



## Optimum design of star layout for TBM cutting tool using gray wolves meta-heuristic optimization algorithm

Mohsen Alebouyeh<sup>1</sup>, Ali Aalianvari<sup>2\*</sup>, Majid Noriyan Bidgoli<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student; Faculty of The Mining Engineering Department; Kashan University, Kashan, Iran, mohsenalebouyeh@grad.kashanu.ac.ir
2. Associate Professor; Faculty of Mining Engineering, Kashan University, Kashan, Iran, ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir
3. Assistant Professor; Faculty of Mining Engineering, Kashan University, Kashan, Iran, noriyan@kashanu.ac.ir

Received: 2023/05/30 - Accepted: 2024/11/21

### Abstract

**Objective** The cutting tool layout in the TBM cutter head is considered one of the most effective factors in improving the efficiency of boring operations, the TBM service life, the proper performance of the cutting tool, and reducing drilling costs. **Method** In the design process of the TBM cutting tool layout, we faced a multi-objective optimization problem with nonlinear constraints, which caused computational complexity. In the present research, in order to evaluate the impact of cutting tool star layout on TBM performance, a numerical model has been developed using meta-heuristic GWO to design a star layout. Also, two types of star layouts (1: 8-pointed star, 2: 12-pointed star) were designed using the presented model, and the TBM performance was evaluated. **Findings** In order to evaluate the performance of the developed design model, the layout design process of the cutting tool in the cutter head of an operational TBM sample was evaluated. Based on the results, it is determined that based on the optimal 8-pointed star layout of the cutting tool, the lateral force  $F_s$  has decreased by 78.88% compared to the original layout of the cutting tool, and the eccentricity torque has decreased by 15.03%. Also, by evaluating the performance results of the TBM with optimal 12-pointed star layout, it was determined that the total lateral force  $F_s$  decreased by 87.89% based on the optimal 12-pointed star cutting tool layout compared to the original cutting tool layout and the eccentricity torque is reduced by 23.68%. From the comparison of the performance results of the TBM with an 8-pointed star layout and a 12-pointed star layout, it was found that the TBM with a 12-pointed star layout showed better performance. Based on the results, it is clear that the optimal star layout of the cutting tool in the TBM cutter head has improved the TBM performance from the point of view of drilling engineering (increasing efficiency and drilling progress). The most important result of this research included providing an efficient numerical model for designing the optimal star layout of the TBM cutting tool based on the grey wolf optimization algorithm. The presented model can be implemented under different operating conditions and for different types of TBMs.

### Keywords

tunnel boring machine, TBM, cutting tool, star layout, cutter head, GWO algorithm.

\* Corresponding Author



### 1- INTRODUCTION

Considering the need for tunnel excavation for purposes such as communication routes, the operation of water transmission lines, and energy systems, providing new solutions to improve the efficiency of excavation operations has always been a topic of interest to activists and engineers in this field.

In the implementation process of TBMs, tunnel excavation time and costs, especially in hard rock drilling conditions, have been influenced by 3 main parameters: 1- Rock characteristics (Rock Abrasivity and Rock Mass Boreability), 2- TBM parameters (TBM specifications from the perspective of drilling power), 3- TBM cutter head design. In terms of hard rock drilling using TBMs, disk cutter consumption is one of the most important issues to be considered and accounts for at least 10% of drilling costs [5]. In addition, cutter consumption significantly impacts TBM performance, the progress time of drilling operations, and, thus, the total cost of tunneling.

The layout design of the TBM cutting tool is closely related to the penetration rate of the cutter in the rock, the cutting force, and the expected performance of the machine. During drilling, three cutting forces are applied to the disc cutter tip: normal force, rolling force, and lateral force. The forces acting on the normal and gauge cutters are shown schematically in (Figure1).

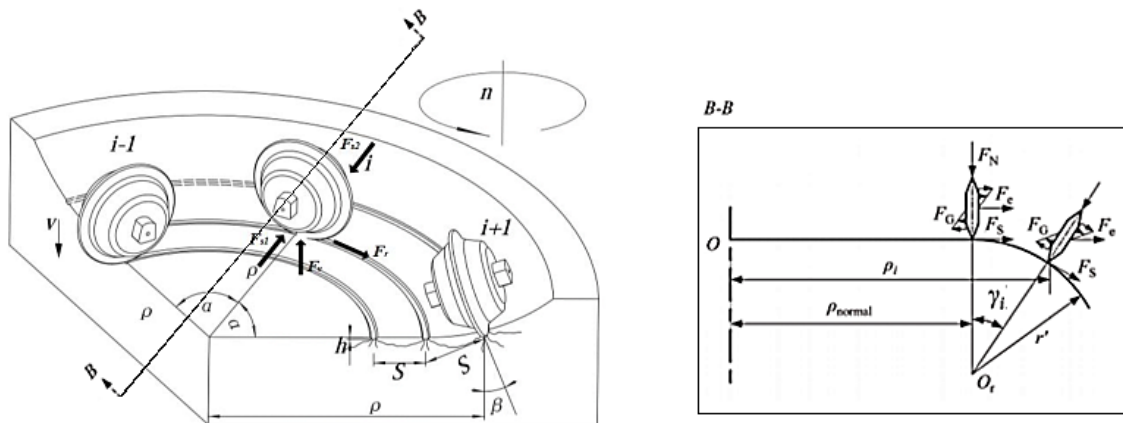
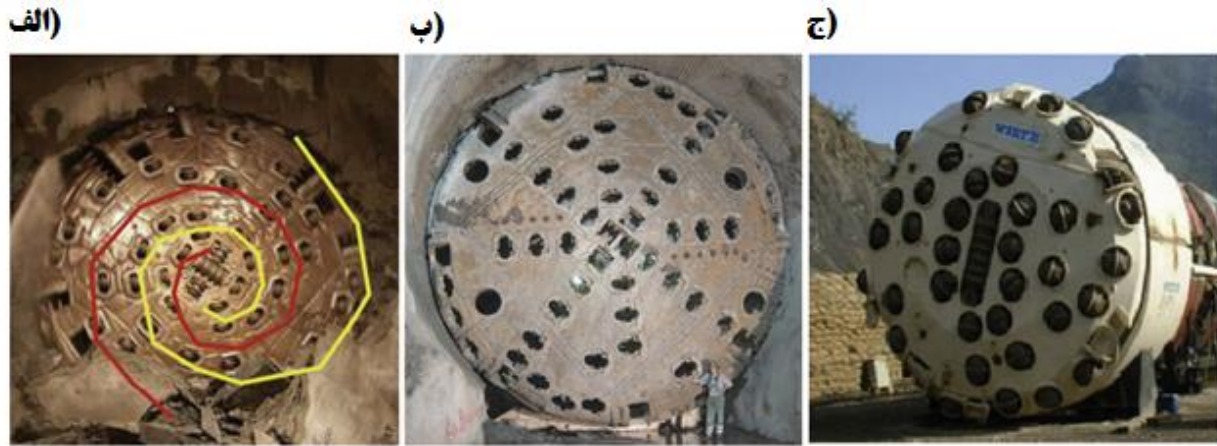


Figure (1): Schematic of forces applied on normal and gauge cutters

The TBM cutter head's cutting tool layout design process is implemented by focusing on two principles. 1- Increasing the efficiency of drilling operations and establishing ideal technical conditions for the operation of the TBM device (drilling engineering technical requirements), 2- Establishing the cutter head structure design constraints such as the working position of the manhole, bucket and the necessary resistance of the cutter head equipment (structural design requirements). Therefore, in designing cutting tool layout in TBMs, we have faced a multi-objective optimization problem with nonlinear constraints, which causes computational complexity in the design process. The main goal in designing the layout of disc-cutting tools is to balance the force distribution on the cutter head during drilling.

Until now, relatively comprehensive studies have been conducted on the TBM cutter head's evaluation and cutting tool layout. In general, the layouts provided for cutting tools are of three types: 1- spiral layout, 2- star layout, and 3- stochastic layout, which a view of the three main layouts of TBM cutting tools is shown in (Figure 3).



**Figure (3): different TBM cutting tool layouts, a) spiral layout, b) star layout, c) stochastic layout**

Each of the three types of cutting tool layout has advantages and disadvantages from the point of view of TBM performance evaluation in drilling operations. Star layout (Figure 3-b), which is named spoke layout in some sources, is one of the types of cutting tool arrangement in the cutter head, which has been assigned this name due to the placement of normal cutters in the form of the blades of a star. The acceptable performance of star layout has been evaluated and investigated in Hu et al. (2011) and Gang et al. (2017) studies. Star layout is divided into different types based on the number of points in the cutter head. Two types of the most used star arrangements include the 8-pointed star arrangement and the 12-pointed star arrangement. The schematic of different types of star layouts is shown in.

## 2- METHODS

In order to provide a model for the optimal design of the cutting tool star layout in the TBM cutter head, based on the design requirements and constraints, as well as the equations governing the star layout, a numerical algorithm has been developed in the present article using the GWO meta-heuristic method. Based on the research model, at first, the input data are presented to the model, which includes three main sections: 1- specifications of the TBM, 2- physical-mechanical specifications of hard rock, and 3- star layout type (8-pointed star, 12-pointed star). After this step, the main multi-objective optimization equation is formed along with the main constraint equations of the problem, and the main optimal design model of the TBM cutting tool is established.

## 3- FINDINGS AND ARGUMENT

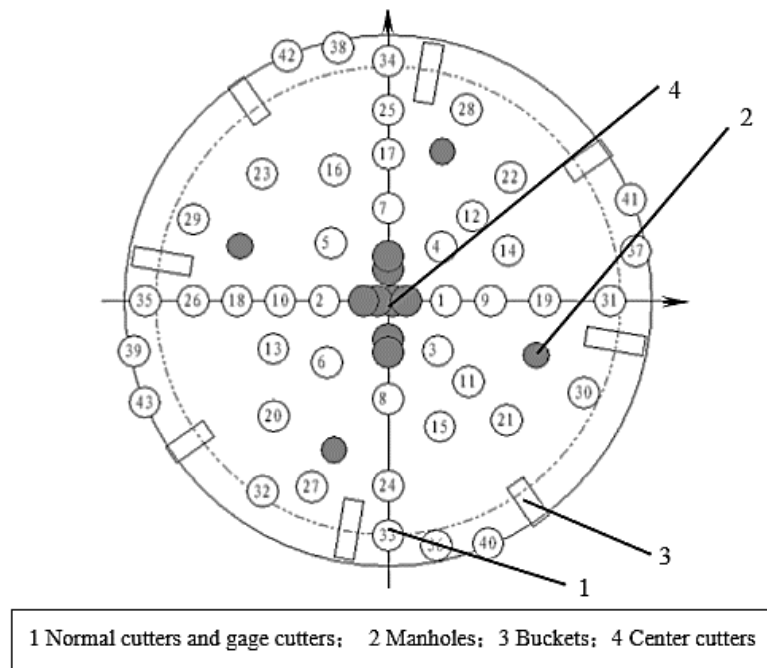
In order to evaluate the performance of the presented optimization model, the cutting tool layout design process for the TBM cutter head of an executive model was evaluated. For this purpose, a hard rock TBM device for drilling a water transmission tunnel with 51 disk cutters (normal, gauge, center), 4 manholes, and 8 buckets has been studied based on engineering requirements. The figure shows the schematic layout of TBM cutting tools and equipment. The number of manholes in this TBM was four, and its position and geometric dimensions are presented in Table (2). Also, the number of buckets is eight, the position of which is given in Table (3); in addition to the mentioned information, the details and parameters of the boring machine, disc cutters, and the physical properties of the rock are presented in Table (4).

**Table (2): Position of manhole in TBM basic model [34]**

No. Manhole	1	2	3	4
$\rho$ (mm)	2700	2700	2700	2700
$\theta$ (rad)	1.2217	2.793	4.363	5.934

**Table (3): Dimensions and position of the bucket in the TBM model [34]**

No. Bucket	$\rho$ (mm)	$\theta$ (rad)	Length (mm)	Width (mm)
1	3700	0.611	700	300
2	3500	1.396	900	300
3	3700	2.182	700	300
4	3500	2.967	900	300
5	3700	3.753	700	300
6	3500	4.538	900	300
7	3700	5.323	700	300
8	3500	6.109	900	300

**Figure: Schematic of equipment and cutting tools in TBM reference model****REFERENCES**

1. Eftekhari, A., & Aalianvari, A. (2019). An overview of several techniques employed to overcome squeezing in mechanized tunnels; A case study. *Geomechanics and Engineering*, 18(2), 215-224
2. Jeong, H. Y., Jeon, S. W., Cho, J. W., Chang, S. H., and Bae, G. J. (2011). "Assessment of cutting performance of a TBM disc cutter for anisotropic rock by linear cutting test." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 508-517 (in Korean).
3. Choi, S. O., & Lee, S. J. (2015). Three-dimensional numerical analysis of the rock-cutting behavior of a disc cutter using particle flow code. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 1129-1138.
4. Yu, S. H. (2007). A study on rock cutting behavior by TBM disc cutter, MSc Thesis, Seoul National University.
5. Bruland A (2000) Hard rock tunnel boring vol 1–10. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
6. Alber M et al. (2014), ISRM suggested a method for determining the abrasive of rock by the CERCHAR abrasivity test. *Rock Mech Rock Eng* 47:261–266. doi:10.1007/978-3-319-07713-

0\_7.

