Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 39-42
DOI: 10.22060/ceej.2022.21540.7757

Evaluation of Effective Factors on Tunnel Instability Through Statistical Approach

M. Javadi*, F. Mohammadi, R. Rafiee

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

ABSTRACT: In this paper, the role of effective factors on the instability of tunnels and underground excavations was explored through statistical analysis. To reach this goal, the effective factors (including 25 different factors) on the tunnel instability were recognized based on the deep literature survey and expert judgment. Then, a database of previous tunnel instabilities was established based on the type of tunnels and the main factor of instabilities. The effective factors were classified into six main groups and utilized for statistical analysis based on the relative frequency of tunnel instability. The results of this paper show that the geomechanical factors, design-investigation issues, and geological-geographic conditions of the site are the main three reasons for tunnel instability, where these main factors control more than 70% of civil-utility tunnels through all case studies. In addition, the design-investigation issues and geological-geographic conditions show the lowest and highest dependency on the tunnel utility, respectively. The "weak zones", "inadequate redesign during construction", and "the groundwater level and conditions" are the main three effective factors in tunnel instability, where the relative frequency of instability due to these factors reaches up to 40% for most of the case studies. Based on the main effective factors of instability, the freeway and highway tunnels show the highest consistency with all other utilities for tunnels in the statistical population. Therefore, freeway and highway tunnels can be considered as the most representative of overall utilities. The outcome of this paper can be applied to risk assessment of tunnel instabilities and technical management.

Review History:

Received: Jun, 30, 2022
Revised: Sep, 13, 2022
Accepted: Nov, 13, 2022
Available Online: Dec, 10, 2022

Keywords:

Tunnel Instability
Tunnel Utility Type
Instability Factor
Statistical Analysis.

1- Introduction

The statistical analysis of the instability of tunnels and underground spaces has been mainly focused on the special kind of problems or databases such as consequences on operation efficiency of under-pressure hydropower tunnels [1], collapse frequencies along time [2], risk management of tunnel collapse [3], and collapse risk assessing of mountain [4] and deep-buried tunnels of china [5]. In these studies, the reasons or effective factors for tunnel instability have not been considered in the analysis. On the other hand, the statistical role of instability effective factors has been indirectly applied in some previous studies [6, 7] without systematic classification. Although these studies reflect the state and necessity of statistical analysis of tunnel instability, few systematic analysis has been performed on the effective factors of instability by the establishment of a comprehensive database. In addition, a few statistical analysis of instability has been reported on the type of tunnel utilization. These issues contribute to the main goal of the present study.

In this paper, the statistical analysis of tunnel instability was performed by focusing on the establishment of a comprehensive database, effective factors of instability, and type of tunnel utilization. After the establishment of the database, different statistical analyses were performed mainly on the relative frequency of instability for different individual effective factors, main categories, and tunnel utilization types.

2- Data Collection for Statistical Analysis

This paper studies the statistical analysis of instabilities that occurred during tunnel construction by focusing on the main reason or main causes of instability. The tunnel instability effective factors were classified into six main categories including special conditions, geological and geographical conditions of the site, ground control and support system, investigation and design, geomechanical factors, and construction generic factors. Totally, 25 different factors were recognized as effective factors that were classified into the mentioned categories. After the reconnaissance and classification of effective factors on tunnel instability, data collection was performed to develop the database. The database contains 200 case studies from different countries around the world. For each case study, the main reason for instability, type of tunnel, and host country were recorded in the database under the supervision of tunneling experts.

*Corresponding author's email: mortezjavadi@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

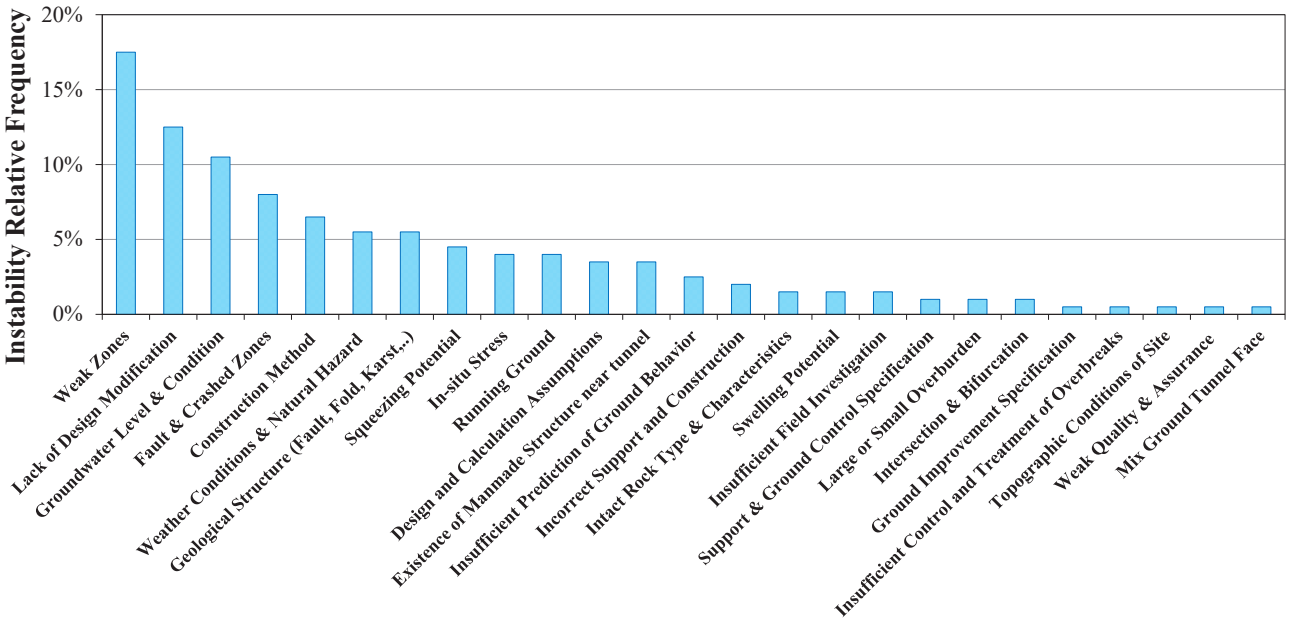


Fig. 1. The sorted distribution of relative frequency of instability for all individual factors.

3- Results

The relative frequency of main instability reasons was calculated for different utility types of tunnel. The results of this calculation show that the "geomechanical factors", "investigation & design", and "geological & geographical conditions" show the highest relative frequency of instability. These factors include about 73% of instabilities recorded for civil tunnels in the database. The analysis of results shows that the minimum and maximum standard deviation of the relative frequency of main instability reasons occurs for "investigation & design" and "geological & geographical conditions", respectively. This means that the factor of "investigation & design" shows less dependency of instability to tunnel utility type and an average of about 23% of instabilities take place due to this reason. On the other hand, the "geological & geographical conditions" of the tunnel site show maximum instability dependency on the tunnel utility.

Each of the main instability groups is composed of several individual factors. The relative frequency of instability of these individual factors is calculated for all the case studies in the database and plotted in Figure 1, sorted according to the relative frequency. Figure 1 shows that the weak zones are the most popular reason for instability with a relative frequency of about 17.5%. The eight most popular reasons for tunnel instability are weak zones, lack of design modification during construction, groundwater level & condition, fault & crashed zones, construction method, weather conditions & natural hazard, geological structure (fault, fold, karst,..), and squeezing potential, respectively. These eight reasons (about 32% of all individual reasons) include about 70 to 80% of all instability cases. In other words, about 70% of instabilities occur due to only 30% of the factors, where this argument is equivalent to Pareto principle. Therefore, the reasonable safety improvement of tunnel stability is anticipated by the management of these most important factors.

4- Conclusion

The main goal of this paper is to investigate the effective factors of tunnel instability during construction based on the statistical analysis of case instabilities. First, about 25 instability-effective factors (or reasons) were identified and then classified into six main categories. These effective factors and classifications were used for the establishment of an instability database in addition to the type of tunnel utility types. After the establishment of the database, the effective factors on tunnel instability were statistically analyzed for different tunnel utility types and factor classification. In the data analysis, the relative frequency of instability was separately investigated for different tunnel utility types, the main group of reasons, and individual instability effective factors. Based on the statistical analysis performed in this study, the following conclusions were obtained:

The maximum average relative frequency of instability is observed for the main category of "geomechanical factors" in the statistical analysis of civil-utility tunnels. Moreover, the individual effective factor of "weak zones" shows the maximum relative frequency of instability.

The "geomechanical factors", "investigation & design", and "geological & geographical conditions" show the highest relative frequency of instability. These main factors include about 73% of instabilities recorded for civil tunnels in the database. Moreover, these main factors show the minimum and maximum standard deviation of the relative frequency of instability.

The "weak zones", "inadequate redesign during construction", and "the groundwater level and conditions" are the main three effective individual factors on tunnel instability, where the relative frequency of instability due to these factors reaches up to 40% for most of the case studies.

The statistical analysis of individual factors shows a fair corresponding between the results and Pareto principle, where

eight individual factors (about 32% of all) include about 70 to 80% of all instability cases.

Based on the main effective factors of instability, the freeway and highway tunnels show the highest consistency with all other utilities for tunnels in the statistical population. Therefore, freeway and highway tunnels can be considered as the most representative of overall utilities.

References

[1] L.N. Lamas, Contributions to understanding the hydromechanical behaviour of pressure tunnels, PhD Thesis, Imperial College, London, (1993) 419.

[2] P. Spyridis, D. Proske, Revised comparison of tunnel collapse frequencies and tunnel failure probabilities, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 7(2) (2021) 04021004.

[3] Q. Qian, P. Lin, Safety risk management of underground engineering in China: Progress, challenges and strategies, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(4) (2016) 423-442.

[4] G.-H. Zhang, Y.-Y. Jiao, L.-B. Chen, H. Wang, S.-C. Li, Analytical model for assessing collapse risk during mountain tunnel construction, Canadian Geotechnical Journal, 53(2) (2015) 326-342.

[5] G.-Z. Ou, Y.-Y. Jiao, G.-H. Zhang, J.-P. Zou, F. Tan, W.-S. Zhang, Collapse risk assessment of deep-buried tunnel during construction and its application, Tunnelling and Underground Space Technology, 115 (2021) 104019.

[6] R.L. Sousa, H.H. Einstein, Lessons from accidents during tunnel construction, Tunnelling and Underground Space Technology, 113 (2021) 103916.

[7] T. Seidenfuss, Collapses in tunnelling, Master Degree Foundation Engineering and Tunnelling. Stuttgart, Germani, 194 (2006).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Javadi, F. Mohammadi, R. Rafiee , Evaluation of Effective Factors on Tunnel Instability Through Statistical Approach, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 39-42.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21540.7757

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۸۵ تا ۲۰۰
DOI: 10.22060/ceej.2022.21540.7757

بررسی عوامل مؤثر بر ناپایداری تونل با استفاده از رویکرد آماری

مرتضی جوادی اصطهباناتی*، فاطمه محمدی، رامین رفیعیی*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران.

