

Investigating the effect of variation of Geology Strength Index (GSI) on the geomechanical parameters of rock mass

Mehdi Mohammadi

Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Received: 02.10.2020 Accepted: 06.15.2020

Determining the geomechanical parameters of rock mass is of particular importance in the design of industrial projects such as dams and tunnels. One of the most useful methods for determining these parameters is Hoek-Brown failure criterion. Because, rock mass quality is considered in this criterion on the basis of Geological Strength Index (GSI). Various methods were developed for determining GSI, and the results of each method differ from the results of the others. So far, the effect of these differences on the geomechanical parameters was not studied. The purpose of this research is to investigate the effects of GSI on the geomechanical parameters. Hence, different methods are reviewed and investigated at first. Latter, with the collected data (field study), this index is predicted and the effects of index variations on Hook-Brown constant parameters, strength parameters and deformation modulus with the proposed relationships are investigated. Results show that the difference in methods has a significant effect on geomechanical parameters. So that, a difference of 9 units in the geological strength index leads to more than 7GPa difference in the modulus of deformation.

Keywords:

Strength parameters, Geology strength index, Deformation modulus, Hoek-Brown criterion.

نوع مقاله: پژوهشی (کاربردی)

بررسی تأثیر تغییرات شاخص مقاومت زمین شناسی

بر پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

مهدي محمدی *

استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶

چکیده

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در طراحی پروژه‌های صنعتی مانند احداث سد و تونل اهمیت خاصی دارند. یکی از روش‌های پرکاربرد برای تعیین این پارامترها، معیار شکست هوک - براون است، زیرا در این معیار کیفیت توده سنگ بر اساس طبقه‌بندی شاخص مقاومت زمین‌شناسی تعیین می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی اثر تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر پارامترهای ژئومکانیکی است. بدین منظور در گام نخست روش‌های مختلف تعیین این شاخص معرفی و مورد بحث قرار گرفته‌اند؛ سپس با داده‌های جمع‌آوری شده (مطالعه میدانی)، شاخص پیش‌بینی شده و اثر نرخ تغییرات شاخص بر پارامترهای معیار هوک - براون و پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی با رابطه‌ای پیشنهادی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تفاوت روش‌ها، تأثیر قابل‌توجهی بر پارامترهای ژئومکانیکی دارد؛ به‌طوری‌که با اختلاف نه‌واحدی شاخص مقاومت زمین‌شناسی، تفاوت مدول دگرشکلی به بیش از هفت گیگاپاسکال می‌رسد.

واژگان کلیدی:

پارامترهای مقاومتی، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، مدول دگرشکلی، معیار شکست هوک - براون.

* نویسنده مسئول: mehdi.mohammadi@vru.ac.ir

۱. مقدمه

در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی، تخمین مشخصه‌های مقاومتی توده‌سنگ شامل مقاومت‌های کششی و فشاری و همچنین مدول دگرشکلی توده‌سنگ بسیار اهمیت دارند [۱]. این پارامترها به شدت تحت تأثیر شرایط ناپیوستگی‌ها شامل طول، عرض ناپیوستگی، مواد پرکننده، زبری و هوازگی ناپیوستگی و از سویی ابعاد و مقیاس توده‌سنگ قرار دارند. این شرایط سبب می‌شود مشخصه‌های مقاومتی و مدول دگرشکلی در جهات مختلف نسبت به هم متفاوت باشند؛ از این رو تعیین این پارامترها با استفاده از آزمایش‌های برجا، کار دشواری است [۲]. هوک و براون در سال ۱۹۸۰ معیاری را موسوم به معیار شکست هوک - براون برای تحلیل و طراحی در محیط‌های سنگی توسعه دادند [۳]. با توجه به کاربرد فراوان این معیار در پروژه‌های صنعتی، تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود آن انجام شد و در نهایت در سال ۲۰۰۲ معیار اصلاح‌شده انتشار یافت [۴]. هوک و همکاران با استفاده از فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون (m_b, S, a) روابطی را برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ توسعه دادند [۵-۴]. آن‌ها برای تعیین فاکتورهای ثابت معیار شکست هوک - براون علاوه بر ویژگی‌های سنگ بکر، کیفیت توده‌سنگ را نیز در نظر گرفتند.

برای تعیین کیفیت توده‌سنگ، یک طبقه‌بندی با عنوان شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) توسعه داده شد [۶]. با توجه به پیچیدگی توده‌سنگ، برای تخمین شاخص مقاومت زمین‌شناسی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است که این مطالعات را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد: گروه نخست، با استفاده از سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ [۶] مانند طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (RMR) است، گروه دوم تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر اساس توسعه نمودار کیفی [۹-۷] و گروه سوم تخمین این پارامتر بر اساس توسعه نمودارهای کمی است [۱۰-۱۲]. امروزه این گروه‌ها کاربرد وسیعی در پروژه‌های مختلف دارند. گروه نخست مرجع نیز به شمار می‌آید و گروه دوم و سوم برای ساده‌کردن و راحتی در تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی به تدریج توسعه داده شده‌اند. نکته مهم در تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی در هر سه گروه این است که علاوه بر داشتن دانش کافی، مهارت و تجربه افراد نیز اهمیت دارد [۱۳].

به دلیل پیچیدگی‌های زمین لازم است که تعیین GSI با دقت و احتیاط بیشتری انجام شود؛ از این رو ساده‌ترین روش و دقیق‌ترین نتیجه برای افراد کم‌تجربه همواره مورد توجه است. از سویی استفاده از هر یک از روش‌ها منجر به نتایج متفاوتی نسبت به سایر روش‌ها - به‌ویژه نتایج گروه نخست که مرجع است - می‌شود [۱۲]. این تفاوت می‌تواند بر پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی پیش‌بینی‌شده تأثیر داشته

باشد. اما مقدار تأثیر آن در مطالعات گذشته بررسی نشده است. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی با استفاده از سه گروه بر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ است. برای این منظور، ابتدا متداول‌ترین روش‌های تعیین GSI در سه گروه به اختصار توضیح داده می‌شود. سپس شاخص مقاومت زمین‌شناسی با این روش‌ها به صورت موردی تعیین و بررسی می‌شود و در پایان بر اساس GSI حاصل‌شده پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ تخمین زده شده و نرخ تغییرات پارامترهای مورد نظر نیز با توسعه رابطه‌ای، مطالعه و بررسی می‌شود.

