Archive of SID.ir

Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)
Vol 18, No 60, 2023, pp 91-106

DOI: 10.22034/IJME.2023.1972196.1953
DOR: 20.1001.1.17357616.1402.18.59.7.0

Iranian Society of Mining Engineering (IRSME)

A new method for selection of optimum tunnel excavation method based on multi-criteria decision-making

Seyed Milad Mohammadi Karibozorg[1], Seyed Hasan Madani[2*], Hamed Moladavoodi[3], Shobeir Arshadnezhad[4]

1. PhD student in rock mechanics, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, seydmilad95@gmail.com
2. Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, hmadani@aut.ac.ir
3. Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, davoodi@aut.ac.ir
4. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Islamic Azad University, Mahalat Branch, Markazi, Iran, s_arshadnejad@yahoo.com

Received: 2022/11/06 - Accepted: 2023/03/02

Abstract

Selection of tunnel excavation method is one of the most critical stages of tunnel implementation because the correct choice of the excavation method is essential from the economic, technical, and safety point of view, and the results of the wrong selection of excavation method may lead to disastrous situations. Due to the complexities in the geological and geotechnical characteristics and the limitations of different tunnel excavation methods, one excavation method cannot be used for all conditions; therefore, a suitable method should be used for a specific situation. Various methods have been presented for choosing the excavation method. More of these methods are based on experience and in the form of formulas, tables, or diagrams. They also rely on the estimation of geomechanical parameters of the rock mass and virgin rock, as well as some physical parameters of the rock. Since one method cannot be easily considered superior to others, all have shortcomings, and none have provided a comprehensive model for selecting the tunnel excavation method.

Various parameters are effective in choosing the right option for the excavation of a tunnel. The most important are geological, geotechnical, geometrical, executive, and economic parameters and parameters related to infrastructure and necessary conditions for excavation methods. The effective factors have not been considered comprehensively in the existing methods provided. This research presents a comprehensive model for evaluating and selecting the most suitable tunnel excavation method among drill and blasting, controlled blasting, cut and cover, Austrian drilling method, road header machine, and conventional shield excavation (TBM). In this model, after studying and reviewing the relevant topics, 31 more effective indicators were considered. Since the importance of indicators in the evaluation is not the same, they should be weighted. Different methods were evaluated, and two methods, SAW[▯] and AHP, were chosen as the most suitable. In this way, the SAW method has been carried out hierarchically on the issue of implementation and ranking. According to the tree branch diagram of choosing the appropriate excavation method, the importance of the indicators in the first and second levels are not the same, and a separate importance coefficient should be considered for each level so that the sum of the coefficients in each level is equal to 1. For this purpose, a

* Corresponding Author

CC BY

▯ Simple Additive Weighting

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

questionnaire was prepared according to the indicators. This questionnaire was distributed among 29 company managers, project managers, university members, consulting engineers, and others who had opinions on this discussion. After filling out the questionnaire, a total of 28 questionnaires were acceptable. Based on the importance of each index, numbers between 0 and 10 were chosen, with 0 being the least important and 10 the most important. According to the number of people who have chosen each option, the weight of each indicator can be determined. For this purpose, a coefficient corresponding to the importance of each option was considered from 0 to 1. In this way, each index's initial weight was calculated, and each index's normalized weight was obtained by dividing the initial weight by the total importance. The average initial coefficients in each level one indicator include geological and geotechnical, geometric, and executive indicators. Infrastructures, necessary conditions, and different economic indicators show the difference in the importance of each one. In this way, the coefficient of indicators in level one is calculated by normalizing the average numbers of indicators in level two. Finally, the final coefficient for each index is obtained from the normalized coefficient in the first level. The normalized coefficient in the second level and the cost of machinery and equipment has the most weight among the indicators, with 7.9%.

Scoring for each of the indicators for each of the excavation methods was also done by means of evaluation questionnaires containing questions in the form of numerical values, such as the scoring of the Nicholas method in the extraction of mineral deposits, in which according to the desirability or undesirable of each feature, 0, 1, 2, 3, 4 and -121 points are used so that -121 points have been used for the impossibility of using the excavation method according to the desired characteristic. A score of zero is used if the possibility of implementing the proposed method is very low but not impossible despite the desired index. With this score, the chance of using the method does not increase. If using the investigated evaluation method is possible according to that characteristic, a score of 1 or 2 is meant. Points 3 and 4 indicate the desirability of implementing the evaluation method according to that index. Then, the assigned data for each of the indicators were checked for normality by SPSS software. If not normal, they were normalized by replacing the data, and finally, averaging was done for each table filled by people.

Finally, the simple weighting method (SAW) was used hierarchically to calculate the final score of each method. In this method, according to the geological and geotechnical conditions and geometrical parameters of the existing tunnel, the score of each index is multiplied by the final weight of that index, and the final score of each method is obtained from their sum. Eventually, the method with the highest score is selected as the appropriate excavation method.

For validation, the results related to the Pataveh-Dehdasht road tunnel (tunnel number 1), which is located between 34+740 km and 35+925 km from the middle part of this section and passes through three geological zones and has a total length of 1185 meters. It was implemented, and finally, for zones 1 and 2, the drilling and blasting method and for zone 3, the Austrian drilling method (NATM) were selected. While the technique presented by the client was based on other existing methods for choosing the tunnel excavation method, for all 3 zones, it was a drilling and blasting method, and it was recommended to use a hydraulic hammer for areas with lower resistance.

Keywords

selecting the optimal method, tunnel excavation, hierarchical analysis process, Pataveh-Dahdasht tunnel.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نشریه مهندسی معدن ایران
Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)

دوره ۱۸، شماره ۶۰، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۹۱ تا ۱۰۶
Vol 18, No 60, 2023, pp 91-106

DOI: 10.22034/IJME.2023.1972196.1953
DOR: 20.1001.1.17357616.1402.18.59.7.0

انجمن مهندسی معدن ایران
Iranian Society of Mining Engineering (IRSME)

یادداشت فنی

ارایه روشی برای انتخاب مناسب حفر تونل بر اساس تصمیم‌گیری چند معیاره

سید میلاد محمدی کری بزرگ[۱]، سید حسن مدنی[۲*]، حامد ملاداودی[۳]، شبیر ارشد نژاد[۴]

۱. کارشناس ارشد مهندسی معدن- مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، seydmilad95@gmail.com
۲. استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، hmadani@aut.ac.ir
۳. استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، davoodi@aut.ac.ir
۴. استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، گروه مهندسی معدن، s_arshadnejad@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱

چکیده

انتخاب روش حفاری تونل یکی از مهم‌ترین مراحل اجرای تونل است و نتایج انتخاب نادرست روش حفر ممکن است منجر به ایجاد موقعیت‌های فاجعه‌بار شود. در انتخاب گزینه مناسب برای حفر یک تونل پارامترهای مختلفی موثرند که مهم‌ترین آن‌ها پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، هندسی، اجرایی، اقتصادی و پارامترهای مربوط به زیرساخت‌ها و شرایط لازم برای روش‌های حفاری است و روش‌های موجود متکی به تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و سنگ بکر و همچنین برخی پارامترهای فیزیکی سنگ‌ها است که در آن‌ها عوامل موثر به صورت همه جانبه در نظر گرفته نشده‌اند. در این پژوهش، مدلی برای ارزیابی همه جانبه و انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل از بین روش‌های چالزنی و آتشباری، چالزنی و آتشباری کنترل شده، کند و پوش، روش حفاری اتریشی، ماشین حفاری بازویی و حفاری با سپر معمولی (TBM) ارایه شده است. در این مدل پس از مطالعه و بررسی مباحث مربوط، ۳۱ شاخص که در ارزیابی موثرترند در نظر گرفته شد و از آنجا که اهمیت شاخص‌ها در ارزیابی یکسان نیست برای تعیین وزن آن‌ها پرسشنامه‌ای تهیه و با تجمیع نظر خبرگان وزن‌دهی شد که هزینه ماشین‌آلات و تجهیزات با 7/9 درصد بیشترین وزن در بین شاخص‌ها را دارد . امتیازدهی به هر یک از شاخص‌ها برای هر یک از روش‌های حفاری نیز به وسیله پرسشنامه‌های ارزیابی حاوی سوالات به صورت مقداردهی عددی مانند امتیازدهی روش نیکلاس در استخراج ذخایر معدنی انجام گرفت که در آن با توجه به مطلوب و یا نامطلوب بودن هر یک از ویژگی‌ها برای روش‌های حفاری از امتیازهای ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۱۲۱- استفاده می‌شود. سرانجام برای محاسبه امتیاز نهایی هر روش از روش وزن‌دهی ساده(SAW) به طور سلسله مراتبی استفاده شد. در این روش با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی و پارامترهای هندسی تونل موجود، امتیاز هر شاخص در وزن نهایی آن شاخص ضرب می‌شود و از حاصل جمع آن‌ها امتیاز نهایی هر روش به دست می‌آید. در نهایت روشی که بیشترین امتیاز را داشته باشد به عنوان روش مناسب حفر انتخاب می‌شود.