خلاصه: در این مطالعه نقش عوامل موثر بر ناپایداری تونل و فضاهای زیرزمینی با استفاده از رویکرد آماری بررسی شده است. بدین منظور، مهم‌ترین عوامل موثر بر ناپایدرای تونل شناسایی و این عوامل (شامل ۲۵ عامل) در قالب شش گروه اصلی دسته‌بندی شدند. سپس، مجموعه وسیعی از ناپایداری‌های رخ داده در تونل‌های مختلف دنیا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی‌ها به صورت یک پایگاه داده مبتنی بر جامعه آماری و با در نظر گرفتن عامل اصلی ایجاد کننده ناپایداری و نوع کاربری تونل ثبت شد. در نهایت، تحلیل‌های آماری بر روی ناپایداری‌های رخ داده در تونل‌های مختلف و با تمرکز بر نوع کاربری و فراوانی نسبی ناپایداری انجام شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد مجموعه عوامل ژئومکانیکی، مباحث مطالعات و طراحی و عوامل مربوط به شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه دارای بیشترین میانگین فراوانی نسبی در ناپایداری بوده که این سه دسته عوامل، مجموعا حدود ۷۳ درصد از ریزش‌های حادث شده در تونل‌های با کاربری عمرانی را شامل می‌شوند. همچنین، بین ۷۰ الی ۸۰ درصد از ناپایداری‌ها ناشی از ۳۲ درصد از عوامل بوده و نقش سایر عوامل در بروز ناپایداری تونل کمتر از ۳۰ درصد برآورد شده است. در این بین، سه عامل اصلی "زون‌های ضعیف"، "عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا" و " سطح و وضعیت آب زیرزمینی"، به ترتیب با فروانی نسبی ۱۷/۵، ۱۲/۵ و ۱۰/۵ درصد، موثرترین عامل در بروز ناپایداری بوده‌اند. در مجموع، تونل‌های آزادراه و بزرگراه، دارای بیشترین انطباق با سایر کاربری‌های دیگر بوده و می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که این نوع کاربری را می‌توان از نقطه نظر عوامل موثر بر ناپایداری تونل، به عنوان نماینده از سایر کاربری‌ها در نظر گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به عنوان یک مبنای کلی در ارزیابی احتمال ناپایداری تونل و فضاهای زیرزمینی و مدیریت این نوع از پروژه‌ها به کار گرفت.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

کلمات کلیدی:
ناپایداری تونل
نوع کاربری تونل
بررسی آماری
عامل ناپایداری
تحلیل آماری

۱- مقدمه

تبعات ناشی از ناپایداری تونل همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های فنی-اجرایی در احداث و بهره‌برداری پروژه‌های زیرزمینی است. پیش‌بینی، کنترل و کاهش تبعات و مخاطرات ناشی از این پدیده‌ها مستلزم شناسایی و درک صحیح از عوامل تاثیرگذار است. بنابراین، بررسی و شناخت عوامل موثر بر وقوع ناپایداری فضاهای زیرزمینی (تونل) و درک اهمیت نسبی این عوامل همواره به عنوان یک موضوع تحقیقاتی کاربردی مطرح می‌شوند.

ناپایداری تونل و فضاهای زیرزمینی از دیرباز به عنوان یک موضوع تحقیقاتی و کاربردی مطرح بوده است. در این زمینه، تاکنون طیف وسیعی از انواع مختلف مطالعات با تمرکز بر روی جنبه‌های متفاوت ناپایداری انجام شده است. بخش عمده‌ای از این مطالعات بر روی مکانیسم‌های مختلف شکست و ریزش متمرکز شده که این مطالعات را از نقطه نظر روش تحلیل و بررسی به دسته‌های مختلف شامل روشهای تحلیلی [۲ و ۱]، مدلسازی فیزیکی [۳]، شبیهسازی عددی [۵ و ۴]، مطالعات مبتنی بر رفتارسنجی و ابزار دقیق [۶] و ترکیبی از این روشها [۹-۷] تقسیم‌بندی کرد. عمده این روش‌ها بر مبنای تحلیل‌های مرسوم ژئومکانیکی و با استفاده از مدل‌های رفتاری زمین درون‌گیر تونل و تحلیل تنش-کرنش انجام می‌شود که این رویکرد به مسئله، سهم بسزایی در ارتقای فهم و درک مهندسی از فرآیند پایداری تونل‌ها داشته‌اند. با این وجود، تحلیل‌های مرسوم ژئومکانیکی دارای محدودیت‌های خاصی هستند. به طور خاص، روشهای طبقه‌بندی مهندسی سنگ علی رغم سادگی و کاربرد گسترده، تنها به تعدادی از عوامل مهندسی سنگ و جنبه‌های خاص رفتاری محدوده می‌شوند [۱۰]. روشهای تحلیلی عمدتاً مبتنی بر تحلیل تعادل حدی توسعه داده شده‌اند که در این روش‌ها، ساده‌سازی‌های فراوانی در خصوص شکل تونل، وضعیت تنش‌های برجا و رفتار مهندسی سنگ اعمال می‌شود [۱۱]. برای برطرف شدن برخی از این

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mortezjavadi@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

محدودیت‌ها (خواص ژئوتکنیکی و مدل رفتاری زمین، هندسه و عمق تونل)، روش‌های عددی به تدریج جایگزین روش‌های تحلیل شدند [۱۲]. با این وجود، روشهای عددی نیز علاوه بر پیچیدگی‌های محاسباتی و زمان بر بودن، تنها به بررسی یکسری از مکانیسمهای خاص ناپایداری محدود می‌شوند [۱۳]. در حقیقت، ناپایداری در فضاهای زیرزمینی شامل طیف وسیعی از مکانیسم‌های مختلف (ریزش بلوکی، ریزش دودکشی، ریزش جریانی، پوسته شدگی، زون پلاستیک، لهیدگی، آماس، انفجار سنگ و...) بوده که روش‌های مرسوم محاسبات و طراحی (به ویژه روش‌های عددی) تنها برای برخی از این مکانیسم‌ها قابل به کارگیری هستند [۱۴]. از طرف دیگر، عمده ویژگی‌های مهندسی و پارامترهای ژئومکانیکی دارای انواع عدم قطعیت هستند [۱۶-۱۴]. در چنین شرایطی، روش‌های مشاهده‌ای و روش‌های احتمالاتی به تدریج به عنوان یکی از روش‌های موثر در حوزه ژئومکانیک و به ویژه تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی به همراه مفاهیمی همچون طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان[1] و تحلیل آماری ایمنی[2] مطرح شده است [۱۷-۱۵]. به کارگیری این روش‌ها نیازمند یک سیستم مهندسی با قابلیت پیش‌بینی موثر رفتار احتمالی اندرکنش زمین و فضای زیرزمینی خواهد بود که بتواند محتمل‌ترین رفتار زمین را با دقت مناسبی برآورد کند. یکی از موثرترین راهکارها برای توسعه مدل‌های احتمالی اندرکنش زمین و فضای زیرزمینی استفاده از تجارب پیشین است. صرف نظر از تعداد زیادی از گزارش‌ها و مطالعات موردی مجزا (در قالب یک مطالعه موردی خاص)، مطالعات اولیه بر روی تجارب پیشین ناپایداری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، با استفاده از تحلیل‌ها و تفسیرهای فنی و در قالب بررسی چندین مطالعه موردی مختلف انجام شده است [۲۴-۱۸]. این مطالعات عمدتاً با هدف ارزیابی کیفی عوامل موثر بر وقوع ناپایداری در فضاهای زیرزمینی و برای شرایط خاص از قبیل تأثیر آب زیزمینی [۱۸]، تأثیر زون‌های گسلی [۱۹]، روش خاص تونل‌سازی به روش NATM [۲۰]، معادن زیزمینی بزرگ مقیاس [۲۱] و یا تونل‌های راه آهن [۲۲] انجام شده است. با افزایش و توسعه کاربرد عملی تحلیل ریسک در حوزه تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی، تحلیل‌های کمی آماری ناپایداری [۳۲-۲۵] جایگزین تحلیل‌های کیفی شد. عمده مطالعات آماری ناپایداری تونل و فضاهای زیرزمینی با تمرکز بر روی مسائل و یا پایگاه داده خاص و یا مسائل خاص از قبیل آسیب‌های بهره‌برداری در تونل‌های تحت فشار برق آبی [۲۵]، فراوانی نسبی ناپایداری در طول زمان [۲۶]، ناپایداری در ترکیب با سایر حوادث [۲۷]، ناپایداری در تونل‌های کوهستانی بخش مرکزی چین [۲۹] متمرکز شده و مطالعات جامع‌نگر [۳۰] بسیار محدودی تاکنون انجام شده است. در عمده این مطالعات، دلایل یا عوامل مؤثر بر ریزش به صورت کمی مورد مطالعه قرار نگرفته [۲۸-۲۵] و یا تنها به صورت ضرایبی خاص منعکس شده [۳۰ و ۲۹] و یا به تعدادی کمی از عوامل (بدون دسته‌بندی و لحاظ نمودن بسیاری از عوامل تأثیرگذار مهم) [۳۱] بسنده شده و یا جامعه آماری ناپایداری‌ها از نظر تعداد جمعیت معرف نبوده است [۳۲]. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مطالعات بسیار محدودی بر روی دلایل وقوع ریزش‌ها از نظر آماری انجام شده و هیچ یک از مطالعات آماری پیشین، جامعیت لازم از نظر جامعه آماری را ندارند. در حقیقت، هیچ مطالعه آماری جامع از دلایل وقوع ریزش‌ها و ناپایداری‌های حادث شده در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی انجام نشده است. از طرف دیگر، در هیچ یک از مطالعات آماری پیشین، دلایل وقوع ریزش‌ها و ناپایداری تونل‌ها بر اساس نوع کاربری مورد ارزیابی قرار نگرفته است. این موضوع، به عنوان هدف اصلی مقاله پیش رو در نظر گرفته شده است.

در این مقاله تلاش شده یک مطالعه آماری نسبتاً جامع از ریزش‌ها و ناپایداری‌های حادث شده در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی در سراسر جهان و با تمرکز بر دسته‌بندی عوامل مختلف موثر در ناپایداری و بررسی اهمیت نسبی این عوامل انجام شود. انجام این مهم نیازمند تهیه یک پایگاه داده منظم بوده که این پایگاه داده توسط نویسندگان مقاله و با بررسی صدها مطالعه موردی ایجاد شده است. در ادامه، جامعه آماری مورد استفاده همراه با توزیع جهانی و نوع کاربری تشریح شده است. سپس، برای هر یک از مطالعات موردی، عامل اصلی مؤثر در ریزش یا ناپایداری تعیین شده است. در نهایت، نتایج حاصل از مراحل قبل به صورت آماری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۲- مبانی

تبعات ناشی از ناپایداری و ریزش، یکی از مهم‌ترین چالش‌های تونل‌سازی بوده و هزینههای زیادی را بر این صنعت وارد میکند. موارد متعددی از ریزش و ناپایداری در گزارش‌ها، مقالات و متون فنی به ثبت رسیده که با توجه به گستردگی ادبیات فنی، از واژگان مختلفی برای نام‌گذاری و تشریح ناپایداری‌ها در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی استفاده شده است. بنابراین، برای یک مطالعه آماری مناسب، در مرحله اول لازم است این مفاهیم بررسی و یک چارچوب یکسان برای انجام مطالعات آماری در نظر گرفته شود.