۲. روش‌های تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی

۲-۱. بر اساس سیستم ژئومکانیکی توده‌سنگ

هوک در سال ۱۹۹۴ برای تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی از سیستم ژئومکانیکی توده‌سنگ RMR استفاده کرد [۶]. جدول شماره ۱ پارامترهای مشارکت داده‌شده در سیستم ژئومکانیکی توده‌سنگ را بر اساس دو نسخه سال ۱۹۷۶ و ۱۹۸۹ نمایش می‌دهد [۱۴-۱۵]؛ بنابراین مقدار GSI از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$GSI = RMR_{1989} - 5 \quad (1)$$

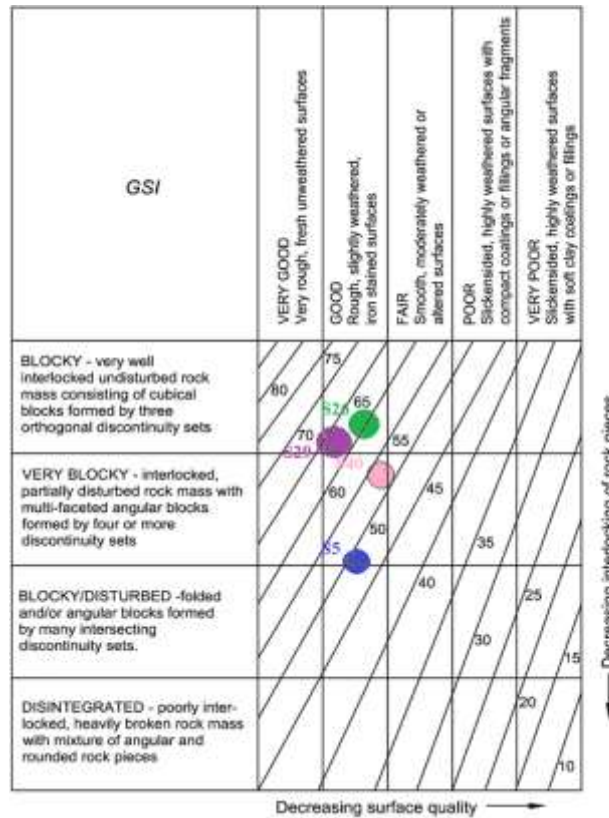
برای تعیین GSI بر اساس RMR باید توجه داشت که امتیاز دو پارامتر شرایط آب و جهت‌یافتگی ناپیوستگی به ترتیب ۱۵ و صفر، در نظر گرفته می‌شود [۱۲، ۶]. امروزه این روش اصلی‌ترین روش برای تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی شناخته می‌شود که از معایب آن می‌توان به کارایی پایین RMR در سنگ‌های با کیفیت پایین اشاره کرد؛ از این رو اطمینان به تخمین GSI در این گروه از سنگ‌ها با تردید همراه است [۱۲، ۶].

جدول شماره ۱. پارامترهای استفاده‌شده در سیستم امتیازدهی توده‌سنگ [۱۴، ۱۵]

ردیف	پارامتر	دامنه امتیاز			
		۱۹۷۶		۱۹۸۹	
		کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
۱	مقاومت فشاری سنگ بکر	۰	۱۵	۰	۱۵
۲	شاخص کیفی توده‌سنگ	۳	۲۰	۳	۲۰
۳	فاصله‌داری	۵	۳۰	۵	۲۰
۴	شرایط ناپیوستگی	۰	۳۵	۰	۳۰
۵	شرایط آب	۰	۱۰	۰	۱۵
۶	جهت‌یافتگی	۰	-۶۰	۰	-۶۰

۲-۲. بر اساس توسعه نمودارهای کیفی

برای تعیین GSI به روش RMR چهار پارامتر مقاومت فشاری، شاخص کیفی توده سنگ، شرایط ناپیوستگی و فاصله داری تأثیرگذار هستند. اغلب این پارامترها بر اساس بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. هوک و براون برای تخمین شاخص مقاومت زمین‌شناسی به صورت ساده‌تر در سال ۱۹۹۷ نموداری را بر اساس کیفیت توده سنگ برای تخمین GSI توسعه دادند. شکل شماره ۱ این نمودار را نمایش می‌دهد [۷]. محور عمودی بیانگر درجه قفل‌شدگی توده سنگ و محور افقی بیانگر کیفیت ناپیوستگی هاست. این نمودار در سنگ‌ها با کیفیت پایین نیز کاربرد دارد.