برای اعتبارسنجی، نتایج مربوط به تونل راه پاتاوه- دهدشت (تونل شماره ۱) که از سه زون زمین‌شناسی عبور می‌کند پیاده‌سازی و در نهایت برای زون ۱ و ۲ روش چالزنی و آتشباری و برای زون۳ روش حفاری اتریشی (NATM) انتخاب شد در حالی که روش ارایه شده توسط کارفرما بر اساس سایر روش‌های موجود برای انتخاب روش حفاری تونل برای هر ۳ زون روش چالزنی وآتشباری بوده و توصیه شده بود که برای مناطق با مقاومت کمتر از چکش هیدرولیکی استفاده شود.

کلمات کلیدی

انتخاب روش مناسب، حفر تونل، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، تونل پاتاوه- دهدشت

* نویسنده مسئول مکاتبات.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱- مقدمه

انتخاب روش حفاری تونل گامی مهم برای شروع حفاری است زیرا این انتخاب صحیح روش حفاری از نقطه نظر اقتصادی، تکنیکی و ایمنی بسیار مهم است. با توجه به پیچیدگی‌هایی که در مشخصه‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی و نیز محدودیت‌های روش‌های مختلف حفاری تونل وجود دارد، نمی‌توان یک روش حفاری را برای همه شرایط به کار برد، بنابراین برای یک شرایط خاص باید از روشی مناسب استفاده کرد. روش‌های مختلفی در انتخاب شیوه حفر تونل‌ها ارایه شده‌اند که همگی بر اساس تجربه و به صورت، فرمول، جدول و یا نمودار است و نیز متکی بر تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و سنگ بکر و همچنین برخی پارامترهای فیزیکی سنگ‌ها است و نمی‌توان یک روش را به راحتی بر دیگر روش‌ها برتر دانست و همه آن‌ها کاستی‌هایی دارند و هیچ کدام یک مدل جامع برای انتخاب روش حفاری تونل ارایه نداده‌اند.

اولین روش برای انتخاب روش حفاری تونل در سال ۱۹۷۱ توسط فرانکلین[۱] ارایه شد، در این روش برای انتخاب روش حفر یک نمودار پیشنهاد شده که در آن شاخص بار نقطه‌ای و فاصله‌داری ناپیوستگی غالب در توده سنگ به عنوان پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده است [1].

در سال ۱۹۷۵ ویور[۲] روشی را ارایه داد که بر اساس یک ساختار امتیازدهی مانند سیستم طبقه‌بندی RMR بنا شده است. محدوده مقادیر مجموع امتیازهای روش ویور بین صفر تا ۱۰۰ و متشکل از ۷ پارامتر است. امتیاز کلی در این روش حاصل جمع امتیازات هر پارامتر است [2].

کریستن[۳] در سال ۱۹۸۲ روشی را بر اساس تشخیص قابلیت حفاری به صورت یک فرمول تجربی و بر مبنای ساختار و پارامترهای سیستم طبقه‌بندی Q ارایه داد [2].

در ادامه و در سال ۱۹۹۴ پتیفر[۴] و فوکس[۵] روشی را ارایه دادند که بر اساس نمودار اصلاح شده فرانکلین بنا شده و در استاندارد انگلستان (BS 5930) متداول است. این روش در چندین پروژه سدسازی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [3].

در سال ۲۰۰۰ روش پیشنهادی شرکت کاترپیلار ارایه شد که در صورتی که روش‌های حفر مکانیزه بدون چالزنی و آتشباری مورد توجه باشد، می‌توان از آن استفاده کرد که این شرکت بر اساس رده‌بندی ماشین‌آلات تولیدی خود (سه دسته سبک، متوسط و سنگین) چهار نمودار کاربردی را پیشنهاد کرده است [3].

تسیامباوس[۶] و ساروگلو[۷] در سال ۲۰۱۰ مدلی با استفاده از جمع‌آوری جامعه آماری نسبتا بزرگ و جدید با کمک سیستم طبقه‌بندی GSI پیشنهاد کرده و به کمک دو نمودار، مطرح کردند که نمودار اول برای اندیس بار نقطه‌ای کمتر از ۳ مگاپاسکال و نمودار دوم برای بیش از ۳ مگاپاسکال است [1].

در ادامه آن یک راهنمایی برای انتخاب روش حفاری توسط وزارت صنعت، معدن و تجارت ارایه شده است. این راهنما مستلزم استفاده از نمودارهای اصلاح شده روش تسیامباوس و ساروگلو است که در این نمودارها علاوه بر اصلاح محدوده‌های رسم شده در روش تسیامباوس و ساروگلو، از نمودار GSI اصلاح شده کایی(۲۰۰۴) بهره می‌گیرد که دارای مزیت رقومی شده دو محور خود است [4].

پیچیدگی، هزینه بالای عملیات و وسعت تشکیلات سازمانی، لزوم به کارگیری شیوه‌های تصمیم‌گیری مناسب و انجام تصمیم‌های مستدل را برای مدیران روشن می‌سازد. پیچیدگی ذاتی بسیاری از محیط‌های تصمیم‌گیری از جمله انتخاب روش حفاری تونل، لزوم جامع‌نگری در تصمیم‌گیری‌ها را ایجاب می‌کند. امروزه لوازم بهره‌گیری از افراد مختلف با مشاغل، تخصص‌ها، تجربیات، سوابق و دیدگاه‌های علمی گوناگون کاملا متداول شده است. همه این موارد، ضرورت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری‌های گروهی و چند معیاره را بیش از پیش مشخص می‌کند [5].

در این مطالعه سعی بر آن است که مشکلات مدل‌هایی که تاکنون ارایه شده‌اند تا حدودی برطرف شده و روشی ارایه شود که مساله انتخاب روش حفاری را از تمام زوایا به دقت مورد بررسی قرار می‌دهد و با به‌کارگیری شاخص‌های متعدد، ارزیابی همه جانبه‌ای را میسر می‌کند، همچنین برای شاخص‌های مهم‌تر درجه اهمیت بیشتر در نظر می‌گیرد. در پایان نیز برای هر روش حفاری امتیازی تعلق می‌گیرد و روشی که بیشترین امتیاز را بر اساس شرایط خاص منطقه مورد مطالعه داشته باشد

[۱] Franklin
[۲] Weaver
[۳] Kristen
[۴] Pettifer
[۵] Fookes
[۶] Tesiambause
[۷] Sarogluoe

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

به عنوان روش مناسب حفاری انتخاب می‌شود.

۲- شاخص‌های ارزیابی

از آنجا که قانون مشخصی برای انتخاب روش حفاری تونل وجود ندارد، تصمیم‌گیری در مورد آن در بیشتر مواقع بر اساس تجارب مشابه تا بر اساس محاسبات نظری انجام می‌گیرد [6]. روش حفاری اصولا باید بر اساس اندرکنش‌های پیچیده‌ای که بین عوامل متعددی مانند شرایط زمین‌شناسی، ایمنی، هزینه و ملاحظات زمان بندی وجود دارد، تعیین شود.

به طور کلی پارامترهای موثر در انتخاب روش حفاری تونل در پنج دسته کلی پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، هندسی، اجرایی، زیرساخت‌ها و شرایط لازم و پارامترهای اقتصادی رده‌بندی می‌شود که در ادامه تشریح شده است.

۲-۱- پارامترهای زمین‌شناسی و ژئو تکنیکی

۲-۱-۱- مقاومت فشاری تک محوره

بر اساس تقسیم‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) سنگ‌های مختلف بر اساس مقاومت فشاری تک محوره از سنگ‌های با مقاومت بسیار بالا (۲۵۰ تا ۷۰۰ مگاپاسکال) تا سنگ‌های با مقاومت بسیار پایین (۱ تا ۵ مگاپاسکال) بر اساس اصلاح طبقه‌بندی دیر و میلر[1] تقسیم‌بندی می‌شود.

۲-۱-۲- مقاومت کششی

از جمله پارامترهای مهم ژئومکانیکی که بر مکانیزم حفاری و پایداری سنگ تاثیر دارد. مقاومت کششی طبق گزارش DAUB[2]، محدوده کاربرد ماشین‌های مکانیزه را می‌توان بر اساس این پارامتر تعیین کرد. محدوده این ماشین‌ها معمولا بین ۰٫۵ تا ۲۵ مگاپاسکال است. از روش چالزنی و آتشباری معمولا در هر مقاومت کششی می‌توان استفاده کرد. ماشین‌های بازویی نیز بر حسب وزن خود تا مقاومت ۱۵ مگاپاسکال قابل کاربردند [7].

۲-۱-۳- مقاومت برشی درزه‌ها

از نظر مقاومت برشی درزه‌ها را به سه گروه زیر تقسیم‌بندی می‌کنند [4]:

- ضعیف: درزه‌هایی تمیز با سطح صاف یا درزه‌هایی پر شده از موادی با مقاومت کمتر از مقاومت توده سنگ اصلی
- متوسط: درزه‌هایی تمیز با سطحی ناصاف
- مقاوم: درزه‌هایی که با موادی با مقاومت مساوی یا بیشتر از توده‌سنگ اصلی پر شده‌اند.

