



Imam Khomeini International University  
Vol. 8, No. 4, Winter 2023



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

## Research Paper

# Ultimate Pit Limit Optimization Using Keshtel Algorithm

Rostamian S.<sup>1</sup>, Ataee-pour M.<sup>2\*</sup>

1- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 26 Aug. 2023

Accepted: 24 Oct. 2023

**Abstract:** To design an open pit mine, geological operations must be conducted, followed by the preparation of a three-dimensional model and mineral block model. The ultimate pit limit can be determined through accurate methods and artificial intelligence techniques. The problem of determining the ultimate pit limit is considered to be NP-hard, making it challenging to solve. While exact methods provide better and optimal results, they may require significant time to answer the problem due to the large number of blocks involved. In such cases, it is more suitable to use collective algorithms or a planned approach to determine the final range. Optimizing the determination of the ultimate pit limit is similar to other optimization problems that can be addressed using logical algorithms in MATLAB software. In this study, Keshtel algorithm, implemented in MATLAB, is utilized to optimize the final range. Initially, Keshtel algorithm is employed to solve the problem. Subsequently, the Songun copper mine is chosen as a case study for the two-dimensional and three-dimensional implementation, and the results of determining the ultimate pit limit are compared with both Keshtel algorithm and NPV Scheduler software. The findings reveal that Keshtel algorithm, used to determine the final limits of the Songun copper mine, differs by only 0.47% compared to the NPV Scheduler software. Moreover, the comparison of Keshtel algorithm with the results of Lerch Grossman in determining the two-dimensional final range, as well as the comparison with NPV Scheduler software in three-dimensional problems, demonstrates its efficiency in solving these issues effectively.

**Keywords:** Optimization, Keshtel Algorithm, 3D ultimate pit limit.

### How to cite this article

Rostamian, S., and Ataee-pour, M. (2023). "Ultimate pit limit optimization using Keshtel algorithm". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(4): 79-102.

DOI: [10.30479/JMRE.2023.19236.1663](https://doi.org/10.30479/JMRE.2023.19236.1663)

\*Corresponding Author Email: [map60@aut.ac.ir](mailto:map60@aut.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 problem of determining the final limit of a mine is thoroughly examined after the design of the 3D and block models. This problem is classified as one of the NP-hard problems. To address the issue of determining the final limit, various mathematical (exact) and artificial intelligence methods are employed. Exact methods typically yield better and optimal results, but for complex problems with a large number of blocks, they may require a significant amount of time to solve. Due to uncertainties such as grade and price uncertainties in the field of mining engineering, mining companies are compelled to find ways to reduce costs and increase revenue. Optimization methods can be categorized into exact methods and search methods. Exact methods provide optimal solutions but require substantial time and powerful computers for larger problems. On the other hand, search methods may not yield the optimal solution, but can provide reasonably accurate solutions within a reasonable time frame. The problem of determining the final limit of a mine is classified as an NP-hard problem. The objective of this article is to investigate the optimization of the final limit using Keshtel algorithm and to compare it with Lerch and Grossman's algorithm (mathematically). To achieve this, the Keshtel algorithm is deemed feasible and will be utilized for optimization. One of the future goals of this article is to evaluate the algorithm and its applications in various mining problems. While many meta-exploration algorithms, such as ant algorithms, colonial competition algorithms, bee algorithms, and genetic algorithms, have been employed to determine the ultimate pit limit in mines, many of these studies have limitations (e.g., slope limitations) and fail to address uncertainties (e.g., price and grade uncertainties). Therefore, researchers are seeking flexible methods or algorithms that can handle all of these cases and even adapt to future changes in the field. In this research, the theory of Keshtel algorithm and its implementation for determining the final limits of mines are initially discussed. Subsequently, it is applied to a hypothetical block model in a two-dimensional form, and the resulting value is compared to the Lerch and Grossman algorithm. The performance of Keshtel algorithm and the final value obtained demonstrate its success in solving the problem.

## METHODS

Keshtel, a place in Mazandaran, derives its name from the Ghazsanan family who migrated to this location from Mazandaran. The scientific name of the duck found in this area is *Anas Claipta*, known as the Northern Shawler in North America, which signifies "Northern paddler". The term "paddler" is attributed to the shape of the duck's beak, and this bird predominantly resides in the northern regions of the world, particularly Eurasia (Europe-Asia). During the winter season, it migrates to southern areas of the Arctic, including North America, Europe, southern Russia, and the south of the Mazandaran Sea. The breeding algorithm of this duck exploits its feeding behavior in the pond. Keshtel's algorithm, inspired by a natural process, is an innovative meta-exploratory algorithm. The behavior of this type of duck involves submerging its head and rotating its entire body, resembling a feather, with the center of its beak when it discovers a favorable food source. This movement creates a moving circle with a mobile center, exhibiting both positional and translational motion. As soon as this hypothetical circle is formed by the duck, other ducks in close proximity gradually approach the target duck, which found the food source first. Then, they rotate around it in the same direction. The initial keshtel occupies the center, while others rotate around it harmoniously. This hypothetical circle, dictated by the movement of the keshtels, combines both positional and translational rotational motions. This collective movement, as depicted in Figure 1, revolves around the food source and consistently gravitates towards more abundant and superior sources of food. The keshtels consume and rotate until no other food source remains in the area. At this point, the keshtels disperse.

## FINDINGS AND ARGUMENT

The implementation of Keshtel algorithm in the problem of determining the final two-dimensional range is discussed after the formation of the block model and the determination of the value of each block [2]. Figure 2 illustrates the values of hypothetical blocks in different positions of the block model, represented as a 4\*10 matrix.

Once the block model is selected, the implementation of Keshtel algorithm is then addressed in the problem of determining the final two-dimensional range.

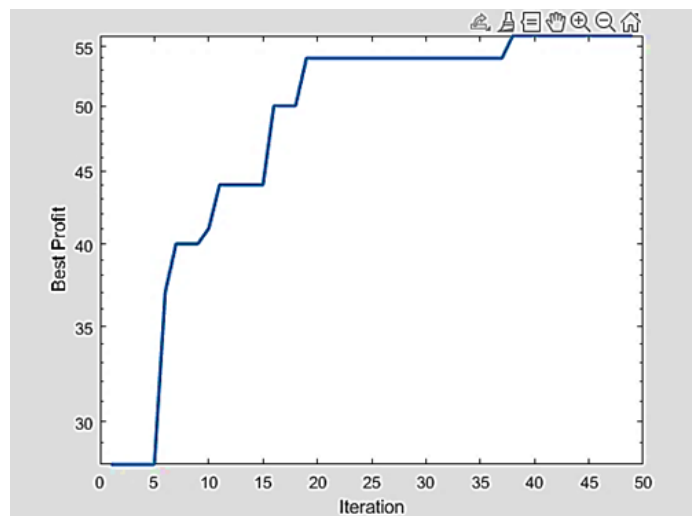
After finalizing the calculations and determining the ultimate pit limit using Keshtel algorithm, the optimal is shown in Figure 3,4.



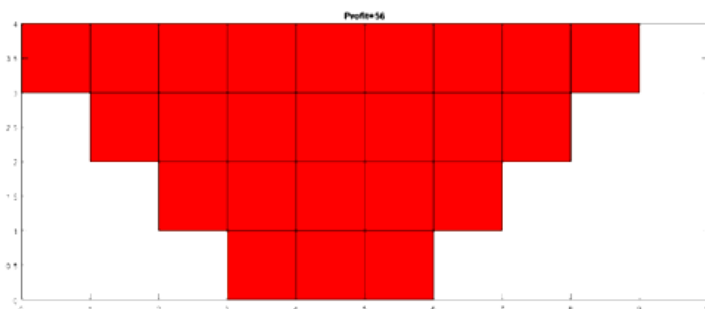
**Figure 1.** Movement of the group of keshtels around the food [1]

-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	-2
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1
1	2	-3	10	-3	-2	-10	-2	-1	-2
-1	1	-3	4	10	10	6	-1	2	-1

**Figure 2.** The values of hypothetical blocks in different positions of the block model [2]



**Figure 3.** The answer obtained by solving the problem with 50 repetitions



**Figure 4.** The result of solving the problem of determining the optimal ultimate pit limit using Keshtel algorithm

To implement Keshtel algorithm in determining the 3D ultimate pit limit, a hypothetical block model with specific dimensions is used. Figure 5 shows a block model with dimensions of 4\*8\*8 and the results of using Keshtel Algorithm.

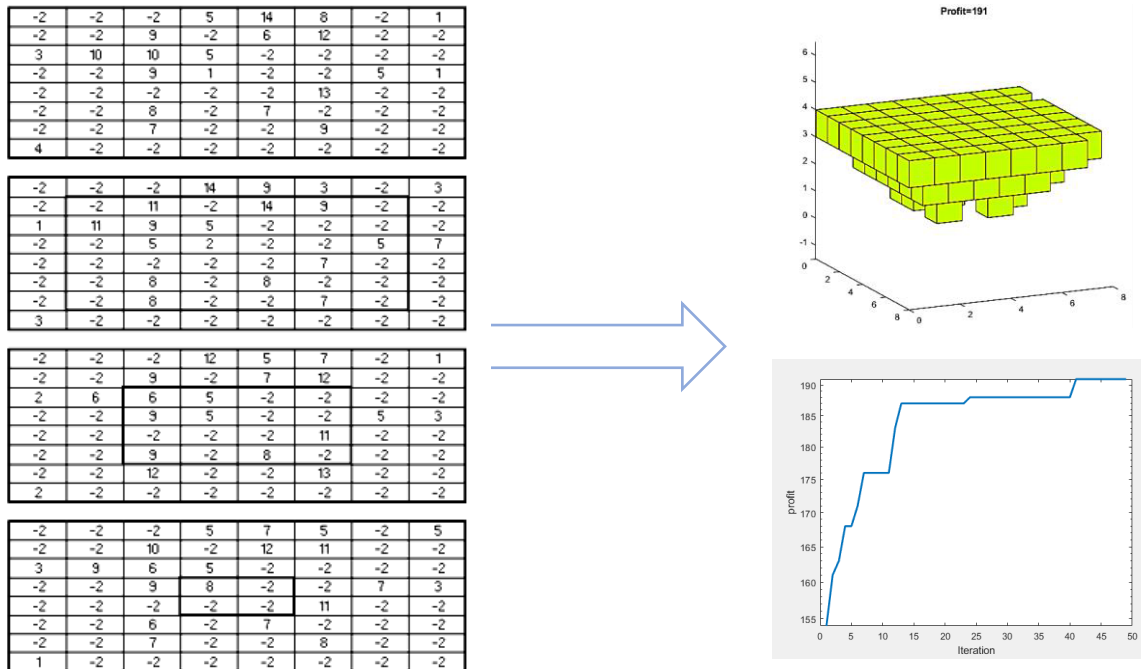


Figure 5. A block model with dimensions of 4\*8\*8 and the results of using Keshtel Algorithm

## CONCLUSIONS

Nowadays, in light of scientific and technological advancements, the optimization of mining activities to achieve maximum income and metal extraction at minimal cost has become crucial. Various uncertainties, such as geological conditions, market price fluctuations, and technical requirements, have prompted mining companies to continuously develop technical improvements in order to enhance profitability, optimize exploitation, and meet investor goals. In this research, the problem of determining the final two-dimensional range was addressed using a set of hypothetical blocks measuring 4\*10. Additionally, to determine the final three-dimensional range, a set of hypothetical blocks measuring 4\*8\*8 was utilized. The response obtained from applying Keshtel algorithm to these hypothetical two-dimensional and three-dimensional datasets (with smaller dimensions) was found to be equivalent to the response generated by NPV Scheduler software. Furthermore, the Keshtel algorithm was evaluated using data from the Songon copper mine, resulting in an ultimate pit limit value of 14501 million dollars. Comparatively, the NPV Scheduler software yielded an ultimate pit limit value of 14570 million dollars for the same mine. The difference between the final answers obtained through these two methods was less than one percent.

## REFERENCES

- [1] Haj Aghaei Keshtali, M. (2014). "Integrated scheduling of rail production and transportation in the supply chain". Doctoral Dissertation, Amirkabir University of Technology. (In Persian).
- [2] Hustrulid, W., Kuchta, M., and Martin, R. (2013). "Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack". CRC Press.



## بهینه‌سازی محدوده نهایی استخراج در معادن روباز با الگوریتم مرغابی

سجاد رستمیان<sup>۱</sup>، مجید عطایی پور<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۲

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

### چکیده

برای طراحی یک معدن بعد از اینکه انجام عملیات زمین‌شناسی، تهیه مدل سه بعدی و مدل بلوکی معدن به اتمام رسید، تعیین محدوده نهایی انجام می‌شود. تعیین محدوده نهایی با استفاده از روش‌های دقیق و روش‌های هوش مصنوعی قابل محاسبه است. مساله تعیین محدوده نهایی از نظر سختی جزو مسایل NP-hard است. روش‌های دقیق معمولاً به نتیجه‌ای بهتر و بهینه خواهند رسید، اما برای مسایل بزرگ با تعداد بلوک‌های زیاد ممکن است با زمان حل بسیار بالایی قادر به پاسخ‌گویی به مساله باشد. در این شرایط بهتر است از الگوریتم‌های هوش جمعی یا تکاملی برای تعیین محدوده نهایی استفاده کرد. بهینه‌سازی مساله تعیین محدوده نهایی شبیه به مسایل بهینه‌سازی دیگر است که با استفاده از یک منطق الگوریتمی در نرم‌افزار متلب قابل حل است. در اینجا از الگوریتم کشتل در متلب برای بهینه‌سازی محدوده نهایی استفاده شده است. ابتدا الگوریتم کشتل برای حل مساله دو بعدی و سه بعدی پیاده‌سازی شده و در نهایت معدن مس سونگون به عنوان مطالعه موردی انتخاب و نتایج حل مساله تعیین محدوده نهایی با الگوریتم کشتل و نرم‌افزار NPVScheduler مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم کشتل در مساله تعیین محدوده نهایی معدن مس سونگون اختلاف ۰/۴۷ درصدی با نرم‌افزار NPVScheduler دارد. مقایسه الگوریتم کشتل با نتایج لرج گروسمن در تعیین محدوده نهایی دو بعدی و مقایسه نتایج حاصله از الگوریتم کشتل با نرم‌افزار NPVScheduler در مسایل سه بعدی نشان‌دهنده کارایی مناسب آن در حل این مسایل است.

### کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، تعیین محدوده نهایی سه بعدی، الگوریتم فراکاوشی کشتل (مرغابی).

### استناد به این مقاله

رستمیان، س.، عطایی پور، م.؛ ۱۴۰۲؛ "بهینه‌سازی محدوده نهایی استخراج در معادن روباز با الگوریتم مرغابی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۴، ص ۷۹-۱۰۲.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.19236.1663



## ۱- مقدمه

مساله تعیین محدوده نهایی بعد از طراحی مدل سه بعدی و مدل بلوکی معدن بحث و بررسی می‌شود. این مساله یکی از مسایل Nphard به حساب می‌آید. برای حل مساله تعیین محدوده نهایی روش‌های ریاضی (دقیق) و هوش مصنوعی مختلفی وجود دارد. روش‌های دقیق معمولاً به نتیجه‌ای بهتر و بهینه خواهند رسید، اما برای مسایل بزرگ با تعداد بلوک‌های زیاد ممکن است با زمان حل بسیار بالایی قادر به پاسخ‌گویی به مساله باشد. عدم قطعیت‌هایی مانند عدم قطعیت عیاری، عدم قطعیت قیمت و نظایر آن که در علم مهندسی معدن وجود دارد، شرکت‌های معدنی را مجاب به پیدا کردن روشی برای کاهش هزینه و افزایش درآمد می‌کند. روش‌های بهینه‌سازی به دو دسته روش‌های دقیق و جستجوگر تقسیم می‌شوند. روش‌های دقیق برای بهینه‌سازی به جواب بهینه برای مسایل منجر خواهد شد، اما این روش‌ها در مسایل بزرگ به زمان و کامپیوترهای بسیار قدرتمند نیاز دارند. با توجه به این که روش‌های جستجوگر به جواب بهینه برای مساله منجر نخواهد شد، اما جواب آن با دقت مناسب و در زمانی معقول قادر به حل مسایل خواهند بود. مساله تعیین محدوده نهایی معدن جزو مسایل np-hard طبقه‌بندی می‌شوند. هدف از نوشتن این مقاله بررسی بهینه کردن محدوده نهایی معدن، با استفاده از الگوریتم کشتل است و برای ارزیابی، آن را با الگوریتم لرج و گروسمن (ریاضی محور) مقایسه کرده است. برای این کار، کاربرد الگوریتم مرغابی امکان‌سنجی شده و برای بهینه‌سازی استفاده خواهد شد. از اهداف بعدی این مقاله می‌توان به ارزیابی این الگوریتم و کاربردهای آن در مسایل مختلف معدنی اشاره کرد. تا به حال از الگوریتم‌های فراکاوشی زیادی مانند الگوریتم مورچگان، الگوریتم رقابت استعماری، زنبور، ژنتیک و نظایر آن‌ها برای تعیین محدوده نهایی در معادن استفاده شده است، اما در بسیاری از این تحقیقات صورت گرفته بسیاری از محدودیت‌ها (مانند محدودیت شیب معدن) و عدم قطعیت‌ها (مانند عدم قطعیت قیمت و عیار) در آن‌ها بررسی نشده است. برای همین محققان به دنبال روش‌ها یا الگوریتم‌های انعطاف‌پذیری می‌گردند که با استفاده از آن بتوان همه این موارد یاد شده و حتی بیشتر از آن را حل و اگر در آینده در این زمینه متغیری اضافه یا کم شد بتوان تغییرات را با سهولت اعمال کرد.

در این پژوهش ابتدا تئوری الگوریتم کشتل و نحوه

پیاده‌سازی این الگوریتم برای موضوع تعیین محدوده نهایی معادن مورد بحث قرار گرفته و در نهایت برای یک داده مدل بلوکی فرضی به صورت دوبعدی پردازش می‌شود و در نهایت ارزش آن با روش تعیین محدوده نهایی با الگوریتم لرج و گروسمن مقایسه می‌شود. عملکرد این الگوریتم و ارزش نهایی آن نشان می‌دهد الگوریتم کشتل در انجام حل مساله موفق بوده است. تا به حال برای تعیین محدوده نهایی روش‌های مختلفی ارایه شده است که به دو دسته روش‌های دستی و کامپیوتری تقسیم می‌شوند [۱]. در استفاده از هر روش باید مسایل اقتصادی در نظر گرفته شود. طراحی محدوده نهایی با روش‌های دستی زمان‌بر بوده و طراحی به وسیله آن نیازمند گروهی از مهندسان و طراحان باتجربه است. همچنین استفاده از این روش تنها در کانسارهای با تعداد داده کم کاربرد دارد [۲]. برای تعیین محدوده نهایی معدن الگوریتم‌های مختلفی نیز ارایه شده است. این الگوریتم‌ها در یک تقسیم‌بندی به الگوریتم‌های با منطق ریاضی و جستجوگر تقسیم می‌شوند. گروهی از الگوریتم‌ها که در محدوده فرضیات اعمال شده در آنها، همواره قادر به یافتن جواب بهینه هستند را الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی و الگوریتم‌هایی را که تنها قادر به یافتن جوابی نزدیک به بهینه هستند را الگوریتم‌های جستجوگر می‌گویند. روش‌های مبتنی بر منطق ریاضی همواره قادر به یافتن محدوده بهینه خواهند بود (همانند الگوریتم لرج و گروسمن)، اما این الگوریتم‌ها برای مسایل بزرگ محدودیت دارند، چراکه زمان حل این الگوریتم‌ها برای مسایل بزرگ بسیار طولانی خواهد بود. روش‌های جستجوگر در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی توسعه داده شدند و از علل گرایش به این الگوریتم‌ها می‌توان به تعداد کم تکنیک‌های ریاضی در آن زمان آشنایی کم معدنکاری با تکنیک‌های ریاضی و مهم‌تر از همه نبود کامپیوترهای قدرتمند برای حل مساله محدوده نهایی اشاره کرد. هر کدام از این روش‌های ارایه شده مزایا و معایبی دارند. در این بخش سعی می‌شود به توضیحی خلاصه در مورد روش‌ها و الگوریتم‌های ارایه شده پرداخته شود. ساده‌ترین راه‌حل برای محدوده نهایی معادن روباز در سال ۱۹۶۵ توسط پانا ارایه شد [۳]. الگوریتم مخروط شناور، یک الگوریتم شبیه‌سازی است که در آن تعیین طرح محدوده نهایی معدن، تابع شبیه‌سازی استخراج آن است. عنصر اصلی در این شبیه‌سازی، مخروط باطله‌برداری حداقل است. یکی از عیب‌های این الگوریتم عدم استفاده از خاصیت ترکیب شدن

## ۲- پیشینه تحقیق

روش‌های مختلف جستجو، همواره مورد علاقه محققان فعال در حوزه بهینه‌سازی مسایل بزرگ و با زمان حل طولانی بوده است. اگر چه تاکنون روش‌های حل زیادی ارائه شده است، اما همواره قابلیت حل، زمان رسیدن به پاسخ و توانایی در رسیدن به بهترین پاسخ، مورد بحث بوده است. در مواجهه با مسایل در حوزه‌ها و اندازه‌های مختلف، این روش‌ها رفتارهای متفاوتی دارند و اغلب از تکنیک‌های تصادفی بهره می‌برند. روش‌های جستجو در بسیاری از مسایل علمی و مهندسی به کار گرفته می‌شوند و توانسته‌اند پاسخ‌های بهینه و یا نزدیک به بهینه را به دست آورند [۱۱].

برای تعیین محدوده نهایی بهینه معدن الگوریتم‌های مختلفی ارائه شده است. این الگوریتم‌ها در یک تقسیم‌بندی کلی به الگوریتم‌های قطعی<sup>۶</sup> و الگوریتم‌های تقریبی<sup>۷</sup> تقسیم می‌شوند. گروهی از الگوریتم‌ها که در محدوده فرضیات اعمال شده، همواره قادر به یافتن پاسخ بهینه هستند. الگوریتم‌های قطعی و الگوریتم‌هایی که تنها قادر به یافتن پاسخی نزدیک به پاسخ بهینه هستند را الگوریتم‌های تقریبی می‌نامند [۱۲].

روش‌های قطعی برای بهینه‌سازی به پاسخ بهینه برای مسایل منجر خواهند شد، اما این روش‌ها در مسایل بزرگ به زمان طولانی و کامپیوترهای بسیار قدرتمند نیاز دارند. هرچند روش‌های تقریبی به پاسخ بهینه برای مساله منجر نخواهد شد، اما با دقت مناسب و در زمانی معقول قادر به حل مسایل خواهند بود. مساله تعیین محدوده نهایی معدن و برنامه‌ریزی تولید نیز از این قضیه مستثنی نیست. به ویژه برای برنامه‌ریزی تولید معادن بزرگ، حل مساله با روش‌های قطعی قابل انجام نبوده و برای قابل حل شدن مساله از تکنیک‌های کاهش بعد و کاهش تعداد متغیرها و محدودیت‌ها استفاده می‌شود. روش‌های قطعی خود به دو گروه روش‌های ریاضی و شمارشی تقسیم می‌شوند.

روش‌های تقریبی در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی توسعه داده شدند و از علل گرایش به این الگوریتم‌ها می‌توان به تعداد کم تکنیک‌های قطعی در آن زمان، آشنایی کم جامعه تخصصی معدنکاری با تکنیک‌های قطعی و مهم‌تر از همه نبود کامپیوترهای قدرتمند برای حل مساله محدوده نهایی اشاره کرد [۱۳]. این دسته از روش‌ها در بهینه‌سازی بر پایه جستجوی پاسخ‌های نزدیک به پاسخ بهینه استوار است. این روش‌ها به تعیین پاسخ بهینه برای مساله منجر نخواهد شد،

بلوک‌ها است. مخروط شناور<sup>۲</sup> توسط رایب در سال ۱۹۹۹ مطرح و معرفی گردید [۴]. در سال ۱۹۶۵ لرج و گروسمن مقاله‌ای تحت عنوان "طراحی بهینه معدن روباز" منتشر کردند که در آن دو روش عددی الگوریتم برنامه‌نویسی پویا، برای کاواک با یک مقطع عمودی از یک معدن و الگوریتم نموداری، برای کاواک کلی سه بعدی ارائه شده بود [۵]. الگوریتم کوروبوف توسط کوروبوف در سال ۱۹۷۴، بر اساس الگوریتم مخروط شناور مطرح و ابداع شد [۶]. مدل جریان شبکه برای تعیین محدوده بهینه معدنکاری روباز، بر پایه تئوری حداکثر جریان شبکه و حداقل میزان برداشت، بنا شده است و نخستین بار این روش در سال ۱۹۶۸ پیشنهاد شد. همین نظریه توسط پیکارد<sup>۷</sup> [۷] تایید شد. در این روش شبکه‌ای با پایانه‌های ورودی و خروجی ساخته می‌شود. لرج و گروسمن در سال ۱۹۶۵ الگوریتمی به نام نظریه نمودار برای حل مساله تعیین محدوده نهایی، در حالت سه بعدی ارائه دادند [۵]. این الگوریتم از نظر ریاضی اثبات شده است که همواره به پاسخ بهینه منجر خواهد شد و در اکثر صنایع معدنی و نرم‌افزارها به کار گرفته شده است. الگوریتم‌هایی که تا به اینجا بحث و بررسی شدند، جزو الگوریتم‌های نسل یک به حساب می‌آیند. الگوریتم‌هایی که در ادامه به آنها اشاره می‌شود، جزو نسل دوم الگوریتم‌ها هستند که برای تعیین محدوده نهایی معدن استفاده شده‌اند. الگوریتم ژنتیک<sup>۸</sup> برای اولین بار در سال ۱۹۵۷ مطرح شد [۸] و بعدها توسط محققان مختلف توسعه یافت. ابزارهایی که در الگوریتم ژنتیک موجود است موجب تغییر ژن‌ها در کروموزوم‌ها شده و در نهایت کروموزوم بهینه که همان محدوده بهینه خواهد بود را ارائه می‌دهد. برای دستیابی سریع به جواب از ترکیب همین الگوریتم با الگوریتم مخروط شناور نیز استفاده شد که جوابی بهتر از خود الگوریتم ژنتیک ارائه داد. الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان<sup>۹</sup> یکی از الگوریتم‌های فراکاوشی<sup>۴</sup> الهام گرفته شده از زندگی حیوانات اجتماعی است. این الگوریتم اولین بار در سال ۱۹۹۰ مطرح شد. در رشته مهندسی معدن نیز برای اولین بار از روش مورچگان برای تعیین محدوده نهایی استفاده شد [۹]. محدوده مورد بررسی به صورت دو بعدی بوده و روش‌های تطبیق محدوده نهایی با الگوریتم مورچگان بررسی شده است. الگوریتم زنبور عسل مصنوعی<sup>۵</sup> یک راهکار بهینه‌سازی است که رفتار یک کلونی زنبور عسل را شبیه‌سازی می‌کند که اولین بار در سال ۲۰۰۵ برای بهینه‌سازی پارامتر واقعی ارائه شد [۱۰].

میان پاسخ‌ها است. همچنین برای تمرکز جست‌وجو و بهبود پاسخ‌ها از روش همگون‌سازی با نزدیک کردن پاسخ‌های بد به سمت پاسخ‌های خوب و اکتشاف نواحی در کنار پاسخ‌های خوب باعث تمرکز پاسخ‌ها شده است و ایجاد سیاست رقابت استعماری به خودی خود یک رویکرد هوشمند برای تنوع میان پاسخ‌ها و تقسیم پاسخ‌ها به سمت گروه‌های جدید است. علاوه بر این در این الگوریتم از انقلاب برای فرار از بهینه محلی استفاده می‌شود [۱۴].

