

ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی و انتخاب بهینه رودهدر در تونل‌های معدن زغال‌سنگ طبس

رضا محمدزاده^۱، کامران گشتاسبی^{۲*}، مصطفی شریف‌زاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران؛ Email: Mohammadzadeh.r@gmail.com

۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن؛ Email: Goshtasb@Modares.ac.ir

۳- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ Email: Sharifzadeh@aut.ac.ir

(دریافت ۱۸ اردیبهشت ۱۳۸۹، پذیرش ۱۷ بهمن ۱۳۸۹)

چکیده

با توجه به انواع ریسک‌هایی که در تونل‌ها وجود دارد، ریسک‌های ژئوتکنیکی در انتخاب روش حفاری و نوع ماشین حفاری از اهمیت بالایی برخوردار هستند. همچنین انتخاب مناسب‌ترین ماشین حفر تونل برای جلوگیری از بروز برخی مشکلات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در حین حفاری، بسیار مهم است. در این تحقیق مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی تونل‌زنی با رودهدر به همراه روش‌های کاهش آن مشخص شد. در حال حاضر سه دستگاه رودهدر در سه تونل دنبال لایه معدن زغال‌سنگ طبس در ایران مشغول به حفاری می‌باشند. بنابراین در این تحقیق تونل‌های مذکور مورد مطالعه قرار گرفتند. روش ماتریس ارزیابی ریسک در این تونل‌ها نشان داد که تونل‌سازی با رودهدر، ریسک کمتری نسبت به روش چالزنی و آتشیاری دارد. همچنین ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی مشخص کرد که رودهدر دارای کله حفار طبلیکی مناسب‌تر از کله حفار مخروطی برای حفاری این تونل‌ها است. سپس با استفاده از مدل پیش بینی نرخ حفاری آنی، توان کله حفار رودهدر تعیین شد که با توجه به آن، رودهدری از نوع سبک با توان کله حفار در حدود ۸۰-۱۱۰ کیلووات و وزنی در حدود ۴۰ تن مناسب تشخیص داده شد. در نهایت ۴ مدل رودهدر ساخته شده که ویژگی‌های آنها مشابه ویژگی‌های به دست آمده است، انتخاب شدند.

کلمات کلیدی

رودهدر، مخاطرات ژئوتکنیکی، ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی، معدن زغال‌سنگ طبس

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

به کارگیری ماشین‌های حفار بازویی بخصوص رودهدرها برای حفاری تونل در سنگ در بعضی شرایط، مشکلات و محدودیت‌های خاصی به همراه دارد. در هر پروژه به منظور انتخاب رودهدر مناسب، معمولاً در زمینه پیش بینی راندمان حفاری، فرسایش ابزار و هزینه‌های راهبری ماشین تحقیقاتی انجام می‌شود، اما همواره تنوع شرایط زمین‌شناسی و تغییرات غیر قابل پیش بینی پارامترهای توده سنگ در طول مسیر تونل باعث کاهش راندمان و گاهی باعث توقف حفاری می‌شود. از جمله این عوامل می‌توان به تغییرات ناگهانی مقاومت سنگ، تناوب لایه‌های سخت و نرم، درصد بالای کوارتز در سنگ و وجود آب زیرزمینی اشاره نمود.

استفاده از رودهدرها برای حفر تونل‌ها در سال ۱۹۶۰ آغاز شد و در اواخر دهه ۷۰ به طور قابل ملاحظه‌ای در اکثر نقاط دنیا متداول گردید [۱]. تا به حال تحقیقات متعددی بر اساس تأثیرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی زمین بر عملکرد رودهدرها انجام شده است. در این تحقیقات بیشتر میزان برش، انرژی ویژه، نرخ نفوذ، فرسایش ابزار و زمان کاربری این نوع ماشین‌ها بررسی شده است. به عنوان مثال، بیلگین^۱ و همکاران [۲، ۳] در این زمینه، مدلی برای پیش بینی عملکرد رودهدر ارائه داده‌اند. همچنین برای انتخاب تکنیک‌های حفر تونل و انتخاب ماشین مناسب برای حفاری در تونل و فضاهای زیرزمینی، کشورهای مختلفی از قبیل ژاپن، اتریش، نروژ، آلمان، ایتالیا، فرانسه استانداردهای متفاوتی بر اساس شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ارائه کرده‌اند که این استانداردها از سوی انجمن بین المللی تونل (AITE/ITA) منتشر شده است [۴]. همچنین تحقیقاتی در زمینه تحلیل پایداری رودهدر، مقایسه انواع رودهدرها و انتخاب بهینه آن با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره (AHP) صورت گرفته است [۵]، [۶] و [۷]. اما در این تحقیق‌ها به مشکلات و مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در روند انتخاب رودهدر توجه نشده است.

در زمینه شناسایی، ارزیابی و مدیریت ریسک در تونل‌ها نیز مطالعاتی انجام شده است [۸] و [۹]. در ایران نیز تحقیقی درباره انتخاب ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع (TBM) در سنگ با توجه به شرایط ژئوتکنیکی و ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی آن توسط شهریار و همکاران انجام شده است [۱۰]. در هیچ‌کدام از کارهای ذکر شده به انتخاب رودهدر با توجه به ریسک‌های ژئوتکنیکی و ارزیابی آنها توجه نشده است.

در همین راستا در این مقاله، پارامترهای اصلی انتخاب رودهدر مشخص و مهمترین مخاطرات ژئوتکنیکی در حین تونل‌زنی با

رودهدر به همراه روش‌های کاهش آن تعیین شده است. با توجه به این‌که سه دستگاه رودهدر در سه تونل دنبال لایه معدن زغال‌سنگ پروده یک طیس در ایران مشغول به عملیات حفاری می‌باشند، بنابراین مخاطرات ژئوتکنیکی در این تونل‌ها جهت انتخاب مناسب رودهدر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و روشی برای تعیین رودهدر مناسب جهت حفاری در تونل‌های معدن در نظر گرفته شد که شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه.

۲- بررسی و تحلیل مخاطرات ژئوتکنیکی در تونل‌های معدن زغال‌سنگ پروده یک طیس.

۳- تعیین روش تونل‌سازی بر اساس پارامترهای هندسی تونل.

۴- انتخاب روش تونل‌سازی مناسب در تونل‌های مورد نظر از بین دو روش رایج چالزنی و آتشیاری و حفاری با رودهدر با استفاده از روش ماتریس ارزیابی ریسک.

