



Imam Khomeini International University

Vol. 8, No. 4, Winter 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

## Research Paper

# Developing a Local Search Algorithm for Solving the Allocation and Dispatching Problem of Transportation Fleet in Open Pit Mines

Pirmoradian H.<sup>1</sup>, Monjezi M.<sup>2\*</sup>, Askari-Nasab H.<sup>3</sup>, Nikbakhsh E.<sup>4</sup>, Mousavi Nogholi A.<sup>5</sup>

- 1- Ph.D Student, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
- 2- Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
- 3- Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada
- 4- Assistant Professor, Dept. of Economic and Social Systems, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
- 5- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 12 Jun. 2022

Accepted: 21 Sep. 2022

**Abstract:** Loading and haulage operation in open pit mines is the last stage of the mining process. truck- shovel system, due to its many advantages including high flexibility, is preferred for this operation. Due to high operating costs, proper fleet management and optimization can significantly affect the project economics. Truck allocation and dispatching issue is a very complex problem, especially in large mines with numerous loading and dumping points. Because of the problem size and complexity, employing mathematical methods is not justified due to very high solution time which leads to employing super computers. To overcome the aforesaid shortcoming, heuristic algorithms can be applied. In this paper, in MATLAB environment, a heuristic algorithm was developed to solve allocation and dispatching problem of transportation fleet of a real mine. According to the obtained results, a running time of 39 seconds was computed for the heuristic algorithm. Finally, the same problem was solved with an available mathematical model with a running time of 24 hours which shows the superiority of the proposed algorithm over the mathematical modeling.

**Keywords:** Loading and haulage operation, Allocation and dispatching problem, Heuristic algorithm.

### How to cite this article

Pirmoradian, H., Monjezi, M., Askari-Nasab, H., Nikbakhsh, E., and Mousavi Nogholi, A. (2023). "Developing a local search algorithm for solving the allocation and dispatching problem of transportation fleet in open pit mines". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(4): 63-78.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.17359.1591](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.17359.1591)

\*Corresponding Author Email: [monjezi@modares.ac.ir](mailto:monjezi@modares.ac.ir)

### COPYRIGHTS



©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## INTRODUCTION

The truck-shovel system is one of the most widely used systems in open pit mines [1]. Truck allocation and dispatching, especially in large mines with a large number of loading and unloading points, is a highly complex problem. In addition to meeting the production goals, suitable fleet management reduces overall costs, also [2]. Truck fleet management is done by two methods of fixed and flexible allocation [3]. In fixed assignment, each truck is assigned to a shovel at the beginning of the shift, whereas, in flexible allocation, each truck can be assigned to different loading and unloading points [4]. In this type of problems, for each of the loading points, the order of the sequence of trucks and the start and end times of each sequence are determined separately [5]. In the problem of designing transportation systems, maximum effort is to optimize the allocation and dispatching with minimum idle times which in turn leads to minimization of the total costs [6]. It is worthy to mention that mathematical modeling is usually used to solve fixed allocation, on the other hand for dispatching problems, simulation method is applied [7,8].

Mathematical modeling has been used by various researchers for truck allocation [1-8]. In mathematical modeling, the problem is solved with various techniques, i.e., linear programming, integer programming, dynamic programming, goal programming, and stochastic programming. It can be said that in the past, the allocation and dispatching were considered separately; however, simultaneous solving can cause better results [5]. Despite the above-mentioned advantage, if the size of the problem is large, the solution time becomes very high and therefore ordinary computers may not be applicable [9]. To cope with this circumstance, heuristic methods can be used as an effective alternative for diminishing solution time [9,10]. The purpose of this study is to develop a heuristic algorithm for solving the problem of allocation and dispatching of transportation fleet in open-pit mines. Finally, the verification of the proposed algorithm is accomplished by a recently developed mathematical model.

## METHODS

To solve the allocation and dispatching problem, a heuristic algorithm was developed in MATLAB environment. One of the main goals in open-pit mine transportation systems is to minimize the completion time of the entire operation. This can be achieved by reducing the length of the queue and thus the waiting time of trucks and by optimizing the dispatching schedule and thus reducing the idle time of shovels.

The inputs of the proposed algorithm include the volume of mined blocks, the capacity of the trucks and the times of loading, transporting, dumping and visiting the next loading point. It should be noted that the start and end of truck work is considered parking. Alternatively, the outputs include allocation and dispatching plan. In the developed algorithm, the following criteria have been applied for allocating trucks:

- 1) Assignment based on the shovel remaining time for commencement of loading
- 2) Assignment based on the shovel required production (job) capacity
- 3) Assignment based on the shovel engagement situation
- 4) Assignment based on the shovel loading time
- 5) Assignment based on the trucks queue length
- 6) Assignment based on the shovel job completion

Solution steps of the algorithm are as follows:

Step 1: Algorithm inputs are prepared in the form of a matrix.

Step 2: Based on the defined truck allocation criteria, one shovel is selected.

Step 3: A truck is assigned to the primarily selected shovel. If the shovel is occupied in loading another truck, the dispatched truck will have to wait in the queue. The truck waiting time is recorded.

Step 4: If the shovel is ready to load but no truck is available, the shovel waiting time (idle) is recorded.

Step 5: After each truck is unloaded, the remaining job is checked for completion; if it is finished, then the truck will be moved to the parking lot.

Step 6: Steps 2 to 5 are repeated until the stopping condition is met and the operation total time is recorded.

Step 7: Steps 2 to 6 are performed for different truck sequences to find out the optimum alternative.

## FINDINGS AND ARGUMENT

To investigate the performance of the developed algorithm, an attempt has been made to solve a real

problem related to an open pit mine. In the defined problem, there are 4 shovels, each of which must load a block of 900 tons. Also, there are 18 trucks with a capacity of 100 tons. The relevant input parameters are given in Table 1.

**Table 1.** Input data

Operations	Time (min.)
Starting	04.00
Loading	03.25
Hauling	13.00
Dumping	02.00
Returning	07.00
Parking	07.00

For the developed algorithm, completion time of 67.50 min was reached with a running time of 39 seconds. On the other hand, for the mathematical modeling, completion time was calculated 70.75 min with a gap of 23% and with 24 hours running time. As it is seen, by using the developed algorithm, the solution time was significantly reduced. It is noted that with considering lower gaps, the running time would be much higher.

According to the Figure 1, the idle time of each shovel from the operation commencement to the end of operation is calculated 12.25 min. In other words, out of 166 minutes of the total possible operational time, the shovels efficacy is computed 70%, which is satisfactory as compared to the mathematical model. Also, the waiting time of trucks was calculated 22.75 min. In this way, out of 1107.75 minutes of the total possible operational time for trucks, the efficacy was calculated 98%. In the same way, using mathematical modeling, the efficacy of trucks was computed 92% (Table 2.)

**Table 2.** Scheduling the sequence order of trucks and their waiting times (min.)

Truck ID	First order starting time		First order finishing time		Second order starting time		Second order finishing time		Waiting time	
	TSSA	CPLEX	TSSA	CPLEX	TSSA	CPLEX	TSSA	CPLEX	TSSA	CPLEX
1	04.00	04.00	29.25	29.25	29.25	29.25	54.50	54.50	00.00	00.00
2	04.00	07.25	29.25	32.50	29.25	45.50	54.50	70.75	00.00	13.00
3	17.00	04.00	42.25	29.25	42.25	42.25	67.50	67.50	00.00	13.00
4	13.75	07.25	39.00	32.50	42.25	35.75	67.50	61.00	03.25	03.25
5	10.50	07.25	35.75	32.50	35.75	35.75	61.00	61.00	00.00	03.25
6	07.25	10.50	32.50	35.75	32.50	35.75	57.75	61.00	00.00	00.00
7	13.75	10.50	39.00	35.75	39.00	42.25	64.25	67.50	00.00	06.50
8	04.00	10.50	29.25	35.75	32.50	35.75	57.75	61.00	03.25	00.00
9	07.25	13.75	32.50	39.00	32.50	39.00	57.75	64.25	00.00	00.00
10	07.25	13.75	32.50	39.00	35.75	39.00	61.00	64.25	03.25	00.00
11	10.50	17.00	35.75	42.25	39.00	42.25	64.25	67.50	03.25	00.00
12	07.25	07.25	32.50	32.50	35.75	45.50	61.00	70.75	03.25	13.00
13	10.50	13.75	35.75	39.00	35.75	45.50	61.00	70.75	00.00	06.50
14	10.50	13.75	35.75	39.00	39.00	42.25	64.25	67.50	03.25	03.25
15	13.75	17.00	39.00	42.25	39.00	45.50	64.25	70.75	00.00	03.25
16	17.00	04.00	42.25	29.25	42.25	39.00	67.50	64.25	00.00	09.75
17	13.75	04.00	39.00	29.25	42.25	32.50	67.50	57.75	03.25	03.25
18	04.00	10.50	29.25	35.75	29.25	39.00	54.50	64.25	00.00	03.25