در الگوریتم کشتل نیز که الگوریتمی نو ظهور و جمعیت محور است که توسط حاجی آقایی کشتل و امین نیری در سال ۲۰۱۳ [۱۵] ارایه شده است، میان جمعیت‌ها سه حالت افراز مختلف در نظر گرفته شده است تا افراز خوبی میان جمعیت‌ها برقرار شود. یک گروه از این جمعیت با یک روش هوشمندانه چرخش بهتر می‌شوند و یک فاز تمرکز قوی را ایجاد می‌کنند. گروه دیگر با حرکت میان نقاط خوب نواحی کنار آنها را کشف می‌کنند و گروه آخر با انتخاب تصادفی منطقه نقاط تنوع تصادفی را انتخاب می‌کنند. کسی که این الگوریتم را استفاده می‌کند، می‌تواند از یک یا دو نقطه دلخواه نیز استفاده کند [۱۵].

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب<sup>۱۲</sup> که توسط اسرینیباس ابداع شده است، یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های فراکاوشی برای حل مسایل بهینه‌سازی چند هدفه است.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا مهاجرت پرندگان<sup>۱۳</sup> یک الگوریتم جستجوی اجتماعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان الهام گرفته شده است. در ابتدا الگوریتم برای کشف الگوهای حاکم بر پرواز همزمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آنها و تغییر شکل بهینه دسته به کار گرفته شد. در این الگوریتم ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو، تحت تاثیر تجربه و دانش خود و همسایگانشان است، بنابراین موقعیت توده ذرات دیگر، بر روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه مدلسازی این رفتار اجتماعی، فرآیند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به دست آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند.

اساس کار الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای

اما پاسخی با دقت کافی در زمانی معقول برای حل مساله ارایه می‌دهد. روش‌های تقریبی خود به دو دسته الگوریتم‌های کاوشی<sup>۸</sup> و فراکاوشی<sup>۹</sup> تقسیم می‌شوند.

کاوش یک استراتژی به دست آمده از حل مسایل مشابه است که به آسانی در دسترس بوده، قابل اجراست و از اطلاعات به دست آمده از حل مسایل مربوط به انسان، ماشین‌آلات یا مسایل انتزاعی نشات می‌گیرد. الگوریتم‌های کاوشی برای هر مساله به صورت جداگانه ارایه می‌شوند. به عبارت دیگر با توجه به مساله موجود برای آن یک یا چند روش کاوشی ارایه می‌شود. برای مثال برای حل مساله معروف فروشنده دوره‌گرد<sup>۱۰</sup> راه‌حل جستجوی همسایگی<sup>۱۱</sup> ارایه شده است. اگر برای حل این مثال با روش قطعی برای ۲۰ شهر یک ساعت وقت لازم باشد، برای ۲۲ شهر ۱۷،۵ روز و برای ۲۵ شهر چیزی بیش از ۷ قرن وقت لازم است. این مدت زمان برای حل مسایل مشابه چندان معقول نیست، از اینرو برای حل این‌گونه مسایل از روش‌های کاوشی و فراکاوشی استفاده می‌شود.

الگوریتم‌های کاوشی برای حل مسایل بسیار حریص هستند و این بزرگ‌ترین عیب این‌گونه الگوریتم‌ها است. به طوری که این الگوریتم‌ها در بسیاری از مواقع در بهینه‌های محلی در دام می‌افتند، اما الگوریتم‌های فراکاوشی وابسته به مساله نبوده و به اندازه الگوریتم‌های کاوشی حریص نیستند. هرچند ممکن است به صورت موقت پاسخ مساله بدتر شود، اما با این عمل باعث جست‌وجوی کامل فضای پاسخ می‌شوند. همچنین الگوریتم‌های فراکاوشی مکانیزمی مانند جهش برای فرار از بهینه‌های محلی دارند.

در سال‌های گذشته محققان الگوریتم‌های بسیاری را استفاده کرده‌اند. در هر یک از آن الگوریتم‌ها نویسندگان به نحوی هوشمندانه از فاز جست‌وجو بهره برده‌اند. تعامل میان فازهای جست‌وجو، هدف اصلی الگوریتم‌های فراکاوشی است. روش‌های کاوشی، اکتشاف خاصی بر فازهای مربوط به روش‌های فراکاوشی نداشته و فقط به صورت تصادفی این فازها را در روش خود دنبال می‌کنند، بدون اینکه یک برنامه حساب شده و هوشمندانه را پیش بگیرند. برای مثال الگوریتم ژنتیک از عمل جهش برای تمرکز و از تقاطع برای تنوع در جست‌وجو استفاده می‌کند، اما به صورت کور این عمل را انجام می‌دهد. در الگوریتم‌های فراکاوشی جدید این رویکرد کاملاً متفاوت است. به طور مثال در الگوریتم رقابت استعماری هدف از تشکیل امپراطوری‌های جدید به وجود آوردن تنوع مناسب



که از یک فرآیند موجود در طبیعت الهام گرفته شده است. رفتار این نوع مرغابی به گونه‌ای است که به محض رسیدن و پیدا کردن یک منبع غذایی خوب و مناسب، سر خود را زیر آب کرده و تمامی بدن خود را مانند یک پرگار با مرکزیت منقار مرغابی، می‌چرخاند. به گونه‌ای که یک دایره متحرک با مرکز رونده و متحرک شکل می‌گیرد. این دایره هم حرکت وضعی و هم حرکت انتقالی دارد. به محض به وجود آمدن این دایره فرضی توسط این مرغابی، یعنی هنگامی که یک کشتل در حال جستجو و چرخیدن در آب با مرکزیت منقار خود است، کشتل‌های اطراف که به آن نزدیکتر هستند، یک به یک به این کشتل مورد نظر که زودتر از همه منبع غذا را پیدا کرده است، نزدیک شده و به دور آن و هم‌جهت با آن می‌چرخند. به گونه‌ای که اولین کشتل در مرکز قرار می‌گیرد و سایر، در اطراف آن در حال چرخیدن در یک جهت موافق هستند. این دایره فرضی نیز مطابق با حرکت کشتلی که در وسط دایره قرار دارد، هم حرکت چرخشی وضعی و هم حرکت چرخشی انتقالی دارد.

این حرکت دسته جمعی، همانند شکل ۱ پیرامون منبع غذایی همواره به سمت منبع بیشتر و بهتر غذا، در حال مصرف و چرخش ادامه دارد تا جایی که منبع غذایی دیگری در آن منطقه باقی نماند. در این حالت کشتل‌ها متفرق می‌شوند.



شکل ۱: حرکت دسته جمعی چرخشی کشتل‌ها به دور غذا [۱۸]

### ۳-۱- ماهیت و ساختار الگوریتم کشتل

همانند دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی، الگوریتم کشتل، دو قسمت مهم و اصلی شامل تمرکز<sup>۱۹</sup> و تنوع<sup>۲۰</sup> دارد. این دو قسمت به ترتیب به نام‌های استخراج و اکتشاف نیز نامیده

جستجو، با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگانش وجود دارد، تنظیم می‌کند [۱۷، ۱۶].

الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور<sup>۱۴</sup> که توسط کارابوگا ابداع شده نیز مانند الگوریتم‌های رقابت استعماری و کشتل است. داشتن سه جنس مختلف برای زنبورها و تشکیل کلونی‌های مختلف مانند امپراطوری، باعث استفاده از فاز تنوع شده و یک روش هوشمندانه را خلق کرده است.

در الگوریتم کرم شب تاب<sup>۱۵</sup> که توسط یانگ ابداع شده است، نزدیک شدن کرم‌ها با ایجاد نور و جذب یکدیگر به سمت مناطق بهتر باعث ایجاد روشی هوشمندانه در فاز تمرکز در جست‌وجو است. همچنین برای تمامی الگوریتم‌ها ایجاد یک تعامل در جست‌وجو و تعیین مولفه‌های مناسب یک پیشنهاد خوب است [۱۵].

در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته، اغلب محدودیت‌ها (مانند محدودیت شیب معدن) و عدم قطعیت‌ها (مانند عدم قطعیت قیمت و عیار) بررسی نشده است. از اینرو محققان به دنبال روش‌ها یا الگوریتم‌های انعطاف‌پذیری هستند که بتوانند تمامی محدودیت‌ها را دخیل کرده و متغیرهای احتمالی که در آینده اضافه یا کم می‌شوند را بتوانند با سهولت اعمال کنند. مطابق آنچه در پیشینه تحقیق بیان شد تاکنون مساله تعیین محدوده نهایی معادن با استفاده از الگوریتم کشتل حل نشده است. از اینرو پژوهش پیش‌رو، ایده تعیین محدوده نهایی بهینه به وسیله الگوریتم کشتل و اعتبارسنجی آن با نرم‌افزار NPV Scheduler را ارائه می‌کند.

### ۳-۲- کشتل<sup>۱۶</sup> و الگوریتم آن [۱۸]

کشتل نام محلی در مازندران است. این اسم از خانواده نوعی غازسانان برداشته شده است که به این محل از مازندران مهاجرت می‌کنند. نام علمی این مرغابی آناس کلاپیپتا<sup>۱۷</sup> است که در امریکای شمالی به نورثرن شاولر<sup>۱۸</sup> به معنی "پارو زنده شمالی" نامیده می‌شود. کلمه پارو زنده به دلیل شکل منقار این مرغابی و شمالی به دلیل اینکه این پرنده در نواحی شمال زمین به ویژه اوراسیا (اروپا-آسیا) زندگی می‌کند و در فصل زمستان به نواحی جنوبی قطب شمال از جمله امریکای شمالی، اروپا، جنوب روسیه و جنوب دریای مازندران مهاجرت می‌کند. الگوریتم کشتل از رفتار تغذیه این نوع مرغابی در برکه بهره می‌گیرد. الگوریتم کشتل یک الگوریتم فراکاوشی جدید است

مطرح کردن کشتل و غذا از یک طرف و جواب در فضای حل از سوی دیگر، به طور هم‌زمان هر دو محیط توضیح داده شود.

### ۳-۲-۱- ایجاد جواب اولیه (فرود کشتل در برکه)

الگوریتم کشتل برای مسایل بهینه‌سازی پیوسته و گسسته کاربرد دارد. تابع هدف با  $F(\vec{x})$  نشان داده می‌شود که  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$  است. فضای جواب موجه  $\psi = \prod_{j=1}^{j=n} [L_j, U_j]$  است که  $L$  و  $U$  به ترتیب حدود بالا و پایین ناحیه جواب هستند [۱۸].

در ابتدا، باید جواب‌های اولیه، در فضای حل ایجاد شود. هر کشتل، معادل هر جواب، به دلیل منحصر به فرد بودن موقعیت جغرافیایی هر دو است، بنابراین از این پس این دو کلمه معادل هم هستند. نسل اولیه با تولید  $M$  کشتل (جواب) شروع می‌شود. این  $M$  جواب را به سه قسمت  $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_3$  تقسیم می‌کنیم به طوری که  $M=M_1+M_2+M_3$  باشد. هر جواب به صورت ماتریس یا بردار، مانند کروموزوم در الگوریتم ژنتیک، بسته به نوع مساله نشان داده می‌شود. هر جواب دارای  $n$  بُعد یا متغیر در فضای حل است، بنابراین (رابطه ۱):

$$\vec{x}_i^g = (x_{i,1}^g, x_{i,2}^g, \dots, x_{i,n}^g) \quad (1)$$

$M$  نشان‌دهنده تعداد جواب برای  $i=1, \dots, M$  است، به طوری که  $g=0, 1, \dots, g_{\max}$  نشان‌دهنده تکرار فعلی الگوریتم و  $g_{\max}$  نشان‌دهنده بیشینه تعداد تکرارهای الگوریتم است. ایجاد جواب اولیه با توزیع یکنواخت تصادفی برای پوشش کل فضای حل انجام می‌شود، بنابراین زامین بُعد جواب  $i$  به صورت رابطه ۲ ایجاد می‌شود [۳].

$$x_{i,j} = L_j + \text{Uniform}(0,1) \times (U_j - L_j) \quad (2)$$

### ۳-۲-۳- عملگر ماندگاری<sup>۲۶</sup> (K) حفظ و بهبود $M_1$ جواب بهتر

در این گام، تعداد  $M_1$  جواب که تابع هدف بهتری نسبت به بقیه جواب‌ها دارند، انتخاب می‌شود. تنظیم پارامترها از نکات مهم و قابل توجه هر الگوریتم فراکاوشی است که باید متناسب با نوع مساله انجام شود، بنابراین مقدار  $M_1$  باید با توجه به مساله و توسط کاربر تعریف شود.

به صورت موازی، در برکه به کشتل‌هایی که غذای بهتری پیدا کرده‌اند، کشتل‌های خوش‌شانس می‌گوییم که معادل  $M_1$  جواب بهتر است. در حقیقت مکانی که کشتل‌های خوش‌شانس

می‌شوند. تمرکز یا استخراج به معنی جستجوی محلی<sup>۲۱</sup> پیرامون نواحی‌ای که به صورت بالقوه انتظار می‌رود تا در آنجا جواب بهینه سراسری<sup>۲۲</sup> وجود داشته باشد، است. این عمل با تغییر اندکی در مشخصات یک جواب بالقوه، مانند عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک، انجام می‌شود.

