

ارزیابی ویژگیهای مقاومتی سنگها با استفاده از نتایج آزمایش پانچ بلوکی و پانچ استوانه ای

ابراهیم جعفری^۱، محمد رضا نیکودل^{۱*}، مرتضی احمدی^۲

^۱گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی: nikudelm@yahoo.com

(دریافت: ۸۸/۵/۱۲؛ پذیرش: ۸۹/۹/۷)

چکیده

مقاومت فشاری تک محوری یکی از پارامترهای مهم مورد استفاده در طراحی های مهندسی سنگ می باشد. از آنجا که انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نیازمند نمونه ای استاندارد می باشد و تهیه نمونه استاندارد برای آن به خصوص از سنگهای سست، لایه دار و دارای سطوح ضعف زیاد بسیار سخت می باشد، روشهای تخمین این پارامتر به صورت غیر مستقیم مورد توجه محققین قرار گرفته است. استفاده از نتایج آزمایش پانچ یکی از جدیدترین این روشهاست. در این تحقیق آزمایشهای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، شاخص پانچ بلوکی، شاخص بارنقطه ای، سرعت عبور موج فشاری و خصوصیات فیزیکی بر روی ۶۳ نوع سنگ مختلف انجام شد. علاوه بر این آزمایشها، برای اولین بار از آزمایش پانچ استوانه ای نیز استفاده گردید. با استفاده از تحلیل نتایج آزمایشات انجام شده مقایسه ای بین دقت آزمایشات مختلف برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری انجام شد. این مقایسه به دو صورت کلی و در سه گروه سنگی مجزا انجام گردید. جدیدترین روش پیشنهادی در سال ۲۰۰۸ جهت استفاده از نتایج آزمایش پانچ بلوکی نیز ارزیابی مورد ارزیابی قرار گرفت. ضمناً امکان جایگزینی شاخص پانچ بلوکی در رده بندی مهندسی توده سنگ به جای مقاومت فشاری تک محوری بررسی گردید.

واژه های کلیدی: مقاومت فشاری تک محوری، شاخص پانچ بلوکی، شاخص پانچ استوانه ای، تخمین غیر مستقیم، شاخص بارنقطه ای، رده بندی سنگ

مقدمه

بسیاری از سازه های ساخت دست بشر بر روی سنگ و یا در داخل آن ساخته شده است. تعیین پارامترهای مختلف سنگ که در طراحی ها مورد استفاده قرار می گیرند از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. برای تعیین پارامترهای مورد نیاز، آزمایشهای صحرائی و آزمایشگاهی متفاوتی انجام می گیرد. یکی از پارامترهای مهمی که در طراحی ها مورد استفاده قرار می گیرد مقاومت فشاری تک محوری سنگ (UCS) است که از انجام آزمایش بر روی نمونه بکر سنگ در آزمایشگاه بدست می آید. این پارامتر در موارد ذیل مورد استفاده دارد:

تعیین میزان و زمان وقوع خرابی بر اثر نیروهای ایجاد شده در سنگهای احاطه کننده فضاهای زیرزمینی
ارزیابی میزان تغییر شکل یا نشست در نقاط مختلف سازه های مرتبط با سنگ

طراحی و ارزیابی مقاومت نهایی پی های سنگی

استفاده در معیارهای شکست سنگ

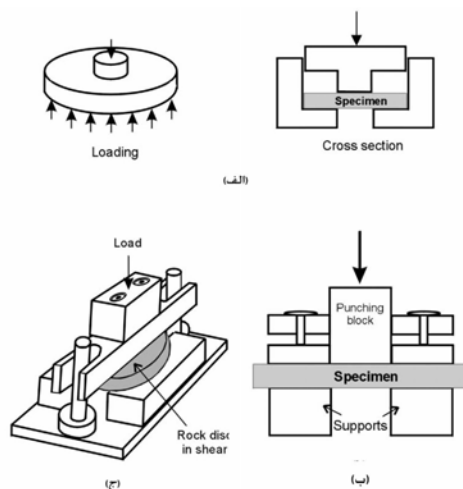
استفاده در رده بندی توده سنگ به روشهای متداول