شکل شماره ۱. تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر اساس نمودار کیفی و تعیین این شاخص در مطالعه حاضر

۲-۳. بر اساس توسعه نمودارهای کمی

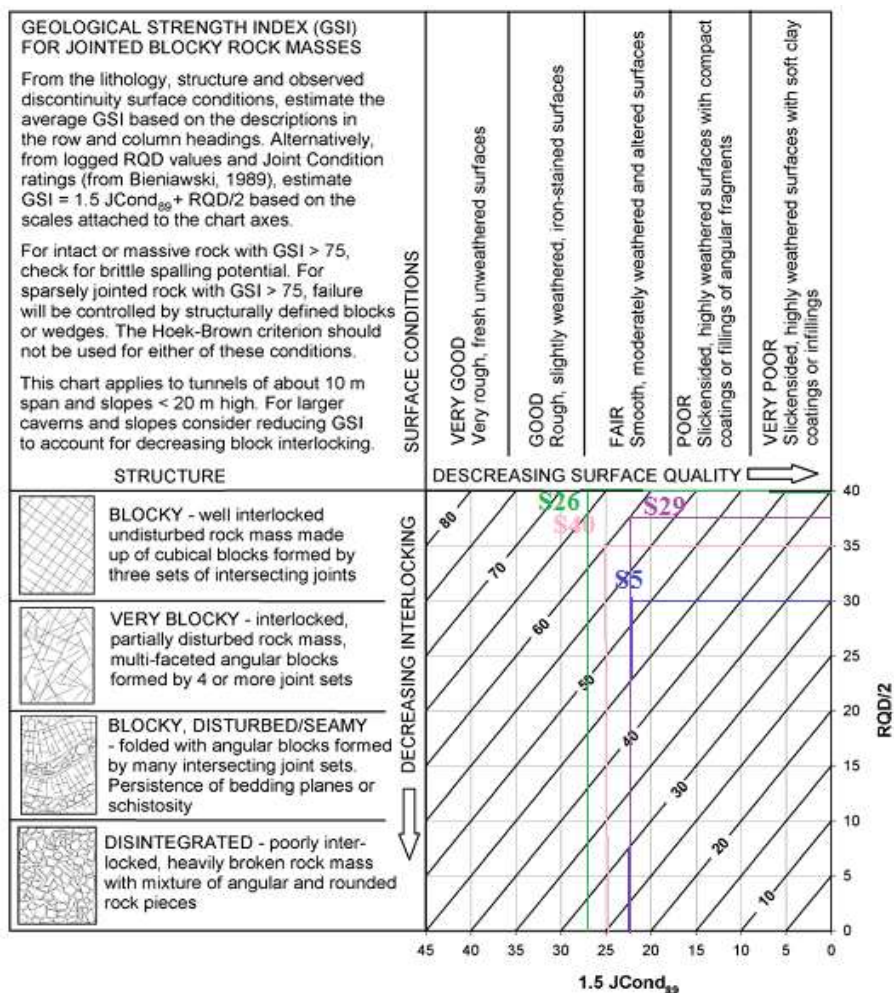
برای استفاده از نمودار کیفی نیاز به تجربه و مهارت افراد متخصص است؛ به همین دلیل محققان،

مطالعات مختلفی را روی نمودار کیفی انجام دادند تا محورهای افقی و عمودی در شکل شماره ۱ را از حالت کیفی به کمی تبدیل کنند. آخرین نسخه نمودار کمی توسط هوک و همکاران در سال ۲۰۱۳ انتشار یافت. شکل شماره ۲ این نمودار را نمایش می‌دهد [۱۱].

در شکل شماره ۲، محور افقی بر اساس شرایط ناپیوستگی موجود در سیستم RMR_{1989} تعیین می‌شود [۱۵]. پارامترهای مشارکت‌کننده در شرایط ناپیوستگی شامل طول و عرض ناپیوستگی، مواد پرکننده، زبری و هوازدگی هستند. جدول شماره ۲ پارامترهای مؤثر و امتیاز هر پارامتر را برای شرایط ناپیوستگی نمایش می‌دهد. بیشینه امتیاز شرایط ناپیوستگی ۳۰ است. برای تعیین امتیاز محور افقی، باید مقدار امتیاز تعیین شده از شرایط ناپیوستگی را در عدد $1/5$ ضرب کرد. برای تعیین مختصات محور عمودی، مقدار امتیاز شاخص کیفی توده سنگ (RQD) بر عدد دو تقسیم می‌شود. محل برخورد این دو مختصات روی نمودار مقدار GSI را نمایش می‌دهد. از محدودیت‌های روش مورد نظر این است که برای مقادیر $RQD < 80$ قابل استفاده است [۱۵].

جدول شماره ۲. توصیف شرایط زمین‌شناسی بر اساس سیستم امتیازدهی توده سنگ ۱۹۸۹ [۱۵]

توصیف					پارامتر
<۲۰	۱۰-۲۰	۳-۱۰	۱-۳	<۱	طول (m)
۰	۱	۲	۴	۶	امتیاز
<۵	۱-۵	۰/۱-۱	<۰/۱	فاقد جدایش	جدایش (mm)
۰	۱	۴	۵	۶	امتیاز
آینه‌ای	بدون زبری	کمی زبر	زبر	خیلی زبر	زبری
۰	۱	۳	۵	۶	امتیاز
پرکننده نرم، دهانه بزرگ‌تر از پنج میلی‌متر	پرکننده نرم، دهانه کوچک‌تر از پنج میلی‌متر	پرکننده سخت، دهانه بزرگ‌تر از پنج میلی‌متر	پرکننده سخت، دهانه کوچک‌تر از پنج میلی‌متر	بدون پرکننده	پرکننده
۰	۲	۲	۴	۶	امتیاز
تخریب شده	خیلی هوازده	هوازده	کمی هوازده	غیرهوازده	هوازگی
۰	۱	۳	۵	۶	امتیاز



شکل شماره ۲. نمودار توصیف زمین‌شناسی و شرایط ناپیوستگی برای تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی به صورت کتی و تعیین برای هر ایستگاه در این مطالعه

۳. معیار شکست هوک - براون

معیار تجربی و غیرخطی هوک - براون کاربردهای فراوانی در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی دارد [۴]. مبنای این معیار بر اساس کیفیت توده‌سنگ است. معیار هوک - براون به صورت رابطه (۲) است.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (2)$$

σ_{ci} تنش اصلی کمینه و تنش اصلی بیشینه، m_b و S و a پارامترهای ثابت توده سنگ هستند، مقاومت فشاری سنگ بکر است. برای تعیین ثوابت توده سنگ از روابط زیر استفاده می شود [۴].

$$m_b = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (۳)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (۴)$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{\left(\frac{-GSI}{15}\right)} - e^{\left(\frac{-20}{3}\right)}}{6} \quad (۵)$$

m_b ثابت سنگ بکر، D فاکتور اغتشاش که تابع تنش های القایی مانند موج ناشی از انفجار است و GSI شاخص مقاومت زمین شناسی است.