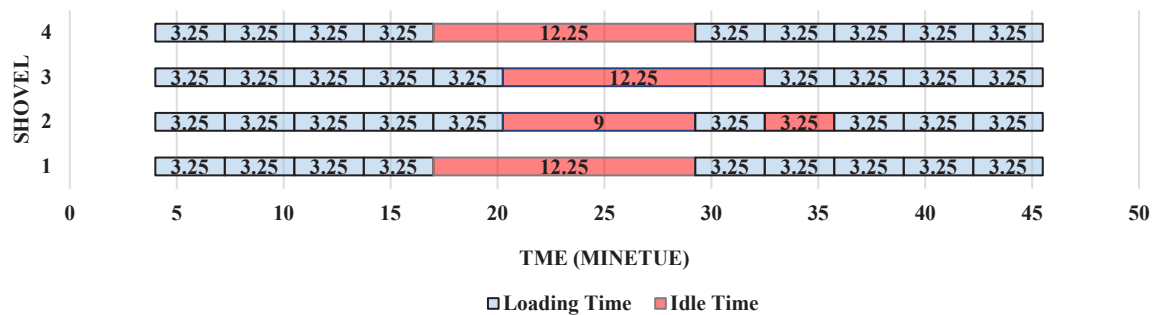


Figure 1. Truck loading schedule and shovel idle time

## CONCLUSIONS

In this study, an attempt had been made to solve the problem of truck allocation and dispatching in open pit mines. Since this type of the problems are normally big in size, mathematical methods may not be applicable, because the solution time is so high that utilization of super computers is inevitable. In this research, to cope with this challenging point, a novel heuristic algorithm was developed to reach the near optimum solution in the minimum possible time. For developing the algorithm, different criteria were defined for truck assignment. According to the obtained results, the solution time with the developed algorithm was 39 sec., which is appreciable with that of mathematical model (i.e., 24 hours).

## REFERENCES

- [1] Shah, K. S., and Rehman, S. U. (2020). "Modeling and Optimization of truck-shovel allocation to mining faces in cement quarry". Journal of Mining Environment, 11: 21-30.
- [2] Ghobadi-Samani, M., Monjezi, M., Khademi Hamidi, J., and Mousavinogholi, A. (2020). "A Mathematical Model to Optimize Allocation Sequence in Dispatching Problem". Journal of Mining and Environment, 11: 185-192.
- [3] Kaveh Ahangaran, D., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Foster, P. (2012). "Real-time dispatching modelling for trucks with different capacities in open pit mines". Archives of Mining Sciences, 57: 39-52.
- [4] Moradi-Afrapoli, A. (2018). "A Hybrid Simulation and Optimization Approach towards Truck Dispatching Problem in Surface Mines". PhD. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
- [5] Saebinia, R., Mousavi, A., and Sayadi, A. R. (2022). "An Integrated Mathematical Model to Optimize Truck Assignment and Dispatching in Open Pit Mines". Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 12: 91-101.
- [6] Pinedo, M., and Hadavi, K. (1991). "Scheduling: theory, algorithms and systems development". In Operations Research Proceedings, 1: 35-42.
- [7] Alarie, S., and Gamache, M. (2002). "Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16: 59-76.
- [8] Moradi-Afrapoli, A., and Askari-Nasab, H. (2019). "Mining fleet management systems: a review of models and algorithms". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33: 42-60.
- [9] Gonzalez, T., and Sahni, S. (1978). "Flowshop and jobshop schedules: complexity and approximation". Operation Research, 26: 36-52.
- [10] Marichelvam, M. K., and Geetha, M. (2019). "A hybrid algorithm to solve the stochastic flow shop scheduling problems with machine break down". International Journal of Enterprise Network Management, 10: 162-175.



دوره هشتم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲، صفحه ۶۷ تا ۷۸  
Vol. 8, No. 4, Winter 2023, pp. 67-78



نشریه مهندسی منابع معدنی  
Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

علمی-پژوهشی

## توسعه الگوریتمی جستجو محور برای حل مسئله تخصیص و گسیل ناوگان حمل و نقل در معادن روباز

حکیمه پیرمادیان<sup>۱</sup>، مسعود منجزی<sup>۲</sup>، هومن عسکری نسب<sup>۳</sup>، احسان نیک بخش<sup>۴</sup>، امین‌اله موسوی نقلی<sup>۵</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- ۲- استاد، گروه مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- ۳- استاد، گروه عمران و محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آلبرتا، ادمونتون، کانادا
- ۴- استادیار، گروه سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- ۵- استادیار، گروه مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲

چکیده

عملیات بارگیری و باربری در معادن روباز، به عنوان آخرین مرحله فرآیند استخراج در نظر گرفته می‌شود. برای انجام این عملیات، استفاده از سیستم شاول- کامیون به دلیل مزایای زیاد مانند انعطاف پذیری بالا، ارجحیت دارد. به دلیل هزینه‌های عملیاتی زیاد، مدیریت مناسب ناوگان و بهینه‌سازی در این بخش به طور قابل توجهی در اقتصاد پروژه موثر است. مساله تخصیص و گسیل کامیون، به ویژه در معادن بزرگ با نقاط بارگیری و تخلیه متعدد بسیار پیچیده است. با توجه به اندازه و پیچیدگی مساله، استفاده از روش‌های حل ریاضی به دلیل زمان حل بسیار زیاد که به استفاده از ابررایانه‌ها منجر می‌شود، توجیه پذیر نیست. برای رفع این کاستی‌ها می‌توان از الگوریتم‌های ابتکاری استفاده کرد. در این مقاله، یک الگوریتم ابتکاری در محیط نرم‌افزار MATLAB، برای حل مساله تخصیص و گسیل یک معدن واقعی توسعه داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، زمان اجرای الگوریتم ابتکاری ۳۹ ثانیه محاسبه شده است. در نهایت حل همین مساله با یک مدل ریاضی موجود طی ۲۴ ساعت، نشان‌دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به مدل‌سازی ریاضی است.

کلمات کلیدی

عملیات بارگیری و باربری، مساله تخصیص و گسیل، الگوریتم ابتکاری.

استناد به این مقاله

پیرمادیان، ح.، منجزی، م.، عسکری نسب، ه.، نیک بخش، ا.، موسوی نقلی، ا.؛ ۱۴۰۲؛ "توسعه الگوریتمی جستجو محور برای حل مسئله تخصیص و گسیل ناوگان حمل و نقل در معادن روباز". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۴، ص ۶۳-۷۸.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.17359.1591



حق مؤلف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

\*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: [monjezi@modares.ac.ir](mailto:monjezi@modares.ac.ir)

## ۱- مقدمه

عملیات بارگیری و باربری در معادن روباز، بخش عمده‌ای از هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد [۲،۱]. ماشین‌آلات مورد استفاده در عملیات بارگیری شامل سه گروه ماشین‌های با محور قابل چرخش (بکهو، دراگلین، شاول و اکسکواتور)، ماشین‌های استخراج پیوسته (اکسکواتورهای بیل چرخشی) و دپو (اسکرپور) می‌شود. ریل، کامیون، نقاله هوایی و نوار نقاله برای عملیات باربری استفاده می‌شوند. سیستم کامیون-شاول به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های حمل و نقل مواد معدنی مورد توجه متخصصان امر است [۳]. تخصیص و گسیل کامیون، به ویژه در معادن بزرگ با تعداد زیادی نقطه بارگیری و تخلیه، پیچیدگی‌های زیادی دارد. مدیریت مناسب ناوگان علاوه بر تامین اهداف تولید، موجب کاهش هزینه‌های کلی نیز می‌شود [۴].