در الگوریتم کشتل، بخش استخراج که وظیفه جستجوی محلی را به عهده دارد، استخراج همان جذب شدن کشتل‌های اطراف کشتلی که در ابتدا غذا را پیدا می‌کند که کشتل خوش‌شانس نامیده می‌شود. نکته مهمی که در این الگوریتم وجود دارد، این است که برخلاف اکثر الگوریتم‌های موجود، به جای اینکه جواب بالقوه را حرکت دهیم، با استفاده از جواب‌های همسایه، به ویژه جوابی که به جواب بالقوه از همه نزدیکتر است، ناحیه بالقوه را به طور دقیق بررسی می‌کند (پارو<sup>۲۳</sup> می‌زند). رویکرد نوین دیگر این الگوریتم که در این قسمت انجام می‌شود، حرکت به سمت جواب‌های بهتر در جستجوی محلی است. کشتل یا همان جواب (چون موقعیت کشتل در اینجا همان موقعیت غذا می‌شود و همان‌طور که در قبل نیز اشاره شد، منحصر بفرود است و به عنوان یک موقعیت منحصر بفرود جغرافیایی است) بالقوه به همراه همسایگانش تا جایی این حرکت به سمت جواب بهتر را ادامه می‌دهند که دیگر هیچ غذا یا جوابی در آن ناحیه وجود نداشته باشد.

عملیات استخراج به برخی از کشتل‌ها اجازه می‌دهد تا برکه را ترک کرده و به برکه‌های اطراف پرواز کند و در مقابل به کشتل‌های دیگر نیز اجازه فرود<sup>۲۴</sup> در این برکه موجود را می‌دهد. این عمل به تولید جواب‌های جدید در تکرار الگوریتم منجر می‌شود. به طور موازی نیز، به بقیه کشتل‌های موجود در هر تکرار نیز اجازه جابه‌جایی در فضای برکه را می‌دهد. کشتل‌ها در برکه بسیار متحرک بوده و همواره در حال جابه‌جایی هستند. یعنی خصوصیت رفتاری این پرنده در جستجوی غذا در برکه به نوعی حریصانه<sup>۲۵</sup> است. این رفتار، در مشاهداتی که صورت گرفته است، کاملاً مشهود است و پیش‌بینی می‌شود با اینگونه رفتار جستجوی حریصانه و الگوریتمی که از رفتار این پرنده اقتباس شده است، الگوریتمی مناسب و کاربردی در مسایل بهینه‌سازی مختلف باشد.

### ۳-۲-۳- گام‌ها و عملگرها در الگوریتم

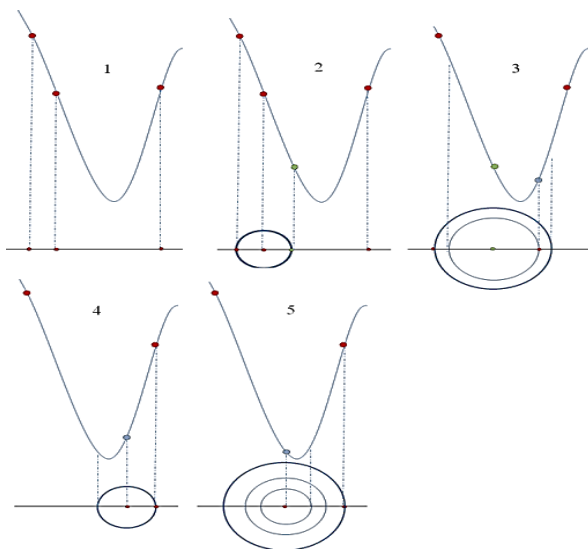
عملگرها و پارامترهای توسعه داده شده در الگوریتم یاد شده در بخش‌های پیش رو آمده است. سعی شده است تا با همزمانی توضیحات در فضای حل و فضای برکه و همچنین با

در آن حضور دارند و غذای خوب را در آنجا پیدا کرده‌اند، به عنوان موقعیت جواب در نظر گرفته می‌شود [۳].

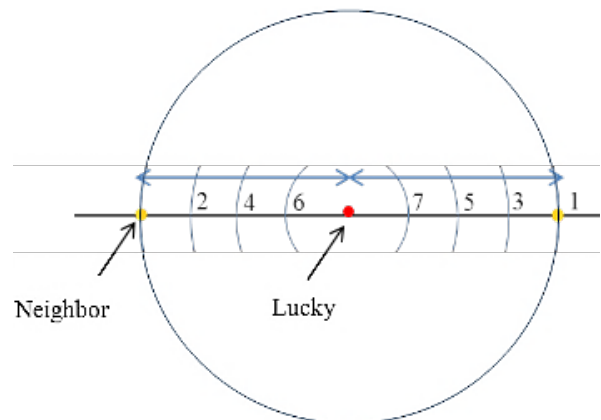
### ۳-۴- چرخش ۲۷

به  $M_1$  جواب بهتر که در مرحله قبلی شناسایی شده‌اند، اجازه می‌دهیم تا در اطراف خود بیشتر جست‌وجو کنند. این مرحله، همان بخش تمرکز یا استخراج و یا همان جست‌وجوی محلی در برخی الگوریتم‌های فراکاوشی است. برای هر یک از این  $M_1$  جواب (کشتل‌های خوش‌شانس)، فرآیند پیش رو را در نظر می‌گیریم. در برکه، کشتل‌ها زمانی که متوجه شوند یک کشتل که در نزدیکی آنها است غذایی یافته است، سمت آن نزدیک می‌شوند. این نزدیک شدن با یک حالت چرخشی رخ می‌دهد. نحوه نزدیک شدن و چرخش در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۸].

یافت نشد، شعاع چرخش را کم کرده و دوباره به دور جواب بهتر با حرکت چرخشی می‌چرخد. این فرآیند چرخش و جذب (کم کردن شعاع چرخش)، با توجه به تعریف کاربر ادامه پیدا می‌کند. به طور مثال اگر بعد از سه چرخش، جواب بهتری نسبت به جواب بهتر اولیه که در مرکز این دایره قرار دارد، یافت نشد، این فرآیند متوقف می‌شود و تمامی این فرآیند برای یکی دیگر از  $M_1$  جواب بهتر تکرار می‌شود تا جایی که اطراف همه  $M_1$  جواب بررسی شود. حال به  $M_1$  جواب بهتر جدید دست پیدا کرده‌ایم. یعنی در جستجوی محل، هرگاه در نزدیکی هر یک از  $M_1$  جواب اولیه، با توجه به تعریف کاربر پیرامون نحوه چرخش و تعداد چرخش، جواب بهتری بیابیم، آن را جایگزین جواب بهتر اولیه می‌کنیم. شکل ۳ این فرآیند را در یک فضای یک بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۳: فرآیند چرخش در یک فضای یک بعدی [۱۸]



شکل ۲: ترتیب نقاطی که در اثر چرخش نقطه همسایه به وجود می‌آید [۱۸]

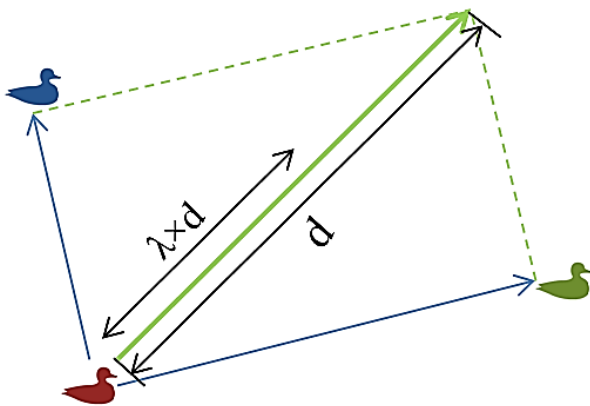
در این شکل اگر تعداد بیشینه چرخش در صورت نرسیدن به جواب را  $S_{max}=3$  تعریف کنیم، تعداد  $(2 \times S_{max} - 1 = 5)$  جواب همسایه جدید می‌توان تعریف کرد. همچنین شکل ۴ همین فرآیند را در فضای دوبعدی نشان می‌دهد. البته می‌توان در همین فضای دوبعدی، نحوه چرخش و یافتن همسایگان را به طور دیگری نیز تعریف کرد. از خصوصیات ویژه این مرحله این است که با توجه به اینکه منطق جذب و چرخش، به یک جستجوی مناسب و هدفمند محلی منجر می‌شود، اما در عین حال به کاربر این امکان را می‌دهد تا انواع ایده‌ها و روش‌های

با شبیه‌سازی این رفتار، زمانی که یک جواب تابع هدف بهتری دارد (جزو  $M_1$  جواب بهتر است)، نزدیک‌ترین همسایه‌اش را به سوی آن به طور چرخشی جذب می‌کنیم. این نوع از حرکت، به طور مثال در فضای دو بعدی، این امکان را می‌دهد که جواب همسایه که ابتدا در طرف چپ جواب بهتر قرار دارد، بسته به ابعاد مساله و ایده کاربر، می‌تواند به وسیله حرکت چرخشی، سمت راست، بالا و یا پایین و یا همه آنها را جستجو کند. اگر در این نقاط جدید جواب بهتری یافت شد، جواب جدید به عنوان جواب بهتر تلقی شده و با نزدیک‌ترین همسایه‌اش این فرآیند تکرار می‌شود، اما اگر جواب بهتری

۳-۶- عملگر جابه‌جایی<sup>۲۹</sup> (M)

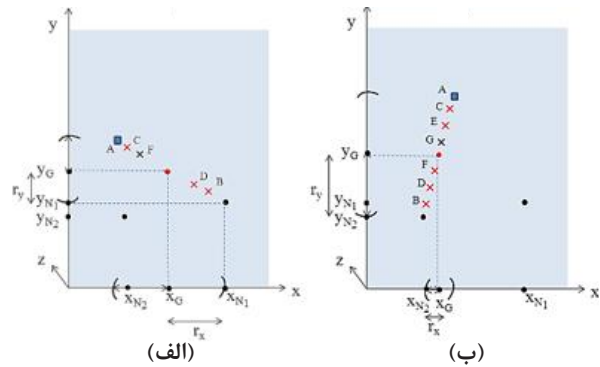
کشتل‌ها در برکه به قایق‌های موتوری معروف هستند. آنها هر لحظه به دنبال غذا می‌گردند. همین خاصیت حریصانه جستجو باعث شده تا از رفتار تغذیه آنها در بهینه‌سازی استفاده و شبیه‌سازی شود. تعداد  $M_3$  جواب باقیمانده را در فضای حل جابه‌جا می‌کنیم تا مطمئن شویم که این مرحله به همراه مرحله قبلی که تولید جواب‌های تصادفی در فضای حل است، ماموریت اکتشاف را به خوبی انجام می‌دهند. البته سهم هر کدام را کاربر در تنظیم پارامترها و متناسب با نوع مساله مشخص می‌کند.

وقتی کشتل‌ها در برکه به دنبال منبع غذایی حرکت می‌کنند (اکتشاف)، با در نظر گرفتن موقعیت مکانی همسایگان خود، نه صرفاً نزدیکترین همسایه، به سمت فضای خالی بین آنها حرکت می‌کنند. به عبارتی دیگر، اگر در هر زمان بر روی یک محوطه از برکه خیره شویم، دیری نخواهد گذشت که در آن منطقه خالی، یک کشتل وارد خواهد شد. در شکل ۵ ورود یک کشتل به فضای بین کشتل‌های دیگر در فضای دوبعدی نشان داده شده است. البته این حرکت می‌تواند به وسیله کاربر الگوریتم به گونه‌ای دیگر نیز، متناسب با نوع مساله مورد مطالعه، تعریف شود. در این حرکت از پارامتر  $\lambda$  که از توزیع یکنواخت بین فاصله صفر و یک است، بهره گرفته می‌شود. تصادفی بودن مقدار  $\lambda$  به دلیل لزوم تصادفی بودن ماهیت حرکات در الگوریتم‌های فراکاوشی است.



شکل ۵: حرکت یک کشتل به سمت فضای خالی اطرافش،  $\lambda \sim U[0,1]$  [۱۸]

چرخش را متناسب با مساله خود تعریف و پیاده‌سازی کند که از نقاط قوت این الگوریتم به حساب می‌آید.



شکل ۴: فرآیند چرخش در یک فضای دو بعدی [۱۸]

برای پیدا کردن نزدیک‌ترین جواب به جواب بهتر در فضای  $J$  بعدی نیز می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$d_i = \left( \sum_{j \in J} (Keshtel_j^{lucky} - Keshtel_j)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

$M_1$  جواب بهتر به وسیله فرآیند زیر که حاصل چرخش است، در صورت امکان بهبود می‌یابند:

for  $i=1$  to  $M_1$  do

$S=1$

While  $S < S_{max}$

$$y = Swirl(x_i^g) \quad (4)$$

if  $f(y) \leq f(x_i^g)$

$$x_i^g \leftarrow y$$

$$S = 1$$

else

۳-۵- عملگر جایگزینی<sup>۲۸</sup> (R)

تعداد  $M_2$  جواب تصادفی تولید شده جدید، به صورت زیر جایگزین تعداد  $M_2$  تا از جواب در هر تکرار از الگوریتم می‌شوند:

for  $i=1$  to  $M_2$  do

for  $j=1$  to  $n$  do

$$x_{i,j}^g = L_j + Uniform(0,1) \times (U_j - L_j) \quad (5)$$

end

end

#### ۴- پیاده‌سازی الگوریتم کشتل در مساله تعیین محدوده نهایی دو بعدی

مساله تعیین محدوده نهایی بعد از تشکیل مدل بلوکی و مشخص شدن ارزش هر بلوک مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۶ ارزش بلوک‌های فرضی در موقعیت‌های مختلف از مدل بلوکی به صورت یک ماتریس  $10 \times 4$  آورده شده است.

بعد از انتخاب مدل بلوکی به پیاده‌سازی الگوریتم کشتل در مساله تعیین محدوده نهایی دو بعدی پرداخته می‌شود.

الف- ایجاد جواب‌های اولیه

تعدادی کشتل به عنوان جمعیت اولیه برای حل مساله الگوریتم کشتل انتخاب می‌شوند. هر یک از کشتل‌ها به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته می‌شوند (هر کشتل یک کاواک را تشکیل خواهد داد). تعداد جمعیت اولیه، بر اساس ارزش خود به کشتل‌های خوش‌شانس<sup>۳۰</sup> و کشتل‌های بدشانس<sup>۳۱</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل ۷ موقعیت کشتل‌ها بر روی بلوک‌ها نشان داده شده است. موقعیت کشتل‌ها با رنگ زرد مشخص شده است.

