



Investigating the Effect of Variation of Geology Strength Index (GSI) on the Geomechanical Parameters of Rock Mass

Mehdi Mohammadi^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Vali-e- Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.10.2020

Revised: 06.04.2020

Accepted: 06.15.2020

Keyword:

Strength parameters
Geology strength index
Deformation modulus
Hoek-Brown criterion

***Corresponding Author:**

Mehdi Mohammadi

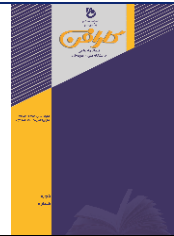
Email:

mehdi.mohammadi@vru.ac.ir

ABSTRACT

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.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

مهدی محمدی*^۱

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

چکیده

اطلاعات مقاله

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ 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 توده‌سنگ بر اساس طبقه‌بندی شاخص مقاومت زمین‌شناسی تعیین می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی اثر تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر پارامترهای ژئومکانیکی است. بدین‌منظور در گام نخست روش‌های مختلف تعیین این شاخص معرفی و مورد بحث قرار گرفته‌اند؛ سپس با داده‌های جمع‌آوری‌شده (مطالعه میدانی)، شاخص پیش‌بینی‌شده 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 قابل توجهی بر پارامترهای ژئومکانیکی دارد؛ به‌طوری‌که با اختلاف نه‌واحدی شاخص مقاومت زمین‌شناسی، تفاوت مدول دگرشکلی به بیش از هفت گیگاپاسکال می‌رسد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶

کلید واژگان:

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

*نویسنده مسئول: مهدی محمدی

پست الکترونیکی:

mehdi.mohammadi@vru.ac.ir



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 هوازدگی 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 [۴; ۵]. 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 [۷-۹] 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 هریک از روش‌ها منجر به نتایج متفاوتی نسبت به سایر روش‌ها - به‌ویژه نتایج گروه نخست که مرجع است - می‌شود [۱۰]. 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 حاصل شده پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ تخمین زده شده و نرخ تغییرات پارامترهای مورد نظر نیز با توسعه رابطه‌ای، مطالعه و بررسی می‌شود.

روش‌های تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی

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.

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

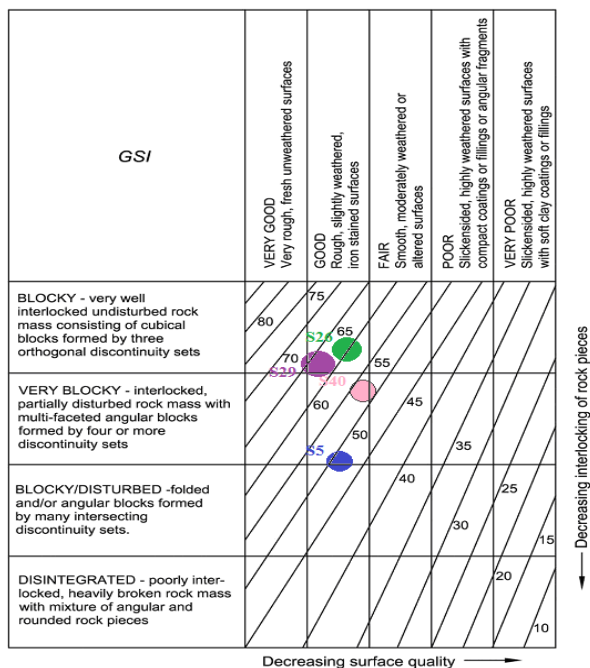
برای تعیین GSI بر اساس RMR باید توجه داشت که امتیاز دو پارامتر شرایط آب و جهت‌یافتگی ناپیوستگی به ترتیب ۱۵ و صفر، در نظر گرفته می‌شود [۶؛ ۱۰]. امروزه این روش اصلی‌ترین روش برای تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی شناخته می‌شود که از معایب آن می‌توان به کارایی پایین RMR در سنگ‌های با کیفیت پایین اشاره کرد؛ از این رو اطمینان به تخمین GSI در این گروه از سنگ‌ها با تردید همراه است [۶؛ ۱۰].