تعیین نوع و مشخصات دستگاه حفاری

تعیین نوع و نتایج عملیات آتشیاری در سنگها (فهیمی فر ۱۳۸۰)
برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری به صورت مستقیم از آزمایش تعیین این پارامتر بر اساس استانداردهای رایج استفاده می گردد. انجام این آزمایش برخلاف سادگی فهم و درک منطق آن، نسبتاً گرانقیمت و مستلزم صرف وقت زیاد می باشد. یکی از مهمترین محدودیت هایی که انجام این آزمایش با آن روبروست موانع و سختی های تهیه نمونه استاندارد برای انجام آن می باشد. برای تهیه نمونه های مناسب و مطابق با شرایط ذکر شده در استانداردهای انجام این آزمایش، در اختیار داشتن مغزه های با کیفیت بالا الزامی است تا بتوان از آن نمونه های با نسبت طول به قطر مورد نظر (۲-۲/۵) را به دست آورد. تهیه مغزه با کیفیت مورد نیاز از برخی سنگها کاری بسیار دشوار و در برخی موارد؛ بخصوص در سنگهای سست لایه دار و دارای شکستگی یا سطوح ضعف زیاد مثل سنگهای متورق یا دارای لایه بندی ریز غیر ممکن است.

مواردی که نمونه بسیار نازک باشد (Sulukcu & Ulusay 2001).

در طی سالهای ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۰ میلادی، مزنتی و سوز (Vutukuri *et al.*)، ووتوکوری و همکاران (Mazanti & Sowers)، و استیسی (Stacey) از نمونه های دیسکی شکل حاصل از مغزه های حفاری شده برای تعیین مقاومت برشی مستقیم صفحات نازک سنگی استفاده کردند. این محققین از دستگاهی با عملکرد ساده و بر اساس اصول موجود در دستگاه پانچ استفاده کردند (شکل ۱) (Sulukcu & Ulusay 2001).



شکل ۱: ابزارهای پانچ مورد استفاده توسط: مزنتی و سوز (الف)، ووتوکوری و همکاران (ب) و استیسی (ج) (Sulukcu & Ulusay 2001)

مزنتی و سوز (شکل ۱ الف) از نمونه های دیسکی به دست آمده از مغزه های حاصله از سنگهای بکار گرفته شده به عنوان پی سازه برای آزمایش پانچ استفاده کردند. آنها براین باور بودند که این آزمایش می تواند به نحو مناسبی تاثیر پانچ کنندگی بار متمرکز بر لایه های پی سنگی سخت را که در زیر آنها لایه های نرمتر قرار گرفته اند، شبیه سازی کند. نتایج چنین آزمایش برش پانچی با مقاومت برشی بدون بار عمودی (چسبندگی ظاهری در نمودار موهر) قابل مقایسه بود. همچنین این تحقیق نشان داد که مقادیر دارای بهترین دقت برای نمونه هایی با نسبت ضخامت به قطر حدود ۰/۲ تا ۰/۲۵ به دست می آید (Sulukcu & Ulusay 2001).

ووتوکوری و همکاران و استیسی از ابزاری استفاده کردند که خود درون یک دستگاه بارگذاری عمودی معمولی قرار می گرفت و این بار عمودی اعمال شده در نمونه های دیسکی شکل یک برش مضاعف (Double) را ایجاد می کرد (شکل ۱ ب و ج).

به همین دلیل محققان بسیاری در طول سالیان اخیر تلاش نموده اند با استفاده از نتایج آزمایشات دیگر و روابط تجربی که بر اساس تحقیقات انجام شده به دست آمده به صورت غیر مستقیم پارامترهای حاصل از انجام این آزمایش را تخمین بزنند. یکی از جدیدترین این روشهای غیرمستقیم تخمین مقاومت فشاری تک محوری، استفاده از نتایج آزمایش پانچ سنگ می باشد.

آزمایش پانچ به دلیل سادگی در تهیه نمونه و کوچک بودن نمونه مورد نیاز که امکان تهیه آن از مغزه های ناقص یا کوتاه نیز وجود دارد و همچنین به دلیل دقت نسبتاً خوبی که در تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک محوری داراست به تازگی در تحقیقات انجام شده بر روی سنگها جایگاه خوبی پیدا کرده است.