۲-۱-۴- فاصله داری درزه‌ها

این پارامتر عبارت از فاصله متوسط عمودی مابین دو ناپیوستگی مجاور متعلق به یک سری دسته درزه و تعیین‌کننده ابعاد تک بلوک سنگ سالم است. طبقه‌بندی مربوط به فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها که توسط انجمن جهانی مکانیک سنگ (ISRM) در سال ۱۹۷۸پیشنهاد شده در جدول ۱ آورده شده است [4].

جدول ۱- طبقه‌بندی فواصل ناپیوستگی‌ها [4]

وضعیت درزه‌ها نسبت به هم	فاصله(میلی‌متر)
بی‌نهایت نزدیک	<۲۰
خیلی نزدیک	۲۰ تا ۶۰
نزدیک	۶۰ تا ۲۰۰
متوسط	۲۰۰ تا ۶۰۰
باز (دور)	۶۰۰ تا ۲۰۰۰
خیلی باز (خیلی دور)	۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰
بی‌نهایت باز (بی‌نهایت دور)	>۶۰۰۰

۲-۱-۵- تداوم درزه‌ها

منظور از تداوم، طول اثر ناپیوستگی است که در یک رخنمون مشاهده می‌شود. از روی تداوم می‌توان معیاری تقریبی از گسترش فضایی یک ناپیوستگی را برآورد کرد. در سنگ‌های متراکم و سخت منتهی شدن ناپیوستگی به ناپیوستگی‌های دیگر، تداوم را کاهش می‌دهد. انجمن جهانی مکانیک سنگ (ISRM) با استفاده از معمول‌ترین طول اثر هر سری از ناپیوستگی‌ها که در رخنمون‌ها اندازه‌گیری شده‌اند، تداوم درزه را مطابق جدول ۲ طبقه‌بندی کرده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی تداوم ناپیوستگی‌ها [4].

تداوم درزه	طول اثر(متر)
خیلی کم	<۱
کم	۱ تا ۳
متوسط	۳ تا ۱۰
زیاد	۱۰ تا ۲۰
خیلی زیاد	>۲۰

۲-۱-۶- مجاله شوندگی

این ویژگی عبارت از تغییر مکان‌های بزرگ وابسته به زمان در اطراف تونل است که در صورت تجاوز از تنش حدی برشی

[1] Dear and Miller

[2] Deutscher Ausschuss for unterrdisches bauen

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مواد، تونل وارد رفتار خزشی می‌شود. روش‌های تئوری و تجربی زیادی برای مچاله‌شوندگی ارایه شده است که در آن از عدد توده سنگN، عرض تونلB استفاده می‌شود، مقدارN از رابطه ۱ به دست می‌آید [4].

$$N=\frac{RQD}{J_n}\times\frac{J_r}{J_a}\times J_w \qquad (۱)$$

که درآن:

RQD: شاخص کیفیت توده سنگ

J_n: امتیاز مربوط به تعداد دسته درزه‌ها

J_r امتیاز مربوط به زبری درزه‌ها

J_a: امتیاز مربوط به هوازدگی درزه‌ها

J_w: امتیاز مربوط به شرایط آب‌های درزه‌ای

۲-۱-۷- آب‌های زیرزمینی

وجود آب در تونل باعث ناپایداری جبهه‌کار و دیواره‌های آن و آسیب به تجهیزات، قطعات الکتریکی و مکانیکی و مشکل شدن حمل مواد حفاری شده می‌شود. در صورت استفاده از روش مکانیزه باید میزان فشار آب به کله حفار و سپر نیز مورد توجه قرار گیرد [8]. علت ناپایداری در جبهه‌کار و دیواره‌ها، کاهش مقاومت ماده سنگ و مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها در اثر فشار آب است [9].

۲-۱-۸- وجود مواد ساینده از جمله کوارتز

سایش سنگ را می‌توان با فرسایش یا کنده شدن ذرات سطحی وسایل و ابزارهای حفاری در اثر تماس و اصطکاک با آن تعریف کرد. در تونلزنی به روش حفاری و آتشباری، حفاری سنگ‌های بسیار سخت و ساینده ممکن است تاثیر کمی بر روی هزینه‌های تونل‌سازی داشته باشد ولی در تونلزنی مکانیزه با TBM این ویژگی‌ها تاثیرات زیادی بر عملیات حفر تونل دارد و ممکن است آن را دچار وقفه ناگهانی کند. از جمله مشکلاتی که به دلیل ساینده بودن سنگ برای TBM ممکن است پیش آید می‌توان به قابلیت دسترسی پایین ماشین به دلیل زمان زیاد لازم برای تعویض برش‌دهنده‌ها، هزینه بالای برش‌دهنده‌ها و نرخ نفوذ پایین آن را بر شمرد. هرچه فاصله دیسک‌ها از مرکز دوران بیشتر باشد مقدار سایش تیغه آن به دلیل افزایش پیمایش بیشتر خواهد شد [11].

۲-۱-۹- وجود گسل در مسیر حفر تونل

افزایش تخلخل، از یک سوکاهش مقاومت تراکمی تک محوره را در پی دارد و از سوی دیگر موجب کاهش دانسیته سنگ می‌شود که حفرپذیری سنگ را بهتر می‌کند. وجود حفرات انحلالی می‌تواند مشکلاتی را در چرخش ماشین‌های حفاری تمام مقطع ایجاد کند.

۲-۱-۱۰- وجود حفرات و مواد کارستی

افزایش تخلخل از یک سو کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری را در پی دارد و از سوی دیگر موجب کاهش چگالی سنگ می‌شود که حفرپذیری سنگ را آسان‌تر می‌کند. وجود حفرات انحلالی ممکن است مشکلاتی را در چرخش ماشین‌های حفاری تمام مقطع ایجاد کند.

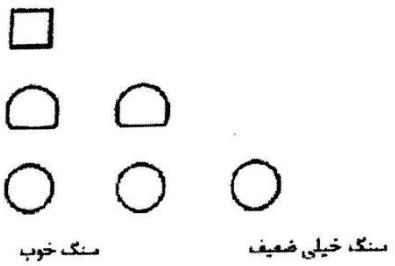
۲-۲- پارامترهای هندسی

۲-۲-۱- شکل مقطع تونل

شکل فضای زیرزمینی بر اساس نوع کاربری، وضعیت زمین‌شناسی، بزرگی و امتداد تنش‌های برجای منطقه، بار تخمینی اعمال شده از زمین و توزیع آن انتخاب می‌شود.

از دیدگاه شکل هندسی، مقطع تونل به سه دسته زیر تقسیم می‌شود [10]:

- تونل قوسی شکل (نعل اسبی، نعل اسبی اصلاح شده، تخم مرغی)
- تونل‌های دایره‌ای شکل
- تونل‌های با مقطع چهارضلعی(ذوزنقه‌ای، چهارگوش)



شکل ۱- شکل‌های مختلف مقاطع حفاری تونل

۲-۲-۲- ابعاد مقطع تونل

از دیدگاه سطح مقطع، تونل‌ها به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند [7]:

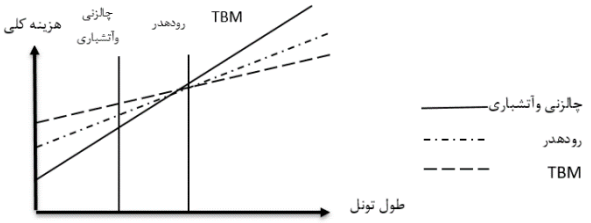
- تونل کوچک مقطع با مساحتی کمتر از ۱۰ مترمربع (مانند اغلب تونل‌های معدنی، اکتشافی یا پیشاهنگ و تونل‌های تاسیساتی)
- تونل متوسط مقطع با مساحتی بین۱۰ تا ۳۰ مترمربع (مانند تونل ارتباطی بین دو تونل اصلی راه و یا آزاد راه، پناهگاه‌های زیرزمینی)
- تونل بزرگ مقطع با مساحتی بیش از ۳۰ مترمربع (مانند تونل‌های راه و آزاد راه، مترو، راه آهن، ایستگاه‌های راه آهن زیرزمینی، مغار نیروگاه‌ها و نظایر آن)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۳-۲-۲- طول تونل

یکی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی که علاوه بر ایجاد محدودیت‌های فنی، تاثیر قابل توجهی بر ارزیابی اقتصادی انتخاب روش تونلسازی دارد، طول تونل است. در پروژه‌های تونلسازی طول تونل حداقل یا حداکثری برای هر روش وجود دارد که ساخت تونل در طولی کمتر از آن، از لحاظ فنی و اقتصادی قابل توجیه نیست.



شکل ۲- رابطه طول تونل با هزینه روش‌های مختلف تونل‌سازی [12]

۴-۲-۲- شیب تونل

شیب تونل یکی دیگر از پارامترهای محدود کننده برای اولویت‌بندی انتخاب گزینه‌های مناسب برای حفاری تونل است. مهم‌ترین عوامل محدودکننده در شیب تونل، ماشین‌آلات ترابری و حفاری‌اند. اگر مسیر حفاری در جهت شیب باشد باید مشکل نفوذ آب به تونل را هم بر آن افزود.