7. Macias FJ, Wilfing L, Andersson T, Thuro K, Bruland A (2015) Performance and cutter life assessments in hard rock tunnelling. Paper presented at the EUROCK 2015 and 64th Geomechanics Colloquium Salzburg, Austria.
8. Wang L, Kang Y, Zhao X, Zhang Q (2015) Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutter head based on energy analysis. *Tunn Undergr Space Technol* 50:324–333. doi:10.1016/j.tust.2015.08.003.
9. Macias FJ (2016) Hard rock tunnel boring, performance predictions, and cutter life assessments. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
10. Zhang, P. (2009). Design and research on cutter layout and the structural parameters of the cutter head optimization for TBM [D].
11. Zhao-Huang, Z., & Yong-Li, Q. (2011). Research on the layout of the TBM disc cutter. *工程力学*, 28(5), 172-177.
12. Sun, H. Y., Guo, W., Liu, J. Q., Song, L. W., & Liu, X. Q. (2018). Layout design for disc cutters based on analysis of TBM cutter-head structure. *Journal of Central South University*, 25(4), 812-830.
13. Huo, J. Z., Zhao, H. F., Zhang, X., Sun, W., & Zhao, Y. (2011). Cutter's plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) is based on a multi-spiral layout pattern. In *Advanced Materials Research* (Vol. 308, pp. 1288-1291). Trans Tech Publications Ltd.
14. Gong, Q. M., Zhao, J., & Hefny, A. M. (2006). Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization. In *AITES-ITA 2006 congress*, Seoul, South Korea.
15. Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., & Zhao, J. (2006). Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and Underground Spacing Technology*, 21(1), 46–55.
16. Gong, Q. M., Zhao, J., & Jiao, Y. Y. (2005). Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and Underground Spacing Technology*, 20(1), 183–191.
17. Eftekhari, A., Aalianvari, A., & Rostami, J. (2018). The influence of TBM operational parameters on optimized penetration rate in schistose rocks is a case study: Golab tunnel Lot-1, Iran. *Computers and Concrete, An International Journal*, 22(2), 239-248.
18. Moon, T. (2006). A computational methodology for modeling rock cutting with a discrete element method: Prediction of TBM rock cutting performance. Doctoral dissertation. Colorado: Colorado School of Mines.
19. Cardu, M., Iabichino, G., Oreste, P., & Rispoli, A. (2017). Experimental and analytical studies of the parameters influencing the action of TBM disc tools in tunnelling. *Acta Geotechnica*, 12(2), 293-304.
20. Geng, Q., Bruland, A., & Macias, F. J. (2018). Analysis on the relationship between layout and consumption of face cutters on hard rock tunnel boring machines (TBMs). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 279-297.
21. Cigla, M., Yagiz, S., & Ozdemir, L. (2001). Application of tunnel boring machines in

- underground mine development. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey (pp. 155–164), Ankara, Turkey.
22. Huo, J., Sun, W., Chen, J., & Zhang, X. (2011). Disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on different layout patterns. *Computers & industrial engineering*, 61(4), 1209-1225.
  23. Sun, W., Ling, J., Huo, J., Guo, L., Zhang, X., & Deng, L. (2013). Dynamic characteristics study with multidegree-of-freedom coupling in TBM cutterhead system based on complex factors. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
  24. Huo, J., Wu, H., Yang, J., Sun, W., Li, G., & Sun, X. (2015). Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunnelling field test. *Journal of mechanical science and technology*, 29, 3043-3058.
  25. Mazaira, A., & Konicek, P. (2015). Intense rockburst impacts in deep underground construction and their prevention. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1426-1439.
  26. Liang, Q., Zhang, D., Coppola, G., Mao, J., Sun, W., Wang, Y., & Ge, Y. (2016). Design and analysis of a sensor system for cutting force measurement in machining processes. *Sensors*, 16(1), 70.
  27. Lin, L., Xia, Y., & Wu, D. (2019). Multiobjective optimization design for structural parameters of TBM disc cutter rings based on FAHP and sampga. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
  28. Farrokh, E. (2021). Layout design specifications of hard-rock TBM cutterheads at maximum cutter penetration and TBM advance. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 2049.
  29. Duan, W., Zhang, L., Zhang, M., Su, Y., Mo, J., & Zhou, Z. (2022). Numerical and experimental studies on the effects of the TBM cutter profile on rock cutting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1), 416-432.
  30. Liu, W., Li, A., & Liu, C. (2022). Multi-objective optimization control for tunnel boring machine performance improvement under uncertainty. *Automation in Construction*, 139, 104310.
  31. Farrokh, E. (2022). Lace Design Optimization for Hard Rock TBMs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(12), 21-21.
  32. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
  33. Katibeh, H., & Aalianvari, A. (2012). Common Approximations to the water inflow into Tunnels. *Drainage systems*, 75-88.
- J. Z. Huo, W. Sun and J. Chen, et al, Optimal disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on a multi-objective genetic algorithm, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24 (2) (2010) 521-528.

مقاله پژوهشی

## طراحی بهینه چیدمان ستاره‌های ابزار برش در TBM با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری گرگ‌های خاکستری GWO

محسن آل‌بویه<sup>۱</sup>، علی عالی انوری<sup>۲\*</sup>، مجید نوریان بیدگلی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی معدن؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، mohsenalebouyeh@grad.kashanu.ac.ir

۲. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir

۳. استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، noriyan@kashanu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱

### چکیده

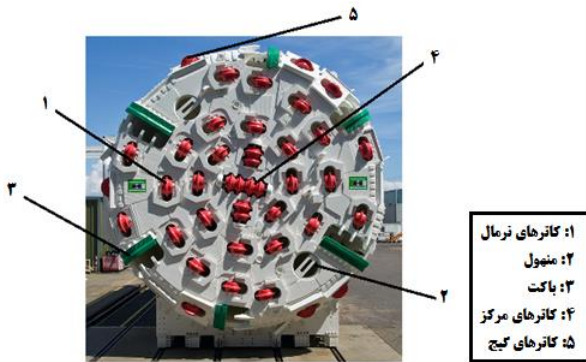
چیدمان ابزار برش در کله حفار ماشین TBM به عنوان یکی از عوامل موثر بر افزایش راندمان عملیات حفاری، عمر مفید TBM، عملکرد مناسب ابزار برش و کاهش هزینه‌های حفاری محسوب می‌شود. در طراحی چیدمان ابزار برش TBM یک مساله بهینه‌سازی دارای چند هدف با قيود غیرخطی مطرح است که این مساله باعث بروز پیچیدگی محاسباتی در فرآیند طراحی می‌شود. در این پژوهش به هدف ارزیابی تاثیر چیدمان ستاره‌های ابزار برش بر عملکرد ماشین TBM، مدل عددی با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری گرگ‌های خاکستری GWO برای طراحی چیدمان ستاره‌های توسعه داده شده است. همچنین دو نوع چیدمان ستاره‌ای (۱- ستاره‌ای ۸ پر، ۲- ستاره‌ای ۱۲ پر) با بهره‌گیری از مدل رایج شده و طراحی و عملکرد ماشین TBM مورد ارزیابی قرار گرفته است. به جهت ارزیابی عملکرد مدل طراحی توسعه داده شده، فرآیند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار یک نمونه اجرایی TBM سنگ مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که نیروی جانبی کل دستگاه Fs بر اساس چیدمان بهینه ستاره‌ای ۸ پر ابزار برش ۷۸/۸۸ درصد نسبت به چیدمان اصلی ابزار برش و میزان گشتاور خروج از مرکز به میزان ۱۵/۰۳ درصد کاهش یافته است. همچنین با ارزیابی نتایج حاصل از عملکرد ماشین TBM با چیدمان بهینه ستاره‌ای ۱۲ پر مشخص شد که نیروی جانبی کل دستگاه Fs بر اساس چیدمان بهینه ستاره‌ای ۱۲ پر ابزار برش ۸۷/۸۹ درصد نسبت به چیدمان اصلی ابزار برش و میزان گشتاور خروج از مرکز به ۲۳/۶۸ درصد کاهش یافته است. از مقایسه نتایج حاصل از عملکرد دستگاه TBM با چیدمان ستاره‌ای ۸ پر و چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر مشخص شد که ماشین TBM با چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر ابزار برش دارای عملکرد بهتری بوده است. بر اساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که چیدمان ستاره‌ای بهینه ابزار برش در کله حفار ماشین TBM از نقطه نظر مهندسی حفاری (افزایش بازده و پیشروی حفاری) موجب ارتقای عملکرد TBM شده است. مهم‌ترین نتیجه حاصل از این پژوهش ارزیابی یک مدل عددی کارآمد برای طراحی چیدمان ستاره‌ای بهینه ابزار برش در ماشین TBM بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی GWO بوده است. مدل رایج شده قابلیت پیاده‌سازی تحت شرایط مختلف عملیاتی و برای انواع مختلف ماشین‌های TBM را دارا بوده است.

### کلمات کلیدی

دستگاه حفاری تونل، TBM، ابزار برش، چیدمان ستاره‌ای، الگوریتم GWO.

## ۱- مقدمه

مختلف شامل: ابزار برش‌های نرمال<sup>۱</sup>، منهول<sup>۲</sup>، باکت<sup>۳</sup>، ابزار برش‌های مرکزی<sup>۴</sup> و ابزار برش‌های گیج<sup>۵</sup> است. در شکل ۱ کله حفار به همراه تجهیزات و ابزارهای برش در نمونه واقعی ماشین TBM نمایش داده شده است.



شکل ۱- تجهیزات موجود در کله حفار TBM

طراحی چیدمان ابزار برش در ماشین TBM ارتباط نزدیکی با میزان نفوذ ابزار برش در سنگ، نیروی برشی و عملکرد مورد انتظار دستگاه دارد. در حین حفاری سه نیروی برشی بر نوک ابزار برش دیسکی اعمال می‌شود که شامل نیروی‌های نرمال، غلتشی و جانبی است. در شکل ۲ نیروهای وارد بر ابزارهای برش نرمال و گیج به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

فرآیند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار ماشین TBM با تمرکز بر دو اصل افزایش بازده عملیات حفاری و برقراری شرایط فنی ایده‌آل برای عملکرد دستگاه TBM (الزامات فنی مهندسی حفاری<sup>۶</sup>)، ۲- برقراری قیدهای طراحی سازه کله حفار همچون: موقعیت کارگذاری منهول، باکت و مقاومت لازم تجهیزات کله حفار (الزامات طراحی سازه‌ای<sup>۷</sup>) پیاده‌سازی می‌شود. بر این اساس در طراحی چیدمان ابزار برش در ماشین‌های TBM یک مساله بهینه‌سازی دارای چند هدف با قیود غیرخطی مطرح است که این مساله باعث بروز پیچیدگی محاسباتی در فرآیند طراحی می‌شود. هدف اصلی در طراحی چیدمان ابزارهای برش دیسکی، تعادل توزیع نیرو بر روی سر ابزار برش در حین حفاری است. به بیان دیگر طراحی بهینه چیدمان ابزارهای برش بیانگر شرایطی است که مقدار نیروهای

با توجه به نیاز حفاری تونل برای اهدافی همچون مسیرهای ارتباطی، کارگذاری خطوط انتقال آب و سامانه‌های انرژی، همواره ارایه راه‌کارهای نوین برای ارتقای بازده عملیات حفاری به عنوان یکی از مباحث مورد توجه فعالان و مهندسان در این عرصه بوده است. ماشین‌های حفاری مکانیزه TBM با داشتن مزیت‌هایی مانند حفاری اتوماتیک و مکانیزه، کاهش اختلال و ارتعاشات نسبت به روش‌های حفاری انفجاری، به عنوان یکی از دستاوردهای برجسته در حوزه مهندسی حفاری قلمداد می‌شود. امروزه به‌طور گسترده در مناطق مختلف دنیا حفاری مکانیزه و بهره‌گیری از ماشین‌های TBM به عنوان جایگزینی مناسب به جای روش‌های سنتی حفاری تونل مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۴]. در فرآیند بهره‌گیری از ماشین‌های TBM، زمان و هزینه‌های حفاری تونل به ویژه در شرایط حفاری سنگ سخت تحت تاثیر ۳ پارامتر اصلی ویژگی‌های سنگ (سایش و تحمل‌پذیری توده سنگ)، پارامترهای ماشین TBM (مشخصات ماشین TBM از منظر توان حفاری) و طراحی کله حفار در ماشین TBM بوده است [۴]. در حفاری سنگ سخت با ماشین‌های TBM، مصرف ابزار برش یکی از مهم‌ترین مسائلی است که باید مورد توجه قرار گیرد و حداقل ۱۰ درصد از هزینه‌های حفاری را به خود اختصاص می‌دهد [۵]. علاوه بر این، مصرف ابزار برش تاثیر زیادی بر عملکرد TBM، زمان پیشروی عملیات حفاری و در نتیجه هزینه تمام شده حفر تونل دارد.

