

ارزیابی تاثیر چیدمان مارپیچ ابزار برش کاترهد در عملکرد ماشین حفاری مکانیزه TBM

مقاله پژوهشی

محسن آل بویه*؛ علی عالی انوری^۲؛ مجید نوریان بیدگلی^۳

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

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، ali_aalianvari@kashanu.ac.ir

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

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

شماره صفحات: ۲۵۹ تا ۲۷۶

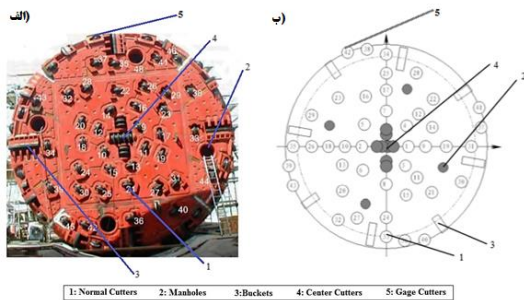
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2024.13052.1477

واژگان کلیدی	چکیده
دستگاه حفاری تونل TBM ابزار برش چیدمان مارپیچ کاترهد الگوریتم GWO	<p>از مهمترین عوامل موثر در عملکرد ماشین حفاری تونل TBM آرایش و چیدمان ابزار برش در کله‌حفار دستگاه بوده که به‌طور مستقیم بر راندمان عملیات حفاری، عمر مفید TBM و عملکرد مناسب ابزار برش تاثیرگذار می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های طراحی چیدمان ابزار برش (الزامات فنی سازه TBM و الزامات مهندسی حفاری) ارائه مدل‌های محاسباتی کارآمد از چالش‌های اصلی محققین بوده است. در این پژوهش به هدف ارزیابی تاثیر چیدمان مارپیچ ابزار برش بر عملکرد ماشین TBM، مدل عددی با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری گرگ‌های خاکستری GWO برای طراحی چیدمان مارپیچ توسعه داده شده است. به جهت ارزیابی عملکرد مدل طراحی توسعه داده شده، فرایند طراحی چیدمان ابزار برش در کله‌حفار یک نمونه اجرایی TBM سنگ مورد ارزیابی قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که چیدمان مارپیچ بهینه ابزار برش باعث کاهش نیروی جانبی کل دستگاه F_s به میزان $130/188KN$ (۸۴/۰۷ درصد) و کاهش گشتاور خروج از مرکز به میزان $2/438KN.m$ (۲۱/۰۹ درصد) نسبت به چیدمان اصلی ابزار برش در کله‌حفار شده است. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود کله‌حفار نشان داد که پیاده‌سازی آرایش مارپیچ ابزار برش در TBM سبب افزایش چشم‌گیر عملکرد TBM از نقطه‌نظر سازه‌ای می‌گردد به‌گونه‌ای که در شرایط بارگذاری بار کل، مقادیر تنش بیشینه در مدل با چیدمان بهینه $13/046MPa$ (۱۶/۶۲ درصد) و میزان تغییر شکل تحت این شرایط بارگذاری $0/135mm$ (۴۱/۴۱ درصد) کاهش یافته است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که چیدمان مارپیچ بهینه ابزار برش در کله‌حفار ماشین TBM هم از نظر مهندسی حفاری (افزایش بازده و پیشروی حفاری) و هم از دیدگاه سازه‌ای ماشین TBM بهبود قابل توجهی یافته است. مهمترین نتیجه حاصل از این پژوهش ارائه یک مدل عددی کارآمد برای طراحی چیدمان مارپیچ بهینه ابزار برش در ماشین TBM بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی GWO بوده است. مدل ارائه شده قابلیت پیاده‌سازی تحت شرایط مختلف عملیاتی و برای انواع مختلف ماشین‌های TBM را دارا بوده است.</p>

۱- مقدمه
برای اهدافی همچون: راه‌سازی، تونل‌های انتقال آب، برق، خطوط راه‌آهن و غیره... محسوب می‌شود. ماشین‌های حفاری TBM دارای انواع مختلفی بوده که با توجه به ویژگی‌های

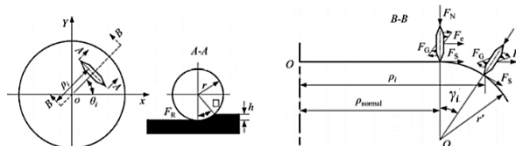
ماشین حفاری مکانیزه تونل (TBM) به عنوان یکی از دستاوردهای نوین مهندسی در حفاری در فضاهای زیرزمینی

ابزارهای برش نرمال، ابزارهای برش گیج، ابزارهای برش مرکزی، منهول و باکت بوده است. در (شکل ۱) کله حفار به همراه تجهیزات و ابزارهای برش در نمونه واقعی ماشین TBM و هم به صورت شماتیک نمایش داده شده است. طراحی چیدمان ابزار برش در ماشین TBM ارتباط نزدیکی با میزان نفوذ آن در سنگ، نیروی برشی و عملکرد مورد انتظار دستگاه دارد. در حین حفاری سه نیروی برشی بر نوک ابزار برش دیسکی اعمال می شود: نیروی نرمال، نیروی غلتشی و نیروی جانبی (شکل ۲).



الف) تجهیزات کله حفار در نمونه واقعی TBM (ب) شماتیک تجهیزات کله حفار

شکل ۱- نشان تجهیزات موجود در کله حفار TBM



شکل ۲- شماتیک نیروهای وارد بر ابزارهای برش نرمال و گیج (Gertsch, et al., 2007)

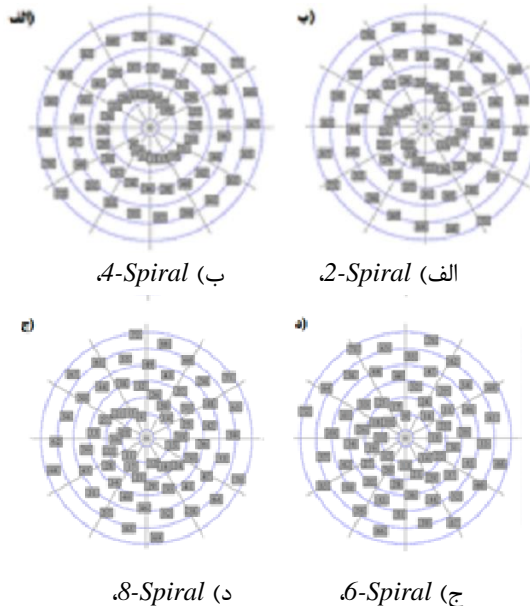
ارزیابی عملکرد ماشین TBM براساس مدل های نیروی برشی در دو دسته: مدل های تئوری-تجربی همچون CSM (Rostami, et al., 1996) و مدل های تجربی همچون NTNU (Rostami, 1997) طبقه بندی می شود. براساس مطالعات آزمایشگاهی مختلف میزان دقت و کارایی مدل CSM نسبت به NTNU تایید گردیده است (Gong, et al., 2006).

فرایند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار ماشین TBM شامل دو مرحله اصلی بوده است: ۱- طراحی فاصله برش (پارامتر S)، ۲- طراحی پلان موقعیت ابزارهای برش نرمال و ابزارهای برش گیج. مرحله اول (طراحی فاصله برش)، طی پژوهش های عددی (Abu Bakar, et al., 2014) و آزمایشگاهی (Anvari, et al., 2010) مختلفی توسط محققین مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا با

محیطی پروژه شامل (خصوصیات خاک محل، خصوصیات سنگ، شرایط سینه کار در مقاطع مختلف، میزان سطح آب زیرزمینی) به کارگیری می شود. همچنین این ماشین های مکانیزه دارای بخش های مختلفی بوده و از نظر ساختاری دارای پیچیدگی های خاص خود می باشند. این نوع ماشین های حفاری تجهیزاتی بسیار گران بوده و به کارگیری آن ها در پروژه های مختلف مستلزم ارزیابی و بررسی دقیق عملکرد آن ها بوده است. کله حفار که در جلوی TBM قرار دارد، به طور مستقیم با سطح تونل (سینه کار) در تماس بوده و عامل کلیدی در حفاری از نقطه نظر کارایی (بهره وری دستگاه و سرعت پیشروی حفاری)، قابلیت اطمینان و پایداری عملیات حفاری بوده است (Zhao-Huang & Young, 2011). طراحی کله حفار در دستگاه TBM شامل طراحی ساختار بدنه دیسک (ابزار برش) و طراحی چیدمان مناسب ابزار برش در چالش اصلی در طراحی چیدمان مناسب ابزار برش در ماشین حفاری، پیاده سازی الزامات فنی مهندسی حفاری (شامل مباحث افزایش بازده عملکردی و شرایط فنی ایده ال برای عملکرد حفاری دستگاه TBM) از یک سو و الزامات طراحی سازه ای کله حفار (شامل قیدهایی برای طرح سازه ای و برقراری مقاومت لازم کله حفار) از سویی دیگر بوده است. بنابراین در طراحی چیدمان ابزار برش در ماشین های TBM با یک مساله بهینه سازی چندهدفه با قیود غیرخطی مواجه بوده ایم، که این مساله باعث بروز پیچیدگی محاسباتی در فرایند طراحی می گردد. 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 خروج از مرکز و ممان های خروج از مرکز را صفر کند. در این شرایط وضعیتی ایده آل برای ابزارهای برش و تکیه گاه های آن ها ایجاد می گردد. اما در عمل به دلیل الزامات فنی مهندسی پیچیده، شرایط سنگ (سینه کار) و الزامات طراحی، همواره سطوحی از خروج از مرکز در نیروها و ممان ها وجود دارد. بر این اساس مطالعه چیدمان ابزارهای برش دیسکی در دستگاه TBM برای کاهش این مشکلات و بهبود عملکرد ابزارهای برش و عمر مفید آن بسیار مهم و حائز اهمیت بوده است (Huo, et al., 2010).