1 Reliability Based Design
2 Probabilistic Safety Analyses

جدول ۱. انواع ریزش و مکانیسم های مربوطه

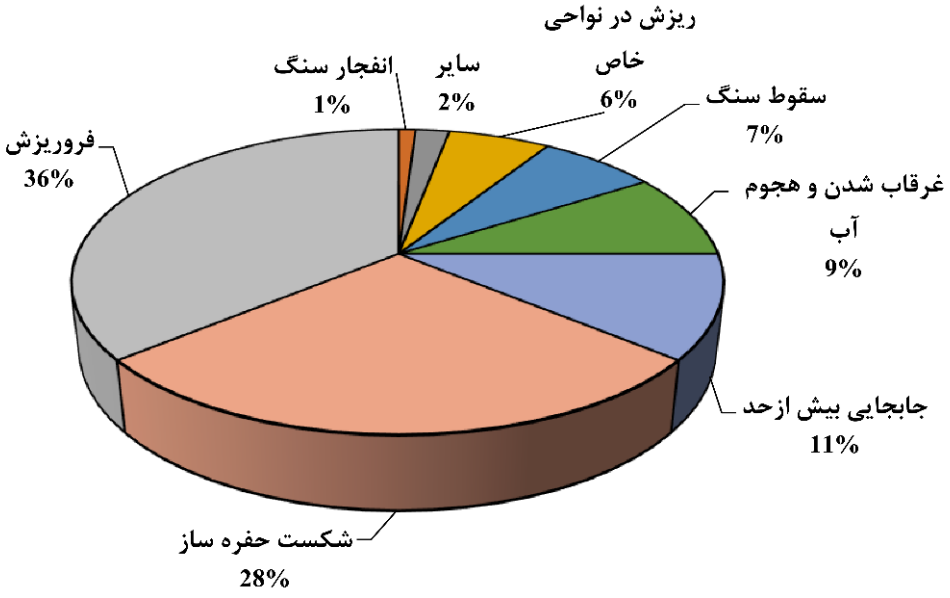
Table 1. Tunnel collapse types and related mechanisms

انواع ریزش	مکانیسم	اقدامات اصلاحی
سقوط سنگ[1]	سقوط بلوک‌های سنگی با ابعاد بزرگ مقیاس در برگیرنده شکست گوه‌ای، صفحه‌ای و واژگونی	نصب سیستم‌های حائل برای جلوگیری از سقوط سنگ [۳۰]
ریزش سینه‌کار[2]	شکست سینه‌کار/ شکست پوشش	سیستم پیش تحکیم سینه‌کار و کاهش فشار آب‌های زیرزمینی [۲۴]
شکست حفره‌ساز[3]	شکست پوشش که از سینه‌کار به سطح می‌رسد و باعث تشکیل حفره در محدوده سینه‌کار می‌شود.	بررسی مناسب زمین، صرف نظر از مناطق کم عمق، اقدامات نگهداری کافی، پیمانکاران با تجربه، پایش، عدم تاخیر در حفاری و نصب نگهداری [۲۴]
جمع شدگی بیش از حد[4]	تغییر شکل بیش از حد در داخل تونل یا در سطح زمین. این امر می‌تواند در اثر نقص در محاسبات طراحی، نقص‌های ساختمانی و زمین دارای خاصیت تورم و مچاله شوندگی، شرایط پیش‌بینی نشده و غیره رخ دهد.	افزایش سختی سازه‌های نگهدارنده، تقویت زمین، ترتیب ساخت و ساز مناسب و توالی حفاری در کاهش زمان ساخت و کنترل تغییر شکل خاک بسیار مؤثر است [۴۰]
هجوم آب[5]	شامل مواردی است که مقادیر زیادی آب زیرزمینی به تونل هجوم آورد.	استفاده از سیستم‌های پیش زهکشی، کاهش سطح آب زیرزمینی و پیش تزریق [۱۸]
انفجار سنگ[6]	تنش بیش از حد، ریزش سنگ‌های شکننده بزرگ یا سنگ بکر، تنش به وجود آمده از تنش محلی بیشتر است بدترین موارد شکست ناگهانی و شدید سنگ است.	اقدامات پیش‌بینی و هشدار اولیه، کاهش تنش با انفجار پیش‌رونده، طراحی بهینه انفجار و نگهداری بهینه تونل در بخش‌های مستعد پدیده انفجار سنگ [۴۱]
ریزش پرتالی[7]	ترکیب ریزش‌ها و ناپایداری سطحی (شیروانی) و ناپایداری تونل	تزریق جت و نگهداری توسط بتن مسلح [۳۸]

در متون فنی، ناپایداری تونل با تعاریف مختلفی از جمله؛ شکست[1]، ناپایداری[2]، جابه‌جایی بیش از حد[3]، حرکت تودهای[4] و فروریزش[5] مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی، فروریزش به معنای آزاد شدن ناگهانی و غیرقابل کنترل زمین بوده [۳۳] که منجر به از بین رفتن بیشتر یا تمام سطح مقطع تونل یا ریزش قابل‌توجهی از مصالح درون‌گیر تونل میشود [۳۵ و ۳۴]. همچنین، واژه شکست به معنای هر گونه ناپایداری منجر به از دست رفتن کارایی سازه یا ایجاد خدشه در فرآیند اجرایی و بهره‌برداری تونل و به عنوان یک مفهوم کلی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. عوامل متعددی در وقوع ناپایداری در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی نقش دارند [۳۷ و ۳۶] که ناپایداری را از نقطه نظر مکانیسم، می‌توان به انواع مختلفی از جمله، ریزش بلوکی، ریزش جریانی، شکست پیش رونده، پوسته پوسته شدگی، شکست تورقی، ریزش ناگهانی (شکست ترد)، جابه‌جایی پلاستیک و جمع شدگی، لهیدگی و آماس تقسیم‌بندی نمود [۱۴]. از نقطه نظر ماهیت و موقعیت ریزش نیز، انواع مختلفی از ناپایداری به صورت ریزش سنگ، ریزش سینهکار [۳۸]، شکست سازه و حفرهساز، ریزش پرتالی [۳۹]، هجوم آب (همراه با گل و لای)، جمع شدگی بیش از حد و انفجار سنگ نیز تقسیم‌بندی کرد. هر یک از این موارد به طور خلاصه در جدول ۱ تشریح شده‌اند. همچنین، سهم هر یک از این نوع ناپایداری‌ها بر اساس مطالعه آماری کومار (۲۰۱۹) در شکل ۱ نشان داده شده است [۳۹].

بر اساس توضیحات فوق الذکر، انواع مختلفی از مکانیسم‌های ناپایداری در فضاهای زیرزمینی وجود داشته که در متون فنی نیز از واژگان مختلفی برای توصیف ناپایداری استفاده شده است. در این مقاله، با توجه به گستردگی طیف واژگان مورد استفاده، چهار نوع مکانیسم اصلی شامل ریزش سینهکار، شکست حفرهساز، شکست سازه و جمع شدگی بیش از حد به عنوان ناپایداری در نظر گرفته شده است. در ادامه، مطالعات موردی مختلف از سرتاسر جهان مورد مطالعه قرار گرفته و مواردی که یکی از این انواع ناپایداری در آن‌ها رخ داده (صرف نظر از نوع ناپایداری)، مورد مطالعه آماری و تحلیلی قرار گرفته است. در بخش بعد، در خصوص جامعه آماری توضیحات بیشتری ارائه شده است.

1 Failure
2 Instability
3 Excessive deformation
4 Mass movement
5 Collapse



شکل ۱. بررسی آماری سهم هر یک از انواع ریزش در ناپایداری تونل‌ها [۳۹].

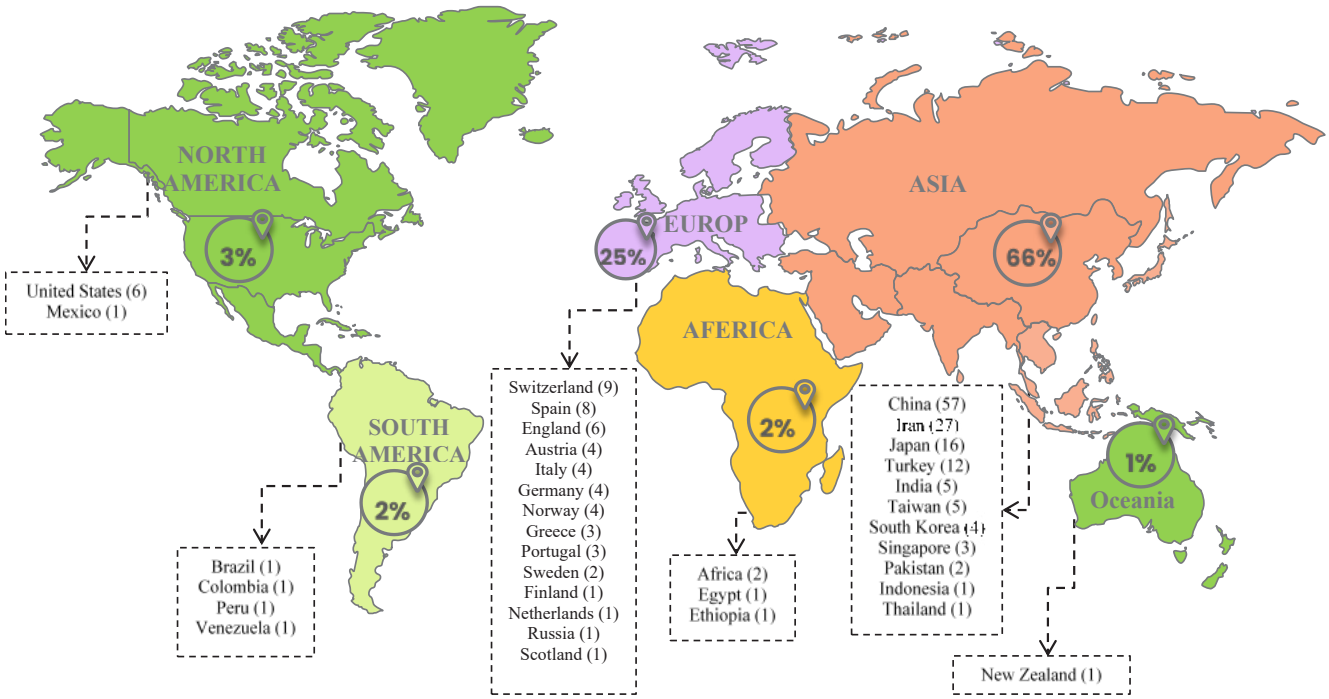
Fig. 1. Statistical investigation of the contribution of each type of collapse in the instability of tunnels [39].