۵- ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی در تونل‌ها برای انتخاب مناسب کله حفار رودهدر.

۶- انتخاب بهینه رودهدر با توجه به معیارهای اصلی انتخاب ماشین بر اساس مدل تجربی پیش بینی نرخ حفاری آئی رودهدر (مدل بیلگین).

۷- مقایسه مشخصات رودهدر پیشنهادی با رودهدرهای رایج ساخته شده.

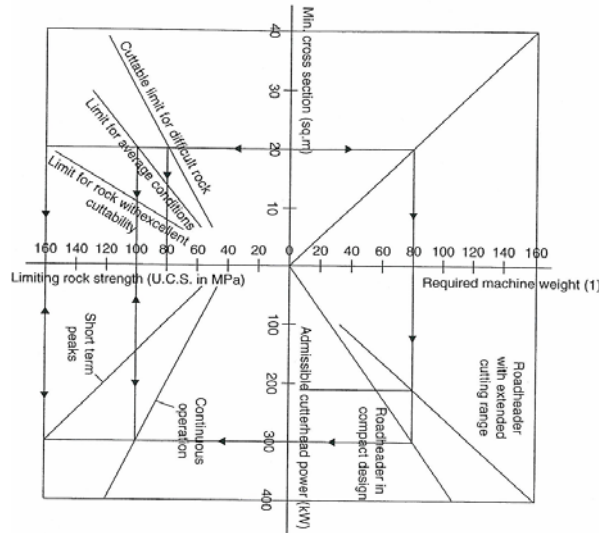
۲- پارامترهای اصلی انتخاب رودهدر

وزن رودهدرها مهم‌ترین خصوصیت در انتخاب آن‌ها می‌باشد. وزن، قدرت، اندازه و بعضی قسمت‌های ماشین را نمی‌توان تغییر داد یا به راحتی تعویض کرد. به همین دلیل پارامترهایی را که نمی‌توان بعداً تغییر داد باید به عنوان معیار اصلی انتخاب در نظر گرفت. رودهدرها را می‌توان بر مبنای وزن دستگاه، قدرت کله حفار به دستگاه‌های سبک تا خیلی سنگین طبقه بندی کرد، که قادرند در سطح کار تا اندازه ۴۵ متر مربع و در محدوده ۱۴۰-۲۰ مگاپاسکال مقاومت فشاری سنگ کار کنند [۱]. جزئیات آن در جدول ۱ آورده شده است. همچنین شکل ۱ رابطه مابین وزن دستگاه، نیروی آن، مقاومت سنگ، مقطع عرضی تونل و محیط عملیاتی را نشان می‌دهد که راهنمای مفیدی برای انتخاب یک رودهدر می‌باشد.

مقدار آن را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد. مهمترین مخاطرات ژئوتکنیکی عمده تونل‌سازی با رودهدر به همراه روش‌های رایج کاهش آن در جدول ۲ آورده شده است. اگر بروز مخاطرات قبل از شروع عملیات حفاری با انجام مطالعات اکتشافی دقیق پیش‌بینی شود، روش‌های مورد اشاره در جدول ۲ به عنوان روش‌های پیشگیرانه، ریسک ژئوتکنیکی را به حداقل رسانده و یا از بین خواهند برد.

در گذشته، در اکثر پروژه‌های تونل‌سازی، انتخاب ماشین تنها با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ناکافی تونل صورت می‌گرفته است، لذا بروز مخاطرات پیش‌بینی نشده حین اجرا، سبب عدم کارایی ماشین‌های انتخابی می‌شد. اما از آنجایی که عموماً انتخاب ماشین به دلایل اقتصادی و زمانی پروژه یک امر برگشت‌ناپذیر است، بنابراین مجریان طرح اغلب مجبور به ادامه عملیات با راندمان عملیاتی پایین بوده‌اند. از این‌رو مشخص نمودن مخاطرات ژئوتکنیکی و روش‌های کاهش آن و ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی می‌تواند این مشکلات را به حداقل رساند.

به منظور آشنایی بیشتر با برخی مشکلات و مخاطرات پیش‌بینی نشده ناشی از شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، برخی از پروژه‌های مسئله‌دار مختلف داخلی و خارجی حفاری با رودهدر به همراه شرایط زمین‌شناسی، نوع مخاطرات ژئوتکنیکی حین اجرا و رودهدر انتخابی در جدول ۳ آورده شده است. در تعدادی از این پروژه‌ها به علت عدم پیشروی، تعویض ماشین اجتناب‌ناپذیر بوده اما در سایر موارد مجبور به ادامه عملیات با راندمان بسیار پایین بوده‌اند.



شکل ۱: نمودار انتخاب رودهدر [۱]

۳- مخاطرات ژئوتکنیکی تونل‌سازی با رودهدر

منظور از مخاطرات ژئوتکنیکی در این تحقیق، بروز وقایعی است که پتانسیل تأثیرگذاری را روی تونل‌سازی داشته و می‌توانند پی‌آمدهای ناخواسته‌ای به همراه داشته باشند. منشأ این مخاطرات، شرایط ژئوتکنیکی نامطلوب است. مخاطرات ژئوتکنیکی در عملیات تونل‌سازی با ماشین‌های تونل‌سازی، به شرایط دشوار زمین اطلاق می‌شود که ماشین انتخابی قادر به انجام عملیات حفاری به خوبی عملکرد پیش‌بینی شده نباشد. اگرچه درجه معینی از مخاطرات ژئوتکنیکی به هنگام استفاده از هر یک از انواع ماشین‌های تونل‌سازی انتظار می‌رود، اما انتخاب ماشین مناسب حفاری

جدول ۱: طبقه بندی رودهدرها [۱]

رودهدر با محدوده برش اضافی		رودهدر با محدوده برش استاندارد		قدرت کله حفار (کیلووات)	محدوده وزن (تن)	رودهدر
حداکثر مقاومت فشاری تک محوره سنگ (مگاپاسکال)	حداکثر مقطع برش (مترمربع)	حداکثر مقاومت فشاری تک محوره سنگ (مگاپاسکال)	حداکثر مقطع برش (مترمربع)			
۲۰-۴۰	۴۰	۶۰-۸۰	۲۵	۵۰-۱۷۰	۸-۴۰	سبک
۴۰-۶۰	۶۰	۸۰-۱۰۰	۳۰	۱۶۰-۲۳۰	۴۰-۷۰	متوسط
۵۰-۷۰	۷۰	۱۰۰-۱۲۰	۴۰	۲۵۰-۳۰۰	۷۰-۱۱۰	سنگین
۸۰-۱۱۰	۸۰	۱۲۰-۱۴۰	۴۵	۳۵۰-۴۰۰	>۱۱۰	خیلی سنگین

