

مبانی شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، کاربردها و محدودیت‌ها

حمیدرضا ربانی، حسین جمشیدی، بهزاد روحبخش و محمدحسین طالبی

شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

تعیین ویژگی‌های توده سنگ در طراحی‌های مهندسی سنگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در میان چندین روشی که برای تعیین این ویژگی‌ها وجود دارد، تحلیل برگشتی بهترین روش است که فقط در هنگام اجرا قابل انجام است. شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) با در نظر گرفتن پیوستگی مکانیکی توده سنگ، این امکان را فراهم می‌آورد تا اثرات زمین‌شناسی در تخمین ویژگی‌های مقاومتی و دگرشکلی به خوبی دیده شود. شاخص مقاومت زمین‌شناسی که در اواسط دهه نود میلادی معرفی شده، روشی کیفی و تجربی و شامل اطلاعات توصیفی زمین‌شناسی است که به طور خاص برای شناسایی و دسته‌بندی توده‌های سنگی ارائه شده است. این سیستم طبقه‌بندی با توجه به طبقه‌بندی‌های متداول توده سنگ توسعه و گسترش یافت و در انواع سنگها با دامنه وسیعی از کیفیت (قوی تا خیلی ضعیف و سست) کاربرد دارد. یکی از کلیدی‌ترین مزایای این شاخص، توانایی آن در شناسایی و طبقه‌بندی توده‌های سنگی است که تشریح و توصیف آنها بسیار دشوار می‌باشد. منطق زمین‌شناسی که در سیستم GSI وجود دارد، این مزیت را به آن بخشیده است. وضعیت بلوک‌دهی توده سنگی و شرایط سطوح بین این بلوکها دو معیار اصلی GSI برای تعیین دامنه امتیاز توده‌های سنگی است. در این مقاله سعی شده است در ابتدا به معرفی GSI و سیر تکاملی آن پرداخته و در ادامه شرایط برخی از انواع سنگها در این سیستم و کاربردها و محدودیت‌های آن ارائه شود.

۱- مقدمه

زمین پیچیده نباشد کاربرد مناسب‌تری دارند (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵). علی‌رغم پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای که در تمامی حیطه طراحی ژئوتکنیکی (به خصوص توسعه قابلیت روش‌های عددی در مهندسی سنگ) صورت گرفته، تاکنون پیشرفت‌هایی هم‌تراز با آن در توسعه روش‌های تعیین مشخصات توده سنگ صورت نگرفته است. غالباً برای کسب داده‌های مورد نیاز توده سنگ در طراحی از روش‌های: الف) آزمون‌های آزمایشگاهی، ب) آزمایش‌های برجا، ج) استفاده از طبقه‌بندی‌های توده سنگ و د) تحلیل‌های برگشتی استفاده می‌شود. به دلیل تفاوت در میزان سطحی از توده که توسط این روشها مورد بررسی قرار می‌گیرد (تفاوت در ماهیت مقیاس) و مسئله معرف

از چند دهه پیش، روش‌ها و ابزارهای طراحی تونل‌ها شروع به تغییر کردند. اگرچه این روش‌ها هنوز در مراحل اولیه رشد خود بودند، ولی روش‌های عددی به عنوان یکی از این ابزارها با چشم‌اندازی مناسب در تحلیل تفصیلی حفاری‌های زیرزمینی با پیچیدگی‌های بسیار زیاد به خصوص در مواردی که بکارگیری سیستم‌های طبقه‌بندی مانند RMR و Q جهت پیش‌بینی سیستم‌های نگهداری تونل‌ها با موفقیت همراه نبود، در حال توسعه بودند. به‌طور قطع هیچ مشکلی در مفهوم این طبقه‌بندی‌ها وجود ندارد و صدها کیلومتر تونل بر اساس این طبقه‌بندی‌ها طراحی و اجرا شده است و این طبقه‌بندی‌ها در مواقعی که شرایط

هوک و براون پی بردند که یک معیار شکست توده سنگ هنگامی می‌تواند ارزش کاربردی داشته باشد که بتوان آن را به مشاهدات زمین‌شناسی که به سادگی و سریعاً توسط یک زمین‌شناس مجرب برداشت شود، ارتباط داد (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۷). هوک و براون (۱۹۸۰a) و (۱۹۸۰b) بر اساس ارزیابی قفل‌شدگی بلوک‌های سنگی و شرایط سطوح بین این بلوک‌ها روشی را برای تخمین مقاومت توده سنگ‌های درزه‌دار پیشنهاد نمودند. این روش در طی سالیان متمادی تکامل یافت. این تلاشها منجر به توسعه یک سیستم طبقه‌بندی جدید به نام "شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)" گردید (هوک، ۲۰۰۷). شاخص GSI اولین بار در دهه نود میلادی به عنوان روشی کیفی جهت برقراری ارتباط معیار شکست هوک- براون با مشاهدات صحرایی زمین‌شناسی در سنگ‌های مقاوم معرفی شد. این روش امروزه بسیار توسعه یافته و دامنه وسیعی از سنگها را از مقاوم تا خیلی ضعیف دربر می‌گیرد و برای بهبود نتایج و قابلیت اطمینان بیشتر بصورت کمی نیز قابل برداشت و گزارش می‌باشد (مورلی، ۲۰۱۷).

۲- معیار شکست هوک- براون

مدول دگرشکلی و مقاومت توده سنگ پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل رفتار توده سنگ می‌باشند. تعیین این ویژگی‌ها یکی از دشوارترین کارها در حوزه مکانیک سنگ است. توسعه یک قانون کلی و یکپارچه جهت تخمین ویژگی‌های توده سنگ به دلیل وجود عوامل تاثیرگذار بسیار بر آنها، عملاً غیرممکن است (کای و همکاران، ۲۰۰۴). مقاومت توده سنگ درزه‌دار به ویژگی‌های قطعات سنگ بکر و وضعیت قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر و امکان لغزش یا چرخش آنها تحت شرایط تنش متفاوت بستگی دارد. وضعیت قرارگیری بلوکهای سنگی توسط شکل هندسی قطعات سنگ بکر و شرایط سطوح جداکننده آنها کنترل می‌گردد. قطعات زاویه‌دار با سطوح ناپیوستگی

بودن نقاط مورد بررسی، داده‌هایی که از هر کدام از این روش‌ها بدست می‌آید با یکدیگر یکسان نیستند. به عنوان مثال آزمون‌های برجا و آزمایشگاهی به دلیل این که به یک موقعیت مکانی خاص محدود می‌گردند، ممکن است حقیقتاً معرف خصوصیات کل توده سنگ نباشند. بعلاوه هزینه و زمان مورد نیاز می‌تواند به ویژه هنگامی که آزمون‌های برجا ضرورت می‌یابد، فرآیند کسب داده‌ها را پیچیده نماید. تحلیل برگشتی به ویژه در مکان‌هایی که ساخت و ساز در آن شروع شده است، یکی از بهترین روش‌ها برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی مناسب می‌باشد. در طراحی تونل‌های عمیق به‌ویژه در مناطق کوهستانی که بدست آوردن اطلاعات صحیح ژئوتکنیکی ضروری و حفاری پیش از شروع ساخت و ساز در آن مناطق دشوار است، آنالیز برگشتی نمی‌تواند گزینه مناسبی باشد. در این شرایط بکارگیری برداشت‌های زمین‌شناسی توصیفی و تفسیر آنها و استفاده از برخی از روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ که با پارامترهای اصلی توده در ارتباط است، بسیار مفید خواهد بود (مارینوس و کارتر، ۲۰۱۸).

ابزارهای عددی که امروزه در دسترس هستند این امکان را به طراحان تونل می‌دهند تا فرآیندهای شکست پیشرونده و در پی آن مهارها و نگهدارنده‌های مورد نیاز جهت حفظ پایداری موقت تونل در حال ساخت را تا پیش از نصب سازه‌های نگهداری دائمی تجزیه و تحلیل نمایند. با این حال این ابزارهای عددی نیازمند داده‌های ورودی قابل اطمینان در مورد ویژگی‌های مقاومتی و دگرشکلی توده‌های سنگ پیرامون تونل است. از آنجا که تعیین این ویژگی‌ها به طور مستقیم از طریق آزمون‌های برجا و آزمایشگاهی عملاً غیرممکن می‌باشد، نیاز به تخمین ویژگی‌های توده سنگ براساس ویژگی‌های سنگ بکر و مشخصات ناپیوستگی‌های توده سنگ پر رنگ می‌گردد. این امر منجر به توسعه معیارهای شکست توده سنگ گردید.