۳- جامعه آماری و جمع‌آوری داده‌ها مورد نیاز

انجام یک مطالعه آماری معرف از دلایل و عوامل موثر بر ناپایداری تونل‌ها مستلزم تهیه یک پایگاه داده مدون و منظم از جامعه آماری است. بنابراین، قبل از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، ابتدا لازم است دلایل و عوامل موثر بر ناپایداری تونل‌ها شناسایی شده و سپس این عوامل به صورت منظم دسته‌بندی و از نظر مفاهیم یکپارچه‌سازی شود. بدین منظور، از نتایج مطالعه انجام شده توسط محمدی و همکاران (۲۰۲۱) در خصوص شناسایی عوامل موثر بر ناپایداری تونل‌ها، دسته‌بندی و رتبه‌بندی مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله مراتبی این عوامل [۳۶] استفاده شده است. بر این اساس، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ناپایداری تونل دسته‌بندی شده و به عنوان مبنای اصلی برای مستندسازی یکپارچه و مدون داده‌های مربوط به ناپایداری‌ها در پایگاه داده در نظر گرفته شد.

بعد از شناسایی و دسته‌بندی عوامل اصلی موثر بر ناپایداری تونل و فضاهای زیرزمینی، جمع‌آوری داده‌ها برای ایجاد پایگاه داده‌ها در دستور کار مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، مطالعات موردی مختلفی از سرتاسر دنیا توسط نویسندگان مورد بررسی قرار گرفت و برای هر یک از مطالعات موردی، عامل اصلی وقوع ریزش و کاربری تونل تعیین شد. سپس، این داده‌ها در یک پایگاه داده منظم ثبت شد. این فرآیند برای سایر مطالعات موردی به طور مجزا تکرار شده و نهایتا یک پایگاه داده منظم و منحصر به فرد (در مقایسه با مطالعات انجام شده تاکنون) با جامعه آماری نسبتاً وسیع از ناپایداری‌های حادث شده در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی ایجاد شد. لازم به ذکر است، این پایگاه داده توسط نویسندگان و با بررسی ۲۰۰ مطالعه موردی مختلف ایجاد شده است. در این پایگاه داده، اطلاعاتی همچون نام تونل، کشور، نوع کاربری تونل و دلایل وقوع ناپایداری با تمرکز بر اصلی‌ترین عامل موثر در وقوع ریزش یا ناپایداری ثبت شده است.

جامعه آماری این پژوهش دربرگیرنده مطالعات موردی مختلفی از کشورهای مختلف دنیا بوده که یک پایگاه داده نسبتا وسیع و جامع را شامل می‌شود. در این پژوهش تلاش شد که موارد مطالعاتی (اعضای جامعه آماری) از کشورهای مختلف جهان و با در نظر گرفتن سهم نسبی این کشورها از کل تونل‌های جهان و همچنین قابلیت دسترسی به داده‌های مورد نیاز انتخاب شوند. توزیع جغرافیایی موارد مطالعاتی انتخاب شده برای جامعه آماری در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق با این شکل، سهم عمده مطالعات موردی انتخاب شده مربوط به قاره آسیا و سپس مربوط به قاره اروپا است. این دو قاره، بیش از ۸۵ درصد از جامعه آماری را شامل شده‌اند. همچنین، از نظر مقایسه‌ای، بیشترین فراوانی مطالعات موردی مربوط به کشور چین با ۵۷ مورد، پس از آن کشور ایران با ۲۷ مورد مطالعاتی و کشور ژاپن با ۱۶ مورد مطالعاتی در صدر تمامی‌کشورها بودهاند.



شکل ۲. پهنه بندی جغرافیایی مطالعات موردی انتخاب شده (تعداد مطالعه موردی هر کشور در مقابل نام کشور و داخل پرانتز نشان داده شده است).

Fig. 2. Geographical distribution of the selected case studies (the number of case studies of each country is shown in front of the country name in parentheses).

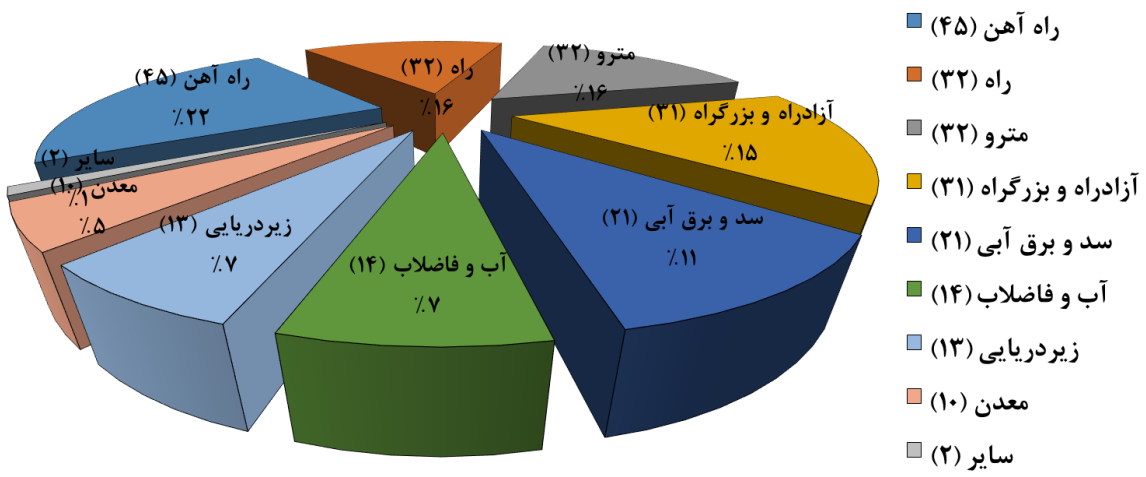
همان گونه که پیشتر توضیح داده شد، در این مطالعه سعی شده که یک پایگاه داده نسبتا وسیع و جامع از ناپایداری‌های حادث شده در تونل‌های مختلف از کشورهای مختلف دنیا تهیه شود. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های اصلی در این پایگاه داده، در نظر گرفتن انواع مختلف کاربری تونل است. بدین منظور، سعی شد که در جامعه آماری ناپایداری‌ها، مطالعات موردی با کاربری‌های مختلف حضور داشته باشند. توزیع فراوانی نوع کاربری تونل‌های تشکیل دهنده جامعه آماری (مطالعات موردی از ناپایداری‌های حادث شده) پایگاه داده‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳، بخش عمده ناپایداری‌ها مربوط به مطالعات موردی با کاربری حمل و نقل بوده که در این میان، تونل‌های راه آهن با ۴۵ مورد، تونل‌های راه با ۳۲ مورد، تونل‌های مترو با ۳۲ مورد و تونلهای آزادراهی و بزرگراهی با ۳۱ مورد، بیشترین جمعیت آماری مورد استفاده در پایگاه داده‌ها هستند. سایر کاربری‌های دیگر در جامعه آماری شامل فضاهای زیرزمینی مربوط به پروژه‌های سد و برق آبی و همچنین تونل‌های انتقال آب و فاضلاب و تونل‌های معدنی است.

۴- نتایج و بحث

برای بررسی عوامل موثر بر ناپایداری تونل‌ها از نقطه نظر آماری، در مرحله اول، لازم است دسته‌بندی و یکپارچه‌سازی انجام شده تا از بروز دوگانگی معنایی در تحلیل‌ها جلوگیری شود. برای دسته‌بندی عوامل، یکی از مطالعات پیشین مبتنی بر تحلیل سلسلهمراتبی [۳۶]، مورد استفاده قرار گرفت که نسخه بروز شده دسته‌بندی عوامل موثر بر ناپایداری تونل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۴، عوامل موثر بر ناپایداری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، در قالب شش گروه اصلی شامل، عوامل ژئومکانیکی، مطالعات و طراحی، شرایط زمین‌شناسی ساختگاه، شرایط خاص (تکینگی‌ها[1])، سیستم نگهداری و کنترل زمین و عوامل عمومی-اجرایی دسته‌بندی شده و در هر گروه، عوامل مختلفی در نظر گرفته شده است.

برای هر یک از ریزش‌های ثبت شده در پایگاه داده‌ها (جامعه آماری)، مهم‌ترین عامل موثر در وقوع پدیده ناپایداری تونل بر اساس بررسی‌های فنی تعیین شده و در پایگاه داده‌ها ثبت شده است. سپس، میزان فراوانی نسبی هر

1 Singularity



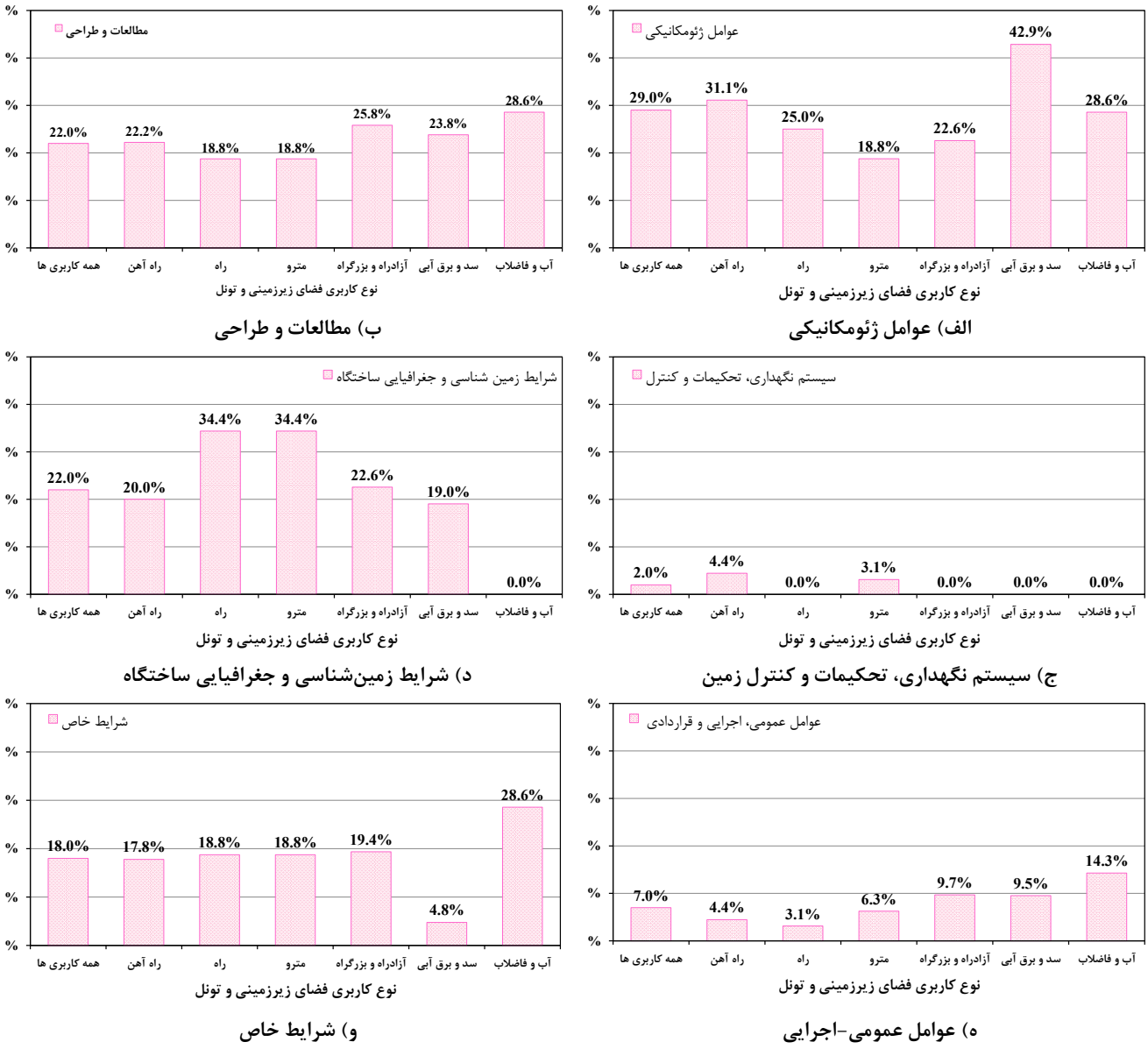
شکل ۳. فراوانی نوع کاربری مطالعات موردی انتخاب شده برای تحلیل آماری (مجموعاً ۲۰۰ ناپایداری در تونل‌ها با کاربری‌های مختلف).