مدیریت ناوگان کامیون به دو روش تخصیص ثابت و تخصیص انعطاف‌پذیر انجام می‌شود [۵]. در تخصیص ثابت، هر کامیون در آغاز شیفت به یک شاول تخصیص داده می‌شود. در تخصیص انعطاف‌پذیر که به سه روش دستی، نیمه‌خودکار و خودکار انجام می‌گیرد، در طول یک شیفت هر کامیون به نقاط بارگیری و تخلیه متفاوت اختصاص می‌یابد [۶]. در این نوع مسایل، برای هر کدام از نقاط بارگیری، ترتیب توالی کامیون‌ها و زمان شروع و پایان هر یک از توالی‌ها به طور جداگانه تعیین می‌شود [۷].

در مساله زمان‌بندی عملیات باربری، تلاش بر این است که تخصیص و گسیل کامیون‌ها بهینه‌سازی شود [۸]. برای حل این نوع مسایل در بخش تخصیص معمولاً مدل‌سازی ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که حل بخش گسیل عمدتاً با استفاده از روش شبیه‌سازی انجام می‌شود [۹، ۱۰].

در مدل‌سازی ریاضی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی آرمانی و برنامه‌ریزی تصادفی مساله حل می‌شود. مدل‌سازی ریاضی توسط محققان مختلف برای تخصیص کامیون استفاده شده است [۱۰-۱۸]. در مطالعه هاوک، تخصیص کامیون با هدف کمینه‌سازی زمان بیکاری شاول‌ها از طریق برنامه‌ریزی خطی انجام شده است. این مدل قابلیت برنامه‌ریزی پویا برای حل مساله تخصیص را ندارد [۱۹]. در مطالعه سومیس و همکاران، تخصیص کامیون به نحوی انجام می‌شود که اختلاف زمان انتظار کامیون‌ها با حالت مطلوب کمینه شود

[۲۰]. در مدل برنامه‌ریزی خطی لی، تخصیص کامیون با هدف کمینه‌سازی کل عملیات حمل و نقل انجام شده است [۲۱]. توپال و رمضان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را توسعه دادند. این مدل با کمینه‌سازی هزینه‌های کلی تعمیر و نگهداری، زمان‌بندی کامیون‌ها را ارائه می‌دهد [۲۲، ۲۳]. کاوه آهنگران و همکاران با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح و شبکه جریان، یک مدل گسیل زمان-واقعی توسعه دادند. هدف این مدل کمینه‌سازی کل هزینه‌های بارگیری و باربری است [۲۴]. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چنگ و همکاران، با هدف بیشینه‌سازی درآمد ارائه شده است [۲۵]. در مدل پیشنهادی ژانگ و ژیا، تعداد سفر کامیون‌ها بین نقاط بارگیری و تخلیه تعیین می‌شود. هدف از مدل آن‌ها دستیابی به تولید مورد نظر با کمترین هزینه است [۲۶]. مدل برنامه‌ریزی باجانی و همکاران برای زمان‌بندی کامیون-شاول و با هدف کمینه‌سازی مصرف سوخت توسعه داده شده است [۱].

تمنگ یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی با هدف بیشینه‌سازی تولید و لحاظ کردن محدودیت عیار توسعه داده است [۲۷]. پانایوتو و میکالاکوپولوس بر اساس مدل تمنگ و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی شانس محدود برای تخصیص کامیون به شاول ارائه کرده‌اند. هدف از این مدل بیشینه‌سازی تولید با در نظر گرفتن محدودیت عیار است. در این مدل تولید شاول به عنوان پارامتر تصادفی لحاظ شده است [۲۸]. در مدل تا و همکاران، روش برنامه‌ریزی تصادفی شانس محدود استفاده شده است. در این مدل، کامیون‌ها بر اساس زمان بیکاری شاول‌ها تخصیص داده می‌شوند. هدف از این مدل کمینه‌سازی تعداد کامیون، با فرض محدودیت‌های عملیاتی و عیار ماده معدنی است. بر اساس نتایج این مدل‌سازی و کاهش تعداد کامیون‌ها، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای نیز کمینه شده است [۲۹].

در مدل سابتیل و همکاران ابتدا با استفاده از یک برنامه‌ریزی خطی، بیشینه مقدار تولید با فرض محدودیت‌های عملیاتی تعیین و سپس گسیل کامیون‌ها با روش شبیه‌سازی و استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری انجام می‌شود [۳۰]. مرادی افراپلی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه برای گسیل پویای کامیون با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توسعه دادند. در این مدل، اندازه بهینه ناوگان تعیین می‌شود. این مساله ضمن کاهش سرمایه‌گذاری اولیه موجب کاهش



می‌شود و با کامپیوترهای شخصی، امکان دست‌یابی به جواب وجود ندارد [۳۷]. برای حل این مشکل می‌توان از روش‌های ابتکاری با سرعت حل بالا، به عنوان یک جایگزین مناسب استفاده کرد [۳۸،۳۷].

هدف از این مقاله توسعه یک الگوریتم ابتکاری برای حل مساله تخصیص و گسیل ناوگان حمل و نقل معادن روباز است. در نهایت، اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی با نتایج مدل صائبی‌نیا و همکاران انجام شده است.

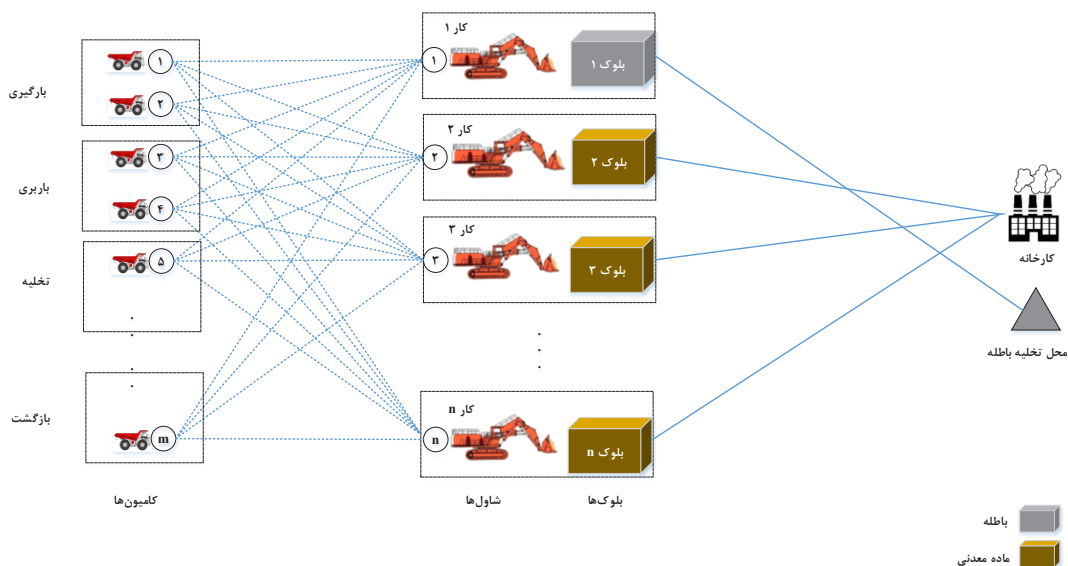
## ۲- روش تحقیق

برای مساله تخصیص و گسیل کامیون‌ها در معادن روباز که از نوع مسایل زمانبندی است، توالی مراجعه کامیون‌ها به نقاط بارگیری باید به نحوی باشد که اهداف تولید در کمترین زمان ممکن محقق شود. در انتخاب توالی کامیون‌ها عواملی مانند زمان چرخه عملیات و طول صف بارگیری موثر است. در هر توالی مجموعه‌ای از عملیات شامل اعزام کامیون از پارکینگ، بارگیری، حمل، تخلیه و مراجعه به نقطه بارگیری منتخب انجام می‌شود (شکل ۱). با توجه به اینکه فرآیند عملیات یاد شده در هر توالی ثابت است، مساله پیش رو از نوع زمانبندی جریان کارگاهی (Flow-Shop Scheduling) در نظر گرفته می‌شود [۳۸].

