Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Evaluation of rock burst phenomenon in tunnel sites using experimental and semi-experimental methods – A case study: Haji-Abad tunnel in Hormozgan province

Behrooz Margan[1], Davood Fereidooni[2] ✉

1. Master of Science, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran. E-mail: b.mnoor110@gmail.com
2. Associate Professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran. E-mail: d.fereidooni@du.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 31 January 2024
Received in revised form 09 April 2024
Accepted 19 May 2024

Keywords:
Haji-Abad tunnel, Rock burst, Squeezing, experimental and semi-experimental methods.

ABSTRACT

In this research, various aspects of the rock burst phenomenon in the Haji-Abad tunnel site in the Hormozgan province have been discussed. Considering that the tunnel site is located in an active tectonized environment in terms of geological conditions and the depth of the tunnel in some parts reaches more than 100 to 253 m, and also considering the variety of rocks in the tunnel site, which are massive rocks with high strength up to broken fault zones, the importance of studying and investigating the phenomenon of rock burst is very important for the safety of the labor force and equipment and the stability of the underground space. For this purpose, the Haji-Abad tunnel site has been divided into ten units in terms of engineering geological conditions using the BGD method, which includes eight units T1 to T8 and two crashed zones Tf1 and Tf2. Then, using common experimental and semi-experimental methods, the phenomenon of rock burst in the tunnel site has been evaluated. In the experimental method, Goel et al.'s criterion was used, according to which rock burst phenomenon does not occur in any of the tunnel units. Using semi-empirical methods, including the criterion of linear elastic energy of the tunnel site units in the range of very low to moderate rock burst phenomena and using the tangential stress criterion, the site units in the medium to very high range and based on the stress criteria of these units in the moderate to high range and finally, using the fragility criterion, all site units are placed in the range of high rock burst.

Introduction

One of the most common phenomena in deep and shallow tunnels with directional stress regime is rock burst. Despite many studies on this phenomenon, there are still many unclear points that make rock burst still because a lot of life and financial loss to projects. In this phenomenon, the sudden exit of the rock from the boundary of the excavation environment takes place, and this point distinguishes this phenomenon from other phenomena such as crushing, large displacements, and falls. Tunneling at great depths involves special conditions and unique phenomena that do not exist in shallow tunnels. For example, gravity stresses are very high and horizontal stresses are strongly influenced by geological structures such as faults, folds, dykes and other structures. In this situation, when the rock is removed from the enclosed state by excavation an underground space, the stability of the excavated space is seriously threatened and the background for phenomena such as the rock burst is prepared. Rock fracturing involves the appearance and expansion of fractures on a microscopic scale that generate seismic waves. These fractures eventually lead to instability on a macroscopic scale. Also, rocks that have a high, or in other words, cannot dissipate the energy put into them by cracking or elastic displacement or plastic

Cite this article: Margan, B., & Fereidooni, D. (2024). Evaluation of rock burst phenomenon in tunnel sites using experimental and semi-experimental methods – A case study: Haji-Abad tunnel in Hormozgan province. Journal of Engineering Geology, 18 (1), 71-88. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.101185

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.101185

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

softening or hardening, have a high tendency to burst. Rock fractures occur immediately after drilling to several days later. This phenomenon occurs in areas of depth and high stress and in hard rock. It also occurs in weak rocks, such as coal, and at shallow depths with high horizontal stresses. This phenomenon also occurs in environments with high stress anisotropy.

Methodology

In order to carry out this research, desk studies were carried out to examine the information available in books and papers related to the subject of the research and to collect the necessary information for the research. In order to separate the engineering geological units from the entrance portal to the exit of the Haji-Abad tunnel based on field studies, the BGD classification was used. The purpose of this classification is to provide a simple way of dividing the rocks forming the tunnel route into different engineering geological units. The physical and mechanical properties of the tunnel rock were determined by physical tests, uniaxial compressive strength and triaxial compressive strength on samples taken from the site borehole. The occurrence of rock failure was assessed using two experimental and semi-experimental methods, depending on the type of rock at the site, the depth of the tunnel and the thickness of the overburden.

Results and discussion

The rock burst phenomenon at the Haji-Abad tunnel site was evaluated using two experimental and semi-experimental methods. In the experimental method, using the criteria of Goel et al., none of the tunnel units have the potential of rock burst phenomenon. According to the results of this method, this criterion is not very accurate in evaluating the rock burst phenomenon. Semi-empirical methods are more accurate because they take into account the thickness of the overburden, the strength of the rock mass and the strain in the tunnel wall. Considering that the route of the Haji-Abad tunnel is located in a tectonically active zone, there is a potential for rock burst in the tunnel site units. In this study, the rock burst phenomenon is based on common semi-empirical methods such as the linear elastic energy criterion of tunnel units in very low to medium explosion potential. According to the standard of tangential stress, the tunnel units are in the category of moderate to very high rock burst, and according to the stress criteria, the ten units of the tunnel site are in the moderate to high category, and according to the brittleness criterion, all the tunnel units are in the high rock burst category.

Conclusions

The rock burst phenomenon at the Haji-Abad tunnel site has been evaluated using two experimental and semi-experimental methods. In the first method, using the criteria of Goel et al., none of the tunnel units have the potential of rock burst phenomenon. They have higher accuracy with semi-empirical methods. Based on semi-experimental methods, there is a potential for rock burst in the tunnel site units.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

ارزیابی وقوع پدیده انفجار سنگ در ساختگاه تونل‌ها با روش‌های تجربی و نیمه تجربی – مطالعه موردی: تونل حاجی‌آباد در استان هرمزگان

بهروز مرگان[۱]، داود فریدونی[۲] ✉

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: b.mnoor110@gmail.com
۲. دانشیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: d.fereidooni@du.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

کلیدواژه‌ها:
تونل حاجی‌آباد، انفجار سنگ، لهیدگی، روش‌های تجربی و نیمه تجربی.

چکیده

در این پژوهش به جنبه‌های مختلف پدیده انفجار سنگ در ساختگاه تونل حاجی‌آباد در استان هرمزگان پرداخته شده است. با توجه به اینکه ساختگاه این تونل از نظر شرایط زمین‌شناسی در یک محیط تکتونیزه فعال قرار گرفته و دارای سنگ‌های توده‌ای با استقامت بالا تا زون‌های گسلی خردشده است و نیز عمق قرارگیری تونل در بعضی از قسمت‌ها به بیش از ۱۰۰ تا ۲۵۳ متر می‌رسد، اهمیت مطالعه و بررسی پدیده انفجار سنگ برای ایمنی جان نیروی کار و تجهیزات و پایداری این تونل بسیار مهم می‌باشد. بدین منظور، ابتدا ساختگاه تونل حاجی‌آباد از لحاظ شرایط زمین‌شناسی مهندسی با استفاده از روش توصیف ژئوتکنیکی مبنا (BGD) به ده واحد تقسیم شده است که شامل هشت واحد T1 تا T8 و دو زون خورد شده Tf1 و Tf2 است. سپس با استفاده از روش‌های تجربی و نیمه تجربی متداول، پدیده انفجار سنگ در ساختگاه تونل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در روش تجربی از معیار گوئل و همکاران استفاده شده است که بر اساس آن در هیچ‌یک از واحدهای تونل پدیده انفجار سنگ رخ نمی‌دهد. با استفاده از روش‌های نیمه تجربی شامل معیار انرژی الاستیک خطی واحدهای ساختگاه تونل در محدوده پدیده انفجار خیلی کم تا متوسط و با استفاده از معیار تنش مماسی، واحدهای ساختگاه در محدوده متوسط تا خیلی شدید و بر اساس معیار تنش‌ها این واحدها در محدوده متوسط تا شدید و در نهایت با استفاده از معیار تردی تمام واحدهای ساختگاه در محدوده انفجار شدید قرار می‌گیرند.