با توجه به مطالعات گسترده انجام شده توسط محققان پیشین و نتایج تجربی حاصل از عملکرد ماشین‌های حفاری مشخص می‌شود که هزینه عملیات حفاری ارتباط تنگاتنگی با بازده ماشین TBM سنگ سخت داشته است [۴-۸]. از طرفی بر اساس مطالعات [۹] طراحی کله حفار به عنوان اصلی‌ترین مولفه در افزایش بازده ماشین TBM در برش سنگ سخت مطرح شده است. کله حفار که در جلوی TBM قرار دارد به طور مستقیم با سطح جبهه‌کار در تماس است و عامل کلیدی در حفاری از نقطه نظر کارایی (بهره‌وری دستگاه و سرعت پیشروی حفاری)، قابلیت اطمینان و پایداری عملیات حفاری بوده است [۱۰-۱۲]. طراحی کله حفار در دستگاه TBM شامل طراحی ساختار بدنه دیسک (ابزار برش) و طراحی چیدمان ابزار برش است. به طور کلی در ماشین TBM فارغ از نوع ماشین حفاری مکانیزه، کله حفار دارای پنج بخش اصلی از تجهیزات

<sup>1</sup> Normal Cutters

<sup>2</sup> Manholes

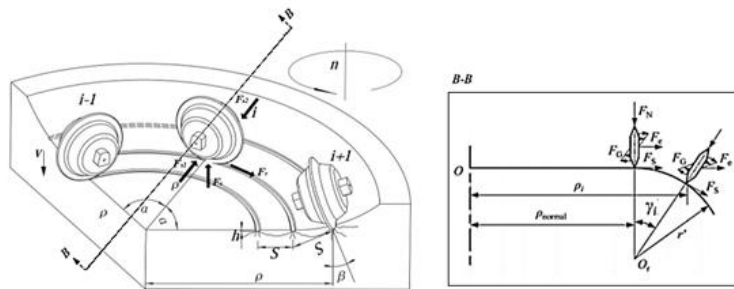
<sup>3</sup> Buckets

<sup>4</sup> Center Cutters

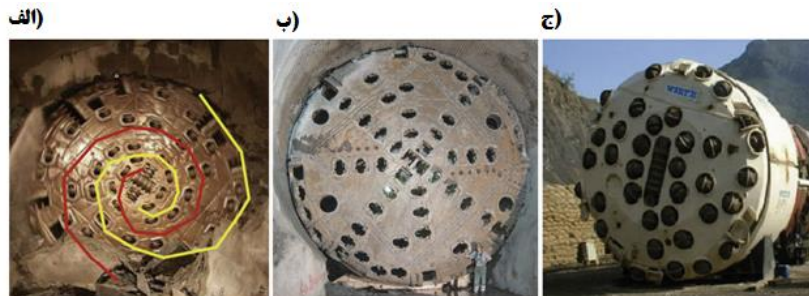
<sup>5</sup> Gage Cutters

<sup>6</sup> engineering technical requirements

<sup>7</sup> structure design requirements



شکل ۲- شماتیک نیروهای وارد بر ابزارهای برش نرمال و گیج



شکل ۳- آرایش چیدمان مختلف ابزار برش در TBM. (الف) چیدمان مارپیچ، (ب) چیدمان ستاره‌ای و (ج) چیدمان تصادفی

هدف اصلی تحقیق است.

تا امروز مطالعات نسبتاً جامعی بر ارزیابی و چیدمان ابزار برش در کله حفار ماشین TBM انجام شده است [۹-۱۹]. به طور کلی چیدمان‌های ارایه شده برای ابزار برش در سه نوع چیدمان مارپیچ، ستاره‌ای و تصادفی است که در شکل ۳ نمایی از سه چیدمان اصلی ابزار برش در ماشین TBM نمایش داده شده است.

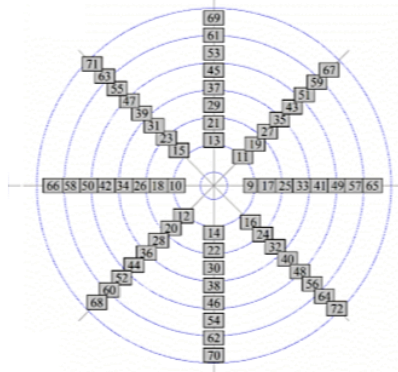
هر یک از سه نوع چیدمان ابزار برش مزایا و معایبی از نقطه نظر ارزیابی عملکرد ماشین TBM در عملیات حفاری دارد. چیدمان ستاره‌ای (شکل ۳- ب) که در برخی منابع با عنوان چیدمان Spoke نامگذاری شده است، یکی از انواع آرایش ابزار برش در کله حفار است که به سبب قرارگیری ابزارهای برش نرمال به صورت پره‌های یک ستاره این نامگذاری را به خود اختصاص داده است. عملکرد قابل قبول چیدمان ستاره‌ای در مطالعات هو و همکاران (۲۰۱۱) و گنگ و همکاران (۲۰۱۷) مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است [۲۰-۱۳]. چیدمان ستاره‌ای بر اساس تعداد پره‌ها (شاخه‌های ستاره) در کله حفار به انواع مختلفی تقسیم می‌شود، دو نوع از پرکاربردترین آرایش ستاره‌ای، آرایش ستاره‌ای ۸ پر و آرایش ستاره‌ای ۱۲ پر است. در شکل ۴ شماتیک انواع مختلف چیدمان ستاره‌ای نمایش داده شده است.

خروج از مرکز و ممان‌های خروج از مرکز را صفر کند. در این شرایط وضعیتی ایده‌آل برای ابزارهای برش و تکیه‌گاه‌های آن‌ها ایجاد می‌شود اما در عمل به دلیل الزامات فنی مهندسی پیچیده، شرایط سنگ (جبهه‌کار) و الزامات طراحی، همواره سطوحی از خروج از مرکز در نیروها و ممان‌ها وجود دارد. بنابراین مطالعه چیدمان ابزارهای برش دیسکی در دستگاه TBM برای کاهش این مشکلات و بهبود عملکرد ابزارهای برش، عمر مفید آن‌ها و افزایش بازده عملکرد TBM که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های حفاری می‌شود، بسیار مهم است [۱۳].

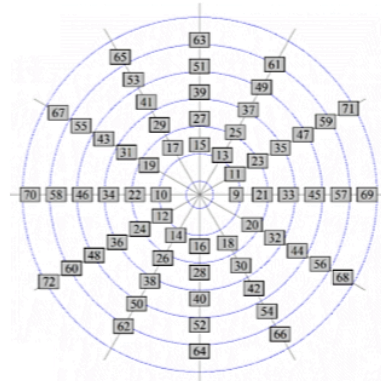
فرآیند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار ماشین TBM شامل دو مرحله اصلی طراحی فاصله برش (پارامتر S) و طراحی پلان موقعیت ابزارهای برش نرمال و ابزارهای برش گیج است. مرحله اول (طراحی فاصله برش)، طی پژوهش‌های عددی [۱۴-۱۶] و آزمایشگاهی [۱۷-۱۹] مختلفی توسط محققان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا با بهره‌گیری از ماشین برش خطی (LCM) و بر اساس ویژگی‌های فیزیکی مکانیکی سنگ سخت مورد آزمایش برش قرار گرفته و فاصله برش محاسبه می‌شود. پس از تعیین فاصله برش برای طراحی چیدمان ابزار برش الزامات مختلفی را باید مدنظر قرار داد که انجام تمام این شرط‌ها بر پیچیدگی مساله افزوده و به عنوان یکی از چالش‌ها نزد محققان بوده است. طراحی فاصله برش در این پژوهش مدنظر نبوده و تعیین چیدمان بهینه ابزار برش

<sup>1</sup> Stochastic layout pattern

الف)



ب)



شکل ۴- شماتیک انواع مختلف چیدمان ستاره‌های ابزار برش، الف) ستاره‌های ۸ پر، ب) ستاره‌های ۱۲ پر

ارزیابی چیدمان ابزار برش در ماشین TBM با در نظر گرفتن پارامترهای قابلیت شکستن سنگ، مصرف انرژی، قابلیت تحمل بار، عمر مفید ابزار برش دیسکی پرداختند. در این مطالعات یک مدل چند هدفه بهینه‌سازی برای تعیین آرایش بهینه ابزار برش تعریف و با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک (GA) و به کارگیری فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) برای محاسبه ضرایب وزن توسعه داده شد، نتایج نشان داد که عملکرد ماشین TBM در برش سنگ و عمر مفید دیسک ابزار برش پس از بهینه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی بهبود یافته است [۲۷]. فرخ (۲۰۲۱) به ارزیابی تاثیر آرایش ابزار برش بر نفوذ برش و ارایه یک دستورالعمل اساسی برای بهینه‌سازی فاصله برش با بهره‌گیری از یک پایگاه داده میدانی گسترده پرداخت. با استفاده از این پایگاه داده، تاثیر نوع سنگ و مقاومت فشاری تک محوری بر نفوذ برش در شرایط مختلف فاصله کارگذاری ابزار برش در کله حفار بررسی شد. نتایج مطالعه بر روی ویژگی‌های طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار نشان داد که توزیع یکنواخت ابزار برش در کله حفار موجب ارتقای بازده عملیات حفاری شده است [۲۸]. دوان و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی جامع که در قالب مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیاده‌سازی شد به بررسی و ارزیابی تاثیر ابزار برش و نیمرخ کارگذاری آن در برش سنگ سخت پرداختند [۲۹]. ليو و همکاران (۲۰۲۲) با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی چند هدفه، کنترل و ارزیابی عملکرد ماشین‌های TBM را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد که بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی منجر به ارتقای عملکرد ماشین TBM و کنترل بهتر در شرایط عدم قطعیت‌ها بوده است [۳۰]. فرخ (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی چیدمان‌های مختلف ابزار برش در ماشین TBM پرداخت و چیدمان‌های ستاره‌ای و مارپیچ

در راستای طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار مطالعاتی توسط محققان مختلف انجام شده است. مدل کامپیوتری CSM برای تخمین نیروهای برش در طراحی TBM های سنگ سخت بر اساس مشخصات سر ابزار برش و خواص سنگ به عنوان اولین مطالعات انجام شده در راستای طراحی چیدمان ابزار برش قلمداد می‌شود که توسط کیگلا و همکاران (۲۰۰۱) ارایه شد [۲۱]. در ادامه محققان مختلف با بهره‌گیری از روش‌های مدل‌سازی عددی به ارزیابی عملکرد ماشین‌های TBM و تاثیر نوع چیدمان ابزار برش در کله حفار پرداختند. در این راستا هو و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی و ارزیابی چیدمان بهینه ابزار برش در کله حفار ماشین TBM سنگ برای انواع مختلف چیدمان پرداختند که برای بهینه‌یابی موقعیت کارگذاری و مدل طراحی چیدمان از الگوریتم ژنتیک استفاده شد [۲۲]. مطالعات مختلفی به ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی در چیدمان ابزار برش در کله حفار ماشین TBM معطوف بوده است. مانند: سان و همکاران (۲۰۱۳) [۲۳]، هو و همکاران (۲۰۱۵) [۲۴]، مازاییرا و کونیک (۲۰۱۵) [۲۴]، لییانگ و همکاران (۲۰۱۶) [۲۶]، گنگ و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعاتی به بررسی انواع مختلف چیدمان ابزار برش در کله حفار TBM پرداختند، نتایج حاصل بیانگر مزایا و معایب انواع چیدمان‌های مختلف ابزار برش در عملیات حفاری بوده است، همچنین معیارهایی برای پارامترهای مختلف آرایش ابزار برش در انواع چیدمان ارایه شد [۲۰]. سان و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی چیدمان ابزارهای برش در ماشین حفاری TBM را بر اساس آنالیز ساختاری کله حفار مورد بررسی قرار دادند و با بررسی جزییات الزامات سازه‌ای و فنی مهندسی فرمول‌بندی نسبتاً جامعی از عملکرد فرآیند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار TBM ارایه دادند [۲۴]. لین و همکاران (۲۰۱۹) به

ابزار برش در کله حفار را مورد مطالعه قرار داد [۳۱].

معادلات حاکم بر عملکرد ابزار برش سنگ در TBM و همچنین با در نظر گرفتن کلیه قیود و الزامات طراحی، مدل عددی برای طراحی چیدمان ستاره‌ای ابزارهای برش دیسکی در کله حفار ارایه و با بهره‌گیری از الگوریتم GWO توسعه داده شده است. علاوه بر این عملکرد مدل توسعه داده شده با ارزیابی یک نمونه TBM اجرایی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات دو نوع آرایش ستاره‌ای ابزار برش، آرایش ستاره‌ای ۸ پر و آرایش ستاره‌ای ۱۲ پر مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد ماشین TBM تحت شرایط مختلف چیدمان ابزار برش ارزیابی شده است.