در ماشین TBM کله حفار شامل پنج بخش اصلی:

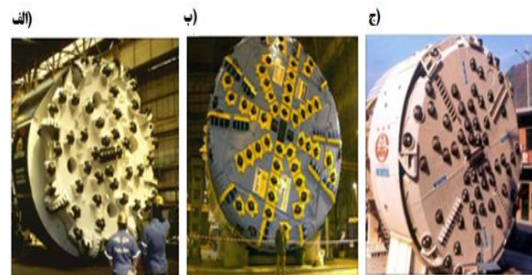
شده‌است. هریک از سه نوع چیدمان ابزار برش دارای مزایا و معایبی از نقطه نظر ارزیابی عملکرد ماشین *TBM* در عملیات حفاری بوده است. چیدمان مارپیچ یکی از انواع آرایش ابزار برش در کله‌حفار می‌باشد که به سبب قرارگیری ابزارهای برش نرمال به صورت حلزونی موجب عملکرد قابل قبول ماشین *TBM* گردیده است. عملکرد قابل قبول چیدمان مارپیچ در مطالعات گنگ و همکاران (۲۰۱۷) مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است (Cigla, et al., 2001). چیدمان مارپیچ بر اساس تعداد حلقه‌های حلزونی شکل ایجاد شده در کله‌حفار به انواع: مولتی مارپیچ، ۲ مارپیچ، ۴ مارپیچ، ۶ مارپیچ و ۸ مارپیچ تقسیم‌بندی شده‌است. در شکل (۳-الف) نوع مولتی مارپیچ و در (شکل ۴) شماتیک انواع مختلف چیدمان مارپیچ نمایش داده شده‌است.



شکل ۴- شماتیک انواع مختلف چیدمان مارپیچ ابزار برش، (Cigla, et al., 2001)

تاکنون مطالعات مختلفی پیرامون طراحی چیدمان ابزار برش در کله‌حفار توسط محققین انجام شده است. در این راستا کیگلا و همکاران (۲۰۰۱) مدل کامپیوتری *CSM* بر اساس روابط نیمه نظری برای تخمین نیروهای برش در طراحی *TBM*‌های سنگ سخت بر اساس مشخصات سر ابزار برش و خواص سنگ ارائه دادند. رستمی (۲۰۰۸) روش‌های مدل‌سازی سر ابزار برش سنگ سخت *TBM* را مورد مطالعه قرار داد. (Rostami, 2008). مدل ارائه شده بر اساس تخمین

بهره‌گیری از ماشین برش خطی (*LCM*) و براساس خصوصیات فیزیک-مکانیکی سنگ سخت مورد آزمایش برش قرار گرفته و فاصله برش محاسبه می‌گردد. پس از تعیین فاصله برش برای طراحی چیدمان ابزار برش الزامات مختلفی را باید مدنظر قرار داد که ارضا نمودن تمام شروط بر پیچیدگی مساله افزوده و به عنوان یکی از چالش‌های اصلی پیش‌روی محققین بوده است. لازم به ذکر است که طراحی فاصله برش در این پژوهش مدنظر نبوده و تعیین چیدمان بهینه ابزار برش هدف اصلی تحقیق می‌باشد. پس از تعیین فاصله برش ابزارهای برش دیسکی، مرحله بعدی اجرای طراحی چیدمان ابزار برش در کله‌حفار بوده است. در طراحی چیدمان ابزارهای برش دیسکی باید بسیاری از الزامات فنی مهندسی و الزامات طراحی ساختاری کله‌حفار برآورده شود. الزامات فنی مهندسی شامل به حداقل رساندن نیروهای خارج از مرکز، گشتاورهای خارج از مرکز سر ابزار برش، ناحیه همپوشانی بین برش‌های ابزار برش و به حداکثر رساندن تعداد برش‌های متوالی بین دو برش دیسکی مجاور است. الزامات طراحی سازه‌ای کله‌حفار شامل الزامات چیدمان باکت‌ها، الزامات چیدمان منهول‌ها و الزامات مونتاژ تجهیزات می‌باشد. همه این الزامات با طراحی چیدمان ابزارهای برش دیسکی تضادهایی را ایجاد می‌نمایند که در زمان طراحی به عنوان قیود مساله باید مدنظر قرار گیرند.



الف) چیدمان مارپیچ، ب) چیدمان ستاره‌ای، ج) چیدمان تصادفی
شکل ۳- آرایش چیدمان مختلف ابزار برش در *TBM*، (Cigla, et al., 2001)

تا به امروز مطالعات نسبتاً جامعی بر ارزیابی و چیدمان ابزار برش در کله‌حفار ماشین *TBM* انجام شده است (Cardu, et al., 2017). به طور کلی چیدمان‌های ارائه شده برای ابزار برش در سه نوع: ۱- چیدمان مارپیچ، ۲- چیدمان ستاره‌ای، ۳- چیدمان تصادفی بوده است. در (شکل ۳) نمایی از سه چیدمان اصلی ابزار برش در ماشین *TBM* نمایش داده

مورد بررسی قرار گرفت (Yang, et al., 2020). فرخ (۲۰۲۱) به ارزیابی تاثیر آرایش ابزار برش بر نفوذ برش و ارائه 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 کله‌حفار بررسی گردید. نتایج مطالعه بر روی ویژگی‌های طراحی چیدمان ابزار برش در کله‌حفار نشان داد که توزیع یکنواخت ابزار برش در کله‌حفار موجب ارتقای بازده عملیات حفاری شده است (Farrokh, 2021). دوان و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی جامع که در قالب مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیاده‌سازی گردید، به بررسی و ارزیابی تاثیر ابزار برش و پروفیل کارگذاری آن در برش سنگ سخت پرداختند (Duan, et al., 2022). لیو 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 (Liu, et al., 2022).

فرخ (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی چیدمان‌های مختلف ابزار برش در ماشین TBM پرداخت و چیدمان‌های ستاره‌ای و مارپیچ ابزار برش در کله‌حفار را مورد مطالعه قرار داد (Farrokh, 2022).

طراحی بهینه و کارآمد چیدمان ابزار برش در کله‌حفار ماشین TBM همواره به عنوان یکی از چالش‌های اصلی پیش روی محققان بوده است. با توجه به سیر مطالعات انجام شده، نیاز به ایجاد یک مدل محاسباتی عملی بر پایه روش‌های محاسباتی پیشرفته و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کارآمد برای طراحی چیدمان ابزار برش مشخص بوده است. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری (GWO) از دسته الگوریتم‌های فراابتکاری و متکی بر جمعیت بوده که توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته جمعی گرگ خاکستری ارائه شده است (Mirjalili, et al., 2014). در ادامه محققین با به‌کارگیری این الگوریتم بهینه‌سازی در حل مسائل مختلف مهندسی بر کارآمدی و عملکرد بی نظیر آن صحنه گذاشته‌اند (Emmanuel, et al., 2021). در این پژوهش هدف اصلی ارائه مدلی جامع برای طراحی

نیروهای برش بوده و ابزار موقفی برای بهینه‌سازی طراحی کله‌حفار و همچنین برای تخمین عملکرد ماشین TBM بوده است (Huo, et al., 2011) هو و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی و ارزیابی چیدمان بهینه ابزار برش در کله‌حفار ماشین TBM سنگ برای انواع مختلف چیدمان پرداختند، که برای بهینه‌یابی موقعیت کارگذاری و مدل طراحی چیدمان از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند (Sun, et al., 2013). مطالعات مختلفی به ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی در چیدمان ابزار برش در کله‌حفار ماشین TBM معطوف بوده است همچون: سان و همکاران (۲۰۱۳)، هو و همکاران (۲۰۱۵) (Huo, et al., 2015)، مازییرا و کونیک (۲۰۱۵) (Mazaira & Konicek, 2015) لیبانگ و همکاران (۲۰۱۶) (Liang, et al., 2016) گنگ و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعاتی به بررسی انواع مختلف چیدمان ابزار برش در کله‌حفار 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 ارائه گردید. سان و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی چیدمان ابزارهای برش در ماشین حفاری TBM را بر اساس آنالیز ساختاری کله‌حفار مورد بررسی قرار داده و با بررسی جزئیات الزامات سازه‌ای و فنی مهندسی فرمول‌بندی نسبتاً جامعی از عملکرد فرایند طراحی چیدمان ابزار برش در کله‌حفار TBM ارائه نمودند. لین و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی چیدمان ابزار برش در ماشین TBM با در نظر گرفتن پارامترهای قابلیت شکستن سنگ، مصرف انرژی، قابلیت تحمل بار، عمر مفید برش دیسکی پرداخت. در این مطالعات یک مدل چند هدفه بهینه‌سازی جهت 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 برش پس از بهینه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی بهبود یافته است.

یانگ و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به ارزیابی طراحی چیدمان تجهیزات کله‌حفار TBM با تمرکز بر تعیین موقعیت بهینه باکت (Bucket) پرداخت، در این پژوهش تاثیر تعداد، زاویه قرارگیری و فاصله بین باکت‌ها بر عملکرد حفاری ماشین

جمع‌بندی می‌توان با ارزیابی الزامات مذکور معادله اصلی و قیود مساله بهینه‌سازی را تعیین نمود. بر این اساس اصلی‌ترین الزامات و شروط طراحی چیدمان ابزار برش به شرح ذیل دسته‌بندی می‌گردد:

- ۱) مقدار نیروهای خارج از مرکز تا حد امکان کم باشد. (کمینه سازی نیروهای خارج از مرکز)
- ۲) مقدار گشتاور خارج از مرکز تا حد امکان کم باشد. (کمینه سازی گشتاورهای خارج از مرکز)
- ۳) خطای موقعیت مرکز کل سیستم نباید از مقدار مجاز تجاوز کند و هر چه کوچکتر باشد بهتر است. (کمینه سازی خطای خروج از مرکز)
- ۴) تمام دیسک‌های مجاور باید سنگ را پشت سر هم خرد کنند تا راندمان برش بالا حفظ شود. (قید همپوشانی در برش)

۵) تمام ابزارهای برش دیسکی باید در داخل سر ابزار برش قرار داشته باشند، بدون اینکه در بین ابزارهای برش دیسکی همپوشانی داشته باشند. (قید عدم هم پوشانی موقعیت کارگذاری ابزارهای برش)

۶) موقعیت ابزارهای برش نباید با موقعیت، *Manholes* *Buckets* همپوشانی داشته باشد. (قید عدم همپوشانی موقعیت ابزار و تجهیزات کله حفار)

با توجه به جمع بندی ارائه شده مشخص می‌گردد که موارد ۱ تا ۳ به عنوان ارکان کلیدی تشکیل معادله اصلی مساله بهینه‌سازی و موارد ۴ تا ۶ به عنوان قیدهای مساله بهینه‌سازی باید به‌کار گرفته شوند.