مقدمه

از پدیده‌های متداول در تونل‌های عمیق و کم عمق با رژیم تنش غیریکنواخت، انفجار سنگ است. با وجود مطالعات فراوان در مورد این پدیده، هنوز نقاط مبهم زیادی وجود دارد که باعث می‌شود انفجار سنگ هنوز هم ضررهای جانی و مالی زیادی به پروژه‌ها تحمیل کند. در این پدیده حرکت ناگهانی سنگ از مرز محیط حفاری صورت می‌گیرد و این نکته این پدیده را از پدیده‌های دیگر مانند لهیدگی، جابه‌جایی‌های بزرگ و ریزش‌ها متمایز می‌کند. تونل سازی در اعماق زیاد شرایط خاص و پدیده‌های منحصر به فردی را همراه دارد که در تونل‌های کم عمق وجود ندارند. برای مثال تنش‌های ثقلی عدد بسیار بالایی دارند و تنش‌های افقی به شدت تحت تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی مثل گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، دایک‌ها و سایر ساختارها هستند. در این شرایط وقتی سنگ توسط حفاری یک فضای زیرزمینی از حالت محصور خارج می‌شود، پایداری فضای حفاری شده به شدت به خطر می‌افتد و پیش زمینه پدیده‌هایی مثل انفجار سنگ مهیا می‌شود. انفجار سنگ شامل ظهور و گسترش شکستگی‌ها در مقیاس

استناد: مرگان، ب.، فریدونی، د. (۱۴۰۳). ارزیابی وقوع پدیده انفجار سنگ در ساختگاه تونل‌ها با روش‌های تجربی و نیمه تجربی - مطالعه موردی: تونل حاجی‌آباد در استان هرمزگان. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۱)، ۸۸-۷۱. https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.101185

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

میکروسکوپی است که تولیدکننده امواج لرزه‌ای هستند. این شکستگی‌ها در نهایت به ناپایداری در مقیاس ماکروسکوپی منجر می‌شوند. همچنین سنگ‌هایی تمایل زیاد به انفجار دارند که تردی و شکنندگی زیادی داشته باشند یا به عبارت دیگر نتوانند انرژی وارد شده به خود را با ایجاد ترک یا جابه‌جایی الاستیک یا پلاستیک نرم شونده یا سخت شونده تخلیه کنند. انفجار سنگ بلافاصله بعد از حفاری تا چندین روز بعد از آن رخ می‌دهد. این پدیده در مناطقی با عمق و تنش بالا و در سنگ‌های سخت رخ می‌دهد. علاوه بر این پدیده در سنگ‌های ضعیف مانند زغال‌سنگ و اعماق کم با تنش‌های افقی زیاد اتفاق می‌افتد. این پدیده همچنین در محیط‌های با ناهمسانگردی تنش بالا رخ می‌دهد.

اولین انفجار سنگ گزارش شده، در قرن ۱۸میلادی در معادن هند بود. ولی قبل از سال ۱۹۳۸ که در معادن زغال بریتانیا این پدیده رایج شد، که کمتر مطالعاتی انجام شده است (Wang and Park, 2001). در برخی منابع پدیده انفجار سنگ برای اولین بار در دهه اول قرن بیستم در معادن عمیق آفریقای جنوبی نظر مهندسین و محققین را به خود جلب کرده است. انفجار سنگ نوعی رویداد لرزه‌ای القاء شده توسط حفاری فضای زیرزمینی است و می‌تواند باعث آسیب جدی به افراد و تجهیزات و ناپایداری فضای زیرزمینی شود. ناپایداری‌ها به صورت ریزش پوسته‌پوسته شدن، ورقه ورقه شدن و پرتاب قطعات ریز و درشت مشاهده می‌شوند (Brauner, 1994). محل رویداد لرزه‌ای می‌تواند در همان محل ترکیدن سنگ یا در فاصله دوری از آن قرار داشته باشد (Kabwe and Wang, 2015). محققین کانادایی در تحقیقات خود در این مورد، انفجار سنگ را آسیبی به حفاری می‌دانند که سریع و ناگهانی اتفاق می‌افتد و با یک رویداد لرزه‌ای مرتبط است (Kaiser, 1996). امروزه کاملاً مشخص است که رویداد لرزه‌ای معلول شکست یا لغزش توده سنگ است که مقدار بالایی لرزش را از منشأ خود منتشر می‌کند، این رویدادهای لرزه‌ای بسته به مکانیزم منشأ خود می‌توانند از صفر تا ۵ ریشتر بزرگی داشته باشند (Ortlepp, 2001). انفجار سنگ بیشتر از هر چیز با دو تعریف شکست ترد و شکست پیشرونده مرتبط است. شکست ترد نوعی شکست رایج در مصالح شکننده است که در حین آن انرژی کرنشی ماده مورد نظر به شدت افت می‌کند. در این نوع شکست معمولاً کرنش پلاستیک بسیار کمی قبل از گسیختگی مشاهده می‌شود. شکست پیشرونده نوعی شکست است که در آن تا زمانی که هندسه جدید ماده به حالت تعادل نرسد، شکستگی و آسیب ادامه می‌یابد. در نتیجه این نوع شکست وابسته به زمان می‌باشد. با افزایش عمق، میدان تنش مقادیر بالایی به خود می‌گیرد. مقادیر تنش‌های برجای بالا، درنتیجه پدیده‌های مختلف مانند حفاری، در محل‌های متفاوتی متمرکز می‌شوند. درنتیجه در نقاط خاصی، مقادیر تنش‌ها حتی بیشتر از سطح تنش برجا می‌شود. این سطح بسیار بالای تنش باعث ایجاد شکستی می‌شود که خود یک منشأ لرزه‌ای خواهد بود. عبور امواج دینامیکی تنش در نتیجه شکستگی در توده سنگ، یک رویداد لرزه‌ای است. در واقع رویداد لرزه‌ای، لرزه‌های ناشی از شکست سنگ می‌باشد و لرزش پاسخ طبیعی توده سنگ به تغییر شکل‌ها و شکستگی‌ها است. انفجار سنگ حاصل بالا رفتن تنش در اطراف فضای حفاری شده است. توزیع دوباره تنش حاصل از فعالیت‌های حفاری باعث می‌شود که در نقاطی تمرکز تنش پدید آید. از طرف دیگر، کاهش مقاومت سنگ با زمان و از دست رفتن محصورشدگی می‌تواند ظرفیت باربری توده سنگ را کاهش دهد. این موارد می‌توانند باعث کمتر شدن مقاومت سنگ از تنش متمرکز شده و در نهایت در سنگ شکست اتفاق بیفتد. از دست رفتن پایداری ساختاری در سنگ مانند کمانش نیز می‌تواند به عنوان یک عامل مستقل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

از مقاومت توده سنگ، باعث انفجار سنگ شود (Kabwe and Wang, 2015).

یکی از خصوصیات انفجار سنگ، پرتاب سنگ با سرعت قابل توجه است. تا به حال مطالعات زیادی روی سرعت پرتاب قطعات سنگ صورت نگرفته است ولی محاسبات نشان می‌دهد که قطعات سنگ می‌توانند سرعتی تا چندین متر بر ثانیه داشته باشد. این باور وجود دارد که قطعات کوچک‌تر که به صورت ناحیه‌ای توسط کمانش خارج می‌شوند می‌تواند تا ده‌ها متر بر ثانیه سرعت داشته باشد (Ortlepp, 2001). به طور کلی انفجار سنگ در سه دسته رده‌بندی می‌شود که عبارت‌اند از:

۱) انفجار کرنشی: این حالت که حاصل تمرکز تنش بسیار زیاد در اطراف فضای حفاری است، هم ممکن است تکه سنگ‌های بسیار کوچک از محیط حفاری خارج شوند و هم ممکن است کل یک دیواره یا سقف ریزش کند. درواقع دهانه فضای حفاری به دنبال رسیدن به شکل پایدار می‌باشد.

۲) انفجار پایه و ستون‌ها: در این حالت ممکن است هزاران تن سنگ وارد دهانه حفاری شود. این نوع انفجار سنگ معمولاً در مناطق به شدت معدن کاری شده رخ می‌دهد.

۳) انفجار بر اثر لغزش گسل: این حالت زمانی رخ می‌دهد که در یک صفحه ضعیف زمین‌شناسی، لغزش اتفاق بیفتد. مکانیزم این نوع انفجار سنگ مشابه زلزله است (Kabwe and Wang, 2015).

مفاهیم کلی نظریه توزیع دوباره تنش در اطراف دهانه حفاری بیان می‌کند که با تغییر شکل و ایجاد شکستگی‌ها، اوج تنش به سمت داخل توده سنگ حرکت می‌کند (Palmström, 1995). این پدیده خطرهای بسیار زیادی را برای تونل سازان به همراه دارد. در بسیاری از گزارش‌ها بیان شده است که این پدیده در تونل‌ها و چاه‌های اجراشده با ماشین‌های حفاری، به نسبت فضاهای حفرشده توسط روش چال زنی و آتش‌کاری، بیشتر مشاهده می‌شود. اورتلپ و استیسی (Ortlepp and Stacey, 1994) در مطالعات گسترده خود، مکانیزم‌های آسیب را مطابق آنچه در ادامه آمده است، دسته‌بندی کرده‌اند که عبارت‌اند از:

۱) انفجار کرنشی: در این نوع مکانیزم قطعات سنگ، معمولاً ورقه‌های نازک بسیار تیزی هستند که با سرعت به صورت موضعی به بیرون پرتاب می‌شوند. به دلیل لبه‌های تیز و خروج این قطعات با سرعت بالا، این مکانیزم خیلی خطرناک است. همچنین این قطعات می‌توانند بزرگ نیز باشند. محل این مکانیزم در اطراف فضای حفاری، می‌تواند تابع جهت‌گیری تنش‌های برجا و هندسه مقطع، متغیر باشد. با توجه به مطالعات اورتلپ، این مکانیزم در راستای محور تونل می‌تواند در فاصله نصف قطر تونل تا سه برابر قطر تونل از سینه کار اتفاق بیفتد. همچنین این مکانیزم می‌تواند در سینه کار نیز اتفاق افتد.

