گرفتن زمان راه اندازی و با امکان انقطاع فعالیت مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور یک رویکرد حل فراابتکاری برای پروژه‌هایی با شبکه‌های بزرگ توسعه داده شده است. در این مطالعه فرض شده چهار نوع زمان راه‌اندازی برای فعالیت‌ها وجود دارد. نتایج محاسباتی نشان داده است که انقطاع فعالیت گاهی منجر به کاهش زمان تکمیل پروژه می‌شود [۲۱].

با توجه به بررسی ادبیات تحقیق، مشخص گردید که تاکنون در مطالعه ای امکان انقطاع فعالیت‌ها در مسأله سه هدفه زمان، هزینه، کیفیت در نظر گرفته نشده است، از این‌رو در این مطالعه این فرض به عنوان نوآوری تحقیق لحاظ گردیده است.

### ۳- روش شناسی

الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز، یک الگوریتم بهینه‌سازی عددی، الهام گرفته از رشد علف‌های هرز می‌باشد. این الگوریتم در سال ۲۰۰۶ توسط محرابیان و لوکاس<sup>۳</sup> در قالب مقاله‌ای پیشنهاد شد [۲۲]. علف‌های هرز گیاهانی هستند که رشد هجوم آورنده و شدید آنها، تهدید مهمی برای گیاهان زراعی محسوب می‌شود. علف‌های هرز، بسیار پایدار و تطابق‌پذیر در مقابل تغییرات محیط می‌باشد. بنابراین با الهام گرفتن و شبیه‌سازی خصوصیات آنها می‌توان به یک الگوریتم بهینه‌سازی قوی رسید. علف‌های هرز تقریباً در همه مزارع و باغ‌های ساخت دست بشر دیده می‌شوند و مستقل از این که ما چقدر و چگونه برای ریشه‌کن شدن آنها تلاش کرده ایم، تقریباً همیشه آن‌ها برنده بوده‌اند. مطالعه رفتار این گونه‌های گیاهی و درس گرفتن از شیوه تکثیر، بقا و تطبیق-پذیری آن‌ها، قطعاً می‌تواند برای ما انسان‌ها، درس آموز باشد. در طبیعت علف‌های هرز، رشدی شدید دارند و این رشد شدید تهدیدی برای گیاهان مفید می‌باشد.

1 Vanhoucke

2 Coelho

3 Lucas

پس از ایجاد یک توالی از فعالیت‌ها، براساس تابع پیش‌نیازی، رابطه پیش‌نیازی هر رشته بررسی می‌گردد. کد مربوط به بررسی رابطه پیش‌نیازی در شکل زیر نشان داده شده است.

```
Function [newX]=PrecedenceCheck(x,Precedence)
newX=[];
while true
for i=x
if all(ismember(cell2mat(Precedence(i)),newX));
break;
end
end
[newX]=[newX i];
[j]=find(x==i);
x(j)=[];
if isempty(x)
break;
end
end
end
```

شکل ۲. کد بررسی رابطه پیش‌نیازی

Fig. 2. Prerequisite Relationship Review Code

پس از بررسی رابطه پیش‌نیازی، اگر رشته‌ای رابطه را برآورده نسازد اصلاح می‌شود. سپس مقادیر تابع هدف برای هر رشته محاسبه می‌گردد. کد مربوط به محاسبه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

```
function T=caltotaltime(FT)
T=max(max(FT));
End
```

شکل ۳. شبه کد تابع هدف زمان

Fig. 3. Pseudo-code time objective function

```
function Cp=calCost(FT,data,Bik)
W=data.W;
c=data.c;
len=size(c,2);
c=c.*Bik;
c=c(c>0);
C=W.*repmat(c,1,len);
C0=data.C0;
B=data.B;
Cp=sum(sum(C))+C0+B*max(max(FT));
End
```

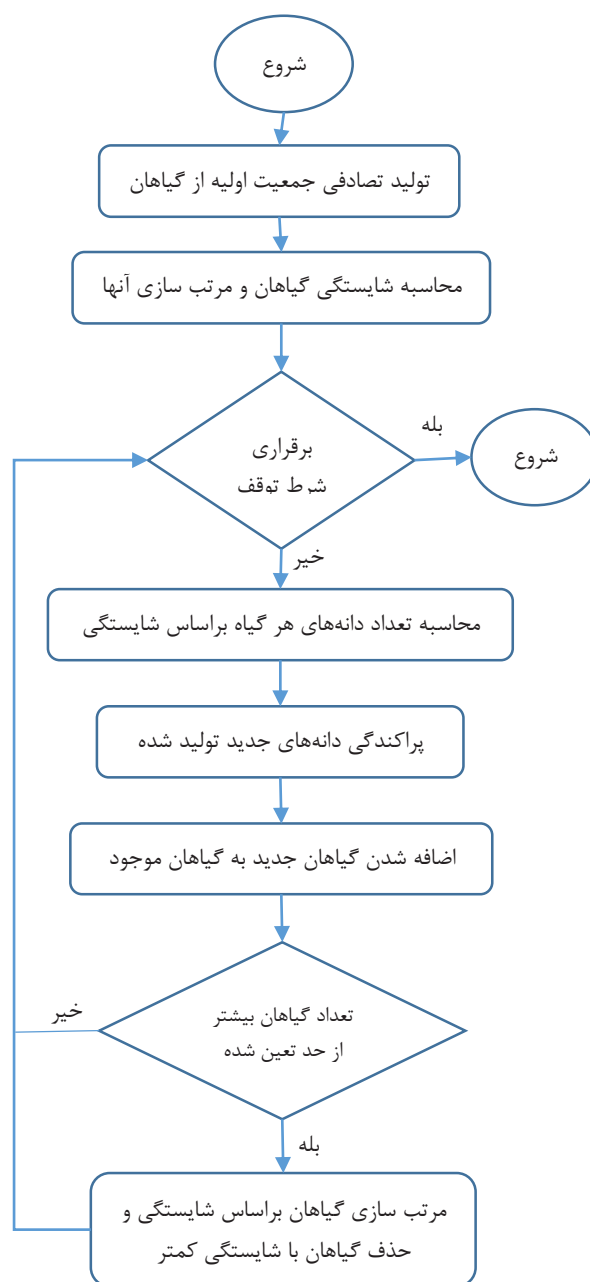
شکل ۴. شبه کد تابع هدف هزینه

Fig. 4. Pseudo-code cost objective function

مرحله چهارم: ادامه پروسه تا رسیدن به گیاهان با بهترین مطلوبیت  
فلوچارت مربوط به نحوه عملکرد علف‌های هرز در شکل ۱ نمایش داده شده است.