۵-۲-۲- انحنای مسیر تونل

مواجهه با شرایط نامناسب زمین‌شناسی در مسیر تونل همچون برخورد با زون‌های برشی، گسل، جریان آب زیرزمینی و نظایر آن مشکلات فراوانی را بر پروژه تحمیل می‌کند. در اغلب موارد برای اجتناب از برخورد به چنین نواحی‌ای در مسیر حفر تونل انحناهایی به وجود می‌آورند. کمترین شعاع مجاز برای قوس‌ها در مسیر تونل در روش‌های مختلف متفاوت است و به عوامل بسیاری همچون نوع ماشین آلات حفاری و تجهیزات ترابری بستگی دارد.

۳-۲- پارامترهای اجرایی

۱-۳-۲- آهنگ پیشروی

آهنگ پیشروی در زمان کل ساخت و ساز و هزینه حفاری تاثیر بسیاری دارد. در شرایط عادی، مشخص شده است که آهنگ پیشروی در روش TBM خیلی بیشتر از روش چالزنی و آتشباری است(۱٫۵تا۶ برابر). از سوی دیگر در روش چالزنی و آتشباری پیشروی در مناطق خردشده با توجه به تطبیق‌پذیری بالای روش، پیشرفت آسان‌تر است [13].

۲-۳-۲- انعطاف‌پذیری

انعطاف‌پذیری در روش حفاری به قابلیت تطبیق آن روش با تغییرات در نیمرخ ، مرز و شرایط توده سنگ بستگی دارد. روش TBM انعطاف‌پذیری کمتر یا بدون انعطاف‌پذیری نسبت به روش چالزنی و آتشباری است. تغییر قطر TBM تقریبا محدود است و به طراحی ماشین و همترازی در طول ساخت و ساز سنگی دارد [14].

۳-۳-۲- لرزش مجاز زمین

یکی از عواملی که باعث محدود شدن استفاده از روش آتشباری در محیط‌های شهری می‌شود، میزان لرزش مجاز زمین است. در انتخاب روش حفر تونل در محیط‌های شهری و یا در نزدیکی مناطق حساس، میزان ارتعاش و کاربرد روش آتشباری باید مورد مطالعه قرار گیرد [15].

۴-۳-۲- ثبات زمین

کیفیت زمین اطراف تونل عامل تعیین‌کننده‌ای برای ثبات تونل‌های ایجاد شده در سنگ و خاک است. اگر زمین اطراف تونل را سنگ‌های همگن و سخت تشکیل دهند، معمولا نیاز به هیچ‌گونه فعالیت اضافی برای تقویت و نگهداری فضای حفاری شده نیست. در صورتی که زمین اطراف تونل را سنگ‌ها و خاک‌های ضعیف تشکیل دهند، برای جلوگیری از بدتر شدن شرایط توده سنگ اطراف تونل باید اقدام به تقویت و نگهداری زمین کرد [16].

۵-۳-۲- زمان اجرا

در هر پروژه مهندسی افزایش زمان اجرا باعث افزایش هزینه‌ها، تاخیر در بهره‌برداری و بازگشت سرمایه و در نهایت کاهش جذابیت اقتصادی طرح می‌شود. در حفر تونل‌ها به دلیل ماهیت و محیط عملیات مدت اجرای پروژه اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا تنش‌ها و تاثیرات محیطی زیادی بر طرح اثر کند، ممکن است مشکلات فنی زیادی را موجب شوند [17].

۶-۳-۲- ایمنی، بهداشت و محیط زیست

محیط‌های کاری به ویژه ساخت فضاهای زیرزمینی، خطرات خاص و منحصر به فردی دارند که پرسنل فعال در آن‌ها باید آگاهی‌های لازم را نسبت به این خطرات داشته باشند. این حوادث باید در برنامه ایمنی کارگاه شناخته شده و پیش‌بینی‌های لازم ارایه شود [18].

۷-۳-۲- مدیریت

مدیریت‌پروژه، برنامه‌ریزی و هدایت پروژه در چهارچوب زمان، هزینه و کیفیت مشخص به سوی ایجاد نتایج مشخص آن

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

است. مدیریت پروژه فعالیت‌های برنامه‌ریزی، سازماندهی، نظارت بر اجرا و هدایت اجرا را در بر می‌گیرد و سعی دارد تا با استفاده درست از منابع، نتایج مشخص و مورد انتظار را با هزینه توافق‌شده قبلی در موعد درست خود تحویل دهد. مدیریت پروژه در اجرای این مهم از دو بازوی قدرتمند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه بهره می‌گیرد [19].

۲-۴- زیرساخت‌ها وشرایط لازم برای هر روش

۲-۴-۱- راه‌های دسترسی

به علت رفت و آمد افراد و حمل مصالح، تجهیزات و ماشین‌آلات به کارگاه باید راه دسترسی برای اتصال به نزدیک‌ترین راه موجود در منطقه با استاندارد لازم، احداث شود. در هنگام طراحی و اجرای راه دسترسی باید به موقعیت ساختگاه، محل احداث پروژه، محل برپایی تجهیز کارگاه، حفاری‌ها، خاکبرداری یا خاکریزی احتمالی آینده و هر عامل احتمالی دیگری که ممکن است در آینده بخشی از راه را دچار اختلال یا انسداد کند توجه شود [20].

۲-۴-۲- تجهیز و آماده‌سازی

گزینه‌های مختلف حفر تونل نسبت به میزان تاثیر تجهیز و آماده‌سازی برای هر روش اولویت‌بندی می‌شوند. به عنوان مثال، در حفاری با TBM باید در مجاورت دهانه تونل فضای کافی برای مونتاژ TBM در نظر گرفته شود تا هم تخلیه قسمت‌های مختلف دستگاه که به محل کارگاه حمل می‌شود و هم مراحل نصب آن به آسانی انجام گیرد زیرا برای مونتاژ TBM نیاز به ماشین‌آلات بزرگ با وزن زیاد است بنابراین علاوه بر فضای کافی باید بستر محل مونتاژ نیز مناسب و از قبل آرماتوربندی، بتن‌ریزی و ریل‌گذاری شده باشد.

۲-۴-۳- برق‌رسانی

در مورد تامین انرژی برق کارگاه‌ها امکان استفاده از شبکه برق شهری و یا دیزل ژنراتور باید مورد بررسی قرار گیرد. مساله مهم در این مورد، برآورد حداکثر برق مورد نیاز است. در صورت استفاده از شبکه برق سراسری، برای اطمینان از تامین برق در موارد قطع برق شبکه سراسری باید از دیزل ژنراتور نیز به عنوان برق اضطراری استفاده کرد. میزان توان مصرفی مورد نیاز بستگی به روش حفاری، نوع تجهیزات و تعداد ساختمان ها در کارگاه دارد.

۲-۴-۴- آبرسانی

تامین آب شرب سالم مورد نیاز برای استفاده در تولید مصالح (بتن و ملات‌ها)، امور بهداشتی پرسنل، تراکم مصالح خاکی، شست و شوی ماشین‌آلات، ساخت و حمل بتن، ایجاد فضای سبز در طول اجرای پروژه نیازی است که اجرای پروژه بدون آن ممکن نیست.

۲-۴-۵- فضاهای لازم برای کارخانه تولید قطعات بتنی

ماشین‌آلات لازم برای کارخانه تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی شامل قالب، ماشین‌آلات ساخت شبکه آرماتور و تجهیزات عمل‌آوری بتن است که باید در فضایی مناسب نصب شوند. ابعاد فضای کارخانه تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی باید شامل انبار آرماتور و قطعات فلزی، کارگاه آرماتوربندی، قالب‌ها، تجهیزات عمل‌آوری و محل انباشت قطعات پیش‌ساخته باشد [21].

۲-۵- عوامل اقتصادی

۲-۵-۱- هزینه ماشین‌آلات و تجهیزات

این هزینه‌ها شامل دو جزء هزینه‌های مالکیت و هزینه‌های عملیاتی است که هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه سرمایه‌گذاری، استهلاک و هزینه بیمه، مالیات و انبارداری می‌شود و هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه‌های سوخت، خدمات، تعمیرات، لاستیک، اقلام خاص و اپراتور ماشین را در بر دارد [22].

۲-۵-۲- هزینه نیروی انسانی

تعداد و مدت زمان نیروی انسانی مورد نیاز از روی فعالیت‌های پروژه و در نظر گرفتن حجم عملیات و بر اساس برآورد فعالیت‌هایی که باید انجام گیرد، مشخص می‌شود. با معلوم شدن نوع شغل و تعداد نیروی انسانی مورد نیاز، می‌توان مدت زمان مورد نیاز به نیروی انسانی را مشخص کرد. هزینه نیروی انسانی ممکن است ۳۰ تا ۴۰ درصد بودجه کل یک پروژه تونل‌سازی را به خود اختصاص دهد [22].