ارزش کشتل‌ها بر اساس موقعیت خود در جدول ۱ آورده شده است. هر کشتل نشان‌دهنده یک کاواک است که برای استخراج هر بلوک زیرین باید بلوک‌های بالاسری (داخل کاواک) آن را نیز استخراج کنند. ارزش هر کشتل مجموعی از بلوک‌های داخل کاواک است.

اما همان‌طور که بیان شد، الگوریتم‌های فراکاوشی ضمن اینکه در جست‌وجو ماهیت تصادفی دارند، حتما باید منطق جست‌وجو، به ویژه در بخش‌های اکتشاف و استخراج داشته باشند که به مزیت‌های آن هم در بخش مربوطه اشاره شد. در نوشتار زیر، نوع دیگری از جابه‌جایی جواب‌ها نشان داده شده است:

$$\begin{aligned} & \text{for } i=1 \text{ to } M_3 \text{ do} \\ & \lambda_1 \leftarrow \text{Uniform}(0,1) \\ & \lambda_2 \leftarrow \text{Uniform}(0,1) \\ & v_i^g = \lambda_1 \times x_{r_1}^g + (1 - \lambda_1) \times x_{r_2}^g \\ & x_i^g = \lambda_2 \times x_i^g + (1 - \lambda_2) \times v_i^g \\ & \text{end} \end{aligned} \quad (۶)$$

#### ۳-۷- شرط توقف

معیار توقف در الگوریتم‌های کاوشی متفاوت است. کاربر می‌تواند متناسب با نوع مساله، این معیار یا معیارها را معرفی کند. معیارها می‌توانند تعداد تکرار، کیفیت بهترین جواب و یا زمان صرف شده باشند. البته می‌توان ترکیبی از آنها را با عملگرهای "و" و "یا" به همراه ایده‌های جدید استفاده کرد. در بعضی مواقع نیز نیاز است تا پارامترهای معیار توقف، تنظیم شود که البته امری نادر در مقالات است. در این پژوهش شرط توقف الگوریتم کشتل برای حل مساله تعیین محدوده نهایی تعداد تکرار و محاسبه زمان حل مساله در رسیدن به همگرایی است [۱۸].

-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	-2
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1
1	2	-3	10	-3	-2	-10	-2	-1	-2
-1	1	-3	4	10	10	6	-1	2	-1

شکل ۶: ارزش‌های بلوک‌ها در موقعیت‌های مختلف از مدل بلوکی (واحد پول) [۱۹]

1	5	9	13	17	21	25	29	33	37
2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
3	7	11	15	19	23	27	31	35	39
4	8	12	16	20	24	28	32	36	40

-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	-2
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1
1	2	-3	10	-3	-2	-10	-2	-1	-2
-1	1	-3	4	10	10	6	-1	2	-1

شکل ۷: موقعیت تصادفی کشتل‌ها بر روی مدل بلوکی به عنوان جواب اولیه

$$\text{UnLocky KeshtelPositionin after Swirl}^{38} = \frac{\text{Best Keshtel Position}^{39} - \text{UnLockyKeshtel old Position}}{3} + \text{UnLockyKeshtel old Position}^{40}$$

د- جابه‌جایی<sup>۳۵</sup>

گام جابه‌جایی برای عبور از جواب بهینه محلی کاربرد دارد. در گام جابه‌جایی ۴ عدد کشتل بدشانس در فضای مدل بلوکی به صورت تصادفی جابه‌جا می‌شوند. به عبارتی هر کشتل از فضای بلوک‌های اولیه به صورت تصادفی بلوکی را انتخاب می‌کند و اگر جوابی بهتر از کشتل خوش‌شانس پیدا کنند، جایگزین آن خواهند شد و در این گام مرتب‌سازی نهایی ارزش کشتل‌ها انجام می‌گردد. در شکل ۹ موقعیت تصادفی کشتل‌ها در مرحله جابه‌جایی آورده شده است (در شکل ۹ رنگ زرد نشان‌دهنده موقعیت تصادفی است).

در جدول ۲ ارزش کشتل‌ها بعد از مرحله جابه‌جایی آورده شده است.

جدول ۲: ارزش کشتل‌ها در گام جابه‌جایی

موقعیت بعد از جابه‌جایی		موقعیت بعد از ۳ بار چرخش	
ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک	ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک
۵۰	۲۰	۵۰	۲۰
۴۲	۱۶	۴۲	۱۶
۱۶	۱۰	۴۲	۱۶
۶	۱۷	۱۴	۲۳
۲۶	۲۴	۱۴	۲۲
-۳	۳۱	-۴	۲۱

به دلیل اینکه جوابی بهتر از قبل حاصل نشده است، در این گام موقعیت کشتل‌های خوش‌شانس تغییر نمی‌کند. در

جدول ۱: ارزش کشتل‌ها در موقعیت تصادفی

ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک	ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک
۲۶	۲۴	۱۶	۱۰
-۱	۲۶	۴۲	۱۶
۴	۳۳	۱۴	۲۲

ب- ماندگاری<sup>۳۲</sup>

در این گام کشتل‌های خوش‌شانس در موقعیت خودشان ثابت می‌مانند (کشتل‌هایی که بر اساس ارزش خود مرتب شده‌اند). ۲ عدد از بهترین آن‌ها، موقعیت خودشان را حفظ می‌کنند. این کشتل‌ها در موقعیت ۱۶ و ۲۴ قرار دارند. کشتل سوم تا ششم می‌توانند در مرحله چرخش حرکت کنند.

پ- چرخش<sup>۳۳</sup>

در مرحله چرخش، کشتل‌های بدشانس<sup>۳۴</sup> که در این مثال ۴ عدد کشتل هستند، می‌توانند با فرآیندی که توضیح داده می‌شود دور کشتل‌های خوش‌شانس چرخش کنند. برای مثال کشتل در موقعیت ۲۶ نسبت به کشتل ۱۶، ده بلوک فاصله دارد. از عدد ۱۶ موقعیت آن کسر می‌گردد و یک سوم عدد روند آن به ۲۶ اضافه می‌گردد (عدد یک سوم توسط کاربر انتخاب می‌گردد). حال کشتل بدشانس از موقعیت ۲۶ به موقعیت ۲۳ خواهد رسید. ارزش این کشتل بدشانس در موقعیت جدید برابر با ۱۴ واحد خواهد بود. کشتل در چرخش اول عددی کمتر از ۲۶ واحد دارد.

در شکل ۸ موقعیت کشتل‌ها در مرحله چرخش اول آورده شده است. رنگ سبز در چرخش اول نشان‌دهنده موقعیت کشتل‌های بدشانس است. در تمامی چرخش‌ها موقعیت بعدی کشتل‌ها با فلش مشخص شده است. رابطه ۷ نشان‌دهنده این مرحله از الگوریتم است:

چرخش اول										
شماره بلوک‌ها (موقعیت کشتل‌ها با رنگ زرد آورده شده است)										
1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	
2	6	10	14	18	22	26	30	34	38	
3	7	11	15	19	23	27	31	35	39	
4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	
ارزش بلوک‌ها										
-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	-2	
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1	
1	2	-3	10	-3	-2	-10	-2	-1	-2	
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1	

شکل ۸: کشتل‌ها در موقعیت‌های جدید در چرخش اول (رنگ قرمز کشتل خوش‌شانس است).

تکرار لازم برای حل مساله می‌تواند توسط کاربر نیز تعریف شود. نتایج آن توسط کاربر بررسی می‌شود. در شکل ۱۱ جواب نهایی الگوریتم برای ۵۰ تکرار آورده شده است. بعد از نهایی شدن محاسبات و تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم کشتل، محدوده نهایی بهینه در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

شکل ۱۰ جواب تکرار اول آورده شده است. جواب تکرار اول و بلوک‌های آن بعد از این مرحله در الگوریتم ذخیره می‌شود. ه- توقف

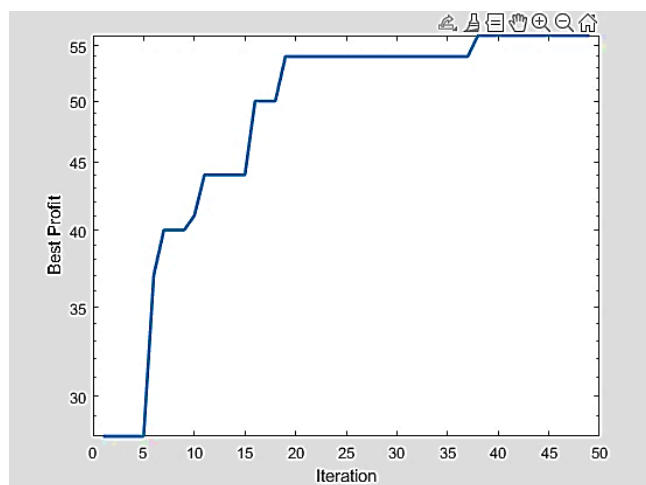
در مساله تعیین محدوده نهایی، شرط توقف رسیدن به پاسخی با بیشترین سود است. اگر بعد از تعدادی تکرار جواب نهایی الگوریتم تغییر نکند، الگوریتم بعد از آن تکرار متوقف می‌شود. در غیر اینصورت الگوریتم تکرار خواهد شد. تعداد

جابجایی									
شماره بلوک‌ها									
1	5	9	13	17	21	25	29	33	37
2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
3	7	11	15	19	23	27	31	35	39
4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
ارزش بلوک‌ها									
-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	-2
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1
1	2	-3	10	-3	-2	-10	-2	-1	-2
-1	1	-3	4	10	10	6	-1	2	-1

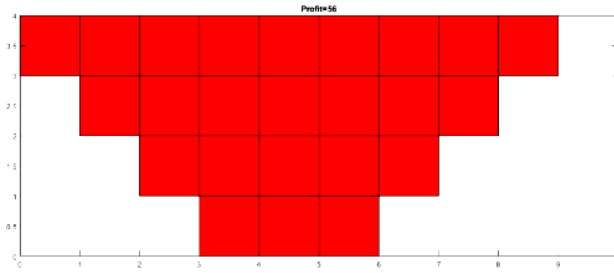
شکل ۹: موقعیت تصادفی کشتل‌های بدشانس در مرحله جابه‌جایی

جابجایی									
شماره بلوک‌ها									
1	5	9	13	17	21	25	29	33	37
2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
3	7	11	15	19	23	27	31	35	39
4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
ارزش بلوک‌ها									
-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	-2
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1
1	2	-3	10	-3	-2	-10	-2	-1	-2
-1	1	-3	4	10	10	6	-1	2	-1

شکل ۱۰: پاسخ حل مساله در مساله تعیین محدوده نهایی بعد از تکرار اول



شکل ۱۱: پاسخ حل مساله با ۵۰ تکرار برای تعیین محدوده نهایی بهینه (دو بعدی)



شکل ۱۲: نتیجه حل مساله تعیین محدوده نهایی بهینه با استفاده از الگوریتم کشتل

-2	-2	-2	5	14	8	-2	1	پله اول
-2	-2	9	-2	6	12	-2	-2	
3	10	10	5	-2	-2	-2	-2	
-2	-2	9	1	-2	-2	5	1	
-2	-2	-2	-2	-2	13	-2	-2	
-2	-2	8	-2	7	-2	-2	-2	
-2	-2	7	-2	-2	9	-2	-2	
4	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	
-2	-2	-2	14	9	3	-2	3	پله دوم
-2	-2	11	-2	14	9	-2	-2	
1	11	9	5	-2	-2	-2	-2	
-2	-2	5	2	-2	-2	5	7	
-2	-2	-2	-2	-2	7	-2	-2	
-2	-2	8	-2	8	-2	-2	-2	
-2	-2	8	-2	-2	7	-2	-2	
3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	
-2	-2	-2	12	5	7	-2	1	پله سوم
-2	-2	9	-2	7	12	-2	-2	
2	6	6	5	-2	-2	-2	-2	
-2	-2	9	5	-2	-2	5	3	
-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2	
-2	-2	9	-2	8	-2	-2	-2	
-2	-2	12	-2	-2	13	-2	-2	
2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	
-2	-2	-2	5	7	5	-2	5	پله چهارم
-2	-2	10	-2	12	11	-2	-2	
3	9	6	5	-2	-2	-2	-2	
-2	-2	9	8	-2	-2	7	3	
-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2	
-2	-2	6	-2	7	-2	-2	-2	
-2	-2	7	-2	-2	8	-2	-2	
1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	

شکل ۱۳: ارزش بلوک‌ها در ۴ پله ۸\*۸ (واحد اعداد=واحد پول)

جدول ۳: ارزش کشتل‌ها در راس کاواک‌های یاد شده در شکل ۱۵

ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک	ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک
۱۲	۱۸۰	۱۰	۲۱۱
۲۰	۱۷۳	۷	۲۱۵
۹	۱۵۰	۶	۲۲۶
۳۹	۱۵۵	۷	۲۳۰
۵۸	۱۶۲	۱۳	۲۳۷

استفاده از الگوریتم کشتل ابتدا تعدادی کشتل به عنوان جواب اولیه انتخاب می‌شوند (شکل ۱۴). در این مثال به صورت فرضی ۱۰ عدد کشتل به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته شده‌اند (انتخاب تعداد کشتل‌ها در قسمت پارامترهای الگوریتم به کاربر بستگی دارد). حال برای استخراج هر یک از بلوک‌های موجود،

### ۵- پیاده‌سازی الگوریتم کشتل در مساله تعیین محدوده نهایی سه بعدی

برای پیاده‌سازی الگوریتم کشتل در تعیین محدوده نهایی سه‌بعدی از یک مدل بلوکی فرضی با ابعاد مشخص استفاده می‌شود. در شکل ۱۳ مدل بلوکی با ابعاد ۸\*۸\*۴ آورده شده است.