## ۲- روش کار

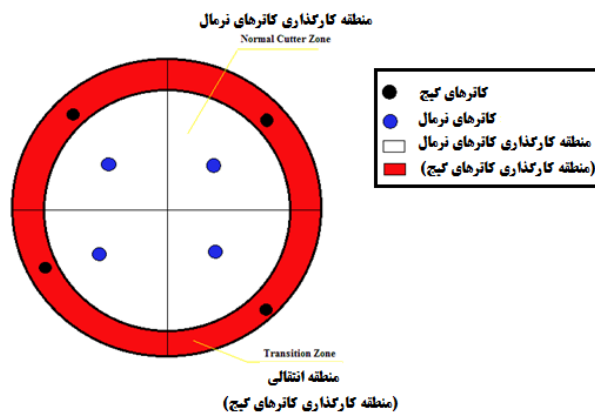
در این مقاله هدف اصلی ارایه مدلی برای طراحی بهینه ابزار برش با آرایش ستاره‌ای در کله حفار ماشین TBM با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی GWO بوده است. بنابراین نیاز است تا ابتدا الزامات و قیود حاکم بر فرآیند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار مورد بررسی قرار گیرد. طراحی چیدمان ابزارهای برش در کله حفار ماشین TBM باید به گونه‌ای پیاده‌سازی شود تا الزامات و قیود فنی-مهندسی و سازه‌ای را در نظر بگیرد و بهترین طرح را ارایه دهد. بنابراین به جهت برپا سازی مدل طراحی بهینه چیدمان ابزار برش با ارزیابی الزامات یا شده می‌توان رابطه اصلی و قیود مساله بهینه‌سازی را تعیین کرد، بر این اساس اصلی‌ترین الزامات و شروط طراحی چیدمان ابزار برش در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱- الزامات و قیود طراحی چیدمان ابزار برش در TBM

طبقه‌بندی	الزامات / قیود	توضیحات
الزامات فنی-مهندسی حفاری	کمینه‌سازی نیروهای خارج از مرکز	مقدار نیروهای خارج از مرکز تا حد امکان کم باشد.
	کمینه‌سازی گشتاورهای خارج از مرکز	مقدار گشتاور خارج از مرکز تا حد امکان کم باشد.
	کمینه‌سازی خطای خروج از مرکز	خطای موقعیت مرکز کل سیستم نباید از مقدار مجاز تجاوز کند و هر چه کوچکتر باشد T بهتر است.
الزامات سازه‌ای TBM	قید همپوشانی در برش	تمام دیسک‌های مجاور باید سنگ را پشت سر هم خرد کنند تا راندمان برش بالا حفظ شود.
	قید عدم هم پوشانی موقعیت کارگذاری ابزارهای برش	تمام ابزارهای برش دیسکی باید در داخل کله حفار قرار داشته باشند، بدون اینکه در بین ابزارهای برش دیسکی همپوشانی داشته باشند.
	قید عدم همپوشانی موقعیت ابزار و تجهیزات کله حفار	موقعیت ابزارهای برش نباید با موقعیت Manholes, Buckets همپوشانی داشته باشد.

کاربردهای مهندسی عملی نشان می‌دهد که ابزارهای برش گیج به دلیل سرعت خطی بالا و سبک مونتاژ (دارای زاویه انحراف) بسیار آسیب‌پذیر بوده‌اند [۱۳، ۲۳].

با توجه به داده‌های آماری و تجارب اجرایی، شعاع منطقه انتقال در کله حفار حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر برای TBMهای کوچک است [۱۳]، جایی که معمولاً ۶ تا ۸ ابزار برش گیج روی این ناحیه مونتاژ می‌شود. برای TBMهای بزرگ (دارای شعاع بیش از ۳ متر)، شعاع انتقال حدود ۶۰۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر است، که معمولاً ۸ تا ۱۰ ابزار برش گیج روی این ناحیه مونتاژ می‌شود. شعاع منطقه انتقال باید یک مقدار معقول تنظیم شود. اگر خیلی کم باشد، تعداد ابزارهای برش گیج کاهش می‌یابد و باعث کاهش عمر مفید ابزارهای برش می‌شود و اگر بیش از حد بزرگ باشد، ضخامت سر ابزار برش افزایش یافته و بار اصلی باربر نیز افزایش می‌یابد. بنابراین شعاع منطقه انتقالی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی بهینه ابزار برش در TBM بوده است. در فرآیند طراحی ابزار برش در کله حفار، منطقه انتقالی برای تعیین موقعیت کارگزاری ابزارهای برش گیج در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۵ منطقه انتقالی در کله حفار TBM به صورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۵- شماتیک مناطق مختلف کارگزاری ابزارهای برش در کله حفار ماشین TBM

چیدمان ابزار برش پیاده‌سازی می‌شود. عمدتاً در مدل‌های مختلف بهره‌گیری از سیستم‌های مختصات کارتیزین برای آرایه موقعیت نقاط رایج بوده است اما با توجه به هندسه کله حفار ماشین TBM که به صورت دایره است، سیستم مختصات قطبی به کارگیری شده است. در این سیستم مبدا مختصات مرکز دایره کله حفار بوده و موقعیت مرکز هر ابزار برش بر اساس طول شعاعی ( $\rho$ ) و زاویه دورانی مثلثاتی ( $\theta$ ) تعریف

با توجه به جدول ۱ مشخص می‌شود که الزامات کمینه‌سازی نیروهای خارج از مرکز، گشتاورهای خارج از مرکز، ۳ خطای خروج از مرکزیت به عنوان ارکان کلیدی تشکیل رابطه اصلی مساله بهینه‌سازی مدنظر بوده است. همچنین قیدهای برش متوالی، عدم هم‌پوشانی موقعیت ابزارهای برش، عدم هم‌پوشانی تجهیزات کله حفار به عنوان قیدهای مساله بهینه‌سازی باید در نظر گرفته شود.

علاوه بر موارد یاد شده (جدول ۱) در فرآیند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار TBM الزاماتی برای تعیین موقعیت ابزارهای برش نرمال و گیج بر اساس ماهیت به کارگیری آن‌ها مطرح بوده است. ابزارهای برش نرمال به عنوان ابزارهای اصلی برش سنگ سخت در بدنه کله حفار قرار گرفته و بر اساس حرکت و اعمال نیروی پیشران با چرخش موجب برش سنگ می‌شود. ابزارهای برش گیج در منطقه انتقالی قرار دارند. نقش اصلی ابزارهای برش گیج حفظ هندسه تونل و کاهش لرزش کله حفار بوده است. همچنین ابزارهای برش گیج دارای زاویه انحراف ( $\gamma$ ) نسبت به مرکز کله حفار بوده است، به گونه‌ای که این زاویه انحراف در ابزارهای برش نرمال معادل با صفر در نظر گرفته شده و محور دوران ابزارهای برش نرمال در راستای شعاع کله حفار پیاده‌سازی می‌شود.

## ۲-۱- بررسی پارامتریک موقعیت ابزارهای برش در کله حفار ماشین TBM

در راستای ایجاد و برپاسازی مدل بهینه‌یابی طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار، نیاز است تا موقعیت ابزار برش به صورت پارامتریک توصیف شود. با تعریف پارامتریک موقعیت تجهیزات ابزار برش در کله حفار مسیر تدوین رابطه‌ها، شرایط و قیدهای مساله در راستای دستیابی به مدل طراحی بهینه

پیش تعیین شده، پیاده‌سازی می‌شود. بر این اساس در گام اول ابتدا نوع چیدمان ستاره‌ای (ستاره‌ای ۸ پر، ستاره‌ای ۱۲ پر) تعیین می‌شود. با تعیین تعداد شاخه‌های چیدمان ستاره‌ای کل صفحه دایره‌ای کله حفار بر اساس تعداد شاخه‌های انتخاب شده به مجموعه‌ای برای جستجوی بهترین موقعیت ابزارهای برش تقسیم می‌شود. به عنوان مثال با تعیین نوع چیدمان ستاره‌ای ۸ پر، کل صفحه کله حفار به ۸ بخش مساوی تقسیم می‌شود. بر این اساس با در نظر گرفتن پارامتر  $m$  به عنوان تعداد شاخه‌های ستاره، مجموعه جستجو ( $E$ ) برای تعیین موقعیت زاویه‌ای ابزارهای برش نرمال به صورت رابطه ۲ تعریف شده است [۲۲]:

$$E_i = i(2\pi/m) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

بنابراین برای تعیین موقعیت بهینه ابزارهای برش نرمال با در نظر گرفتن فضای جستجوی فاصله از مرکز (پارامتر  $\rho$ ) بین صفر و تا مرز ناحیه انتقالی و پارامتر زاویه دوران (پارامتر  $\theta$ ) بر اساس فضای جستجوی  $E$  که بر اساس رابطه ۲ محاسبه شده است، فرآیند تعیین موقعیت بهینه ابزارهای برش پیاده‌سازی می‌شود. برای تعیین موقعیت ابزارهای برش گنج فضای جستجوی نامحدود در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که پارامتر  $\rho$  در فاصله بین مرز ناحیه انتقالی تا شعاع کله حفار و پارامتر  $\theta$  بین صفر تا  $2\pi$  موقعیت‌یابی می‌شود. با توجه به توضیحات یاد شده، فضای جستجو برای تعیین موقعیت بهینه ابزارهای برش نرمال و گنج در چیدمان ستاره‌ای بر اساس رابطه ۳ و ۴ است [۲۲]:

$$\theta_i \in \{\theta \mid \theta = \theta_i + i(2\pi/m), i = 1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

$$\text{if } \rho_i \in \{\text{Normal cutter Zone}\}$$

$$\theta_i \in \{0, 2\pi\} \quad \text{if } \rho_i \in \{\text{Transition zone}\} \quad (4)$$

### ۲-۳- مدل بهینه‌یابی

در راستای برپاسازی مدل بهینه‌یابی برای طراحی بهینه چیدمان ستاره‌ای با در نظر گرفتن کلیه الزامات و قیود طراحی (جدول ۱) و همچنین با توجه به روابط حاکم بر ساختار چیدمان ستاره‌ای، الگوریتم عددی تدوین شده است. بر این اساس رابطه اصلی بهینه‌یابی از ۳ بخش مجزا تشکیل شده است که با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی GWO کمینه‌سازی

می‌شود. علاوه بر این زاویه انحراف ابزار برش ( $\gamma$ ) هم به عنوان سومین پارامتر در تعیین موقعیت ابزارهای برش معرفی می‌شود. با توجه به سیستم تعریف شده موقعیت هر ابزار برش به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود [۲۲]:

$$L_i = (\rho_i, \theta_i, \gamma_i)^T \in R^3 \quad (1)$$

که در آن:

$i$ : شماره کاترها

$T$ : فرم ماتریسی پارامترهای ( $\rho$ )، ( $\theta$ ) و ( $\gamma$ )

در شکل ۲ موقعیت ابزار برش به صورت پارامتریک نمایش داده شده است با توجه به هندسه کله حفار و سیستم مختصات تعریف شده، کرانه تغییرات هر یک از ۳ پارامتر ارایه شده در رابطه ۱ عبارت است از: پارامتر  $\rho$  دارای مقادیری بین صفر و شعاع کله حفار، پارامتر  $\theta$  دارای مقادیری بین صفر و  $2\pi$  و پارامتر  $\gamma$  دارای مقادیری بین صفر و  $\pi/2$  بوده است.

تعیین موقعیت بهینه برای ابزارهای برش منوط به تعیین مقادیر بهینه برای ۳ پارامتر ( $\rho, \theta, \gamma$ ) بوده است. علاوه بر این با بررسی ابزارهای برش نرمال و گنج مشخص می‌شود که مقادیر زاویه انحراف برای ابزارهای برش نرمال معادل با صفر بوده است، بنابراین در بهینه‌یابی موقعیت ابزارهای برش نرمال دو پارامتر  $\rho, \theta$  بهینه‌یابی می‌شود ولی برای ابزارهای برش گنج هر ۳ پارامتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علاوه بر این با توجه به ناحیه کارگزاری ابزارهای برش نرمال و گنج مقادیر پارامتر  $\rho$  برای ابزارهای برش نرمال بین صفر تا مرز ناحیه انتقالی بوده است. همچنین این پارامتر برای ابزارهای برش گنج منطقه انتقالی را پوشش می‌دهد و مقادیر آن بین مرز ناحیه انتقالی تا شعاع کله حفار در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۲- رابطه‌های حاکم بر چیدمان ستاره‌ای

با توجه به شماتیک چیدمان ستاره‌ای که در شکل ۴ نمایش داده شد، مشخص می‌شود که در این نوع چیدمان ابزار برش به صورت پره‌های یک ستاره بر صفحه کله حفار قرار می‌گیرند. همچنین با توجه به الزامات طراحی موقعیت ابزارهای برش نرمال و گنج مشخص شد که ابزارهای برش گنج در ناحیه انتقالی و ابزارهای برش نرمال و مرکز در ناحیه خارج از ناحیه انتقالی در صفحه کله حفار قرار می‌گیرند (شکل ۵). فرآیند طراحی چیدمان ستاره‌ای بر اساس تعداد پره‌های ستاره که از

پایه‌سازی فرآیند امتیازدهی به هریک از توابع C1 تا C3 مقادیر بیشینه و کمینه تابع استخراج و مقادیر محاسباتی در هرگام زمانی بین صفر تا یک امتیازدهی می‌شود. مقادیر کمینه هر تابع معادل با صفر و مقادیر بیشینه هریک از توابع C1 تا C3 معادل با مقادیر بیشینه مجاز دستگاه TBM (بر اساس ویژگی‌های دستگاه) بوده است.