در این تحقیق با بررسی مطالعات گذشته و انجام آزمایشات مختلف مانند آزمون مقاومت فشاری تک محوری، تعیین خصوصیات فیزیکی سنگ، تعیین سرعت موج فشاری، شاخص بار نقطه ای، شاخص بلوک پانچ و همچنین یک نوع پانچ دیگر به صورت استوانه ای که برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفته است؛ پارامترهای مقاومتی حدود شصت و سه نوع سنگ مختلف تعیین گردیده و پس از تحلیل نتایج به دست آمده روابط هر یک از پارامترها با سایر پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت از بین روشهای مختلف، آنهایی که بهترین برآزش و همبستگی را با نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری داشته اند معرفی شده اند.

مرور مطالعات گذشته

در خصوص استفاده از نتایج آزمایشاتی نظیر عدد چکش اشمیت، شاخص بار نقطه ای، تعیین سرعت صوت، تخلخل، چگالی، مقاومت کششی و برخی دیگر از آزمایشات، به منظور تخمین غیر مستقیم مقاومت فشاری تک محوری سنگ تحقیقات نسبتاً مفصلی در گذشته انجام گردیده است (Zhang 2005).

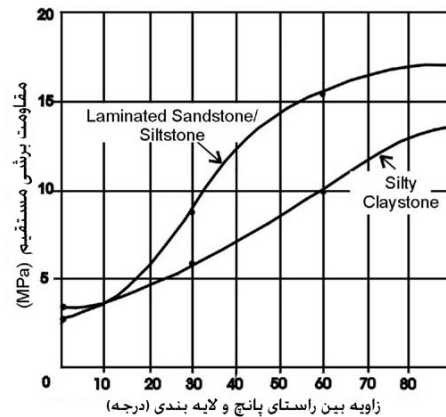
علاوه بر روشهایی که گفته شد به تازگی آزمایش شاخص پانچ هم جایگاه ویژه ای در میان محققین به عنوان یک آزمون جایگزین مناسب برای تعیین غیر مستقیم مقاومت فشاری تک محوری برای خود باز کرده است.

اولین اشاره در ارتباط با استفاده از آزمایش پانچ را می توان در مقاله نوشته شده توسط لاخاریت . مشاهده نمود که در آن زمان از آزمایش برش پانچ برای تخمین مقاومت برشی ماسه سنگ استفاده کرده بود. او نشان داد که وقتی قطر نمونه ها افزایش پیدا می کند مقاومت برشی ظاهری آنها هم افزایش می یابد و همچنین نشان داد که تغییر در ضخامت نمونه ها تاثیر چندانی در مقاومت برشی ظاهری به دست آمده ندارد به جز در

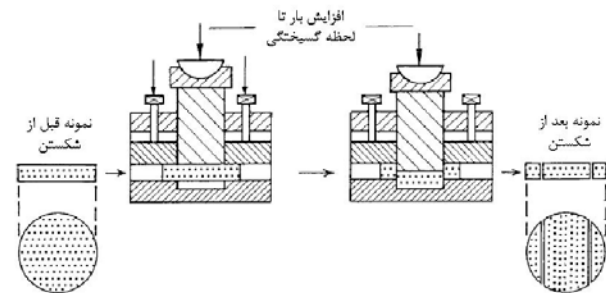
مختلف (برش، کالک آرنایت، کلسی لوتایت، دونیت، گنیس، سنگ آهک، مرمر، گل سنگ و ماسه سنگ) تهیه کرده بود، رابطه‌ای بین UCS، مقاومت کششی برزیلی و BPI ارائه نمود. وی پیشنهاد داد که می‌توان از BPI به عنوان شاخصی برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری استفاده نمود و رابطه‌ای هم برای این امر ارائه داد (رابطه ۲-۱) (Schrier 1988).

$$\text{رابطه ۳-۱} \quad \text{UCS} = 6.1 \text{ BPI} - 3.3$$

یک نوع دیگر از دستگاه پانچ را که اساسا شامل یک صفحه بالایی و یک صفحه در قسمت پایینی و یک پیستون استوانه‌ای پانچ کننده مورد استفاده قرار دادند. نتایج آزمایشات آنها نشان می‌داد که یک نسبت ضخامت به قطر پانچ ۰/۱۴ یک عامل خوب برای تولید داده‌های منطقی می‌تواند باشد. مدلسازی عددی انجام شده توسط این محققین نشان داد که مقاومت برشی پانچ به دست آمده به طور قابل توجهی از آنچه توسط آزمایش سه محوری به دست می‌آید بیشتر می‌باشد. نتایج این آزمایشات همچنین نشان داد که اعمال یک ضریب تصحیح برای رابطه مقاومت برشی پانچ ضروری می‌نماید (Sulukcu & Ulusay 2001).