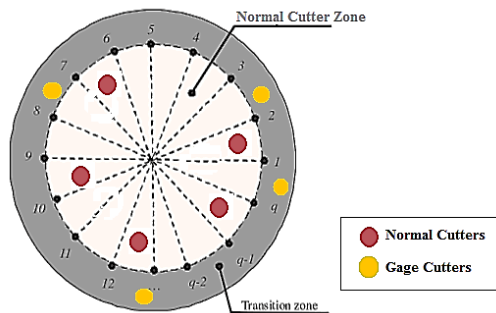
۲-۱- الزامات طراحی ابزارهای برش نرمال و گیج

ابزارهای برش نرمال به عنوان ابزارهای اصلی برش سنگ سخت در بدنه کله‌حفار قرار گرفته و بر اساس حرکت و اعمال نیروی پیشران با چرخش موجب برش سنگ می‌گردند. ابزارهای برش گیج در منطقه انتقالی قرار دارند. نقش اصلی ابزارهای برش گیج حفظ هندسه تونل و کاهش لرزش کله‌حفار بوده است. از دیگر تفاوت‌های بین ابزارهای برش نرمال و ابزارهای برش گیج، اعمال زاویه انحراف (؟) در ابزارهای برش گیج بوده است به گونه‌ای که این زاویه انحراف در ابزارهای برش نرمال معادل با صفر در نظر گرفته می‌شود و محور دوران ابزارهای برش نرمال در راستای شعاع کله‌حفار پیاده‌سازی می‌گردد. کاربردهای مهندسی عملی نشان می‌دهد

بهینه چیدمان مارپیچ ابزار برش در ماشین *TBM* با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری گرگ‌های خاکستری (*GWO*) و ارزیابی تاثیر چیدمان مارپیچ ابزار برش بر عملکرد ماشین *TBM* بوده است. بر این اساس ابتدا با ارزیابی روابط و 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 مارپیچ ابزارهای برش دیسکی در کله‌حفار ارائه 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. همچنین مدل‌سازی عددی بر پایه روش المان محدود (*FEM*) و با بهره‌گیری از نرم افزار آباکوس برای بررسی میزان تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در کله‌حفار طراحی شده بر اساس مدل طراحی توسعه داده شده در این پژوهش نسبت به چیدمان اصلی، انجام شده است.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

در این پژوهش هدف اصلی طراحی بهینه چیدمان مارپیچ ابزار برش در کله‌حفار ماشین *TBM* با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه سازی *GWO* بوده است. در کله‌حفار دیسک‌ها به‌گونه‌ای چیده شده‌اند که هنگام چرخش سر ابزار برش با کل صفحه برش در مسیرهای متحدالمرکز تماس می‌گیرند. فاصله مسیرهای برش و دیسک‌ها بسته به نوع سنگ و سطح سخت برش انتخاب می‌شود. سر ابزار برش چرخان دیسک‌ها را با فشار زیاد روی صفحه سنگ فشار می‌دهد. بنابراین، دیسک‌ها یک حرکت چرخشی-برشی در سطح سنگ ایجاد می‌کنند. فشار در لبه برش ابزارهای برش دیسکی از مقاومت فشاری سنگ بیشتر می‌شود و به صورت موضعی آن را خرد می‌کند. بنابراین ابزار برش به داخل سنگ نفوذ کرده و موجب تخریب آن می‌گردد. این فرایند تا زمانی که نیروی پیشروی و سختی سنگ به تعادل برسد برقرار بوده است. از طریق این جابجایی که به عنوان نفوذ خالص توصیف می‌شود، دیسک برش تنش زیادی را به صورت موضعی ایجاد می‌کند که منجر به شکستن قطعات صاف و طولانی سنگ (تراشه) می‌شود. طراحی چیدمان ابزارهای برش در کله‌حفار ماشین *TBM* باید به گونه‌ای پیاده‌سازی گردد تا الزامات و قیود فنی-مهندسی و سازه‌ای را در نظر گرفته و بهترین طرح را ارائه دهد. به عنوان



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

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 هر یک از ۳ پارامتر مذکور عبارت است از: پارامتر ρ دارای مقادیری بین صفر و شعاع کله حفار بوده است. پارامتر θ دارای مقادیری بین صفر و 2π بوده است. پارامتر γ دارای مقادیری بین صفر و $\pi/2$ بوده است.

با توجه به مطالب مذکور تعیین موقعیت بهینه برای ابزارهای برش منوط به تعیین مقادیر بهینه برای ۳ پارامتر (ρ, θ, γ) بوده است. علاوه بر این با بررسی ابزارهای برش نرمال و ابزارهای برش گیج مشخص می‌گردد که مقادیر زاویه انحراف برای ابزارهای برش نرمال معادل با صفر بوده است. بنابراین در بهینه‌یابی موقعیت ابزارهای برش نرمال دو پارامتر ρ, θ بهینه‌یابی می‌گردد و برای ابزارهای برش گیج هر ۳ پارامتر مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. با توجه به ناحیه کارگذاری ابزارهای برش نرمال و گیج مقادیر پارامتر ρ برای ابزارهای برش نرمال بین صفر تا مرز ناحیه انتقالی بوده است. همچنین این پارامتر برای ابزارهای برش گیج منطقه انتقالی را پوشش می‌دهد و مقادیر آن بین مرز ناحیه انتقالی تا شعاع کله حفار در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- معادلات حاکم بر چیدمان مارپیچ

با توجه به شکل ۴، الگوی چیدمان مارپیچ (در حالت کلی چیدمان مولتی مارپیچ - Multi Spiral) معمولاً برای توزیع متوالی ابزارهای برش در کله حفار برای TBM های با اندازه بزرگ و متوسط استفاده می‌شود. آرایش چیدمان مولتی مارپیچ ابزار برش بر اساس دو مولفه فاصله از مرکز (پارامتر ρ) و زاویه دوران مثلثاتی (پارامتر θ) فرمول بندی می‌شود. برای ارائه روابط حاکم بر چیدمان مولتی مارپیچ فرض می‌گردد که

که ابزارهای برش گیج به دلیل سرعت خطی بالا و سبک مونتاژ (دارای زاویه انحراف) بسیار آسیب پذیر بوده‌اند (Huo, et al., 2010).

با توجه به داده‌های آماری و تجارب اجرایی، شعاع منطقه انتقال در کله حفار حدوداً ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی متر برای TBM های کوچک است جایی که معمولاً ۶-۸ ابزارهای برش گیج روی این ناحیه مونتاژ می‌شود. برای TBM های بزرگ (دارای شعاع بیش از ۳ متر)، شعاع انتقال حدود ۶۰۰ تا ۶۵۰ میلی متر است، که معمولاً ۸-۱۰ 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 ابزار برش می‌شود و اگر بیش از حد بزرگ باشد، ضخامت سر ابزار برش افزایش می‌یابد 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. با توجه به توضیحات ارائه شده مشخص می‌گردد که منطقه انتقالی محدوده کارگذاری ابزارهای برش گیج بوده است. در شکل ۵، منطقه انتقالی در کله حفار به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

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

به جهت پیاده‌سازی مدل بهینه‌یابی و تدوین معادلات، شرایط و قیدهای مساله ابتدا باید موقعیت ابزارهای برش (ابزارهای برش نرمال و گیج) به صورت پارامتریک و بر اساس مفاهیم ریاضیاتی تعریف گردد. عمدتاً در مدل‌های مختلف بهره‌گیری از سیستم مختصات کارتیزین برای ارائه موقعیت نقاط رایج بوده است، اما با توجه به هندسه کله حفار ماشین TBM که دایره می‌باشد، 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 (ρ) و زاویه دوران مثلثاتی (θ) تعریف می‌گردد. علاوه بر این زاویه انحراف کاتر (γ) هم به عنوان سومین پارامتر در تعیین موقعیت ابزارهای برش معرفی می‌گردد. با توجه به سیستم تعریف شده موقعیت هر ابزار برش به صورت ذیل فرمول بندی می‌شود.

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

آن بر اساس رابطه (۵) مقدار معادله اصلی تعیین می‌گردد. براین اساس می‌توان معادله اصلی را به شرح رابطه (۵) ارائه نمود.

$$\min y = f(X) = (C_1, C_2, C_3) \quad (۵)$$

در رابطه (۵) پارامتر C_1 بیانگر مینیمم سازی نیروی خارج از مرکز، C_2 بیانگر مینیمم سازی گشتاور خارج از مرکز و C_3 خروج از مرکزیت ابزارهای برش میباشد، با در نظر گرفتن کل نیروهای وارد بر ابزار برش روابط مکانیکی حاکم تحت هریک از توابع C_1 تا C_3 فرمول بندی می‌شود.