جدول ۲: مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی تونل‌زنی با رودهدر به همراه روش‌های کاهش آن

مخاطرات ژئوتکنیکی	روش‌های کاهش مخاطرات
قابلیت حفاری (سختی و ساینده‌گی)	- استفاده از رودهدرهای دارای کله حفار قابل تعویض - استفاده از دندان‌ها، با جنس تنگستن کاربید مقاوم - بکارگیری آب فشان بروی رودهدر - اعمال گشتاور بالا
ناپایداری سقف، دیواره و سینه کار تونل	- سیستم‌های نگهداری همچون پیچ‌سنگ، قاب فولادی و شاتریت - پیش‌تحکیم با چال‌های تزریق - پوشش تونل با قطعات پیش‌ساخته بتنی - استفاده از سپر برای رودهدر
سینه کار مختلط (لایه‌ای)	- حفاری انتخابی در سینه کار - تعویض کله حفار
جریان آب زیرزمینی	- گمانه اکتشافی - زهکشی - پیش‌تزریق - انجماد
زمین‌های نرم و رسی	- کف‌سازی - زهکشی - طراحی دقیق اولیه مسیر تونل و قرار دادن لایه‌های مقاوم در کف
بارگیری سنگ‌های خرد شده	- استفاده از سیستم خاکبرداری مناسب - استفاده از رودهدر با کله حفار طبلکی

لایه می‌باشد. شیب تونل‌ها با تغییر شیب لایه زغال‌سنگ تغییر می‌کند. شیب تونل‌ها در مقاطع مختلف بین ۷- تا ۱۴- درجه است [۱۱]. از آنجائی که هر چهار تونل از نظر هندسی و روش اجرا ویژگی‌های یکسانی دارند و در شرایط یکسان زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه قرار گرفتند، بنابراین مجموعه چهار تونل، یک واحد در نظر گرفته می‌شود.

۵- مخاطرات ژئوتکنیکی در تونل‌های معدن طبس

۵-۱- قابلیت حفاری در سنگ‌های سخت و ساینده

مهم‌ترین پارامتر برای به‌کارگیری ماشین تونل‌سازی در شرایط دشوار زمین این است که آیا ماشین، قادر به حفاری مقرون به صرفه در سنگ سخت و ساینده می‌باشد یا خیر؟ ساینده‌گی بالا در سنگ‌های سخت، سبب مصرف زیاد مته و تعویض زود هنگام آنها شده و این امر پیشروی ماشین را هم از لحاظ زمانی و هم اقتصادی با مشکل مواجه می‌سازد. پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های دربرگیرنده تونل در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است تمام سنگ‌ها به جز ماسه‌سنگ دارای مقاومت فشاری کمتر از ۵۰ مگاپاسکال می‌باشند [۱۲].

براساس تعریف کلی ارائه شده از سوی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، سنگ سخت و زمین نرم به ترتیب به سنگ‌هایی با مقاومت فشاری ۵۰-۱۰۰ و ۵-۵۰ مگاپاسکال اطلاق می‌شود [۱۳]. از آنجائیکه که تقریباً بیشتر مسیر تونل را زمین نرم تشکیل می‌دهد، لذا احتمال برخورد با سنگ‌های سخت و ساینده در طول مسیر تونل کم می‌باشد. شکل ۲ مقایسه قابلیت حفاری با روش چالزنی و آتشیاری و رودهدر در محدوده متغیری از مقاومت فشاری سنگ‌ها با توجه به میزان سختی و ساینده‌گی آن‌ها را نشان می‌دهد.

۵-۲- ناپایداری سقف، دیواره و سینه کار تونل

با توجه به اینکه تونل‌ها دنبال لایه می‌باشند بخش عمده‌ای از مسیر تونل را زغال‌سنگ تشکیل داده است. همچنین سنگ‌هایی با کیفیت ضعیف مانند، شیل و لای سنگ نیز در کنار لایه‌های زغال قرار دارند. از سوی دیگر، توده سنگ‌های درزه‌دار سبب بروز ناپایداری‌های ساختاری به شکل ریزش بلوک‌ها می‌شود [۱۲].

۴- مشخصات هندسی تونل‌های فرعی معدن طبس و

روش اجرا

از نظر چینه‌شناسی، سازند دربرگیرنده زغال معدن طبس مربوط به دوره تریاس می‌باشد. سنگ‌های تشکیل دهنده این سازند عمدتاً گل‌سنگ با تناوبی از لای سنگ و ماسه سنگ است. لایه‌های اصلی زغال B₁, B₂, C₁ هستند که در محدوده‌ای ۵۰ متری از سازند قرار دارند [۱۱].

تونل‌های بازکننده معدن شامل چهار تونل شیب‌دار است که با فواصل ۳۵ متری از یکدیگر حفر می‌شوند. تونل‌ها به شکل نعل اسبی با سطح مقطع تمام شده ۱۵ متر مربع و به صورت دنبال

جدول ۳: پروژه‌های مسئله‌دار تونل‌زنی با انتخاب نامناسب رودهدر [۱۴]، [۱۵] و [۱۶]