σ_1 ، σ_3 و σ_{ci} به ترتیب تنش اصلی بزرگ موثر در لحظه گسیختگی، تنش اصلی فرعی موثر در لحظه گسیختگی و مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر هستند. همچنین m_b ، a و s ثابت‌های مواد برای توده سنگ هستند. m_i ثابت سنگ بکر است که مقدار آن با توجه به نوع سنگ و بر اساس برازش یک منحنی بر نتایج آزمایش سه محوری سنگ بکر تعیین می‌شود. در حالتی که نتایج آزمایش سه محوری وجود نداشته باشد، می‌توان m_i را از نسبت مقاومت فشاری به کششی سنگ بکر بدست آورد. D فاکتور دست خوردگی توده سنگ ناشی از انفجار یا رهایی تنش است. این معیار و در حقیقت تمامی معیارهای منتشر شده فرض می‌نمایند که توده سنگ به صورت ایزوتروپ (همسان) رفتار می‌کند. به عبارت دیگر رفتار توده سنگ توسط جابجایی و چرخش بلوک‌های سنگی بدون این که در راستای مشخصی گسیخته شود، کنترل می‌گردد (مارینوس و هوک، ۲۰۰۰). یافته‌های محققین نشان داده‌اند هنگامی که مقیاس انتخابی مورد مطالعه از اندازه بلوک به اندازه کافی بزرگتر باشد، بکارگیری معیار شکست هوک-براون مقبولیت دارد. در توده‌های سنگی بزرگ که ابعاد بلوک‌های سنگی نسبت به اندازه سازه مورد نظر به میزان کافی کوچک هستند، مقاومت توده سنگ مقدار ثابتی خواهد بود. در شکل ۲ سیر تحولی یک نمونه سنگ بکر همسانگرد به یک توده سنگ به شدت ناهمسانگرد که گسیختگی آن توسط یک تا دو دسته ناپیوستگی کنترل می‌شود، نشان داده شده است.

۳- طبقه‌بندی توده سنگ

توده سنگ از نظر زمین‌شناسی عموماً ناپیوسته، انیزوتروپ (ناهمسان) و غیر همگن است و عدم قطعیت‌ها را در مدل‌سازی ایجاد می‌کند. مدل‌سازی دقیق توده سنگ به محققان این اجازه را می‌دهد که ابهامات و ناهماهنگی‌های ذاتی توده سنگ را کاهش دهند و در

خشن و زبر (عاری از مواد پرکننده و هوازده) نسبت به قطعات غیر زاویه‌دار با سطوح ناپیوستگی هوازده و پر شده از مواد نرم، انسجام و پایداری بهتری از خود نشان می‌دهند (هوک، ۲۰۰۷). معیار شکست هوک-براون بر اساس تئوری کلاسیک گریفیث بر پایه تعداد بسیار زیادی از آزمایشها ارائه شد. این معیار شکست غیرخطی تجربی ابتدا در سال ۱۹۸۰ توسط هوک پیشنهاد گردید. این معیار در سال‌های ۱۹۸۳، ۱۹۸۸، ۱۹۹۲، ۱۹۹۵، ۱۹۹۷، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ اصلاح گردیده است. هوک در سال ۱۹۸۸ نسخه‌ای به روز شده از معیار خود برای توده‌سنگ‌های درزه‌دار که در آن مفهوم توده سنگ بهم‌ریخته و غیر بهم‌ریخته دیده شده بود، ارائه نمود. در این نسخه، ثابت‌های m و s این معیار، بر اساس عدد RMR تعیین می‌گردید. به دنبال تحقیقات هوک و براون (۱۹۹۲) که بین توصیف زمین‌شناسی و RMR و پارامترهای معیار شکست هوک-براون ارتباطی را برقرار نمودند، هوک در سال ۱۹۹۴ نموداری ارائه نمود (شکل ۱) که این ارتباط را با GSI نشان می‌داد (برتوزی و همکاران، ۲۰۱۶). هوک و همکاران (۱۹۹۵) شکل تعمیم یافته معیار شکست هوک-براون را معرفی نمودند، که با وارد نمودن عدد GSI در آن توانایی تخمین ویژگی‌های توده سنگ‌هایی با کیفیت متوسط تا خیلی ضعیف فراهم گردید. آخرین نسخه این معیار شکست در سال ۲۰۰۲ معرفی شد. در این نسخه روابط تعیین m_b ، s و a اصلاح گردید. روابط بین تنش‌های اصلی در این معیار به صورت زیر است (هوک، ۲۰۰۷):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$





$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2)$$

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

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

اطلاعات کافی برای طراحی حیاتی است و بر این اساس روش‌های گوناگونی شکل گرفته است.

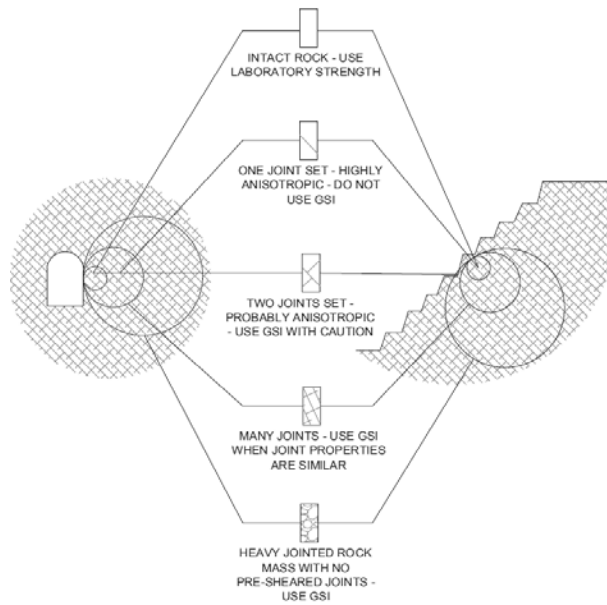
راستای این هدف روش‌های مدل‌سازی گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است. واقعیت این است که داشتن

GENERALISED HOEK-BROWN CRITERION		SURFACE CONDITIONS				
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right]^a$ <p> σ_1' = major principal effective stress at failure σ_3' = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of intact pieces of rock m_b, s and a are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass </p>		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slacksided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slacksided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE						
	<p>BLOCKY - well interlocked un-disturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	m_b/m_i 0.60 s 0.190 a 0.5 E_m 75,000 ν 0.2 GSI 85	m_b/m_i 0.40 s 0.062 a 0.5 E_m 40,000 ν 0.2 GSI 75	m_b/m_i 0.26 s 0.015 a 0.5 E_m 20,000 ν 0.25 GSI 62	m_b/m_i 0.16 s 0.003 a 0.5 E_m 9,000 ν 0.25 GSI 48	m_b/m_i 0.08 s 0.0004 a 0.5 E_m 3,000 ν 0.25 GSI 34
	<p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joints sets</p>	m_b/m_i 0.40 s 0.062 a 0.5 E_m 40,000 ν 0.2 GSI 75	m_b/m_i 0.29 s 0.021 a 0.5 E_m 24,000 ν 0.25 GSI 65	m_b/m_i 0.16 s 0.003 a 0.5 E_m 9,000 ν 0.25 GSI 48	m_b/m_i 0.11 s 0.001 a 0.5 E_m 5,000 ν 0.25 GSI 38	m_b/m_i 0.07 s 0 a 0.53 E_m 2,500 ν 0.3 GSI 25
	<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	m_b/m_i 0.24 s 0.012 a 0.5 E_m 18,000 ν 0.25 GSI 60	m_b/m_i 0.17 s 0.004 a 0.5 E_m 10,000 ν 0.25 GSI 50	m_b/m_i 0.12 s 0.001 a 0.5 E_m 6,000 ν 0.25 GSI 40	m_b/m_i 0.08 s 0 a 0.5 E_m 3,000 ν 0.3 GSI 30	m_b/m_i 0.06 s 0 a 0.55 E_m 2,000 ν 0.3 GSI 20
	<p>CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded blocks</p>	m_b/m_i 0.17 s 0.004 a 0.5 E_m 10,000 ν 0.25 GSI 50	m_b/m_i 0.12 s 0.001 a 0.5 E_m 6,000 ν 0.25 GSI 40	m_b/m_i 0.08 s 0 a 0.5 E_m 3,000 ν 0.3 GSI 30	m_b/m_i 0.06 s 0 a 0.55 E_m 2,000 ν 0.3 GSI 20	m_b/m_i 0.04 s 0 a 0.60 E_m 1,000 ν 0.3 GSI 10