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

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

بر اساس توسعه نمودارهای کیفی

برای تعیین GSI به روش RMR چهار پارامتر مقاومت فشاری، شاخص کیفی توده‌سنگ، شرایط ناپیوستگی و فاصله‌داری 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 توده‌سنگ برای تخمین GSI توسعه دادند. شکل شماره ۱ این نمودار را نمایش می‌دهد [۷]. محور عمودی بیانگر درجهٔ قفل‌شدگی توده‌سنگ و محور افقی بیانگر کیفیت ناپیوستگی هاست. این نمودار در سنگ‌ها با کیفیت پایین نیز کاربرد دارد.



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

بر اساس توسعه نمودارهای کمی

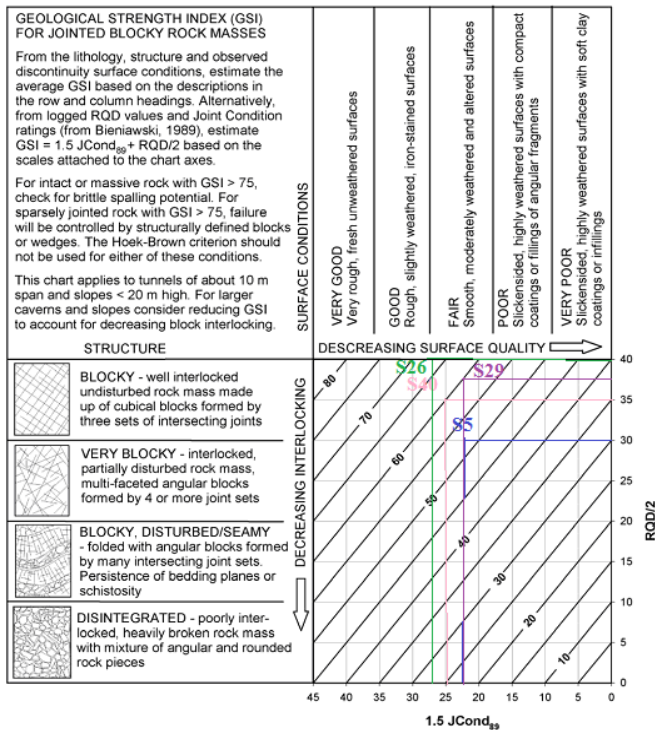
برای استفاده از نمودار کیفی نیاز به تجربه و مهارت افراد متخصص است؛ به همین دلیل محققان، مطالعات مختلفی را روی نمودار کیفی انجام دادند تا محورهای افقی و عمودی در شکل شماره ۱ را از حالت کیفی به کمی تبدیل کنند. آخرین نسخه نمودار کمی توسط هوک و همکاران در سال ۲۰۱۳ انتشار یافت. شکل شماره ۲ این نمودار را نمایش 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 تعیین‌شده 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 ۲. توصیف شرایط زمین‌شناسی بر اساس سیستم امتیازدهی توده سنگ ۱۹۸۹ [۱۵]

پارامتر	توصیف			
طول (m)	< 1	۳-۱	۱۰-۳	۲۰-۱۰
امتیاز	۶	۴	۲	۱

توصیف				پارامتر	
<۵	۵-۱	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	پرکننده نرم، دهانه	پرکننده سخت، دهانه	پرکننده سخت، دهانه	بدون پرکننده	پرکننده
بزرگ‌تر از پنج میلی‌متر	کوچک‌تر از پنج میلی‌متر	بزرگ‌تر از پنج میلی‌متر	کوچک‌تر از پنج میلی‌متر	بدون پرکننده	پرکننده
۰	۲	۲	۴	۶	امتیاز
تخریب‌شده	خیلی هوازده	هوازده	کمی هوازده	غیر هوازده	هوازده‌گی
۰	۱	۳	۵	۶	امتیاز



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

معيار شکست هوک - براون

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

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (2)$$

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

$$m_b = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (3)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (4)$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{\left(\frac{-GSI}{15}\right)} - e^{\left(\frac{-20}{3}\right)}}{6} \quad (5)$$

m_i ثابت سنگ بکر، D فاکتور اغتشاش که تابع تنش‌های القایی مانند موج ناشی از انفجار است و GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی است.