۲) کمانش: این نوع مکانیزم بیشتر در محیط‌های لایه‌بندی شده و به صورت طولی ناهمسانگرد شایع است. البته کمانش لزوماً در دیوارها رخ نمی‌دهد، بلکه در تمام محیط فضای حفاری اگر شرایط مهیا باشد رخ می‌دهد. انرژی منشأ برای این مکانیزم معمولاً از انرژی کرنشی ذخیره شده در صفحات تحت کمانش حاصل می‌شود، اگرچه انرژی اضافه ممکن است از مؤلفه‌های برشی و فشاری موج رویداد لرزه‌ای که از نقاط نزدیک و دور درحرکت هستند، منتقل شود.

۳) خروج سنگ: این نوع مکانیزم مربوط به خروج ناگهانی سنگ از دیواره، کف یا سقف تونل در راستای موج انرژی لرزش در مسیر تونل می‌باشد. حرکت و شکل بلوک خارج شده، تحت تأثیر درزه و شکستگی‌های القایی در محیط دهانه حفاری است. منشأ انرژی این مکانیزم، رویداد لرزه‌ای است که شاید در فاصله دوری اتفاق افتاده باشند و محل این پدیده و محل منشأ انرژی آن یکسان نیست. شدت این مکانیزم،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

تابع رویداد لرزه‌ای و فاصله آن با فضای حفاری است. پیش‌بینی می‌شود در این مکانیزم، سرعت خروج سنگ حدود ۱۰ متر در ثانیه باشد.

۴) ریزش قوس: ریزش قوس، معمولاً به صورت یک مکانیزم انفجار سنگ بیان می‌شود و احتمالاً زیر مجموعه مکانیزم خروج ناگهانی سنگ است. این امر باعث تسهیل حرکت‌های جنبشی بلوک‌ها و گوه‌های سنگی تحت نیروی جاذبه می‌شود. رویداد لرزه‌ای می‌تواند به عنوان یک کمک دهنده که شتاب کوچکی القا می‌کند تا بر مقاومت برشی سطوح غلبه شود، عمل کند.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای برای تحلیل و طبقه‌بندی و پیش‌بینی شدت وقوع انفجار سنگ انجام شده است. عوامل متعددی در پدیده انفجار سنگ مؤثر هستند که از جمله این عوامل می‌توان به انرژی کرنشی، نحوه طراحی حفاری‌های زیرزمینی، وضعیت زمین‌شناسی و خصوصیات فیزیکی اشاره کرد. سنگ قبل از گسیختگی می‌تواند مقدار زیادی انرژی کرنشی را در خود ذخیره کند، هر چه مقدار این انرژی بیشتر باشد احتمال انفجار سنگ بیشتر خواهد بود. بنابراین مقدار انرژی کرنشی ذخیره شده در سنگ تعیین کننده شدت وقوع انفجار است (Kwasniewski et al., 1994). طراحی نامناسب و نادرست، به افزایش پتانسیل انفجار سنگ در فضاهای زیرزمینی کمک می‌کند. حفر هم‌زمان چند تونل در یک منطقه، آتش‌کاری و ساختارهای زیرزمینی که هر یک به نوعی باعث ایجاد تمرکز تنش در نزدیکی فضای زیرزمینی خواهند شد، محل مناسبی برای ایجاد انفجار سنگ است که در صورت درست بودن طراحی پتانسیل انفجار سنگ کاهش می‌یابد. گسل‌ها، دایک‌ها و فاصله‌داری درزه‌ها علاوه بر ایجاد ضعف در سازه‌های زیرزمینی سبب افزایش پدیده انفجار در اطراف خود می‌شوند. تردی و سایر ویژگی‌های مرتبط با انفجار سنگ می‌تواند توسط پترولوژی سنگ و اندازه کریستال‌ها بیان شود به طوری که سنگ‌های دگرگونی و آذرین نسبت به سنگ‌های رسوبی، پتانسیل بیشتری برای انفجار دارند و همچنین با کاهش میزان بزرگی دانه‌ها و حرکت از اندازه دانه درشت تا میکروکریستال سنگ پتانسیل بیشتری برای انفجار پیدا می‌کند. هیراتا و همکاران (Hirata et al.,1991) بر روی رابطه بین تنش سنگ‌های محیط و میزان انتشار صوت در محل‌های انفجار سنگ، مطالعاتی انجام دادند. واسنیوسکی و همکاران (Kwasniewski et al., 1994) پیشنهاد دادند که وقوع انفجار سنگ می‌تواند توسط انرژی پتانسیل (الاستیک) که در واقع انرژی کرنشی ذخیره شده در واحد حجم توده سنگ در آزمایش بارگذاری (PES) کرنش تک محوره در مرحله قبل از مقاومت نهایی است، مرتبط باشد. این معیار تجربی در معادن مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و بازه‌های عددی آن مشخص شد. اورتلپ و استیسی (Ortlepp and Stacey, 1994) با مطالعه و بررسی، اقدام به دسته‌بندی مکانیزم‌های مختلف منشأ و آسیب انفجار سنگ کردند. دیو و همکاران (Du et al., 2016) اقدام به بررسی عددی تأثیر امواج دینامیکی بر روی وقوع انفجار سنگ، در یک فضای زیرزمینی کردند. آن‌ها نشان دادند که تونلی که در اعماق مختلف و تحت تنش‌های عمودی و افقی متفاوت، پایدار است می‌تواند به راحتی توسط یک موج دینامیکی با دامنه و مدت زمان مشخص و رایج در معادن، دچار انفجار سنگ و ناپایداری شود. کولی و همکاران (Coli et al., 2010) پدیده انفجار سنگ در معدن مرمر کارارا در ایتالیا را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با همکاری پروفسور هه از دانشگاهی در چین، نمونه‌ها را در آزمون سه محوره مخصوص انفجار سنگ، آزمایش کردند. نتیجه این آزمایش‌ها نشان داد که تعداد و دامنه انتشارهای صوتی (AE) در نزدیکی لحظه انفجار به شدت زیاد می‌شوند و پس از آن نمونه غیر قابل کنترل است. خانلری و میبدی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

(Khanlari and Meybodi, 2013) پتانسیل انفجار سنگ در بخش دوم تونل آبرسانی تهران-کرج را با استفاده از روش‌های تجربی ارزیابی کردند. حاصل تحقیقات آن‌ها نشان داد که چهار روش تجربی رایج می‌تواند پراکندگی جواب بسیار فاحشی داشته باشند. کابو و وانگ (Kabwe and Wang, 2015) مطالعه اجمالی بر روی تئوری‌های انفجار سنگ و انواع سیستم‌های نگهداری مورد استفاده در معادن با شروع انفجار سنگ انجام دادند. آن‌ها تأکید کردند که هر رویداد لرزه‌ای انفجار سنگ نیست، درواقع پدیده‌های لرزه‌ای بسیار رایج هستند و حاصل به وجود آمدن درزه‌ها در پاسخ سنگ به حفاری و بارگذاری دوباره هستند ولی ذات ناگهانی و غیر قابل کنترل بودن انفجار سنگ مرز تشخیص این دو نوع پدیده است.

روش‌های برآورد انفجار سنگ و راهکارهای کاستن شدت آن

امروزه روش‌های متعدی برای ارزیابی و تخمین شدت پدیده انفجار سنگ وجود دارد که شامل روش‌های تجربی و نیمه تجربی و عددی است. در این پژوهش از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های نیمه تجربی و تجربی پدیده انفجار سنگ استفاده شده است که در زیر به طور مختصر به آن‌ها اشاره شده است.

معیارهای نیمه تجربی

معیار انرژی الاستیک خطی (Wang and Park, 2001)

طبق نتایج تحقیقات واسنیوسکی و همکاران (Kwasniewski et al., 1994) وقوع پدیده انفجار سنگ را می‌توان با توجه به میزان انرژی کرنشی در واحد حجم سنگ طبق رابطه ۱ محاسبه و بر اساس میزان شدت مقدار آن بر اساس جدول ۱ تعیین می‌شود.

$$PES = \frac{\sigma_C^2}{2E} \qquad (۱)$$

در این رابطه، PES انرژی کرنشی (kJ/m^3)، σ_C مقاومت فشاری تک محوری (MPa) و E مدول الاستسیته (GPa) سنگ می‌باشند.