### ۳-۳- تولید جواب

در گام اول رشته‌ای به تعداد فعالیت‌ها ایجاد می‌شود. مقادیر موجود در رشته شامل اعداد صحیح از ۱ تا تعداد فعالیت‌ها می‌باشد.



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم علف‌های هرز

Fig. 1. Weed Algorithm Flowchart

است، اما مقادیر کاری ( $W_{i,j}$ ) با بخش دیگر متفاوت باشد. همچنین ممکن است مقدار کار برای یک فعالیت در یک بخش صفر در نظر گرفته شود ( $W_{i,j} = 0$ ) و این بدان معناست که فعالیت  $i$  در بخش  $j$  انجام نمی‌شود. در روش پیشنهاد شده، زمان مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت  $i$  که به صورت ( $d_i$ ) نشان داده می‌شود، به عنوان متغیر تصمیم و وابسته به مقدار منابع یا ساختار گروه کاری می‌باشد و مقدار آن در تمام بخش‌ها یکسان است. به عبارت دیگر، فرض می‌شود قطع نظر از مقادیر کاری مختلف در بخش‌های متفاوت، یک گروه کاری یا یک منبع مخصوص با نرخ معینی در تمام بخش‌ها کار خواهد کرد و تعیین مقدار منابع بر عهده مدیر پروژه است (به عنوان مثال برای یک مترمربع اسکلت فلزی مقدار  $d_i$  برای یک گروه کاری با ۵ کارگر برابر  $0.02$  مترمربع/روز و برای گروه کاری با ۱۸ کارگر برابر  $0.1$  مترمربع/روز است). هزینه مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت  $i$  که به صورت ( $i_c$ ) نشان داده می‌شود، نیز به مقدار ( $i_d$ ) وابسته است و این رابطه نه یک رابطه پیوسته خطی یا غیر خطی، بلکه یک رابطه گسسته در نظر گرفته می‌شود و برای هر فعالیت به صورت مرتب (زمان، هزینه، کیفیت) بیان می‌شود. به این ترتیب، زمان انجام هر فعالیت در هر بخش، از ضرب مقدار  $d_i$  در  $W_{i,j}$  به دست می‌آید و با  $D_{i,j}$  نشان داده می‌شود و هزینه هر فعالیت در هر بخش از ضرب مقدار  $C_i$  در  $W_{i,j}$  به دست می‌آید و با  $C_{i,j}$  نشان داده می‌شود. بنابراین مقادیر  $D_{i,j}$  و  $C_{i,j}$  برای هر فعالیت در هر بخش با بخش دیگر متفاوت خواهد بود. در این مدل، فعالیت‌ها به دو نوع قابل انقطاع و غیرقابل انقطاع تقسیم می‌شوند. به این معنی که اگر فعالیت از نوع غیرقابل انقطاع ( $a$ ) باشد، به صورت پیوسته اجرا خواهد شد. این بدان معنی است که انتخاب فعالیت‌هایی با تپ  $a$  ممکن است منجر به طولانی‌تر شدن کل پروژه شود و اگر فعالیت از نوع قابل انقطاع ( $b$ ) باشد، می‌توان پیوستگی آن‌را در بخش‌ها و واحدهای پی‌درپی نادیده گرفت و برای جلوگیری از افزایش زمان کلی اتمام پروژه، آن‌را در مقاطعی قطع کرد، البته باید توجه نمود که زمان انقطاع کمترین میزان ممکن را داشته باشد تا تأثیر سوء بر هزینه، زمان و کیفیت اتمام پروژه نداشته باشد. در مدل پیشنهاد شده، رابطه بین فعالیت‌ها از نوع پایان به شروع فرض می‌شود. یعنی فعالیت  $i$  در واحد  $j$  تنها زمانی می‌تواند شروع شود که دو شرط زیر را داشته باشد:

۱- فعالیت  $i$  در واحد  $j-1$  به اتمام رسیده باشد.

```
function Q=calQuality(data,val)
Qk=data.Qk;
W=data.W;
n=data.n;
Qki=zeros(1,n);
for i=1:n
    Qki(i)=Qk(i,val(i));
end
Qki=Qki';
Q=sum(sum(W.*repmat(Qki,1,size(W,2))))/sum(sum(W));
End
```

شکل ۵. شبه کد تابع هدف کیفیت

Fig. 5. Pseudo-code quality objective function

سپس براساس مرتب سازی نامغلوب، جواب‌ها مرتب شده، تعدادی از علف‌های هرز با شایستگی بیشتر به نسل بعدی منتقل شده و تعدادی دیگر حذف می‌گردند. در هر تکرار، انحراف معیار جدید برورسانی شده و براساس آن علف‌های هرز جدید تولید می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا تکرارها به حد تعیین شده برسند.

#### ۴- تعریف مسأله

براساس مطالب مذکور، در تحقیق حاضر سعی بر آن است تا با استفاده از مفهوم الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز به حل مسأله موازنه زمان-هزینه-کیفیت پرداخته شود. در این قسمت برای مشاهده عملکرد مدل پیشنهادی و بررسی صحت سنجش توانایی این مدل به حل دو مسأله معروف از مسائل بهینه‌سازی موازنه زمان-هزینه-کیفیت با در نظر گرفتن انقطاع و عدم انقطاع پرداخته می‌شود و برای حالت زمان-هزینه-کیفیت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه به تشریح مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق پرداخته شده است. مدل مطرح شده در این پژوهش، از مدل ارائه شده توسط لانگ<sup>۱</sup> و اهاساتو<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹ اقتباس شده است [۲۳]. این مدل برای یک پروژه با  $N$  فعالیت که به صورت متناوب در  $Q$  بخش (واحد) تکرار می‌شود، در نظر گرفته شده است. فعالیت‌های هر بخش و ارتباط بین آن‌ها با یک شبکه گرهی مدل شده است و این فعالیت‌ها به طور مشابه در تمام بخش‌ها تکرار می‌شود. برای اجرای هر فعالیت، گزینه‌های مختلفی وجود دارد که شامل زمان، هزینه و کیفیت مورد نیاز برای انجام یک واحد از آن فعالیت است. در این مدل فرض می‌شود که تعداد منابع و میزان و سرعت (نرخ) کارکرد آن‌ها در هر بخش ثابت

- 1 Long
- 2 Ohsato



dik: زمان مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i برای حالت

اجرائی k ام، در صورتی که آن گزینه انتخاب شود.

cik: هزینه مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i برای

حالت اجرائی k ام، در صورتی که آن گزینه انتخاب شود.