شکل ۲- تغییرات مقاومت برشی مستقیم بدست آمده بر اثر تغییر زاویه بین راستای پانچ و لایه بندی؛/ستیزی ۱۹۸۰ (Sulukcu & Ulusay 2001)



شکل ۳: شکل شماتیک دستگاه ساخته شده در دانشگاه دلفت (Schrier 1988)

در تمامی مطالعات که تا به حال ذکر شد این نکته که میزان مقاومت با تغییرات اندازه نمونه، تغییر می‌کند امری قابل تأمل و توجه نشان داده بود اما این تاثیرات به طور عملی در هیچ کدام از این تحقیقات اصلاح نشد و در عمل تمامی تخمین‌ها بر اساس نتایج آزمایش اصلاح نشده استوار شده بود. بنابراین یک مطالعه آزمایشی برای تحقیق بر روی تاثیر اندازه نمونه بر روی BPI توسط اولوسای و گوکچه‌وگلو (Ulusay & Gokceoglu) در سال ۱۹۹۷ آغاز گردید و تا سال ۱۹۹۹ ادامه یافت. در این تحقیقات ۱۹۰۰ آزمایش BPI بر روی ۲۵ نوع مختلف سنگ انجام شد. دستگاهی که بدین منظور در دانشگاه حاجه‌تپه (Hacettepe) در ترکیه ساخته شد شبیه دستگاهی بود که در دانشگاه تکنولوژی دلفت ساخته شده بود (شکل ۴).

این تحقیقات اولیه که در ابتدا فقط برای تخمین مقاومت برشی سنگ استفاده می‌شد، بعدها توسط تاسلار (Taselaar) در سال ۱۹۸۲ و در کشور هلند به منظور پیشرفت آزمایش شاخص پانچ بلوکی گسترش یافت. نوع اولیه دستگاه آزمایش شاخص پانچ بلوک (شکل ۳) برای اولین بار در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه صنعتی دلفت (Delft Univ. of Technology) ساخته شد. بعدها این دستگاه را طوری طراحی کردند که به راحتی درون چارچوب ابزار آزمایش بار نقطه‌ای جای بگیرد. تاسلار در تحقیق خود ارتباط بین تغییرات شاخص پانچ بلوکی (BPI, Block Punch Index) و زاویه مابین راستای اعمال پانچ و لایه بندی یک نوع لای سنگ را بررسی کرد که یافته‌های او به طور تقریبی شبیه نتایجی بود که /ستیزی به دست آورده بود. این محققین این گونه نتیجه گیری کردند که می‌توان با تقسیم کردن بیشترین مقدار BPI به دست آمده به کمترین مقدار آن برای یک سنگ، میزان ناهمسانگردی مقاومتی را در سنگ بیان نمود (Sulukcu & Ulusay 2001).

در سال ۱۹۹۸ میلادی، شرایر (Schrier 1998) از همان دانشگاه از دستگاه ساخته شده توسط تاسلار در تحقیق خود استفاده کرد. او با استفاده از نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌هایی به ضخامت ۱۰ و قطر ۴۰ میلیمتر که از تعداد ۹ گونه سنگ

(Modified Rock Mass Rating) برای دسته بندی توده سنگها و همینطور براساس رابطه ارائه شده بین UCS و BPI تحقیق مورد بحث پیشنهاد گردید ($UCS = 5.5BPI_c$) که می-توان از BPI به عنوان یک پارامتر جایگزین برای مقاومت سنگ بکر در طبقه بندی توده سنگ استفاده نمود. در کنار اینها یک روش ارزیابی ناهمسانگردی مقاومتی در سنگها با استفاده از نمونه‌های جهت یافته به دست آمده از سنگهای لایه لایه توسط این محققین مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت یک فاکتور به نام ضریب تبدیل ناهمسانگردی مقاومتی (k_{σ}) برای تعیین مقاومت شاخص در پرمقاومت‌ترین راستا در شرایطی که نمونه‌ها دارای زوایای متفاوتی با سطوح ضعف باشند، ارائه گردید (Sonmez & Tunusluoglu 2008).