تعریف تابع C_1 : نیروهای خارج از مرکز

$$C_1 = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \quad (۶)$$

در رابطه (۶) توابع F_x ، F_y برای ابزارهای برش مرکز و ابزارهای برش نرمال عبارتند از:

$$F_x = \sum_{i=1}^Q [F_{Ri} \sin \theta_i + (F_{Si} + F_{ei}) \cos \theta_i] \quad (۷)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^Q [-F_{Ri} \cos \theta_i + (F_{Si} + F_{ei}) \sin \theta_i] \quad (۸)$$

در روابط (۷) و (۸) پارامتر Q معرف تعداد ابزارهای برش، F_R نیروی غلتشی، F_S نیروی جانبی و F_e نیروی اینرسی ابزار برش بوده است، مقادیر نیروی جانبی و اینرسی بر اساس روابط (۹) و (۱۰) فرمول بندی می‌گردد:

$$F_{Si} = \frac{\tau}{2} (R\varphi)^2 \sin \left(\frac{R\varphi}{2\rho_i} \right) \quad (۹)$$

$$F_{ei} = m\omega^2 \rho_i \quad (۱۰)$$

پارامتر τ مقاومت برشی سنگ، m جرم کاتر و ω سرعت دورانی کله‌حفار در دستگاه TBM بوده است. مقادیر توابع F_x ، F_y برای ابزارهای برش گیج بر اساس روابط ذیل بازنویسی میشود:

$$F_x = \sum_{i=1}^Q [F_{Ri} \sin \theta_i + F_{bi} \cos \theta_i] \quad (۱۱)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^Q [-F_{Ri} \cos \theta_i + F_{bi} \sin \theta_i] \quad (۱۲)$$

در روابط (۱۱)، (۱۲) پارامتر F_b بیانگر تاثیر زاویه انحراف ابزار برش (۷) بر نیروی اعمالی بوده و بر اساس رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد:

$$F_{bi} = F_{ei} + F_{Si} \cos \gamma_i - F_{Ni} \sin \gamma_i \quad (۱۳)$$

تعداد کل ابزارهای برش معادل با n و تعداد مارپیچ‌ها (بر اساس نوع چیدمان مارپیچ که میتواند ۲ مارپیچ، ۴ مارپیچ، ... باشد. (شکل ۴ را ببینید) معادل با m باشد. براین اساس اختلاف زاویه بین دو مارپیچ مجاور معادل با: $2\pi/m$ بوده است. اگر فرض کنیم j شمارنده ابزارهای برش بوده و هدف بدست آوردن موقعیت ابزار برش j ام (ρ_j, θ_j) باشد، روابط به شرح ذیل فرمول بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{if } (j > (m - 1)) \\ & \rho_j = (\rho_0 + i * \Delta p) + a(\theta_j + \theta_0) + i * \frac{2\pi}{m} \\ & i = \{0, 1, \dots, m - 1\}; \quad j = \{m, \dots, n - 1\} \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } (j > (m - 1)) \\ & \rho_j = (\rho_0 + i * \Delta p) + a(\theta_j + \theta_0) + i * \frac{2\pi}{m} \\ & i = \{0, 1, \dots, m - 1\}; \quad j = \{m, \dots, n - 1\} \end{aligned} \quad (۳)$$

در روابط ۲ و ۳ پارامتر ρ_0 بیانگر شعاع (فاصله از مرکز) اولین ابزار برش نرمال، Δp اندازه فاصله برش ابزارهای نرمال، a ضریب شکل و θ_0 زاویه اولیه آرایش مارپیچ بوده است. با توجه به روابط ارائه شده (رابطه ۲) مشخص می‌گردد که موقعیت زاویه‌ای ابزار برش θ_j رابطه مستقیم با فاصله شعاعی ابزار برش ρ_j داشته است، همچنین پارامتر ρ_j بر اساس فاصله برش محاسبه می‌گردد. بنابراین با تعیین ضریب a و زاویه اولیه مارپیچ θ_0 ، موقعیت زاویه‌ای ابزارهای برش θ_j تعیین می‌گردد. براین اساس با تعیین دو پارامتر (a, θ_0) موقعیت ابزارهای برش نرمال در آرایش چیدمان مارپیچ به شرح رابطه ۴ فرمول بندی شده است:

$$\begin{aligned} X_\theta &= \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} = \{a, \theta_0\} \\ \theta_j &= \begin{cases} \frac{\rho_j - (\rho_0 + i * \Delta p) - i * \frac{2\pi}{m}}{a} - \theta_0 & \text{if } (j > (m - 1)) \\ \theta_0 + \frac{2\pi}{m} * j & \text{if } (j \leq (m - 1)) \end{cases} \\ & i = \{0, 1, \dots, m - 1\}; \quad j = \{m, \dots, n - 1\} \end{aligned} \quad (۴)$$

۲-۴- مدل بهینه‌یابی

بر اساس الزامات فنی-سازه‌ای چیدمان ابزار برش، معادله اصلی بهینه‌یابی از ۳ بخش مجزا تشکیل شده است که مدل بهینه‌یابی درسد کمین‌سازی آن می‌باشد. در مدل بهینه‌یابی آرایش مارپیچ ابتدا با انتخاب مقادیر اولیه برای دو پارامتر (a, θ_0) موقعیت ابزارهای برش در کله‌حفار مشخص و بعد از

(۲) قید برش متوالی دو ابزار برش 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 برش مجاور بوده است. بر اساس معادلات حاکم بر چیدمان مارپیچ (روابط ۲ تا ۴) این قید هم در استخراج موقعیت کاترها با آرایش مارپیچ در نظر گرفته شده است.

(۳) قید تعادل استاتیکی (محدودیت خروج از مرکزیت ابزار برش‌ها)

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

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

در رابطه (۲۳) داریم: $O_m (X_m, Y_m)$ مرکز واقعی کل سیستم و $O_e (X_e, Y_e)$ موقعیت مورد انتظار O_m است.

(۴) 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 *Manholes, Buckets* بوده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده مشخص می‌گردد که از ۴ قید اصلی طراحی موقعیت ابزار برش در کله حفار، دو قید عدم هم پوشانی موقعیت ابزارهای برش و قید برش متوالی دو برش مجاور در معادلات حاکم بر آرایش مارپیچ در نظر گرفته شده است و تنها دو قید تعادل استاتیکی (محدودیت خروج از مرکزیت ابزارهای برش) و موقعیت *manholes, buckets* (معادلات ۲۳ و ۲۴) به عنوان قیده‌های مدل بهینه‌یابی آرایش مارپیچ ابزار برش در نظر گرفته شده است.

۲-۶- الگوریتم بهینه سازی گرگ‌های خاکستری GWO

الگوریتم گرگ‌های خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته جمعی گرگ‌ها ارائه شده است (Mirjalili, et al., 2014). برطبق سلسه مراتب زندگی گروهی گرگ آلفا (α)، گرگ حاکم نیز در گروه نامیده می‌شود، چرا که دستورات او باید توسط گروه پیروی شود. آلفاها اساساً مسئول تصمیم‌گیری درباره شکار، جای خواب، زمان حرکت، و مانند آن هستند. دومین سطح درجه بندی گرگ‌های خاکستری بتا (β) است، بتاها گرگ‌های تحت امر آلفا هستند که به آلفا در تصمیم‌گیری و دیگر فعالیت‌های گروه کمک می‌کنند. گرگ بتا، احتمالاً بهترین کاندیدا برای آلفا شدن است و نقش یک معاون را برای آلفا و ناظم را برای

تعریف تابع C_2 : گشتاور خارج از مرکز

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

در رابطه (۱۴) M_x, M_y برای ابزارهای برش به شرح روابط (۱۵ و ۱۶) تعریف می‌گردد:

$$M_x = \sum_{i=1}^Q [-F_{Ni} \rho_i \sin \theta_i + M_i \sin \theta_i + F_{ei} r \sin \theta_i] \quad (15)$$

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

در روابط (۱۵، ۱۶) پارامتر M گشتاور ابزار برش میباشد که براساس رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردد:

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

تعریف تابع C_3 : 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) فرمول‌بندی می‌گردد.

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

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

۲-۵- قیده‌های مساله بهینه‌یابی

به طور کلی قیده‌های اصلی برای برپاسازی مساله بهینه سازی چیدمان ابزار برش در کله حفار شامل ۴ قید می‌گردد، در این بخش قیده‌های و محدودیت‌های حاکم بر مساله بهینه‌یابی فرمول بندی و ارائه شده است:

(۱) قید عدم هم پوشانی موقعیت ابزارهای برش

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

در رابطه (۲۱) ΔV_{ij} بیانگر منطقه همپوشانی بین موقعیت دو ابزار برش i ام و j ام بوده است. با توجه به مدل بهینه‌یابی که برای استخراج آرایش مارپیچ ابزار برش توسعه داده شده است، عملاً این قید در روابط حاکم بر آرایش مارپیچ (روابط ۲ تا ۴) مستتر بوده است، بنابراین قید مذکور به عنوان قیود مساله بهینه سازی در مدل طراحی بهینه آرایش چیدمان مارپیچ ابزار برش در نظر گرفته نشده است.

تصادفی (بین ۰ و ۱) می‌باشند. بر اساس روابط (۲۵ و ۲۶) یک گرگ خاکستری در موقعیت (X, Y) می‌تواند موقعیت خود را بر اساس موقعیت طعمه (X^*, Y^*) بروزرسانی کرده و مکان‌های مختلف پیرامون بهترین جواب می‌تواند بر اساس تنظیم مقدار بردارهای A و C حاصل گردد.

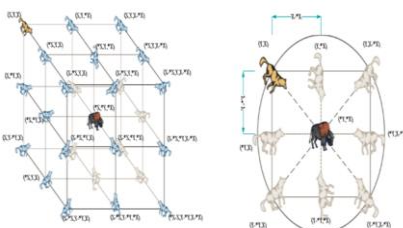
(۲) محله محاصره: تعقیب، محاصره کردن، اختلال در حرکت شکار تا زمانی که از حرکت بایستد (Mirjalili, et al., 2014):

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \end{aligned} \quad (28)$$

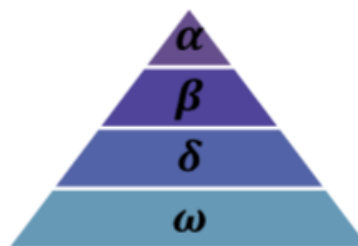
$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (29)$$

گرگ‌های خاکستری این توانایی را دارند تا محل یک طعمه را تشخیص دهند و آن‌ها را احاطه کنند. شکار معمولاً توسط 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 ما هیچ ایده‌ای درباره محل بهینه (طعمه) نداریم. به جهت شبیه‌سازی ریاضی‌وار رفتار شکارگونه گرگ‌های خاکستری، ما فرض می‌کنیم که آلفا (بهترین جواب)، بتا و دلتا اطلاع خوبی درباره پتانسیل محل طعمه دارند. بنابراین ما ۳ جواب بهتر بدست آمده تاکنون را ذخیره کرده و بقیه عوامل جستجو را مجبور می‌کنیم تا موقعیت‌های خود را بر اساس موقعیت عوامل بهتر بروزرسانی کنند. در شکل ۷، شماتیک به روزرسانی موقعیت گرگ‌ها در فرایند شکار- مرحله محاصره نمایش داده شده‌است.