ردیف	تونل (کشور)	طول (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	شرایط زمین شناسی	مخاطرات	رودهدر انتخابی	روش مناسب
۱	Altenberg (آلمان) [۱۴]	۳۲۰	۹۲	کوارتزیت سخت، رگه‌های کوارتز، اسلیت‌های رسی و سنگ‌های آذرین با درجات هوازدگی مختلف	خردشدگی و مصرف زیاد سرمته	کله حفار طبلکی توان ۳۰۰ Kw	چالزنی و آتشباری
۲	Meistern (آلمان) [۱۴]	۱۶۸۴	۱۴۰	سنگ‌هایی از جنس کنگلومرا، ماسه سنگ، اسلیت رسی، لایه‌های آهکی	مقاومت فشاری بالای لایه‌های کالکریت، کنگلومرا و سیلت و درزه‌داری و لایه بندی زیاد سنگ	پائورات مدل E242B توان ۳۰۰ Kw وزن ۱۲۰t	چالزنی و آتشباری
۳	Zeulendroda (آلمان) [۱۵]	۲۴۰۰	۱۱	کوارتزیت با مقاومت فشاری بالا، یک گسل بزرگ دارای موادی شکسته و ترک خورده و دارای درزه‌های زیاد	سنگ‌های سخت و ساینده، مصرف زیاد مته	اطلس کوپکو، ایکهوف ET120 توان ۱۳۲ Kw	تعویض کله‌حفار از مخروطی به طبلکی
۴	Nuremberg (آلمان) [۱۵]	۳۳۰۰	-	ماسه سنگ، ماسه سنگ رسی، دولومیت بسیار سخت و آهک کلسیتی	مشکل تخلیه به خاطر افزایش رس و سیلت، فرسایش بیش از حد مته،	اطلس کوپکو، ایکهوف ET380L/Q توان ۲۰۰ Kw وزن ۱۰۵t	چالزنی و آتشباری
۵	امامزاده هاشم (ایران) [۱۶]	۳۱۸۰	۷۹/۱ تا ۹۳	سنگ‌های کوارتزیت سخت و ماسه سنگ‌های کوارتزی در کنار لایه‌های نرم زغال، وجود لایه‌های سست شیلی	وجود لایه‌های مختلط در سینه کار، نشست دستگاه در لایه‌های شیلی زغال دار، وجود آب	پائورات T2-11 نوع طبلکی توان ۴۲۲ Kw وزن ۸۳t	چالزنی و آتشباری
۶	گاووشان (ایران) [۱۶]	۲۰۰۰۰	۷/۵ تا ۵/۵	فلش‌های سالم تا کمی هوازده و تناوب آهکی مارنی، شیل ماسه‌ای و ماسه سنگ نازک تا متوسط لایه	بالا رفتن مقاومت سنگ، افزایش میزان سیلیس و ساینده‌گی سنگ، مشکل تخلیه، نشست دستگاه،	پائورات T2-11 نوع مخروطی توان ۴۲۲ Kw وزن ۸۳t	چالزنی و آتشباری

جدول ۴: برخی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های دربرگیرنده تونل [۱۲]

نوع سنگ	RQD	چگالی ویژه (t/m^3)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	RMR
ماسه سنگ	۲۵-۳۰	۲/۷	۸۰-۹۰	۶/۶	۴۸
لای سنگ	۲۰-۲۵	۲/۷۲	۳۵-۴۵	۵/۲	۴۳
شیل	$10 \leq$	۲/۶۵	۱۰-۲۰	۰/۱۴	۳۸
زغال سنگ	$10 \leq$	۱/۵	۱۰-۱۵	۰/۱	۳۲

تونل نیز (مانند مقاطعی که زغال سنگ در کف قرار می‌گیرد) مشکلات حرکتی دستگاہ در حین نفوذ و عدم تعادل و پایداری مناسب در هنگام برش، کاهش نرخ حفاری را موجب می‌گردد. به دلیل سست بودن زغال سنگ و شیل، در مقطعی که این لایه‌ها در کف تونل قرار می‌گیرند، سرعت حفاری و پیشروی با رودهدر کاهش می‌یابد. علاوه بر این وجود لایه‌های رسی، به ویژه در کف تونل و در حضور آب، باعث افزوده شدن عملیات کف‌سازی به عملیات اجرایی تونل و کاهش زمان کاربری دستگاہ می‌شود. بنابراین در هنگام طراحی تونل‌های دنبال لایه این مطلب باید مورد توجه قرار گرفته و در صورت امکان تراز تونل به گونه‌ای تعیین شود که سنگ‌های مقاوم‌تر و با استحکام بیشتر در کف قرار گیرند.

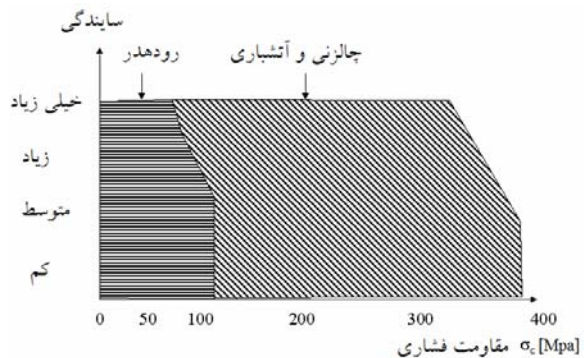
۵-۵- جریان آب زیرزمینی

در صورت وجود آب در جبهه کار تونل، جنس و ترکیب لایه‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در صورت استفاده از رودهدر، گل و لای ایجاد شده در اثر مجاورت لایه‌های رسی با آب، شرایط دشواری برای حفاری با رودهدر ایجاد می‌کند و احتمال فرونشستن و گیر کردن ماشین وجود دارد که راندمان حفاری را به شدت کاهش می‌دهد. اما با تعیین مناسب وزن و عرض دستگاہ و محاسبه میزان فشار وارده بر زمین توسط دستگاہ می‌توان تا حدودی از این مشکل جلوگیری کرد. همچنین با عملیاتی از قبیل زهکشی، تزریق و انجماد می‌توان جریان آب به داخل تونل را تا حدی کاهش داد.

۵-۶- بارگیری سنگ‌های خرد شده

همان‌طور که در جدول ۵ اشاره شد، تونل‌ها به صورت شیب‌دار و با کاهش شیب همراه می‌باشند. به علت وجود نیروی ثقل همواره مشکلاتی در بارگیری و خاک‌برداری در سینه کار تونل وجود دارد زیرا سنگ‌ها و خاک‌های خرد شده به وسیله نیروی ثقل در پائین سطح سینه کار انباشته شده و به راحتی تخلیه نمی‌شوند. از طرفی با جریان آب به داخل آن‌ها، گل و لای ایجاد شده مشکلاتی را نیز در تخلیه مواد می‌افزاید. در صورت استفاده از رودهدر برای حفاری، با توجه به سیستم برش کله‌حفار مخروطی و طبلیکی، رودهدر طبلیکی، عملکرد بهتری در بارگیری، به واسطه ریختن مناسب سنگ‌های خرد شده بر روی صفحه بارگیری نسبت به رودهدر مخروطی دارد. کله‌حفار طبلیکی در حدود ۸۰٪ خاک را روی صفحه بارگیری می‌ریزد [۱].