مقاومت فشاری توده‌سنگ از رابطه (۶) و مقاومت کششی توده‌سنگ از رابطه شماره (۷) تعیین می‌شود.

$$\sigma_{c(mass)} = \sigma_c S^a \text{ (MPa)} \quad (6)$$

$$\sigma_{t(mass)} = -\frac{s\sigma_c}{m_b} \text{ (MPa)} \quad (7)$$

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

$$E_{(mass)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{((GSI-10/40))} \text{ (GPa)} \quad (8)$$

داده‌های پژوهش

در این پژوهش تمرکز بر بررسی تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ است؛ بنابراین به مجموعه داده‌های استاندارد نیاز است که قابلیت تعیین GSI را داشته باشند و بتوان نتایج به‌دست‌آمده را با هم مقایسه کرد. بدین‌منظور مجموعه داده‌های معتبری از مطالعات گذشته جمع‌آوری شد [۱۶]. داده‌ها مربوط به مطالعات انجام‌شده روی شیروانی‌های موجود در مسیر بزرگراه چالوس است. شیروانی‌های مورد نظر، از سازه‌های مختلف گذشته و اطلاعات استفاده‌شده در این پژوهش، مربوط به چهار ایستگاه S40, S5, S29, S26 هستند. جداول شماره ۳-۶ اطلاعات مربوط به پارامترهای سیستم ژئومکانیکی توده‌سنگ و مقادیر RMR_{1989} را نمایش می‌دهند. همچنین شکل‌های ۳-۶ نمونه توده‌سنگ مربوط به ایستگاه‌های مورد نظر را نمایش می‌دهد [۱۶].

جدول ۳. امتیازدهی پارامترهای طبقه‌بندی RMR برای ماسه‌سنگ دربرگیرنده دامنه سنگی ایستگاه S40 [۱۶]

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

جدول ۴. امتیازدهی پارامترهای طبقه‌بندی RMR برای لای سنگ دربرگیرنده دامنه سنگی ایستگاه S5 [۱۶]

امتیاز	ارزش تعیین‌شده	پارامتر
۷	۸۵/۵۰	مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)
۱۳	۵۹	شاخص کیفی توده‌سنگ (درصد)
۸	۰/۰-۰۴/۵	فاصله‌داری درزه (m)
۱۵	سطوح درزه نسبتاً زیر، اندکی پُرشدگی و هوازدهی متوسط	شرایط سطح درزه
۱۳	خشک	جریان آب زیرزمینی
RMR=56		

جدول ۵. امتیازدهی پارامترهای طبقه‌بندی RMR برای ماسه‌سنگ دربرگیرنده دامنه سنگی ایستگاه S26 [۱۶]

امتیاز	ارزش تعیین‌شده	پارامتر
۱۷	۹۸/۱۴	مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)
۱۷	۸۲	شاخص کیفی توده‌سنگ (درصد)
۱۰	۰/۰-۳۵/۶۵	فاصله‌داری درزه (m)
۱۸	سطوح درزه زیر، با اندکی پُرشدگی و هوازده	شرایط سطح درزه
۱۵	کاملاً خشک	جریان آب زیرزمینی
RMR=67		

جدول ۶. امتیازدهی پارامترهای طبقه‌بندی RMR برای ماسه‌سنگ دربرگیرنده دامنه سنگی ایستگاه S29 [۱۶]

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



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



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



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



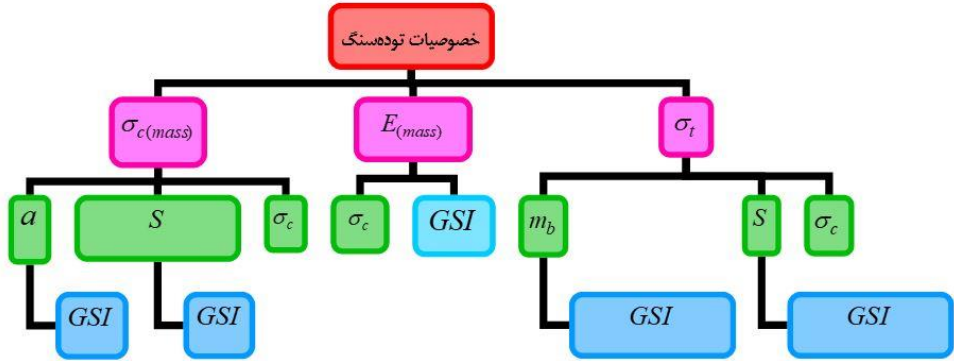
شکل ۵. نمای عمومی ماسه سنگ ایستگاه S26 [۱۶]