مقاومت فشاری توده سنگ از رابطه (۶) و مقاومت کششی توده سنگ از رابطه شماره (۷) تعیین می شود.

$$\sigma_{c(mass)} = \sigma_c S^a (MPa) \quad (۶)$$

$$\sigma_{t(mass)} = -\frac{S\sigma_c}{m_b} (MPa) \quad (۷)$$

رابطه (۸) نیز برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ کاربرد دارد و برای $\sigma_{ci} < 100MPa$ مفید است [۵].

$$E_{(mass)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{((GSI-10)/40)} (GPa) \quad (۸)$$

۴. داده های پژوهش

در این پژوهش تمرکز بر بررسی تغییرات شاخص مقاومت زمین شناسی بر پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ است؛ بنابراین به مجموعه داده های استاندارد نیاز است که قابلیت تعیین GSI را داشته باشند و بتوان نتایج به دست آمده را با هم مقایسه کرد. بدین منظور مجموعه داده های معتبری از مطالعات گذشته جمع آوری شد [۱۶]. داده ها مربوط به مطالعات انجام شده روی شیروانی های موجود در مسیر بزرگراه چالوس است. شیروانی های مورد نظر، از سازندهای مختلف گذشته و اطلاعات استفاده شده در این پژوهش، مربوط به چهار ایستگاه S40, S5, S29, S26 هستند. جداول شماره ۳-۶ اطلاعات مربوط به پارامترهای سیستم ژئومکانیکی توده سنگ و مقادیر RMR_{1989} را نمایش می دهند. همچنین شکل های ۳-۶ نمونه توده سنگ مربوط به ایستگاه های مورد نظر را نمایش می دهد [۱۶].

جدول شماره ۳. امتیازدهی پارامترهای طبقه بندی RMR برای ماسه سنگ در برگیرنده دامنه سنگی

ایستگاه S40 [۱۶]

امتیاز	ارزش تعیین شده	پارامتر
۷	۷۳	مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)
۱۳	۶۹	شاخص کیفی توده سنگ (درصد)
۱۰	۰/۲-۰/۶	فاصله داری درزه (m)
۱۷	سطوح درزه نسبتاً زبر، اندکی هوازده و مقدار کمی بازشدگی	شرایط سطح درزه
۱۳	خشک	جریان آب زیرزمینی
RMR=60		

جدول شماره ۴. امتیازدهی پارامترهای طبقه بندی RMR برای لای سنگ دربرگیرنده دامنه سنگی

ایستگاه S5 [۱۶]

امتیاز	ارزش تعیین شده	پارامتر
۷	۸۵/۵۰	مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)
۱۳	۵۹	شاخص کیفی توده سنگ (درصد)
۸	۰/۰۴-۰/۵	فاصله داری درزه (m)
۱۵	سطوح درزه نسبتاً زبر، اندکی پرشدگی و هوازده متوسط	شرایط سطح درزه
۱۳	خشک	جریان آب زیرزمینی
RMR=56		

جدول شماره ۵. امتیازدهی پارامترهای طبقه بندی RMR برای ماسه سنگ دربرگیرنده دامنه سنگی

ایستگاه S26 [۱۶]

امتیاز	ارزش تعیین شده	پارامتر
۱۷	۹۸/۱۴	مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)
۱۷	۸۲	شاخص کیفی توده سنگ (درصد)
۱۰	۰/۳۵-۰/۶۵	فاصله داری درزه (m)
۱۸	سطوح درزه زبر، با اندکی پرشدگی و هوازده	شرایط سطح درزه
۱۵	کاملاً خشک	جریان آب زیرزمینی
RMR=۶۷		

جدول شماره ۶. امتیازدهی پارامترهای طبقه بندی RMR برای ماسه سنگ دربرگیرنده دامنه سنگی

ایستگاه S29 [۱۶]

امتیاز	ارزش تعیین شده	پارامتر
۱۲	۱۳۵/۷	مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)
۱۷	۷۸/۷	شاخص کیفی توده سنگ %
۱۵	۱/۰۵ - ۱/۳۰	فاصله‌داری درزه (m)
۱۵	سطوح درزه کمی زیر، با اندکی پرشدگی و هوازده	شرایط سطح درزه
۱۵	کاملاً خشک	جریان آب زیرزمینی
RMR=۷۴		



شکل شماره ۴. نمای عمومی دامنه لای سنگ
ایستگاه S5 [۱۶]



شکل شماره ۳. نمای عمومی دامنه ماسه سنگی
ایستگاه S40 [۱۶]



شکل شماره ۶. نمای عمومی دامنه ماسه سنگی
ایستگاه S29 [۱۶]



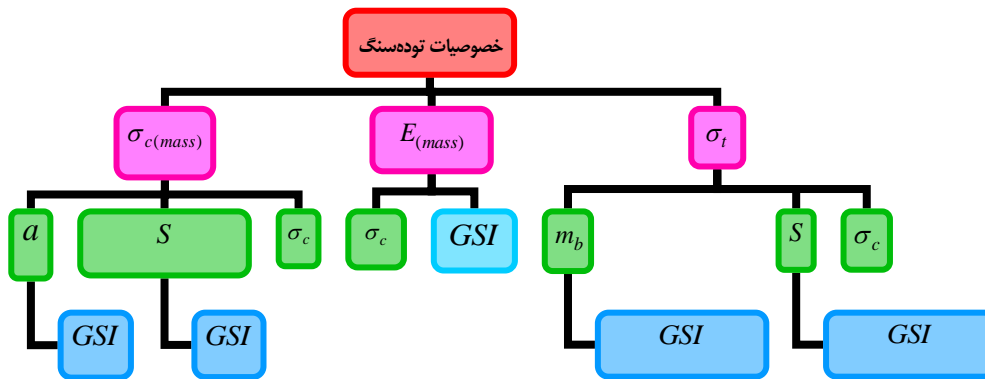
شکل شماره ۵. نمای عمومی ماسه سنگ
ایستگاه S26 [۱۶]