در این مقاله، به دلیل کاستی‌های مدل‌سازی ریاضی، با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری، مساله تخصیص و گسیل

هزینه‌های عملیاتی نیز می‌شود. هدف از این مدل کمینه‌سازی زمان بیکاری شاول، زمان انتظار کامیون و کمینه‌سازی انحراف از نرخ تولید هر مسیر است [۳۲،۳۱]. همچنین آن‌ها، کاستی مدل‌های گسیل کامیون را در کم اهمیت دانستن تعامل بین ناوگان کامیون، ناوگان شاول، کارخانه‌های فرآوری، نادیده گرفتن اهداف برنامه‌های بلندمدت و عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای ورودی دانسته و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی خطی فازی یک مدل گسیل پیشنهاد دادند [۳۳]. محتشم و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی شانس محدود چند هدفه، برای تخمین اثرات عدم قطعیت بر کارایی سیستم‌های شاول-کامیون توسعه دادند. نتایج قابلیت مدل را در مدیریت کیفیت و کمیت مواد مورد نیاز، برای دستیابی به اهداف تولید کوتاه مدت نشان می‌دهد [۳۴]. همچنین برای کاهش هزینه عملیاتی کامیون‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح با در نظر گرفتن دو استراتژی مدیریت مستقل و یکپارچه ناوگان ارایه کرده است [۳۵]. آن‌ها در مطالعه‌ای دیگر طی سه مرحله به تخصیص و گسیل کامیون در معدن مس سونگون پرداختند [۳۶].

در واقع می‌توان بیان کرد که تاکنون بخش‌های تخصیص و گسیل عمدتاً به طور جداگانه مورد توجه قرار گرفته‌اند. بر اساس مدل صائبی‌نیا و همکاران، با حل همزمان این دو بخش، نتایج بهتری به دست آمده است [۷]. با وجود مزیت یاد شده، در صورتی که اندازه مساله بزرگ باشد زمان حل بسیار طولانی



شکل ۱: شماتیک جریان کارگاهی برای ناوگان حمل و نقل معدن روباز

کامیون‌ها در ناوگان حمل و نقل معادن روباز، به عنوان یک مساله پیچیده جریان کارگاهی حل شده است.

## ۲-۱- الگوریتم ابتکاری توسعه یافته

برای حل مساله تخصیص و گسیل، یک الگوریتم ابتکاری با عنوان زمان‌بندی کامیون- شاول (Truck-Shovel Scheduling Algorithm) در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد. یکی از اهداف اصلی در سیستم‌های حمل و نقل معادن روباز، کمینه‌سازی زمان انجام کل عملیات شامل بارگیری، حمل، تخلیه و مراجعه به نقطه بارگیری بعدی است. در الگوریتم توسعه داده شده، این هدف از یک طرف با کاهش طول صف و در نتیجه کاهش زمان انتظار کامیون‌ها و از طرف دیگر با مناسب‌سازی برنامه گسیل کامیون‌ها و در نتیجه کاهش زمان بیکاری شاول‌ها محقق می‌شود.

## ۲-۱-۱- ورودی و خروجی الگوریتم

ورودی‌های این الگوریتم شامل حجم بلوک‌های استخراجی، ظرفیت کامیون‌ها و زمان‌های بارگیری، حمل، تخلیه و مراجعه به نقطه بارگیری بعدی است. لازم به ذکر است که شروع و خاتمه کار کامیون‌ها پارکینگ در نظر گرفته می‌شود. خروجی‌های این الگوریتم شامل برنامه تخصیص و گسیل کامیون‌ها به شاول‌ها است به نحوی که کل عملیات در کمترین زمان ممکن انجام شود. به عنوان مثال برنامه گسیل برای ۳ کامیون به ۲ شاول در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، به عنوان مثال، توالی حرکت کامیون شماره ۱ برای انجام عملیات بارگیری و تخلیه، به اینصورت است که ابتدا این کامیون به شاول شماره ۱، سپس به شاول شماره ۲ و در مرحله بعد مجدداً به شاول شماره ۱ و در نهایت برای بار دوم به شاول شماره ۲ هدایت می‌شود. پس از اتمام کار محوله کامیون فوق به پارکینگ منتقل می‌شود.

به این ترتیب برای استخراج تمام بلوک‌ها برنامه گسیل کامیون‌ها به شاول‌ها به صورت دنباله‌های زیر تعیین شده است:

شاول ۱: ۱ ۳ ۲ ۳  
شاول ۲: ۳ ۲ ۱ ۳ ۱

مثلاً برنامه مربوط به شاول شماره ۱ به اینصورت است که ابتدا کامیون شماره ۱ و سپس کامیون شماره ۳ به سمت این شاول گسیل داده می‌شوند. در ادامه کامیون شماره ۱ برای دومین بار به سمت این شاول هدایت شده و پس از آن به ترتیب کامیون‌های شماره ۲ و ۳ به سمت این شاول اعزام می‌شوند. با توجه به این برنامه، کمترین زمان محاسبه شده برای استخراج کل بلوک‌ها، ۶۴ دقیقه است.

شایان ذکر است که حجم بلوک‌های استخراجی مربوط به شاول‌های شماره ۱ و ۲، به ترتیب ۵۰۰ و ۶۰۰ تن و ظرفیت کامیون‌ها ۱۰۰ تن در نظر گرفته شده است. مدت زمان عملیات بارگیری، باربری، تخلیه و مراجعه به نقطه بارگیری بعدی به ترتیب ۲، ۷، ۲ و ۴ دقیقه لحاظ شده است.

جدول ۱: برنامه گسیل کامیون‌ها به شاول‌ها

کامیون	شاول	ترتیب توالی کامیون	زمان (دقیقه)		
			شروع	پایان	انتظار کامیون
۱	۱	۱	۴	۱۹	۰
۱	۲	۲	۱۹	۳۴	۰
۱	۱	۳	۳۴	۴۹	۰
۱	۲	۴	۴۹	۶۴	۰
۲	۲	۱	۴	۲۴	۲
۲	۲	۲	۲۴	۳۹	۰
۲	۱	۳	۳۹	۵۴	۰
۳	۲	۱	۴	۱۹	۰
۳	۱	۲	۱۹	۳۴	۰
۳	۲	۳	۳۴	۴۹	۰
۳	۱	۴	۴۹	۶۴	۰



## ۲-۱-۲- فرض‌های ساده‌کننده

- فرض‌های مورد نظر در این الگوریتم به شرح زیر است:
- افق زمانی یک شیفت کاری به مدت ۸ ساعت است.
  - موقعیت جغرافیایی جبهه‌کارهای معدنی در طول یک شیفت ثابت باقی می‌ماند.
  - شبکه مسیرهای معدن تغییر نمی‌کند.
  - در طول دوره زمانی مسیر جدید ایجاد نمی‌شود.
  - تعمیر و نگهداری جاده‌ها لحاظ نمی‌شود.
  - خرابی کامیون و شاول لحاظ نمی‌شود.
  - کامیون‌ها همگن هستند.
  - در زمان  $t=0$ ، تمام کامیون‌ها در پارکینگ قرار دارند و پس از اتمام کار به پارکینگ منتقل می‌شوند.
  - هر شاول در هر زمان تنها یک کامیون را بارگیری می‌کند.
  - هر کامیون در هر زمان تنها مجاز به انجام یک عملیات است.
  - استخراج از بلوک‌ها برای تمامی شاول‌ها از شروع شیفت کاری آزاد است.
  - بین شاول و بلوکی که قرار است استخراج شود، زمان سفر وجود ندارد.
  - زمان مانور و پهلوگیری کامیون پای شاول و در نقاط تخلیه، به ترتیب در زمان بارگیری و تخلیه گنجانده شده است.
  - هر عملیاتی که نیاز است تا شاول آماده به کار شود و پای بلوک قرار گیرد، جزو عملیات بارگیری در نظر گرفته می‌شود.
  - در محل تخلیه صف تشکیل نمی‌شود.