جدول ۱. مقدار شدت انفجار سنگ بر اساس معیار تردی

Table 1. The value of rock burst intensity based on brittleness criterion

a	>40	26.7-40	14.5-26.7	<14.5
شدت انفجار سنگ	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید

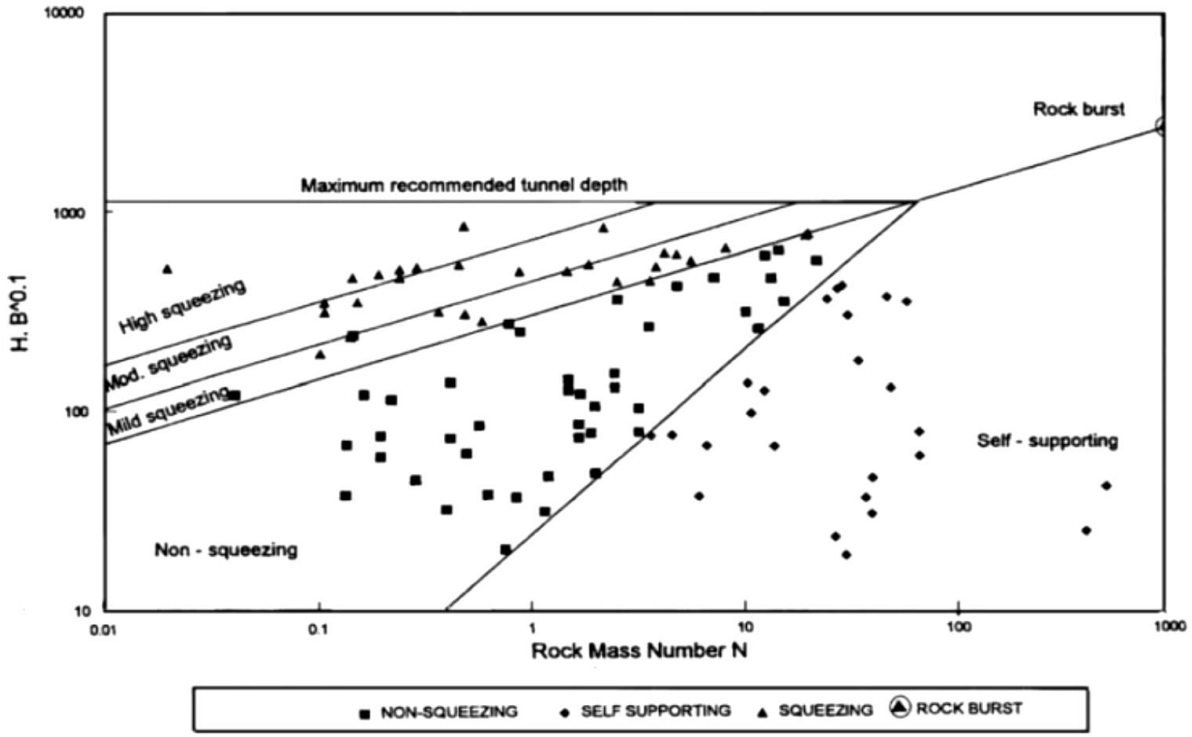
معیار تجربی گوئل و همکاران (Goel et al., 1995)

این معیار به صورت رابطه ۵ تعریف شده است و بر اساس شکل ۱ در این معیار شرایط زمین از نظر وضعیت پایداری تونل تخمین زده می‌شود (Goel et al., 1995).

$$N = Q \times SRF \qquad (۲)$$

در این رابطه، Q شاخص کیفیت تونل‌زنی سنگ و SRF ضریب کاهش تنش می‌باشند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]



شکل ۱. پیش‌بینی شرایط زمین (Goel et al., 1995) (H عمق تونل و B عرض تونل می‌باشند.)

Fig. 1. Prediction of ground conditions (Goel et al., 1995) (H is tunnel depth and B is tunnel width.)

موقعیت جغرافیایی و جایگاه زمین‌شناسی تونل حاجی‌آباد

منطقه احداث تونل حاجی‌آباد در استان هرمزگان و در ۴ کیلومتری غرب شهر حاجی‌آباد با حداکثر ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد و در مسیر طرح خط انتقال آب خلیج فارس به صنایع و معادن جنوب شرق کشور قرار دارد. مختصات نقطه شروع X=۳۸۷۱۹۴ و Y=۳۱۳۱۸۰۱ و نقطه انتهایی با مختصات X=۳۸۶۲۱۸ و Y=۳۱۳۵۳۳۱ به طول ۴۳۱۲ متر و با حداکثر تراز ارتفاعی ۱۲۳۵ متر از سطح دریا به عنوان مبانی طرح محسوب می‌شود. دسترسی به موقعیت تونل از طریق شبکه جاده‌های اصلی و فرعی در محدوده شهر حاجی‌آباد و جاده اصلی بندرعباس به حاجی‌آباد و سیرجان امکان‌پذیر است.

از نظر شرایط زمین‌شناسی، منطقه احداث تونل حاجی‌آباد در ناحیه ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است. تونل مورد بررسی و ترانشه‌های ورودی و خروجی آن در این زون و محدوده فرورانش صفحه عربی واقع شده است، لذا توده‌های فلیشی، سنگ‌های دگرگونی، توده‌های افیولیتی و سنگ‌آهک‌های این زون حضور دارند. ضمن اینکه در این زون به هم ریختگی ساختاری شدیدی نیز وجود دارد. لیتولوژی ساختگاه تونل حاجی‌آباد شامل واحدهای زیر است (Margan, 2018):

۱- افیولیت‌های زمین‌درز زاگرس: پرتال ورودی تونل در کیلومتر ۱+۵۰۰ در میان این واحد قرار دارد. اگرچه سطح زمین در محدوده پرتال ورودی پوشیده از واریزه‌های دامنه‌ای است، رخنمون‌هایی از این واحد در سطح زمین و در اطراف ساختگاه تونل دیده می‌شود. واحد مذکور تا کیلومتر ۲+۱۷۵

ادامه دارد. عملکرد گسل‌ها واحدهای فیلشی این واحد را به دو بخش تقسیم کرده است. بخش ابتدایی از دهانه ورودی تا کیلومتر ۱+۵۵۷ و بخش دوم از کیلومتر ۱+۶۸۳ تا ۲+۱۷۵ گسترش دارد. واحد مذکور عمدتاً از سرپانتینیت‌هایی تشکیل شده که در بخش‌های مختلف ۴ تا ۵ دسته درزه در آن قابل برداشت است و در سطح نسبتاً هوازده شده است. مقاومت فشاری این واحد بر اساس ضربات چکش اشمیت کمتر از ۲۰ مگاپاسکال تعیین شده است.

۲- فلیش‌های ترشیاری: در بخش‌هایی از مسیر تونل فلیش‌ها وجود دارند. این واحد را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول از کیلومتر ۱+۵۵۷ تا ۱+۵۸۷ به طول حدود ۳۰ متر می‌باشد. این واحد از سنگ‌آهک ماسه‌ای تشکیل شده است. و دچار خردشدگی شده و سپس جوش خورده است. مقاومت فشاری این واحد بر اساس ضربات چکش اشمیت ۶۰ تا ۸۰ مگاپاسکال تعیین شده است. بخش دوم از کیلومتر ۱+۵۸۷ تا ۱+۶۸۳ به طول ۹۶ متر از سنگ‌آهک توده‌ای با مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال تشکیل شده است. این واحد چندین دسته درزه با فاصله‌داری قابل توجهی دارد.

۳- زون خردشده: از کیلومتر ۲+۱۷۵ تا ۲+۲۳۷ به طول ۶۲ متر مسیر از میان یک راندگی عبور می‌کند که زون خردشده‌ای را ایجاد کرده است. آثار این راندگی را می‌توان به صورت زونی خردشده در سطح زمین مشاهده کرد. سنگ‌آهک خردشده و سرپانتینیت‌های تکتونیزه از آثار این گسل و زون خردشده می‌باشد. با توجه به ضخامت روباره قابل توجه این بخش احتمالاً ضعیف‌ترین و پر مخاطره‌ترین زون در مسیر گسل می‌باشد.

۴- سنگ‌آهک اربیتولینادار: سنگ‌آهک اربیتولینادار از کیلومتر ۲+۲۳۷ تا ۲+۹۷۱ به طول ۷۳۴ متر بخش قابل توجهی از طول تونل را تشکیل داده است. مطالعات صحرایی مسیر تونل نشان از چین‌خوردگی این واحد در طول تونل دارد. مقاومت فشاری این واحد بر اساس ضربات چکش اشمیت ۸۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال تعیین می‌شود. این واحد ۳ تا ۴ دسته درزه دارد و در بخش‌هایی دچار خردشدگی است. همان‌طور که گفته شد ممکن است در بخش‌هایی نفوذ توده‌های آذرین در این واحد رخ داده باشد.

۵- زون خردشده ۲: از کیلومتر ۲+۹۷۱ تا ۲+۹۸۷ به طول ۱۶ متر مسیر از میان یک زون خردشده عبور می‌کند.

۶- سنگ‌آهک توده‌ای: این واحد آهکی ستیغ‌ساز در بخش انتهایی مسیر تونل از کیلومتر ۲+۹۸۷ تا ۳+۰۶۸ گسترش دارد و شامل آهک‌های توده‌ای با مقاومت بسیار بالایی می‌باشد که به نظر می‌رسد توسط عملکرد گسل‌های منطقه ستیغ مشاهده شده در خروجی تونل را تشکیل داده است. این واحد نیز یکی از مقاوم‌ترین واحدهای سنگی مسیر تونل خواهد بود.