۵. روش تحقیق

شکل شماره ۷ رابطه بین GSI و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ را نمایش می‌دهد. شکل نشان می‌دهد مقاومت‌های فشاری (σ_c) و کششی (σ_t) توده‌سنگ تابعی از فاکتورهای ثابت معیار شکست هوک - براون شامل a, S, m_b هستند و فاکتورهای گفته‌شده و مدول دگرشکلی توده‌سنگ (E_{mass}) تابعی از GSI هستند؛ از این رو GSI می‌تواند بر اساس روش‌هایی که در بخش دوم گفته شد، تخمین زده شده و فاکتورهای ثابت معیار شکست هوک - براون و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ تعیین شود. منطقی است تعیین GSI با هر یک از روش‌ها متفاوت باشد که سبب می‌شود پارامترهای ژئومکانیکی نیز نسبت به هم اختلاف داشته باشند. حتی امکان دارد تفاوت‌های زیادی نسبت به هم داشته باشند؛ بنابراین نیاز است تغییرات نسبت به یک مرجع سنجش شود. برای سنجش نرخ تغییرات می‌توان از رابطه (۹) که رابطه‌ای پیشنهادی است، استفاده کرد. در رابطه (۹) C.R% نرخ تغییرات بر حسب درصد، مقادیر مرجع و B مقادیر سنجش است.

$$C.R\% = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (9)$$

در این مقاله ابتدا با استفاده از داده‌های بخش ۴، GSI بر اساس روش‌های مختلف تعیین می‌شود و سپس با استفاده از نتایج حاصل‌شده پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ تخمین زده می‌شود و نرخ تغییرات پارامترهای مختلف به دست می‌آید. مرجع در این پژوهش، مقادیر به‌دست‌آمده بر اساس سیستم طبقه‌بندی RMR در نظر گرفته شده‌اند.



شکل شماره ۷. تأثیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر پارامتر

۶-۱. تعیین شاخص مقاومت زمین شناسی

در این بخش برای ایستگاه‌های مشخص شده که اطلاعات آن‌ها در جداول ۳-۶ موجود است، شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر اساس طبقه‌بندی RMR، نمودار کیفی و نمودار کمی تخمین زده می‌شود. برای تعیین GSI به روش RMR از رابطه ۱ استفاده می‌شود، مقادیر RMR در جداول ۳-۶ نمایش داده شده است. اما در جداول ۳ و ۴ امتیاز شرایط آب محیطی برابر با ۱۳ تعیین شده است. همان‌طور که در بخش دوم اشاره شد، برای تعیین GSI باید مقدار امتیاز آن به ۱۵ افزایش یابد. در نتیجه مقدار RMR برای ایستگاه‌های S40 و S5 به ترتیب ۶۲ و ۵۸ تعیین می‌شود. جدول شماره ۷ مقادیر تعیین‌شده GSI را نمایش می‌دهد.

برای تعیین GSI بر اساس نمودار کیفی، از اطلاعات جداول و شکل‌های ۴-۶ استفاده شده است. مقادیر تعیین‌شده برای هر ایستگاه در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است. طبق جداول، شرایط ناپیوستگی در همه ایستگاه‌ها تقریباً مشابه است و بنابراین سطح کیفی توده‌سنگ‌ها در طبقه‌بندی کیفی خوب ارزیابی شده است. همچنین برای در نظر گرفتن درجه قفل‌شدگی توده‌سنگ، از پارامترهای فاصله‌داری و شاخص کیفی توده‌سنگ و همچنین نمایی استفاده شد که از توده‌سنگ مورد نظر در شکل‌های ۴-۶ نمایش داده شده است. نتایج در جدول شماره ۷ آمده است. برای تعیین GSI با استفاده از نمودار کمی، با در نظر گرفتن دو پارامتر شاخص کیفی توده‌سنگ و شرایط ناپیوستگی (جدول ۴-۶) مقادیر GSI از نمودار شماره ۲ تعیین شد. نتایج در جدول شماره ۷ نمایش داده شده است.

جدول شماره ۷. تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

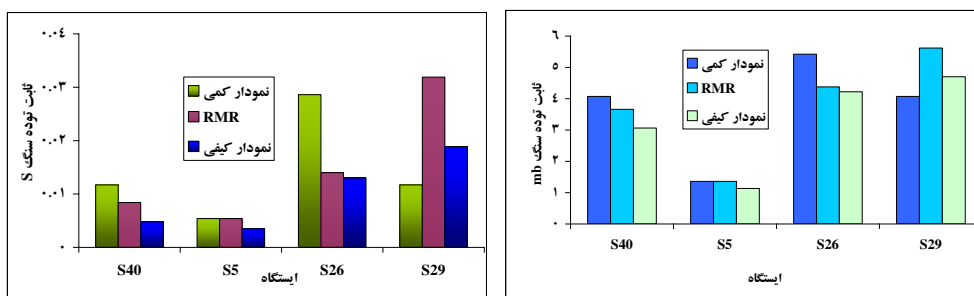
ایستگاه	GSI (طبقه‌بندی RMR)	GSI (نمودار کیفیتی)	GSI (نمودار کمیتی)
S40	۵۷	۵۲	۶۰
S5	۵۳	۴۹	۵۳
S26	۶۲	۶۱	۶۸
S29	۶۹	۶۴	۶۰

نتایج جدول شماره ۷ نشان می‌دهد مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف با هم متفاوتند. در بین نتایج به‌دست‌آمده از چهار ایستگاه، بیشینه اختلاف در ایستگاه S29 وجود دارد که مقدار تغییرات آن به ۹ واحد می‌رسد (اختلاف بین دو نتیجه حاصل از دو روش سیستم ژئومکانیکی توده‌سنگ RMR و نمودار کمیتی). دلیل این موضوع ناشی از نبود قطعیت در روش‌های مختلف برای تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی است؛ از این رو تعیین آن در پروژه‌های صنعتی با روش‌های مختلف، نتایج متفاوتی را به دنبال دارد؛ هرچند که فرد دارای تجربه نیز باشد؛ بنابراین اهمیت دارد تأثیر نرخ این تغییرات یا

تفاوت‌ها بر پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ بررسی شود.