تعریف تابع C1: نیروهای خارج از مرکز

$$C_1 = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \quad (6)$$

در رابطه ۶، توابع  $F_x$ ،  $F_y$  برای ابزارهای برش مرکز و نرمال عبارتند از (رابطه ۷ و ۸) [۱۲]:

$$F_x = \sum_{i=1}^Q [F_{Ri} \sin \theta_i + (F_{Si} + F_{ei}) \cos \theta_i] \quad (7)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^Q [-F_{Ri} \cos \theta_i + (F_{Si} + F_{ei}) \sin \theta_i] \quad (8)$$

که در این روابط:

Q: تعداد ابزارهای برش

FR: نیروی غلتشی

FS: نیروی جانبی

Fe: نیروی اینرسی ابزار برش

نیروی جانبی و اینرسی بر اساس روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$F_{Si} = \frac{\tau}{2} (R\phi)^2 \sin\left(\frac{R\phi}{2\rho_i}\right) \quad (9)$$

$$F_{ei} = m\omega^2\rho_i \quad (10)$$

که در این روابط:

$\tau$ : مقاومت برشی سنگ

m: جرم کاتر

$\omega$ : سرعت دورانی کله حفار در دستگاه TBM

مقادیر توابع  $F_x$ ،  $F_y$  برای ابزارهای برش گچی بر اساس روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود [۱۲]:

آن انجام می‌گیرد. در مدل بهینه‌یابی آرایش ستاره‌ای ابتدا با انتخاب نوع چیدمان (ستاره‌ای ۸ پر، ستاره‌ای ۱۲ پر) مقادیر اولیه برای دو پارامتر  $(\rho, \theta_0)$  موقعیت ابزارهای برش در کله حفار بر اساس روابط حاکم بر چیدمان ستاره‌ای (روابط ۲ تا ۴) در فضای جستجو انتخاب و بعد از آن بر اساس رابطه ۵، مقدار رابطه اصلی تعیین می‌شود. بر این اساس رابطه اصلی به شرح رابطه ۵ ارائه می‌شود:

$$\min y = f(X) = (C_1, C_2, C_3) \quad (5)$$

که در آن:

C1: نیروی خارج از مرکز

C2: گشتاور خارج از مرکز

C3: خروج از مرکزیت ابزارهای برش

با در نظر گرفتن کل نیروهای وارد بر ابزارهای برش روابط مکانیکی حاکم تحت هر یک از توابع C1 تا C3 رابطه‌بندی می‌شود. رابطه ۵ یک تابع عملکردی مشتمل بر ۳ تابع نیروی خارج از مرکز، گشتاور خارج از مرکز و خروج از مرکزیت سیستم) است که در هر گام مدل‌سازی (Iteration) مقادیر آن بر اساس روابط ارائه شده در ادامه محاسبه می‌شود. بر این اساس مقادیر ارائه شده برای رابطه اصلی به عنوان امتیاز برای فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. سه پارامتر C1، C2، C3 هریک دارای واحد و بازه عملکردی متفاوت بوده، بنابراین مشخص است که نمی‌توان عملیات جبری را به صورت مستقیم بر این توابع اعمال کرد. بر این اساس امتیاز حاصل از مقادیر هر یک از متغیرهای C1، C2، C3 در رابطه اصلی در نظر گرفته شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، تابع اصلی مساله بهینه‌سازی به شرح رابطه  $f = P(C_1) + P(C_2) + P(C_3)$  بیانگر تابع امتیاز بوده است. فرآیند امتیازدهی به مقادیر توابع C1، C2، C3 بر اساس مقادیر بیشینه و کمینه هر تابع و مقیاس کردن مقادیر بین بازه صفر تا یک بوده است. بر این اساس بیشترین میزان امتیاز هر یک از سه تابع یک و کمترین میزان امتیاز هریک از سه تابع صفر بوده است.  $0 \leq P(C_1) \leq 1$ ،  $0 \leq P(C_2) \leq 1$ ،  $0 \leq P(C_3) \leq 1$

با توجه به توضیحات ارائه شده مقادیر تابع اصلی بهینه‌سازی بین صفر تا ۳ بوده است و هدف مدل بهینه‌یابی یافتن مقادیر کمینه تابع اصلی است:  $0 \leq f \leq 3$ . برای

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^Q \rho_i \cos \theta_i}{Q} \quad (19)$$

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^Q \rho_i \sin \theta_i}{Q} \quad (20)$$

### ۲-۳-۱- قیدهای مساله بهینه‌یابی

با توجه به الزامات و قیود طراحی (جدول ۱) قیدهای حاکم بر مدل بهینه‌سازی در راستای طراحی بهینه چیدمان ابزار برش شامل ۴ قید اصلی به شرح زیر است [۲۲]:

#### الف) قید عدم هم پوشانی موقعیت کاترها

$$g_1(X) = \sum_{i=0}^{Q-1} \sum_{j=i+1}^Q \Delta V_{ij} \leq 0 \quad (21)$$

که در آن:

$\Delta V_{ij}$ : منطقه همپوشانی بین موقعیت دو کاتر نام و زام

#### ب) قید برش متوالی دو کاتر مجاور

$$g_2(X) = \sum_{i=0}^{Q-1} (\theta_{i+1} - \theta_i) \geq \Delta \theta \quad (22)$$

در رابطه ۲۲، پارامتر  $\Delta \theta$  بیانگر اختلاف زاویه بین دو ابزار برش مجاور بوده است.

#### پ) قید تعادل استاتیکی (محدودیت خروج از مرکزیت کاترها)

$$g_3(X) = |x_m - x_e| - \delta x_e \leq 0 \quad (23)$$

$$g_4(X) = |y_m - y_e| - \delta y_e \leq 0$$

که در آن:

Om(xm, ym): مرکز واقعی کل سیستم

Oe(xe, ye): موقعیت مورد انتظار Om

#### ت) قید موقعیت manholes, buckets

$$g_5(X) = \{\forall i \in \{1, \dots, Q\}: C_i \cap OP \in \emptyset\} \quad (24)$$

رابطه ۲۴ بیانگر عدم قرارگیری موقعیت ابزارهای برش در موقعیت باکت و منهول است.

که در آن:

$$F_x = \sum_{i=1}^Q [F_{Ri} \sin \theta_i + F_{bi} \cos \theta_i] \quad (11)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^Q [-F_{Ri} \cos \theta_i + F_{bi} \sin \theta_i] \quad (12)$$

که در روابط ۸ و ۹ پارامتر Fb بیانگر تاثیر زاویه انحراف کاتر (γ) بر نیروی اعمالی است و بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$F_{bi} = F_{ei} + F_{Si} \cos \gamma_i - F_{Ni} \sin \gamma_i \quad (13)$$

تعریف تابع C2: گشتاور خارج از مرکز

$$C_2 = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴، Mx, My برای ابزارهای برش به طبق رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ تعریف می‌شود [۱۲]:

$$(15)$$

$$M_x = \sum_{i=1}^Q [-F_{Ni} \rho_i \sin \theta_i + M_i \sin \theta_i + F_{ei} r \sin \theta_i] \quad (16)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^Q [-F_{Ni} \rho_i \cos \theta_i + M_i \cos \theta_i + F_{ei} r \cos \theta_i]$$

در روابط ۱۵ و ۱۶ پارامتر M گشتاور ابزارهای برش است که بر اساس رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$M_i = \frac{m \omega^2 r}{2} \rho_i \quad (17)$$

تعریف تابع C3: خروج از مرکزیت

$$C_3 = \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \quad (18)$$

در رابطه ۱۸، دو پارامتر Xm و Ym بر اساس روابط ۱۹ و ۲۰ تعریف می‌شود:

$C_i$ : موقعیت کاترها

$OP$ : محدوده موقعیت منهول و باکت در کله حفار

بر این اساس  $C_i \cap OP \in \emptyset$  بیانگر عدم قرارگیری موقعیت کاترها در مکان Manholes, Buckets است.

#### ۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری GWO

الگوریتم گرگ‌های خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته‌جمعی گرگ‌ها ارایه شده است و ۴ به ترتیب فرمول‌بندی شده است [۳۲]. طبق سلسله مراتب زندگی گروهی گرگ آلفا ( $\alpha$ )، گرگ حاکم نیز در گروه نامیده می‌شود و اساساً مسوول تصمیم‌گیری درباره شکار، جای خواب و زمان حرکت است. دومین سطح درجه‌بندی گرگ‌های خاکستری بتا ( $\beta$ ) است، بتاها گرگ‌های تحت امر آلفا هستند که به آلفا در تصمیم‌گیری و دیگر فعالیت‌های گروه کمک می‌کنند. گرگ بتا، احتمالاً بهترین کاندید برای آلفا شدن است و نقش یک معاون را برای آلفا و ناظم را برای گروه بازی می‌کند. پایین‌ترین طبقه گرگ خاکستری امگا ( $\omega$ ) است. گرگ‌های امگا نقش قربانی را برای سایر اعضای گروه دارند. آن‌ها آخرین گرگ‌هایی‌اند که اجازه خوردن غذا را دارند. اگر گرگ آلفا، بتا یا امگا نباشد او فرمانبردار یا دلتا ( $\delta$ ) نامیده می‌شود. گرگ‌های دلتا از آلفاها و بتاها تبعیت و به امگاها حکمرانی می‌کنند. در شکل ۶ طبقه‌بندی و سلسله مراتب زندگی گرگ‌های خاکستری نمایش داده شده است.



شکل ۶- سلسله مراتب گرگ خاکستری (تسلط و حکمرانی از بالا به پایین کاهش می‌یابد). [۳۲]

برای مدلسازی ریاضی حکومت اجتماعی گرگ‌ها هنگام طراحی الگوریتم GWO، شایسته‌ترین راه‌حل را گرگ  $\alpha$  نامگذاری می‌کنند. در نتیجه، دومین و سومین راه‌حل‌های بهتر به ترتیب گرگ  $\beta$  و  $\delta$  نامیده شدند. راه‌حل‌های باقیمانده فرض می‌شود که  $\omega$  هستند. بنابراین در الگوریتم GWO، بهینه‌سازی

با  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\delta$  رهبری می‌شود و گرگ‌های  $\omega$  از این سه دسته پیروی می‌کنند. الگوریتم GWO بر اساس این فرآیند، شکار گرگ‌های خاکستری شامل سه مرحله جستجو، محاصره و شکار است که به شرح زیر روابط آن تعریف شده است:

مرحله جستجو: ردگیری، وادار به فرار کردن و نزدیک شدن به شکار، روابط ارایه شده برای مرحله جستجو عبارت است [۳۲]:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (25)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}\vec{D}$$

که در آن:

$t$ : تکرار فعلی

$A$  و  $C$ : بردار ضرایب

$X_p$ : بردار موقعیت طعمه

$X$ : بردار موقعیت یک گرگ خاکستری

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (26)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2$$

در رابطه ۲۶، مولفه‌های  $a$  به صورت خطی با بالا رفتن تعداد تکرار (از ۲ تا صفر) کاهش می‌یابد و  $r_1$  و  $r_2$  بردارهای تصادفی (بین ۰ و ۱) است. بر اساس روابط ۲۵ و ۲۶ یک گرگ خاکستری در موقعیت  $(X, Y)$  می‌تواند موقعیت خود را بر اساس موقعیت طعمه  $(X^*, Y^*)$  بروزرسانی کند و مکان‌های مختلف پیرامون بهترین جواب می‌تواند بر اساس تنظیم مقدار بردارهای  $A$  و  $C$  حاصل شود.