روش تحقیق

برای انجام این پژوهش در طی مطالعات کتابخانه‌ای اطلاعات موجود در کتب و مقالات مرتبط با موضوع تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت و اطلاعات لازم برای تحقیق جمع‌آوری گردید. به منظور تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی بر مبنای مطالعات صحرایی از پرتال ورودی تا خروجی تونل حاجی‌آباد، از طبقه‌بندی توصیف ژئوتکنیکی مبنا (BGD[1]) استفاده شده است. هدف از این طبقه‌بندی، تفکیک سنگ‌های تشکیل دهنده مسیر تونل به شیوه‌ای ساده به واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مختلف می‌باشد. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ساختگاه تونل از آزمون‌های فیزیکی، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت فشاری سه محوری بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه حفاری شده ساختگاه انجام شده است. با توجه به جنس توده سنگ

1. Basic Geotechnical Description

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

ساختگاه و عمق تونل و ضخامت روباره آن ارزیابی وقوع پدیده انفجار سنگ با استفاده از دو روش تجربی و نیمه تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه تونل حاجی‌آباد

مطالعات صحرایی نشان می‌دهند که از پرتال ورودی تا خروجی تونل، علاوه بر تغییر در جنس لایه‌ها، تغییر در خصوصیات ساختمانی واحدهای تشکیل‌دهنده مسیر تونل نیز وجود دارد و همین موضوع سبب تشکیل واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی در مسیر آن شده است. به منظور تفکیک واحدهای زمین‌شناسی از طبقه‌بندی BGD که توسط ISRM (1981) توصیه شده استفاده شد. رده-بندی بر اساس موارد زیر صورت می‌گیرد:

۱) نام سنگ با توصیف زمین‌شناسی ساده‌ای از ساختمان، بافت، رنگ و درجه هوازدگی. ۲) خصوصیات ساختاری سنگ شامل ضخامت لایه‌ها و فاصله‌داری درزه‌ها. ۳) خصوصیات مکانیکی سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و زاویه اصطکاک سطح درزه‌ها. در جدول ۲ خلاصه طبقه‌بندی مورد استفاده ارائه شده است. بر این اساس محدوده تونل به ۱۰ بخش مجزا تفکیک شده که در جدول ۳ نام‌گذاری این بخش‌ها بر اساس طبقه‌بندی BGD ارائه شده است.

جدول ۲. خلاصه روش طبقه‌بندی توده سنگ به روش BGD (ISRM, 1981)

Table 2. A summary of rock mass classification based on BGD method (ISRM, 1981)

Layer thickness			**Fracturing intercept**		
Intervals (cm)	Symbols	Descriptive terms	Intervals (cm)	Symbols	**Descriptive terms**
>200	L_1	Very large	>200	F_1	Very wide
	$L_{1.2}$	Large		$F_{1.2}$	Wide
200-60	L_2	Large	200-60	F_2	Wide
60-20	L_3	Moderate	60-20	F_3	Moderate
20-6	L_4	Small	20-6	F_4	Close
	$L_{4.5}$	Small		$F_{4.5}$	Close
<6	L_5	Very small	<6	F_5	Very close
Angle of joint friction			**Uniaxial compressive strength**		
Intervals (cm)	Symbols	Descriptive terms	Intervals (cm)	Symbols	**Descriptive terms**
>45	A_1	Very high	>200	S_1	Very high
	$A_{1.2}$	High		$S_{1.2}$	High
45-35	A_2	High	200-60	S_2	High
35-25	A_3	Moderate	60-20	S_3	Moderate
25-15	A_4	Low	20-6	S_4	Low
	$A_{4.5}$	Low		$S_{4.5}$	Low
<15	A_5	Very low	<6	S_5	Very low

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

جدول ۳. تفکیک واحدهای زمین‌شناسی در طول تونل حاجی‌آباد بر اساس طبقه‌بندی BGD (ISRM, 1981)

Table 3. Separating the geological units along the Haji-Abad tunnel based on BGD classification (ISRM, 1981)

ردیف	سنگ‌شناسی	رده زمین‌شناسی مهندسی	مشخصه اصلی	طبقه‌بندی BGD
1	سرپانتینیت	T_1	خردشدگی و چندین دسته درزه	Serpentinite, $I_3, F_{2,3}, S_{4,5}, A_4$
2	سنگ‌آهک ماسه‌ای	T_2	خردشدگی	Sandy limestone, $I_2, F_{2,3}, S_2, A_2$
3	سنگ‌آهک توده‌ای	T_3	توده‌ای و مقاوم	Massive limestone, I_1, F_1, S_2, A_2
4	سرپانتینیت	T_4	خردشدگی	Serpentinite, $I_3, F_{3,4}, S_{4,5}, A_4$
5	زون خرد شده	T_{f1}	تکتونیزه	Fracture zone, I_5, F_5, S_4, A_4
6	سنگ‌آهک	T_5	چین‌خوردگی	limestone, I_3, F_3, S_2, A_2
7	سنگ‌آهک	T_6	چین‌خوردگی	limestone, I_3, F_2, S_2, A_2
8	سنگ‌آهک	T_7	چین‌خوردگی	limestone, I_3, F_3, S_2, A_2
9	زون خرد شده	T_{f2}	تکنونیزه	Fracture zone, I_5, F_5, S_4, A_4
10	سنگ‌آهک توده‌ای	T_8	توده‌ای مقاوم	Massive limestone, I_1, F_1, S_2, A_2

نتایج و بحث

پارامترهای مهندسی سنگ

در این پژوهش، با استفاده از آزمایش‌های تعیین دانسیته، مقاومت فشاری تک‌محوری و سه محوری به بررسی نمونه‌های به‌دست آمده از گمانه حفاری شده پرداخته شده و خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ساختگاه تونل تعیین شده که در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴. پارامترهای مهندسی سنگ‌ها در ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 4. Engineering parameters of rocks in the Haji-Abad tunnel site

ردیف	T_1	T_2	T_3	T_4	T_{f1}	T_5	T_6	T_7	T_{f2}	T_8
ارتفاع روباره (متر)	36	60	126	244	252	251	243	243	47	44
طول (متر)	57	30	96	492	62	197	157	380	110	81
E (GPa)	3.38	9.11	23.83	2.17	1.68	8.96	8.96	8.96	1.68	23.83
K	0.93	1.2	1	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	2.2
SRF	5	5	25	25	25	25	25	25	5	5
γ (g/cm^3)	2.90	2.65	2.7	2.90	2.80	2.65	2.65	2.65	2.60	2.70
φ (°)	25	35	45	25	15	35	35	35	15	45
Q	0.17	1.30	2.83	0.10	0.08	1.76	1.76	1.76	0.04	1.42
σ_1 (MPa)	97	262	613	283	352	399.9	385.8	385.8	85.54	1099.77
σ_C (MPa)	20	80	120	20	10	100	100	100	15	120
σ_T (MPa)	6.35	11.53	18.83	6.35	2.60	11.53	11.53	11.53	2.60	18.83
σ_θ (MPa)	230.72	477	680.2	2688	2469	2128	2060	2021	354	950

* در این جدول، E مدول الاستیسیته، K مدول بالک، SRF فاکتور کاهش تنش، γ دانسیته سنگ، φ زاویه اصطکاک داخلی، Q عدد کیفی سنگ، σ_1 تنش اصلی حداکثر، σ_C مقاومت فشاری تک‌محوری، σ_T مقاومت کششی تک‌محوری و σ_θ تنش مماسی می‌باشند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

بررسی پدیده انفجار سنگ

در این پژوهش، با استفاده از تعداد پنج روش متداول تخمین شدت پدیده انفجار سنگ که شامل یک روش تجربی روش گوئل و چهار روش نیمه تجربی شامل معیار انرژی الاستیک خطی، معیار تردی، معیار تنش‌ها و در نهایت معیار تنش مماسی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

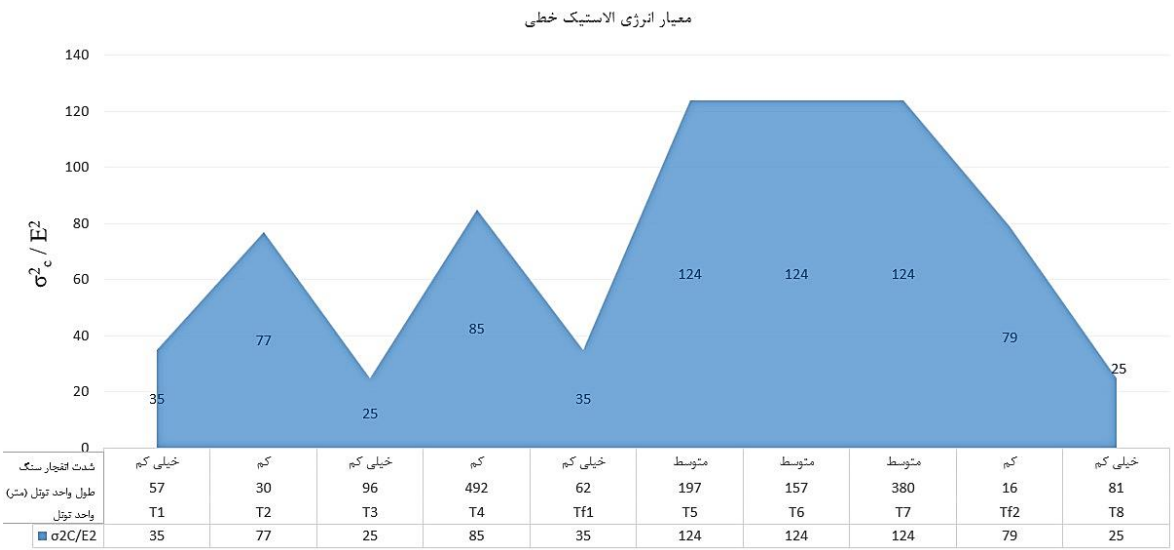
معیار انرژی الاستیک خطی

معیار انرژی الاستیک خطی حاصل نسبت حداکثر مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ به توان دو تقسیم بر مدول الاستیسیته به توان دو است. بر اساس این معیار واحدهای ده‌گانه ساختگاه تونل حاجی‌آباد از نظر شدت پدیده انفجار سنگ در رده خیلی کم تا متوسط قرار می‌گیرد (جدول ۵). همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است واحدهای T_1، T_3، T_{f1} و T_8 در رده شدت انفجار سنگ خیلی کم و واحدهای T_2، T_4 و T_{f2} در رده شدت انفجار سنگ کم و واحدهای T_5، T_6و T_7 در رده متوسط انفجار سنگ قرار می‌گیرند. بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده نتایج حاصل از این معیار تا حدودی به واقعیت نزدیک‌تر است.