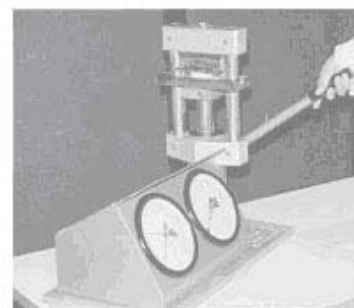
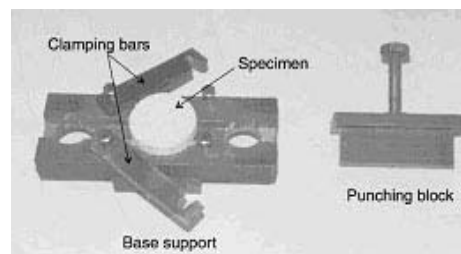
پس از آن، این تحقیقات ادامه یافت تا اینکه در سال ۲۰۰۱ سولوکچو و اولوسای (Sulukcu & Ulusay) با ترکیب داده‌های به دست آمده در تحقیقات چند سال قبل و نتایج آزمایشاتی که خودشان انجام داده بودند نتایج جدیدتری را به دست آوردند. آنها علاوه بر اینکه روابط جدیدی برای اصلاح عدد BPI براساس ابعاد نمونه و همچنین تخمین مقاومت فشاری تک محوری از نتایج اصلاح شده آزمایش پانچ بلوکی (BPI_c) (روابط ۲-۴ و ۵) ارائه دادند، با استفاده از روش المان محدود نشان دادند که اولاً شروع شکستگی در نمونه حین انجام آزمایش پانچ در قسمت بالایی رخ می‌دهد و دوماً نتایج آزمایش پانچ بلوکی برای تشخیص میزان مقاومت برشی سنگ مناسب نیستند.

$$BPI_c = 3499D^{-1.3926} t^{-1.1265} F_{t,D} \quad \text{رابطه ۲-۴}$$

$$UCS = 5.1 BPI_c \quad \text{رابطه ۲-۵}$$

همچنین در این تحقیقات با توجه به مقایسه‌ای که بین میزان دقت استفاده از نتایج پانچ و بار نقطه‌ای در تخمین مقاومت فشاری و کششی محصور نشده سنگ انجام گردید مشاهده شد که آزمایش پانچ در تخمین UCS از خطای کمتری نسبت به بار نقطه‌ای برخوردار می‌باشد. آنها به علت محدودیت در تهیه نمونه‌ها با جهت‌یابی‌های متفاوت نسبت به سطح ضعف نتوانستند در ارتباط با ضریب اصلاحی برای تاثیر تغییرات زاویه راستای پانچ و سطوح ضعف سنگ مطالعه‌ای انجام دهند.

برپایه همین تحقیقات هر سه محقق (اولوسای، گوکچه اوغلو و سولوکچو) به طور مشترک طی یک مقاله چاپ شده در مجله بین‌المللی مکانیک سنگ و علوم معدن در سال ۲۰۰۱ استفاده از روش پانچ بلوکی را به عنوان یک آزمایش استاندارد شده به انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ISRM پیشنهاد کردند. این روش پیشنهاد شده توسط اولوسای، گوکچه اوغلو و سولوکچو در



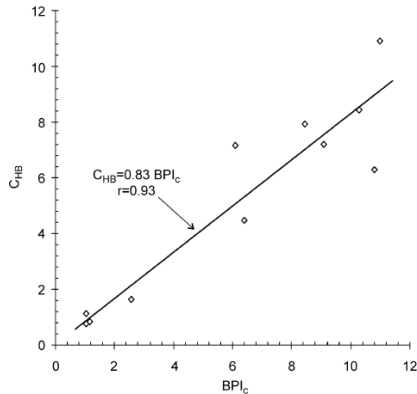
شکل ۴: دستگاه ساخته شده در دانشگاه حاجه‌تپه ترکیه