مرحله محاصره: تعقیب، محاصره کردن، به هم زدن کارایی شکار تا اینکه از حرکت بایستد [۳۲]:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (27)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}|$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}|$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (28)$$

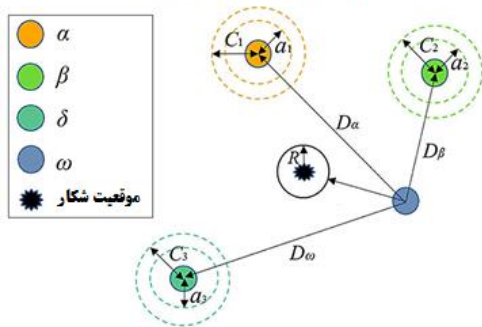
$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta)$$

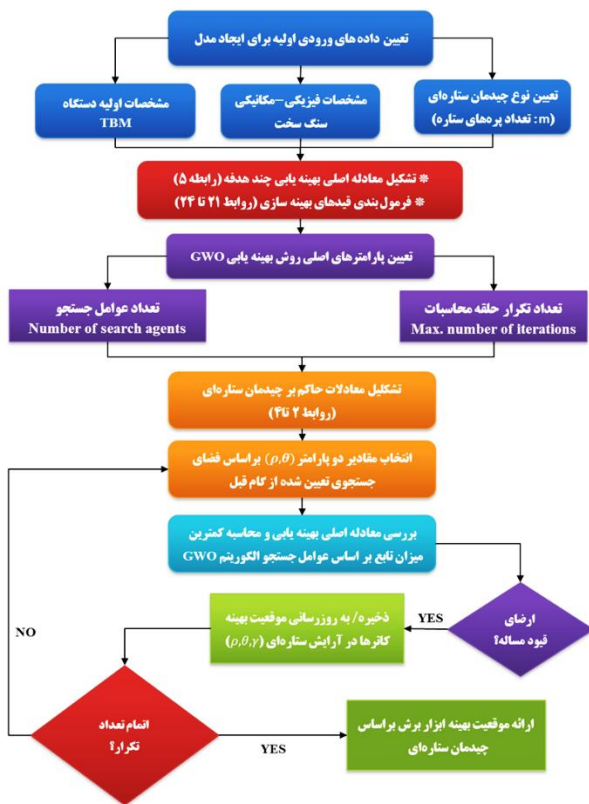
$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (29)$$

بهینه‌سازی ابزار برش در TBM برپاسازی می‌شود. پس از برپاسازی مدل، با انتخاب مقادیر دو پارامتر  $(\rho, \theta)$  بر اساس فضای جستجوی تعریف شده با توجه به روابط حاکم بر چیدمان ستاره‌ای (روابط ۲ تا ۴) ابتدا موقعیت ابزارهای برش تعیین و مقدار رابطه اصلی بهینه‌یابی (رابطه ۵) محاسبه می‌شود، در نهایت با بهره‌گیری از الگوریتم GWO مدل بهینه‌یابی حل شده و موقعیت بهینه ابزارهای برش در چیدمان ستاره‌ای محاسبه و ارزیابی می‌شود. در شکل ۸، مدل بهینه‌یابی چیدمان ستاره‌ای ابزار برش بر اساس الگوریتم GWO ارزیابی شده‌است.

موقعیت یابی و حرکت به سمت شکار



شکل ۷- بردار موقعیت و بروزآوری گرگ‌های خاکستری



شکل ۸- مدل بهینه‌یابی چیدمان ستاره‌ای ابزار برش بر اساس الگوریتم GWO

گرگ‌های خاکستری این توانایی را دارند تا محل یک طعمه را تشخیص دهند و آن‌ها را احاطه کنند. شکار معمولاً به وسیله گرگ آلفا هدایت می‌شود. گرگ‌های بتا و دلتا ممکن است در شکار در بعضی مواقع مشارکت داشته باشند. با این حال در یک فضای جستجوی محدود، هیچ ایده‌ای درباره محل بهینه (طعمه) وجود ندارد. به جهت شبیه‌سازی ریاضی‌وار رفتار شکارگونه گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود که آلفا (بهترین جواب)، بتا و دلتا اطلاع خوبی درباره پتانسیل محل طعمه دارند. بنابراین ۳ جواب بهتر بدست آمده تاکنون را ذخیره شده و بقیه عوامل جستجو را باید موقعیت‌های خود را بر اساس موقعیت عوامل بهتر به‌روزرسانی کنند. در شکل ۷ شماتیک به‌روزرسانی موقعیت گرگ‌ها در فرآیند شکار- مرحله محاصره نمایش داده شده است.

در شکل ۷، پارامتر  $D$  بیانگر فاصله هر گرگ تا موقعیت شکار است که از رابطه ۲۷ و بر اساس دو پارامتر  $a$  و  $c$  که در رابطه ۲۶ معرفی شد، به روزرسانی و تعیین می‌شود.

مرحله حمله: شروع حمله نهایی به سمت شکار. گرگ‌های خاکستری شکار را با حمله به طعمه زمانی که از حرکت باز می‌ایستد خاتمه می‌دهند. به این منظور با کاهش مقدار پارامتر  $a$  فرآیند پیاده‌سازی می‌شود. علاوه بر این محدوده نوسان بردار  $A$  نیز بر حسب  $a$  کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر  $a$  یک مقدار تصادفی است در بازه  $[-2a, 2a]$  جایی که  $a$  از  $2$  تا صفر با بالا رفتن تعداد تکرار کاهش می‌یابد. زمانی که مقادیر تصادفی  $A$  در بازه  $[-1, 1]$  است، موقعیت بعدی یک عامل جستجو می‌تواند در هر موقعیتی بین موقعیت کنونی و موقعیت طعمه باشد.

## ۲-۵- الگوریتم مدل عددی طراحی بهینه چیدمان ستاره‌ای

در این مقاله به جهت ارزیابی مدلی برای طراحی بهینه چیدمان ستاره‌ای ابزار برش در کله حفار TBM، بر اساس الزامات و قیود طراحی و همچنین روابط حاکم بر آرایش ستاره‌ای الگوریتم عددی با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی فراابتکاری GWO توسعه داده شده است. بر اساس مدل پژوهش ابتدا داده‌های ورودی که شامل سه بخش اصلی، مشخصات دستگاه TBM، مشخصات فیزیکی- مکانیکی سنگ سخت (جبهه‌کار) و نوع چیدمان ستاره‌ای (ستاره‌ای ۸ پر، ستاره‌ای ۱۲ پر) به مدل ارزیابی می‌شود. پس از این مرحله بر اساس روابط ارزیابی شده، رابطه (۵ تا ۲۰)، رابطه اصلی بهینه‌سازی چند هدفه به همراه رابط قیدهای اصلی مسأله (روابط ۲۱ تا ۲۴) تشکیل می‌شود و مدل اصلی طراحی

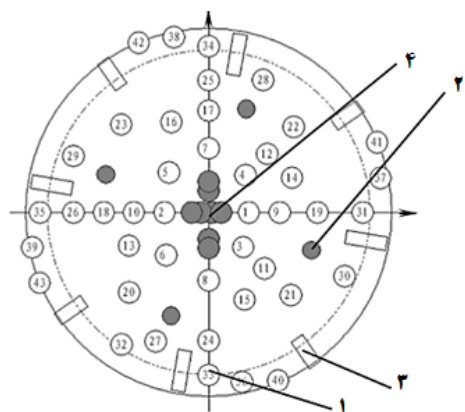
(جدول های ۲ تا ۴)، مدل طراحی بهینه چیدمان ستاره‌ای ابزار برش برای دو نوع چیدمان ستاره‌ای ۸ پر و چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر برپاسازی و موقعیت بهینه ابزارهای برش نرمال و گیج با چیدمان ستاره‌ای براساس الگوریتم بهینه‌سازی GWO ارایه شده است. برای برپاسازی مدل بهینه‌یابی علاوه بر پارامترهای اولیه دستگاه و ویژگی‌های فیزیکی سنگ سخت، لازم است تا دو پارامتر الگوریتم GWO یعنی (تعداد عامل‌های جستجو و تعداد تکرار الگوریتم) مشخص شود، برای این منظور تعداد عامل‌های جستجو معادل با ۳۰ و تعداد تکرار معادل با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل

جدول ۲- موقعیت Manhole در TBM مدل پایه [۳۴]

شماره منهول	۱	۲	۳	۴
$\rho$ (mm)	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰
$\theta$ (rad)	۱,۲۲۱۷	۲,۷۹۳	۴,۳۶۳	۵,۹۳۴

جدول ۳- ابعاد و موقعیت Bucket در TBM مدل [34]

شماره باکت	$\rho$ (mm)	$\theta$ (rad)	طول (میلی‌متر)	عرض (میلی‌متر)
۱	۳۷۰۰	۰,۶۱۱	۷۰۰	۳۰۰
۲	۳۵۰۰	۱,۳۹۶	۹۰۰	۳۰۰
۳	۳۷۰۰	۲,۱۸۲	۷۰۰	۳۰۰
۴	۳۵۰۰	۲,۹۶۷	۹۰۰	۳۰۰
۵	۳۷۰۰	۳,۷۵۳	۷۰۰	۳۰۰
۶	۳۵۰۰	۴,۵۳۸	۹۰۰	۳۰۰
۷	۳۷۰۰	۵,۳۲۳	۷۰۰	۳۰۰
۸	۳۵۰۰	۶,۱۰۶	۹۰۰	۳۰۰



۱: کاترهای نرمال و گیج ۲: منهول ۳: باکت ۴: کاترهای مرکز

شکل ۹- شماتیک تجهیزات و ابزار برش در مدل مرجع TBM [۳۴]

در مدل محاسباتی ارایه شده به جهت بهره‌گیری از الگوریتم GWO در گام نخست دو پارامتر اولیه، تعداد عامل‌های جستجوگر (تعداد گرگ‌ها) و تعداد حلقه‌های تکرار محاسبات تعیین شده و در نهایت بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری مدل حل می‌شود. همچنین به جهت برقراری قیود و ارضای روابط ارایه شده تحت قیدهای مساله بهینه‌سازی از روش مجازات (پنالتی) استفاده می‌شود، به این صورت که بر اساس مقادیر بدست آمده برای متغیرهای مساله بهینه‌سازی در هر اجرای مدل، اگر قیدی نقض شود، یک مقدار نسبتاً بزرگ به جواب نهایی رابطه اصلی بهینه‌سازی اضافه شده و بر این اساس جواب‌هایی که قیدهای مساله را نقض کرده‌اند از مجموعه جواب‌های مساله خارج می‌شوند.

### ۳- نتایج و بحث

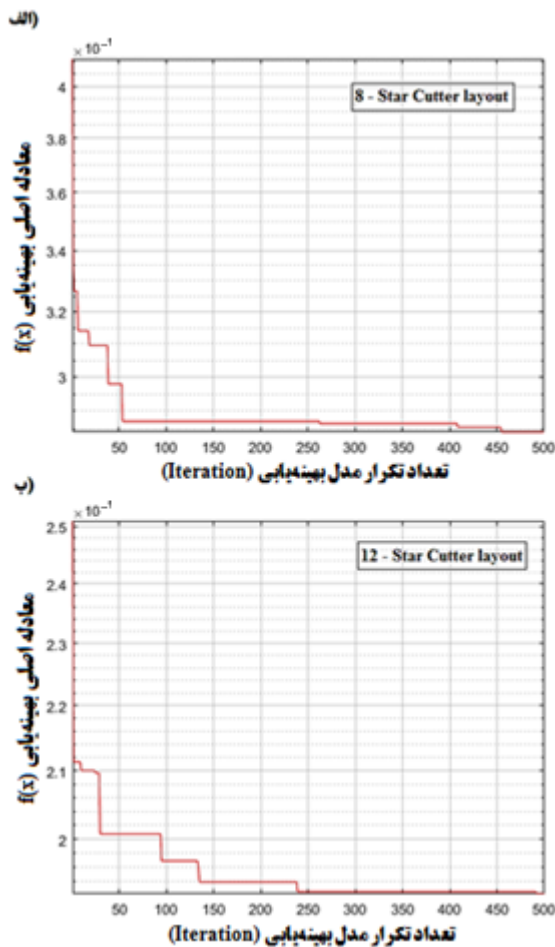
برای ارزیابی عملکرد مدل بهینه‌یابی ارایه شده، فرآیند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار یک مدل اجرایی TBM مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور یک دستگاه TBM سنگ سخت برای حفاری تونل انتقال آب که دارای کله حفاری با ۵۱ کاتر دیسکی (نرمال، گیج، مرکز) و بر اساس الزامات مهندسی دارای ۴ Manhole و ۸ Bucket بوده، مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۴]. TBM مدل مینا در مطالعات مختلف [۱۲، ۱۳، ۲۲، ۳۴] به عنوان مدل اصلی برای ارزیابی عملکرد دستگاه TBM به‌کارگیری شده است. بر این اساس در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل طراحی بهینه چیدمان ستاره‌ای ابزار برش و انجام مقایسات دستگاه TBM یاد شده به عنوان مدل مینا به‌کارگیری شده است. در شکل ۹ شماتیک چیدمان ابزار و تجهیزات برش TBM نمایش داده شده است. تعداد Manhole در این TBM چهار عدد بوده است که موقعیت و ابعاد هندسی آن در جدول ۲ ارایه شده است، همچنین در این دستگاه تعداد Bucket هشت عدد بوده که موقعیت آن‌ها در جدول ۳ ارایه شده است، علاوه بر اطلاعات یاد شده جزئیات و پارامترهای مختلف ماشین حفار، دیسک‌های برش و ویژگی‌های فیزیکی سنگ در جدول ۴ ارایه شده است.