۲-فعالیت پیش‌نیاز i یعنی t در واحد j تمام شده باشد.

در صورت وجود زمان تأخیر می‌توان این زمان را نیز به زمان t

اضافه کرد.

#### ۴-۱- اندیس‌ها

j: واحد فعالیت (1, 2, ..., Q)

i: تعداد فعالیت (1, 2, ..., M)

k: حالت اجرا (گزینه) فعالیت

t: زمان

#### ۴-۴- مدل ریاضی مسأله

$$\text{Min } T_p = \text{Max}_{i,j} (f_{ij}) = \text{Max}_{i,j} (S_{ij} + D_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{Min } C_p = C_D + C_I = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Q C_{ij} + (C_o + B T_p) \quad (2)$$

$$\text{Max } Q_p = \frac{\sum_{i=1}^M W e_i \sum_{k=1}^K Q_{ik}}{\sum_{i=1}^M W e_i} \quad (3)$$

#### ۴-۲- پارامترها

Dij: زمان مورد نیاز برای تکمیل فعالیت i در واحد j

ci: هزینه مستقیم مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i

di: زمان مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i

Cij: هزینه مورد نیاز برای تکمیل فعالیت i در واحد j

Co: هزینه اولیه

B: هزینه غیر مستقیم روزانه

Wi.j: مقدار کار فعالیت i در واحد j

Lagt.i: زمان تأخیر بین فعالیت پیش‌نیاز t و فعالیت i

Qik: کیفیت فعالیت i در حالت اجرائی k

Wei: ارزش فعالیت i

#### ۴-۵- محدودیت‌ها

$$D_{ij} = d_i W_{ij} \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$C_{ij} = c_i W_{ij} \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$d_i = d_i^k . B_i^k \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$c_i = c_i^k . B_i^k \quad \forall i, k \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K B_i^k = 1 \quad (8)$$

$$S_{ij} + D_{ij} + \text{lag}_{it} \leq S_{i,j+1} \quad \forall i, t \in \{P\} \quad (9)$$

$$S_{ij} + D_{ij} \leq S_{i,j+1} \quad \forall i, j = 1, \dots, Q-1 \quad (10)$$

$$F_{ij} = S_{ij} + D_{ij} \quad \forall i, j \quad (11)$$

#### ۴-۳- متغیرهای مسأله

Qp: کیفیت پروژه

TP: زمان کل پروژه

Qp: کیفیت کل پروژه

CP: هزینه کل پروژه

CD: هزینه مستقیم

CI: هزینه غیر مستقیم

di: زمان مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i

Sij: زمان شروع فعالیت i در واحد j

Fij: زمان پایان فعالیت i در واحد j

Bik: عدد باینری ۰ یا ۱ برای انتخاب حالت اجرائی k ام، در

صورتی که آن گزینه انتخاب شود ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.

رابطه (۱) نشان دهنده نحوه به دست آمدن زمان ختم پروژه که

معادل زمان ختم آخرین فعالیت پروژه می‌باشد. رابطه (۲) نشان

دهنده نحوه محاسبه هزینه‌های پروژه می‌باشد که از مجموع هزینه

های مستقیم و غیرمستقیم پروژه به دست می‌آید. رابطه (۳) نشاندهنده

نحوه محاسبه کیفیت در پروژه می‌باشد که از حاصل تقسیم مجموع

وزنی کیفیت فعالیت‌ها بر جمع وزن‌ها به دست می‌آید. رابطه‌های

(۴) و (۵) به ترتیب زمان تکمیل و هزینه اجرای بخش j ام از فعالیت

i را نشان می‌دهد. رابطه‌های (۶) و (۷) نیز زمان و هزینه کل فعالیت

i را نشان می‌دهد. رابطه (۸) تضمین می‌نماید که به ازای هر فعالیت

توسط یک گروه که از یک مکان به مکان دیگر حرکت می‌کند، بدون تأخیر زمانی انجام می‌شود و همه فعالیت‌های این پروژه از نوع قابل انقطاع (b) هستند. برای انجام هر فعالیت، چندین گزینه (حالت اجرا) از گروه‌های کاری (منابع) وجود دارد. زمان، هزینه و کیفیت تکمیل هر واحد از هر فعالیت معین به صورت یک زوج مرتب برای هر گروه کاری مشخص است. پس از انتخاب هر گروه، زمان، هزینه و کیفیت مورد نیاز انجام هر فعالیت در هر واحد محاسبه می‌شود و سپس بر اساس روش مسیر بحرانی که طولانی‌ترین زمان مورد نیاز برای اتمام پروژه است، مدت زمان انجام پروژه و هزینه برآورد شده و کیفیت برای آن به دست می‌آید. این فرآیند به دفعات توسط الگوریتم انجام می‌شود و نهایتاً طیفی از بهترین جواب‌ها به صورت مجموعه جواب پارتو ارائه می‌شود که در یک انتهای آن، زمان حداقل، هزینه حداکثر و کیفیت کم قرار دارد و در انتهای دیگر، زمان حداکثر، هزینه حداقل و کیفیت بالا. بدین ترتیب تصمیم‌گیران پروژه می‌توانند مناسب‌ترین گزینه را که بیشترین هماهنگی را با شرایط موجود دارد، انتخاب کنند. اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها و گروه‌های کاری در جدول ۲ آمده است.

پس از حل مدل در نرم افزار برنامه‌نویسی متلب، نتایج به شرح زیر به دست آمده است. با اجرای الگوریتم، هفت جواب، پیشنهاد شده است که زمان، هزینه و کیفیت حالت انتخابی برای هر یک از فعالیت‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است. بهترین زمان برای اجرای فعالیت‌ها، ۷۶ روز با هزینه اجرایی ۱۳۶۱۸۰۰۰ و با بهترین کیفیت ۸۶ می‌باشد و بهترین هزینه اجرای فعالیت‌ها، ۱۲۹۱۷۷۵ و زمان اجرای ۸۲ روز و بهترین کیفیت اجرای فعالیت ۸۵ می‌باشد و بهترین کیفیت اجرای فعالیت ۸۹ و هزینه آن ۱۴۰۸۷۵۰۰ و زمان آن ۸۲ روز می‌باشد که بسته به شرایط پروژه و میزان اهمیت هر یک از پارامترهای زمان، هزینه و کیفیت، هر کدام از گزینه‌های اجرایی زیر می‌توانند انتخاب گردند. همچنین، نتایج حاصله برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت مربوط به مطالعه مثال اول با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی علف‌هرز در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد جواب‌ها شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان هزینه-کیفیت به دست آمده که با دایره نشان داده شده است، می‌باشد. در این میان نقاطی که با رنگ قرمز نشان داده شده، به عنوان جواب‌های نامغلوب شناخته شده‌اند. بدین معنی که این نقاط نسبت به یکدیگر

تنها باید یک حالت اجرا انتخاب شود. رابطه (۹)، رابطه پیشنهادی فعالیت‌ها را بیان مینماید، یعنی یک فعالیت زمانی آغاز می‌شود که فعالیت‌های پیش نیاز آن تکمیل شده باشند. رابطه (۱۰)، رابطه پیش‌نیازی را برای فعالیت‌های غیرقابل انقطاع نشان می‌دهد. در نهایت رابطه (۱۱) زمان شروع و پایان بخش زام فعالیت  $i$  را محاسبه می‌نماید.