جدول ۵. نتایج پدیده انفجار سنگ حاصل از معیار انرژی خطی الاستیک برای واحدهای ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 5. The results of the rock burst phenomenon resulting from the linear elastic energy criterion for the Haji-Abad tunnel site units

واحد تونل	T_1	T_2	T_3	T_4	T_{f1}	T_5	T_6	T_7	T_{f2}	T_8
طول	57	30	96	492	62	197	157	380	16	81
شدت	خیلی کم	کم	خیلی کم	کم	خیلی کم	متوسط	متوسط	متوسط	کم	خیلی کم
σ^2_C / E^2	35	77	25	85	35	124	124	124	79	25



شکل ۲. نمودار ارزیابی شدت انفجار سنگ بر اساس معیار انرژی الاستیک خطی

Fig. 2. Evaluation diagram of rock burst intensity based on linear elastic energy criterion

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

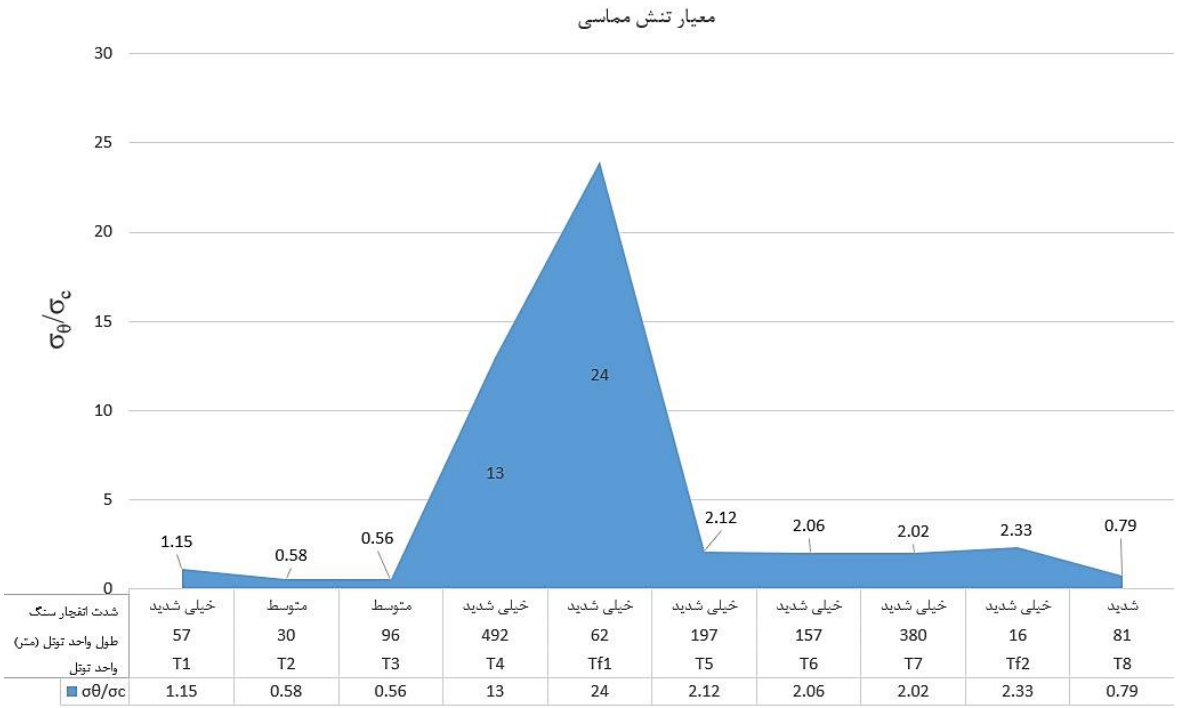
معیار تنش مماسی

معیار تنش مماسی بر اساس نسبت حداکثر تنش مماسی به حداکثر مقاومت تک محوری توده سنگ (که از روابط تجربی به‌دست آمده) است. بر اساس این معیار پدیده انفجار سنگ در واحدهای ده‌گانه ساختگاه تونل حاجی‌آباد در رده‌های متوسط تا خیلی شدید قرار می‌گیرد که نتایج همه واحدها در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ ارائه شده است واحدهای T_2 و T_3 در رده متوسط و واحد T_8 در رده شدید و سایر واحدهای تونل در رده خیلی شدید قرار می‌گیرند. بر اساس بررسی و مقایسه نتایج، این معیار تا حدودی نسبت به واقعیت مقدار بیشتری را برای پدیده انفجار سنگ نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج پدیده انفجار سنگ حاصل از معیار تنش مماسی برای واحدهای ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 6. The results of rock burst phenomenon resulting from the tangential stress criterion for the Haji-Abad tunnel site units

پارامتر	T_1	T_2	T_3	T_4	T_{f1}	T_5	T_6	T_7	T_{f2}	T_8
طول	57	30	96	492	62	197	157	380	16	81
شدت	خیلی شدید	متوسط	متوسط	خیلی شدید	خیلی شدید	خیلی شدید	خیلی شدید	خیلی شدید	خیلی شدید	شدید
σ_θ/σ_c	1.15	0.81	0.65	13	24	2.12	2.06	2.02	2.33	0.79



شکل ۳. نمودار ارزیابی شدت انفجار سنگ بر اساس معیار تنش‌های مماسی

Fig. 3. Evaluation diagram of rock burst intensity based on tangential stress criterion

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

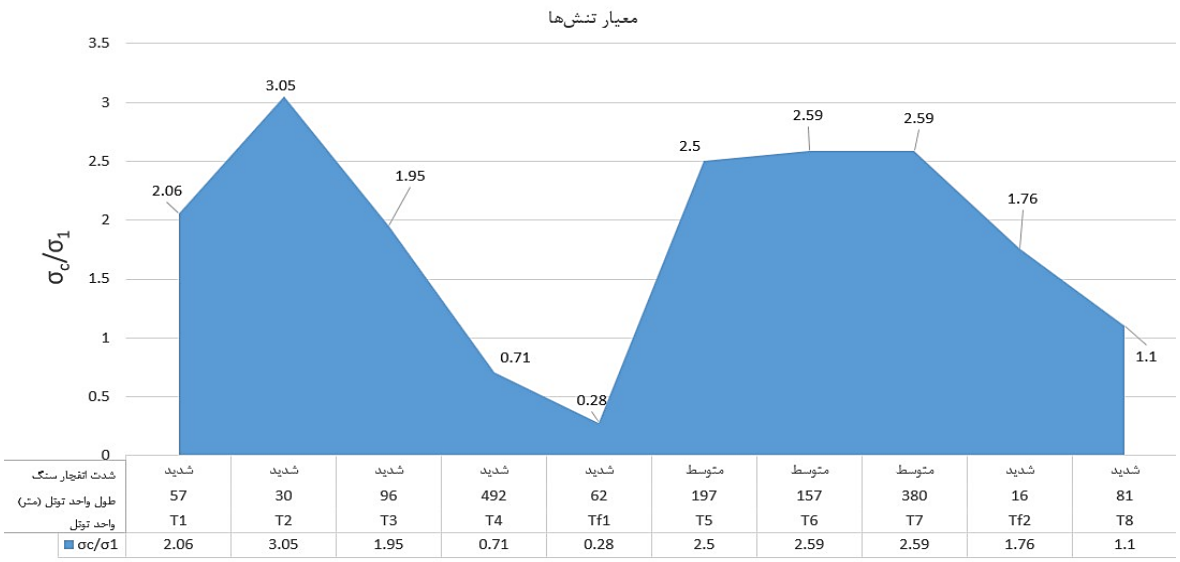
معیار تنش‌ها

این معیار بر اساس نسبت حداکثر مقاومت تک محوری به تنش اصلی حداکثر است. بر اساس این معیار واحدهای ده‌گانه تونل برای پدیده انفجار سنگ در رده‌های متوسط تا شدید قرار می‌گیرند که در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است بر اساس معیار تنش‌ها واحدهای مختلف تونل در دو رده انفجار شدید سنگ با اعداد کمتر از ۲,۵ و رده انفجار متوسط با اعداد بیشتر از ۲,۵ است. این معیار برای انواع سنگ‌ها با شرایط زمین‌شناسی مختلف و شرایط ساختاری مختلف توده سنگ و پارامترهای مقاومتی متفاوت در اعماق مختلف دو رده شدت متوسط و شدید در پدیده انفجار سنگ را نشان می‌دهد. بر اساس بررسی و مقایسه نتایج، این معیار مقدار پدیده انفجار سنگ را بیش از حد تخمین می‌زند.