### ۳-۱- نتایج حاصل از اجرای مدل

بر اساس الگوریتم عددی ارایه شده (شکل ۸) مدل طراحی بهینه چیدمان ستاره‌ای ابزار برش در بستر نرم افزار متلب کدنویسی و توسعه داده شده است. با توجه به ویژگی‌ها و پارامترهای متعدد معرفی شده از مدل دستگاه TBM

جدول ۴- پارامترهای دستگاه TBM و سنگ در مدل [34]

مقدار	پارامتر	ویژگی‌های سنگ سخت	ویژگی‌های دستگاه TBM
۷ تا ۱۳	مقاومت برشی پانچ سنگ (مگاپاسکال)		
۵۰ تا ۹۳٫۶	مقاومت فشاری تک محوری سنگ (مگاپاسکال)		
۲٫۱۴ تا ۴	مقاومت کشش سنگ (مگاپاسکال)		
۴٫۰۱۵	شعاع کله حفار دستگاه TBM (متر)		
۰٫۶۲۸۳	سرعت دورانی TBM (rad/s)		
۲۰۰	جرم هر ابزار برش (کیلوگرم)		
۴۸۳	قطر ابزار (میلی‌متر)		
۱۰	عرض ابزار (میلی‌متر)		
۷	نفوذ ابزار (میلی‌متر)		
۸	تعداد ابزارهای برش مرکز		
۳۳	تعداد ابزارهای برش نرمال		
۱۰	تعداد ابزارهای برش گیج		
(۰, ۰)	موقعیت مدنظر برای مرکز کله حفار $(x_e, y_e)$		
(۵, ۵)	میزان خطای خروج از مرکزیت کل سیستم (میلی‌متر) $(\Delta x_e, \Delta y_e)$		
۴	تعداد Manhole		
۲۰۰	شعاع Manhole (میلی‌متر)		
۸	تعداد Bucket		



شکل ۱۰- روند بهینه‌یابی در مدل برای چیدمان ستاره‌ای ابزار برش، الف) چیدمان ۸ پر، ب) چیدمان ۱۲ پر

ب چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر) نمایش داده شده است. بر اساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که در فرآیند بهینه‌یابی برای چیدمان ستاره‌ای ۸ پر تا تکرار ۴۶۰ میزان مقادیر کمینه محاسباتی برای رابطه اصلی کاهش یافته و عملاً از تکرار ۴۶۰ تا ۵۰۰ مقادیر کمینه محاسباتی برای رابطه اصلی ثابت و معادل با  $2.8e-1$  بوده است، همچنین با توجه به شکل (۱۰-ب) برای طراحی چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر مقادیر کمینه رابطه اصلی تا تکرار ۲۴۰ کاهش یافته و عملاً از تکرار ۲۴۰ به بعد مقادیر کمینه محاسباتی برای رابطه اصلی ثابت و معادل با  $1.9e-1$  بوده است. بر این اساس انتخاب ۵۰۰ تکرار برای برپاسازی مدل بهینه‌یابی مناسب بوده است.

بهینه‌یابی اجرا و موقعیت بهینه ابزارهای برش بر اساس کمینه‌سازی رابطه اصلی (رابطه ۵) و با ارضای قیدهای مساله (روابط ۲۱ تا ۲۴) برای دو نوع چیدمان ستاره‌ای (۸ پر و ۱۲ پر) ارایه شده است. در نمودار شکل (۱۰-الف) و (۱۰-ب) میزان مقادیر حاصل از تابع اصلی مدل بهینه‌یابی بر اساس تعداد تکرار مدل (روند بهینه‌یابی) برای چیدمان‌های ستاره‌ای ۸ پر و ۱۲ پر به ترتیب ارایه شده است. پس از اجرای مدل، اتمام حل و اخذ نتایج، موقعیت بهینه ابزارهای برش نرمال و گیج استخراج شده است، نتایج حاصل به صورت شماتیک در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰، روند بهینه‌یابی بر اساس تعداد تکرار الگوریتم GWO برای رابطه اصلی بر اساس دو نوع چیدمان ستاره‌ای (شکل ۱۰-الف چیدمان ستاره‌ای ۸ پر، شکل ۱۰-ب)

شده است. در این پژوهش نسبت به چیدمان اصلی دستگاه ۴ پارامتر اصلی، نیروی جانبی کل دستگاه TBM، گشتاور خارج از مرکز دستگاه TBM، ارزیابی میزان خروج از مرکزیت کل سیستم، عدم همپوشانی موقعیت ابزارها و برش های ناموفق مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

### ۳-۲-۱- ارزیابی نیروی جانبی کل دستگاه TBM (پارامتر $F_S$ )

پارامتر  $F_S$  بیانگر نیروی جانبی کل دیسک های برش دستگاه TBM است که از رابطه ۹ محاسبه می شود. در رابطه ۳۰،  $n$  بیانگر تعداد ابزارهای برش و  $F_{Si}$  معرف نیروی جانبی برای کاتر  $i$ ام بوده است [۲۲].

$$F_S = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{Si} \quad (30)$$

### ۳-۲-۲- ارزیابی گشتاور خارج از مرکز دستگاه TBM (پارامتر $M_V$ )

پارامتر  $M_V$  بیانگر گشتاور خروج از مرکز کل سیستم TBM است و بر اساس رابطه ۱۷ محاسبه می شود. در رابطه ۳۱، پارامتر  $M_{Vi}$  معرف گشتاور خروج از مرکز برای ابزار برش  $i$ ام بوده است [۲۲].

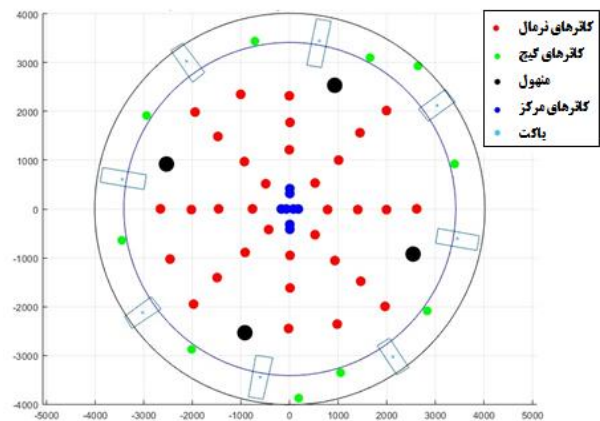
$$M_V = \sum_{i=1}^n \vec{M}_{Vi} \quad (31)$$

### ۳-۲-۳- ارزیابی میزان خروج از مرکزیت کل سیستم ( $X_m, Y_m$ )

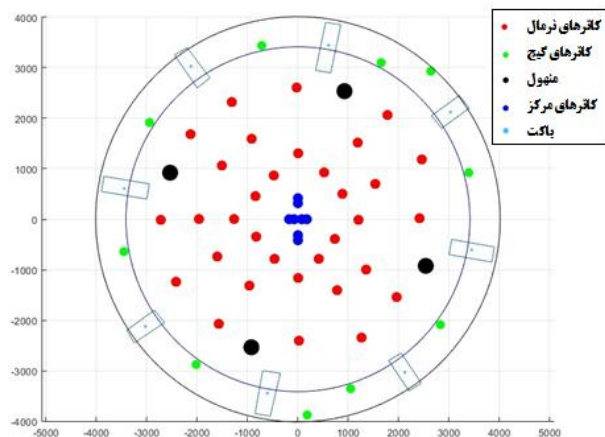
پس از چیدمان ابزارهای برش لازم است تا میزان خروج از مرکزیت کل سیستم کله حفار TBM بر اساس موقعیت ارایه شده برای ابزارهای برش مورد بررسی قرار گیرد، مقادیر  $X_m$  و  $Y_m$  نباید از حد مجاز خروج از مرکزیت دستگاه  $(\Delta x_e, \Delta y_e)$  فراتر رود (جدول ۳، خطای خروج از مرکزیت کل سیستم). برای محاسبه میزان خروج از مرکزیت سیستم از رابطه های ۱۹ برای محاسبه  $X_m$  و ۲۰ برای محاسبه  $Y_m$  استفاده شده است.

### ۳-۲-۴- ارزیابی قید عدم همپوشانی موقعیت ابزارها و برش های ناموفق

یکی از پارامترهای مهم در بررسی چیدمان ارایه شده



شکل ۱۱- شماتیک چیدمان ستاره های ۸ پر (8-Star) بهینه ابزار برش در TBM بر اساس مدل طراحی پژوهش



شکل ۱۲- شماتیک چیدمان ستاره های ۱۲ پر (12-Star) بهینه ابزار برش در TBM بر اساس مدل طراحی پژوهش

در شکل های ۱۱ و ۱۲، خروجی مدل عددی طراحی بهینه چیدمان ستاره های ابزار برش که بیانگر موقعیت بهینه ابزار برش بر اساس چیدمان ستاره های ۸ پر و ۱۲ پر بوده، به ترتیب نمایش داده شده است. در این شکل ها، دایره های توپر قرمز رنگ معرف موقعیت کارگذاری ابزارهای برش نرمال و دایره های توپر سبز رنگ نمایش دهنده ابزارهای برش گیج بوده که بر اساس اجرای مدل موقعیت آنها بدست آمده است. علاوه بر این در این شکل ها موقعیت ابزارهای برش مرکز با دایره های توپر آبی رنگ، موقعیت Manhole با دایره های توپر مشکی رنگ و همچنین موقعیت Bucket با مستطیل های محیطی فیروزه ای رنگ نمایش داده شده است.

### ۳-۲-۴- ارزیابی عملکرد مدل پژوهش

برای انجام مقایسه بین عملکرد دستگاه TBM با چیدمان بهینه ستاره های (دو نوع ستاره های ۸ پر و ستاره های ۱۲ پر) ارایه

بهینه ستاره‌ای ۸ پر در جدول ۵ و نسبت به چیدمان بهینه ستاره‌ای ۱۲ پر در جدول ۶ ارایه شده است. مقادیر پارامترهای مقایسه‌ای برای چیدمان اصلی دستگاه TBM بر اساس داده‌های دستگاه [۳۴] ارایه شده است.

ارزیابی عدم همپوشانی موقعیت کاترها است.

با توجه به توضیحات ارایه شده بررسی بر روی چهار پارامتر فوق برای مقایسه بین چیدمان ارایه شده و چیدمان اصلی دستگاه TBM انجام گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه عملکرد دستگاه TBM با چیدمان اصلی نسبت به چیدمان

جدول ۵- مقایسه عملکرد دستگاه TBM بر اساس چیدمان اصلی ابزار برش و چیدمان ستاره‌ای ۸ پر بهینه بر اساس مدل پژوهش

پارامتر	چیدمان اصلی	چیدمان ستاره‌ای ۸ پر بهینه	میزان تغییرات (درصد)
نیروی جانبی کل دستگاه $F_S$ (کیلو نیوتن)	۱۵۴,۸۴۰	۳۲,۶۸۹۵	۱۲۲/۱۵ - کیلو نیوتن (۷۸,۸۸ درصد)
گشتاور خروج از مرکز دستگاه $M_v$ (کیلو نیوتن / متر)	۱۱,۵۵۸	۹,۸۲	۱/۷۳۸ - کیلو نیوتن / متر (۱۵,۰۳ درصد)
خروج از مرکزیت $X_m$ (میلی متر)	-۲,۱۳۵	-۱,۲۵	-۰,۸۸۵ میلی متر (۴۱,۴۵ درصد)
خروج از مرکزیت $Y_M$ (میلی متر)	-۰,۲۲۱	-۰,۱۹۹	-۰,۰۲۲ میلی متر (۹,۹۵ درصد)
محدوده همپوشانی موقعیت ابزارهای برش	۰/۰۰	۰	-
تعداد ابزار با برش‌های ناموفق	۴	۰	-۴ (۱۰۰ درصد)

جدول ۶- مقایسه عملکرد دستگاه TBM بر اساس چیدمان اصلی ابزار برش و چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر بهینه بر اساس مدل پژوهش

پارامتر	چیدمان اصلی	چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر بهینه	میزان تغییرات (%)
نیروی جانبی کل دستگاه $F_S$ (کیلو نیوتن)	۱۵۴,۸۴۰	۱۸,۷۴۳۸	۱۳۶,۰۹ - کیلو نیوتن (۸۷,۸۹ درصد)
گشتاور خروج از مرکز دستگاه $M_v$ (کیلو نیوتن / متر)	۱۱,۵۵۸	۸,۸۲	۲,۷۳۸ - کیلو نیوتن / متر (۲۳,۶۸ درصد)
خروج از مرکزیت $X_m$ (میلی متر)	-۲,۱۳۵	-۰,۷۲	-۱,۴۱۵ میلی متر (۶۶,۲۷ درصد)
خروج از مرکزیت $Y_M$ (میلی متر)	-۰,۲۲۱	-۰,۱۷۵	-۰,۰۴۶ میلی متر (۲۰,۸۱ درصد)
محدوده همپوشانی موقعیت ابزارهای برش	۰/۰۰	۰	-
تعداد ابزار با برش‌های ناموفق	۴	۰	-۴ (۱۰۰ درصد)

نمایش داده شده است، بر اساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که نیروی جانبی کل دستگاه  $F_S$  بر اساس چیدمان بهینه ابزار برش در چیدمان ستاره‌ای ۸ پر به میزان ۱۲۲/۱۵ کیلو نیوتن و

در جدول‌های ۵ و ۶ پارامترهای مختلف عملکرد ماشین TBM بر اساس چیدمان اصلی دستگاه نسبت به چیدمان بهینه ستاره‌ای (۸ پر، ۱۲ پر) ارایه شده با مدل بهینه‌یابی پژوهش

درصد و خروج از مرکزیت  $Y_M$  حدوداً ۱۱ درصد در چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر نسبت به چیدمان ستاره‌ای ۸ پر کاهش بیشتری یافته است که بیانگر عملکرد بهتر ماشین TBM با این نوع چیدمان ابزار برش بوده است.