شکل ۷- بردار موقعیت و بروزرسانی در فضای دوبعدی و سه بعدی

گروه بازی می‌کند. پایین‌ترین طبقه گرگ خاکستری امگا (ω) است. گرگ‌های امگا نقش قربانی را برای سایر اعضای گروه دارند. آن‌ها آخرین گرگ‌هایی هستند که اجازه خوردن غذا را دارند. اگر گرگی آلفا، بتا یا امگا نباشد او فرمانبردار یا دلتا (δ) نامیده می‌شود. گرگ‌های دلتا از آلفاها و بتاها تبعیت می‌کنند و به امگاها حکمرانی می‌کنند. در شکل ۶، طبقه بندی و سلسله مراتب زندگی گرگ‌های خاکستری نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی ریاضی حکومت اجتماعی گرگ‌ها هنگام طراحی الگوریتم GWO ، شایسته‌ترین راه حل را گرگ α نامگذاری می‌کنند. در نتیجه، دومین و سومین راه حل‌های بهتر به ترتیب گرگ β و δ نامیده شدند. راه حل‌های باقیمانده فرض می‌شود که ω هستند. لذا در الگوریتم GWO بهینه‌سازی با α و β و δ رهبری می‌شود و گرگ‌های ω از این سه دسته پیروی می‌کنند. بنابراین الگوریتم GWO بر اساس فرایند شکار گرگ‌های خاکستری شامل ۳ مرحله: ۱- مرحله جستجو، ۲- مرحله محاصره، ۳- مرحله شکار بوده است.



شکل ۶- سلسله مراتب گرگ خاکستری (تسلط و حکمرانی از بالا به پایین کاهش می‌یابد) (Mirjalili, et al., 2014)

(۱) مرحله جستجو: ردگیری، وادار به فرار کردن، و نزدیک شدن به شکار، روابط ارائه شده برای مرحله جستجو عبارت است از (Mirjalili, et al., 2014):

$$\begin{aligned} \vec{D} &= |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \\ \vec{X}(t+1) &= \vec{X}_p(t) - \vec{AD} \end{aligned} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) پارامتر t تکرار فعلی، A و C بردار ضرایب، X_p بردار موقعیت طعمه و X بردار موقعیت یک گرگ خاکستری می‌باشد.

$$\begin{aligned} \vec{A} &= 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \\ \vec{C} &= 2\vec{r}_2 \end{aligned} \quad (26)$$

در رابطه (۲۶) مؤلفه‌های a به صورت خطی با بالا رفتن تعداد تکرار (از ۲ تا صفر) کاهش می‌یابد و r_1 و r_2 بردارهای

بدست آمده برای متغیرهای مساله در هر اجرای مدل، اگر قیدی نقض گردید یک مقدار نسبتا بزرگ به جواب نهایی معادله اصلی بهینه سازی اضافه می گردد و با این سازوکار جوابهایی که قیدهای مساله را نقض نموده اند از مجموعه جوابهای مسئله خارج می گردد. در فلوچارت شکل ۸، الگوریتم عددی مدل طراحی بهینه چیدمان مارپیچ ابزار برش نمایش داده شده است.

۳- نتایج و بحث

به جهت ارزیابی عملکرد مدل ارائه شده، فرایند طراحی چیدمان ابزار برش در کله حفار برای یک دستگاه TBM واقعی پیاده سازی شده و عملکرد TBM با چیدمان مارپیچ نسبت به TBM با چیدمان اصلی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. به این منظور دستگاه TBM سنگ سخت، دارای کله حفاری با ۵۱ ابزارهای برش دیسکی (نرمال، گیج، مرکز)، ۴ منهول و ۸ باکت (براساس الزامات مهندسی) مورد مطالعه قرار گرفته است (Huo, et al., 2011).

تعداد Manhole در این TBM چهار عدد بوده که موقعیت و ابعاد هندسی آن در جدول ۱، ارائه شده است. همچنین در این دستگاه تعداد Bucket هشت عدد بوده که موقعیت آن ها در جدول ۲، ارائه شده است. علاوه بر اطلاعات مذکور جزئیات و پارامترهای مختلف ماشین حفار، ابزارهای برش و خصوصیات فیزیکی سنگ در جدول ۳، ارائه شده است.

۳-۱- نتایج حاصل از اجرای مدل

با توجه به خصوصیات و پارامترهای متعدد معرفی شده از مدل دستگاه TBM (جدول ۳)، مدل بهینه یابی ارائه شده در بخش قبل برپاسازی و موقعیت بهینه ابزارهای برش نرمال و گیج با چیدمان مارپیچ بر اساس الگوریتم بهینه سازی GWO ارائه شده است.

به جهت اجرای مدل بهینه یابی علاوه بر پارامترهای اولیه دستگاه و خصوصیات فیزیکی سنگ سخت، لازم است تا دو پارامتر مدل GWO یعنی (تعداد عامل های جستجو و تعداد تکرار الگوریتم) مشخص گردد. برای این منظور تعداد عامل های جستجو معادل با ۳۰ و تعداد تکرار معادل با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. با اجرای مدل نتایج حاصله که بیانگر موقعیت بهینه ابزارهای برش بر اساس مینیمم سازی معادله اصلی (رابطه ۵) و با ارضای قیدهای مساله (روابط 23, 24)

۳) مرحله حمله: شروع حمله نهایی به سمت شکار: گرگ های خاکستری شکار را با حمله به طعمه زمانی که از حرکت باز می ایستد خاتمه می دهند. به این منظور با کاهش مقدار پارامتر a فرایند پیاده سازی می شود. علاوه بر این محدوده نوسان بردار A نیز بر حسب a کاهش می یابد. به عبارت دیگر a یک مقدار تصادفی است در بازه $[-2a, 2a]$ جایی که a از ۲ تا صفر با بالا رفتن تعداد تکرار کاهش می یابد. زمانی که مقادیر تصادفی A در بازه $[-1, 1]$ هستند، موقعیت بعدی یک عامل جستجو می تواند در هر موقعیتی بین موقعیت کنونی و موقعیت طعمه باشد.

۲-۷- الگوریتم مدل عددی طراحی بهینه چیدمان مارپیچ

در این پژوهش مدل عددی جامعی برای طراحی بهینه چیدمان مارپیچ ابزار برش در TBM با بهره گیری از الگوریتم فراابتکاری GWO توسعه داده شده است. براساس مدل پژوهش ابتدا داده های ورودی که شامل سه بخش اصلی: ۱- مشخصات دستگاه TBM، ۲- مشخصات فیزیکی-مکانیکی سنگ سخت (سینه کار) و ۳- نوع چیدمان مارپیچ (۲- مارپیچ، ۴- مارپیچ و...) به مدل ارائه می گردد. پس از این مرحله بر اساس روابط ارائه شده رابطه (۵ تا ۲۰)، معادله اصلی بهینه سازی چند هدفه به همراه معادلات قیدهای اصلی مساله (روابط ۲۳، ۲۴) تشکیل می گردد و مدل اصلی طراحی بهینه ابزار برش در TBM برپاسازی می گردد. پس از اجرای مدل، با انتخاب مقادیر دو پارامتر (a, θ_0) ابتدا موقعیت ابزارهای برش براساس معادلات حاکم بر چیدمان مارپیچ (روابط ۲ تا ۴) تعیین و مقدار معادله اصلی بهینه یابی (رابطه ۵) محاسبه می گردد. در نهایت با بهره گیری از الگوریتم GWO مدل بهینه یابی حل گردیده و موقعیت بهینه ابزارهای برش در چیدمان مارپیچ محاسبه و ارائه می گردد.

در مدل محاسباتی ارائه شده به جهت بهره گیری از الگوریتم GWO در گام نخست دو پارامتر اولیه: ۱- تعداد عامل های جستجوگر (تعداد گرگ ها) و ۲- تعداد حلقه های تکرار محاسبات تعیین می گردد و در نهایت بر اساس الگوریتم بهینه سازی گرگ های خاکستری مدل حل می گردد. لازم به ذکر است که به جهت برقراری قیود و ارضای معادلات ارائه شده تحت قیدهای مساله بهینه سازی از تکنیک مجازات (پنالتی) استفاده می گردد، به این صورت که بر اساس مقادیر

جدول ۱- موقعیت Manhole در TBM مدل پایه
(Huo, J., et al., 2011)

شماره Manhole	۱	۲	۳	۴
ρ (mm)	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰
θ (rad)	۱/۲۲۱۷	۲/۷۹۳	۴/۳۶۳	۵/۹۳۴

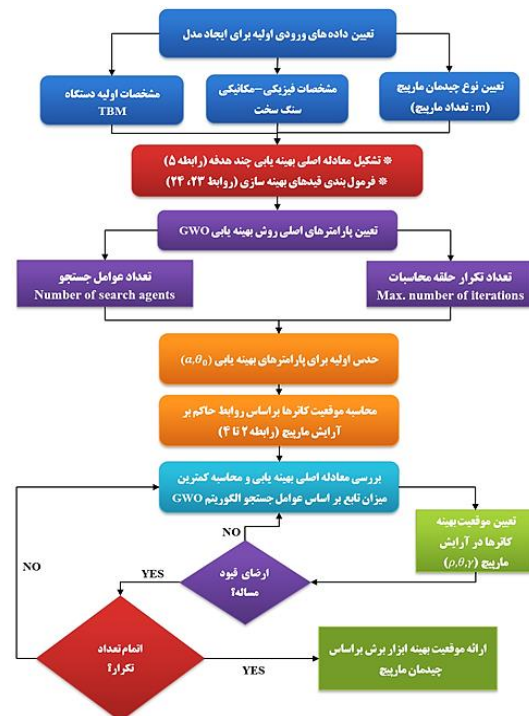
جدول ۲- ابعاد و موقعیت Bucket در TBM مدل
(Huo, J., et al., 2011)