جدول ۷. نتایج پدیده انفجار سنگ حاصل از معیار تنش‌ها برای واحدهای ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 7. The results of rock burst phenomenon resulting from the measurement of stresses for the Haji-Abad tunnel site units

پارامتر	T_1	T_2	T_3	T_4	T_{f1}	T_5	T_6	T_7	T_{f2}	T_8
طول	57	30	96	492	62	197	157	380	16	81
شدت	شدید	شدید	شدید	شدید	شدید	متوسط	متوسط	متوسط	شدید	شدید
σ_C/σ_1	2.06	3.05	1.95	0.71	0.28	2.50	2.59	2.59	1.76	1.10



شکل ۴. نمودار ارزیابی شدت انفجار سنگ بر اساس معیار تنش‌ها

Fig. 4. Evaluation diagram of rock burst intensity based on stress criterion

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

معیار تردی

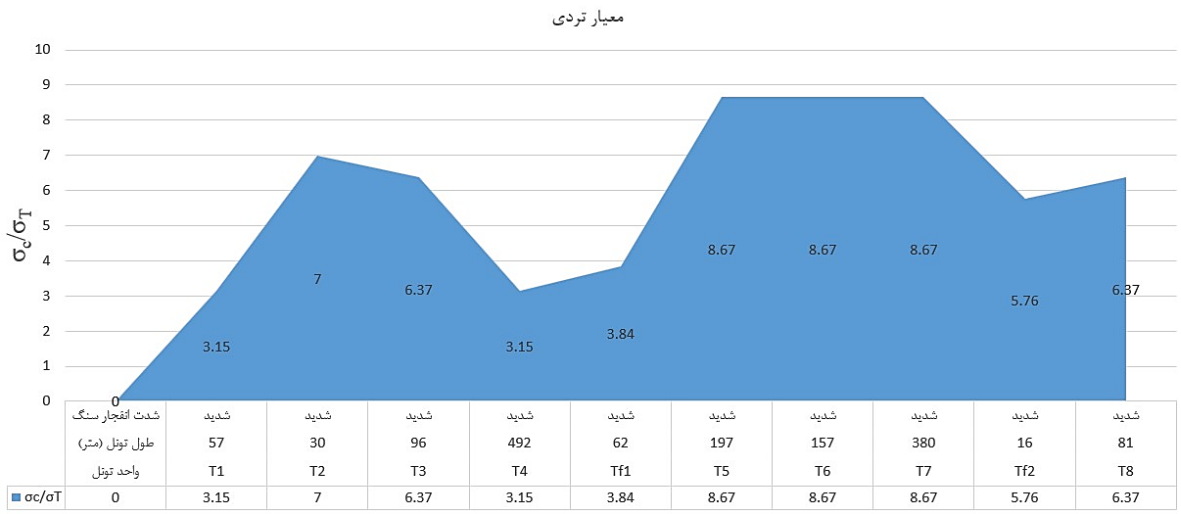
معیار تردی حاصل حداکثر مقاومت ترکمی تک محوری توده سنگ به مقاومت کششی توده سنگ (که از روابط تجربی به‌دست آمده) است که بر اساس این معیار همه واحدهای ده‌گانه ساختگاه تونل حاجی‌آباد در رده انفجار شدید سنگ قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است.

همچنین شکل ۵، شدت انفجار سنگ را در واحدهای ده‌گانه ساختگاه تونل نشان می‌دهد. شدت انفجار سنگ برای همه سنگ‌های ساختگاه تونل حاجی‌آباد از لحاظ عددی بالاتر از ۳ تا ۹ است. بر این اساس همه سنگ‌های واحدهای ده‌گانه تونل در محدوده انفجار شدید قرار می‌گیرند. بر اساس بررسی و مقایسه نتایج، این معیار مقدار پدیده انفجار سنگ را زیادتر از حد معمول برآورد می‌کند.

جدول ۸. نتایج پدیده انفجار سنگ حاصل از معیار تردی برای واحدهای ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 8. The results of rock burst phenomenon resulting from the brittleness criterion for the Haji-Abad tunnel site units

پارامتر	T_1	T_2	T_3	T_4	T_{f1}	T_5	T_6	T_7	T_{f2}	T_8
طول	57	30	96	492	62	197	157	380	16	81
شدت	شدید	شدید	شدید	شدید	شدید	شدید	شدید	شدید	شدید	شدید
σ_C/σ_T	3.15	7	6.37	3.15	2.84	8.67	8.67	8.67	5.76	6.37



شکل ۵. نمودار ارزیابی شدت انفجار سنگ بر اساس معیار تردی

Fig. 5. Evaluation diagram of rock burst intensity based on brittleness criterion

معیار تجربی گوئل و همکاران (Goel et al., 1995)

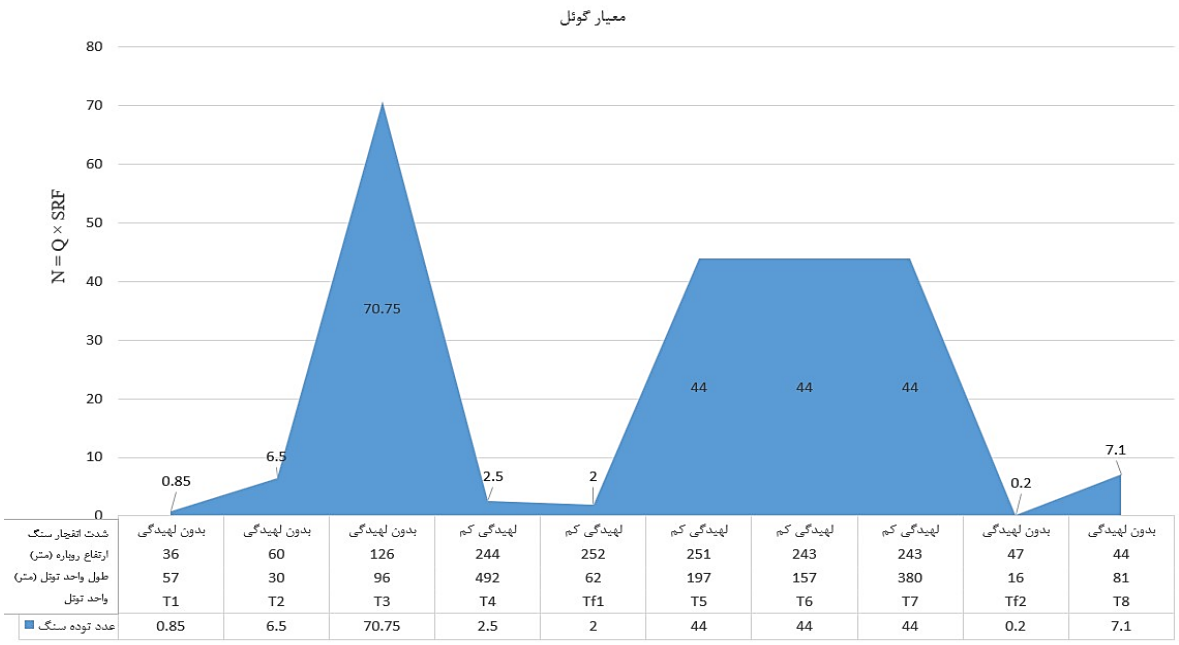
معیار گوئل و همکاران یکی از معیارهای تجربی است که بر اساس آن می‌توان پدیده انفجار سنگ را در معدن و فضاهای زیرزمینی پیش‌بینی کرد. با توجه به نتایج به دست آمده برای پدیده انفجار سنگ با استفاده از معیار گوئل برای ساختگاه تونل حاجی‌آباد بر اساس این معیار در بخش‌های T_5 ,T_4, T_{f1}, سنگ‌هایی با پتانسیل لهیدگی کم (همگرایی ۱ تا ۳٪ قطر تونل) وجود دارد و بخش‌های T_6 و T_7 نیز دارای

سنگ‌هایی هستند که در نزدیکی محدوده لهیدگی کم قرار می‌گیرند. سایر بخش‌ها پتانسیل لهیدگی وجود ندارد که در جدول ۹ ارائه شده است. بنابراین بر اساس این معیار همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود پدیده انفجار سنگ در هیچ‌کدام از واحدهای تونل مشاهده نمی‌شود.