Fig. 3. Frequency of use type of case studies selected for statistical analysis (a total of 200 instabilities in tunnels with different use types).

شرایط خاص (تکینگی ها)						شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه				سیستم نگهداری و کنترل زمین			مطالعات و طراحی					عوامل ژئومکانیکی					عمومی اجرایی	
زون پرتالی، تقاطع تونلها و اینترسکشن	رویاره کم یا بسیار زیاد	وجود سازه های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل	گل و لای آبدار، لنزهای شن و ماسه	زون های شدیدا خردشده و گسله	وجود سینه کار مختلط	عوارض زمین شناسی گسل چین خوردگی کارست	سطح و ضعیت آب زیرزمینی	وضعیت آب و هوایی و بلایای طبیعی	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	اضافه حفاری و پرکردن فضای خالی پشت نگهداری	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	عدم بکارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا	انتخاب نادرست روش اجرایی و تحکیمات	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	ضعف در پیش بینی رفتار و شرایط زمین	سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	زون های ضعیف	وجود پتانسیل آماس	وجود پتانسیل لهیدگی	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	تنش های برجا	روش حفاری تونل TBM,SEM,NATM	رعایت مشخصات کیفی و فنی

شکل ۴. دسته‌بندی عوامل موثر بر ناپایداری تونل‌ها به گروه‌های اصلی.

Fig. 4. Classification of factors affecting the instability of tunnels into main groups.



شکل ۵. تاثیر دسته عوامل مختلف بر میزان فراوانی ناپایداری حادث شده در تونل‌ها.

Fig. 5. The effect of main factors on the frequency of instability in tunnels.

یک از دسته‌های اصلی در ناپایداری‌های حادث شده برای مطالعات موردی برای انواع مختلف کاربری تونل محاسبه و نتایج به صورت نموداری در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵، فراوانی نسبی (به صورت درصد) عوامل اصلی موثر بر ریزش تونل‌ها به تفکیک نوع کاربری (برای شش کاربری عمرانی شامل تونل‌های راه آهن، راه، مترو، بزرگراه و آزادراه، سد و برق آبی و تونل‌های انتقال آب و فاضلاب) و همچنین، برای کل جامعه آماری نشان داده شده است. مطابق با شکل ۵، مجموعه عوامل ژئومکانیکی دارای بالاترین میانگین فروانی نسبی ناپایداری در تونل‌های عمرانی بوده و بعد از آن، عوامل مربوط به مباحث مطالعات و طراحی و عوامل مربوط به دسته شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه دارای بیشترین میانگین فراوانی نسبی در ناپایداری هستند. این سه دسته عوامل، مجموعا حدود ۷۳ درصد از ریزش‌های حادث شده در تونل‌های با کاربری عمرانی را در بر می‌گیرند. همچنین، دسته عوامل مربوط به سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین و عوامل عمومی-اجرایی دارای کمترین تاثیر در ریزش‌های حادث شده

جدول ۲. پارامترهای آماری فراوانی نسبی ناپایداری‌های حادث شده برای کاربری‌های عمرانی.

Table 2. Statistical parameters of the relative frequency of instabilities for civil type tunnels.

دسته عوامل	پارامترهای آماری فراوانی نسبی ناپایداری				
	حداقل (درصد)	حداکثر (درصد)	میانگین (درصد)	انحراف استاندارد (درصد)	ضریب تغییرات
عوامل ژئومکانیکی	۱۸/۸	۴۲/۹	۲۸/۱	۷/۷	۰/۲۷
مطالعات و طراحی	۱۸/۸	۲۸/۶	۲۳/۰	۳/۶	۰/۱۶
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۰	۴/۴	۱/۳	۱/۸	۱/۴۵
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	۰	۳۴/۴	۲۱/۷	۱۱/۶	۰/۵۳
عوامل عمومی- اجرایی	۳/۱	۱۴/۳	۷/۹	۳/۷	۰/۴۷
شرایط خاص	۴/۸	۲۸/۶	۱۸/۰	۷/۰	۰/۳۹

[1] Rock fall
[2] Heading collapse
[3] Daylight collapse
[4] Excessive deformation
[5] Flooding or Large inflow of water
[6] Rock burst
[7] Portal collapse

در تونل‌های عمرانی بوده که سهم این دو دسته عوامل در فراوانی نسبی ناپایداری در حدود ۹ درصد بوده است. به منظور مقایسه بهتر نتایج، برای هر یک از دسته عوامل اصلی موثر در ناپایداری، مقادیر پارامترهای آماری مربوط به کاربری‌های مختلف محاسبه و نتایج به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است.

مطابق با جدول ۲، کمترین انحراف استاندارد فراوانی نسبی ناپایداری برای کاربری‌های مختلف عمرانی به ترتیب برای دسته عوامل مطالعات و طراحی بوده و بیشترین انحراف استاندارد مربوط به دسته عوامل شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه است. به طور مشابه، بیشترین بازه تغییرات فراوانی نسبی ناپایداری برای کاربری‌های مختلف برای دسته عوامل شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه رخ داده که در نتیجه، انحراف استاندارد، این دسته از عوامل نسبت به سایر عوامل بیشتر بوده است. برای مقایسه بهتر این نتایج، لازم است بررسی‌ها بر روی ضریب تغییرات متمرکز شود. برای کاربری‌های مختلف تونل، کمترین ضریب تغییرات فراوانی نسبی ناپایداری مربوط به دسته عوامل مطالعات و طراحی است. این موضوع نشان می‌دهد که تاثیر دسته عوامل مطالعات و طراحی کمترین وابستگی به نوع کاربری تونل داشته و به طور میانگین و فارغ از نوع کاربری، حدود ۲۳ درصد از ناپایداری‌های تونل ناشی از ضعف مطالعاتی و مباحث طراحی (به ویژه فرضیات طراحی) است.

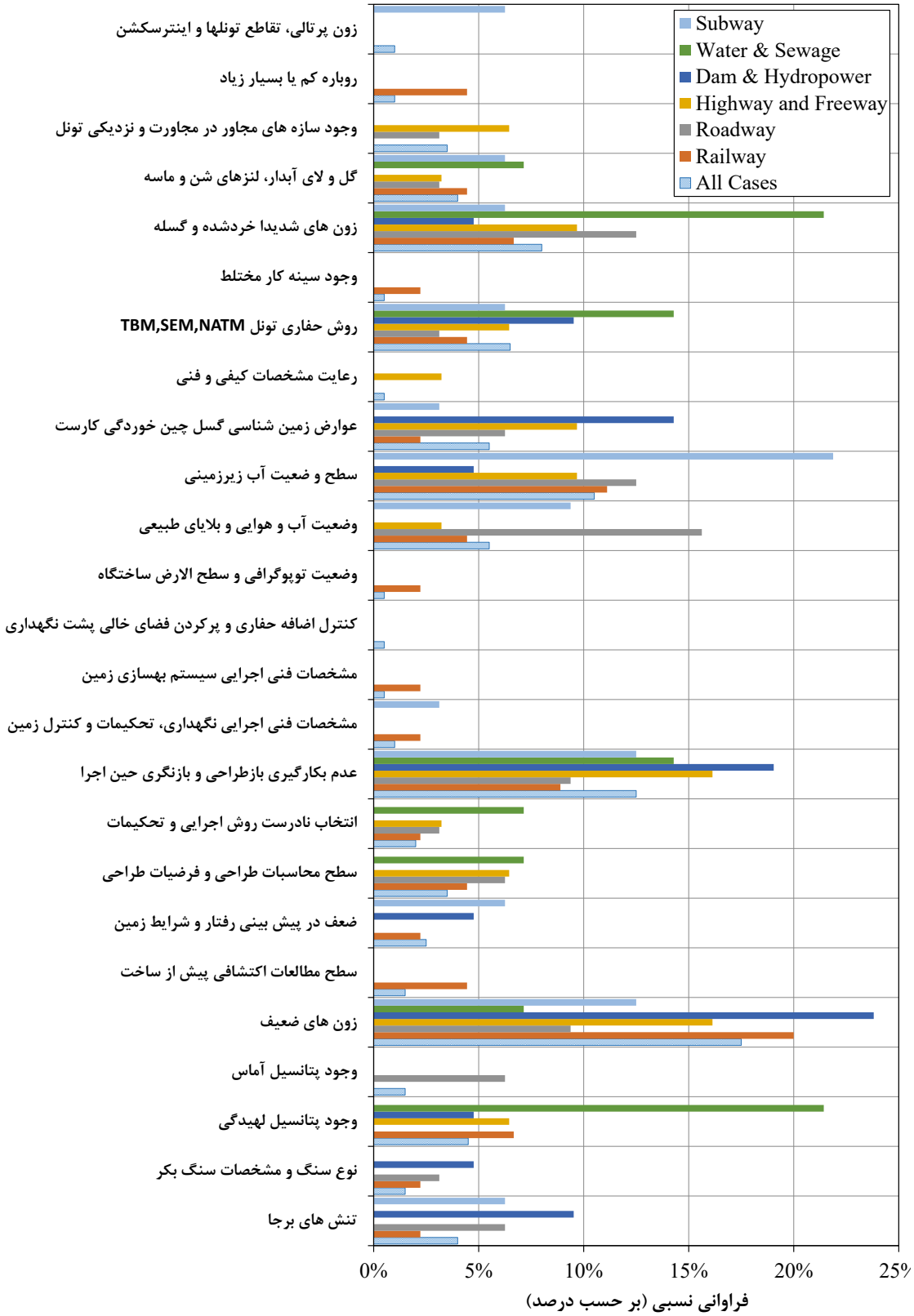
بیشترین ضریب تغییرات در بین دسته عوامل مختلف برای کاربری‌های مختلف تونل مربوط به سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین بوده که بیشترین وابستگی بین نوع کاربری و فراوانی نسبی ناپایداری برای این دسته از عوامل مشاهده شده است. در حقیقت، ناپایداری‌های ناشی از مشخصات فنی و اجرایی تحکیمات تونل بیشترین وابستگی را به نوع کاربری تونل نشان می‌دهد. با این وجود، میانگین و بیشینه فراوانی نسبی ناپایداری ناشی از این دسته عوامل چندان زیاد نبوده و قابل صرف نظر کردن است. رتبه بعدی بیشترین ضریب تغییرات در بین دسته عوامل مختلف برای کاربری‌های مختلف تونل مربوط به شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه بوده که

با توجه به بیشینه و میانگین فراوانی نسبی ناپایداری، این دسته از عوامل را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین دسته عوامل ایجاد کننده ناپایداری با توجه به نوع کاربری تونل در نظر گرفت. در حقیقت، احتمال وقوع ناپایداری در تونل‌های عمرانی ناشی از دسته عوامل شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه دارای بیشترین تأثیرپذیری از نوع کاربری تونل بوده و بسته به نوع کاربری تونل، میزان اثرگذاری این دسته عوامل در بروز ناپایداری دارای بیشترین دامنه تغییرات خواهد بود.