بر اساس تحلیل پایداری سقف و سینه کار تونل و با توجه به میانگین RMR به دست آمده در جدول ۴ که ۴۰ می‌باشد، مشخص می‌شود که توده سنگ، مطابق نظر بنیاوسکی در رده سنگ‌های سست قرار می‌گیرد. اما با توجه به RMR در حالت بحرانی که ۳۲ است، زمان خود ایستایی متوسط برای تونل مورد نظر ۸۰ دقیقه است. از این رو سیستم نگهداری اولیه، پیچ‌سنگ به همراه شاتریت در سقف و استفاده از قاب‌های فولادی می‌تواند مفید باشد.



شکل ۲: مقایسه محدوده امکان استفاده از روش‌های چالزنی و آتشیاری و رودهدر [۱۷]

۵-۳- سینه کار مختلط

شیب تونل‌ها باعث به وجود آوردن شرایط مختلفی از لایه‌ها در سینه کار در کل طول مسیر تونل می‌شود. از آنجائی که تونل‌ها دنبال لایه می‌باشند، لایه‌های زغال سنگ به طور ترکیبی در میان دیگر لایه‌ها قرار گرفته است و در بعضی مقاطع باعث به وجود آمدن لایه‌های سخت و نرم در کنار یکدیگر می‌شود. به عنوان مثال قرار گرفتن ماسه سنگ در مجاورت لایه‌های زغال سنگ و شیل، شرایط مختلطی در سینه کار ایجاد می‌کند. شکل ۳ نمونه‌هایی از شرایط مختلط سینه کار در مسیر تونل را نشان می‌دهد.

۵-۴- زمین‌های نرم و رسی

با توجه به لایه‌های نرم تونل و زون‌های مورد نظر در جدول ۵ احتمال قرار گرفتن لای سنگ و شیل در کف تونل قابل انتظار می‌باشد. استفاده از رودهدرها در چنین زمین‌های نرم و رسی شرایط دشواری را ایجاد می‌کند. در بعضی زون‌های تونل، دو یا چند لایه در کف قرار می‌گیرد. در این شرایط، نامتقارن بودن تکیه‌گاه چرخ زنجیری دستگاہ باعث عدم تعادل رودهدر شده و بر ایستایی آن تأثیر منفی می‌گذارد. در صورت سست بودن کف



شکل ۳: حالت‌های مختلف سینه کار مختلط در مقاطع مختلف

جدول ۵: سنگ کف تونل در زون‌های مختلف مورد بررسی

زون	شیب (درجه)	سنگ کف تونل	مترای	
			تونل شماره ۱	تونل شماره ۲
۱	۷-۸	لای سنگ و لای سنگ ماسه‌ای	۱۱۵-۲۱۰	تونل شماره ۳
۲		زغال سنگ	۲۱۱-۲۲۳	۱۲۰-۱۷۵
۳	۱۱/۳-۱۲/۹	لای سنگ و لای سنگ ماسه‌ای	۲۱۱-۲۸۰	۲۳۰-۱۷۵، ۳۶۰-۲۰۰
۴		مختلط	۲۷۰-۳۲۰	
۵		زغال سنگ	۲۲۳-۲۷۰	

می‌توان با روش ماتریس ارزیابی ریسک، سطح ریسک این مخاطرات را به دست آورد.

۷-۱- روش ماتریس ارزیابی ریسک

در این روش لیستی از مخاطرات ژئوتکنیکی تهیه می‌شود و آن‌ها را در پنج گروه طبقه بندی می‌نمایند. برای وقایع مختلف یکی از درجات I الی IV را در نظر می‌گیرند و از ترکیب آن‌ها ماتریس ارزیابی ریسک به دست می‌آید، که در آن مناطق بی‌خطر، کم خطر، خطرناک و بحرانی مشخص می‌گردد. در نهایت اطلاعات کیفی به صورت کمی تبدیل و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به احتمال وقوع مخاطرات، می‌توان پی‌آمد مخاطرات را از بیشتر تا کمتر درجه بندی نمود. این تحلیل باعث می‌شود تا قابلیت اطمینان بهبود یابد و سطح ایمنی سیستم بالا رود. سطوح مذکور را می‌توان به صورت کمی نشان داد. احتمال وقوع مخاطرات و پی‌آمد مخاطرات به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

بنابراین جهت اندازه‌گیری ریسک باید:

- ۱- احتمال وقوع مخاطرات را ارزیابی کرد.
- ۲- پی‌آمد مخاطرات را تعیین نمود.

۶- انتخاب روش حفاری تونل‌های معدن

همانطور که گفته شد، تونل‌های دنبال لایه معدن اغلب در لایه‌های نرم زغال با مقاومت فشاری در حدود ۲۰-۱۰ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند، همچنین تونل‌ها به صورت دنبال لایه و به شکل نعل اسبی می‌باشند. از این رو استفاده از TBM ها با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالای این نوع ماشین‌ها به هیچ وجه گزینه مناسبی نمی‌باشد.

بنابراین دو گزینه برای حفر این تونل‌ها وجود دارد:

- روش سنتی چالزنی و آتشیاری
- روش مکانیزه استفاده از رودهدر

از این رو مناسب‌ترین روش تونل‌زنی از بین دو روش چالزنی و آتشیاری و روش حفاری با رودهدر با استفاده از ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی در تونل‌های معدن مورد نظر انتخاب می‌شود.

۷- ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی در تونل‌ها

ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی به روند شناخت مخاطرات ژئوتکنیکی و ریسک‌ها، ارزیابی پی‌آمدهای بالقوه‌شان و احتمال پیشامد آن‌ها، به اضافه راه کارهایی برای پیشگیری، گفته می‌شود. از آنجایی که مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی تونل‌زنی با رودهدرها تعیین شد و در بخش قبل، در تونل‌های معدن زغال‌سنگ طبس مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت، اکنون

جدول ۶: امتیازات مربوط به احتمال وقوع مخاطرات [۱۸]

احتمال	امتیاز	توضیحات
غیر محتمل	۱	شامل رخدادهایی با احتمال خیلی کم و یا غیرممکن
بعید	۲	شامل رخدادهایی با احتمال کم
محتمل	۳	شامل رخدادهایی که گاهی اوقات روی می‌دهند.
قابل انتظار	۴	شامل رخدادهایی که احتمالاً روی می‌دهند.
مکرر	۵	شامل رخداد مکرر

جدول ۸: ماتریس ریسک [۱۸]