نمونه‌های تهیه شده دارای ضخامتهایی بین ۵ تا ۱۵ میلیمتر بوده و از لحاظ قطری هم از نمونه‌های مغزه با قطر BX (۴۲ میلیمتر) و NX (قطر ۵۴) که به طور معمول در اکثر مطالعات ژئوتکنیکی استفاده می‌گردند، استحصال شده بودند. نتایج آزمایشات نشان داد که اصلاح تاثیر اندازه در آزمایش BPI امری ضروری و غیرقابل چشم پوشی است و قطر ۱۰ و ضخامت ۵۰ میلیمتر را می‌توان به طور نسبی به عنوان ابعاد معیار و مناسب برای نمونه‌ها در نظر گرفت. در این تحقیقات با توجه به داده‌های تجربی حاصل از تحلیل رگرسیون نتایج، رابطه‌ای (رابطه ۲-۲) برای اصلاح تاثیر تغییرات اندازه بر نتایج به دست آمد تا با استفاده از آنها بتوان به مقادیر اصلاح شده BPI دست پیدا کرد (BPI_c). به علاوه یک همبندی قابل توجه بین نتایج BPI و UCS مشاهده گردید که این مسئله نشان می‌داد استفاده از نتایج آزمایش BPI برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری مخصوصاً برای سنگهای ضعیف و لایه لایه منجر به خطاهای قابل اغمازی می‌شود و این همبندی هم به صورت یک رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و شاخص پانچ بلوکی ارائه گردید (رابطه ۲-۳) (Sulukcu & Ulusay 2001).

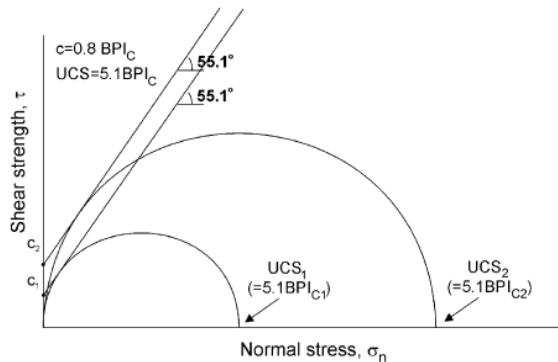
$$BPI_c = 3353D^{-1.3687} t^{-1.157} F_{t,D} \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

$$UCS = 5.5 BPI_c \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

اما این مزیت استفاده از BPI با سایر آزمایشات شاخص مورد مقایسه قرار نگرفت. با توجه به حدود بالا و پایین UCS استفاده شده در طبقه بندی RMR (Rock Mass Rating) و M-RMR

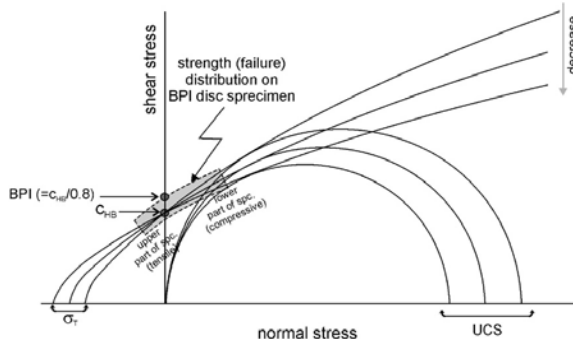


شکل ۵- ارتباط بین شاخص پانچ بلوکی اصلاح شده (BPI_c) و مقاومت برشی در حالت بدون تنش قائم (C_{HB}) (SONMEZ & TUNUSLUOGLU 2008)



شکل ۶- در صورت استفاده از BPI_c برای تعیین UCS و C_{HB} اصطکاک داخلی با تغییرات مقاومتی تغییری نمی کند (SONMEZ & TUNUSLUOGLU 2008)

از آنجا که در نمودار موهر کولمب مقادیر مقاومت فشاری و چسبندگی و شیب خط که به نوعی نشان دهنده مقدار M_I (پارامتر وابسته به نوع سنگ در معیار هوک-براون) می باشد، به هم وابستگی زیادی دارند و با ثابت بودن یکی از آن سه، دو تای دیگر تحت تاثیر تغییرات یکدیگر تغییر پیدا می کنند (شکل ۷).



شکل ۷: با ثابت بودن مقدار C_{HB} ، دو پارامتر UCS و M_I با تغییر یکدیگر تغییر پیدا می کنند (SONMEZ & TUNUSLUOGLU 2008)

مجموعه منتشر شده از طرف ISRM به عنوان روش استاندارد و پیشنهادی این انجمن در سال ۲۰۰۶ معرفی گردید.

از معدود مطالعات انجام شده در داخل کشور می توان به نیکودل و باغبانیان (۱۳۸۰) و احمدی (۱۳۸۳) اشاره کرد. نیکودل و باغبانیان با استفاده از دستگاه پانچ به بررسی پارامترهای مقاومتی سنگهای ناهمسانگرد پرداختند.