شکل ۱- توصیف زمین‌شناسی طبقه‌بندی GSI و ارتباط آن با معیار شکست هوک و براون (هوک، ۲۰۰۴)

می‌گردد (ادلبرو، ۲۰۰۳). به عبارتی دیگر هدف از طبقه‌بندی توده سنگ فراهم نمودن پایه‌ای برای تخمین ویژگی‌های دگرشکلی و مقاومتی، ایجاد داده‌های کمی برای ارزیابی نگهداری و ارائه راهکار برای ایجاد ارتباط بین گروه‌های اکتشاف، طراحی و اجرا می‌باشد. خلاصه‌ای از نقش‌های سیستم‌های توده سنگ در شکل ۳ ارائه شده است (کای و همکاران، ۲۰۰۴).

در مکانیک سنگ دو واژه برای توصیف توده سنگ استفاده می‌شود: الف) طبقه‌بندی (Classification) و ب) شناسایی مشخصات (Characterisation). شناسایی مشخصات توده سنگ، توصیف آن با تاکید بر ویژگی‌های رنگ، شکل، ابعاد و غیره می‌باشد. در طبقه‌بندی، توده سنگ براساس ویژگی‌هایی که دارد و بر پایه یک سیستم یا مبانی خاص در گروه‌ها یا رده‌های مختلف دسته‌بندی



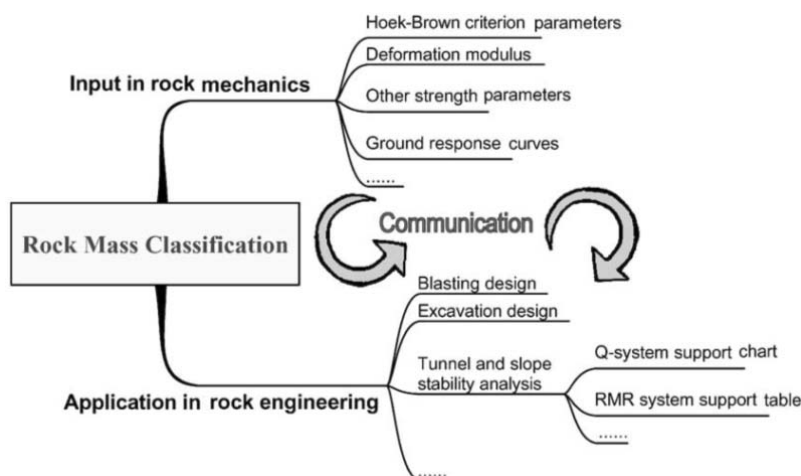
شکل ۲- اثر مقیاس بر اعتبار رابطه معیار هوک- براون با GSI (هوک و براون، ۱۹۸۰)

خارجی و ۳) پارامترهای اجرا. اگر هدف اصلی طبقه‌بندی، دسته‌بندی نمودن توده‌سنگ و تخمین ویژگی‌های مقاومتی و دگرشکلی توده سنگ است، تنها پارامترهای ذاتی توده مورد نیاز است (کای و همکاران، ۲۰۰۴). طبقه‌بندی توده سنگ یک روش غیرمستقیم در تخمین یا محاسبه ویژگی‌های توده سنگ با استفاده از یک معیار شکست می‌باشد (ادلبرو، ۲۰۰۳). رایدمولر و همکاران (۱۹۹۹) عنوان می‌نمایند که یک عدد به تنهایی نمی‌تواند رفتار اینزوتروپی (ناهمسانی) و وابسته به زمان توده سنگ را تشریح نماید. همچنین هیچکدام از این سیستم‌ها به دلیل این که بیش از حد ساده شده‌اند و بر یکسری محدود از پارامترها استوارند، مکانیسم‌های گسیختگی و دگرشکلی را در نظر نمی‌گیرند.

تعداد زیادی سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ برای اهداف عمومی و خاص معرفی و توسعه یافته‌اند. در این سیستم‌ها فاکتورهای تاثیرگذار مانند شرایط ناپیوستگی‌ها (تعداد دسته درزه‌ها، فاصله آنها، زبری و پر شدگیها و ...)، مقاومت سنگ بکر، تنش و وضعیت آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شوند. برآورد کیفی توده سنگ از طریق سیستم‌های طبقه‌بندی تجربی و ارتباط و همبستگی با پارامترهای طراحی به یک چالش مبدل شده است. از آنجا که اولین سیستم طبقه‌بندی توده سنگ در سال ۱۹۴۶ ابداع شد، سیستم‌های تجربی متعددی برای توده‌های سنگی با در نظر گرفتن ساختار و هدف طراحی پیشنهاد شده‌اند، که در جدول ۱ مشاهده می‌شود. هنگامی که از یک طبقه‌بندی جهت طراحی استفاده می‌شود، باید سه دسته پارامتر در نظر گرفته شوند: (۱) پارامترهای ذاتی توده سنگ، (۲) پارامترهای

جدول ۱- تاریخچه سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ (حافظور و همکاران، ۲۰۱۸)

S. No.	Classification System	Abbreviation	Applications	Year	Authors [References]
1	Rock load	-	Tunnels	1946	Terzaghi [5]
2	Stand-up time	-	Tunnels	1958	Lauffer [13]
3	Rock quality designation	RQD	General	1964	Deere [14,15]
4	Rock structure rating	RSR	Tunnels	1972	Wickham et al. [16]
5	Rock mass rating	RMR	tunnels	1973	Bieniawski [8]
6	Tunneling quality index	Q	Tunnels	1974	Barton et al. [9]
7	Geological strength Index	GSI	general	1995	Hoek et al. [12]
8	Rock mass Index	RMI	General	1995	Palmstrom [11]
9	Rock tunneling quality index by TBM excavation	Q_{TBM}	TBM tunnels	1999	Barton [17]
10	Continuous rock mass rating	CRMR	General	2003	Sen and Sadagah [18]
11	Rock mass excitability	RME	TBM tunnels	2006	Von Preinls et al. [19]
12	Rock mass quality rating	RMQR	General	2014	Aydan et al. [7]



شکل ۳- کاربرد سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ در مکانیک سنگ و مهندسی سنگ (کای و همکاران، ۲۰۰۴)

شکست همراه گردید. سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q به پارامتر RQD بسیار وابسته‌اند و با توجه به مشکلات اساسی که از دیرباز در استفاده از RQD وجود داشته (پلز و همکاران، ۲۰۱۷)، ضرورت معرفی یک سیستم طبقه‌بندی جایگزین وجود داشته است. این سیستم جدید بدون این که از پارامتر RQD استفاده نماید، بر روی مشاهدات زمین‌شناسی که منعکس کننده جنس سنگ، ساختار توده و تاریخچه زمین‌شناسی آن است، متمرکز گردید و به طور خاص برای تخمین ویژگی‌های توده سنگ توسعه یافت

۴- شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

در ابتدای استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR، به علت این که از این سیستم در توده سنگ‌های با کیفیت مناسب ($30 < RMR < 70$) تحت شرایط تنش متوسط استفاده شده بود، نتایج خوبی بدست می‌آمد. ولی بزودی مشخص شد که استفاده از این سیستم در توده سنگ‌هایی که کیفیت مناسبی ندارد، با مشکلاتی روبرو است. همچنین برقراری رابطه بین RMR و ثابت‌های m و s معیار شکست هوک و براون در توده سنگ‌های شدیداً خرد شده و ضعیف با

کمی‌سازی توده سنگ‌های ضعیف یا خرد شده براساس ناپیوستگی‌ها همانگونه که در طبقه‌بندی‌های RMR و Q انجام می‌شود، معنادار نیست. ب) هرگز قرار نبوده این سیستم جایگزین RMR و Q با قابلیت استفاده در طراحی مهارها و نگهدارنده‌های توده سنگ باشد. به عبارتی دیگر GSI به تنهایی ابزاری برای طراحی تونل‌ها نیست و تنها کارکرد آن تخمین ویژگی‌های توده سنگ است. از GSI به همراه مقادیر مناسب مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و ثابت ماده سنگ (m_i)، برای محاسبه مقاومت فشاری توده سنگ و مدول دگرشکلی آن استفاده می‌شود (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵).