۲-۵-۳- هزینه تامین مصالح

در هر یک از روش‌های حفاری تجهیزات و مصالح معینی مورد نیاز است. روش چالزنی و آتشباری نیاز به تامین مواد منفجره و چاشنی‌های انفجاری و سایر مصالح برای آتشباری به عنوان هزینه تامین مصالح دارد. در روش‌های حفاری تونل به صورت نیمه مکانیزه و مکانیزه نیز تهیه برش‌دهنده‌ها و قطعات جایگزین قطعات فرسوده، به عنوان هزینه تامین مصالح در نظر گرفته می‌شود. سایر هزینه تامین مصالح مورد نیاز پروژه مانند سیمان، تورسیمی و نظایر آن باید به طور مجزا مشخص و محاسبه شود [23].

۳- وزن‌دهی شاخص‌ها

اهمیت هر شاخص در انتخاب روش حفاری متفاوت است به همین دلیل باید ضریب اهمیت هر شاخص تعیین شود. در پروژه

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

حاضر مساله انتخاب روش مناسب حفاری بر اساس تصمیم‌گیری چند معیاره دارای شاخص‌هایی(معیارها) است که در دو سطح عنوان شده (شکل ۳) و گزینه‌ها (روش‌های حفاری) نیز مشخص است. برای رتبه‌بندی روش‌های مختلف ارزیابی‌شده و دو روش SAW[1] و AHP[2] به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. به این ترتیب که روش SAW، به صورت سلسله مراتبی بر روی مساله اجرا و رتبه‌بندی انجام شده است. با توجه به نمودار شاخه درختی انتخاب روش مناسب حفاری، اهمیت شاخص‌ها در سطح اول و دوم یکسان نیست و باید برای هر سطح ضریب اهمیتی جداگانه در نظرگرفته شود، به طوری که مجموع ضرایب در هر سطح برابر با ۱ شود. به این منظور پرسشنامه‌ای با توجه به شاخص‌ها تهیه شد. این پرسشنامه بین ۲۹ نفر از مدیران شرکت و مدیران پروژه، اساتید دانشگاهی، مهندسان مشاور و سایر عواملی که در این بحث صاحب نظر توزیع شد. پس از پر شدن پرسشنامه در مجموع ۲۸پرسشنامه قابل قبول بود. بر اساس اهمیت هر شاخص اعداد بین ۰ تا۱۰ انتخاب می‌شود که به ترتیب عدد ۰ کمترین و عدد۱۰ بیشترین اهمیت را دارد. با توجه به تعداد افرادی که هرگزینه را انتخاب کرده‌اند، می‌توان وزن هر شاخص را مشخص کرد. به این منظور ضریبی متناسب با اهمیت هر یک از گزینه‌ها، از ۰ تا ۱ طبق جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- ضریب اهمیت هر گزینه در پرسشنامه‌های تعیین وزن شاخص‌های ارزیابی

عدد اختصاصی	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ضریب اهمیت	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱

وزن اولیه هر شاخص (w_j) طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$w_j = (\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{10}\frac{i}{10}K_i) \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن:

N: تعداد کل افرادی که پرسشنامه‌ها را پرکرده‌اند

K_0 تا K_{10}: به ترتیب تعداد افرادی است که گزینه‌های صفر تا ۱۰ را انتخاب کرده‌اند.

به این ترتیب وزن اولیه (W_j) هر شاخص محاسبه شد. وزن نرمال‌شده هر شاخص (W_j') از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$W_j' = {W_J}/{\sum W_J} \qquad (۳)$$

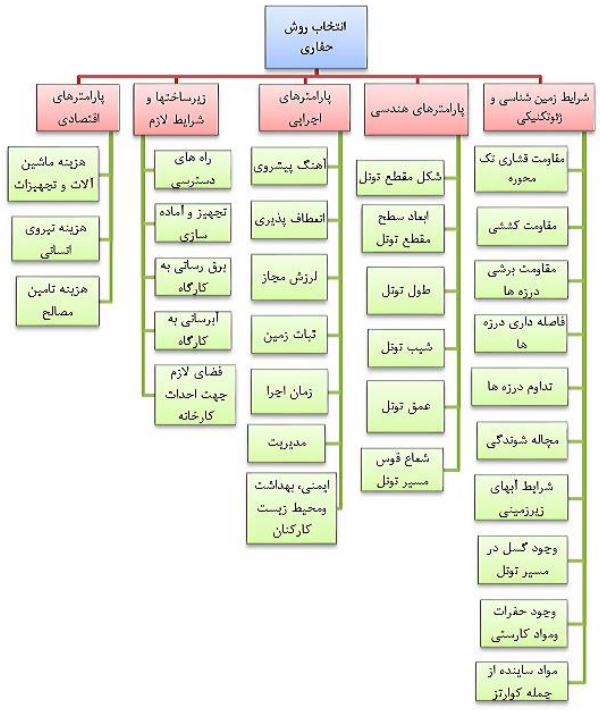
ضرائب یاد شده در جدول ۴ ارایه شده است.

(۴)

ضریب نرمال سطح دوم × ضریب نرمال سطح اول = ضریب نهایی

میانگین ضرایب اولیه در هر یک از شاخص‌های سطح یک یعنی شاخص‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، هندسی، اجرایی، زیرساخت‌ها و شرایط لازم و شاخص‌های اقتصادی متفاوت است و این نشان‌دهنده تفاوت اهمیت هرکدام از آن‌ها است. به این ترتیب ضریب شاخص‌ها در سطح یک با نرمال‌سازی اعداد میانگین شاخص‌های سطح دو محاسبه می‌شود. ضرایب مربوط به شاخص‌های سطح یک در جدول ۴ آورده شده است. ضریب نهایی هر شاخص از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

ضرایب نهایی شاخص‌ها در جدول ۵ ارایه شده است.



شکل ۳- شاخص‌های انتخاب روش حفاری

جدول ۴- میانگین ضرایب اولیه و نرمال شاخص‌های سطح یک

شاخص‌های سطح اول	میانگین ضرایب اولیه	ضرایب نرمال (درصد)
زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی	۷۹/۱۴۲	۲۱/۵۴۱
هندسی	۷۶/۹۹۹	۲۰/۹۵۸
اجرایی	۷۳/۱۱۲	۱۹/۹۰۰
زیر ساخت و شرایط لازم	۶۶/۷۱۴	۱۸/۱۵۸
اقتصادی	۷۱/۴۲۸	۱۹/۴۴۱
مجموع	۳۶۷/۳۹۸	۱۰۰

[1] Simple Additive Weighting

[2] Analytical Hierarchy Process

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۵- ضرایب اولیه، نرمال و نهایی برای شاخص‌های سطح دوم

سطح اول	نماد	(شاخص‌های سطح دوم)	وزن اولیه	وزن نرمال	وزن نهایی
شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی	S_{A1}	مقاومت فشاری تک‌محوره	۸۷٫۸۵۷	۱۱٫۱۰۱	۲٫۳۹۱
	S_{A2}	مقاومت کششی	۷۳٫۵۷۱	۹٫۲۹۶	۲٫۰۰
	S_{A3}	مقاومت برشی درزه‌ها	۶۸٫۹۲۸	۸٫۷۰۹	۱٫۷۸۶
	S_{A4}	فاصله‌داری درزه‌ها	۷۲٫۸۵۷	۹٫۲۰۵	۱٫۹۸۳
	S_{A5}	تداوم درزه‌ها	۶۷٫۸۵۷	۸٫۵۷۴	۱٫۸۴۶
	S_{A6}	مچاله‌شوندگی	۶۸٫۴۲۸	۱۰٫۹۲۰	۲٫۳۵۲
	S_{A7}	شرایط آب‌های زیرزمینی	۸۱٫۷۸۵	۱۰٫۳۳۳	۲٫۲۲۶
	S_{A8}	وجود گسل در مسیر تونل	۸۷٫۸۵۷	۱۱٫۱۰۱	۲٫۳۹۱
	S_{A9}	حفرات و مواد کارستی	۸۶٫۴۲۸	۱۰٫۹۲۰	۲٫۳۵۲
	S_{A10}	مواد ساینده از جمله کوارتز	۷۷٫۸۵۷	۹٫۸۳۷	۲٫۱۱۹
پارامترهای هندسی	S_{B1}	شکل مقطع تونل	۸۸٫۹۲۸	۱۹٫۷۶۱	۴٫۱۴۱
	S_{B2}	ابعاد سطح مقطع تونل	۷۳٫۲۱۴	۱۶٫۲۶۹	۳٫۴۰۹
	S_{B3}	طول تونل	۸۷٫۸۵۷	۱۹٫۵۲۳	۴٫۰۹۱
	S_{B4}	شیب تونل	۵۸٫۵۷۱	۱۳٫۰۱۵	۲٫۷۲۷
	S_{B5}	عمق تونل	۷۷٫۸۵۷	۱۷٫۳۰۱	۳٫۶۲۶
	S_{B6}	شعاع قوس مسیر	۶۶٫۵۷۱	۱۴٫۱۲۶	۲٫۹۶۰
پارامترهای اجرایی	S_{C1}	آهنگ پیشروی	۶۵٫۷۱۴	۱۲٫۸۴۰	۲٫۵۵۵
	S_{C2}	انعطاف‌پذیری	۶۷٫۱۴۲	۱۳٫۱۱۹	۲٫۶۱۰
	S_{C3}	لرزش مجاز زمین	۶۶٫۷۸۵	۱۳٫۰۴۹	۲٫۵۹۶
	S_{C4}	ثبات زمین	۷۵٫۰۰	۱۴٫۶۵۴	۲٫۹۱۶
	S_{C5}	زمان اجرا	۹۲٫۵۰۰	۱۸٫۰۷۳	۳٫۵۹۶
	S_{C6}	ایمنی، بهداشت و محیط زیست کارکنان	۷۳٫۵۷۱	۱۴٫۳۷۵	۲٫۸۶۰
	S_{C7}	مدیریت	۷۱٫۰۷۱	۱۳٫۸۸۶	۲٫۷۶۳
زیرساخت‌ها و شرایط لازم	S_{D1}	راه‌های دسترسی	۶۵٫۷۱۴	۱۹٫۷۰۰	۳٫۵۷۷
	S_{D2}	تجهیز و آماده‌سازی	۷۲٫۵۰۰	۲۱٫۷۳۴	۳٫۹۴۶
	S_{D3}	برق‌رسانی به کارگاه	۷۱٫۷۸۵	۲۱٫۵۲۰	۳٫۹۰۷
	S_{D4}	آب‌رسانی به کارگاه	۶۳٫۲۱۴	۱۸٫۹۵۰	۳٫۴۴۱
	S_{D5}	فضای لازم برای احداث کارخانه	۶۰٫۳۵۷	۱۸٫۰۹۴	۳٫۲۸۵
شاخص‌های اقتصادی	S_{E1}	هزینه تامین مصالح	۶۴٫۶۴۲	۳۰٫۱۶۶	۵٫۸۶۴
	S_{E2}	هزینه نیروی انسانی	۶۱٫۷۸۵	۲۸٫۸۳۳	۵٫۶۰۵
	S_{E3}	هزینه ماشین آلات و تجهیزات	۸۷٫۸۵۷	۴۱٫۰۰۰	۷٫۹۷۱