روش تحقیق

شکل شماره ۷ رابطه بین GSI و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ را نمایش می‌دهد. شکل نشان می‌دهد مقاومت‌های فشاری (σ_c) و کششی (σ_t) توده سنگ تابعی از فاکتورهای ثابت معیار شکست هوک - براون شامل a , S , m_b هستند و فاکتورهای گفته شده و مدول دگرشکلی توده سنگ (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 توده سنگ 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، A 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 حاصل شده پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ تخمین زده می‌شود و نرخ تغییرات پارامترهای مختلف به دست می‌آید. مرجع در این پژوهش، مقادیر به دست آمده بر اساس سیستم طبقه‌بندی RMR در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۷. تأثیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر پارامتر

بحث

تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی

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 S5 و S40 به ترتیب ۶۲ و ۵۸ تعیین می‌شود. جدول شماره ۷ مقادیر تعیین شده GSI را نمایش می‌دهد.

برای تعیین GSI بر اساس نمودار کیفی، از اطلاعات جداول و شکل‌های ۴-۶ استفاده شده است. مقادیر تعیین شده 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.

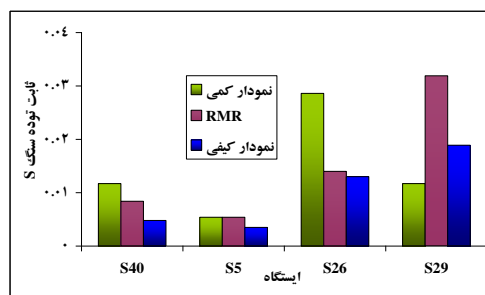
جدول ۷. تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

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

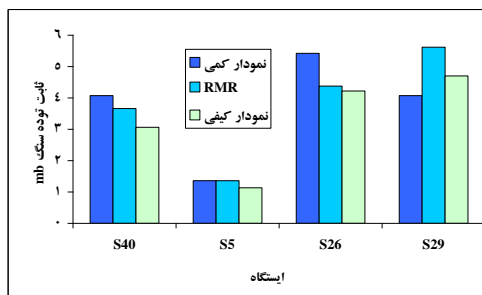
نتایج جدول شماره ۷ نشان می‌دهد مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف با هم متفاوتند. در بین نتایج به‌دست‌آمده از چهار ایستگاه، بیشینه اختلاف در ایستگاه S29 وجود دارد که مقدار تغییرات آن به ۹ واحد می‌رسد (اختلاف بین دو نتیجه حاصل از دو روش سیستم ژئومکانیکی توده‌سنگ RMR و نمودار کمیتی). دلیل این موضوع ناشی 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؛ هر چند که فرد دارای تجربه نیز باشد؛ بنابراین اهمیت دارد تأثیر نرخ این تغییرات یا تفاوت‌ها بر پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ بررسی شود.

تعیین پارامترهای معیار هوک - براون

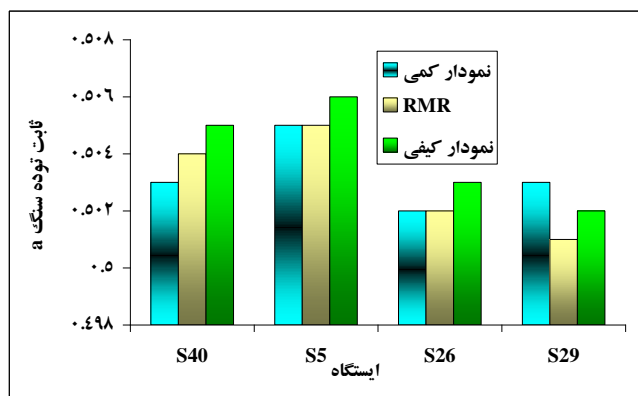
با تعیین GSI از سه روش مختلف برای هر ایستگاه و بررسی اختلاف در نتایج حاصله (جدول شماره ۷)، در این بخش فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون تعیین و نرخ تغییرات پارامترهای معیار هوک - براون مطالعه می‌شود. برای این منظور از روابط ۳-۵ برای تعیین پارامترهای m_b , S , a استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز در 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