این شاخص بر ارزیابی لیتولوژی، ساختار و شرایط سطوح ناپیوستگی استوار است و از بررسی‌های چشمی توده‌های سنگی رخنمون یافته در ترانشه‌ها، تونل‌ها و مغزه‌های حفاری شده تخمین زده می‌شود. سیستم GSI با تلفیق دو پارامتر اصلی که بلوک‌دهی توده‌سنگ و شرایط ناپیوستگی می‌باشد، برآورد می‌شود (شکل ۴). بنابراین GSI یک شاخص ساده و سریع زمین‌شناسی است که به سادگی در صحرا بکار گرفته می‌شود (مارینوس و هوک، ۲۰۰۰). همچنین محققین یادآور شدند که محورهای نمودار GSI مستقل از هم نمی‌باشند و غالباً بلوک‌دهی توده سنگ (محور قائم) با کیفیت سطح توده سنگ (محور افقی) مرتبط است. جایگاه یک توده سنگ با کاهش کیفیت از بالا و سمت چپ نمودار به پایین و سمت راست آن حرکت می‌نماید (برتوزی و همکاران، ۲۰۱۶). مارینوس و همکاران (۲۰۰۵) یادآوری نمودند که نمی‌توان تمام حالات را در نمودار GSI لحاظ نمود و آنها گوشه پایین سمت چپ و گوشه بالا سمت راست را از نمودار حذف نمودند.

(مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵). این سیستم جدید که GSI نامیده می‌شود، حیات خود را از تورنتو با داده‌های زمین‌شناسی دیوید وود (هوک و همکاران، ۱۹۹۲) آغاز نمود. پس از آن هوک (۱۹۹۴)، هوک و همکاران (۱۹۹۵) و هوک و براون (۱۹۹۷) از این طبقه‌بندی در معیار شکست هوک- براون استفاده کردند. از سال ۱۹۹۸ هوک و مارینوس سیستم GSI را براساس مشاهدات زمین‌شناسی خود در طی احداث تونل در یونان به نحوی تکمیل کردند تا بتواند توده سنگ‌های با کیفیت پایین را شامل شود (هوک و همکاران، ۱۹۹۸ و مارینوس و هوک، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱).







به دلایل زیر GSI به عنوان گزینه‌ای به جای RMR جهت تعیین پارامترهای توده سنگ معرفی گردیده است (برتوزی و همکاران، ۲۰۱۶):

- غلبه بر محدودیت RMR در توده سنگ‌های ضعیف،
- پرهیز از تاثیرگذاری مضاعف اثر آب زیرزمینی و جهت‌داری درزه،

همانند تمام سیستم‌های طبقه‌بندی، محدودیت‌هایی برای سیستم GSI وجود دارد، که می‌توان به تاثیر قضاوت فرد استفاده کننده و نیاز به تجربه بالا جهت در نظرگیری مقیاس اشاره کرد (موسستین و داگلاس، ۲۰۰۰).

کاندهال و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعات خود نشان دادند که هنگامی که مقیاس ۱۰ تا ۱۵ برابر اندازه بلوک انتخاب گردد، شرایطی بوجود می‌آید که معرف توده خواهد بود. دوران (۲۰۱۶) یادآوری می‌نماید مقیاسی که برای تعیین مقاومت توده سنگ قابلیت بکارگیری دارد، باید ۶ تا ۱۰ برابر اندازه بلوکها باشد.

شالوده اصلی طبقه‌بندی GSI تشریح دقیق زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ که اساساً کیفی است، می‌باشد. باید به دو نکته توجه نمود که، الف) بکارگیری اعداد و

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		STRUCTURE				
		DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓</p>	 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	80		N/A	N/A
	 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>		70			
	 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60			
	 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>		50			
	 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>		40			
	 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>		30			
					20	
					10	
		N/A	N/A			

شکل ۴- نمودار GSI [مارینوس و هوک، ۲۰۰۰]

فرض شده است که میان لایه‌های ضعیف رسی و شیلی دخالتهی در مقاومت توده سنگ ندارند. در صورتی که این میان لایه‌ها تاثیرگذار باشند، مقدار GSI به سمت راست حرکت می‌نماید (شکل ۵الف).

ب) لای سنگ‌ها و شیل‌ها: این گونه سنگ‌ها می‌توانند همگن و بدون ناپیوستگی (به غیر از سطوح لایه‌بندی) باشند. اگر سن این تشکیلات جوان و فعالیت‌های تکتونیکی عمده‌ای را متحمل نشده باشند، در این حالت سیستم طبقه‌بندی GSI قابل کاربرد نبوده و بکارگیری آن

خصوصیات پتروگرافی سنگ‌ها به گونه‌ای است که این امکان را نمی‌دهد که تمام حالات سنگ‌شناسی را بتوان در یک نمودار GSI در نظر گرفت. بنابراین چارتهای مختلفی در طی سالیان رشد GSI توسعه یافته است (مارینوس و هوک، ۲۰۰۰):

الف) ماسه‌سنگ‌ها: شاخص مقاومت زمین‌شناسی در این گونه سنگ‌ها دارای محدوده‌ی وسیعی بین ۴۵ تا ۹۰ است و اگر تحت تاثیر فعالیت‌های تکتونیکی برشی شده باشند، دامنه آن بین ۳۰ تا ۴۵ قرار می‌گیرد. در تمامی حالات

کم هوازده شده مناسب خواهد بود. در گرانیت‌های هوازده به دلیل افزایش ناهمسانگردی به خصوص در جایی که توده‌های سنگی دارای قفل‌شدگی ضعیف و سطوح ناپیوستگی صاف و هوازده است (به عنوان مثال $GSI=30-35$)، بایستی در تخمین GSI دقت فراوان نمود (شکل ۵د).

ه) افیولیت‌ها: در این گونه سنگها که عمدتاً از پریدوتیت و دیاباز تشکیل شده‌اند، شاخص اصلی آنها حتی در حالتی که دچار هوازده‌نگردی نشده‌اند، پر شدن ناپیوستگی‌های آنها با کانی‌های ضعیف ناشی از آلتراسیون یا دگرگونی است. بنابراین در مقایسه با گرانیت‌های هوازده در نمودار GSI به سمت راست و پایین حرکت می‌نماید. غالباً سرپانتینی شدن در افیولیت‌ها اتفاق افتاده و سبب گردیده که توده‌های سنگی ضعیفی ایجاد گردند (شکل ۵ه).


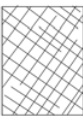




و) گنیس‌ها: در مقایسه با توده‌های گرانیتی هوازده یک جابجایی نسبتاً کوچکی به سمت راست و پایین نمودار GSI دارند. گنیس‌های هوازده همانند گرانیت‌های هوازده رفتار می‌نمایند (شکل ۵و).

ز) شیست‌ها: این سنگها از توده‌های نسبتاً مقاوم میکا شیست و کلسیت شیست تا توده‌های ضعیف تالک شیست، کلریت شیست و فیلیت طبقه‌بندی می‌گردند. تداوم سطوح شیستوزیته و شرایط ضعیف سطوح ناپیوستگی دامنه مقادیر GSI را محدود می‌نماید (شکل ۵ز).

حتی به صورت تقریبی توصیه نمی‌گردد. در این حالتها آزمون‌های آزمایشگاهی بکار گرفته می‌شود. هنگامی می‌توان از GSI در لای سنگها استفاده نمود که دارای درزه است و تحت فعالیت‌های تکتونیکی، برشی شدن را تجربه نموده باشند. در شیل‌ها نقش سطوح شیستوزیته مانند ضعیف، پر رنگتر می‌باشد ولی در توده سنگ وضعیت ناهمسانگردی را ایجاد نمی‌نمایند. وضعیت سطوح ناپیوستگی در این گونه سنگها معمولاً ضعیف است و حتی در بهترین حالت در وضعیت مناسب (Fair) قرار نمی‌گیرند. در بسیاری از حالات لای‌سنگها و شیلها به صورت میان لایه‌های نازک بین لایه‌های سنگی مقاوم قرار می‌گیرند و در این حالت کیفیت توده سنگ به سمت راست نمودار حرکت می‌نماید (شکل ۵ب).