۴- امتیازدهی

نحوه امتیازدهی به هر یک از روش‌ها بر اساس شاخص‌های مورد نظر شبیه امتیازدهی روش نیکلاس در استخراج ذخایر معدنی است که به صورت امتیازدهی عددی مطرح شده است.

با توجه به مطلوب و یا نامطلوب بودن هر یک از ویژگی‌ها برای روش‌های حفاری از امتیازهای ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۱۲۱- استفاده شده است. از امتیاز ۱۲۱- برای غیرممکن بودن بکارگیری روش حفاری با توجه به مشخصه مورد نظر استفاده شده است. امتیاز صفر در صورتی استفاده می‌شود که امکان اجرای روش

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پیشنهادی با وجود شاخص مورد نظر خیلی کم ولی غیرممکن نباشد. با این امتیاز شانس بکارگیری روش افزایش پیدا نمی‌کند. در صورتی که استفاده از روش حفاری مورد بررسی با توجه به آن مشخصه امکان‌پذیر باشد، امتیاز ۱یا ۲ منظور می‌شود. امتیاز ۳ و ۴ نشان‌دهنده مطلوبیت اجرای روش حفاری با توجه به آن شاخص است. پرسشنامه برای ۲۹ نفر از افراد جامعه آماری شامل مدیران شرکت‌ها، مدیران پروژه، اساتید دانشگاهی، مهندسان مشاور و سایر عوامل صاحب‌نظر در بحث انتخاب روش حفاری و عوامل موثر در آن توزیع شد. با بررسی اولیه پرسشنامه‌ها ۱ مورد به دلیل عدم همکاری مناسب و پاسخ‌های نادرست و بعضا تکراری کنار گذاشته شد و ۲۸ پرسشنامه کامل برای تحلیل انتخاب و سپس داده‌های اختصاص یافته برای هر یک از شاخص‌ها از نظر نرمال بودن به وسیله نرم‌افزار SPSS بررسی و در صورت نرمال نبودن با جایگزینی داده‌ها نرمال‌سازی شد و در نهایت میانگین‌گیری برای هر یک از خانه‌های جداول پرشده توسط افراد، انجام شد. در نهایت عدد اختصاصی برای هر بخش جدول ارایه شده از ضرب میانگین حاصل از پرسشنامه در ضریب اهمیت محاسبه شده برای آن شاخص به دست می‌آید. اگر عملکرد بی‌مقیاس شده گزینه i ام روی شاخص j ام، r_{ij} و w_j وزن معیار j ام باشد، مقدار نهایی(P_{ij}) هر گزینه i بر اساس شاخص j طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$P_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{m} W_j \times r_{ij} \qquad (۵)$$

جدول ۶- امتیاز مربوط به شاخص‌های اجرایی برای هر یک از روش‌های حفاری تونل

شاخص	راحتی‌راه‌های دسترسی	تجهیزوآماده سازی کارگاه	برق‌رسانی به کارگاه	آبرسانی به کارگاه	فضای‌لازم برای کارخانه تولید قطعات پیش ساخته بتنی
شرح / روش	-	-	-	-	-
چالزنی و آتشباری	۱۱٫۶۲	۱۱٫۱۳	۹٫۹۰	۸٫۲۳	۲٫۲۳
چالزنی و آتشباری کنترل شده	۱۱٫۲۴	۱۱٫۹۸	۹٫۶۳	۷٫۱۲	۲٫۲۳
کند و پوش	۹٫۰۷	۱۳٫۲۴	۱۲٫۹۸	۱۱٫۶	۱۰٫۹۱
اتریشی (NATM)	۱۰٫۰۹	۱۲٫۱۲	۱۱٫۱۶	۹٫۰۹	۱٫۲۹
ماشین حفاری بازویی	۱۱٫۶۲	۱۳٫۱۰	۱۳٫۵۳	۹٫۵۸	۲٫۲۳
TBM	۱۱٫۱۱	۱۳٫۳۹	۱۳٫۸۱	۹٫۸۳	۱۲٫۳۲

جدول ۷- امتیاز مربوط به زیرساخت‌ها و شرایط لازم برای هر روش

شاخص	هزینه تامین مصالح	هزینه نیروی انسانی	هزینه ماشین آلات وتجهیزات		
شرح / روش	-	-	هزینه‌های عملیاتی ماشین‌آلات	هزینه‌های سرمایه‌ای	هزینه‌های مالکیت یا اجاره ساختگاه
چالزنی و آتشباری	۲۰٫۹۴	۱۸٫۸۱	۲۵٫۶۲	۲۸٫۱۸	۲۷٫۳۳
چالزنی وآتشباری کنترل شده	۱۹٫۰۶	۱۷٫۰۱	۲۴٫۷۶	۲۵٫۹۰	۲۷٫۰۴
کندوپوش	۱۴٫۰۳	۱۴٫۴۱	۲۲٫۴۹	۱۸٫۷۸	۵٫۹۷
اتریشی (NATM)	۱۵٫۷۱	۱۵٫۴۱	۲۳٫۰۵	۲۲٫۴۹	۲۲٫۷۷
ماشین حفاری بازویی	۱۲٫۳۵	۱۲٫۸۲	۱۲٫۵۲	۱۲٫۵۲	۱۲٫۵۲
TBM	۵٫۶۵	۷٫۶۰	۵٫۴۰	۴٫۸۴	۴٫۸۳

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۸- امتیاز شاخص‌های اقتصادی برای هر یک از روش‌های حفاری تونل

شاخص / شرح روش	آهنگ پیشروی	انعطاف پذیری	لرزش مجاز	ثبات زمین	زمان اجرا	ایمنی، بهداشت و محیطزیست کارکنان	مدیریت
	-	-	-	-	-	-	-
چالزنی و آتشباری	۳/۵۵	۹/۰۴	۱/۸۵	۴/۳۴	۷/۸۳	۴/۲۹	۶/۰۲
چالزنی و آتشباری کنترل شده	۳/۶۵	۸/۵۷	۴/۲۶	۷/۶۰	۶/۵۵	۶/۷۴	۷/۹۹
کند و پوش	۷/۲۱	۷/۳۶	۷/۷۹	۷/۱۸	۷/۸۳	۶/۷۴	۸/۵۸
اتریشی (NATM)	۶/۶۷	۹/۷۹	۸/۴۴	۸/۷۴	۸/۶۰	۸/۰۷	۸/۶۸
ماشین حفاری بازویی	۸/۲۱	۹/۰۴	۸/۸۱	۸/۷۴	۹/۲۴	۷/۷۶	۸/۰۹
TBM	۹/۱۲	۲/۰۵	۹/۳۶	۹/۵۸	۱۲/۰۷	۱۰/۳۱	۹/۳۷

جدول ۹- امتیاز شاخص‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی برای هر یک از روش‌های حفاری تونل