هر یک از دسته عوامل موثر بر ناپایداری تونل متشکل از چندین عامل مستقل است. این عوامل موثر بر ریزش، قبلا در شکل ۴ معرفی شده‌اند. مجموعه این عوامل به عنوان اصلی‌ترین دلایل وقوع ناپایداری در تونل‌ها بوده و هر یک از این عوامل دارای تاثیرگذاری متفاوتی هستند. برای بررسی این موضوع، فراوانی نسبی ناپایداری‌های حادث شده برای مطالعات موردی (جامعه آماری) و برای انواع مختلف کاربری تونل از پایگاه داده‌ها استخراج و نتایج به صورت نموداری در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶، فراوانی نسبی (به صورت درصد) هر یک از عوامل موثر بر ناپایداری تونل برای کل جامعه آماری و همچنین به صورت تفکیک شده بر اساس نوع کاربری تونل (برای شش کاربری عمرانی) نشان داده شده است. مطابق با شکل ۶، برای کل جامعه آماری (صرف نظر از نوع کاربری)، عامل "زون‌های ضعیف" دارای بیشترین فراوانی نسبی بین کلیه عوامل بوده و میزان فراوانی نسبی این عامل برای کلیه تونل‌ها در حدود ۱۷/۵ درصد است. عامل زون‌های ضعیف برای تونل‌های راه آهن و تونل‌های مربوط به پروژه‌های سد و برق آبی نیز دارای بیشترین فراوانی نسبی (به ترتیب برابر با ۲۰ و ۲۳/۸ درصد) است. لازم به ذکر است، در بین کلیه عوامل موثر بر ریزش در انواع مختلف کاربری، بیشترین فراوانی نسبی برای عامل زون‌های ضعیف و در تونل‌های مربوط به پروژه‌های سد و برق آبی مشاهده شده است.

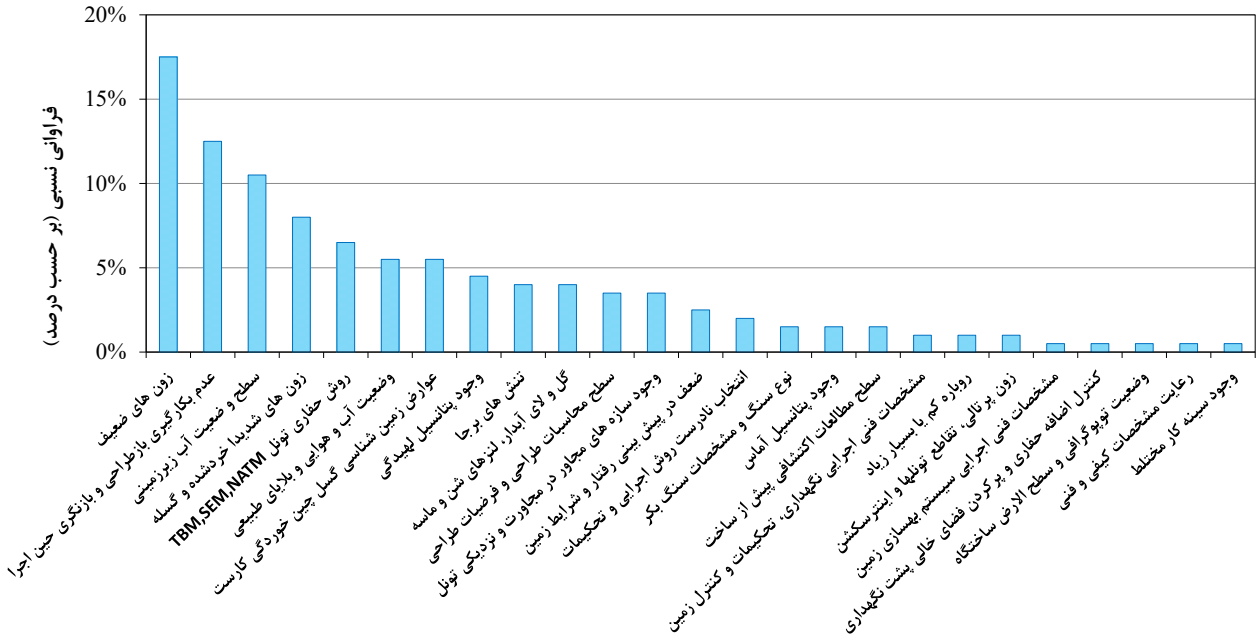
مطابق با شکل ۶، برای تونل‌های راه آهن، عوامل مربوط به زون‌های ضعیف، سطح و وضعیت آب زیرزمینی و عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا سه عامل اصلی موثر در ناپایداری بوده که فراوانی نسبی ناپایداری‌های حادث شده در تونل‌های راه آهن موجود در پایگاه داده‌ها به ترتیب برابر با ۲۰، ۱۱/۱ و ۸/۹ درصد است. برای تونل‌های راه، تأثیرگذارترین عوامل به ترتیب وضعیت آب و هوایی و بلایای طبیعی، سطح و وضعیت آب زیرزمینی و زون‌های شدیدا خرد شده و گسله به ترتیب با فراوانی نسبی ناپایداری ۱۵/۶، ۱۲/۵ و ۱۲/۵ درصد مشاهده شده است. برای تونل‌های مترو، سطح و وضعیت آب زیرزمینی، زون‌های ضعیف و عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا به ترتیب با فراوانی نسبی ۲۱/۹، ۱۲/۵ و ۱۲/۵ درصد مهم‌ترین عوامل موثر بر ناپایداری بوده‌اند. برای تونل‌های آزادراه و بزرگراه، عوامل مربوط به زون‌های ضعیف، عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا و سطح و وضعیت آب زیرزمینی به ترتیب سه عامل اصلی موثر در ناپایداری بوده که فراوانی نسبی ناپایداری به ترتیب برابر با ۱۶/۱، ۱۶/۱ و ۷/۹ درصد بوده است. زون‌های ضعیف، عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا و عوارض زمین‌شناسی گسل چین خوردگی کارست به ترتیب با فراوانی نسبی ۲۳/۸، ۱۹ و ۱۴/۳ درصد، تاثیرگذارترین عوامل موثر بر ریزش در تونل‌های سد و برق آبی هستند. از طرف دیگر، عواملی همچون وضعیت توپوگرافی ساختگاه، رعایت مشخصات کیفی و فنی، کنترل اضافه حفاری و روباره‌های کم یا بسیار زیاد، از جمله عواملی هستند که دارای کمترین فراوانی نسبی در پایگاه داده‌ها بوده‌اند.

شکل ۶ نشان می‌دهد که در بین کلیه عوامل موثر بر ناپایداری، نقش برخی از عوامل بسیار پررنگ‌تر و بیشتر از سایر عوامل است. عواملی از قبیل، زون‌های ضعیف، عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا، سطح و وضعیت آب زیرزمینی، زون‌های شدیدا خرد شده و گسله و نوع روش حفاری در عمده کاربری‌های تونل‌های عمرانی به عنوان تاثیرگذارترین عوامل در بروز ناپایداری هستند. از طرف دیگر، برخی از عوامل مثل وجود پتانسیل لهیدگی در برخی از کاربری‌های خاص (به طور نمونه در تونل‌های انتقال آب طویل) دارای نقش مهمی بوده و در سایر کاربری‌های عمرانی دارای اثرگذاری کمتری هستند. به منظور شناسایی مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عوامل موثر بر ناپایداری، دو رویکرد مختلف در نظر گرفته شده است. در رویکرد اول، عوامل موثر بر ناپایداری بر اساس فراوانی نسبی برای کلیه تونل‌های موجود در جامعه آماری به صورت نزولی مرتب شدند. نمودار توزیع فراوانی نسبی حاصل از این رویکرد در شکل ۷ نشان داده شده است. در رویکرد دوم، برای هر یک از کاربری‌های مختلف، ابتدا عوامل بر اساس فراوانی نسبی مرتب شده و سپس به عوامل یک امتیاز ترتیبی (به ترتیب برای عامل با بیشترین فراوانی نسبی تا کمترین فراوانی نسبی) داده شد و سپس امتیازات هر عامل برای کاربری‌های مختلف محاسبه و نهایتا کلیه عوامل بر اساس امتیاز ترتیبی مرتب‌سازی شدند. نتیجه حاصل از این دو روش بسیار مشابه به هم بوده و اختلاف بین دو روش بسیار جزئی به دست آمد. برای کاربری‌های مختلف تونل، فراوانی تجمعی ناپایداری‌های حادث شده بر اساس عوامل مرتب‌سازی شده (با مرتب‌سازی مشابه با شکل ۷) محاسبه شده و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است.