#### ۴-۶- متغیرهای تصمیم و پارامترها

در این مسأله،  $d_i$  به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود و  $C_{ij}, D_{ij}, c_i$  تابع‌هایی از  $d_i$  هستند. همچنین مقادیر  $F_{ij}$  و  $S_{ij}$  با توجه به روابط (۹) الی (۱۱)، براساس مقادیر  $D_{ij}$  به دست می‌آید.

#### ۴-۷- مقادیر ورودی الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز

مقادیر ورودی الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مطابق جدول شماره ۱ تنظیم شده است: همچنین لازم به ذکر است که شرط توقف الگوریتم همان تعداد تکرارها در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۸- مطالعه موردی

برای ارزیابی و سنجش عملکرد برنامه، از دو نمونه مثال عملی که در مطالعات پیشین توسط محققان و براساس مدل‌های پیشنهادی آنان حل شده است، استفاده می‌شود.

#### مثال اول

مثال اول، مثال پل بتنی سه دهانه است که این پروژه شامل چهار بخش (واحد) است و در هر واحد فعالیت‌های خاک‌برداری، فونداسیون، ستون، تیر، دال به ترتیب انجام خواهد شد. هر فعالیت

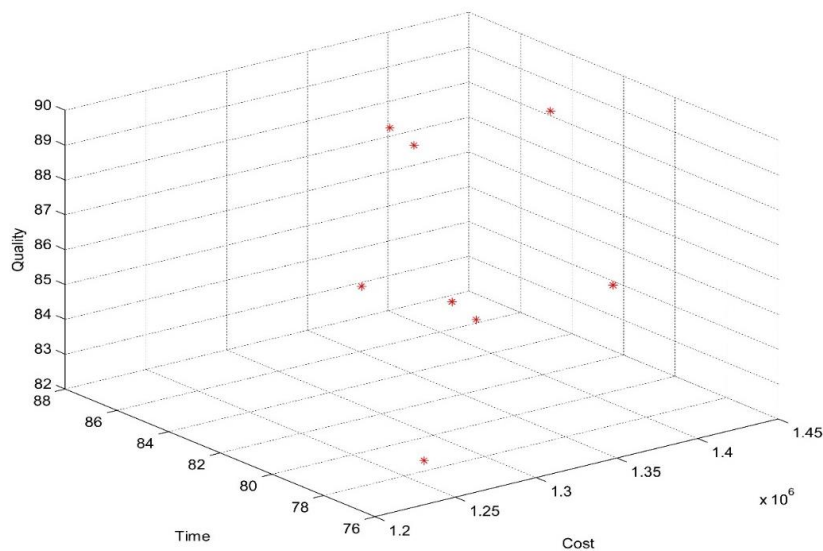
#### جدول ۱. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز

Table 1. Weed optimization algorithm Parameters

نماد	تعریف	مقدار
MaxIt	تعداد تکرار	۱۰۰
Npop	تعداد جمعیت اولیه	۱۰۰
Pmax	حداکثر تعداد جمعیت	۲۵
$S_{min}$	حداقل تعداد دانه	۰
$S_{max}$	حداکثر تعداد دانه	۵
Sigma_initial	انحراف استاندارد اولیه	۰/۹۹
Sigma_final	انحراف استاندارد نهایی	۰/۰۰۱

جدول ۲. اطلاعات پروژه پل بتنی سه دهانه  
Table 2. Three span concrete bridge project information

فعالیت	درصد تأثیر در کل فعالیت	$W_{i,j}$				گزینه ۱	$D_{i,k} \text{ (day)}, C_{i,k} \text{ (\$)}, Q_{i,k}$		
		واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴		گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴
خاک برداری	۱۴	۶۰۰	۷۵۰	۵۲۰	۸۰۰	۰/۰۲۰۸ و ۳۰ و ۸۰	۰/۰۱۵۶ و ۵۵ و ۸۵	---	---
فونداسیون	۱۷	۹۲۰	۹۶۰	۸۴۰	۸۰۰	۰/۰۱۲۵ و ۵۰ و ۹۰	۰/۰۱۰۴ و ۴۰ و ۸۰	---	۰/۰۳۱۲ و ۲۵ و ۸۰
ستون	۳۳	۱۴۵۰	۱۲۰۰	۱۸۰۰	۱۴۰۰	۰/۰۱۲۵ و ۵۰ و ۹۰	۰/۰۱۷۸ و ۶۰ و ۹۵	۰/۰۲۵۰ و ۷۵ و ۹۵	---
تیر	۱۹	۴۸۰	۵۲۰	۵۷۰	۴۵۰	---	---	---	۰/۰۱۰۴ و ۳۰ و ۸۵
دال	۱۷	۰	۱۱۴۰	۹۴۰	۱۲۰۰	---	۰/۰۲۰۸ و ۵۰ و ۸۵	۰/۰۰۸۹ و ۴۰ و ۷۰	---



شکل ۶. نتایج حاصل از الگوریتم علف‌های هرز برای موازنه زمان - هزینه - کیفیت در مثال اول  
Fig. 6. The results of the weed algorithm for time-cost-quality trade off in the first example

برتری کامل نداشته، اما توانایی غلبه بر سایر جواب‌ها را داشته‌اند.