## ۲-۱-۳- معیارهای تخصیص کامیون به شاول

- در این الگوریتم برای تخصیص کامیون به شاول، معیارهای زیر اعمال شده است:
- (۱) انتخاب شاول بر اساس زمان باقی‌مانده تا شروع کار
  - (۲) انتخاب شاول بر اساس حجم کار
  - (۳) انتخاب شاول بر اساس وضعیت کاری
  - (۴) انتخاب شاول بر اساس مدت زمان بارگیری
  - (۵) انتخاب شاول بر اساس تعداد کامیون در صف
  - (۶) انتخاب شاول بر اساس اتمام کار
- ابتدا چیدمان ثابتی بر اساس معیارهای شماره ۱ تا ۶ به

عنوان اولویت انتخاب شاول در نظر گرفته و الگوریتم بر این اساس نوشته شده است. به عنوان مثال در چیدمان (۶-۳-۱) (۵-۲-۴)، منظور انتخاب شاول به گونه‌ای است که ابتدا کامیون به شاولی که کارش خاتمه پیدا نکرده، تخصیص داده می‌شود. در صورتی که کار هیچ شاولی به پایان نرسیده باشد، کامیون به شاولی که بیکار است، گسیل داده می‌شود. در حالتی که تمام شاول‌ها مشغول به کار باشند، کامیون به شاولی که زمان باقی‌مانده تا شروع عملیات بارگیری بعدی آن کمتر است، تخصیص پیدا می‌کند. اگر این زمان برای شاول‌ها یکسان باشد، کامیون به شاولی که کمترین تعداد کامیون در صف را دارد، تخصیص داده می‌شود.

در صورتی که به تعداد مساوی کامیون در صف تمام شاول‌ها قرار دارد، کامیون به شاولی با بیشترین حجم کار و در نهایت اگر حجم کاری تمام شاول‌ها برابر است، کامیون به شاولی که سرعت بارگیری بیشتری دارد، تخصیص پیدا می‌کند. نتایج نشان داد که برای تمام حالت‌ها یک چیدمان قطعی جواب بهینه را نمی‌دهد، بنابراین از چیدمان‌های تصادفی در کنار هر یک از معیارهای شماره ۱ تا ۶ استفاده شده است. به عنوان مثال چیدمان تصادفی -۵، یعنی ابتدا شاولی که تعداد کامیون در صف آن کمتر است، انتخاب می‌شود و در صورت برابر بودن تعداد کامیون‌های موجود در صف شاول‌ها، انتخاب شاول به طور تصادفی انتخاب می‌شود. همچنین یک چیدمان کاملاً تصادفی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت بهترین جواب از بین جواب حاصل از چیدمان‌های یاد شده انتخاب می‌شود.

## ۲-۱-۴- مراحل اجرای الگوریتم

مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر است:

گام ۱: ورودی‌های الگوریتم به شکل ماتریس آماده‌سازی می‌شود.

گام ۲: بر اساس معیارهای تعریف شده تخصیص کامیون، یک شاول انتخاب می‌شود.

گام ۳: یک کامیون به طور تصادفی انتخاب و به سمت شاول منتخب گسیل داده می‌شود. در صورتی که شاول مورد نظر در حال بارگیری باشد، کامیون گسیل داده شده در صف منتظر می‌ماند. مدت زمان انتظار کامیون تا شروع بارگیری از شاول، به عنوان زمان انتظار کامیون ثبت می‌شود.

گام ۴: در صورتی که شاول آماده بارگیری باشد اما کامیونی

استخراج) است. اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مدل در ادامه بیان شده است [۷].

اندیس‌ها	
توالی کار	$s$
توالی کامیون	$c$
کار یا شاول	$j$
عملیات	$o$
پارامترها	
مجموعه توالی کارها	$S$
مجموعه توالی کامیون‌ها	$C$
مجموعه کارها	$J$
مجموعه عملیات (بارگیری، باربری، تخلیه، بازگشت)	$O$
مجموعه کامیون‌ها	$T$
ظرفیت کامیون $t$ ام	$cap_t$
حجم بلوک یا کار $z$ ام	$blocksize_j$
زمان انجام عملیات $o$ ام از کار $j$ ام که به وسیله کامیون $t$ ام انجام می‌شود.	$d_{tjo}$

موجود نباشد، زمان انتظار شاول برای کامیون به عنوان زمان بیکاری شاول ثبت می‌شود.

گام ۵: پس از تخلیه بار هر کامیون، کنترل برای میزان کار باقی‌مانده صورت می‌گیرد و چنانچه کار به اتمام رسیده باشد، کامیون به پارکینگ منتقل می‌شود. در غیر اینصورت، کامیون به محل بارگیری بعدی گسیل می‌شود.

گام ۶: تا زمانی که شرط توقف (استخراج تمام بلوک‌ها) حاصل نشده باشد، مراحل ۲ تا ۵ تکرار می‌شود.

گام ۷: مدت زمان انجام کل عملیات، ثبت می‌شود.

گام ۸: مراحل ۲ تا ۷ برای توالی‌های مختلف اجرا شده و توالی با کمترین زمان، به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود.

## ۲-۲- معرفی مدل ریاضی منتخب

در این مقاله از مدل صائبی‌نیا و همکاران استفاده شده است. دلیل این انتخاب مدل‌سازی همزمان تخصیص و گسیل است که با حل آن تخصیص، ترتیب و زمان شروع و پایان هر توالی کامیون تعیین می‌شود. تابع هدف در این مدل، کمینه‌سازی زمان تکمیل کل کارها (زمان تکمیل کل عملیات

### متغیرهای تصمیم

اگر کامیون $t$ ام در توالی $c$ امش عملیات $o$ ام از توالی $s$ ام کار $z$ ام را انجام دهد، یک و در غیر این صورت صفر است.	$X_{tcjso}$
زمان شروع به کار عملیات $o$ ام که بوسیله کامیون $t$ ام در توالی $c$ امش انجام می‌شود.	$ST_{tco}$
زمان شروع به کار عملیات $o$ ام از توالی $s$ ام بلوک $z$ ام	$SJ_{js o}$
زمان تکمیل کل کارها	$CT$
زمان پایان عملیات $o$ ام از کار $z$ ام بوسیله کامیون $t$ ام در توالی $c$ امش که از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.	$E_{tcjo}$

$$E_{tcjo} = ST_{tco} + \sum_{s=1}^S (d_{tjo} * X_{tcjso}) \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, o \in O \quad (1)$$

تابع هدف

$$\min CT \quad (2)$$

محدودیت‌ها

$$CT \geq E_{tcjo} \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, o \in O \quad (3)$$

$$ST_{tco+1} \geq ST_{tco} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S (d_{tjo} * X_{tcjso}) \quad \forall t \in T, c \in C, o \in O-1 \quad (4)$$

$$ST_{tc+11} \geq ST_{tc4} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S (d_{tj4} * X_{tcjs4}) \quad \forall t \in T, c \in C-1 \quad (5)$$

$$SJ_{js+11} \geq SJ_{js1} + (d_{tj1} * X_{tcjs1}) \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, s \in S-1 \quad (6)$$

$$1 - \left( \frac{\min_{t \in T} cap_t}{blocksize_j} \right) / 2 \leq \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S X_{tcjs1} * \left( \frac{cap_t}{blocksize_j} \right) \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$ST_{tco} - SJ_{jso} \geq (1 - X_{tcjs0}) * (-M) \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, s \in S, o \in O \quad (8)$$

$$SJ_{jso} - ST_{tco} \geq (1 - X_{tcjs0}) * (-M) \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, s \in S, o \in O \quad (9)$$

$$ST_{tc2} = ST_{tc1} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S (d_{tj1} * X_{tcjs1}) \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J \quad (10)$$

$$ST_{tc4} = ST_{tc3} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S (d_{tj3} * X_{tcjs3}) \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S X_{tcjs0} \leq 1 \quad \forall t \in T, c \in C, o \in O \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C X_{tcjs0} \leq 1 \quad \forall j \in J, s \in S, o \in O-1 \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C (X_{tcjs0} + X_{tcjs0'}) \neq 1 \quad \forall j \in J, s \in S, o, o' \in O-1, o \neq o' \quad (14)$$