ج) سنگ آهک‌ها: از نظر لایه‌بندی به انواع توده‌ای، لایه‌ای و نازک لایه تقسیم‌بندی می‌گردند. در این گونه سنگها تاریخچه تکتونیکی به صورت ظهور درزه‌ها خود را نشان می‌دهد. در تمام حالات سطوح ناپیوستگی عمدتاً خوب (Good) است و در بدترین حالت می‌تواند مناسب (Fair) در نظر گرفته شود. در سنگ آهک‌های نازک لایه بدلیل حرکت تفاضلی لایه‌ها نسبت به یکدیگر در اثر چین‌خوردگی، انتظار می‌رود که مقادیر GSI در آنها پایین‌تر باشد. در این نوع سنگها دسته درزه‌های متقاطع، از اثر تداوم سطوح لایه‌بندی کاسته و سبب می‌گردد GSI در این نوع سنگها قابلیت بکارگیری داشته باشند (شکل ۵ج).

د) گرانیت‌ها: وضعیت سطوح ناپیوستگی‌ها یا قفل‌شدگی بلوک‌های سنگی در گرانیت‌های سالم و بسیار


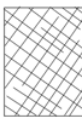




GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY	→				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity		50			
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces		40		30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes		30		20	
			20			
		N/A	N/A			10

*** WARNING**

The shaded areas are indicative and may not be appropriate for site specific design purposes. Mean values are not suggested for indicative characterisation; the use of ranges is recommended

1. Massive or bedded (no clayey cement present)
2. Brecciated (no clayey cement present)

شکل ۵الف - دامنه GSI در ماسه سنگها


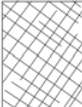




GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	1	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A		20	
					10	2

***WARNING**

The shaded areas are indicative and may not be appropriate for site specific design purposes. Mean values are not suggested for indicative characterisation; the use of ranges is recommended

1. Bedded, foliated, fractured
2. Sheared, brecciated

شکل ۵ب- دامنه GSI در لای سنگها و شیلها

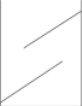





GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A		20	
						10

***WARNING**

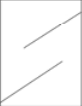





The shaded areas are indicative and may not be appropriate for site specific design purposes. Mean values are not suggested for indicative characterisation; the use of ranges is recommended

1. Massive
2. Thin bedded
3. Brecciated

شکل ۵-ج - دامنه GSI در سنگ آهکها

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY	→				
 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90			N/A	N/A	
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80					
 <p>VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	70					
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	60					
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50		40			
 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	40			30		
	30				20	
	20				10	
	10	N/A	N/A			
<p>↓ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES</p>						
<p>*WARNING The shaded areas are indicative and may not be appropriate for site specific design purposes. Mean values are not suggested for indicative characterisation; the use of ranges is recommended</p>						

شکل ۵- دامنه GSI در گرانیتها

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. <u>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</u> Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10
		↓ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
<p>*WARNING</p> <p>The shaded areas are indicative and may not be appropriate for site specific design purposes. Mean values are not suggested for indicative characterisation; the use of ranges is recommended</p>						

1. Fresh
2. Serpentinised with brecciation and shears

شکل ۵- دامنه GSI در افولیتها

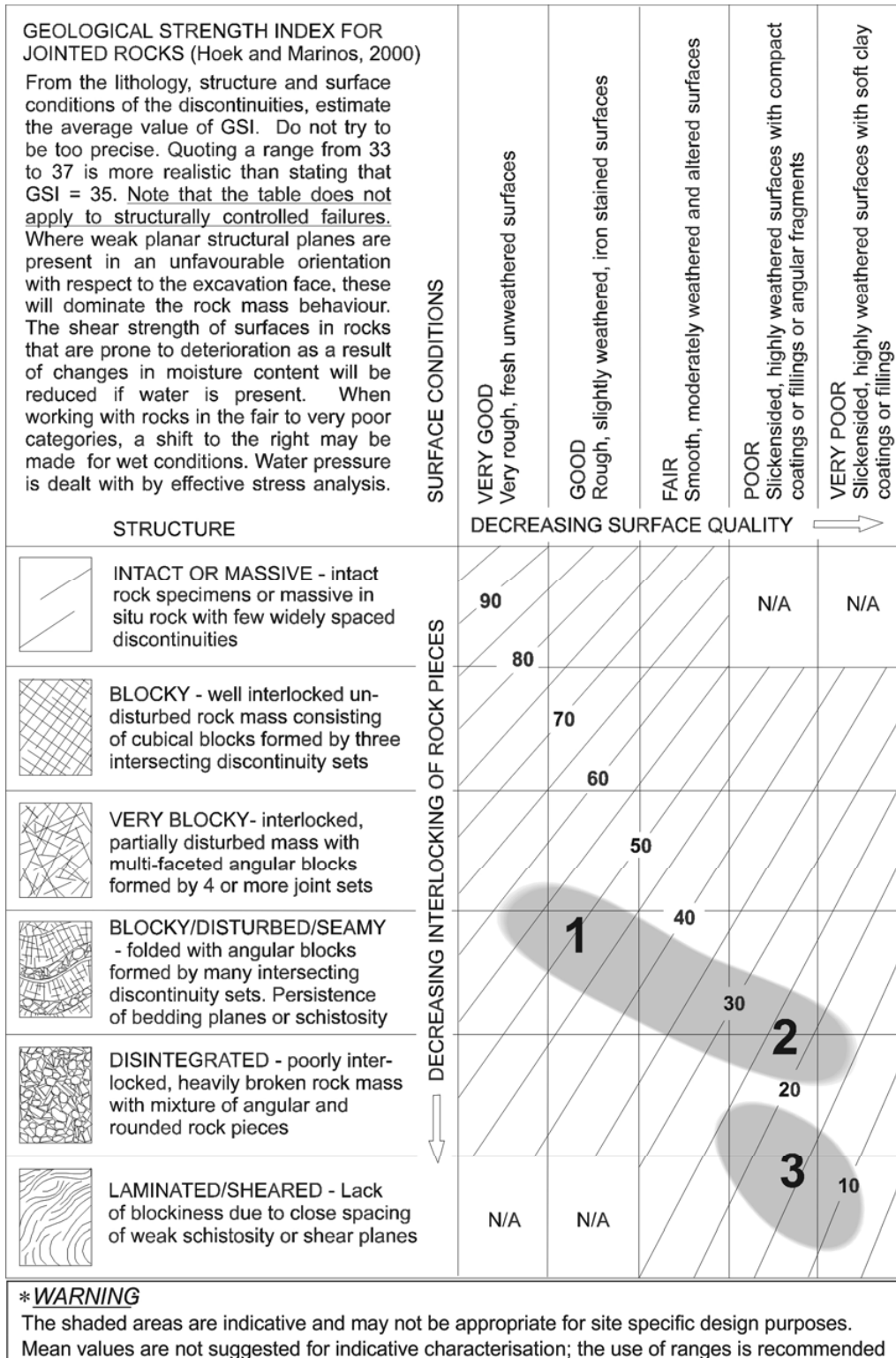
GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. <u>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</u> Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		<p>STRUCTURE</p> <p>DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
<p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p> <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p> <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p> <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p> <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p> <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES</p> <p>↓</p>	90			N/A	N/A
		80				
		70				
		60				
		50				
		40				
30						
20						
10						
N/A						
N/A						

*** WARNING**

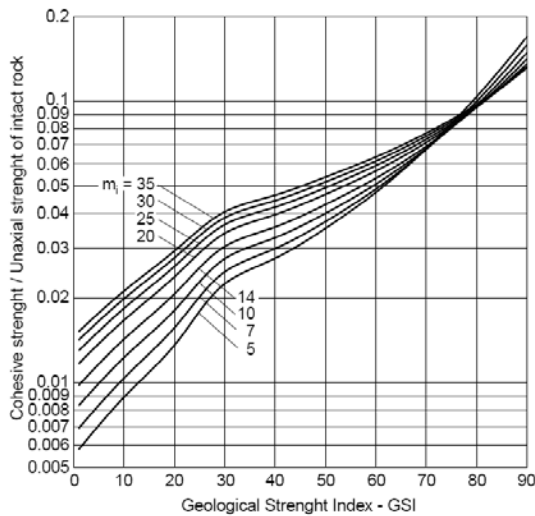
The shaded areas are indicative and may not be appropriate for site specific design purposes. Mean values are not suggested for indicative characterisation; the use of ranges is recommended

Sound gneiss. Shaded area does not cover weathered rockmasses.