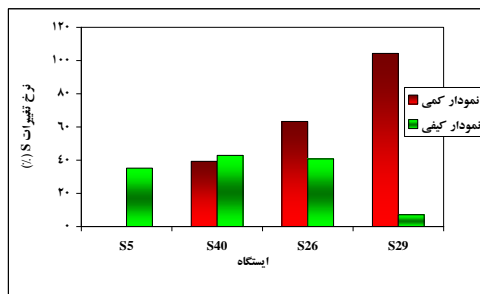


۸. ج) ثابت توده‌سنگ a

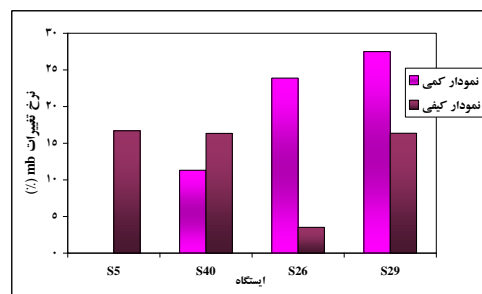
شکل ۸. تعیین پارامترهای ثابت معیار هوک - براون با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی

(بر مبنای جدول شماره ۷)

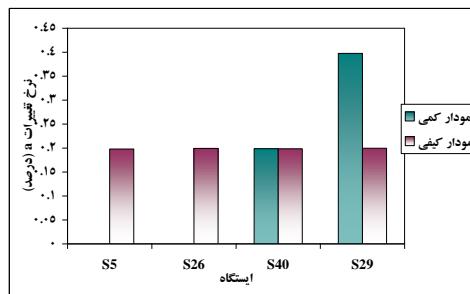
شکل شماره ۸ نشان می‌دهد، در هر ایستگاه، فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون متناظر با شاخص مقاومت زمین‌شناسی که از سه روش تعیین شده‌اند، با هم اختلاف دارند؛ بنابراین نیاز است نرخ تغییرات برای این پارامترها تعیین و بررسی شود. بدین منظور، از رابطه (۹) استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از سیستم طبقه‌بندی 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 ثوابت هوک - براون را در شرایطی که GSI متغیر است، نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که بیشترین نرخ تغییرات در ایستگاه S29 رخ داده است و دلیل آن نیز اختلاف نه‌واحدی بین GSI به‌دست‌آمده حاصل از طبقه‌بندی RMR و نمودار کمی است. شکل ۹-ب نشان می‌دهد ثوابت 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 توده‌سنگ S



۹.الف) ثابت توده‌سنگ m_b



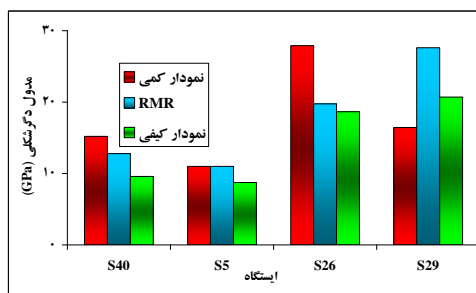
۹.ج) ثابت توده‌سنگ a

شکل ۹. نرخ تغییرات ثوابت توده‌سنگ سنگ بکر

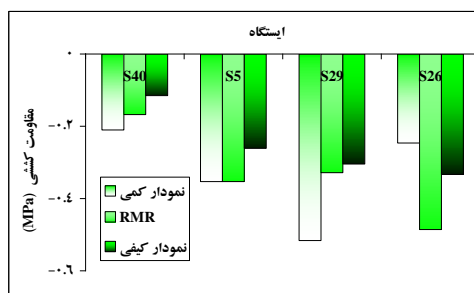
تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