جدول ۹. نتایج پدیده انفجار سنگ حاصل از معیار گوئل برای واحدهای ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 9. The results of rock burst phenomenon resulting from Goel criteria for the Haji-Abad tunnel site units

واحد تونل	T_1	T_2	T_3	T_4	T_{f1}	T_5	T_6	T_7	T_{f2}	T_8
طول	57	30	96	492	62	197	157	380	16	81
ارتفاع	36	60	126	244	252	251	243	243	47	44
شدت	بدون لهیدگی	بدون لهیدگی	بدون لهیدگی	لهیدگی کم	لهیدگی کم	لهیدگی کم	لهیدگی کم	لهیدگی کم	بدون لهیدگی	بدون لهیدگی
عدد توده سنگ	0.85	6.50	70.75	2.5	2	44	44	44	0.2	7.1

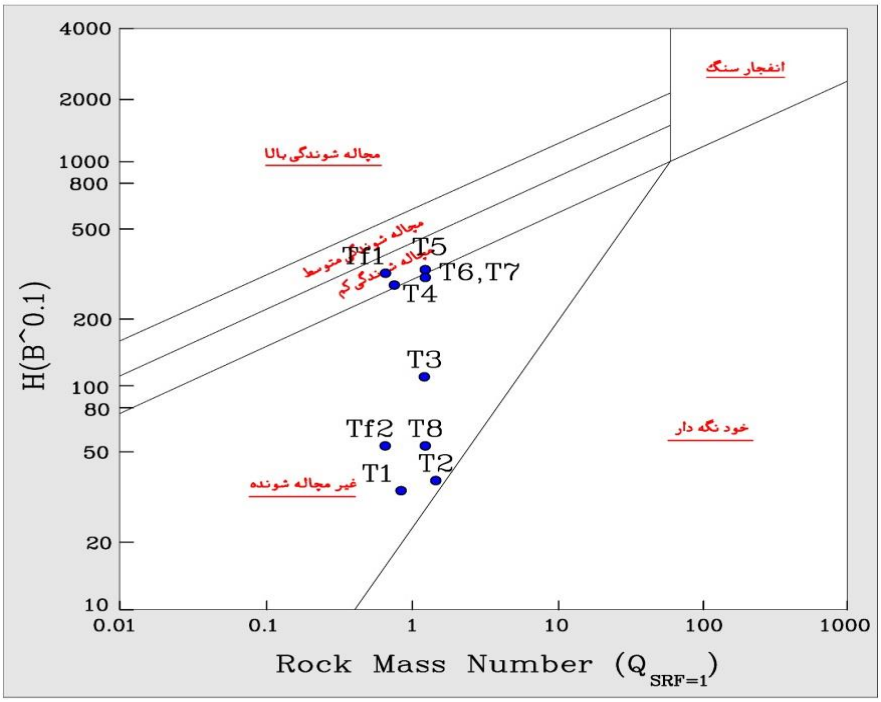


شکل ۶. نمودار ارزیابی شدت پدیده انفجار سنگ با استفاده از معیار گوئل و همکاران (Goel et al., 1995)

Fig. 6. Evaluation diagram of rock burst intensity using Goel et al. (1995) criterion

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]



شکل ۷. وضعیت بخش‌های مختلف دارای پتانسیل لهیدگی بر اساس نمودار گوئل و همکاران (Goel et al., 1995)

Fig. 7. The status of different unite with squizing potential based on the diagram of Goel et al. (1995)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی پتانسیل پدیده انفجار سنگ در ساختگاه تونل حاجی‌آباد در استان هرمزگان پرداخته شد. با توجه به جنس خیلی ضعیف تا مقاوم توده سنگ مسیر تونل و ضخامت روباره امکان وقوع پدیده انفجار سنگ محتمل است. بنابراین پدیده با استفاده از دو روش تجربی و نیمه تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. در روش تجربی، با استفاده از معیار گوئل و همکاران هیچ‌کدام از واحدهای تونل پتانسیل پدیده انفجار توده سنگ وجود ندارد. طبق نتایج بدست آمده از این روش و مقایسه آن با نتایج سایر روش‌ها، این معیار در ارزیابی پدیده انفجار سنگ دقت زیادی ندارد. با توجه به این که در روش‌های نیمه تجربی علاوه بر ضخامت روباره، مقاومت توده سنگ و کرنش جداره تونل لحاظ می‌شود، این روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار هستند. با توجه به اینکه مسیر تونل حاجی‌آباد در زون فعالی از لحاظ تکتونیکی قرار دارد، بنابراین پتانسیل وقوع پدیده انفجار سنگ در واحدهای ساختگاه تونل وجود دارد. در این بررسی پدیده انفجار سنگ بر اساس روش‌های متداول نیمه تجربی مانند معیار انرژی الاستیک خطی واحدهای تونل دارای پتانسیل انفجار خیلی کم تا متوسط قرار می‌گیرد. با توجه به معیار تنش مماسی واحدهای تونل در رده انفجار متوسط تا خیلی شدید و بر اساس معیار تنش‌ها واحدهای ده‌گانه ساختگاه تونل در رده متوسط تا شدید و بر اساس معیار تردی همه واحدهای تونل در رده انفجار شدید سنگ قرار دارند. بنابراین بر اساس نتایج بدست آمده از روش‌های مورد بررسی، احتمال وقوع انفجار سنگ در واحدهای ده‌گانه ساختگاه تونل وجود دارد. بنابراین انجام اقدامات لازم برای کاهش خطر انفجار سنگ و همچنین برای مقابله با خطرات احتمالی پیشنهاد می‌شود که تمهیدات لازم و به موقع بهتر است انجام شود چرا که پیش‌بینی دقیق زمان انفجار امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به اینکه برای

زون‌های T_{f1} و T_{f2} در معیارهای تردی، تنش‌ها و تنش مماسی انفجار سنگ پیش‌بینی می‌شود، اما به دلیل خردشدگی این زون‌ها و مدول الاستیسیته پایین این دو زون نسبت به زون‌های دیگر، انتظار می‌رود در این دو زون بجای انفجار سنگ تغییر شکل و همگرایی به داخل تونل اتفاق بیفتد.

References

Brauner, G. (1994). Rock Burst in Coal Mines. Rotterdam-Brookfield: A.A. Balkema.

Coli, M., Livi, E., Berry, P., Bandini, A., & Jia, X.N. (2010). Studies for rockburst prediction in the Carrara marble (Italy). In ISRM International Symposium on In-Situ Rock Stress, ISRM, 367–373.

Du, K., Tao, M., Li, X.B., & Zhou, J. (2016). Experimental study of slabbing and rockburst induced by true-triaxial unloading and local dynamic disturbance. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, 3437–3453.

Goel, R. K., Jethwa, J. L., & Paithankar, A. G. (1995). Tunnelling through the young Himalayas—a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel. Engineering Geology, 39(1–2), 31–44.

Hirata, A., Ishiyama, K., Taga, N., & Kameoka, Y. (1991). AE monitoring and rock stress measurement in rock burst site. In ISRM Congress (pp. ISRM-7CONGRESS). ISRM.

ISRM, (International Society of Rock Mechanic) (1981). Rock characterization, testing and Monitoring. In: Brown, E.T., (Ed.), ISRM, Suggested methods for the Quantitative Description of discontinuities in the rock mass. Oxford, London, Pergamon, p. 211.

Kabwe, E., & Wang, Y. (2015). Review on rockburst theory and types of rock support in rockburst prone mines. Open Journal of Safety Science and Technology, 5(04), 104.

Kaiser, P.K., MacCreath, D.R., & Tannant, D.D. (1996). Canadian rockburst support handbook: prepared for sponsors of t he Canadian rockburst research program 1990-1995. Geomechanics Research Centre.

Khanlari, G.R., & Meybodi, R.G. (2013). Evaluation of rockburst potential in second part of Karaj-Tehran water conveyance tunnel. Journal of Engineering Geology, 6(2), 1545–1558.

Kwasniewski, M., Szutkowski, I., & Wang, J.A. (1994). Study of ability of coal from seam 510 for storing elastic energy in the aspect of assessment of hazard in Porabka-Klimontow Colliery. Sci. Rept. Silesian Technical University.

Margan, B. (2018). Evaluating the engineering geological characteristics of Hajiabad tunnel site in Hormozgan province. MSc thesis in Engineering Geology, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Semnan, Iran.

Ortlepp, W.D. (2001). The behaviour of tunnels at great depth under large static and dynamic pressures. Tunn. Undergr. Sp. Technol., 16(1), 41–48.

Ortlepp, W.D., & Stacey, T.R. (1994). Rockburst mechanisms in tunnels and shafts. Tunnelling and Underground Space Technology, 9(1), 59–65.

Palmström, A. (1995) Characterizing rock burst and squeezing by the rock mass index. In International conference in design and construction of underground structures, 10(10).

Wang, J.A., & Park H.D. (2001). Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks. Tunnelling and underground space technology, 16(1), 49–57.

Zhang, G., Chen, J.X., & Hu, B. (2003). Prediction and control of rockburst during deep excavation of a gold mine in China. Chin. J. Rock Mech. Eng, 22(10), 1607–1612.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.4.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.101185]