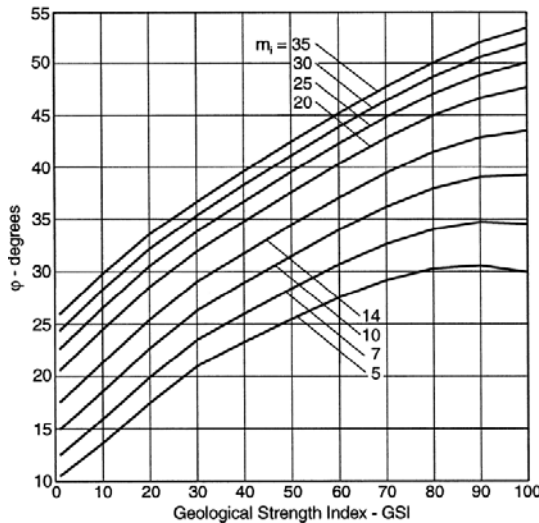
شکل ۵- دامنه GSI در گنیسها



شکل ۵- دامنه GSI در شیستها



شکل ۶- رابطه چسبندگی و شاخص مقاومت زمین‌شناسی



شکل ۷- رابطه زاویه اصطکاک داخلی و شاخص مقاومت زمین‌شناسی

ب) پیش‌بینی روش حفاری متناسب با توده سنگ در معادن و پروژه‌های عمرانی بخصوص در ساخت و ساز بزرگراه‌ها، بسیار مهم است. در سال ۲۰۰۰ و برای نخستین بار توسط هوک و کارزولوویچ (۲۰۰۰)، ارتباطی بین ماشین‌آلات و ارزیابی روش‌های حفاری با شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) ارائه شد. بر اساس مطالعات هوک و کارزولوویچ، توده سنگ‌هایی که به ترتیب با روش کندن (Digging)، تراشیدن (Ripping) و انفجار حفاری می‌گردند، به ترتیب معادل با $GSI < 40$ ، $40 < GSI < 60$ و

در هنگام استفاده از نمودار GSI نباید تنها به شکل نمایش داده شده در نمودار اکتفا کرد و بایستی به توصیفات هم توجه نمود. ممکن است بهترین حالت برای یک توده سنگ به گونه‌ای باشد که بین دو کلاس قرار بگیرد. همچنین قویاً توصیه شده است که از اختصاص یک عدد به عنوان امتیاز توده سنگ در سیستم GSI خودداری و به جای آن از یک دامنه استفاده شود (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵).

۵- کاربردهای GSI

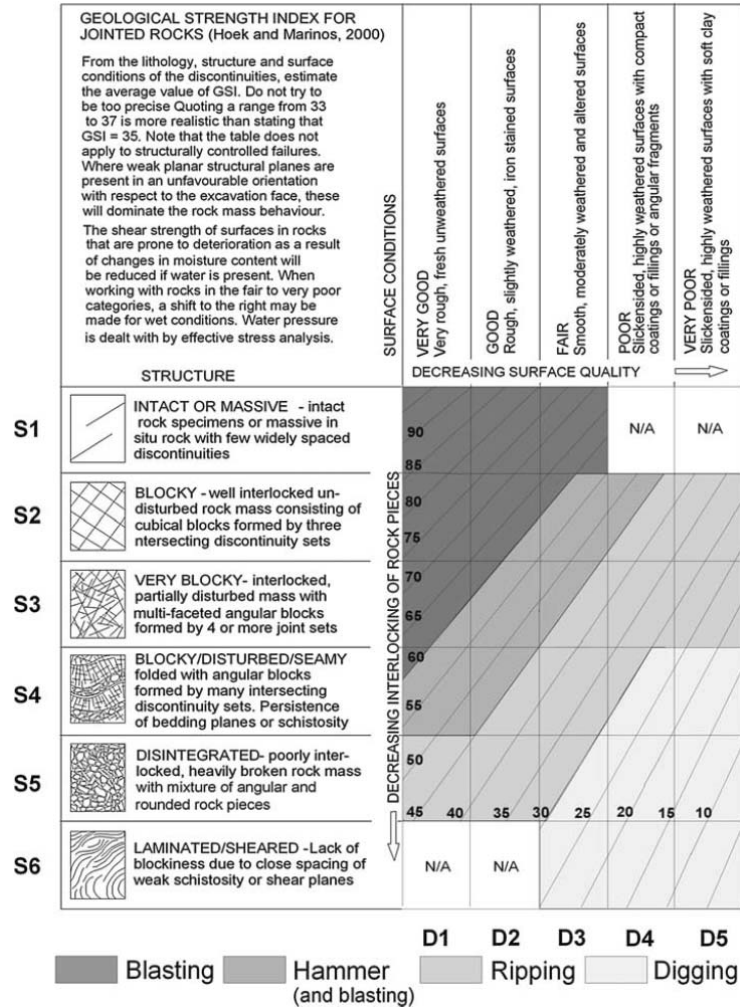
پس از سه دهه استفاده از GSI در زمینه‌های مختلف زمین‌شناسی، محدودیت‌ها و کاربردهای این شاخص مشخص گردیده است. در این بخش به ارزیابی کاربردهای شاخص GSI در علوم زمین‌شناسی، مکانیک سنگ و... پرداخته خواهد شد. به طور کلی می‌توان کاربردهای این شاخص را در دو دسته تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ و ارزیابی نوع روش حفاری جای داد.

الف) استفاده از نتایج شاخص مقاومت زمین‌شناسی در تعیین ثابت‌های معیار شکست هوک- براون جهت تعیین مقاومت و مدول دگرشکلی توده سنگ. در بخش‌های قبلی در رابطه با تخمین مقاومت توده سنگ توضیح کامل داده شده است. هوک و دیدریش (۲۰۰۶) جهت تخمین مدول دگرشکلی رابطه ۵ را ارائه نمودند:

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - 0.5D}{1 + e^{((60 + 20D - GSI)/12)}} \right) \quad (5)$$

E_i مدول سنگ بکر است که مقدار آن با توجه به نوع سنگ تعیین می‌گردد.

مقاومت برشی توده سنگ (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) را می‌توان از شکل‌های ۶ و ۷ تخمین زد (هوک و همکاران، ۱۹۹۸).



شکل ۹- نمودار GSI برای ارزیابی قابلیت حفاری توده سنگ‌هایی با $Is50 \geq 3 \text{ MPa}$

آن یک جهت ساختاری غالب کاملاً مشخص وجود دارد، استفاده شود. در این حالت گسیختگی توسط مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. به هر حال در صورت وجود یک زون برشی یا گسل می‌توان از سیستم GSI استفاده کرد (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵). همچنین تخصیص امتیاز GSI به توده سنگ‌های بسیار سخت که تعداد کمی ناپیوستگی با فاصله‌داری مشابه با ابعاد سازه در دست اجرا دارند، مناسب نیست (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۷).

۶- محدودیت‌های GSI

فرض اساسی در سیستم طبقه‌بندی GSI، وجود تعداد کافی ناپیوستگی با جهت‌داری تصادفی است به گونه‌ای که همانند یک توده ایزوتروپیک رفتار نماید. به عبارت دیگر، رفتار توده سنگ مستقل از جهت بارهای اعمال شده باشد. سیستم GSI و معیار شکست هوک- براون نیازمند این حقیقت هستند که توده سنگ به صورت همسانگرد رفتار نماید و گسیختگی در راستای یک ناپیوستگی مشخص یا فصل مشترک دو یا سه ناپیوستگی رخ ندهد. بنابراین، واضح است که سیستم GSI نباید در توده سنگ‌هایی که در

۷- عوامل تاثیرگذار بر مقدار GSI

توده سنگ‌هایی با جنس یکسان ولی تحت شرایط متفاوت با یکدیگر رفتار متفاوتی خواهند داشت و دامنه امتیاز آنها در این سیستم می‌تواند بسیار متفاوت باشد. در این بخش به بررسی برخی از عوامل تاثیرگذار بر GSI پرداخته می‌شود.