برای تعیین پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ از روابط ۸-۶ استفاده شده است. در این روابط، علاوه بر تأثیر فاکتورهای ثابت توده‌سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره نیز مؤثر است که خود نقش مهمی در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ دارد. برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی از نتایج موجود در شکل شماره ۷ و همچنین پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر از جداول ۶-۳ استفاده شده است. شکل شماره شماره ۱۰ نتایج به‌دست‌آمده را نمایش می‌دهد که بر اساس آن، تفاوت در شاخص مقاومت زمین‌شناسی، تغییرات قابل توجهی در مقادیر پارامترهای

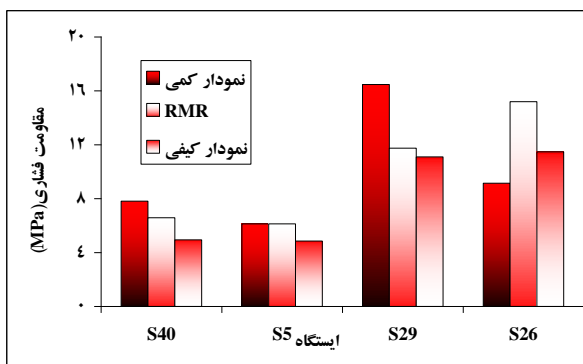
مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ دارد. برای مثال اختلاف در مدول دگرشکلی به دست آمده با روش های مختلف به هفت گیگاپاسکال می رسد؛ از این رو این اختلاف در نتایج را می توان بر اساس نرخ تغییرات تعیین کرد.



۱۰. (ب) مدول دگرشکلی توده سنگ



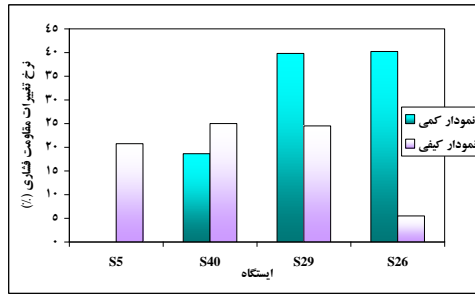
۱۰. (الف) مقاومت کششی توده سنگ



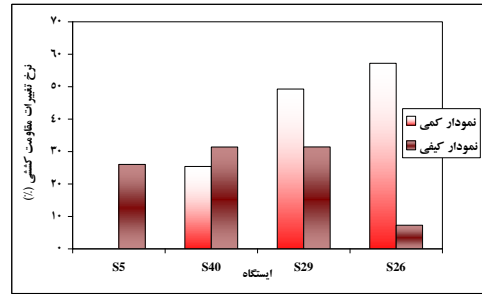
۱۰. (ج) مقاومت فشاری توده سنگ

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

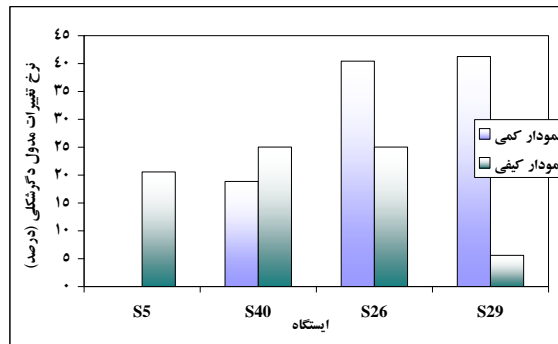
شکل شماره ۱۱ نرخ تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی را نشان می دهد. بر این اساس، بیشینه نرخ تغییرات، برای مقاومت کششی توده سنگ در ایستگاه S26 برابر با ۵۷ درصد رخ داده است. به عبارت دیگر، مقاومت کششی به دست آمده حاصل طبقه بندی RMR و طبقه بندی کمی به ترتیب برابر با ۰/۴۸۵ و ۰/۲۵ مگاپاسکال است. همچنین شکل نشان 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 ۱۱. نرخ تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