### مثال دوم

نمونه مثال دوم نیز اقتباسی از دومین مثال ارائه شده توسط لانگ و اهساتو است، که با اندکی تغییر ساختاری ارائه شده است. این پروژه شامل ۵ واحد تکراری با هجده فعالیت در هر واحد است، که اطلاعات تکمیلی آن در جدول ۴۳ آمده است. در این مثال، فعالیت ۴ و ۶ از نوع a (غیر مجاز برای انقطاع) و مابقی فعالیت‌های از نوع b (مجاز برای انقطاع) می‌باشند. تنها بعد از فعالیت ۱ در واحدهای ۱ و ۲ و ۳ و ۴ تأخیر زمانی وجود دارد و مابقی فعالیت‌ها بدون تأخیر زمانی اجرا می‌شوند. هزینه غیر مستقیم روزانه  $S/d$  ۵۰۰ و هزینه اولیه S

جدول ۳. جوابهای پارتو به دست آمده از الگوریتم علف‌های هرز با نرم‌افزار متلب (مثال ۱)

Table 3. Parto's solution are derived from the weed algorithm with MATLAB software (example 1)

جواب	زمان	هزینه	کیفیت
۱	۸۲	۱۴۰۸۷۵۰۰	۸۹
۲	۸۷	۱۳۸۵۹۲۵	۸۷
۳	۸۶	۱۳۸۵۹۹۱۰	۸۷
۴	۸۱	۱۳۴۲۹۳۵	۸۴
۵	۸۲	۱۲۹۱۷۷۵	۸۵
۶	۷۶	۱۳۶۱۸۰۰۰	۸۶

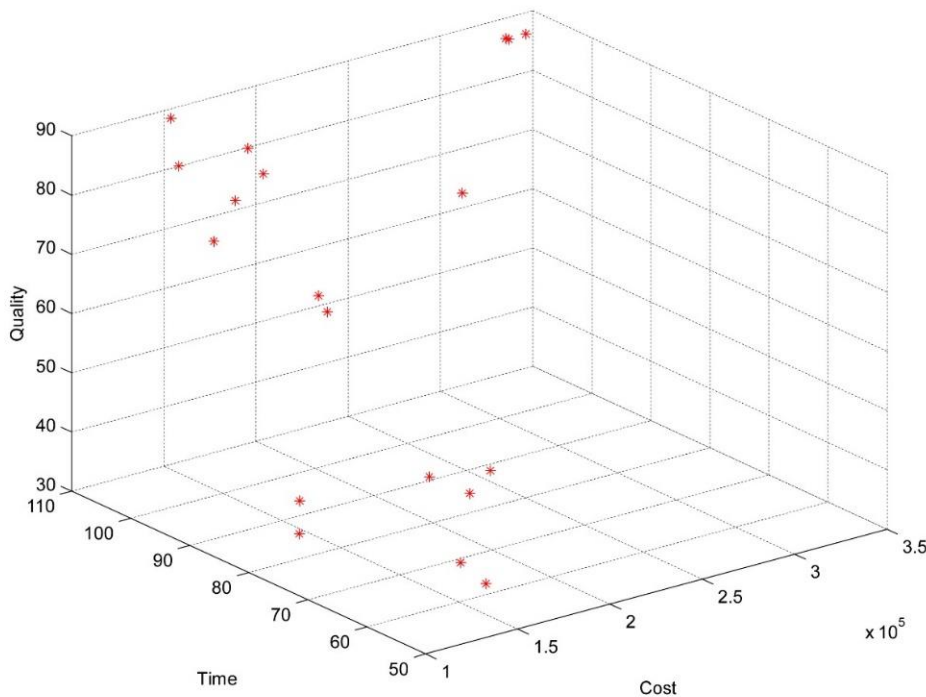
۱۵۸۳۷۲ و با کیفیت ۸۳ می‌باشد و بهترین هزینه اجرای فعالیت‌ها، ۵۵۹۴۳ و زمان اجرای ۱۶۵ روز و با کیفیت ۹۲ می‌باشد و بهترین کیفیت اجرای پروژه ۹۲ و با هزینه اجرایی ۵۵۹۴۳ و زمان اجرای آن ۱۶۵ روز می‌باشد که بسته به شرایط پروژه و میزان اهمیت هر یک از پارامترهای زمان، هزینه و کیفیت، هر کدام از گزینه‌های اجرایی زیر می‌توانند انتخاب گردند. همچنین، نتایج حاصله برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت مربوط به مطالعه مثال دوم، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد جواب‌ها شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان، هزینه و کیفیت به دست آمده است.

#### ۹-۴- اعتبارسنجی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی

به منظور ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز پیشنهادی، مدل ریاضی مربوط به مطالعه موردی اول که دارای ابعاد کوچکی است در نرم‌افزار برنامه‌نویسی گمز پیاده‌سازی شده و به طور دقیق حل گردیده است. اطلاعات مربوط به فعالیتها و گروههای کاری مطابق جدول ۱ میباشد. از آنجایی که مدل پیشنهادی سه هدفه میباشد، برای حل مسأله بصورت دقیق از رویکرد اپسیلون محدودیت استفاده

۴۴۰۰ لحاظ شده است. تنها تفاوتی که این مثال با مثال ارائه شده توسط لانگ و اهساتو دارد در این است که در روش پیشنهادی لانگ و اهساتو رابطه بین زمان انجام هر فعالیت و هزینه آن، هم می‌تواند یک رابطه گسسته باشد و هم پیوسته. در این تحقیق، این رابطه صرفاً یک رابطه گسسته تعریف شده است. بنابراین با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، ناگزیر به دست‌کاری داده‌ها و تغییر ارتباط زمان و هزینه در مواردی که این رابطه پیوسته بود، می‌باشد. این تغییر بدین صورت اعمال شد که هر گزینه پیوسته، به سه گزینه گسسته تغییر یافت، که گزینه اول، همان زمان ابتدای بازه است و با جای‌گذاری آن در تابع زمان-هزینه-کیفیت مربوط به آن محاسبه شده است. گزینه دوم، مقدار میانی بازه و گزینه سوم مقدار انتهایی بازه است. با لحاظ تغییر اعمال شده، لزوماً جواب حاصله نیز با جواب ارائه شده توسط لانگ و اهساتو اندکی تفاوت خواهد داشت.