مکرر	قابل انتظار	محتمل	بعید	غیر محتمل	احتمال / پی‌آمد
۵	۴	۳	۲	۱	جزئی
۱۰	۸	۶	۴	۲	متوسط
۱۵	۱۲	۹	۶	۳	جدی
۲۰	۱۶	۱۲	۸	۴	بحرانی
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	فاجعه آمیز
توضیحات				اندیس ریسک	امتیاز ریسک
ریسک بدون هیچ کاهش قابل قبول است				۱-۴	پایین
ریسک نسبتاً قابل قبول است. کاهش آن ممکن است نیاز باشد.				۵-۹	متوسط
ریسک در مرز قابل قبول بودن قرار دارد. روش‌های حذف و یا کاهش ریسک بایستی به کار گرفته شود.				۱۰-۱۵	بالا
ریسک به هیچ وجه قابل قبول نیست. روش‌های حذف و یا کاهش ریسک بایستی به کار گرفته شود.				۱۶-۲۵	بسیار بالا

جدول ۷: امتیازات مربوط به پی‌آمد مخاطرات [۱۸]

شدت پی‌آمد	امتیاز	توضیحات
جزئی	۱	خطر ندارد و در سیستم تأخیر یا آسیب به وجود نمی‌آورد.
متوسط	۲	حوادث جزئی است و خرابی یا تأخیر جزئی سیستم تا دو روز را در بردارد.
جدی	۳	باعث آسیب رساندن و یا تأخیر قابل جبران تا یک هفته می‌شود.
بحرانی	۴	باعث خرابی کلی در سیستم و تأخیر قابل توجه بین یک تا دو هفته می‌شود.
فاجعه آمیز	۵	خیلی خطرناک که خطر نابودی سیستم و یا تأخیر غیر قابل جبران را دارد

۳-۷- ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی حفاری با رودهدر

میزان ریسک هر یک از مخاطرات ژئوتکنیکی تونل‌زنی با رودهدر در جدول ۱۰ نشان داده شده است. برای انتخاب رودهدر با کله حفار مناسب، میزان سطوح ریسک ژئوتکنیکی برای هر دو نوع کله حفار مخروطی و طبلیکی ارزیابی و مقایسه شد.

با مقایسه بین سطح ریسک‌های دو روش فوق و استفاده از روش‌های کاهش مخاطرات و تقلیل سطح ریسک، می‌توان دریافت که استفاده از رودهدر برای حفاری در تونلهای مورد نظر از ایمنی بیشتری نسبت به چالزنی و آتشیاری برخوردار می‌باشد. با توجه به اختلاف کم بین میانگین سطح ریسک در دو نوع کله حفار، انتخاب کله حفار طبلیکی مناسب‌تر است.

۸- انتخاب بهینه رودهدر برای حفاری در تونلهای معدن

در این مرحله بر اساس معیارهای اصلی انتخاب رودهدر که وزن و توان کله حفار ماشین می‌باشد و با توجه به پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی تونل‌های مورد نظر، می‌توان رودهدر مناسبی جهت حفاری در تونل‌ها به طور پیشنهادی انتخاب کرد.

از ترکیب پارامترهای مذکور، ماتریسی ایجاد می‌شود که به آن ماتریس ارزیابی ریسک گفته می‌شود. با توجه به رابطه ۱ اندیس ریسک مقداری بین ۱ تا ۲۵ خواهد داشت که در جدول ۸ مقدار ریسک حاصله به همراه توضیحات آورده شده است.

$$(۱) \text{ پی‌آمد} \times \text{احتمال وقوع} = \text{میزان ریسک}$$

۷-۲- ارزیابی ریسک برای روش چالزنی و آتشیاری

به طور عمومی مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی و ریسک‌ها در استفاده از روش چالزنی و آتشیاری و با در نظر گرفتن اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه در جدول ۹ آورده شده است. با توجه به جدول ۹ میزان ریسک تمام مخاطرات حفاری با روش چالزنی و آتشیاری در سطح بالا (بین ۱۶-۱۰) قرار دارد که میانگین آن ۱۴/۱۶ می‌باشد که با توجه به جدول ۸ این سطح ریسک در مرز قابل قبول قرار دارد اما حتماً باید روش‌های حذف و یا کاهش ریسک را برای ایمنی بهتر و سرعت پیشروی بهتر به کار گرفت.

جدول ۹: مقادیر ریسک برای بکارگیری روش چالزنی و آتشیاری

ردیف	مخاطرات	ریسک	سطح ریسک	
			احتمال	پیامد
۱	توده سنگ درزه دار	زمین های نرم، ناپایداری سقف، دیواره و سینه کار تونل	۴	۴
۲	زون های گسله	شرایط مختلط سینه کار یا زمین نرم	۴	۴
۳	جریان آب	نفوذ آب در حفرات حین حفاری	۳	۴
۴	حفرات در توده سنگ	ناپایداری سقف، دیواره و سینه کار تونل	۴	۴
۵	تهویه تونل	ریسک ناشی از انفجار	۳	۵
۶	استفاده از مواد منفجره	انفجار ناپهنگام	۲	۵
میانگین سطح ریسک			۱۴/۱۶	

جدول ۱۰: مقادیر ریسک ژئوتکنیکی برای بکارگیری رودهدر

ردیف	مخاطرات	احتمال بروز	رودهدر مخروطی		رودهدر طبلیکی	
			پیامد	ریسک	پیامد	ریسک
۱	سنگ‌های سخت و ساینده	۳	۳	۹	۲	۶
۲	سینه کار مختلط	۴	۲	۸	۳	۱۲
۳	جریان زیاد آب	۳	۳	۹	۳	۹
۴	زمین‌های نرم و رسی	۴	۳	۱۲	۳	۱۲
۵	ناپایداری سقف، دیواره و سینه کار	۴	۴	۱۶	۴	۱۶
۶	بارگیری سنگهای خرد شده	۴	۳	۱۲	۲	۸
میانگین سطح ریسک			۱۰/۸۳		۱۰/۵	

مناسب برای مناطق درزه‌دار و زون‌های ضعیف و با مشاهدات
برجای چندین پروژه تونل و معادن توسعه داده شده است.

$$ICR = 0.28 \times HP \times (0.974)^{RMCI} \quad (2)$$

$$RMCI = UCS \times (RQD/100)^{2/3} \quad (3)$$

که در این رابطه:

ICR: نرخ حفاری آنی (مترمکعب در ساعت)

UCS: مقاومت فشاری تک محوره (مگاپاسکال)

RMCI: شاخص قابلیت حفاری توده سنگ

HP: توان کله حفار (اسب بخار)

RQD: شاخص کیفی توده سنگ

رابطه (۲) را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$HP = \frac{ICR}{0.28 \times (0.974)^{RMCI}} \quad (4)$$