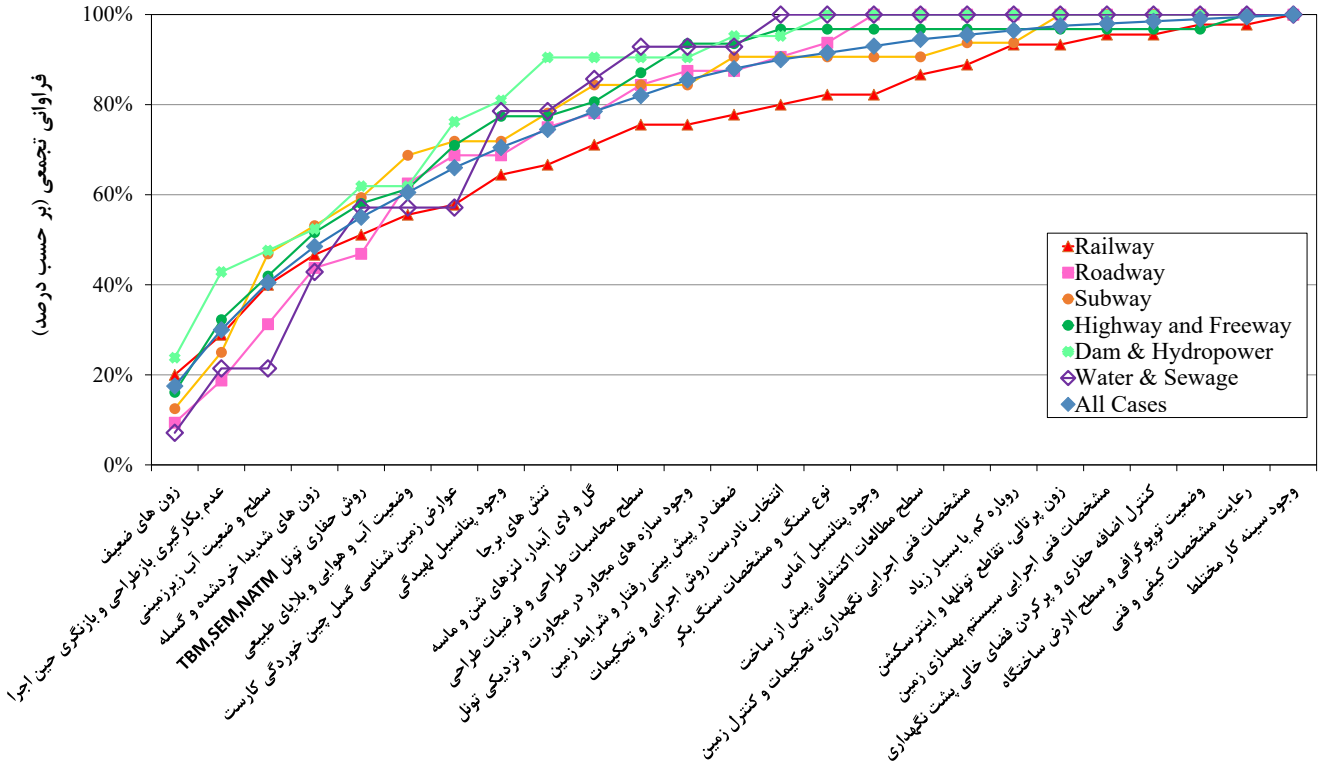
شکل ۶. تاثیر هر یک از عوامل مختلف موثر بر ناپایداری بر فراوانی نسبی ناپایداری حادث شده در تونل‌ها.

Fig. 6. The instability relative frequency of each individual effective factors on tunnel instability.



شکل ۷. توزیع فراوانی نسبی ناپایداری‌های ثبت شده برای کلیه تونل‌های جامعه آماری به صورت مرتب‌سازی شده.

Fig. 7. The sorted distribution of relative frequency of instability for all individual factors.



شکل ۸.توزیع فراوانی تجمعی ناپایداری‌های حادث شده بر اساس عوامل مرتب‌سازی شده برای کاربری‌های مختلف تونل.

Fig. 8. Cumulative frequency distribution of instabilities based on sorted factors for different tunnel uses.

جدول ۳. ماتریس همبستگی بین کاربری‌های مختلف تونل بر اساس فراوانی نسبی ناپایداری‌های مربوط به هشت عامل اصلی.

Table 3. Correlation matrix between different tunnel uses based on the relative frequency of instabilities related to eight main factors.

	همه کاربری‌ها	راه آهن	راه	مترو	آزادراه و بزرگراه	سد و برق آبی	آب و فاضلاب
همه کاربری‌ها	۱	۰/۹۱۶۵	۰/۲۹۱۱	۰/۶۱۹۷	۰/۸۶۳۱	۰/۷۴۷۵	-۰/۰۹۷
راه آهن	۰/۹۱۶۵	۱	۰/۱۷۹۵	۰/۵۴۳۱	۰/۶۸۵۹	۰/۵۷۴۱	-۰/۰۳۸
راه	۰/۲۹۱۱	۰/۱۷۹۵	۱	۰/۶۲۲۱	۰/۰۶۰۵	-۰/۱۸۶	-۰/۴۷۶
مترو	۰/۶۱۹۷	۰/۵۴۳۱	۰/۶۲۲۱	۱	۰/۳۷۲۹	۰/۱۱۹۳	-۰/۴۸۷
آزادراه و بزرگراه	۰/۸۶۳۱	۰/۶۸۵۹	۰/۰۶۰۵	۰/۳۷۲۹	۱	۰/۸۷۷۴	۰/۰۷۷۶
سد و برق آبی	۰/۷۴۷۵	۰/۵۷۴۱	-۰/۱۸۶	۰/۱۱۹۳	۰/۸۷۷۴	۱	-۰/۰۲۴
آب و فاضلاب	-۰/۰۹۷	-۰/۰۳۸	-۰/۴۷۶	-۰/۴۸۷	۰/۰۷۷۶	-۰/۰۲۴	۱

مطابق با شکل ۸، عوامل اصلی شامل زون‌های ضعیف، عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا، سطح و وضعیت آب زیرزمینی، زون‌های شدیدا خرد شده و گسله، روش حفاری تونل، وضعیت آب و هوایی و بلایای طبیعی، عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین خوردگی، کارست) و پتانسیل لهیدگی، به ترتیب دارای بیشترین فراوانی نسبی ناپایداری در کلیه تونل‌های جامعه آماری بوده‌اند. این ۸ عامل (حدود ۳۲ درصد از کل عوامل موثر) برای عمده کاربری‌های عمرانی، بین ۷۰ الی ۸۰ درصد از فراوانی ناپایداری‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. به عبارت دیگر، ۳۰ درصد از عوامل، در حدود ۷۰ الی ۸۰ درصد از آمار ناپایداری‌ها را شامل می‌شوند که این موضوع با اصل پارتو[1] دارای انطباق نسبی است. مطابق با اصل پارتو، در سیستم‌های چند عاملی، بخش عمده‌ای از اثرات و وقایع (در حدود ۸۰ درصد از اثرات) از بخش اندکی از عوامل (حدود ۲۰ درصد از عوامل یا علل) ایجاد می‌شود. این اصل برای مقدار خاصی از پارامتر تعریف در تابع توزیع احتمال پارتو (یکی از توابع توزیع احتمال قانون–توانی) حاصل می‌شود. بررسی نتایج مندرج در شکل ۸ نشان می‌دهد که عمده فراوانی نسبی ناپایداری در تونل‌ها از بخش خاصی از عوامل ناشی می‌شود که در نتیجه، با مدیریت حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد از کل عوامل اصلی تاثیرگذار، بهبود بسیار بیشتری در کاهش فراوانی ناپایداری در تونل و در نتیجه کاهش خسارات حاصل خواهد شد.

همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده، برای تونل‌ها با کاربری‌های مختلف، دامنه اثرگذاری عوامل مؤثر بر ریزش و به ویژه هشت عامل اصلی دارای تفاوت‌هایی است. برای بررسی این موضوع، ماتریس همبستگی بین کاربری‌های مختلف تونل بر اساس مقادیر فراوانی نسبی ناپایداری مربوط به هشت عامل اصلی موثر در ناپایداری محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. مطابق با جدول ۳، در بین کاربری‌های مختلف، بیشترین همبستگی با کل جامعه آماری برای تونل‌های راه آهن مشاهده شده که به نظر می‌رسد یکی از مهم‌ترین دلایل این همبستگی، وزن بالای این نوع کاربری در کل جامعه آماری است. با این وجود، تونل‌های مترو و راه که دارای دومین وزن نسبی در جامعه آماری هستند، دارای همبستگی نسبتاً پایین‌تری با کل جامعه آماری هستند. در حقیقت، مقایسه همبستگی بین تونل‌های مترو و راه با کل جامعه آماری نشان می‌دهد که وزن نسبی تونل‌ها در کل جامعه آماری، تاثیر چندانی در این بخش از نتایج ندارد. از طرف دیگر، رتبه دوم همبستگی با جامعه آماری کل برای تونل‌های آزادراه و بزرگراه مشاهده شده که این نتیجه نیز بر عدم وابستگی نتایج به وزن نسبی نوع کاربری تونل در کل جامعه آماری تاکید دارد. کمترین همبستگی نیز مربوط به تونل‌های انتقال آب و فاضلاب است. در بین کاربری‌های مختلف، بیشترین همبستگی بین فراوانی نسبی ناپایداری مربوط به هشت عامل اصلی موثر در ناپایداری مربوط به تونل‌های با کاربری آزادراه–بزرگراه با تونل‌های سد و برق آبی

1 Pareto Principle

است. این دو دسته از کاربری برای تونل‌ها دارای تشابهات زیادی هستند. به طور نمونه، ابعاد تونل‌های این دو دسته نسبت به سایر کاربری‌ها بزرگ‌تر بوده، عمر طراحی سازه‌های این نوع تونل‌ها معمولا بیشتر در نظر گرفته شده و معمولا با سطح استاندارد بالاتری طراحی می‌شوند. در مجموع، تونل‌های آزادراه و بزرگراه، دارای بیشترین انطباق با سایر کاربری‌های بوده و می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که این نوع کاربری را می‌توان از نقطه نظر عوامل موثر بر ناپایداری تونل، به عنوان نماینده از سایر کاربری‌ها در نظر گرفت. همچنین، کمترین همبستگی در بین کاربری‌های مختلف مربوط به تونل‌های انتقال آب و فاضلاب بوده که در نتیجه، نتایج حاصل از این تحقیق برای این نوع از تونل‌ها قابلیت کمتری از نظر تطبیق کلی خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله، بررسی تاثیر عوامل موثر بر ناپایداری تونل و فضاهای زیرزمینی با استفاده از بررسی آماری رخدادهای پیشین است. در این مقاله تلاش شده یک مطالعه آماری از ریزش‌ها و ناپایداری‌های حادث شده در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی در سراسر دنیا و با تمرکز بر دسته‌بندی عوامل مختلف موثر بر ناپایداری و بررسی اهمیت نسبی این عوامل انجام شود. بدین منظور، پایگاه داده مبتنی بر یک جامعه آماری نسبتا جامع (نسبت به مطالعات مشابه پیشین) با در نظر گرفتن انواع کاربری‌های مختلف و ساختگاه‌های متفاوت جمع‌آوری شد. در ادامه، عوامل موثر بر ناپایدرای تونل در قالب شش گروه اصلی شامل، عوامل ژئومکانیکی، مطالعات و طراحی، شرایط زمین‌شناسی ساختگاه، شرایط خاص و تکینگی‌ها، سیستم نگهداری و کنترل زمین و عوامل عمومی–اجرایی دسته‌بندی شد که این دسته‌بندی مجموعا ۲۵ عامل را در خود جای داده است. برای هر یک از تونل‌های جامعه آماری، مهم‌ترین عامل موثر در وقوع پدیده ناپایداری تونل (از میان ۲۵ عامل اصلی) و بر اساس بررسی‌های فنی تعیین شده و در پایگاه داده‌ها ثبت شد. سپس، میزان فراوانی نسبی هر یک از دسته‌های اصلی در ناپایداری‌های حادث شده برای مطالعات موردی برای انواع مختلف کاربری تونل محاسبه شد. در نهایت نتایج حاصل از بررسی‌های آماری بر روی پایگاه داده‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس فرایند فوق الذکر و بررسی‌های به عمل آمده بر روی داده‌های آماری، نتایج زیر حاصل شده است:

مجموعه عوامل ژئومکانیکی دارای بالاترین میانگین فروانی نسبی ناپایداری در تونل‌های عمرانی بوده و بعد از آن، عوامل مربوط به مباحث مطالعات و طراحی و عوامل مربوط به دسته شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه دارای بیشترین میانگین فراوانی نسبی در ناپایداری هستند. این سه دسته عوامل، مجموعا حدود ۷۳ درصد از ریزش‌های حادث شده در تونل‌های با کاربری عمرانی را در بر می‌گیرند. همچنین، کمترین ضریب تغییرات فراوانی نسبی ناپایداری مربوط به بخش مطالعات و طراحی بوده که این عامل کمترین وابستگی به نوع کاربری تونل را داشته و به طور میانگین و فارغ از نوع کاربری، حدود ۲۳ درصد از ناپایداری‌های تونل را شامل می‌شود.