پس از حل مدل در نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز، نتایج به شرح زیر به دست آمده است. با اجرای الگوریتم، ۲۰ جواب، پیشنهاد شده است که زمان، هزینه و کیفیت برای هر یک از فعالیت‌ها در جدول ۵ نمایش داده شده است. بهترین زمان برای اجرای فعالیت‌ها، ۶۳ روز با هزینه اجرایی



شکل ۷. نتایج حاصل از الگوریتم علف‌های هرز برای موازنه زمان - هزینه - کیفیت در مطالعات مثال دوم

Fig. 7. The results of the weed algorithm for time-cost-quality trade off in the second example

جدول ۴. اطلاعات پروژه مثال دوم (لانگ و اوساتو) با تغییرات اعمال شده

Table 4. Example 2 (Long and ohsato) project information with the applied changes

فعالیت	پیش‌نیاز	درصد تأثیر در کل فعالیت	W <sub>ij</sub>					نوع فعالیت	D <sub>i</sub> (day/work), C <sub>i</sub> (usd/workunit), Q <sub>i</sub>				
			واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵		واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵
۱	-	۵	۵	۱	۵	۳	۶	A	۵,۵۵,۹۰	۲,۲۵,۸۰	۲,۴۵,۷۰	---	---
۲	-	۶	۳۰	۴۰	۳۵	۰	۳۰	A	۲,۶,۲۰	۱۰,۵۰,۱۳۰	---	---	۷,۲۰,۹۵
۳	۱	۷	۵	۱۰	۰	۱۰	۵	A	---	۸,۳۵,۷۵	---	۹,۲۰,۷۰	---
۴	۳	۳	۲	۴	۲	۳	۴	B	۸,۵۰,۹۵	---	۷,۴۰,۸۰	۴,۳۵,۸۵	۹,۲۵,۷۰
۵	۱و۲	۶	۱	۱	۰	۱	۰	A	۴,۴۰,۸۰	۴,۳۰,۷۵	---	۴,۵۰,۹۰	۲,۵۵,۹۵
۶	۱و۲	۶	۸	۵	۹	۷	۴	B	---	۴,۴۵,۸۰	---	۵,۵۰,۹۰	۶,۴۵,۸۵
۷	۴و۵	۵	۳	۲	۳	۴	۴	A	---	۸,۲۵,۷۰	۷,۲۵,۷۰	---	---
۸	۴و۵	۹	۱	۲	۱	۱	۳	A	۱,۳۰,۷۵	---	۱,۳۵,۸۰	---	۳,۲۵,۷۵
۹	۷	۴	۲	۲	۲	۲	۲	A	۱,۲۰,۷۵	۱,۲۰,۷۰	۱,۲۰,۷۰	---	---
۱۰	۷	۸	۱	۱	۱	۱	۱	A	---	---	---	۸,۵۵,۹۰	۸,۶۰,۹۵
۱۱	۶و۸	۶	۴	۴	۶	۲	۰	A	۱,۵۰,۷۵	---	۵,۵۵,۸۰	---	۳,۵۰,۸۰
۱۲	۱۰و۱۱	۵	۳	۶	۰	۷	۲	A	---	۹,۵۰,۸۵	۱۰,۴۰,۸۰	۹,۴۵,۸۰	---
۱۳	۹و۱۲	۴	۲	۲	۲	۲	۲	A	---	۷,۲۵,۸۰	۶,۳۰,۷۵	---	۶,۳۵,۹۰
۱۴	۱۰و۱۱	۳	۴	۲	۱	۲	۴	A	۲,۲۵,۷۵	---	۶,۳۵,۸۵	۶,۲۰,۷۰	---
۱۵	۱۰و۱۱	۳	۶	۶	۶	۶	۶	A	۵,۵۰,۸۵	۲,۴۰,۹۵	---	۱,۶۰,۱۰۰	---
۱۶	۱۳و۱۴	۷	۲	۲	۲	۲	۲	A	---	۵,۲۰,۸۰	۵,۲۰,۸۵	---	---
۱۷	۱۵	۸	۱	۱	۱	۱	۱	A	۲,۵۰,۲۵	۸,۶۰,۷۵	---	---	۹,۲۰,۹۵
۱۸	۱۶و۱۷	۵	۶	۶	۶	۶	۶	A	۹,۳۵,۹۰	---	۲,۵۵,۹۵	---	۵,۶۰,۱۰۰

آن برابر با ۹۰ به دست آمده است. مدل ریاضی مسأله با تابع هدف کیفیت به صورت زیر می‌باشد.

$$Max Q_p = \frac{\sum_{i=1}^M We_i \sum_{k=1}^K Q_{ik}}{\sum_{i=1}^M We_i} \quad (3)$$

S.t.

(۴) الی (۱۱)

پس از به دست آمدن مقادیر بهینه هر یک از توابع و به دست آمدن بهترین حد هر یک از آنها، در ادامه یکی از اهداف، به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و دو هدف دیگر به صورت محدودیت وارد مسأله می‌شوند. در این مسأله تابع هدف هزینه به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده و دو هدف زمان و کیفیت به عنوان اهداف فرعی به محدودیت‌های مسأله اضافه می‌شوند. مدل ریاضی مسأله فوق با رویکرد اسپیلون محدودیت به شرح زیر می‌باشد.

$$Min C_p = C_D + C_I = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_{ij} + (C_o + B T_p) \quad (2)$$

$$T_p \leq \varepsilon_1 \quad (12)$$

$$Q_p \geq \varepsilon_2 \quad (12)$$

شده است. بدین منظور ابتدا هر یک از اهداف به طور جداگانه در نظر گرفته شده و سه مرتبه با سه هدف زمان، هزینه و کیفیت مسأله تک هدفه حل میشود تا مقدار بهینه هر یک از اهداف به دست آید. از این رو ابتدا مسأله پیشنهادی با تابع هدف زمان به صورت تک هدفه حل شده و مقدار بهینه آن برابر با ۷۵ به دست آمده است. مدل ریاضی مسأله با تابع هدف زمان به صورت زیر می‌باشد.

$$Min T_p = Max_{i,j} (f_{ij}) = Max_{i,j} (S_{ij} + D_{ij}) \quad (1)$$

S.t.

(۴) الی (۱۱)

در ادامه مسأله با تابع هدف هزینه بصورت تک هدفه حل شده و مقدار بهینه آن برابر با ۱۲۴۴۸۵۰ به دست آمده است. مدل ریاضی مسأله با تابع هدف هزینه به صورت زیر می‌باشد.

$$Min C_p = C_D + C_I = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_{ij} + (C_o + B T_p) \quad (2)$$

S.t.