$$X_{tcjs0} + X_{tcjs0'} \neq 1 \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, s \in S, o, o' \in O-1, o \neq o' \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J (X_{tcjs1} + X_{tcjs4}) \neq 1 \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, s \in S \quad (16)$$

$$X_{tcjs4} + X_{tc+1j's'1} \neq 2 \quad \forall t \in T, c \in C-1, j, j' \in J, s, s' \in S, j \neq j' \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S X_{tcjs1} \geq \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S X_{tc+1js1} \quad \forall t \in T, c \in C-1 \quad (18)$$

$$ST_{tc1} \leq ST_{tc+11} + (1 - X_{tc+1js1}) * (M) \quad \forall t \in T, c \in C-1, j \in J, s \in S \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C X_{tcjs1} \geq \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C X_{tcjs+11} \quad \forall j \in J, s \in S-1 \quad (20)$$

$$SJ_{ts1} \leq SJ_{ts+11} + (1 - X_{tcjs+11}) * (M) \quad \forall t \in T, c \in C, j \in J, s \in S-1 \quad (21)$$

$$ST_{tco} \geq 0 \quad \forall t \in T, c \in C, o \in O \quad (22)$$

$$SJ_{jso} \geq 0 \quad \forall j \in J, s \in S, o \in O \quad (23)$$

$$CT \geq 0 \quad (24)$$

یک بلوک ۹۰۰ تنی را استخراج کند، ۱۸ دستگاه کامیون با ظرفیت ۱۰۰ تن و یک نقطه تخلیه است. تعداد چرخه‌های عملیات کامیون و شاول به ترتیب ۲ و ۹ عدد در نظر گرفته شده است. پارامترهای ورودی مورد نظر بر اساس داده‌های معدن واقعی در جدول ۲ نشان داده شده است. پس از اجرای الگوریتم ابتکاری برای این پارامترها، مقدار تابع هدف طی ۳۹ ثانیه، ۶۷٫۵ دقیقه محاسبه شده است.

جدول ۲: پارامترهای ورودی مساله

مدت زمان (دقیقه)	عملیات
۴	اعزام کامیون از پارکینگ
۳٫۲۵	بارگیری
۱۳	باربری
۲	تخلیه
۷	مراجعه به نقطه بارگیری منتخب
۷	انتقال به پارکینگ

با استفاده از حل مدل ریاضی در نرم‌افزار CPLEX 12.8، IBM ILOG، طی ۲۴ ساعت و با مقدار ۲۳ درصد گپ، مقدار تابع هدف ۷۰٫۷۵ دقیقه محاسبه شده است.

به عنوان نمونه در شکل‌های ۲ و ۳، زمانبندی کامیون‌ها برای شاول شماره یک نشان داده شده است.

بر اساس زمانبندی‌های به دست آمده، در برخی موارد شاول‌ها منتظر کامیون بوده و بیکار می‌مانند. با توجه به شکل ۴، با استفاده از الگوریتم ابتکاری، مدت زمان بیکاری هر شاول از زمان شروع اولین بارگیری تا پایان آخرین بارگیری، ۱۲٫۲۵ دقیقه و در مجموع ۴۹ دقیقه محاسبه شده است. بدین ترتیب از ۱۶۶ دقیقه مجموع کارایی شاول‌ها، متوسط کارایی هر شاول ۷۰ درصد است.

همان‌طور که از شکل ۵ قابل مشاهده است، نتایج به دست آمده از حل مدل ریاضی، مدت زمان بیکاری هر شاول از زمان شروع اولین بارگیری تا پایان آخرین بارگیری، ۱۵٫۵ دقیقه و در مجموع ۶۲ دقیقه محاسبه شده است. بدین ترتیب از ۱۷۹ دقیقه مجموع کارایی شاول‌ها، متوسط کارایی هر شاول ۶۵ درصد است.

محدودیت‌های مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:  
 (۳) زمان تکمیل کل کارها برابر و یا بیشتر از زمان تکمیل تک عملیات است.

(۴) ترتیب انجام عملیات در هر توالی را نشان می‌دهد.  
 (۵) هر کامیون تنها پس از اتمام یک توالی، می‌تواند توالی بعدی را آغاز کند.  
 (۶) هر شاول تنها پس از اتمام یک توالی بارگیری، می‌تواند توالی بعدی را آغاز کند.

(۷) حجمی از هر بلوک که باید استخراج شود.  
 (۸ و ۹) رابطه بین زمان شروع توالی کامیون‌ها و شاول‌ها را برقرار می‌کند.

(۱۰) بین عملیات بارگیری و حمل زمان انتظار وجود ندارد.  
 (۱۱) بین عملیات تخلیه و بازگشت زمان انتظار وجود ندارد.  
 (۱۲) هر توالی از هر کامیون تنها یک‌بار انجام می‌شود.  
 (۱۳) هر توالی از هر بلوک تنها یک‌بار انجام می‌شود.  
 (۱۴) در صورت انتخاب انجام عملیات بارگیری یک توالی از شاول، عملیات باربری و تخلیه نیز باید انجام شود.

(۱۵) در صورت انتخاب انجام عملیات بارگیری یک توالی از کامیون، عملیات باربری و تخلیه نیز باید انجام شود.  
 (۱۶) در صورت انجام عملیات بارگیری یک توالی از کامیون، عملیات بازگشت نیز باید انجام شود.

(۱۷) مسیر بازگشت کامیون را مشخص می‌کند که بعد از تخلیه به پای کدام شاول گسیل می‌شود.

(۱۸ و ۱۹) ترتیب توالی کامیون‌ها را مشخص می‌کند. به اینصورت که شروع توالی  $c$  ام قبل از شروع توالی  $c+1$  ام است.  
 (۲۰ و ۲۱) ترتیب توالی شاول‌ها را مشخص می‌کند. به اینصورت که شروع توالی  $s$  ام قبل از شروع توالی  $s+1$  ام است.  
 ۲۲، ۲۳ و ۲۴) زمان تکمیل کل کارها، زمان شروع کارها و زمان شروع توالی کامیون‌ها همواره عددی مثبت است.

### ۳- نتایج و بحث

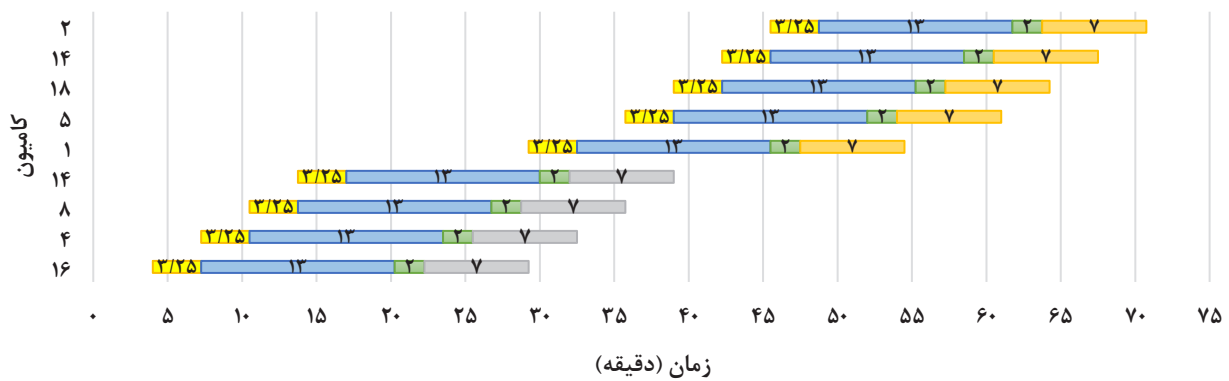
برای بررسی عملکرد الگوریتم ابتکاری توسعه داده شده در واقعیت، مساله با استفاده از داده‌های یک معدن واقعی طراحی شده است. این مساله شامل ۴ دستگاه شاول که هر کدام باید