شماره Bucket	ρ (mm)	θ (rad)	طول (mm)	عرض (mm)
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	۶/۱۰۹	۹۰۰	۳۰۰

جدول ۳- پارامترهای دستگاه TBM و سنگ
(Huo, J., et al., 2011)

مقدار	پارامتر	توضیحات
۱۳-۷	مقاومت برشی پانچ سنگ (MPa)	خصوصیات سنگ
-۵۰	مقاومت فشاری تک محوری سنگ (MPa)	
۹۳٫۶	مقاومت کشش سنگ (MPa)	
2/14-4	شعاع کله‌حفار دستگاه TBM (m)	خصوصیات دستگاه TBM
۴/۰۱۵	سرعت دورانی TBM (rad/s)	
۰/۶۲۸۳	جرم هر ابزار برش (kg)	
۲۰۰	قطر ابزار برش (mm)	
۴۸۳	عرض ابزار برش (mm)	
۱۰	نفوذ ابزار برش (mm)	
۷	تعداد ابزارهای برش مرکز	
۸	تعداد ابزارهای برش نرمال	
۳۳	تعداد ابزارهای برش گچی	
۱۰	موقعیت مدنظر برای مرکز کله‌حفار (x_e, y_e)	
(۰/۰)	میزان خطای خروج از مرکزیت کل	
(۵/۵)	سیستم $(\Delta x_e, \Delta y_e)$ (mm)	
۴	تعداد Manhole	
۲۰۰	شعاع Manhole (mm)	
۸	تعداد Bucket	

ارائه شده‌است. در نمودار شکل ۹، میزان مقادیر حاصله از تابع اصلی مدل بهینه‌یابی بر اساس تعداد تکرار مدل ارائه شده است. پس از اجرای مدل، اتمام حل و اخذ نتایج، موقعیت بهینه ابزارهای برش نرمال و گچی استخراج گردیده و نتایج حاصله به صورت شماتیک در شکل ۱۰، نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۹، روند بهینه‌یابی بر اساس تعداد تکرار الگوریتم GWO برای معادله اصلی نمایش داده شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که تا تکرار ۳۶۰ میزان مقادیر کمینه محاسباتی برای معادله اصلی کاهش یافته و عملاً از ایتريشن ۳۶۰ به بعد مقادیر کمینه محاسباتی برای معادله اصلی ثابت بوده است. بنابراین انتخاب ۵۰۰ ایتريشن برای برپاسازی مدل بهینه‌یابی مناسب بوده است. در شکل ۱۰، دواير توپر قرمز رنگ معرف موقعیت کارگذاری ابزارهای برش نرمال و دواير توپر سبز رنگ نمایش دهنده ابزارهای برش گچی بوده که بر اساس اجرای مدل موقعیت آنها بدست آمده است. علاوه بر این در شکل ۱۰، موقعیت ابزارهای برش مرکز با دواير توپر آبی رنگ، موقعیت منهول با دواير توپر مشکی رنگ و همچنین موقعیت باکت‌ها با مستطیل‌های محیطی فیروزه‌ای رنگ نمایش داده شده است.



شکل ۸- الگوریتم مدل بهینه‌یابی چیدمان مارپیچ ابزار برش براساس الگوریتم GWO

ارزیابی تاثیر چیدمان مارپیچ ابزار برش کاترهد در عملکرد ماشین حفاری مکانیزه TBM؛ محسن آل بویه و ...؛ ص ۲۵۹-۲۷۶

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

۲) ارزیابی گشتاور خارج از مرکز TBM (پارامتر M_V):
پارامتر M_V بیانگر گشتاور خروج از مرکز کل سیستم TBM بوده است و بر اساس رابطه (۲۷) محاسبه می‌گردد. در رابطه (۳۱) پارامتر M_V معرف گشتاور خروج از مرکز برای ابزار برش i ام بوده است.

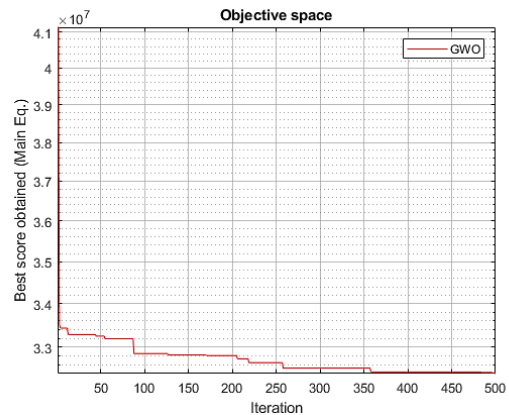
$$M_V = \sum_{i=1}^n \vec{M}_{V_i} \quad (31)$$

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 کله‌حفار TBM بر اساس موقعیت ارائه شده برای ابزارهای برش مورد بررسی قرار گیرد، لازم به ذکر است که مقادیر X_m و Y_m نباید از حد مجاز خروج از مرکزیت دستگاه ($\Delta x_e, \Delta y_e$) فراتر شود (جدول ۳، خطای خروج از مرکزیت کل سیستم). برای محاسبه میزان خروج از مرکزیت سیستم از روابط (۱۹) برای محاسبه X_m و از روابط (۲۰) برای محاسبه Y_m استفاده شده است.

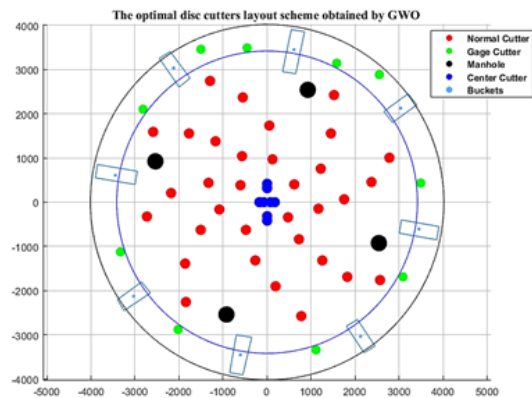
۴) ارزیابی قید عدم همپوشانی موقعیت ابزارهای برش و برش‌های ناموفق: یکی از پارامترهای مهم در بررسی چیدمان ارائه شده ارزیابی عدم همپوشانی موقعیت ابزارهای برش است.

با توجه به توضیحات ارائه شده بررسی بر روی چهار پارامتر فوق جهت مقایسه بین چیدمان ارائه شده و چیدمان اصلی دستگاه TBM صورت گرفته است، نتایج حاصل به شرح جدول ۴، لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای مقایسه‌ای برای چیدمان اصلی دستگاه TBM بر اساس داده‌های سازنده دستگاه بوده که در مطالعات مختلف هم مورد استفاده قرار گرفته است (Huo, J., et al., 2011) ارائه شده است.

در جدول ۴، پارامترهای مختلف عملکرد ماشین TBM بر اساس چیدمان اصلی دستگاه نسبت به چیدمان بهینه ارائه شده توسط مدل بهینه‌یابی پژوهش نمایش داده شده است، بر اساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که نیروی جانبی کل دستگاه F_S در بر اساس چیدمان بهینه ابزار برش به میزان ۱۳۰/۱۸ کیلونیوتن نسبت به چیدمان اصلی ابزار برش کاهش یافته است، همچنین میزان گشتاور خروج از مرکز به میزان



شکل ۹- روند بهینه‌یابی در مدل برای چیدمان مارپیچ ابزار برش



شکل ۱۰- شماتیک چیدمان مارپیچ بهینه ابزار برش در TBM بر اساس مدل پژوهش

۳-۲- ارزیابی عملکرد مدل پژوهش

برای انجام مقایسه بین عملکرد دستگاه TBM با چیدمان بهینه مارپیچ ارائه شده در این پژوهش نسبت به چیدمان اصلی دستگاه ۴ پارامتر اصلی: ۱- نیروی جانبی کل دستگاه TBM، ۲- گشتاور خارج از مرکز دستگاه TBM، ۳- ارزیابی میزان خروج از مرکزیت کل سیستم، ۴- عدم همپوشانی موقعیت ابزارهای برش و برش‌های ناموفق مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

۱) ارزیابی نیروی جانبی کل دستگاه TBM (پارامتر F_S)

پارامتر F_S بیانگر نیروی جانبی کل ابزارهای برش دستگاه TBM بوده، که از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود. در رابطه (۳۰)، n بیانگر تعداد ابزارهای برش و F_{S_i} معرف نیروی جانبی برای ابزار برش i ام بوده است.

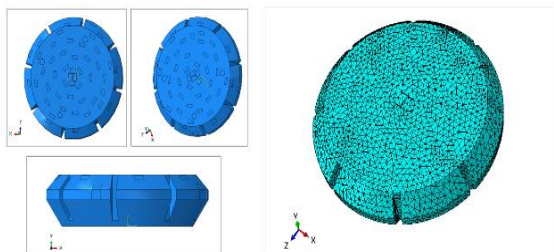
کله حفار *TBM* استخراج شده است. در این بخش از مقایسات مقادیر بیشینه تنش و تغییرشکل دستگاه *TBM* اصلی براساس داده‌های شرکت سازنده و پژوهش‌های مختلف استخراج شده و با نتایج حاصل از مدل المان محدود دستگاه *TBM* با چیدمان ماریچ مورد مقایسه قرار گرفته است.

در مطالعات پیشین مدل عددی المان محدود ماشین حفاری با چیدمان اصلی ابزار برش در نرم افزار المان محدود *ANSYS* مدل‌سازی گردیده است (*Huo, et al., 2010*) و نتایج حاصله که بیانگر میزان بیشینه تنش و تغییرشکل کله‌حفار ماشین *TBM* با چیدمان اصلی ابزار برش بوده تحت دو شرایط بارگذاری به شرح جدول ۵، ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر بیشینه تنش و تغییرشکل دستگاه *TBM* با چیدمان اصلی ابزار برش (*Huo, J., et al., 2010*)

مقادیر بیشینه تغییر شکل (mm)	مقادیر بیشینه تنش فون مایزش <i>Von stress (Mpa)</i>	پارامتر
بارگذاری <i>FT</i>	بارگذاری <i>FT</i>	شرایط بارگذاری
۱/۰۳۹	۷۸/۴۶۶	چیدمان اصلی ابزار برش
۰/۳۲۶	۲۴۱/۵۱۳	
بارگذاری <i>FN</i>	بارگذاری <i>FN</i>	شرایط بارگذاری
		چیدمان اصلی ابزار برش

لازم به ذکر است که در این پژوهش مدل‌سازی تحت دو شرایط بارگذاری: ۱- شرایط بارگذاری با اعمال نیروی نرمال F_N ، ۲- شرایط بارگذاری با اعمال نیروی کل F_T که بر اساس خصوصیات ابزار برش به عنوان بیشینه نیروی اعمالی مجاز تعریف شده برای ابزار برش می‌باشد. در مدل *TBM* مدنظر با توجه به خصوصیات ابزارهای برش به‌کارگیری شده نیروی کل معادل با 250 KN بوده است.