(۴) الی (۱۴)

در نهایت مسأله با تابع هدف کیفیت حل شده و مقدار بهینه

جدول ۵. جواب های پارتو به دست آمده از الگوریتم علف های هرز با نرم افزار متلب

Table 5. Parto's solution are derived from the weed algorithm with MATLAB software (example 2)

جواب	زمان	هزینه	کیفیت
۱	۱۶۵	۵۵۹۴۳	۹۲
۲	۱۶۵	۴۶۳۶۰۶	۸۹
۳	۹۴	۲۳۵۸۷۲	۸۵
۴	۱۵۳	۲۱۷۶۱۰	۸۵
۵	۱۳۹	۱۸۸۶۵۲	۸۴
۶	۱۰۹	۱۷۷۲۳۹	۸۲
۷	۷۶	۱۵۵۴۷۹	۷۹
۸	۱۲۰	۱۷۶۶۱۷	۸۱
۹	۱۳۹	۱۸۸۶۵۲	۸۴
۱۰	۷۲	۱۶۹۴۶۳	۸۰
۱۱	۶۳	۱۵۸۳۷۲	۸۳
۱۲	۷۲	۱۶۹۴۶۳	۸۰
۱۳	۸۰	۲۱۹۹۱۰	۸۲
۱۴	۸۳	۱۷۹۱۶۳	۸۳
۱۵	۷۴	۱۷۵۱۶۹	۸۰
۱۶	۹۶	۲۲۷۸۵۰	۸۴
۱۷	۸۵	۲۱۷۲۸۹	۸۳
۱۸	۱۰۷	۱۹۶۱۹۴	۸۳
۱۹	۸۷	۲۱۹۵۵۹	۸۴
۲۰	۸۱	۲۲۱۷۰۶	۸۲

(۴) الی (۱۱)

از آنجایی که تابع هدف زمان از نوع حداقل سازی می باشد، زمانی که در محدودیت قرار می گیرد به صورت کوچکتر مساوی قرار می گیرد، بدین معنی که مجموع زمان ختم فعالیت ها نباید از یک مقدار  $E_1$  تجاوز کند که بهترین مقدار آن برابر ۷۵ می باشد. اما بر خلاف تابع هدف زمان، تابع کیفیت از نوع حداکثر سازی می باشد، بنابراین در محدودیت به صورت بزرگتر مساوی ظاهر می شود یعنی مجموع کیفیت حاصله از یک حد  $E_2$  نباید کمتر باشد که بهترین مقدار آن برابر با ۹۰ می باشد. به منظور به دست آوردن جواب های پارتو، به ترتیب هر یک از این دو حد را به اندازه مشخصی تغییر داده تا در صورت وجود، جواب پارتو به دست آید. بدین ترتیب ممکن است

به ازای ترکیب هایی از زمان و کیفیت، جواب امکان پذیری برای هزینه وجود نداشته باشد. این مسأله نیز توسط نرم افزار گمز بر روی سیستم دو هسته ای با ۳GHz CPU و ۲GB RAM در مدت زمان حدود یک دقیقه حل گردیده است، همچنین الگوریتم پیشنهادی این تحقیق قادر است مسأله را در زمانی کمتر از ۴۰ ثانیه حل نماید. جواب های به دست آمده حاصل از حل دقیق و فراابتکاری در جداول ۶ و ۷ نمایش داده شده است. همان طور که در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است مقادیر مختلف زمان، هزینه و کیفیت مختلفی به ازای دو روش برای مثال اول به دست آمده است. در مقایسه حل به دست آمده از مطالعه موردی اول با استفاده از دو روش توسعه داده شده، می توان مشاهده

جدول ۷. جواب بدست آمده از نرم افزار متلب برای مثال اول  
Table 6. Answer from Matlab software for the first example

شماره جواب	زمان	هزینه	کیفیت
۱	۸۲	۱۴۰۸۷۵۰۰	۸۹
۲	۸۷	۱۳۸۵۹۲۵	۸۷
۳	۸۶	۱۳۸۵۹۹۱۰	۸۷
۴	۸۱	۱۳۴۲۹۳۵	۸۴
۵	۸۲	۱۲۹۱۷۷۵	۸۵
۶	۷۶	۱۳۶۱۸۰۰۰	۸۶
۷	۷۶	۱۲۴۴۸۵۰	۸۲

حصول اطمینان از کارایی روش ارائه شده و امکان مقایسه آن با روش‌های ارائه شده پیشین، دو نمونه مثال عملی به عنوان مطالعه موردی ارائه و با روش پیشنهادی این تحقیق حل شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد. نتایج این پژوهش در مقایسه با نتایج تحقیقات پیشین، عملکرد مناسب و کارایی روش ارائه شده را به خوبی نشان می‌دهد و ویژگی‌های مثبت آن را به اثبات می‌رساند. نکته قابل توجهی که با مشاهده مجموعه پاسخ‌های به دست آمده توسط روش ارائه شده می‌توان استنباط کرد این است که، برای حصول یک جواب مناسب و بهینه، اولاً باید ترکیب مناسبی از گزینه‌های موجود برای اجرای هر فعالیت انتخاب شود و ثانیاً ترتیب فعالیت‌ها، براساس رابطه پیش‌نیازی تعریف شده، باید به گونه‌ای تنظیم شود که یک موازنه و تعادل مناسب بین زمان اتمام پروژه، هزینه تمام شده و مدت زمان توقف منابع در بین واحدها برقرار باشد و در نهایت پس از انتخاب و چینش فعالیت‌ها و گزینه‌های انجام آنها، تنظیم برنامه زمانی باید با انجام زمان بندی به صورت مراحل رفت و برگشتی به گونه‌ای انجام شود که میزان انقطاع کاری به حداقل خود برسد. همچنین در انتها به منظور سنجش نتایج به دست آمده حاصل از الگوریتم، مسأله مورد نظر در ابعاد کوچک با استفاده از نرم‌افزار گمز به صورت دقیق حل شده و با نتایج به دست آمده الگوریتم پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده عملکرد درست الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. از جمله تحقیقات آتی که می‌توان در این زمینه انجام داد، در نظر گرفتن محدودیت منابع، اجرای چند حالت فعالیت‌ها و استفاده از منابع چند مهارته در مدل پیشنهادی این تحقیق، می‌باشد.