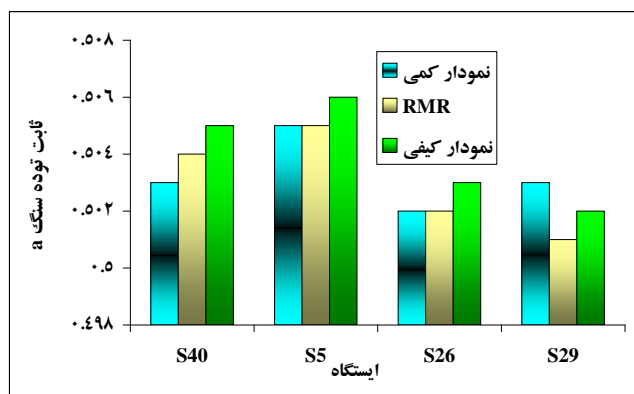
۶-۲. تعیین پارامترهای معیار هوک - براون

با تعیین GSI از سه روش مختلف برای هر ایستگاه و بررسی اختلاف در نتایج حاصله (جدول شماره ۷)، در این بخش فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون تعیین و نرخ تغییرات پارامترهای معیار هوک - براون مطالعه می‌شود. برای این منظور از روابط ۳-۵ برای تعیین پارامترهای m_b , S, a استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز در روابط، ثابت m_i برای ماسه‌سنگ و لای‌سنگ به ترتیب ۱۷ و ۷ در نظر گرفته شد [۱۷]. فاکتور اغتشاش نیز با توجه به نبود تنش‌های القایی در منطقه برابر با صفر در نظر گرفته شده است. نتایج پیش‌بینی شده در شکل شماره ۸ نمایش داده شده است.



۸-ب) ثابت توده‌سنگ S

۸-الف) ثابت توده‌سنگ m_b

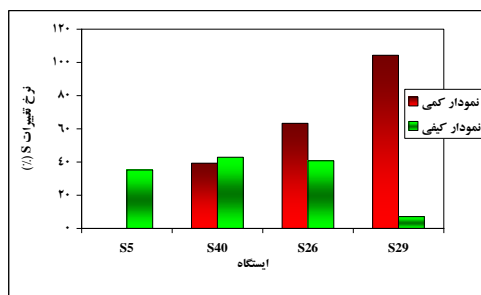


۸-ج) ثابت توده‌سنگ a

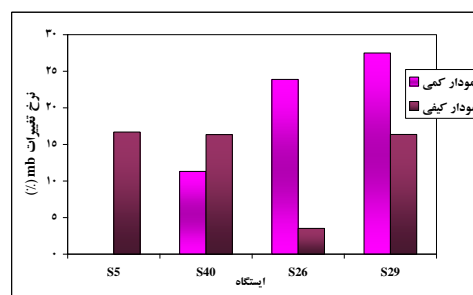
شکل شماره ۸. تعیین پارامترهای ثابت معیار هوک - براون با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (بر مبنای جدول شماره ۷)

شکل شماره ۸ نشان می‌دهد، در هر ایستگاه، فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون متناظر با شاخص

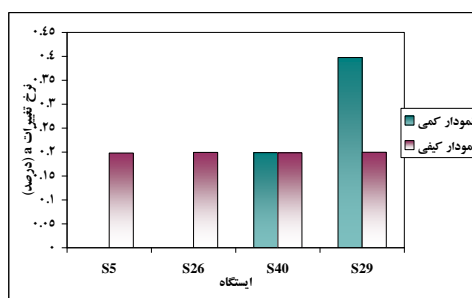
مقاومت زمین‌شناسی که از سه روش تعیین شده‌اند، با هم اختلاف دارند؛ بنابراین نیاز است نرخ تغییرات برای این پارامترها تعیین و بررسی شود. بدین‌منظور، از رابطه (۹) استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از سیستم طبقه‌بندی RMR به عنوان مرجع و نتایج به‌دست‌آمده از نمودار کیفی و کمی به عنوان مقادیر سنجش در نظر گرفته شده است. شکل شماره ۹، درصد نرخ تغییرات ثابت هوک - براون را در شرایطی که GSI متغیر است، نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که بیشترین نرخ تغییرات در ایستگاه S 29 رخ داده است و دلیل آن نیز اختلاف نُه‌واحدی بین GSI به‌دست‌آمده حاصل از طبقه‌بندی RMR و نمودار کمی است. شکل ۹-ب نشان می‌دهد ثابت S بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات GSI دارند، زیرا نرخ تغییرات برای این پارامتر به ۱۰۰ درصد می‌رسد، اما نکته مهم تأثیر این تغییرات بر پارامترهای ژئومکانیکی است؛ یعنی اینکه نبود قطعیت در GSI تا چه اندازه می‌تواند بر پارامترهای ژئومکانیکی تأثیر داشته باشد؟