الف) اثر آب: شرایط آب‌های زیرسطحی در تعیین مقدار بسیاری از سیستم‌های طبقه‌بندی از جمله RMR، Q تاثیر دارد، اما در تعیین کیفی GSI، شرایط آب در نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین باید به صورت اصلاحی یا به صورت ارزیابی، اثر آن در نظر گرفته شود. حضور آب در ناپیوستگی‌ها و پرکننده‌ها باعث کاهش مقاومت برشی توده سنگ می‌شود. علی‌الخصوص تاثیر منفی حضور آب در سنگ‌های ضعیف تا خیلی ضعیف، بسیار زیاد می‌باشد. همچنین در اثر خیس بودن محیط درزه‌ها می‌توان در چارت GSI به سمت راست خصوصیات درزه را کاهش داد. حرکت به سمت راست در چارت در توده سنگ‌های ضعیف قابل توجه‌تر است (شکل ۱۰). تاثیر فشار آب منفذی در توده سنگ مربوط به تعیین تنش‌های موثر در طراحی‌ها می‌باشد و مستقل از چارت GSI است (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵).

ب) اثر هوازدگی: هوازدگی همانند آب باعث کاهش مقاومت توده سنگ می‌شود. هوازدگی یک توده سنگ در مقایسه با یک توده سنگ مشابه هوازده باعث می‌شود در نمودار GSI به سمت راست جابجا شود. در صورتی که قسمتی از سنگ بکر هوازده شود، در آن صورت باید ثابت‌های معیار شکست هوک- براون در توده سنگ نیز کاهش یابد. در صورتی که نرخ هوازدگی به حدی باشد که باعث از بین رفتن ساختارها و ناپیوستگی‌ها در سنگ شود، توده سنگ به خاک تبدیل شده و نمودار GSI در آن کاربرد ندارد (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵). با شروع

هوازدگی، کاهش مقاومت مشهود است. در شکل ۱۱ درجات تغییر شاخص GSI با توجه به افزایش میزان هوازدگی نشان داده شده است با افزایش میزان هوازدگی وضعیت بلوک‌ها به پایین سمت راست میل می‌نماید. کلاس ۳ و ۴ مرزی حیاتی در تخمین GSI است، زیرا بعد از آن کاهش قابل توجهی در خصوصیات توده سنگ رخ می‌دهد و قطعات بلوکی به خرده سنگ‌های کوچک تغییر می‌کنند (مارینوس و کارتر، ۲۰۱۸).

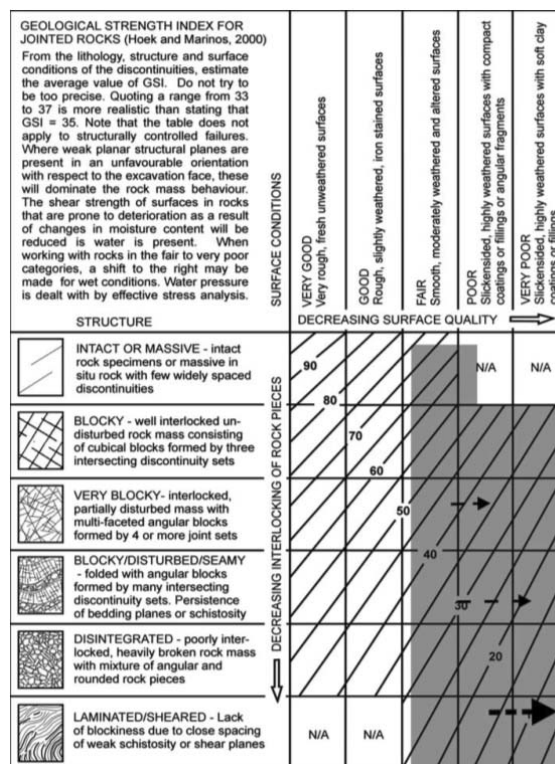
ج) اثر تکتونیزه شدن: سنگ‌ها بر اثر فشار، کشش، برش و خمش می‌توانند تکتونیزه شوند. هنگامی که حالت تکتونیزه سنگ‌ها کاهش می‌یابد از تعداد درزه‌ها و شکستگی‌ها نیز کاسته می‌شود و عدد GSI به سمت توده سنگ بکر تا کمی بلوکی پیش می‌رود. مقادیر پایین GSI زمانی اتفاق می‌افتد که توده سنگ دارای ناپیوستگی زیاد باشد. در مناطقی که سنگ‌ها در معرض نیروی فشاری قرار گرفته‌اند دچار شکستگی‌های بسیار کوچکی بصورت سیستماتیک می‌شوند یا حتی برش خورده و جدا می‌گردند که باعث می‌شود عدد GSI کاهش یابد (مارینوس و کارتر، ۲۰۱۸).

د) اثر دگرسانی: دگرسانی اغلب در عمق زیاد و در سنگ‌های دگرگونی در ارتباط با واکنش‌های هیدروترمال بوجود می‌آید. دگرسانی باعث کاهش کیفیت توده سنگ می‌شود و همانند هوازدگی باعث تغییر در خصوصیات سنگ‌بکر و تغییر در خصوصیات سطح ناپیوستگی می‌گردد. دگرسانی با درجه متوسط با پرشدگی‌ها و کریستاله شدن مجدد کانی‌ها همراه است و با پیشرفت آن سنگها تغییر ماهیت می‌دهد و ممکن است بافت سنگ به طور کلی تغییر یابد. بطور کلی با افزایش دگرسانی وضعیت نمونه در نمودار GSI به پایین سمت راست متمایل می‌گردد (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵).

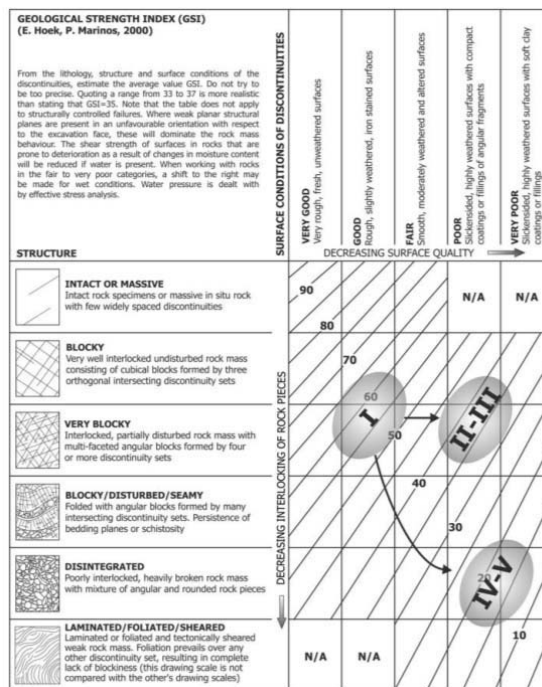
ه) اثر عمق: در اعماق بسیار زیاد (برای مثال ۱۰۰۰ متر یا بیشتر) ساختار توده سنگ بسیار به هم فشرده و پیوسته است به طوری که رفتار توده سنگ را بسیار شبیه به سنگ بکر می‌کند. در این حالت مقدار GSI به میزان ۱۰۰ تقریب زده می‌شود و استفاده از سیستم آن تقریباً بی‌معنی است. در این حالت، علت اصلی ناپایداری در اثر گسیختگی ماده سنگ می‌باشد. زمانی که آشفستگی‌های ناشی از تکنیک مهم باشد و تا عمق ادامه‌دار باشد، می‌توان در اعماق زیاد با احتیاط از نمودار GSI استفاده نمود (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۷).