جدول ۶. جواب بدست آمده از نرم افزار گمز برای مثال اول  
Table 6. Answer from Gams software for the first example

شماره جواب	زمان	هزینه	کیفیت
۱	۸۶	۱۲۴۴۸۵۰	۸۳
۲	۸۴	۱۲۷۱۵۰۶	۸۵
۳	۸۲	۱۲۹۱۷۳۰	۸۵
۴	۸۰	۱۳۳۶۵۴۷	۸۷
۵	۷۸	۱۳۶۱۸۰۴۰	۸۶
۶	۷۶	۱۴۰۹۵۰۳۹	۸۹

کرد که الگوریتم علف‌های هرز پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته است، چرا که توانسته به مقادیر مشابهی با حل دقیق از نظر زمانی، هزینه‌ای و کیفی دست یابد. همچنین روند تغییر زمان و هزینه بیانگر عملکرد صحیح مدل ریاضی پیشنهادی می‌باشد. به عنوان نمونه می‌توان مشاهده کرد که هر دو روش به جواب‌هایی با زمان تکمیل در بازه ۷۶ تا ۸۷ رسیده‌اند. همچنین از نظر هزینه‌ای، جواب‌های نزدیک به هم ارائه نموده‌اند که می‌توان به جواب شماره ۵ از جدول ۶ و جواب شماره ۶ از جدول شماره ۷ اشاره نمود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در پروژه‌های عمرانی، مدیریت زمان، هزینه و کیفیت به گونه‌ای که پروژه در کوتاه‌ترین زمان و با کمترین هزینه و کیفیت قابل قبولی به انجام برسد، از اهداف مهم مدیریت پروژه است که به نظر می‌رسد با بهره‌گیری از رویکرد سیستمی و استفاده از ابزارهای نوین مدیریتی، بتوان گام‌های سریع تری را برای رسیدن به این اهداف برداشت. در این پژوهش سعی شده نوعی از برنامه زمان بندی ارائه شود که ضمن کاهش زمان، هزینه پروژه به کمترین میزان ممکن و بیشترین کیفیت، انقطاع کاری را نیز تا جایی که ممکن است کاهش داده و بدین ترتیب از بیکاری منابع و تحمیل هزینه‌های ناشی از آن جلوگیری کند. ویژگی برتر این روش در آن است که، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز در حل مسائل، طیفی از جواب‌ها به عنوان مجموعه جواب پارتو به کاربر ارائه می‌شود و تصمیم‌گیران پروژه قادر خواهند بود از میان راه‌حل‌های ارائه شده، گزینه مناسب را که بیشترین هماهنگی را با شرایطشان دارد، انتخاب کنند. برای

- Vol 30, No 5, pp. 705-713, Doi: 10.5829/idosi.ije.2017.30.05b.00.
- [11]. Mungle, S, Benyoucef, L, Son, Y.J, Tiwari, M.K, (2013) "A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time–cost–quality trade-off problems:A case study of highway construction project", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol 26, 1953–1966.
- [12]-Li, H., Zhang, H., (2013), "Ant colony optimization-based multi-mode scheduling under renewable and nonrenewable resource constraint", *Automation in construction*, Vol. 35, PP. 431-438.
- [13]- Afshar-Nadjafi, B., (2014), "Multi-mode resource availability cost problem with recruitment and release dates for resources", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, PP. 5347-5355.
- [14]-Coughlan, E.T., Lubbecke, M.K., Schulz, J., (2015), "A branch-price-cut algorithm for multi-mode resource leveling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 245, PP. 70-80.
- [15]-Nabipoor Afruzi, E., Roghanian, E., Najafi, A. A., Mazinani, M., (2013), "A multi-mode resource constraint discrete time-cost trade off problem solving using an adjusted fuzzy dominance genetic algorithm", *Scientia Iranica*, Vol. 20, No. 3, PP. 931-944.
- [16]-Jaboui, B., Damak, N., Siarry, P., Rebai, A., (2008), "A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *Applied mathematics and computation*, Vol. 195, PP. 299-308.
- [17]-Van Peteghem, V., Vanhoucke, M., (2010) "A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 201, PP. 409-418.
- [18]. Taheri Amiri, M.J, Haghghi, F, Eshtehardian, E, Hematian, M, Kordi, H, (2017), "Optimization of Time and Costs in Critical Chain Method Using Genetic Algorithm", *Journal of Engineering and*
- [1]. El-Rayes K., Kandil A., (2005), "Time-cost-quality trade off analysis for highway construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 131, No. 4, PP. 477-486
- [2]. Burns S., Liu L., Feng C., (1996), "The LP/IP hybrid method for construction time-cost trade-off analysis", *Construction Management and Economics*, Vol. 14, PP. 199-215.
- [3]. Elmaghraby S.E., "Resource allocation via dynamic programming in activity networks", (1995), *European Journal of Operational Research*, Vol. 64, PP. 199-215.
- [4]. De P., Dunne E.J., Gosh J.B., Wells C.E., (1995), "The discrete time-cost trade-off problem revisited", *European Journal of Operational*, Vol. 81, No. 2, PP. 225-238.
- [5]. Siemens N., (1971), "A simple CPM time-cost trade-off algorithm", *Management Science*, Vol. 18, No. 3B, PP. 354-363.
- [6]. Moselhi O., (1993), "Schedule compression using the direct stiffness method", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.20, PP. 65-72.
- [7]. Hegazy T., (1999), "Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.26, PP. 685-697.
- [8]. Zheng D.X.M., Ng S.T., Kumaraswamy M., (2005), "Applying Pareto ranking and niche formation to genetic algorithm-based multi objective time-cost optimization", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.131, No. 11, 2005, PP. 81-91.
- [9]. De, P., Dunne, E., Ghosh, J., & Wells, C., (1997), "Complexity of the discrete time/cost trade-off problem for project networks", *Operations Research*, Vol. 45, PP. 302–306.
- [10]. Taheri Amiri, M.J, Haghghi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2017), "Optimization of Time, Cost, and Quality in Critical Chain Method Using Simulated Annealing", *International Journal of Engineering*,



- constrained project scheduling with activity splitting and setup times", *Computers & Operations Research*, Vol.109, 230-249.
- [22]. Mehrabian A.R. and Lucas C., (2006), "A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization", *Ecological Informatics*, Vol. 1, pp. 355-366.
- [23]. Long, L.D., Ohsato, A., (2009), "A genetic algorithm-based method for scheduling repetitive construction projects", *Automation in Construction*, Vol.18, No. 4, 499-511.
- Applied Sciences, Vol 12, No 4, 871-876, Doi: 10.3923/jeasci.2017.871.876.
- [19]. Taheri Amiri, M.J, Haghghi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2018), "Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.22, No. 10, 3738-3752.
- [20]. Creemers, S., (2019), "The preemptive stochastic resource-constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*", Vol.227, No. 1, 238-247.
- [21]. Vanhoucke, M., Coelho, J., (2019), "Resource-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. J., Taheri Amiri, M., Hematian, M., Jooj, *Time-Cost-Quality Optimization using an Invasive Weed Algorithm with Activity Preemption in Construction Projects. Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021)807-822.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16215.6163](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16215.6163)