شاول ۱



شکل ۲: زمانبندی عملیات کامیون‌ها برای شاول شماره ۱ (نتایج TSSA)

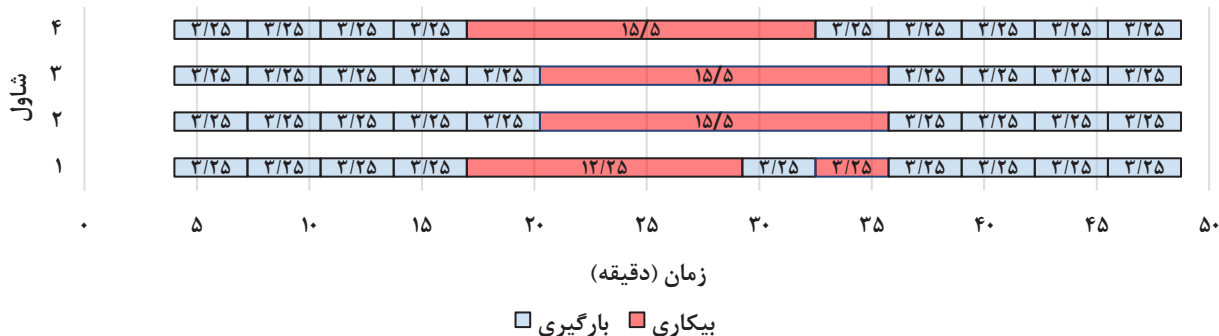
شاول ۱



شکل ۳: زمانبندی عملیات کامیون‌ها برای شاول شماره ۱ (نتایج CPLEX)



شکل ۴: زمانبندی بارگیری کامیون‌ها و زمان بیکاری شاول‌ها (نتایج TSSA)



شکل ۵: زمانبندی بارگیری کامیون‌ها و زمان بیکاری شاول‌ها (نتایج CPLEX)

جدول ۳: زمانبندی ترتیب توالی مراجعه کامیون‌ها و زمان انتظار آن‌ها (بر حسب دقیقه)

شماره کامیون	زمان شروع ترتیب اول		زمان پایان ترتیب اول		زمان شروع ترتیب دوم		زمان پایان ترتیب دوم		مدت زمان انتظار	
	CPLEX	TSSA	CPLEX	TSSA	CPLEX	TSSA	CPLEX	TSSA	CPLEX	TSSA
۱	۴,۰۰	۴,۰۰	۲۹,۲۵	۲۹,۲۵	۲۹,۲۵	۲۹,۲۵	۵۴,۵۰	۵۴,۵۰	۰	۰
۲	۴,۰۰	۷,۲۵	۲۹,۲۵	۳۲,۵۰	۲۹,۲۵	۴۵,۵۰	۵۴,۵۰	۷۰,۷۵	۰	۱۳
۳	۱۷,۰۰	۴,۰۰	۲۹,۲۵	۴۲,۲۵	۴۲,۲۵	۴۲,۲۵	۶۷,۵۰	۶۷,۵۰	۰	۱۳
۴	۱۳,۷۵	۷,۲۵	۳۹,۰۰	۳۲,۵۰	۴۲,۲۵	۳۵,۷۵	۶۷,۵۰	۶۱,۰۰	۳,۲۵	۳,۲۵
۵	۱۰,۵۰	۷,۲۵	۳۵,۷۵	۳۲,۵۰	۳۵,۷۵	۳۵,۷۵	۶۱,۰۰	۶۱,۰۰	۰	۳,۲۵
۶	۷,۲۵	۱۰,۵۰	۳۲,۵۰	۳۵,۷۵	۳۲,۵۰	۳۵,۷۵	۵۷,۷۵	۶۱,۰۰	۰	۰
۷	۱۳,۷۵	۱۰,۵۰	۳۹,۰۰	۳۵,۷۵	۳۹,۰۰	۴۲,۲۵	۶۴,۲۵	۶۷,۵۰	۰	۶,۵
۸	۴,۰۰	۱۰,۵۰	۲۹,۲۵	۳۵,۷۵	۳۲,۵۰	۳۵,۷۵	۵۷,۷۵	۶۱,۰۰	۳,۲۵	۰
۹	۷,۲۵	۱۳,۷۵	۳۲,۵۰	۳۹,۰۰	۳۲,۵۰	۳۹,۰۰	۵۷,۷۵	۶۴,۲۵	۰	۰
۱۰	۷,۲۵	۱۳,۷۵	۳۲,۵۰	۳۹,۰۰	۳۵,۷۵	۳۹,۰۰	۶۱,۰۰	۶۴,۲۵	۳,۲۵	۰
۱۱	۱۰,۵۰	۱۷,۰۰	۳۵,۷۵	۴۲,۲۵	۳۹,۰۰	۴۲,۲۵	۶۴,۲۵	۶۷,۵۰	۳,۲۵	۰
۱۲	۷,۲۵	۷,۲۵	۳۲,۵۰	۳۲,۵۰	۳۲,۵۰	۳۵,۷۵	۴۵,۵۰	۶۱,۰۰	۳,۲۵	۱۳
۱۳	۱۰,۵۰	۱۳,۷۵	۳۵,۷۵	۳۹,۰۰	۳۵,۷۵	۳۵,۷۵	۴۵,۵۰	۶۱,۰۰	۰	۶,۵
۱۴	۱۰,۵۰	۱۳,۷۵	۳۵,۷۵	۳۹,۰۰	۳۹,۰۰	۴۲,۲۵	۴۲,۲۵	۶۴,۲۵	۳,۲۵	۳,۲۵
۱۵	۱۳,۷۵	۱۷,۰۰	۳۹,۰۰	۴۲,۲۵	۳۹,۰۰	۴۲,۲۵	۴۵,۵۰	۶۴,۲۵	۰	۳,۲۵
۱۶	۱۷,۰۰	۴,۰۰	۴۲,۲۵	۲۹,۲۵	۴۲,۲۵	۲۹,۲۵	۳۹,۰۰	۶۷,۵۰	۰	۹,۷۵
۱۷	۱۳,۷۵	۴,۰۰	۳۹,۰۰	۲۹,۲۵	۴۲,۲۵	۲۹,۲۵	۳۲,۵۰	۵۷,۷۵	۳,۲۵	۳,۲۵
۱۸	۴,۰۰	۱۰,۵۰	۲۹,۲۵	۳۵,۷۵	۲۹,۲۵	۲۹,۲۵	۳۹,۰۰	۶۴,۲۵	۰	۳,۲۵

در جدول ۳، مدت زمان انتظار هر کامیون طی توالی بهینه آن بیان شده است. بر اساس الگوریتم ابتکاری مدت زمان انتظار کامیون‌ها، در مجموع ۲۲,۷۵ دقیقه محاسبه شده است.

بدین ترتیب از ۱۱۰۷,۷۵ دقیقه مجموع کارایی کامیون‌ها، متوسط کارایی کامیون‌ها ۹۸ درصد است. از طریق حل مدل ریاضی، از مجموع ۹۹۰,۲۵ دقیقه کارایی کامیون‌ها، کل مدت

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله حل مساله تخصیص و گسیل کامیون در معادن روباز با توسعه یک الگوریتم ابتکاری بررسی شده است.



ریاضی یکپارچه برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون‌ها در معادن روباز". نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره ۱۲، شماره ۳۰، ص ۹۱-۱۰۱.