شکل ۱۱- ژئومتری و مش‌بندی مدل *TBM* ایجاد شده در نرم افزار *ABAQUS*

در شکل ۱۱، مدل هندسی کله‌حفار *TBM* ایجاد شده

$2/438 \text{ KN.m}$ کاهش یافته است. علاوه بر این مقادیر خروج از مرکزیت کل سیستم $O(Xm, Ym)$ به میزان $1/15 \text{ mm}$ برای Xm و $0/36 \text{ mm}$ برای Ym کاهش داشته است، با توجه به مقادیر ارائه شده و مقایسه نتایج حاصله مشخص می‌گردد که عملکرد دستگاه *TBM* بر اساس مدل بهینه‌یابی چیدمان ماریچ ابزار برش بهبود چشم‌گیری نسبت به چیدمان اصلی دستگاه داشته است.

جدول ۴- مقایسه عملکرد دستگاه *TBM* بر اساس چیدمان اصلی ابزار برش و چیدمان ماریچ بهینه بر اساس مدل پژوهش

پارامتر	چیدمان اصلی	چیدمان ماریچ بهینه	میزان تغییرات (%)
نیروی جانی کل دستگاه $F_g (KN)$	۱۵۴/۸۴۰	۲۴/۶۵۸۹	-۱۳۰/۱۸۱۱ <i>KN</i> -۸۴/۰۷) (درصد)
گشتاور خروج از مرکز دستگاه $Mv (KN.m)$	۱۱/۵۸۸	۹/۱۲	-۲/۴۳۸ <i>KN.m</i> -۲۱/۰۹) (درصد)
خروج از مرکزیت $Xm (mm)$	-۲/۱۳۵	-۰/۹۸	-۱/۱۵۵ <i>mm</i> -۵۴/۰۹) (درصد)
خروج از مرکزیت $Ym (mm)$	-۰/۲۲۱	-۰/۱۸۵	-۰/۰۳۶ <i>mm</i> -۱۶/۲۸) (درصد)
محدوده همپوشانی موقعیت ابزارهای برش	۰/۰۰	۰	-
تعداد ابزارهای برش با برش‌های ناموفق	۴	۰	-۴ (۱۰۰ درصد)

۳-۳- ارزیابی عملکرد *TBM* بر اساس مدل‌سازی المان محدود (*FEM*)

به هدف ارزیابی و مقایسه عملکرد سازه کله‌حفار *TBM* با چیدمان ماریچ بهینه و چیدمان اصلی، مدل المان محدود *TBM* در بستر نرم‌افزار *Abaqus* (به جهت مزایای برجسته این نرم‌افزار در مدل‌سازی عددی مسائل مکانیک جامدات) مدل‌سازی عددی شده و مقادیر بیشینه تنش و تغییرشکل

همچنین بیشترین میزان تغییر شکل تحت این شرایط بارگذاری $0.135mm$ معادل با $41/41$ درصد کاهش یافته است.

با بررسی نتایج حاصل از مدل سازی در شرایط اعمال بار F_T مشخص می گردد که مقادیر بیشینه تنش در مدل با آرایش بهینه مارپیچ ابزار برش $30/133Mpa$ معادل با $12/47$ درصد کاهش یافته است، از طرفی مقادیر تغییر شکل تحت شرایط بارگذاری نیروی کل در مدل TBM با آرایش مارپیچ بهینه ابزار برش $0.3648mm$ معادل با $35/12$ درصد نسبت به مدل TBM با آرایش اصلی ابزار برش کاهش یافته است.

جدول ۶- مقایسه بیشینه تنش و تغییر شکل در TBM با چیدمان اصلی ابزار برش نسبت به چیدمان بهینه مارپیچ

پارامتر	مقادیر بیشینه تنش Von stress (Mpa)		مقادیر بیشینه تغییر شکل (mm)	
	بارگذاری FN	بارگذاری FT	بارگذاری FN	بارگذاری FT
شرایط بارگذاری	۷۸/۴۶۶	۲۴۱/۵۱۳	۰/۳۲۶	۱/۰۳۹
چیدمان اصلی [1-4/17]	۶۵/۴۲	۲۱۱/۳۸	۰/۱۹۱	۰/۷۷۴۲
چیدمان مارپیچ بهینه	۱۳/۰۴۶	۳۰/۱۳۳	۰/۱۲۵	۰/۳۶۴۸
درصد تغییرات (%)	(۱۶/۶۲درصد)	(۱۲/۴۷درصد)	(۴۱/۴۱درصد)	(۳۵/۱۲درصد)

۴- جمع بندی

هدف اصلی در این پژوهش ارزیابی چیدمان مارپیچ ابزار برش در کله حفار بر عملکرد ماشین حفاری مکانیزه TBM بوده است. براین اساس با ارزیابی کلیه الزامات طراحی و روابط حاکم، مدل محاسباتی نوینی بر پایه الگوریتم فراابتکاری گرگ های خاکستری برای طراحی بهینه چیدمان مارپیچ ابزار برش توسعه داده شده است. به جهت ارزیابی عملکرد مدل بهینه یابی و بررسی اثر چیدمان مارپیچ بهینه در عملکرد ماشین حفاری، یک دستگاه ماشین TBM واقعی که کلیه مشخصات هندسی، جزییات برش، ابزارهای برش، تجهیزات و همچنین خصوصیات فیزیکی سنگ سینه کار در عملیات حفاری موجود بوده، انتخاب گردیده و عملکرد TBM تحت دو شرایط چیدمان اصلی ابزار برش و چیدمان بهینه مارپیچ

در نرم افزار المان محدود آباکوس از زاوایای مختلف نمایش داده شده است. در مدل ایجاد شده کلیه ابعاد و خصوصیات بر اساس مدل اصلی TBM بوده است. پس از ایجاد هندسه مدل و پیاده سازی موقعیت ابزار برش، خصوصیات مواد مدل بر اساس اطلاعات مدل اصلی تعریف شده است. بر این اساس چگالی متریکال معادل با $7850 kg/m^3$ ، مدول الاستیسیته $210.6Mpa$ و ضریب پواسون معادل با 0.3 تعریف شده است. در روش مدل سازی المان محدود نیاز است تا المان ها که همان حوزه حل میباشد تعریف گردد، به این منظور مش بندی با ابعاد $100mm$ و از نوع مش مثلثی (Tet) ایجاد شده است. پس از مش بندی، مدل ایجاد شده تحت دو شرایط بارگذاری (نیروی نرمال و نیروی کل) قرار گرفته و نتایج که بیانگر میزان تنش فون مایزس و تغییرشکل بر اساس شرایط بارگذاری بوده، استخراج شده است. به جهت ارزیابی عملکرد TBM با چیدمان بهینه مارپیچ ابزار برش که بر اساس نتایج مدل بهینه یابی طراحی گردیده، مقایسه ای بین مقادیر بیشینه تنش و تغییر شکل تحت دو شرایط بارگذاری (نیروی F_N و نیروی F_T) در TBM با چیدمان بهینه نسبت به TBM با چیدمان اصلی انجام شده است. مقادیر حاصله از خروجی های مدل اصلی و نتایج حاصل از مدل سازی المان محدود TBM با چیدمان بهینه ابزار برش در جدول ۶، ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله مشخص می گردد که مقادیر بیشینه تنش در محدوده کارگذاری ابزارهای برش نرمال بوده است که با توجه به منطقه اعمال بارگذاری برابندی منطقی و توجیح پذیر میباشد. علاوه بر این نتایج نشان میدهد که بیشترین میزان تنش فون مایزس در مدل سازی انجام شده معادل با $65/42Mpa$ تحت بارگذاری F_N و $211/38Mpa$ تحت بار F_T بوده است. همچنین با ارزیابی میزان تغییرشکل مشخص می گردد که میزان تغییر شکل در مدل TBM با چیدمان بهینه مارپیچ ابزار برش تحت بارگذاری F_N معادل با $0.125mm$ و تحت بارگذاری F_T معادل با $0.775mm$ بوده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶، مشخص می گردد که پیاده سازی ابزار برش در TBM بر اساس مدل بهینه یابی چیدمان مارپیچ سبب افزایش چشم گیر عملکرد TBM از نقطه نظر سازه ای گردیده، به گونه ای که در شرایط بارگذاری بار F_T مقادیر تنش بیشینه در مدل با چیدمان بهینه $13/046Mpa$ معادل با $16/62$ درصد کاهش یافته است،