مدل سه بعدی به صورت چند ماتریس در ۴ پله به نرم‌افزار متلب وارد می‌شود. از هر ردیف در مرحله دوم از نرم‌افزار متلب از هر ردیف  $(I, J)$  یک عدد کم می‌شود تا یک شیب ۴۵ درجه اولیه برای کل داده‌ها ایجاد شود. در جدول ۳ این محدوده نهایی قابل مشاهده است.

الف- ایجاد جواب اولیه

بعد از ایجاد شیب اولیه برای حل مساله تعیین محدوده نهایی، بلوک‌های داخل محدوده اولیه بهینه‌سازی می‌شوند. با



و این کشتل‌ها در راس کاواک بلوک‌های ۱۶۲، ۱۵۵، ۱۷۳ و ۲۳۷ به عنوان کشتل‌های خوش‌شانس انتخاب می‌شوند و در موقعیت خود باقی می‌مانند.

پ- چرخش

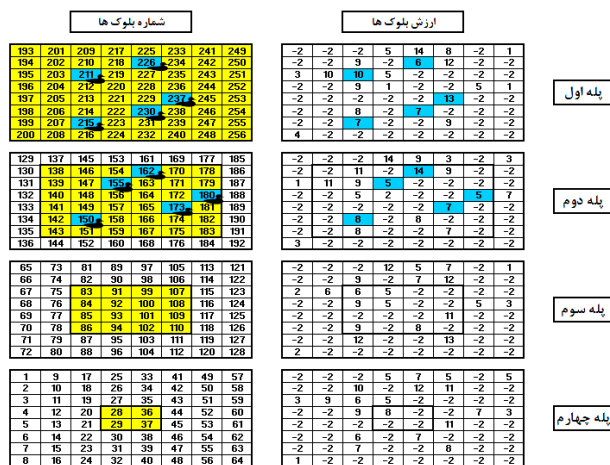
در این مرحله بقیه کشتل‌ها دور کشتل‌های خوش‌شانس چرخش می‌کنند. تعداد چرخش در این گام به عهده کاربر است. در این گام یک بار چرخش استفاده شده است. تعداد چرخش را کاربر می‌تواند تغییر دهد و هر چقدر تعداد چرخش زیادتر باشد، الگوریتم با تکرار کمتری همگرا خواهد شد. در این مثال تعداد ۴ کشتل خوش‌شانس و ۶ کشتل بدشانس موجود است. زمانی که ۴ کشتل خوش‌شانس در موقعیت خود قرار گرفتند. بقیه کشتل‌ها به صورت فرآیند زیر تغییر موقعیت

شیب ۱ به ۹ باید رعایت شود. ارزش بلوک‌های بالاسری جمع می‌شوند و ارزش یک کشتل در راس مخروط به دست می‌آید. در این بخش بلوک‌ها بر اساس ارزش خود مرتب شده‌اند و کشتل‌ها از فضای موجود یک بلوک را به تصادف انتخاب می‌کنند.

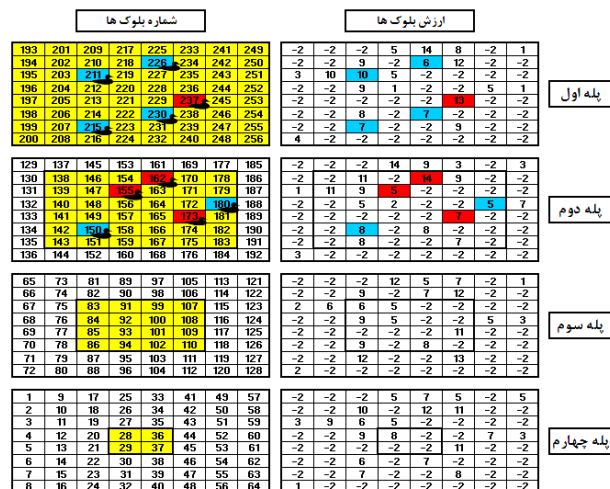
کشتل‌های موجود در راس کاواک‌های یاد شده بر اساس ارزش خود مرتب می‌شوند. ۴ عدد از این کشتل‌ها به عنوان کشتل خوش‌شانس معرفی می‌شوند. در جدول ۴ دو ارزش ده کشتل یاد شده، بر اساس موقعیت تصادفی آورده شده است. در شکل ۱۵ کشتل‌های بدشانس با رنگ آبی و کشتل‌های خوش‌شانس با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

ب- عملگر ماندگاری

در این گام، تعداد کشتل‌های خوش‌شانس  $M1=4$  بوده



شکل ۱۴: موقعیت تصادفی کشتل‌های بر روی مدل بلوکی در گام جواب اولیه



شکل ۱۵: موقعیت تصادفی کشتل‌های خوش‌شانس و بدشانس بر روی مدل بلوکی

خوش‌شانس قبلی مقایسه می‌شوند. کشتل‌هایی که ارزش (سود) بیشتری نسبت به کشتل‌های خوش‌شانس قبلی داشته باشند، جایگزین آن می‌شوند. در این مرحله کشتل‌ها بر اساس ارزش خود مرتب شده و ۴ کشتل اول خوش‌شانس خواهند بود. کشتل‌های شماره ۱۵۴ و ۱۷۴ جایگزین کشتل‌های شماره ۱۷۳ و ۲۳۷ می‌شوند. در شکل ۱۷ موقعیت کشتل‌ها بعد از مرحله جایگزینی آورده شده است. کشتل‌های بدشانس با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. موقعیت دو کشتل خوش‌شانس در شکل ۱۷ تغییر کرده است. با استفاده از روابط ذیل، جایگزینی امکان‌پذیر است:

جدول ۴: ارزش کشتل‌ها در راس کاواک‌های یاد شده بعد از اعمال گام چرخش

موقعیت قبل از چرخش کشتل‌ها		موقعیت بعد از ۳ بار چرخش	
شماره بلوک در راس کاواک	ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک	ارزش کشتل
۱۶۲	۵۸	۱۶۲	۵۸
۱۵۵	۳۹	۱۵۵	۳۹
۱۷۳	۲۰	۱۵۴	۴۱
۲۳۷	۱۳	۱۷۴	۱۵
۱۸۰	۱۲	۱۷۳	۲۰
۲۱۱	۱۰	۲۳۷	۱۳
۲۱۵	۷	۲۰۷	-۲
۱۵۰	۹	۱۹۷	-۲
۲۳۰	۷	۲۰۴	-۲
۲۲۶	۶	۱۹۴	-۲

می‌دهند. در گام بعدی جایگزین کشتل خوش‌شانس خواهند شد.

برای مثال چرخش کشتل بدشانس در موقعیت ۱۵۰ توضیح داده می‌شود. کشتل‌های بدشانس موقعیت بهترین کشتل را در مرحله چرخش انتخاب می‌کند. این کشتل نسبت به کشتل خوش‌شانس در موقعیت ۱۶۲ به تعداد ۱۲ بلوک فاصله دارد. فاصله بین دو کشتل تقسیم بر یک سوم<sup>۳۶</sup> می‌شود. ۴ عدد بلوک به سمت کشتل خوش‌شانس حرکت می‌کند و کشتل به موقعیت ۱۵۴ می‌رسد. ارزش کشتل در موقعیت جدید برابر با ۴۱ واحد است. در نتیجه کشتل جوابی بیشتر از کشتل خوش‌شانس به دست آورده است.

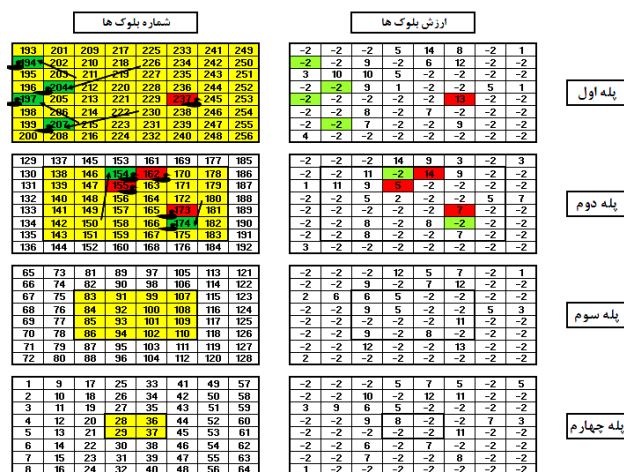
بقیه ۶ کشتل بدشانس در این مرحله همزمان چرخش می‌کنند. در شکل ۱۶ تغییر موقعیت (چرخش) کشتل‌ها نسبت به جواب اولیه آورده شده است. کشتل‌های بدشانس در موقعیت جدید با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. موقعیت کشتل‌های خوش‌شانس در تمامی تصاویر با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

در جدول ۴ ارزش ده کشتل، بر اساس موقعیت تصادفی آنها آورده شده است.

بدین ترتیب کشتل‌های بدشانس در کنار کشتل‌های خوش‌شانس به دنبال غذایی بهتر خواهند بود. در این مثال کشتل‌ها در راس کاواک‌های ۱۵۴ و ۱۷۴ غذایی بهتر از کشتل‌های خوش‌شانس پیدا کرده‌اند.

ج- جایگزینی

در این مرحله، ارزش کشتل‌ها با ارزش کشتل‌های



شکل ۱۶: موقعیت کشتل‌ها بعد از اعمال گام چرخش

اعمال گام جابه‌جایی برای عبور از پاسخ بهینه محلی استفاده می‌شود. بعد از گام جابه‌جایی کشتل‌ها بر اساس ارزش خود مرتب شده و ۴ عدد از آن‌ها به عنوان کشتل خوش‌شانس نهایی انتخاب می‌شوند. کشتل‌ها در موقعیت‌های ۳۶، ۹۲، ۱۶۲ و ۱۵۴ به عنوان کشتل خوش‌شانس بعد از این گام انتخاب می‌شوند.

ذ- شرط توقف

بعد از گام جابه‌جایی یک پارامتری به عنوان بهترین جواب<sup>۴۲</sup> انتخاب می‌شود. تمامی کشتل‌های خوش‌شانس با مولفه‌های خود در این پارامتر ذخیره می‌شوند. جواب تکرار اول به عنوان جواب اولیه برای تکرارهای بعدی در نظر گرفته می‌شود. پاسخ نهایی الگوریتم برابر با مجموع ارزش بلوک‌های استخراجی به وسیله کشتل‌های خوش‌شانس است. در این

$$\text{Keshtel} = \text{SortKeshtel}$$

$$\text{LockyKeshtel} = \text{Keshtel}(1:4)$$

د- جابه‌جایی<sup>۴۱</sup>

در این گام بارزترین کشتل در موقعیت خود ثابت بوده و بقیه کشتل‌ها به صورت تصادفی جابه‌جا می‌شوند. کشتل‌های بدشانس بلوک‌هایی را به تصادف انتخاب می‌کنند. ارزش کشتل‌ها در موقعیت‌های جدید با ارزش کشتل‌های خوش‌شانس مورد مقایسه قرار گرفته، در صورتی که ارزشی بیشتر از آن داشته باشد، جای آن را خواهد گرفت. موقعیت کشتل‌های خوش‌شانس با رنگ قرمز و بدشانس با رنگ آبی روشن نشان داده شده است (شکل ۱۸).

ارزش کشتل‌ها بعد از گام جابه‌جایی به صورت جدول ۵ آورده شده است.

شماره بلوک‌ها										ارزش بلوک‌ها									
193	201	209	217	225	233	241	249	257	265	-2	-2	-2	5	14	8	-2	1		
194	202	210	218	226	234	242	250	258	266	-2	-2	9	-2	6	12	-2	-2		
195	203	211	219	227	235	243	251	259	267	3	10	10	5	-2	-2	-2	-2		
196	204	212	220	228	236	244	252	260	268	-2	-2	9	1	-2	-2	5	1		
197	205	213	221	229	237	245	253	261	269	-2	-2	-2	-2	-2	14	-2	-2		
198	206	214	222	230	238	246	254	262	270	-2	-2	8	-2	7	-2	-2	-2		
199	207	215	223	231	239	247	255	263	271	-2	-2	7	-2	-2	9	-2	-2		
200	208	216	224	232	240	248	256	264	272	4	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		
129	137	145	153	161	169	177	185	193	201	-2	-2	-2	14	9	3	-2	3		
130	138	146	154	162	170	178	186	194	202	-2	-2	11	-2	14	9	-2	-2		
131	139	147	155	163	171	179	187	195	203	1	11	9	5	-2	-2	-2	-2		
132	140	148	156	164	172	180	188	196	204	-2	-2	5	2	-2	-2	5	7		
133	141	149	157	165	173	181	189	197	205	-2	-2	9	5	-2	-2	5	1		
134	142	150	158	166	174	182	190	198	206	-2	-2	8	-2	8	-2	-2	-2		
135	143	151	159	167	175	183	191	199	207	-2	-2	8	-2	-2	7	-2	-2		
136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		
65	73	81	89	97	105	113	121	129	137	-2	-2	-2	12	5	7	-2	1		
66	74	82	90	98	106	114	122	130	138	-2	-2	9	-2	7	12	-2	-2		
67	75	83	91	99	107	115	123	131	139	2	6	6	5	-2	-2	-2	-2		
68	76	84	92	100	108	116	124	132	140	-2	-2	9	5	-2	-2	5	3		
69	77	85	93	101	109	117	125	133	141	-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2		
70	78	86	94	102	110	118	126	134	142	-2	-2	9	-2	8	-2	-2	-2		
71	79	87	95	103	111	119	127	135	143	-2	-2	12	-2	-2	13	-2	-2		
72	80	88	96	104	112	120	128	136	144	2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		
1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	-2	-2	-2	5	7	5	-2	5		
2	10	18	26	34	42	50	58	66	74	-2	-2	10	-2	12	11	-2	-2		
3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	3	7	6	5	-2	-2	-2	-2		
4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	-2	-2	9	8	-2	-2	7	3		
5	13	21	29	37	45	53	61	69	77	-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2		
6	14	22	30	38	46	54	62	70	78	-2	-2	6	-2	7	-2	-2	-2		
7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	-2	-2	7	-2	-2	8	-2	-2		
8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		