نتیجه‌گیری

در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی، تخمین مقاومت کششی و فشاری و همچنین مدول دگرشکلی توده‌سنگ 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 توده‌سنگ بر اساس شاخص مقاومت زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود. تاکنون تحقیقات فراوانی برای تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی، انجام شده و روش‌های گوناگونی نیز ارائه شده است. استفاده از هریک از روش‌ها، نتایج متفاوتی نسبت به سایر روش‌ها دارد و تاکنون اثر این تغییرات بر پارامترهای ژئومکانیکی بررسی نشده است. در این مقاله تأثیر تفاوت شاخص مقاومت زمین‌شناسی به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف نسبت به فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون و پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ مطالعه شده است. همچنین با ارائه رابطه‌ای پیشنهادی نرخ تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بررسی شده است. در این رابطه، شاخص مقاومت زمین‌شناسی حاصل شده از طبقه‌بندی RMR به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. برای این منظور، از داده‌های میدانی مسیر بزرگراه چالوس استفاده شد.

نتایج نشان می‌دهد، حساسیت فاکتورهای ثابت معیار هوک - براون (m_b , S , a) نسبت به تغییرات GSI پایین است، ولی پارامترهای ژئومکانیکی تحت تأثیر تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی قرار دارند. به‌طوری‌که بیشینه نرخ تغییرات، برای مقاومت کششی توده‌سنگ در ایستگاه S26 برابر با ۵۷ درصد رخ داده است. به عبارت دیگر مقاومت کششی حاصل طبقه‌بندی RMR و طبقه‌بندی کمی به‌ترتیب 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 طبقه‌بندی 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 می‌دهد 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 می‌شود برای تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی حداقل از دو روش برای تعیین این پارامتر استفاده شود و در نهایت بر اساس قضاوت مهندسی، شاخص مقاومت زمین‌شناسی تعیین شود تا نتایج از قابلیت اتکای بیشتری برخوردار باشد.

References

- [1] Sari, M., Karpuz, C., & Ayday, C. (2010). Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites. *Computers & Geosciences*, 36(7), 959-969. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.02.001>
- [2] Kavur, B., Štambuk Cvitanović, N., & Hrženjak, P. (2015). Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.09.022>
- [3] Hoek, E., & Brown, T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. Taylor & Francis. <https://books.google.com/books?id=XeGKeYa8d30C>
- [4] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. The 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), Toronto, Canada. <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Hoek-Brown-Failure-Criterion-2002.pdf>
- [5] Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- [6] Hoek, E. (1983). Strength of rock and rock masse. *Gherhnikue, ICE Publishing*, 33(3), 187-223. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/geot.1983.33.3.187#:~:text=The%20strength%20of%20such%20rock,shear%20strength%20of%20the%20discontinuities.>
- [7] Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- [8] Marinos, P., & Hoek, E. (2000, November 19–24). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. ISRM international symposium, Melbourne, Australia. <https://onepetro.org/ISRMIS/proceedings-abstract/IS00/All-IS00/ISRM-IS-2000-035/50905>
- [9] Marinos, V. (2010). New proposed GSI classification charts for weak or complex rock masses. 12th International Congress. Bulletin of the Geological Society of Greece, Patras, Greece. <https://ejournals.epublishing.ekt.gr/index.php/geosociety/article/view/11301>
- [10] Bertuzzi, R., Douglas, K., & Mostyn, G. (2016). Comparison of quantified and chart GSI for four rock masses. *Engineering Geology*, 202, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.002>

- [11] Hoek, E., Carter, T., & Diederichs, M. (2013, June 23-26). Quantification of the Geological Strength Index Chart. The 47th US Rock Mechanics /Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, USA. <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2013-Quantification-of-the-GSI-Chart.pdf>
- [12] 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(3), 251-269. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(03\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00002-2)
- [13] Pells, P. (2008). What happened to the mechanics in rock mechanics and the geology in engineering geology? 6th international symposium on ground control in mining and civil engineering construction, Capetown. Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- [14] Bieniawski, Z. T. (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, South Africa.
- [15] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=f4hTAAAAMAAJ>
- [16] Blourchi, M. J., Entezam, I., Mahmoudpour, M., & Ansari, F. (2006). *Investigation of the risk of falling rocks on Chalous Road*. G. S. o. Iran.
- [17] Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. Rocscience. <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>