- [8] Pinedo, M., and Hadavi, K. (1991). "Scheduling: theory, algorithms and systems development". In: Gaul, W., Bachem, A., Habenicht, W., Runge, W., and Stahl, W. W. (Eds.), Operations Research Proceedings, Springer, Berlin, Heidelberg, 1991: 35-42. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-46773-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46773-8_5).
- [9] Alarie, S., and Gamache, M. (2002). "Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16(1): 59-76.
- [10] Moradi-Afrapoli, A., and Askari-Nasab, H. (2019). "Mining fleet management systems: a review of models and algorithms". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33(1): 42-60.
- [11] Zeng, W. (2018). "A simulation model for truck-shovel operation". PhD. thesis, University of Wollongong, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, March. <https://ro.uow.edu.au/theses1/270>.
- [12] Ataepour, M., and Baafi E. Y. (1999). "Arena simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-despatching modes". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 13(3): 125-129.
- [13] He, M. X., Wei, J. C., Lu, X. M., and Huang, B. X. (2010). "The genetic algorithm for truck dispatching problems in surface mine". Information Technology Journal, 9(4): 710-714.
- [14] Saadatmand-Hashemi, A., and Sattarvand, J. (2015). "Simulation Based Investigation of Different Fleet Management Paradigms in Open Pit Mines-A Case Study of Sungun Copper Mine". Archives of Mining Sciences, 60(1): 195-208.
- [15] Upadhyay, S. P., and Askari-Nasab, H. (2016). "Truck-shovel allocation optimization: a goal programming approach". Mining Technology, 125(2): 1-11.
- [16] Mohtasham, M., Mirzaei Nasirabad, H., and Mahmoodi Markid, A. (2017). "Development of a goal programming model for optimization of truck allocation in open pit mines". Journal of Mining and Environment, 8(3): 359-371.
- [17] Chaowasakoo, P., Seppala, H., Koivo, H., and Zhou, Q. (2017). "Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching". International Journal of Mining Science and Technology, 27: 229-236.
- [18] Chaowasakoo, P., Seppala, H., Koivo, H., and Zhou,

با توجه به پیچیدگی و اندازه مساله، گاه امکان دست‌یابی به جواب با استفاده از روش‌های ریاضی وجود ندارد یا زمان حل بسیار طولانی می‌شود، بنابراین استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری برای افزایش سرعت حل الزامی است. در این مقاله، یک الگوریتم ابتکاری با در نظر گرفتن معیارهای مختلف در تخصیص کامیون به شاول توسعه داده شده است. برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از یک مدل ریاضی منتخب در یک معدن واقعی مقایسه شده است. بر این اساس، قابلیت الگوریتم پیشنهادی برای کاهش زمان حل مساله به اثبات رسید. در این راستا زمان انجام کل عملیات تولید با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، در مقایسه با روش ریاضی، ۵ درصد کاهش یافته است. همچنین متوسط کارآیی شاول و کامیون به ترتیب ۵ و ۶ درصد افزایش یافته است.

## ۵- مراجع

- [1] Bajany, D. M., Xia, X., and Zhang, L. (2017). "A MILP Model for Truck-Shovel Scheduling to Minimize Fuel Consumption". The 8<sup>th</sup> International Conference on Applied Energy, 125: 2739- 2745.
- [2] Isnafitri, M. F., Rosyidi, C., and Aisyati A. (2021). "A Truck Allocation Optimization Model in Open Pit Mining to Minimize Investment and Transportation Costs". In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1096(1): 12-24.
- [3] Shah, K. S., and Rehman, S. U. (2020). "Modeling and Optimization of truck-shovel allocation to mining faces in cement quarry". Journal of Mining Environment, 11(1): 21-30.
- [4] Ghobadi-Samani, M., Monjezi, M., Khademi Hamidi, J., and Mousavinogholi, A. (2020). "A Mathematical Model to Optimize Allocation Sequence in Dispatching Problem". Journal of Mining and Environment, 11(1): 185-192.
- [5] Kaveh Ahangaran, D., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Foster, P. (2012). "Real-time dispatching modelling for trucks with different capacities in open pit mines". Archives of Mining Sciences, 57(1): 39-52.
- [6] Moradi-Afrapoli, A. (2018). "A Hybrid Simulation and Optimization Approach towards Truck Dispatching Problem in Surface Mines". PhD. Thesis, University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering. <https://era.library.ualberta.ca>.

[۷] صائبی‌نیا، ر.، موسوی، الف.، صیادی، الف؛ ۱۴۰۱؛ "ارائه یک مدل

- truck allocation*". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 19(3): 162-175.
- [30] Subtil, R. F., Silva, D. M., and Alves, J. C. (2011). "A practical approach to truck dispatch for open pit mines". In: Thirty-Fifth Applications for Computers and Operations Research in the Minerals Industries (APCOM) Symposium, 765-777.
- [31] Moradi-Afrapoli, A., Tabesh, M., and Askari-Nasab, H. (2018). "A stochastic hybrid simulation-optimization approach towards haul fleet sizing in surface mines". Mining Technology, 128(1): 1-12.
- [32] Moradi-Afrapoli, A., Tabesh, M., and Askari-Nasab, H. (2019). "A multiple objective transportation problem approach to dynamic truck dispatching in surface mines". European Journal of Operational Research, 276(1): 331-342.
- [33] Moradi-Afrapoli, A., Upadhyay, S., and Askari-Nasab, H. (2021). "Truck dispatching in surface mines Application of fuzzy linear programming". The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 121(9): 505-512.
- [34] Mohtasham, M., Mirzaei Nasirabad, H., and Alizadeh, B. (2021). "Optimization of truck-shovel allocation in openpit mines under uncertainty: a chance-constrained goal programming approach". Journal of Mining Technology, 130(2): 81-100.
- [35] Mirzaei-Nasirabad, H., Rahimzadeh-Nanekaran, F., and Mohtasham, M. (2023). "Evaluating the effect of fleet management on the performance of mining operations using integer linear programming approach and two different strategies". Iranian Journal of Management Studies, 16(1): 139-155. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijms.2022.330990.674769>.
- [36] Mohtasham, M., Mirzaei Nasirabad, H., Askari-Nasab, H., and Alizadeh, B. (2022). "Multi-stage optimization framework for the real-time truck decision problem in open-pit mines: a case study on Sungun copper mine". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 36(7): 461-491. DOI: 10.1080/17480930.2022.2067709.
- [37] Gonzalez, T., and Sahni, S. (1978). "Flowshop and jobshop schedules: complexity and approximation". Operation Research, 26(1): 36-52.
- [38] Marichelvam, M. K., and Geetha, M. (2019). "A hybrid algorithm to solve the stochastic flow shop scheduling problems with machine break down". International Journal of Enterprise Network Management, 10(2): 162-175.
- Q. (2017). "Improving fleet management in mines: The benefit of heterogeneous match factor". European Journal of Operational Research, 261(3): 1052-1065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.02.039>.
- [19] Hauck, R. F. (1973). "A Real-Time Dispatching Algorithm for Maximizing Open-Pit Mine Production under Processing and Blending Requirements". In: Seminar on Scheduling in Mining, Smelting and Metallurgy, 1-10.
- [20] Soumis, F., Ethier, J., and Elbrond, J. (1989). "Evaluation of the New Truck Dispatching in the Mount Wright Mine". In: Twenty-First Applications for Computers and Operations Research in the Minerals Industries (APCOM), 674-682.
- [21] Li, Z. (1990). "A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining". Mining Science and Technology, 10(3): 337-340.
- [22] Topal, E., and Ramazan, S. (2010). "A new MIP model for mine equipment scheduling by minimizing maintenance cost". European Journal of Operational Research, 207(2): 1065-1071.
- [23] Topal, E., and Ramazan, S. (2012). "Mining truck scheduling with stochastic maintenance cost". Journal of Coal Science and Engineering, 18(3): 313-319.
- [24] Kaveh-Ahangaran, D., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Foster, P. (2012). "Real-time dispatching modelling for trucks with different capacities in open pit mines". Archives of Mining Sciences, 57(1): 39-52.
- [25] Chang, Y., Ren, H., and Wang, S. (2015). "Modelling and optimizing an open-pit truck scheduling problem". Discrete Dynamics in Nature and Society, 2015: 1-7.
- [26] Zhang, L., and Xia, X. (2015). "An integer programming approach for truck-shovel dispatching problem in open-pit mines". In: Energy Procedia, 75: 1779-1784.
- [27] Panagiotou, G., and Michalakopoulos, T. (2001). "A computer-based truck dispatching system for small-medium scale mining operations". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 8(1): 1-15.
- [28] Temeng, V. A., Otuonye, F. O., and Friendewey, J. O. (1997). "Real-time truck dispatching using a transportation algorithm". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 11(4): 203-207.
- [29] Ta, C. H., Kresta, J. V., Forbes, J. F., and Marquez, H. J. (2005). "A stochastic optimization approach to mine