۹-ب. ثابت توده سنگ S



۹-الف) ثابت توده سنگ m_b

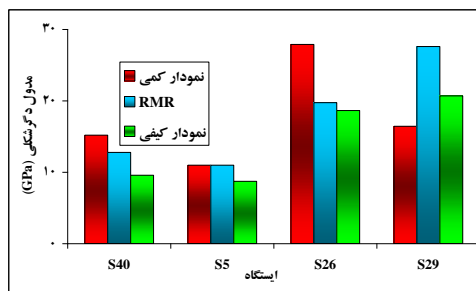


۹-ج) ثابت توده سنگ a

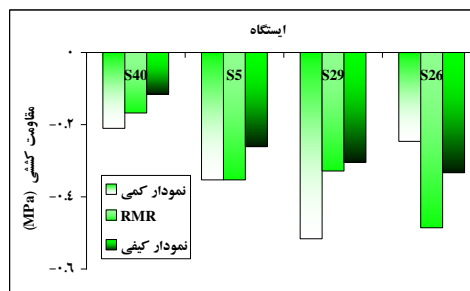
شکل شماره ۹. نرخ تغییرات ثابت توده سنگ سنگ بکر

۳-۶. تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

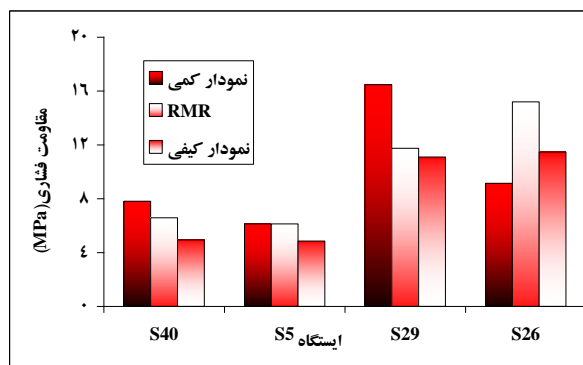
برای تعیین پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ از روابط ۸-۶ استفاده شده است. در این روابط، علاوه بر تأثیر فاکتورهای ثابت توده سنگ، مقاومت فشاری تک محوره نیز مؤثر است که خود نقش مهمی در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ دارد. برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی از نتایج موجود در شکل شماره ۷ و همچنین پارامتر مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر از جداول ۳-۶ استفاده شده است. شکل شماره ۱۰ نتایج به دست آمده را نمایش می دهد که بر اساس آن، تفاوت در شاخص مقاومت زمین شناسی، تغییرات قابل توجهی در مقادیر پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ دارد. برای مثال اختلاف در مدول دگرشکلی به دست آمده با روش های مختلف به هفت گیگاپاسکال می رسد؛ از این رو این اختلاف در نتایج را می توان بر اساس نرخ تغییرات تعیین کرد.



۱۰-ب) مدول دگرشکلی توده سنگ



۱۰-الف) مقاومت کششی توده سنگ

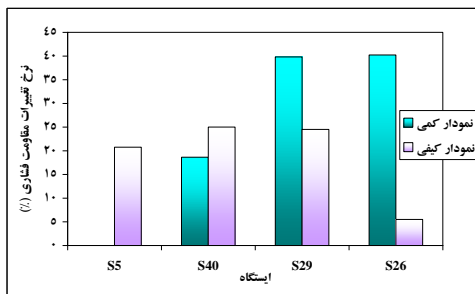


۱۰-ج) مقاومت فشاری توده سنگ

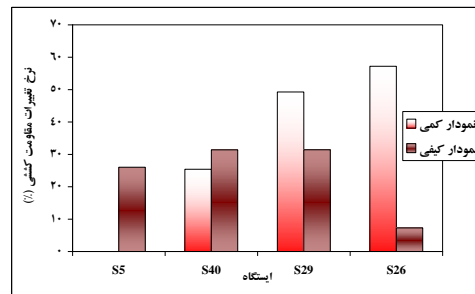
شکل شماره ۱۰. تعیین پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ با استفاده از پارامترهای هوک - براون

شکل شماره ۱۱ نرخ تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی را نشان می دهد. بر این اساس، بیشینه نرخ تغییرات، برای مقاومت کششی توده سنگ در ایستگاه S26 برابر با ۵۷ درصد رخ داده است. به عبارت

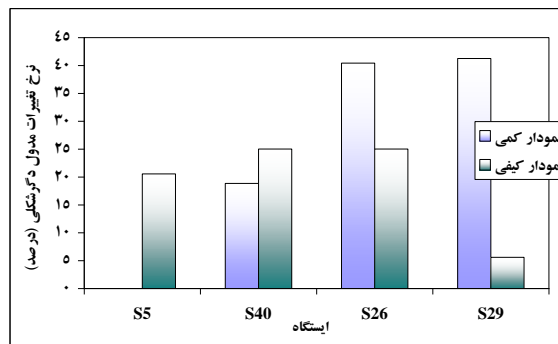
دیگر، مقاومت کششی به دست آمده حاصل طبقه بندی RMR و طبقه بندی کمی به ترتیب برابر با ۰/۴۸۵ و ۰/۲۵ مگاپاسکال است. همچنین شکل نشان می دهد برای مقاومت فشاری و مدول دگرشکلی پیش بینی شده، بیشترین نرخ تغییرات مربوط به دو ایستگاه S26, S29 و برابر با ۴۰ درصد است. به عبارت دیگر، مقاومت فشاری به دست آمده بر اساس طبقه بندی RMR و نمودار کمی برای ایستگاه S26 به ترتیب برابر با ۱۵/۲ و ۹/۱ مگاپاسکال، و برای مدول دگرشکلی نیز به ترتیب برابر با ۱۹/۷ و ۲۷/۹ گیگاپاسکال است. مطالعه نشان می دهد اختلاف بین نتایج به دست آمده بسیار بزرگ است و باید به آن توجه کافی شود، در غیر این صورت طراحی یا تحلیل با واقعیت مطابقت نخواهد داشت.