در شرایط ایده‌آل می‌توان نرخ خالص حفاری را برابر ۲۰
مترمکعب در ساعت در نظر گرفت، که مقدار مناسبی برای نرخ

با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تونل‌ها،
ماشین ایده‌آل انتخابی باید ویژگی‌های اصلی زیر را داشته باشد:

۱- ماشینی سبک با کمترین اعمال فشار بر روی زمین

۲- دارای نرخ پیشروی بالا

۳- کار در شرایط دشوار زمین از جمله ناپایداری سقف، دیواره
و سینه کار تونل

۴- قابلیت تعویض کله حفار

۸-۱- انتخاب بهینه توان کله حفار

به چند روش می‌توان میزان توان کله حفار مناسب را به
دست آورد. بهترین روش استفاده از آزمایش برش خطی تمام
مقیاس است. روش دیگر، استفاده از مدل تجربی پیش‌بینی
نرخ حفاری رودهدر (مدل بیلگین) است، که در این تحقیق به
دست آورده شد.

بیلگین و همکاران [۲] روابط ۲ و ۳ را برای تعیین نرخ حفاری
آنی رودهدر به دست آوردند. این مدل براساس انواع
رودهدرهای مخروطی و طبلیکی و در توده سنگ‌های مختلف،

۸-۲- انتخاب رودهدر از میان رودهدرهای رایج

در نهایت ۴ مدل رودهدر رایج که بیشترین استفاده را در حفاری تونل‌ها و معادن در نقاط مختلف جهان دارند و ویژگی‌های آنها مشابه ویژگی‌های رودهدر پیشنهادی است و با ویژگی‌های تونل‌های مورد نظر سازگار می‌باشند، انتخاب گردید. این رودهدرها به همراه سایر مشخصاتشان در جدول ۱۳ آورده شده است.

فشار وارده بر زمین از سوی رودهدر، سرعت حرکت دستگاه و سیستم بارگیری از دیگر عوامل مهم انتخاب ماشین می‌باشد که در جدول ۱۳ بین رودهدرهای انتخابی مقایسه شده است که می‌توان بهترین حالت را از میان آنها برگزید. همچنین با در نظر گرفتن عواملی همچون هزینه ماشین، نحوه قرارداد با شرکت تولیدکننده دستگاه، خدمات پس از فروش، آسانی کار با دستگاه، می‌توان دستگاهی را از میان این چهار نوع انتخاب کرد.

۹- نتیجه‌گیری

ریسک‌های ژئوتکنیکی جزء بحرانی‌ترین ریسک‌های صنعت معدن کاری محسوب می‌شوند که همواره ایمنی معدن کاران و تجهیزات را تهدید می‌کنند لذا در راستای به حداقل رساندن این ریسک‌ها و ایمن ساختن معدن، مدیریت قوی برای تشخیص و ارزیابی ریسک‌ها و در نتیجه ارائه راه حلی مناسب به منظور کاهش ریسک‌ها، ضروری به نظر می‌رسد.

مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی عمده تونل‌زنی با رودهدر شامل: قابلیت حفاری (سختی و سایندگی)، ناپایداری سقف، دیواره و سینه کار تونل، سینه کار مختلط (لایه‌ای)، جریان آب‌های زیرزمینی، زمین‌های نرم و رسی و کیفیت بارگیری سنگ‌های خرد شده می‌باشد.

با توجه به میزان ریسک بین دو روش چالزنی و آتشباری و حفاری با رودهدر در تونل‌های معدن مورد مطالعه، استفاده از رودهدر به مراتب بهتر و دارای ریسک کمتری نسبت به روش چالزنی و آتشباری است. همچنین با توجه به میزان ریسک ژئوتکنیکی در تونل‌های مورد مطالعه، استفاده از کله حفار طبلیکی نسبت به مخروطی مناسب‌تر است.

با توجه به مطالعات انجام شده، مشخصات هندسی و پارامترهای ژئومکانیکی تونل‌ها، رودهدر مدل داسکو MD۱۱۰۰ که از ابتدا برای حفاری تونل‌های مورد نظر انتخاب شده بود، گزینه مناسبی می‌باشد.

حفاری آبی در معادن دارای لایه‌های زغال‌سنگ می‌باشد [۴]. میزان RMCI و توان کله‌حفار به ازای هر کدام از سنگ‌های تونل با توجه به مقاومت فشاری و شاخص کیفی آن‌ها با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ در جدول ۱۱ آورده شده است. فرض بر این است که نمونه‌های گرفته شده از تونل تقریباً ساختار رگه‌ای یکسانی داشته و سینه کار به طور یکنواختی ترکیبی از زغال‌سنگ، ماسه سنگ، لای سنگ و شیل باشد. توان کله حفار را می‌توان بر حسب کیلووات نیز به دست آورد.

$$(۵) \quad 112HP \times 0.7457 = 83.5KW$$

با استفاده از جدول ۱ و همچنین شکل ۱ دیگر معیارهای اصلی رودهدر را می‌توان به دست آورد که در جدول ۱۲ محدوده مشخصات اصلی رودهدر پیشنهادی آورده شده است. محدوده مشخصات اصلی رودهدر به دست آمده را می‌توان با مشخصات رودهدرهای ساخته شده رایج مطابقت داد و بر اساس آن رودهدرهایی را که مشخصاتی نزدیک محدوده مشخصات تعیین شده دارند، به عنوان انتخاب نهایی برگزید.

جدول ۱۱: میزان توان کله حفار به ازای مقاومت فشاری سنگ‌ها

توان (اسب بخار)	RMCI	RQD	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	نوع سنگ
۷۵/۷۵	۲/۱۵	۱۰	۱۰	زغال سنگ
۷۷/۸۲	۳/۲۳	۱۰	۱۵	زغال سنگ
۷۵/۷۵	۲/۱۵	۱۰	۱۰	شیل
۸۰	۴/۳۰	۱۰	۲۰	شیل
۹۸/۰۳	۱۱/۹۶	۲۰	۳۵	لای سنگ
۱۱۴/۹۴	۱۷/۸۵	۲۵	۴۵	لای سنگ
۱۶۵/۲۸	۳۱/۷۴	۲۵	۸۰	ماسه سنگ
۲۰۸/۳۰	۴۰/۳۳	۳۰	۹۰	ماسه سنگ
۱۱۲	میانگین			

جدول ۱۲: محدوده مشخصات اصلی رودهدر پیشنهادی

نوع رودهدر	سبک
محدوده وزن (تن)	۸-۴۰
توان کله حفار (کیلووات)	۸۰-۱۱۰
حداکثر مقطع برش (مترمربع)	۲۵
حداکثر مقاومت فشاری سنگ (مگاپاسکال)	۶۰-۸۰

قبیل زهکشی، تزریق و انجماد می‌توان جریان آب به داخل تونل را تا حدی کاهش داد.