با توجه به مقدار ضریب تغییرات، میانگین و بیشینه فراوانی نسبی ناپایداری، دسته عوامل مربوط به شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه به عنوان مهم‌ترین عامل همبسته با کاربری تونل بوده و بسته به نوع کاربری تونل، میزان اثرگذاری این دسته عوامل در بروز ناپایداری دارای بیشترین دامنه تغییرات خواهد بود.

برای کل جامعه آماری و صرف نظر از نوع کاربری تونل، "زون‌های ضعیف"، "عدم به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا" و "سطح و وضعیت آب زیرزمینی"، به ترتیب با فروانی نسبی ۱۷/۵، ۱۲/۵ و ۱۰/۵ درصد موثرترین عامل در بروز ناپایداری بوده‌اند که مجموع اثرگذاری این سه عامل در ناپایداری تونل با کاربری‌های مختلف در عمده موارد بیش از ۴۰ درصد بوده است. بعد از این سه عامل، زون‌های شدیدا خرد شده و گسله، روش حفاری تونل، وضعیت آب و هوایی و بلایای طبیعی، عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین خوردگی، کارست) و پتانسیل لهیدگی، به ترتیب دارای بیشترین فراوانی نسبی ناپایداری هستند. این ۸ عامل (حدود ۳۲ درصد از کل عوامل موثر) برای عمده کاربری‌های عمرانی، بین ۷۰ الی ۸۰ درصد از فراوانی ناپایداری‌ها را به خود اختصاص می‌دهند.

در بین کاربری‌های مختلف، بیشترین همبستگی بین فراوانی نسبی ناپایداری مربوط به هشت عامل اصلی موثر در ناپایداری مربوط به تونل‌های با کاربری آزادراه–بزرگراه با تونل‌های سد و برق آبی است. در مجموع، تونل‌های آزادراه و بزرگراه، دارای بیشترین انطباق با سایر کاربری‌های دیگر بوده و می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که این نوع کاربری را می‌توان از نقطه نظر عوامل موثر بر ناپایداری تونل، به عنوان نماینده از سایر کاربری‌ها در نظر گرفت.

بخش قابل توجهی از ناپایداری‌های حادث شده در تونل‌ها ناشی از مخاطرات زمین‌شناسی به ویژه زون‌های ضعیف، آب زیرزمینی، زون‌های گسله و عوارض زمین‌شناسی بوده که با افزایش سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت و یا حین ساخت می‌توان این مخاطرات را شناسایی نمود. همچنین، بازطراحی–بازنگری حین اجرا و روش حفاری دو عامل کلیدی

و تاثیرگذار در وقوع ناپایداری بوده که با مدیریت این دو مولفه می‌توان احتمال وقوع ناپایداری را تا حد مناسبی کاهش داد. این موارد باید به عنوان راهبردهای اساسی در زمان مطالعات و حین اجرا مدنظر دست اندرکاران پروژه‌های تونل‌سازی قرار گیرد. همچنین، نتایج فراوانی نسبی حاصل شده برای عوامل موثر در ناپایداری‌ها را می‌توان به طور مستقیم در تحلیل ریسک کمی پروژه‌های تونل‌سازی در ترکیب با روش‌های نوین به کار گرفت.

منابع

[1] M. Fraldi, F. Guarracino, Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek–Brown failure criterion, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(4) (2009) 665-673.

[2] X. Yang, F. Huang, Collapse mechanism of shallow tunnel based on nonlinear Hoek–Brown failure criterion, Tunnelling and Underground Space Technology, 26(6) (2011) 686-691.

[3] Y. Xiang, Z. Zeng, Y. Xiang, E. Abi, Y. Zheng, H. Yuan, Tunnel failure mechanism during loading and unloading processes through physical model testing and DEM simulation, Scientific Reports, 11(1) (2021) 1-20.

[4] F. Kitchah, S. Benmebarek, M. Djabri, Numerical assessment of tunnel collapse: a case study of a tunnel at the East–West Algerian highway, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(8) (2021) 6161-6176.

[5] C. Martin, P. Kaiser, R. Christiansson, Stress, instability and design of underground excavations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8) (2003) 1027-1047.

[6] Z. Liang, R. Xue, N. Xu, W. Li, Characterizing rockbursts and analysis on frequency-spectrum evolutionary law of rockburst precursor based on microseismic monitoring, Tunnelling and Underground Space Technology, 105 (2020) 103564.

[7] N. Moussaei, M. Sharifzadeh, K. Sahriar, M.H. Khosravi, A new classification of failure mechanisms at tunnels in stratified rock masses through physical and numerical modeling, Tunnelling and Underground Space Technology, 91 (2019) 103017.

[8] Z. Li, L. Wang, B. Feng, J. Xiao, Q. Zhang, L. Li, J. Liang, Comprehensive collapse investigation and treatment: An engineering case from qingdao expressway tunnel, Journal of cleaner production, 270 (2020) 121879.

[9] Q. Xue, X. Yang, F. Wu, A three-stage hybrid model for the regional assessment, spatial pattern analysis and source apportionment of the land resources comprehensive supporting capacity in the Yangtze River Delta urban agglomeration, Science of the Total Environment, 711 (2020) 134428.

[10] H. Stille, A. Palmström, Classification as a tool in rock engineering, Tunnelling and underground space technology, 18(4) (2003) 331-345.

[11] H. Zhu, M. Chen, Y. Zhao, F. Niu, Stability assessment for underground excavations and key construction techniques, Springer, 2017.

[12] A. Zsaki, Optimized mesh generation for two-dimensional finite element analysis of underground excavations in rocks masses traversed by joints, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(4) (2010) 553-558.

[13] T. Wiles, Reliability of numerical modelling predictions, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(3) (2006) 454-472.

[14] H. Stille, A. Palmström, Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations, Tunnelling and Underground Space Technology, 23(1) (2008) 46-64.

[15] K.-K. Phoon, Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications, CRC Press, 2008.

[16] F. Nadim, Tools and Strategies for Dealing with Uncertainty in Geotechnics, in: D.V. Griffiths, G.A. Fenton (Eds.) Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Springer Vienna, Vienna, 2007, pp. 71-95.

[17] N. Doorn, S.O. Hansson, Should Probabilistic Design Replace Safety Factors?, Philosophy & Technology, 24(2) (2011) 151-168.

[18] M. Sharifzadeh, M. Javadi, Groundwater and underground excavations: From theory to practice, Rock

during construction and its application, Tunnelling and Underground Space Technology, 115 (2021) 104019.

[30] R.L. Sousa, H.H. Einstein, Lessons from accidents during tunnel construction, Tunnelling and Underground Space Technology, 113 (2021) 103916.

[31] T. Seidenfuss, Collapses in tunnelling, Master Degree Foundation Engineering and Tunnelling. Stuttgart, Germani, 194 (2006).

[32] Z. Xu, N. Cai, X. Li, M. Xian, T. Dong, Risk assessment of loess tunnel collapse during construction based on an attribute recognition model, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(8) (2021) 6205-6220.

[33] D. Kolymbas, Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling, Springer Science & Business Media, 2005.

[34] Z.T. Bieniawski, Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering, John Wiley & Sons, 1989.

[35] E. Brown, Underground excavations in rock, CRC Press, 1980.

[36] F. Mohammadi, Javadi, M., Rafiee, R., , Application of Hierarchical Analysis Process in Evaluating and Ranking Parameters Affecting Tunnel Stability., Second International Conference on Metallurgy, Mechanics and Mining., (2021).

[37] I. Watanabe, S. Ueno, M. Koga, K. Muramoto, T. Abe, T. Goto, Safety and disaster prevention measures for underground space: an analysis of disaster cases, Tunnelling and underground space technology, 7(4) (1992) 317-324.

[38] S.W. Tun, S.K. Singal, Management of Hydropower Tunnels to Prevent Collapse and Remedial Measures, Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment, 19 (2016) 31-37.

[39] S. Ashok Kumar, Safety Management of Road Tunnel During Construction-A Case Study. , International Journal of Engineering Trends and Technology, 67(5) (2019) 31-43.

Mechanics and Engineering, (2017).

[19] A.C. e Matos, L.R. e Sousa, J. Kleberger, P.L. Pinto, Geotechnical Risk in Rock Tunnels: Selected Papers from a Course on Geotechnical Risk in Rock Tunnels, Aveiro, Portugal, 16-17 April 2004, CRC Press, 2006.

[20] J.-E. Shin, I.K. Lee, Y. Lee, H.-S. Shin, Lessons from serial tunnel collapses during construction of the Seoul subway Line 5, Tunnelling and Underground Space Technology, 21 (2006) 296-297.

[21] T. Szwedzicki, Geotechnical precursors to large-scale ground collapse in mines, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(7) (2001) 957-965.

[22] W. Leichnitz, Analysis of collapses on tunnel construction sites on the new lines of the German Federal Railway, Tunnelling and Underground Space Technology, 5(3) (1990) 199-203.

[23] C.E.a.D. Department, Catalogue of notable tunnel failure case histories Hong Kong, CEDD.
, (2015).

[24] H.S.a. Environment, The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground, HSE Books, (2006) 78.

[25] L.N. Lamas, Contributions to understanding the hydromechanical behaviour of pressure tunnels, PhD Thesis, Imperial College, London, (1993) 419.

[26] P. Spyridis, D. Proske, Revised comparison of tunnel collapse frequencies and tunnel failure probabilities, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 7(2) (2021) 04021004.

[27] Q. Qian, P. Lin, Safety risk management of underground engineering in China: Progress, challenges and strategies, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(4) (2016) 423-442.

[28] G.-H. Zhang, Y.-Y. Jiao, L.-B. Chen, H. Wang, S.-C. Li, Analytical model for assessing collapse risk during mountain tunnel construction, Canadian Geotechnical Journal, 53(2) (2015) 326-342.

[29] G.-Z. Ou, Y.-Y. Jiao, G.-H. Zhang, J.-P. Zou, F. Tan, W.-S. Zhang, Collapse risk assessment of deep-buried tunnel

[40] T.-j. Liu, S.-w. Chen, H.-y. Liu, Deformation characterisation and distress diagnosis of a metro shield tunnel by adjacent constructions, Advances in Civil Engineering, 2020 (2020).

[41] J. Wang, X. Zeng, J. Zhou, Practices on rockburst prevention and control in headrace tunnels of Jinping II hydropower station, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 4(3) (2012) 258-268.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Javadi, F. Mohammadi, R. Rafiee, Evaluation of Effective Factors on Tunnel Instability Through Statistical Approach, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 185-200.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21540.7757