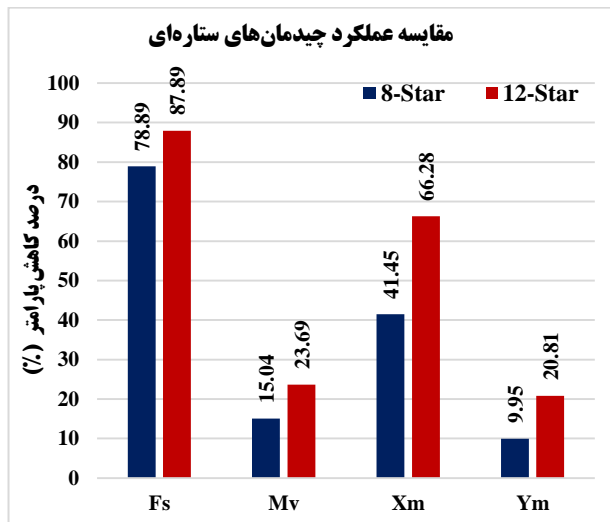
#### ۴- جمع‌بندی

در این پژوهش به هدف ارزیابی چیدمان ستاره‌ای ابزار برش در ماشین حفاری مکانیزه TBM مطالعاتی با بهره‌گیری از روش مدلسازی عددی تعریف و پیاده‌سازی شده است. در این راستا ابتدا بر اساس الزامات طراحی چیدمان ابزار برش (الزامات فنی-مهندسی و الزامات سازه‌ای کله حفار) در کله حفار ماشین TBM و همچنین با توجه به روابط حاکم بر ساختار چیدمان ستاره‌ای، مدلی با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری GWO برای طراحی بهینه چیدمان ابزار برش در TBM توسعه داده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل بهینه‌یابی و بررسی اثر چیدمان ستاره‌ای بهینه در عملکرد ماشین حفاری، یک دستگاه ماشین TBM که کلیه مشخصات هندسی، جزییات برش، ابزارهای برش، تجهیزات و همچنین ویژگی‌های فیزیکی جبهه کار در عملیات حفاری موجود بوده، انتخاب شده و عملکرد TBM تحت دو شرایط چیدمان اصلی ابزار برش و چیدمان بهینه ستاره‌ای ابزار برش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در این پژوهش در راستای ارزیابی عملکرد ماشین TBM با چیدمان ستاره‌ای، دو نوع چیدمان ستاره‌ای چیدمان ستاره‌ای ۸ پر، چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر با بهره‌گیری از مدل پژوهش طراحی و عملکرد آن نسبت به چیدمان اصلی ابزار برش مورد مقایسه قرار گرفته است. با بررسی نتایج کلی حاصل از عملکرد دستگاه TBM با آرایش ستاره‌ای بهینه ابزار برش مشخص می‌شود که عملکرد TBM در شرایط پیاده‌سازی چیدمان ستاره‌ای ابزار برش (در هر دو نوع ۸ پر و ۱۲ پر) نسبت به شرایط اصلی (چیدمان اولیه مدل ارایه شده با سازنده دستگاه) از نقطه نظر مهندسی حفاری (افزایش بازده و پیشروی حفاری) بهبود قابل توجهی یافته است.

مهم‌ترین نتیجه حاصل از این پژوهش ارایه یک مدل جامع و کارآمد برای طراحی چیدمان ستاره‌ای بهینه ابزار برش در ماشین TBM بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی GWO بوده که در بستر نرم افزار متلب کدنویسی و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل ارایه شده قابلیت پیاده‌سازی تحت شرایط مختلف عملیاتی و برای انواع مختلف ماشین‌های TBM را دارا

در چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر ۱۳۶/۰۹ کیلونیوتن نسبت به چیدمان اصلی ابزار برش کاهش یافته است. همچنین میزان گشتاور خروج از مرکز در چیدمان ستاره‌ای ۸ پر به میزان ۱/۷۳۸ و در چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر به میزان ۲/۷۳۸ کیلونیوتن بر متر کاهش یافته است.

علاوه بر این مقادیر خروج از مرکزیت کل سیستم  $O(X_m)$  در چیدمان ۸ پر به میزان ۰/۸۸۵ و در چیدمان ۱۲ پر به میزان ۱/۴۱۵ میلی‌متر برای  $X_m$  و ۰/۰۲۲ و ۰/۰۴۶ میلی‌متر برای  $Y_M$  کاهش داشته است، با توجه به مقادیر ارایه شده و مقایسه نتایج حاصل، مشخص می‌شود که عملکرد دستگاه TBM بر اساس مدل بهینه‌یابی چیدمان ستاره‌ای در هر دو نوع ستاره‌ای ۸ پر و ستاره‌ای ۱۲ پر ابزار برش بهبود چشم‌گیری نسبت به چیدمان اصلی دستگاه داشته است.



شکل ۱۳- مقایسه عملکرد TBM بر اساس دو چیدمان ستاره‌ای ۸ پر و ۱۲ پر

در راستای ارزیابی و مقایسه عملکرد دستگاه TBM تحت شرایط دو نوع چیدمان ستاره‌ای ابزار برش، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل (جدول‌های ۵ و ۶) بر اساس سه پارامتر نیروی جانبی کل دستگاه TBM، گشتاور خارج از مرکز دستگاه TBM، میزان خروج از مرکزیت کل سیستم انجام و نتایج تحت نمودارهای میله‌ای شکل ۱۳ ارایه شده است. با توجه به نتایج ارایه شده در نمودارهای شکل ۱۳ مشخص می‌شود که ماشین TBM با چیدمان ستاره‌ای ۱۲ پر ابزار برش نسبت به چیدمان ستاره‌ای ۸ پر دارای عملکرد بهتری بوده است به گونه‌ای که میزان نیروی جانبی کل دستگاه حدوداً ۱۰ درصد، گشتاور خروج از مرکز ۸/۶۵ درصد، خروج از مرکزیت  $X_m$  حدوداً ۲۵

cutterhead optimization for TBM [D].

11. Zhao-Huang, Z., & Yong-Li, Q. (2011). Research on the layout of TBM disc cutter, 28(5), 172-177.
12. Sun, H. Y., Guo, W., Liu, J. Q., Song, L. W., & Liu, X. Q. (2018). Layout design for disc cutters based on analysis of TBM cutter-head structure. *Journal of Central South University*, 25(4), 812-830.
13. Huo, J. Z., Zhao, H. F., Zhang, X., Sun, W., & Zhao, Y. (2011). Cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on multi-spiral layout pattern. In *Advanced Materials Research* (Vol. 308, pp. 1288-1291). Trans Tech Publications Ltd.
14. Gong, Q. M., Zhao, J., & Hefny, A. M. (2006). Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization. In *AITES-ITA 2006 congress*, Seoul, South Korea.
15. Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., & Zhao, J. (2006). Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and Underground Spacing Technology*, 21(1), 46-55.
16. Gong, Q. M., Zhao, J., & Jiao, Y. Y. (2005). Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and Underground Spacing Technology*, 20(1), 183-191.
17. Eftekhari, A., Aalianvari, A., & Rostami, J. (2018). Influence of TBM operational parameters on optimized penetration rate in schistose rocks, a case study: Golab tunnel Lot-1, Iran. *Computers and Concrete, An International Journal*, 22(2), 239-248.
18. Moon, T. (2006). A computational methodology for modeling rock cutting with a discrete element method: Prediction of TBM rock cutting performance. Doctoral dissertation. Colorado: Colorado School of Mines.
19. Cardu, M., Iabichino, G., Oreste, P., & Rispoli, A. (2017). Experimental and analytical studies of the parameters influencing the action of TBM disc tools in tunnelling. *Acta Geotechnica*, 12(2), 293-304.
20. Geng, Q., Bruland, A., & Macias, F. J. (2018). Analysis on the relationship between layout and consumption of face cutters on hard rock tunnel boring machines (TBMs). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 279-297.
21. Cigla, M., Yagiz, S., & Ozdemir, L. (2001). Application of tunnel boring machines in underground mine development. 17th International

بوده است. این مدل بر اساس داده‌های اولیه شامل (ویژگی‌های فیزیکی سنگ سخت، ویژگی‌های ابزار برش و هندسه برش) توانایی ارزیابی چیدمان ستاره‌ای بهینه برای ابزارهای برش در ماشین TBM را دارا بوده است. مدل ارزیابی شده قابلیت بکارگیری به صورت فراگیر برای فعالان و طراحان در عرصه حفاری مکانیزه را دارد.

#### منابع

1. Eftekhari, A., & Aalianvari, A. (2019). An overview of several techniques employed to overcome squeezing in mechanized tunnels; A case study. *Geomechanics and Engineering*, 18(2), 215-224
2. Jeong, H. Y., Jeon, S. W., Cho, J. W., Chang, S. H., and Bae, G. J. (2011). "Assessment of cutting performance of a TBM disc cutter for anisotropic rock by linear cutting test." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 508-517 (in Korean).
3. Choi, S. O., & Lee, S. J. (2015). Three-dimensional numerical analysis of the rock-cutting behavior of a disc cutter using particle flow code. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 1129-1138.
4. Yu, S. H. (2007). A study on rock cutting behavior by TBM disc cutter, MSc Thesis, Seoul National University.
5. Bruland A (2000) Hard rock tunnel boring vol 1-10. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
6. Alber M et al (2014) ISRM suggested method for determining the ablativity of rock by the CERCHAR ablativity test. *Rock Mech Rock Eng* 47:261-266. doi:10.1007/978-3-319-07713-0\_7.
7. Macias FJ, Wilfing L, Andersson T, Thuro K, Bruland A (2015) Performance and cutter life assessments in hard rock tunnelling. Paper presented at the EUROCK 2015 and 64th Geomechanics Colloquium Salzburg, Austria.
8. Wang L, Kang Y, Zhao X, Zhang Q (2015) Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis. *Tunneling and Underground Spacing Technology* 50:324-333. doi:10.1016/j.tust.2015.08.003.
9. Macias FJ (2016) Hard rock tunnel boring, performance predictions and cutter life assessments. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
10. Zhang, P. (2009). Design and research on cutter layout and the structural parameters of the

28. Farrokh, E. (2021). Layout design specifications of hard-rock TBM cutterheads at maximum cutter penetration and TBM advance. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 2049.
29. Duan, W., Zhang, L., Zhang, M., Su, Y., Mo, J., & Zhou, Z. (2022). Numerical and experimental studies on the effects of the TBM cutter profile on rock cutting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1), 416-432.
30. Liu, W., Li, A., & Liu, C. (2022). Multi-objective optimization control for tunnel boring machine performance improvement under uncertainty. *Automation in Construction*, 139, 104310.
31. Farrokh, E. (2022). Lace Design Optimization for Hard Rock TBMs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(12), 21-21.
32. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
33. Katibeh, H., & Aalianvari, A. (2012). Common Approximations to the water inflow into Tunnels. *Drainage systems*, 75-88.
34. J. Z. Huo, W. Sun, Jing Chen, P. Su, (2010) Optimal disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on a multi-objective genetic algorithm, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24 (2), 521-528.
22. Huo, J., Sun, W., Chen, J., & Zhang, X. (2011). Disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on different layout patterns. *Computers & industrial engineering*, 61(4), 1209-1225.
23. Sun, W., Ling, J., Huo, J., Guo, L., Zhang, X., & Deng, L. (2013). Dynamic characteristics study with multidegree-of-freedom coupling in TBM cutterhead system based on complex factors. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
24. Huo, J., Wu, H., Yang, J., Sun, W., Li, G., & Sun, X. (2015). Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunnelling field test. *Journal of mechanical science and technology*, 29, 3043-3058.
25. Mazaira, A., & Konicek, P. (2015). Intense rockburst impacts in deep underground construction and their prevention. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1426-1439.
26. Liang, Q., Zhang, D., Coppola, G., Mao, J., Sun, W., Wang, Y., & Ge, Y. (2016). Design and analysis of a sensor system for cutting force measurement in machining processes. *Sensors*, 16(1), 70.
27. Lin, L., Xia, Y., & Wu, D. (2019). Multiobjective optimization design for structural parameters of TBM disc cutter rings based on FAHP and sampga. *Advances in Civil Engineering*, 2019.