شکل ۱۷: موقعیت کشتل‌ها بعد مرحله جایگزینی

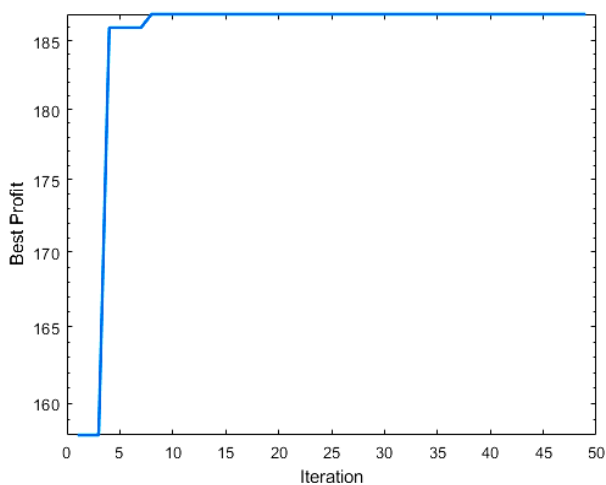
شماره بلوک‌ها										ارزش بلوک‌ها									
193	201	209	217	225	233	241	249	257	265	-2	-2	-2	5	14	8	-2	1		
194	202	210	218	226	234	242	250	258	266	-2	-2	9	-2	6	12	-2	-2		
195	203	211	219	227	235	243	251	259	267	3	10	10	5	-2	-2	-2	-2		
196	204	212	220	228	236	244	252	260	268	-2	-2	9	1	-2	-2	5	1		
197	205	213	221	229	237	245	253	261	269	-2	-2	-2	-2	-2	14	-2	-2		
198	206	214	222	230	238	246	254	262	270	-2	-2	8	-2	7	-2	-2	-2		
199	207	215	223	231	239	247	255	263	271	-2	-2	7	-2	-2	9	-2	-2		
200	208	216	224	232	240	248	256	264	272	4	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		
129	137	145	153	161	169	177	185	193	201	-2	-2	-2	14	9	3	-2	3		
130	138	146	154	162	170	178	186	194	202	-2	-2	11	-2	14	9	-2	-2		
131	139	147	155	163	171	179	187	195	203	1	11	9	5	-2	-2	-2	-2		
132	140	148	156	164	172	180	188	196	204	-2	-2	5	2	-2	-2	5	7		
133	141	149	157	165	173	181	189	197	205	-2	-2	9	5	-2	-2	5	1		
134	142	150	158	166	174	182	190	198	206	-2	-2	8	-2	8	-2	-2	-2		
135	143	151	159	167	175	183	191	199	207	-2	-2	8	-2	-2	7	-2	-2		
136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		
65	73	81	89	97	105	113	121	129	137	-2	-2	-2	12	5	7	-2	1		
66	74	82	90	98	106	114	122	130	138	-2	-2	9	-2	7	12	-2	-2		
67	75	83	91	99	107	115	123	131	139	2	6	6	5	-2	-2	-2	-2		
68	76	84	92	100	108	116	124	132	140	-2	-2	9	5	-2	-2	5	3		
69	77	85	93	101	109	117	125	133	141	-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2		
70	78	86	94	102	110	118	126	134	142	-2	-2	9	-2	8	-2	-2	-2		
71	79	87	95	103	111	119	127	135	143	-2	-2	12	-2	-2	13	-2	-2		
72	80	88	96	104	112	120	128	136	144	2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		
1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	-2	-2	-2	5	7	5	-2	5		
2	10	18	26	34	42	50	58	66	74	-2	-2	10	-2	12	11	-2	-2		
3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	3	7	6	5	-2	-2	-2	-2		
4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	-2	-2	9	8	-2	-2	7	3		
5	13	21	29	37	45	53	61	69	77	-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2		
6	14	22	30	38	46	54	62	70	78	-2	-2	6	-2	7	-2	-2	-2		
7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	-2	-2	7	-2	-2	8	-2	-2		
8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2		

شکل ۱۸: موقعیت کشتل‌ها بعد از مرحله جابه‌جایی

با متوسط عمق ۴۲۶ متر و ۲۰۹۸۳ نمونه عیاری استفاده شده است. هر یک از گمانه‌ها به صورت متوسط ۱۰۵ متر از هم فاصله دارند و شعاع تاثیر هر یک از گمانه‌ها ۶۰ متر در نظر گرفته شده است. به دلیل تعداد زیاد بلوک‌های محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید معدن سونگون، بهتر است برای افزایش سرعت محاسبات در نرم‌افزار Matlab ارزش تعدادی از بلوک‌ها در یک بلوک گنجانده شود. در شکل ۲۴ مدل سه بعدی و در شکل ۲۵ مدل بلوکی معدن مس سونگون آورده شده است.

جدول ۵: ارزش کشتل‌ها در راس کاواک‌های یاد شده بعد از اعمال گام جابه‌جایی

موقعیت اولیه کشتل‌ها		موقعیت بعد از اعمال گام جابه‌جایی	
شماره بلوک در راس کاواک	ارزش کشتل	شماره بلوک در راس کاواک	ارزش کشتل
۱۶۲	۵۸	۱۶۲	۵۸
۱۵۵	۳۹	۱۵۵	۳۹
۱۷۳	۲۰	۱۵۴	۴۱
۲۳۷	۱۳	۱۷۴	۱۵
۱۸۰	۱۲	۳۶	۱۴۲
۲۱۱	۱۰	۹۲	۷۸
۲۱۵	۷	۱۶۴	۵
۱۵۰	۹	۱۵۱	۹
۲۳۰	۷	۱۴۰	۲۰
۲۲۶	۶	۲۲۱	-۲



شکل ۲۰: تعداد ۵۰ تکرار با ۱۵ عدد کشتل برای داده‌ها

مثال جواب تکرار اول برابر با ۱۱۲ واحد است و اگر بعد از تکرار جواب تغییر کند و افزایش یابد دستور توقف الگوریتم دوباره تکرار خواهد شد. با توجه به موارد گفته شده در فصل‌های قبلی، دستور توقف بیشتر به تصمیم کاربر بستگی دارد. در این مثال اگر بعد از تعدادی تکرار جواب نهایی تغییر نکند، دستور توقف صادر می‌شود.

در شکل ۱۹ پاسخ نهایی الگوریتم با ۱۰ کشتل و در شکل ۲۰ با ۱۵ کشتل نشان داده شده است.

برای رسیدن به نتایج بهینه، پاسخ‌دهی الگوریتم را می‌توان بهبود داد. با افزایش تعداد کشتل روند رسیدن به پاسخ نهایی بهبود یافته است. در این مثال بیشتر از ۲۰ کشتل نیز بررسی شده است. پاسخ آن تغییر نیافته و جواب بهینه مساله برابر با ۱۹۱ واحد حاصل شده است.

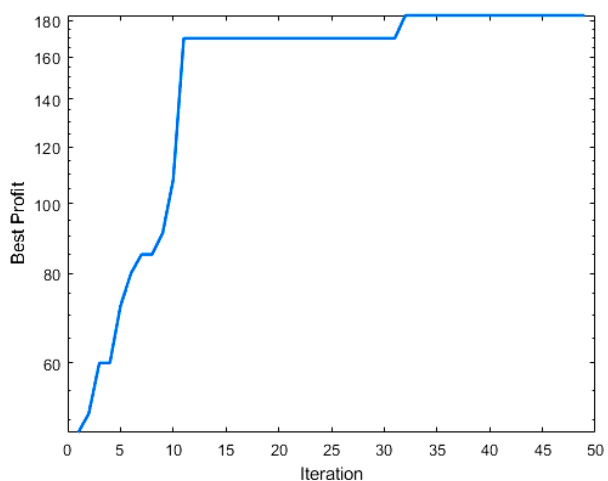
در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به ترتیب نتایج پردازش با الگوریتم کشتل آورده شده است.

در شکل ۲۳ بلوک‌های داخل محدوده نهایی بهینه در مقاطع مختلف مدل بلوکی نشان داده شده است.

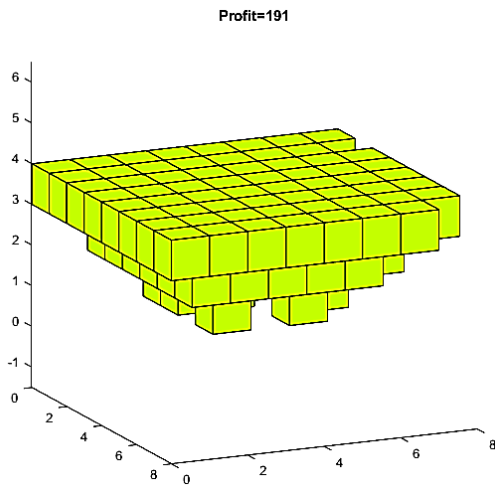
#### ۶- اعتبارسنجی

۶-۱- مقدمه‌ای در مورد مدل‌سازی و بلوک‌بندی عیاری معدن مس سونگون

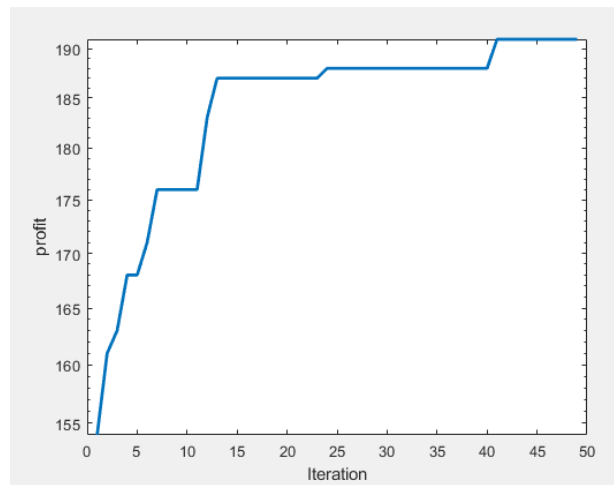
برای مدل‌سازی معدن مس سونگون از تعداد ۱۲۱ گمانه



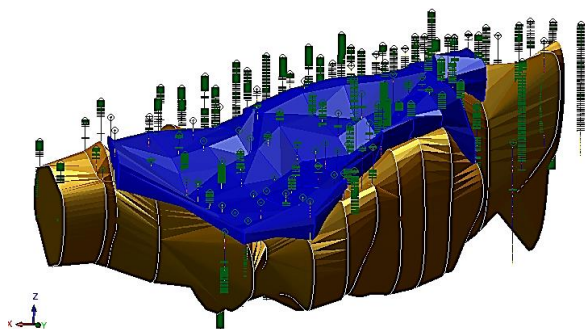
شکل ۱۹: تعداد ۵۰ تکرار با ۱۰ عدد کشتل برای داده‌ها



شکل ۲۲: نمایش بلوک‌های داخل محدوده نهایی با حذف قسمت‌های خارج محدوده نهایی (واحد ارزش پول است).



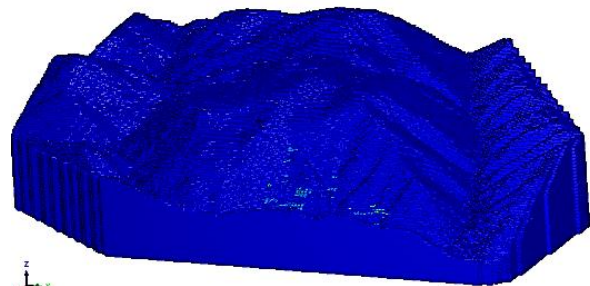
شکل ۲۱: نتیجه الگوریتم کشتل با ۵۰ تکرار برای تعیین محدوده نهایی سه بعدی (با در نظر گرفتن فرآیند بهبود جواب)



شکل ۲۴: مدل سه بعدی معدن مس سونگون (دو زون Superghen, Hypoghen)

شماره بلوک‌های داخل محدوده نهایی بهینه													ارزش بلوک‌ها محدوده نهایی بهینه												
193	201	209	217	225	233	241	249	-2	-2	-2	5	14	8	-2	1										
194	202	210	218	226	234	242	250	-2	-2	9	-2	6	12	-2	-2										
195	203	211	219	227	235	243	251	3	10	10	5	-2	-2	-2	-2										
196	204	212	220	228	236	244	252	-2	-2	9	1	-2	-2	5	1										
197	205	213	221	229	237	245	253	-2	-2	-2	-2	-2	13	-2	-2										
198	206	214	222	230	238	246	254	-2	-2	8	-2	7	-2	-2	-2										
199	207	215	223	231	239	247	255	-2	-2	7	-2	-2	9	-2	-2										
200	208	216	224	232	240	248	256	4	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2										
129	137	145	153	161	169	177	185	-2	-2	-2	14	9	3	-2	3										
130	138	146	154	162	170	178	186	-2	-2	11	-2	14	9	-2	-2										
131	139	147	155	163	171	179	187	1	11	9	5	-2	-2	-2	-2										
132	140	148	156	164	172	180	188	-2	-2	5	2	-2	-2	5	7										
133	141	149	157	165	173	181	189	-2	-2	-2	-2	-2	7	-2	-2										
134	142	150	158	166	174	182	190	-2	-2	8	-2	8	-2	-2	-2										
135	143	151	159	167	175	183	191	-2	-2	8	-2	-2	7	-2	-2										
136	144	152	160	168	176	184	192	3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2										
65	73	81	89	97	105	113	121	-2	-2	-2	12	5	7	-2	1										
66	74	82	90	98	106	114	122	-2	-2	9	-2	7	12	-2	-2										
67	75	83	91	99	107	115	123	2	6	6	5	-2	-2	-2	-2										
68	76	84	92	100	108	116	124	-2	-2	9	5	-2	-2	5	3										
69	77	85	93	101	109	117	125	-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2										
70	78	86	94	102	110	118	126	-2	-2	9	-2	8	-2	-2	-2										
71	79	87	95	103	111	119	127	-2	-2	12	-2	-2	13	-2	-2										
72	80	88	96	104	112	120	128	2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2										
1	9	17	25	33	41	49	57	-2	-2	-2	5	7	5	-2	5										
2	10	18	26	34	42	50	58	-2	-2	10	-2	12	11	-2	-2										
3	11	19	27	35	43	51	59	3	9	6	5	-2	-2	-2	-2										
4	12	20	28	36	44	52	60	-2	-2	9	8	-2	-2	7	3										
5	13	21	29	37	45	53	61	-2	-2	-2	-2	-2	11	-2	-2										
6	14	22	30	38	46	54	62	-2	-2	6	-2	7	-2	-2	-2										
7	15	23	31	39	47	55	63	-2	-2	7	-2	-2	8	-2	-2										
8	16	24	32	40	48	56	64	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2										

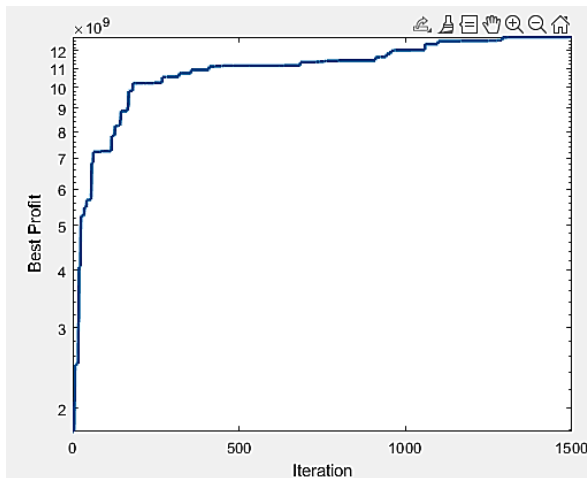
شکل ۲۳: نتیجه الگوریتم کشتل در تعیین محدوده نهایی بهینه (بلوک‌های استخراجی با رنگ زرد مشخص شده‌اند).