- داشتن دو کله حفار مخروطی و طبلیکی برای رودهدر جهت بالابردن راندمان دستگاه در شرایط مختلف زمین و تعویض به هنگام آن‌ها برای حفاری مؤثر در تونل‌ها توصیه می‌شود.

- هر چه اطلاعات اکتشافی و مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تونل‌ها کامل‌تر باشد، می‌توان ماشین و تجهیزات مناسب‌تری جهت حفاری مداوم با کمترین مشکلات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی انتخاب کرد.

همواره برخی مشکلات در حین حفاری با رودهدر در تونل‌های معدن زغال‌سنگ پروده یک طبس وجود دارد که باعث تأخیر در عملیات، بهره‌وری کم دستگاه و حتی گاهی منجر به تغییر روش و استفاده از روش چالزنی و آتشباری شده است. پیشنهادهایی برای جلوگیری از این مشکلات آورده شده است:

- در صورت امکان تراز تونل به گونه‌ای تعیین شود که سنگ‌های مقاوم‌تر و با استحکام بیشتر در کف قرار گیرند.

- عملیات کف‌سازی موقت تأثیر مثبتی بر عملکرد رودهدر در زمین‌های نرم و رسی می‌گذارد، همچنین با عملیات‌هایی از

جدول ۱۳: مدل و ویژگی‌های رودهدرهای انتخاب شده

Voest-Alpine AM50	Dosco Overseas MD1100	AtlasCopco-Eickhoff ET-110	Dosco Overseas SL120	مدل دستگاه
۲۴	۳۱/۵	۲۵	۳۳	وزن (تن)
۱۱۰	۸۲	۱۱۰	۸۲	توان کله حفار (کیلووات)
۱۷۰	۱۵۷	۱۸۵	۱۶۵	توان کل (کیلووات)
طبلیکی	مخروطی/طبلیکی	مخروطی/طبلیکی	مخروطی/طبلیکی	نوع کله حفار (مخروطی/طبلیکی)
۲/۰-۴/۸	۴/۲	۴/۰	۴/۱	حداکثر ارتفاع برش (متر)
۴/۸	۲/۷-۵/۷	۵/۳	۲/۰-۴/۳	حداکثر عرض برش (متر)
۱/۳	۱/۴-۱/۷	۱/۴	۱/۵	فشار وارده بر زمین (بار)
۶/۰	۷/۲	۰/۵	۱۳/۸	سرعت حرکت (متر بر دقیقه)
اهرم‌های جمع کننده	چرخ ستاره‌ای اهرم‌های جمع کننده	دیسکی اهرم‌های جمع کننده	اهرم‌های جمع کننده	سیستم بارگیری

منابع

- [5] Acaroglu, O., Ergin, H., Eskikaya S.; 2006; "Analytical hierarchy process for selection of Roadheaders", The journal of the south African institute of mining and metallurgy, Vol. 106, pp. 569-575.
- [6] Acaroglu, O., Ergin, H.; 2006; "A new method to evaluate Roadheader operational stability", Tunneling and Underground space Technology, Vol. 21, pp. 172-179.
- [7] Ergin, H., Acaroglu, O.; 2007; "The effect of machine design parameters on the stability of a Roadheader", Tunneling and Underground space Technology, Vol. 22, pp. 80-89.
- [8] Wagner, H.; 2006; "Risk Management of tunneling Works", Workshop on safety in Tunnels and Underground Structures, Riyadh, pp 167-173.
- [9] Campos e Matos, A., Riberio e Souda, L., Kleberger, J., Lopes pinto, P.; 2006; "Geotechnical risk in rock tunnels", Taylor & Francis Group, London.
- [1] Raj tatiya, R.; 2005; "Surface and underground excavations method, techniques & equipment", A.A. balkema publishers, Chapter 10.
- [2] Bilgin, N., Yazici, S., Eskikaya, S.; 1996; "A model to predict the performance of Roadheaders and impact hammers in tunnel drivages", Int Proceedings Eurock'96, Torino, pp 715-720.
- [3] Bilgin, N., Dincer T., Copur H., Erdogan M.; 2004; "Some geological and geotechnical factors affecting the performance of a Roadheader in an inclined tunnel", Tunneling and Underground space Technology, Vol. 19, pp. 629-636.
- [4] ITA/AITES; 2009; "International Tunneling and Underground space association", WWW.ita-aites.org

- [15] Thuro, K, Plinninger, R.J.; 1998; "Geological Limits in Roadheader – Four Case studies", Proceeding 8th international IAEG Congress, Balkema, Rotterdam pp 3545-3552.
- [16] فروغ، امید؛ حسن پور، جعفر؛ ۱۳۸۲؛ "بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بر راندمان رودهدر"، کنفرانس ششم تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت، تهران.
- [17] Isaksson, T.; 2002; "Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel projects", Doctoral Thesis, Division of soil and rock mechanics royal institute of technology, Stockholm, Sweden.
- [18] قراچورلو، نجف، ۱۳۸۴، "ارزیابی و مدیریت ریسک"، انتشارات علوم و فنون.
- [10] Shahriar, K., Sharifzadeh, M., Khademi, J.; 2008; "Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions", Tunneling and Underground space technology, Vol 23, pp. 318-325.
- [۱۱] گزارش فنی اکتشافات مناطق زغال‌خیز ناحیه پروده طبس؛ ۱۳۷۴؛ دفتر فنی - مهندسی طرح تجهیز و راه اندازی معادن زغال‌سنگ پروده طبس.
- [۱۲] گزارش مجتمع معادن زغال سنگ پروده طبس؛ ۱۳۸۷؛ دفتر فنی - مهندسی معدن زغال سنگ طبس.
- [13] AFTES; 2000; "New recommendations on choosing mechanized tunneling techniques", WWW.ita-aites.org
- [14] Thuro, K.; 2003; "Predicting roadheader advance rates: geological challenges and geotechnical answers", 50th years symposium of the faculty of Mines, Istanbul Technical University, Turkey.

پی‌نوشت

¹ Bilgin