شاخص	مقاومت فشاری تک‌محوره (مگاپاسکال)						مقاومت کششی (مگاپاسکال)			مقاومت برشی درزه‌ها (مگاپاسکال)			فاصله‌داری درزه‌ها (سانتی‌متر)				
شرح / روش	۱>	۱-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰<	۰/۱۵-۵	۵-۱۵/۲۵	۲۵<	ضعیف	متوسط	مقاوم	۲۰۰≥	۶۰/۲۰۰-۱	۲۰/۶۰-۱	۶/۲۰-۱	۶>
چالزنی و اتشباری	-۱۰۲/۹۹	۳/۱۴	۶/۲۳	۶/۹۱	۷/۹۴	۷/۹	۵/۵۰	۵/۵۷	۵/۳۶	۲/۶	۳/۱	۳/۷۵	۳/۶	۴/۸۸	۵/۳۸	۵/۷۳	۵/۸
چالزنی و آتشباری کنترل شده	-۱۷۵/۴۲	۳/۵۸	۶/۰۶	۷/۶۸	۷/۵۱	۷/۵	۴/۹۳	۴/۸۶	۵/۳۶	۲/۶	۳/۱	۳/۹۰	۳/۸	۴/۴۶	۵/۴۵	۶/۰۱	۵/۵
کندو پوش	۸/۷۹	۶/۹۱	۵/۰۳	۳/۵۸	۱/۷۹	۱/۸	۶/۲۹	۵/۵۷	۳/۷۹	۳/۱	۳/۶	۳/۳۲	۶/۰	۵/۲۴	۵/۳۱	۵/۴۵	۶/۰
اتریشی (NATM)	۵/۹۷	۷/۱۷	۷/۶۰	۷/۷۷	۶/۴۰	۶/۴	۶/۱۵	۵/۵۰	۵/۳۶	۳/۹	۳/۶	۳/۵۱	۴/۳	۴/۹۵	۵/۳۸	۶/۰۱	۶/۵
ماشین حفاری بازویی	۳/۰۷	۵/۲۹	۷/۷۷	۷/۲۵	۶/۱۴	۶/۱	۵/۵۷	۴/۷۹	۳/۵۷	۳/۹	۴/۹	۴/۰۴	۵/۳	۵/۵۲	۶/۳۷	۷/۰۸	۶/۸
TBM	۷/۵۹	۷/۳۴	۷/۹۴	۷/۶۸	۷/۵۱	۷/۵	۶/۹۳	۶/۲۲	۵/۵۰	۴/۱	۳/۷	۲/۹۹	۳/۹	۴/۶۷	۵/۶۶	۵/۲۴	۶/۸

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ادامه جدول ۹- امتیاز شاخص‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی برای هر یک از روش‌های حفاری تونل

شاخص	تداوم درزه‌ها (متر)				مچاله‌شوندگی (درصد)			شرایط آب‌های زیرزمینی				وجود گسل در مسیر تونل	حفرات و مواد کارستی	مواد سایینده از جمله کوارتز
شرح / روش	<۱	۱-۳	۳-۱۰	>۲۰	<۳	۳-۵	>۵	خشک	مرطوب	جریانی	خاصیت خورندگی	-	-	-
چالزنی و آتشباری	۳/۴۹	۳/۳۶	۴/۲۹	۴/۳۵	۵/۰۴	۴/۲۶	۴/۳۶	۸/۵۰	۵/۲۴	۱/۶۷	۱/۹۸	۳/۴۱	۱/۶۸	۳/۷۸
چالزنی و آتشباری کنترل شده	۳/۳۶	۳/۴۹	۴/۶۱	۴/۶۱	۲/۲۸	۳/۸۶	۳/۷۸	۸/۳۴	۴/۸۴	۱/۶۶	۲/۳۰	۴/۴۴	۳/۲۷	۲/۸۰
کندوپوش	۲/۹۰	۴/۰۲	۴/۳۵	۶/۶۶	۷/۵۶	۷/۶۴	۶/۲۱	۸/۴۲	۷/۴۷	۴/۰۵	۳/۱۸	۷/۶۸	۷/۸۱	۵/۲۲
اتریشی(NATM)	۴/۸۸	۵/۲۱	۵/۶۷	۵/۳۰	۶/۶۳	۶/۴۶	۶/۳۸	۸/۴۲	۷/۳۱	۴/۶۱	۳/۴۱	۶/۷۴	۶/۰۴	۷/۳۵
ماشین حفاری بازویی	۵/۰۱	۵/۱۴	۴/۸۸	۴/۸۱	۶/۲۱	۵/۲۰	۳/۹۴	۸/۳۴	۷/۰۷	۴/۲۱	۳/۱۸	۷/۶۰	۷/۲۲	۲/۸۷
TBM	۴/۶۱	۴/۶۸	۴/۸۸	۵/۳۴	۶/۴۶	۵/۲۰	۳/۶۱	۸/۳۴	۷/۲۳	۴/۹۲	۳/۱۰	۶/۶۶	۶/۲۱	۲/۳۶

جدول ۱۰- امتیاز شاخص‌های هندسی برای هر یک از روش‌های حفاری تونل

شاخص	شکل مقطع تونل				سطح مقطع تونل(متر مربع)			طول تونل(کیلومتر)			
شرح / روش	دایره ای	نعل اسبی	هلالی شکل	چهارضلعی	<۱۰	۱۰ تا ۳۰	>۳۰	<۲	۲ تا ۳	۳/۱ تا ۶	>۶
چالزنی و آتشباری	۱۴/۷۹	۱۵/۳۸	۱۵/۲۳	۱۵/۳۸	۱۲/۵۴	۱۱/۷۹	۹/۴۹	۱۵/۳۴	۱۱/۱۰	۱۱/۱۰	۵/۴۰
چالزنی و آتشباری کنترل‌شده	۱۴/۶۴	۱۶/۱۲	۱۵/۹۷	۱۵/۸۲	۱۲/۲۹	۱۰/۹۶	۷/۹۱	۱۴/۶۱	۱۰/۰۸	۱۰/۰۸	۶/۴۳
کندوپوش	۱۳/۰۱	۱۳/۷۵	۱۲/۲۷	۱۳/۰۱	۵/۸۴	۸/۷۶	۱۰/۴۷	۱۴/۱۷	۴/۹۶	۴/۹۶	-۸۷/۵۳
اتریشی (NATM)	۱۵/۰۸	۱۴/۹۳	۱۳/۷۵	۱۰/۹۴	۷/۲۴	۱۰/۵۹	۱۳/۲۷	۱۴/۰۲	۱۳/۰۰	۱۳/۰۰	۱۱/۸۳
ماشین حفاری بازویی	۱۴/۶۴	۱۵/۶۷	۱۵/۶۷	۱۳/۱۶	-۲۶۴/۹۹	۱۲/۴۲	۱۱/۶۹	۱۱/۲۵	۱۳/۱۵	۱۳/۱۵	۱۲/۴۲
TBM	۱۶/۵۶	-۵۰۱/۱۴	-۵۰۱/۱۴	-۵۰۱/۱۴	-۳۲۳/۸۱	۶/۶۵	۱۱/۵۶	-۳۱۷/۶۹	۱۰/۰۸	۱۰/۰۸	۱۵/۶۳

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ادامه جدول ۱۰- امتیاز شاخص‌های هندسی برای هر یک از روش‌های حفاری تونل

شاخص	شیب تونل (درصد)			عمق تونل			شعاع قوس مسیر تونل(متر)		
شرح / روش	< ۴	۴ تا ۶	۶٫۱ تا ۱۸	کم عمق	نیمه عمیق	عمیق	<۳۰۰	۳۰۰ تا ۲۰۰۰	>۲۰۰۰
چالزنی و اتشباری	۹٫۹۳	۱۰٫۳۲	۹٫۳۵	۹٫۹۷	۱۲٫۳۰	۱۳٫۹۸	۱۱٫۶۳	۱۰٫۹۹	۱۱٫۴۲
چالزنی و آتشباری کنترل شده	۹٫۲۵	۹٫۷۴	۸٫۷۶	۱۳٫۰۷	۱۲٫۸۲	۱۴٫۱۱	۱۱٫۲۰	۱۰٫۷۸	۱۰٫۷۸
کندوپوش	۱۰٫۴۲	۷٫۱۱	۴٫۰۹	۱۳٫۳۴	-۲۰۳٫۳۲	-۳۷۵٫۶۷	۱۱٫۱۰	۱۰٫۷۹۶	۱۰٫۶۷
اتریشی((NATM)	۱۰٫۰۳	۹٫۳۵	۷٫۰۱	۱۳٫۲۱	۱۰٫۷۴	۸٫۲۸	۷٫۸۲	۹٫۴۱	۱۰٫۸۹
ماشین حفاری بازویی	۹٫۹۳	۷٫۶۹	۴٫۰۹	۱۰٫۸۷	۱۲٫۱۷	۱۳٫۰۸	۱۰٫۵۷	۱۰٫۳۶	۱۰٫۷۸
TBM	۱۰٫۵۲	۶٫۵۲	-۳۶۶٫۷۵	۱۳٫۸۵	۱۲٫۵۶	۱۳٫۵۹	۱٫۵۸	۷٫۵۰	۹٫۹۳

۵- مطالعه موردی و پیاده سازی روش

نتایج مطالعه بر روی تونل شماره ۱ راه اصلی پاتاوه به دهدشت که در حدفاصل کیلومتر ۳۴+۷۴۰ تا ۳۵+۹۲۵ از بخش میانی این قطعه واقع شده و شامل سه زون زمین‌شناسی است و در مجموع طولی معادل ۱۱۸۵متر را دارد، پیاده سازی شد. کارفرما بر اساس پارامترهای منطقه مورد مطالعه که در جدول ۱۱ آورده شده و با استفاده از روش‌های مختلف ارایه شده برای انتخاب روش حفاری تونل، روش مناسب بر اساس هر یک از آن‌ها را به دست آورد که در جدول۱۲ ارایه شده است و در یک جمع‌بندی کلی، روش مناسب حفاری تونل به صورت چالزنی و آتشباری، توسط کارفرما پیش‌بینی و توصیه شده است. البته بر حسب مورد در برخی از نواحی با توجه به شرایط توده سنگ و امکانات کارگاهی توصیه شده با چکش هیدرولیکی نیز حفر و پیشروی تونل انجام شود اما از آنجا که راندمان این روش پایین است برای هر سه زون روش چالزنی و آتشباری توصیه شده است [24].