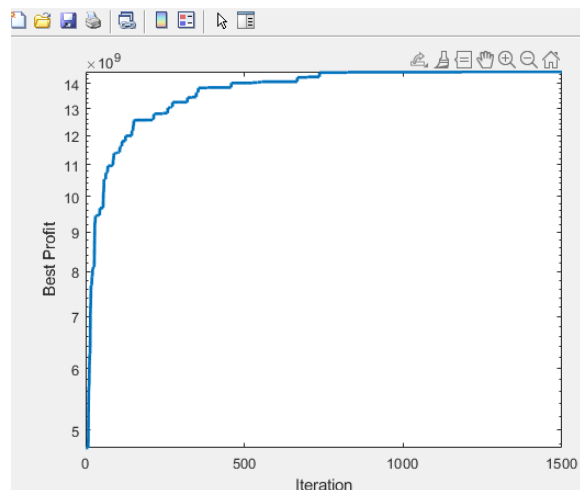
شکل ۲۵: مدل بلوکی معدن مس سونگون

۲-۶- پارامترهای محاسبه تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید

مهم‌ترین پارامترهای تعیین محدوده نهایی شامل قیمت، عیار میانگین بلوک و عیار حد، حجم بلوک، وزن مخصوص، درصد بازیابی، هزینه استخراج ماده معدنی و باطله، هزینه فرآوری، هزینه ذوب، هزینه پالایش و فروش است. در جدول ۶ پارامترهای مورد نیاز برای تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید آورده شده است.



شکل ۲۶: تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم کشتل برای داده‌های معدن مس سونگون با ۲۰ کشتل



شکل ۲۷: تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم کشتل برای داده‌های معدن مس سونگون با ۵۰ کشتل (بهبود جواب)

از پارامترهای یاد شده برای تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید معدن استفاده می‌شود.

### ۳-۶- تعیین محدوده نهایی معدن مس سونگون

برای تعیین محدوده نهایی معدن مس سونگون از مدل بلوکی اقتصادی که با استفاده از روابط بالا به دست آمده است، استفاده می‌شود. شیب دیواره معدن ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۶ تعداد ۱۵۰۰ تکرار با ۲۰ کشتل برای انجام محاسبات الگوریتم، در نظر گرفته شده است. برای بهبود جواب در شکل ۲۷ از ۱۵۰۰ تکرار با ۵۰ کشتل استفاده شده است.

ارزش محدوده نهایی معدن مس سونگون با استفاده از الگوریتم کشتل برابر با ۱۴۵۰۱ میلیون دلار و محدوده نهایی معدن با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler برابر با ۱۴۵۷۰ میلیون دلار است. در شکل ۲۸ محدوده نهایی معدن مس سونگون نشان داده شده است.

### ۷- نتیجه‌گیری

امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی نیاز داریم فعالیت‌های معدنکاری را بهینه کرده و با کمترین هزینه، بیشترین درآمد و استحصال فلز را انجام داده باشیم. عدم قطعیت‌ها در شرایط زمین‌شناسی، نوسانات قیمت بازار، ملزومات فنی و نظایر آنها، شرکت‌های معدنی را بر آن داشته تا پیوسته در حال توسعه پیشرفت‌های فنی برای دست یافتن به سود بیشتر، بهبود بهره‌برداری و تامین اهداف سرمایه‌گذارانشان باشند. در این پژوهش ابتدا تعداد ۱۰\*۴ بلوک فرضی برای حل مساله تعیین محدوده نهایی دوبعدی استفاده شد. همچنین برای تعیین

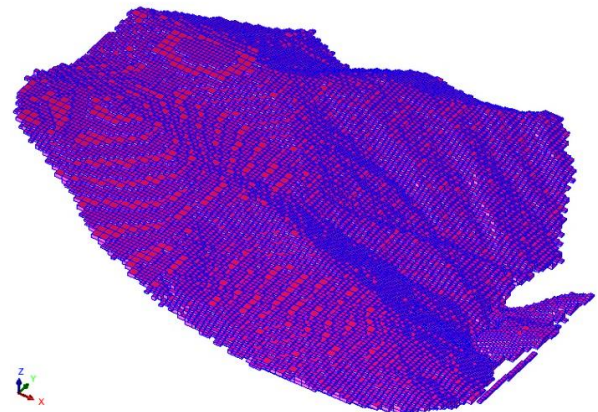
جدول ۶: پارامترهای محاسبه ارزش بلوک معدن مس سونگون [۲۱،۲۰]

ردیف	کلمات اختصاری	توضیح	مقدار	ردیف	کلمات اختصاری	توضیح	مقدار
۱	C <sub>O</sub>	هزینه استخراج هر تن سنگ	۱٫۱ دلار بر تن	۷	R	درصد بازیابی	۸۲٫۹
۲	F	هزینه فرآوری یک تن کانسنگ	۹ دلار بر تن	۸	P	قیمت هر تن کانسنگ	۷۰۰۰ دلار بر تن
۳	C <sub>w</sub>	نرخ تنزیل در نظر گرفته شده	۱۰ درصد	۹	D <sub>O</sub>	وزن مخصوص نسبی ماده معدنی	۲٫۵*۶٫۴*g
۴	S	هزینه فروش	۲۰ دلار بر تن	۱۰	D <sub>w</sub>	وزن مخصوص نسبی باطله	۲٫۵
۵	g <sub>c</sub>	عیار حد	۰٫۱۷	۱۱	V <sub>b</sub>	حجم یک بلوک	۲۵*۲۵*۱۲٫۵
۶	Mc	ظرفیت استخراج سالانه	۵۶ میلیون تن در سال	۱۲	Mc	ظرفیت کارخانه فرآوری	۱۴ میلیون تن در سال

optimization- Part 2: Production scheduling and inclusion of roadways". Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy (Section A: Mining Technology), 102: 105-113.

- [7] Picard, J. (1976). "Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems". Management Science, 22: 1268-1272.
- [8] Fraser, A. S. (1957a). "Simulation of genetic systems by automatic digital computers I. Introduction". Australian Journal of Biological Sciences, 10(4): 484-491.
- [9] Sattarvand, Javad. (2009). "Long-term open-pit planning by ant colony optimization". Doctoral Dissertation, University Heidelberg, pp. 125.
- [10] Karaboga, D. (2005). "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization". Technical Report-Tr06, October, Erciyes University, Türkiye.
- [11] Raphael, B., and Smith, I. F. C. (2003a). "A direct stochastic algorithm for global search". Journal of Applied Mathematics and Computation, 146(2-3): 729-758.
- [12] Kim, Y. C. (1978). "Ultimate pit limit design methodologies using computer models-The state of the art". Mining Engineering, 30(10): 1454-1459.
- [۱۳] اصائلو، م؛ ۱۳۸۹؛ "عیار حد و نقش آن در طراحی معدن". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [14] Atashpaz-Gargari, E., and Lucas, C. (2007). "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition". IEEE Congress on Evolutionary Computation, 4661-4667.
- [15] Hajiaghaci-Keshteli, M., and Aminnayeri, M. (2013). "Keshtel Algorithm (KA); a new optimization algorithm inspired by Keshtels' feeding". In: Proceeding in IEEE Conference on Industrial Engineering and Management Systems, Novel Metaheuristic, 2249-2253.
- [16] Gupta, A., Singh, D., and Kaur, M. (2019). "An efficient image encryption using non dominated sorting genetic algorithm III based 4 D chaotic maps". Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 11: 1309-1324. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01493-x>.
- [17] Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995). "Particle swarm optimization". Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, New York, USA, 4: 1942-1948.

[۱۸] حاج آقایی کشتلی، م؛ ۱۳۹۴؛ "زمان بندی یکپارچه تولید و حمل ریلی در زنجیره تامین". رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.



شکل ۲۸: سه بعدی تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم کشتل

محدوده نهایی سه بعدی از تعداد  $4 * 8 * 8$  بلوک فرضی استفاده شد که پاسخ این تعداد داده فرضی (با ابعاد کمتر) دوبعدی و سه بعدی با الگوریتم کشتل با پاسخ نرم افزار NPVScheduler برابر حاصل شد. در نهایت برای ارزیابی الگوریتم کشتل از داده های معدن مس سونگون استفاده شد که ارزش محدوده نهایی معدن مس سونگون با استفاده از الگوریتم کشتل برابر با ۱۴۵۰۱ میلیون دلار و محدوده نهایی معدن با استفاده از نرم افزار NPV Scheduler برابر با ۱۴۵۷۰ میلیون دلار است. پاسخ نهایی با دو روش کمتر از یک درصد اختلاف دارند.

## ۸- مراجع

- [1] Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., and Newman, A. (2013). "MineLib: a library of open pit mining problems". Annals of Operations Research, 206(1): 93-114.
- [۲] اصائلو، م؛ ۱۳۹۳؛ "روش های استخراج معدن سطحی (جلد اول)". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ویرایش اول.
- [3] Pana, M. T. (1965). "The simulation Approach to Open Pit Design". 5th APCOM Symposium, Johannesburg, 139-144.
- [4] Dowd, P. A., and Onur, A. H. (1993). "Open-pit optimization—part 1: optimal open-pit design". Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy (Section A: Mining Technology), 102: 95-104.
- [5] Lerchs, H., and Grossman, F. (1965). "Optimum Design of Open-Pit Mines". Transaction CIM, 58: 47-54.
- [6] Onur, A. H., and Dowd, P. (1993). "Open-pit

- <sup>16</sup> Keshtel
- <sup>17</sup> Anas Clypeata
- <sup>18</sup> Northern Shoveller
- <sup>19</sup> Intensification
- <sup>20</sup> Diversification
- <sup>21</sup> Local Search
- <sup>22</sup> Global
- <sup>23</sup> Shovel
- <sup>24</sup> Landing
- <sup>25</sup> Greedy
- <sup>26</sup> Keep
- <sup>27</sup> Swirl
- <sup>28</sup> Replace
- <sup>29</sup> Move
- <sup>30</sup> Locky keshtel
- <sup>31</sup> UnLocky Keshtel
- <sup>32</sup> Keep
- <sup>33</sup> Swirl
- <sup>34</sup> UnLocky Keshtel
- <sup>35</sup> موقعیت کشتل بعد از چرخش
- <sup>36</sup> موقعیت بهترین کشتل از لحاظ ارزش
- <sup>37</sup> موقعیت کشتل بدشانس قبل از چرخش
- <sup>38</sup> Move
- <sup>39</sup> عدد یک سوم توسط کاربر انتخاب می شود.
- <sup>40</sup> Profit
- <sup>41</sup> move
- <sup>42</sup> Best Sol
- [19] Hustrulid, W., Kuchta, M., and Martin, R. (2013). "Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack". CRC Press.
- [20] Dadi, V., and Sattarvand, J. (2016). "Effects of the volatility of input parameters on cut-off grade optimisation, a case study of Sungun copper mine". International Journal of Mining and Mineral Engineering, 7(1): 64-77.
- [۲۱] نوروزی، ا؛ عطایی پور، م؛ ۱۳۹۶؛ "امکان سنجی کاربرد الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی در برنامه ریزی تولید معادن". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- 
- <sup>1</sup> Jean-Claude Picard
- <sup>2</sup> Genetic Algorithm
- <sup>3</sup> Ant colony optimization
- <sup>4</sup> Meta heuristic
- <sup>5</sup> Artificial bee colony algorithm
- <sup>6</sup> Deterministic Algorithm
- <sup>7</sup> Approximate *Algorithm*
- <sup>8</sup> Heuristic Algorithm
- <sup>9</sup> Meta-heuristic Algorithm
- <sup>10</sup> Traveling Salesman Problem (TSP)
- <sup>11</sup> *Neighborhood Search*
- <sup>12</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)
- <sup>13</sup> Particle Swarm Optimization
- <sup>14</sup> Artificial Bee Colony *Algorithm*
- <sup>15</sup> Firefly Algorithm