ابزار برش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نیروی جانبی کل دستگاه Fs براساس چیدمان مارپیچ بهینه ابزار برش ۸۴/۰۷ درصد نسبت به چیدمان اصلی ابزار برش کاهش یافته است. همچنین میزان گشتاور خروج از مرکز به ۲۱/۰۹ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این مقادیر خروج از مرکزیت کل سیستم $O(Xm, Ym)$ به میزان $1/0.15 mm$ (۵۴/۰۹ درصد) برای Xm و $0/0.3 mm$ (۱۶/۲۸ درصد) برای Ym کاهش داشته است. به جهت بررسی تاثیر چیدمان در عملکرد سازه دستگاه TBM مدل المان محدود کله‌حفار ماشین TBM در بستر نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شده است و میزان بیشینه تنش و تغییر شکل بر اساس اعمال بارگذاری نیروی نرمال F_N و نیروی کل F_T بر ابزارهای برش دستگاه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که پیاده‌سازی ابزار برش در TBM بر اساس مدل بهینه‌یابی چیدمان سبب افزایش چشم‌گیر عملکرد TBM از نقطه نظر سازه‌ای می‌گردد به گونه‌ای که در شرایط بارگذاری بار F_N مقادیر تنش بیشینه در مدل با چیدمان مارپیچ بهینه $13/0.46 MPa$ معادل با $16/62$ درصد کاهش یافته است. همچنین بیشترین میزان تغییر شکل تحت این شرایط بارگذاری $0/135 mm$ معادل با $41/41$ درصد کاهش یافته است. همچنین در شرایط اعمال بار F_T مشخص می‌گردد که مقادیر بیشینه تنش در مدل با آرایش مارپیچ بهینه ابزار برش $12/47$ درصد کاهش یافته است، از طرفی مقادیر تغییر شکل تحت شرایط بارگذاری نیروی کل در مدل TBM با آرایش مارپیچ بهینه ابزار برش $35/12$ درصد نسبت به مدل TBM با آرایش اصلی

ابزار برش کاهش یافته است. با بررسی نتایج کلی حاصل از عملکرد دستگاه TBM با آرایش مارپیچ بهینه ابزار برش مشخص می‌گردد که عملکرد TBM در شرایط پیاده‌سازی چیدمان مارپیچ اصلی (چیدمان اولیه مدل ارائه شده توسط سازنده دستگاه) هم از نقطه نظر مهندسی حفاری (افزایش بازده و پیشروی حفاری) و هم از دیدگاه سازه‌ای ماشین TBM بهبود قابل توجهی یافته است. مهمترین نتیجه حاصل از این پژوهش ارائه یک مدل جامع و کارآمد برای طراحی چیدمان مارپیچ بهینه ابزار برش در ماشین TBM بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی GWO بوده است. مدل ارائه شده قابلیت پیاده‌سازی تحت شرایط مختلف عملیاتی و برای انواع مختلف ماشین‌های TBM را دارا بوده است. این مدل بر اساس داده‌های اولیه شامل (خصوصیات فیزیکی سنک سخت، خصوصیات ابزار برش و هندسه برش) توانایی ارائه چیدمان مارپیچ بهینه برای ابزارهای برش در ماشین TBM را دارا بوده است. مدل ارائه شده قابلیت بکارگیری به صورت فراگیر برای فعالان و طراحان در عرصه حفاری مکانیزه را دارا می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش که بیانگر عملکرد قابل قبول الگوریتم بهینه‌سازی GWO در طراحی بهینه چیدمان مارپیچ ابزار برش در دستگاه TBM بوده، انتظار می‌رود که با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نوین بتوان گامی موثر در فرایند طراحی چیدمان تجهیزات کله‌حفار در راستای ارتقای بازده عملیات حفاری مکانیزه طی نمود، که این مهم به عنوان پیشنهاد مطالعات آتی ارائه می‌گردد.

۵- مراجع

- Abu Bakar, M. Z., Gertsch, L. S., & Rostami, J. (2014). Evaluation of fragments from disc cutting of dry & saturated sandstone. *Rock mechanics & rock engineering*, 47, 1891-1903.
- Anvari, A. A., Katibeh, H., & Sharifzade, M. (2010). A new approach for computing permeability of fault zones case study: the upper reservoir of Azad pumped-storage power station in Iran. *Archives of mining Sciences*, 55(3), 605-621
- Cardu, M., Iabichino, G., Oreste, P., & Rispoli, A. (2017). Experimental & analytical studies of the parameters influencing the action of TBM disc tools in tunnelling. *Acta Geotechnica*, 12, 293-304.
- Cigla, M., Yagiz, S., & Ozdemir, L. (2001, June). Application of tunnel boring machines in underground mine development. *In 17th international mining congress & exhibition of Turkey* (pp. 155-164)

- Duan, W., Zhang, L., Zhang, M., Su, Y., Mo, J., & Zhou, Z. (2022). Numerical & experimental studies on the effects of the TBM cutter profile on rock cutting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26, 416-432.
- Emmanuel, D. A. D. A., JOSEPH, S., OYEWOLA, D., FADELE, A. A., & CHIROMA, H. (2021). Application of grey wolf optimization algorithm: Recent trends, issues, & possible horizons. *Gazi University Journal of Science*, 35(2), 485-504.
- Farrokh, E. (2021). Layout design specifications of hard-rock TBM cutterheads at maximum cutter penetration & TBM advance. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 2049.
- Farrokh, E. (2022). Lace Design Optimization for Hard Rock TBMs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(12), 5517-5534.
- Geng, Q., Bruland, A., & Macias, F. J. (2018). Analysis on the relationship between layout & consumption of face cutters on hard rock tunnel boring machines (TBMs). *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 51, 279-297.
- Gertsch, R., Gertsch, L., & Rostami, J. (2007). Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. *International Journal of rock mechanics & mining sciences*, 44(2), 238-246.
- Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., & Zhao, J. (2006b). Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 21(1), 46-55.
- Gong, Q. M., Zhao, J., & Hefny, A. M. (2006a). Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters & cutter spacing optimization. *Tunnelling & Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 21(3), 263-263.
- Gong, Q. M., Zhao, J., & Jiao, Y. Y. (2005). Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling & underground space technology*, 20(2), 183-191.
- Huo, J., Sun, W., Chen, J., Su, P., & Deng, L. (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 & Technology*, 24, 521-528.
- 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.
- 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 & technology*, 29, 3043-3058.
- Katibeh, H., & Aalianvari, A. (2012). Common Approximations to the water inflow into Tunnels. *Drainage systems*, 75-88.
- Liang, Q., Zhang, D., Coppola, G., Mao, J., Sun, W., Wang, Y., & Ge, Y. (2016). Design & analysis of a sensor system for cutting force measurement in machining processes. *Sensors*, 16(1), 70.
- Lin, L., Xia, Y., & Wu, D. (2019). Multiobjective optimization design for structural parameters of TBM disc cutter rings based on FAHP & sampga. *Advances in Civil Engineering*, 2019.

- Liu, W., Li, A., & Liu, C. (2022). Multi-objective optimization control for tunnel boring machine performance improvement under uncertainty. *Automation in Construction*, 139, 104310.
- Mazaira, A., & Konicek, P. (2015). Intense rockburst impacts in deep underground construction & their prevention. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1426-1439.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
- Rostami, J. (1997). Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling & physical measurement of crushed zone pressure (Vol. 38, pp. 56-64). Golden, CO, USA: Colorado School of Mines.
- Rostami, J. (2008). Hard rock TBM cutterhead modeling for design & performance prediction. *Geomechanik und Tunnelbau: Geomechanik und Tunnelbau*, 1(1), 18-28.
- Rostami, J., Ozdemir, L., & Nilson, B. (1996, May). Comparison between CSM & NTH hard rock TBM performance prediction models. In Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology, Las Vegas (pp. 1-10).
- 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.
- 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.
- Yang, M., Xia, Y. M., Lin, L. K., Qiao, S., & Ji, Z. Y. (2020). Optimal design for buckets layout based on muck removal analysis of TBM cutterhead. *Journal of Central South University*, 27(6), 1729-1741.
- Zhao-Huang, Z., & Yong-Li, Q. (2011). Research on the layout of TBM disc cutter. *Engineering mechanics*, 28(5), 172-177.

Evaluation of the effect of spiral cutter head layout on the performance of mechanized TBM

M. Alebouyeh¹; A. Aalianvari^{2*}; M. Noriyan Bidgoli³

1- Ph.D. Student, Mining Engineering Department; University of Kashan, mohsenalebouyeh@grad.kashanu.ac.ir

2- Associate Professor; Mining Engineering Department, University of Kashan, ali_aalianvari@kashanu.ac.ir

3- Assistant Professor; Mining Engineering Department, University of Kashan, noriyan@kashanu.ac.ir

Received: 12 Jun 2023; Accepted: 23 Jan 2024

DOI: 10.22044/tuse.2024.13052.1477

Keywords

Tunnel boring machine (TBM)
Cutting tool
Spiral layout
Cutter head
GWO algorithm

Extended Abstract

Summary

One of the most important factors affecting the performance of TBMs (Tunnel Boring Machines) is the arrangement and layout of the cutting tool in the cutter head that directly affects the efficiency of boring operations, TBM lifecycle and proper cutting tool performance. Considering the complexities of cutting tool layout design affecting technical requirements of TBM structure and drilling engineering requirements, one of the main challenges of researchers in this regard is to provide efficient computational models has been.

Introduction

The main challenge in designing the appropriate layout of the drilling machine cutting tool consists of the implementation of the technical requirements of drilling engineering (including functional efficiency and ideal technical conditions for the drilling performance of TBMs), and also, the structural design requirements of the cutter head (including constraints for the structural design and ensuring the necessary resistance of the cutter head).

Methodology and Approaches

In the present research, in order to evaluate the effect of spiral layout of cutting tools on the performance of TBM, a numerical model has been developed using a meta-heuristic GWO algorithm to design a spiral layout. In order to evaluate the performance of the developed design model, the layout design process of the cutter head has been evaluated for an operational TBM sample.

Results and Conclusions

Based on the results, it is clear that the optimal spiral layout of the cutting tool reduces the lateral force of the entire device by 130.18 KN (84.07 %) and reduces the eccentric torque by 2.438 KN.m (21.09 %) compared to the original cutter head layout. Moreover, the results of the cutter head finite element modeling have shown that the implementation of spiral arrangement for the TBM cutting tool significantly increases the performance of the TBM from the structural point of view. In addition, the maximum stress values in the optimal layout model reach 13.046 MPa (16.62 %) and the amount of deformation under these loading conditions is reduced by 0.135 mm (41.41 %). Based on the results, it is clear that the optimal spiral layout of the cutter head has been significantly improved both from the point of view of drilling engineering (improved efficiency and drilling progress) and from the structural point of view for the TBM. The most important result of this research is to provide an efficient numerical model for the optimal spiral layout design of the cutting tool in the TBM based on the GWO optimization algorithm. The presented model can be implemented under different operating conditions and for different types of TBMs.