بر اساس روش مطالعه شده در این تحقیق نیز برای هر زون به صورت جداگانه مجموع امتیازهای هر کدام از روش‌های حفاری، محاسبه و در نهایت بهترین روش پیشنهادی برای حفاری هر زون طبق جدول ۱۳ ارایه شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی به صورت مقداردهی عددی ارایه شد که با در نظر گرفتن ۳۱ شاخص و با توجه به ضریب اهمیت هر یک از آن‌ها قادر به انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل از بین روش‌های چالزنی و آتشباری، چالزنی و آتشباری کنترل‌شده، کند و پوش، روش حفاری اتریشی، ماشین حفاری بازویی و حفاری با سپر معمولی (TBM) است و همچنین از بین معیارهای در نظر گرفته شده برای انتخاب روش حفاری تونل، معیار هزینه ماشین‌آلات و تجهیزات با وزن ۷/۹ درصد، بالاترین وزن را دارد و همانگونه که نتایج پیاده کردن مدل بر روی یک پروژه نشان می‌دهد، این مدل قادر است روش مناسب حفاری را با توجه به شاخص‌های مختلف موثر در انتخاب، ارایه دهد. برای حفر بعضی از تونل‌ها با طول زیاد یا به طور کلی تونل‌هایی که به صورت ترکیبی باید حفر شوند نیز می‌توان از این مدل برای انتخاب روش‌های حفاری استفاده کرد.

جدول ۱۱- پارامترهای مورد استفاده در رویکردهای مختلف انتخاب روش حفر تونل‌ها [24]

Zone	RQD	Q	Qc= Q.σci/100	ciσ (MPa)	GSI	Is (kg/cm^2)	Lf (m)	Ja	Jr	Jn	Js	Vp (km/s)	Vs (km/s)
I	۶۵	۰٫۵۸	۰٫۲۹	۵۰	۴۰	۲۵	۱	۳	۱	۱۵	۱	۲٫۹۶۰	۱٫۵۵۰
II	۸۵	۱۴٫۰۳	۱۲٫۶	۹۰	۶۵	۵۰	۲	۱	۳	۱۲	۱	۴٫۶۰۰	۲٫۸۰۰
III	۳۵	۰٫۰۵	۰٫۰۱۳	۲۵	۳۰	۲۰	۰٫۵	۴	۱٫۵	۱۵	۱	۱٫۶۱۰	۰٫۴۸۰

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۱۲- نتایج حاصل از روش‌های مختلف بررسی شده توسط کارفرما [24]

روش	ناحیه	امتیاز حاصل از روش	محدوده قرار گیری در نمودار	روش حفاری پیشنهادی
ویور (Weaver)	زون۱	۷۲	-	چالزنی و آتشباری و یا خرد کردن با چکش هیدرولیکی سنگین
	زون۲	۹۰	-	چالزنی و آتشباری
	زون۳	۴۱	-	حفاری سخت و خرد کردن با چکش هیدرولیکی متوسط
کریستن (Kristen)	زون۱	۷۲/۲	-	حفر نسبتا دشوار (شیارزنی با ریپر)
	زون۲	۱۹۱۲/۵	-	حفر بسیار دشوار (خرد کردن با چکش سنگین و یا چالزنی و آتشباری)
	زون۳	۲۱/۸۷۵	-	حفر نسبتا دشوار (شیارزنی با ریپر)
فرانکلین (Franklin)	زون۱	-	Blast to fracture	چالزنی و آتشباری
	زون۲	-	Blast to fracture	چالزنی و آتشباری
	زون۳	-	Blast to fracture	چالزنی و آتشباری
پتیفر و فوکس (Fookes & Pettifer)	زون۱	-	Blasting	چالزنی و آتشباری
	زون۲	-	Blasting	چالزنی و آتشباری
	زون۳	-	Hydraulic breaking	شکست با چکش هیدرولیکی
ساروقلو (Sarogluoe)	زون۱	-	Ripping	حفر دشوار با چکش سنگین
	زون۲	-	Blasting	چالزنی و آتشباری
	زون۳	-	Digging	حفر آسان با چکش سبک

جدول ۱۳- انتخاب روش حفاری تونل بر اساس روش تصمیم‌گیری چند معیاره

ناحیه	بیشینه مقدار امتیاز	روش پیشنهادی
زون۱	۳۰۳/۷۰۹	چالزنی و آتشباری
زون۲	۳۰۳/۱۱۸	چالزنی و آتشباری
زون۳	۳۰۳/۲۷۳	اتریشی(NATM)

منابع

1. Tsiambaos, G., Saroglou, H,(2010): "Excavatability assessment of rock masses using the geological strength index", Bull Eng Geol Environ, p. p. 13-270.
2. Dey, K., Ghose, A.K. (2008); "Predicting cuttability with surface miners (A rock mass classification approach)", Journal of mines, metals and fuels, p. p. 85-91.
3. Bell, F.G., (2004), Engineering geology and construction, Taylor and Francis Group, London, p791.

۴. وزارت صنعت، معدن و تجارت، دفتر نظارت امور معدنی، گردآورنده برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن، (۱۳۹۴)، راهنمای پیش‌بینی رفتار تونل‌ها و انتخاب روش حفر مناسب، انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن ایران.

۵. عطایی، محمد، (۱۳۸۹)، تصمیم‌گیری چندمعیاره، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

6. International Society for Rock Mechanics ISRM, (1981), Rock characterization, testing and monitoring, In: Brown ET (ed) ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford, p 211.
7. AITES-ITA Working Group NO.14-2000,Recomandation and Classification for Tunnel Boring Machines(TBMs), www.ita-aites.org.
8. Nyqvist ,L., (2005), Tunnelling options in long drives, Master thesis, Leula University Technology.
9. Palmström, A.,(1995), RMi - a rock mass

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

characterization system for rock engineering purposes, Unversity of Oslo.

10. Sinha, R.S., (1989), Underground Structure Design and Instrumentation, Elsevier Science Publisher, B.V.

11. Aydan, O., Ulusay, R., Tokashiki, N., (2013), A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses, Journal of rock mechanics and rock engineering, On line published, 4 Sep.

12. 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 Technolog Stockholm, Sweden.

13. Kaiser, P.K. & McCreath, D.R. (1994). Rock Mechanics Considerations for Drilled or Bored Excavationsin Hard Rock . Tunnelling and Underground Space technology, 1994, Vol.9 No.4, pp 425–437.

14. Hansen, A.M. (2008). TBM vs D&B – Pros and Cons, AMH ConsultAS. Personal communication.

15. Holen, H. (1998).TBM vs Drill & BlastTunnelling. Publication NO.11, NorwegianTunnelling Society.

۱۶. حسن پور، جعفر، رستمی، جمال (۱۳۸۹)، عملکرد ماشین‌های تونل‌بری در سنگ سخت، نشر شرم، نشر فن آریا.

۱۷. محمودی، رضا، (۱۳۸۴)، حفر تونل‌ها با روش آتشباری و توجه به افزایش سرعت پیشروی. مجموعه مقالات دومین همایش منطقه‌ای معدن و علوم وابسته، صفحات ۲۸۵ تا ۲۹۷.

18. Brian Fulcher, Eric Hudson-Smith, Lok Hom. (2015). Decision Process and Criteria for Selection of a Preferred Tunneling Method. Kenny Construction Company, The Robbins Company, Geosite,Pty,Ltd.

۱۹. راهکار مدیریت، مدیریت پروژه، (۱۳۸۹). http://www.mgtsolution.com/

20. AITES-ITA, (1997), Characerisation of TBM for tunnelling flysches, Workshop: "The Gibraltar Crossing", www.ita-aites.org.

۲۱. تقی‌پور، سیاوش، رخشنده، مهدی، (۱۳۸۲)، طبقه‌بندی توده سنگ‌ها، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

۲۲. مدیریت طرح‌های عمرانی(۱۳۸۲)، انتشارات قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، چاپ دوم.

23. University of Trondheim, (1998), “Hard rock Tunnel Boring Costs”, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, pp 3545-3551.

۲۴. محمدی کری بزرگ، سیدمیلاد؛ ۱۴۰۰؛ **«ارایه روشی برای انتخاب مناسب حفر تونل بر اساس تصمیم‌گیری چندمعیاره»**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Archive of SID.ir