۱۱-ب) نرخ تغییرات مقاومت فشاری



۱۱-الف) نرخ تغییرات مقاومت کششی



۱۱-ج) نرخ تغییرات مدول دگرشکلی

شکل شماره ۱۱. نرخ تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

۷. نتیجه گیری

در تحلیل و طراحی سازه های سنگی، تخمین مقاومت کششی و فشاری و همچنین مدول دگرشکلی توده سنگ بسیار اهمیت دارند. برای این منظور، روابط متعددی توسعه داده شده است. یکی از این روابط، معیار شکست هوک - براون است که کاربرد فراوانی در این زمینه دارد زیرا در این معیار کیفیت

توده سنگ بر اساس شاخص مقاومت زمین شناسی در نظر گرفته می شود. تاکنون تحقیقات فراوانی برای تعیین شاخص مقاومت زمین شناسی، انجام شده و روش های گوناگونی نیز ارائه شده است. استفاده از هر یک از روش ها، نتایج متفاوتی نسبت به سایر روش ها دارد و تاکنون اثر این تغییرات بر پارامترهای ژئومکانیکی بررسی نشده است. در این مقاله تأثیر تفاوت شاخص مقاومت زمین شناسی به دست آمده از روش های مختلف نسبت به فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون و پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ مطالعه شده است. همچنین با ارائه رابطه ای پیشنهادی نرخ تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ بررسی شده است. در این رابطه، شاخص مقاومت زمین شناسی حاصل شده از طبقه بندی RMR به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. برای این منظور، از داده های میدانی مسیر بزرگراه چالوس استفاده شد.

نتایج نشان می دهد، حساسیت فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون (m_b, S, a) نسبت به تغییرات GSI پایین است، ولی پارامترهای ژئومکانیکی تحت تأثیر تغییرات شاخص مقاومت زمین شناسی قرار دارند. به طوری که بیشینه نرخ تغییرات، برای مقاومت کششی توده سنگ در ایستگاه S26 برابر با ۵۷ درصد رخ داده است. به عبارت دیگر مقاومت کششی حاصل طبقه بندی RMR و طبقه بندی کمی به ترتیب برابر با ۰/۴۸۵ و ۰/۲۵ مگاپاسکال است.

همچنین برای مقاومت فشاری و مدول دگرشکلی، بیشترین نرخ تغییرات در دو ایستگاه S26, S29 و برابر با ۴۰ درصد است. به عبارت دیگر، مقاومت فشاری بر اساس طبقه بندی RMR و نمودار کمی برای ایستگاه S26 به ترتیب برابر با ۱۵/۲ و ۹/۱ مگاپاسکال است و برای مدول دگرشکلی نیز به ترتیب برابر با ۱۹/۷ و ۲۷/۹ گیگاپاسکال است.

مطالعه حاضر نشان می دهد اختلاف بین نتایج به دست آمده بسیار بزرگ است و باید به آن توجه کافی شود، و گرنه طراحی یا تحلیل، با واقعیت مطابق نیست. در چنین شرایطی و با توجه به فقدان قطعیت در نتایج، پیشنهاد می شود برای تعیین شاخص مقاومت زمین شناسی حداقل از دو روش برای تعیین این پارامتر استفاده شود و در نهایت بر اساس قضاوت مهندسی، شاخص مقاومت زمین شناسی تعیین شود تا نتایج از قابلیت اتکای بیشتری برخوردار باشد.

منابع

1. Sari, M.; Karpuz, C.; Ayday, C. (2010), "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites", *Computers & Geosciences*, 36, pp. 959-969.
2. Kavur, B.; Cvitanovic, N. S.; Hrzenjak, p. (2015), "Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 73: 102-114.
3. Hoek, E.; Brown, E.T. (1980), "Underground Excavations in Rock", *Institution of Mining and Metallurgy*, London, pp. 527.
4. Hoek, E.; Carranza-Torres, C.T.; Corkum, B. (2002), "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition", In: *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS- TAC*, Toronto, ON, pp. 267-271.
5. Hoek, E.; Diederichs, M. (2006), "Empirical estimates of rock mass modulus", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, pp. 203-215.
6. Hoek, E. (1994), "Strength of rock and rock", *masses*, ISRM News J, pp. 4-16.
7. Hoek, E.; Brown, E. T. (1997), "Practical estimates of rock mass strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, pp. 1165-1186.
8. Marinos, P.; Hoek, E. (2000), "GSI-a geologically friendly tool for rock mass strength estimation", In: *Proceedings Geo Eng 2000 conference*, Melbourne, Australia.
9. Marinos, P.V. (2010)., "New proposed GSI classification charts for weak or for complex rock masses", *12th International Congress. Bulletin of the Geological Society of Greece*, Patras, pp. 1248-1258.
10. Sonmez, H.; Gokceoglu, C.; Ulusay, R. (2003), "An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16, pp. 251-269.
11. Hoek, E.; Carter, T.G. & Diederichs, M.S. (2013), "Quantification of the Geological Strength Index chart", *47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (ARMA 13-672*, San Francisco, CA, USA).
12. Bertuzzi, R.; Douglas, K. & Mostyn, G. (2016), "Comparison of quantified and chart GSI for four rock masses", *Engineering Geology*, 202, pp. 24-35.
13. Pells, P.J.N. (2008), "What happened to the mechanics in rock mechanics and the geology in engineering geology? ", *6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction*.
14. Bieniawski, Z.T. (1976), "Rock mass classifications in rock engineering", *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg.
15. Bieniawski, Z.T. (1989), "Engineering Rock Mass Classifications", John Wiley & Sons.
۱۶. بلورچی، م. ج.؛ انتظام، ا.؛ محمودپور، م.؛ کریم‌نژاد، س.؛ و شمشکی، ا. (۱۳۸۵)، «گزارش بررسی خطر سنگ ریزش در جاده چالوس، سازمان زمین‌شناسی کشور»، گزارش شماره: Geo 85-1.
17. Hoek, E. (2007), "Practical rock engineering", <https://www.rocsience.com/learning/hoek-s-corner>.