۸- GSI و اسناد قراردادی

یکی از مشکلات اساسی در پروژه‌هایی که در درون یا بر روی توده‌های سنگی از جمله تونل، ترانشه و ... اجرا می‌شود، تغییر در شرایط زمین است. معمولاً در اکثر پروژه‌ها، حین اجرا بین کارفرما و پیمانکار در خصوص تعیین ساختار زمین مشخص شده در قرارداد، اختلاف نظر وجود دارد. به منظور حل این مشکل، از سیستم‌های طبقه‌بندی برای برآورد استفاده می‌شود (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵). از ابتدای سال ۹۶ در فهرست بهای راه و باند جهت پرداخت حق‌الزحمه عملیات ترانشه برداری از شاخص مقاومت زمین‌شناسی استفاده شده است. پیش از ارائه GSI در این فهرست بهاء، حق‌الزحمه از طریق بازدید میدانی گروه کارشناسی مجرب و با تهیه صورت جلسه، نوع رخنمون‌ها از نظر مقاومت بصورت تجربی و بر اساس داده‌های بدست آمده مشخص می‌گردید. در روش پیشین که بر اساس تجربه‌ی افراد، قضاوت صورت می‌گرفت، هیچ‌گونه معیار و مقیاسی برای صحت‌سنجی آنها وجود نداشت و اختلافاتی به وجود می‌آمد. با ورود شاخص مقاومت زمین‌شناسی در فهرست بهاء الزاماتی بیان شد و اعداد این شاخص هر قسمت از توده سنگ را بطور مجزأ تقسیم‌بندی می‌کند و برای هر قسمت عدد خاصی را



شکل ۱۰- تغییرات در نمودار GSI در صورت وجود آب (مارینوس و همکاران، ۲۰۰۵).



شکل ۱۱- تغییرات در نمودار GSI و ارتباط آن با میزان هوازگی (مارینوس و کارتر، ۲۰۱۸)

سطح درزه و ناپیوستگی‌ها می‌باشد. این شاخص می‌تواند در دامنه ۰ تا ۱۰۰ دسته‌بندی شود. اساس این روش کیفی است و دقت آن به سطح تجربه و تشخیص متخصص زمین‌شناسی در محل بستگی دارد.

۱۰- مراجع

1. Bertuzzi, R., Douglas, K. & Mostyn, G., "Comparison of quantified and chart GSI for four rock masses", Engineering Geology, vol. 202. pp. 24-35, 2016.
2. Cai, M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y. and Minami, M., "Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI system", Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 41, Issue 1, pp 3-19, 2004.
3. Carter, T. G. and Marinos, V., "Use of GSI for rock engineering design", Proceedings 1st international conference on applied empirical design methods in mining, Lima-Peru, pp. 1-19, 2014.
4. Cundall PA, Pierce ME, Mas Ivars D (2008) "Quantifying the size effect of rock mass strength", SHIRMS 2008—Y. Potvin, J. Carter, A. Dyskin (eds), Australian Centre for Geomechanics, Perth, 3-15.
5. Edelbro, C., "Rock mass strength: a review", Technical Report, LULEA University of Technology, 2003, 141 pages.
6. Hafeezur R., Wahid, A., Abdul, N., Jungjoo, K., Abdullah, A., Han-Kyu, Y., "Review of Rock-Mass Rating and Tunneling Quality Index Systems for Tunnel Design: Development, Refinement, Application and Limitation", Applied Sciences, 8. 27. 2018.
7. Hoek, E., Brown, E. T., "Underground excavations in rock", London: Institution of Mining and Metallurgy; 1980a.
8. Hoek, E., Brown, E. T., "Empirical strength criterion for rock masses", Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(GT9): 1013-35, 1980b.
9. Hoek, E., "Strength of rock masses" ISRM New Journal, 2 (2), 4-16, 1994.
10. Hoek, E.; Kaiser, P. K. & Bawden, W. F., "Support underground excavations in hard rock", Balkema, 1995.

گزارش می‌نماید که باعث می‌گردد اختلافاتی که بین کارشناسان مختلف به وجود می‌آید، برطرف شود و معیاری باشد که در هر لحظه بتوان اعداد و یا اعتراضات را بررسی کرد زیرا شاخص مقاومت زمین‌شناسی چه بصورت کیفی و چه کمی، از الگویی واحد تبعیت می‌کند.

استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی در شناسایی وضعیت توده‌های سنگی به دلیل تفسیرهای گوناگون (که وابسته به تجربه و سطح کارشناس دارد) می‌تواند مسئله‌ساز باشد. مارینوس و همکاران (۲۰۰۵) توصیه می‌نمایند GSI به منظور تخمین پارامترهای توده سنگ توسعه داده شود و به تنهایی نمی‌تواند در تعیین شرایط زمین مورد استفاده قرار گیرد. اخیراً در برخی از پروژه‌های راهسازی از سیستم GSI برای تعیین حق‌الزحمه پیمانکاران استفاده شده است. اگرچه انتقاداتی در مورد قابلیت این سیستم در این زمینه وجود دارد، ولی این روش نسبت به رویکردهای پیشین پایه علمی محکم‌تری داشته و با افزایش تجربه در بکارگیری GSI در شرایط مختلفی از توده‌های سنگی، استفاده و توسعه آن در این زمینه منطقی می‌باشد.

۹- نتیجه‌گیری

شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI سیستمی برای ارائه خصوصیتی از توده سنگ است که توسط هوک (۱۹۹۴) و هوک و همکاران (۱۹۹۵) معرفی و توسعه داده شده است تا بتواند معیار شکست را با مشاهدات زمین‌شناسی مهندسی در محل پیوند دهد. معیار شکست هوک- براون و GSI وابسته به آن به عنوان ابزاری برای تخمین مقاومت و تغییر شکل توده‌های سنگی دارای درزه و شکستگی به سرعت مورد پذیرش قرار گرفت و توسعه پیدا کرد و استفاده از آن براساس فصل مشترک درزه‌های اصلی و بلوک‌دهی گسترش یافت. سیستم GSI بر توصیف زمین‌شناسی دقیق از توده سنگ استوار است که بر پایه ساختارهای لیتولوژی و ساختارهای زمین‌شناسی و شرایط

- engineering structures in Rock", *Engineering Geology*, vol. 239, pp. 282–297, 2018.
23. Morelli, G. L., "Alternative Quantification of the Geological Strength Index Chart for Jointed Rocks", *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 35, Issue 6, pp 2803–2816, 2017.
 24. Mostyn, G. R., Douglas, K. J., "Strength of Intact Rock and Rock Masses", *GeoEng2000*. AGS, Melbourne, Australia, pp. 1389–1421, 2000.
 25. Pells, P., Bieniawski, Z. T. R., Hencher, S., Pells, S., "RQD: time to rest in peace", *Can Geotech J.*, 54(6):825-834, 2017.
 26. Tsimbaos G., Saroglou H., "Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI)", *Bull. Eng. Geol. Environment*, Vol. 69, Issue 1, pp 13–27, 2010.
 11. Hoek, E., Brown E. T., "Practical estimates of rock mass strength", *Int J Rock Mech Min Sci*, 34:1165–1186, 1997.
 12. Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M., "Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens Schist Formation", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), pp. 151-160, 1998.
 13. Hoek E, Karzulovic A., (2000), "Rock mass properties for surface mines", *Slope Stability in Surface Mining*. In: Hustralid WA, McCarter MK, van Zyl DJA (eds) Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), pp 59–70.
 14. Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., "Hoek- Brown failure criterion- 2002 edition" In: Bawden H.R.W., Curran, J., Telesnicki, M. (eds), *Proceedings of NARMS-TAC 2002*, Toronto, pp. 267-273.
 15. Hoek E., Diederichs M. S., "Empirical estimation of rock mass modulus", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, pp 203-215, 2006.
 16. Hoek, E., "Practical rock engineering", E-book, www.rocsience.com, 2007.
 17. Hoek, E., E.T. Brown, "The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018.
 18. Marinos, P., Hoek, E., (2000) "GSI: A geologically friendly tool for rock-mass strength estimation", *Proc. GeoEng2000 at the Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, Pennsylvania, pp 1422-1446.
 19. Marinos, P., Hoek, E., "Estimating the geotechnical properties of a heterogeneous rock mass such as flysch", *Bull. Eng. Geol. and the Environment*, 60(2), pp. 85-92, 2001.
 20. Marinos, V., P. Marinos and E. Hoek, "The geological strength index: applications and limitations", *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol.64. pp. 55–65, 2005.
 21. Marinos, P, Marinos, V & Hoek, E 2007, 'Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses', in M Romana, A Perucho & C Olalla (eds), *Underground Works Under Special Conditions*, Taylor and Francis, Lisbon, pp. 13–21.
 22. Marinos, V., T.G. Carter, "Maintaining geological reality in application of GSI for design of