احمدی با استفاده از دستگاه ساخته شده برای پانچ نمونه های با قطر ۵۴ میلیمتر و انجام آزمایش پانچ بلوکی بر روی آهکهای لار و دلچای؛ ضریب های تبدیل شاخص پانچ بلوکی به مقاومت فشاری تک محوری را برای این آهکها به ترتیب ۵/۵۳ و ۵/۴۵ اعلام کرد (احمدی ۱۳۸۳).

سونمز و تونوسلوواوغلو (SONMEZ & TUNUSLUOGLU 2008) در تحقیقی که انجام دادند به نتایج جدیدی در ارتباط با استفاده از نتایج آزمایش پانچ به عنوان شاخصی برای تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ دست یافتند. نتیجه کار ایشان در سال ۲۰۰۸ منتشر گردید. این دو محقق با در نظر داشتن این نکته که عدم دخالت نوع سنگ در تخمین مقاومت فشاری تک محوری سنگ از روی نتایج آزمایش پانچ به روشی که محققان قبلی پیشنهاد کردند می تواند مقادیر مشابهی از مقاومت فشاری تک محوری برای دو سنگ متفاوت که شاخص پانچشان برابر است، به دست دهد؛ این تحقیق را طرح ریزی کردند. در این تحقیق معیار شکست هوک-براون و پارامترهایی که در آن دخیل هستند به طور مفیدی مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا بین مقادیر چسبندگی لحظه ای در شرایط عدم وجود تنش قائم (C_{HB}) یا همان مقاومت برشی سنگ که از رابطه معیار شکست هوک-براون به دست آمده است و مقادیر BPI_c برازشی انجام داده شد (شکل ۵).

سپس با قرار دادن مقادیر متناظر هر کدام از پارامترهای UCS و C_{HB} که با استفاده از پانچ به دست می آید مشاهده گردید که در مقادیر مختلف مقاومت فشاری تک محوری (UCS) میزان زاویه اصطکاک داخلی هیچ تغییری نخواهد کرد (شکل ۶).

لازم به توضیح است که گنیس با توجه به منشأ و ویژگیهای مشترکی که با سنگهای آذرین دارد در این دسته قرار گرفته است. همچنین در خصوص مرمر هم با توجه به حضورش در دسته سنگهای رسوبی شیمیایی، چنین توجیهی مد نظر قرار گرفته شده است. در این میان بیشترین تعداد را سنگهای رسوبی تخریبی و بیشترین تنوع لیتولوژیکی را گروه سنگهای آذرین به خود اختصاص داده اند.

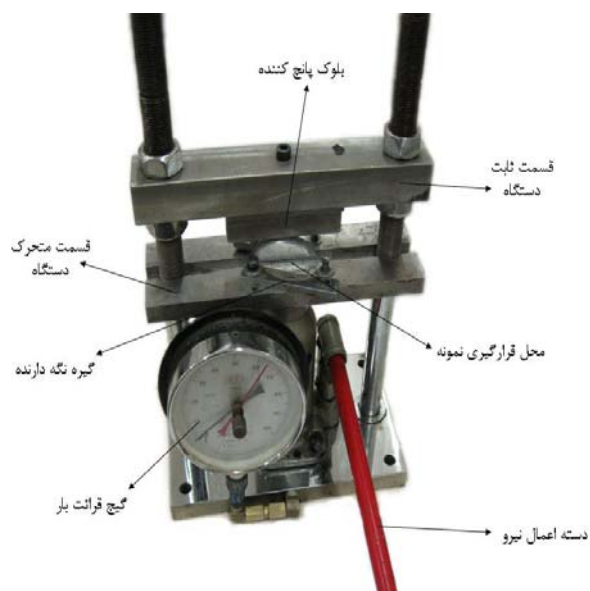
جدول ۱: دسته بندی انواع مختلف سنگ مورد استفاده در این تحقیق و تعداد و نوع سنگهای هر دسته

نام گروه سنگ	آذرین	رسوبی آواری	رسوبی شیمیایی	زیست تخریبی
تعداد نمونه‌ها	۱۵	۳۳	۱۱	۴
اساسی سنگهای موجود	تراکیت، توف، گرانیت، آندزیت، آندزیت بازالت، ایگنبریت، گنیس، داسیت، گابرو	شیل و ماسه سنگ با لیتولوژی و سیمان متفاوت	سنگ آهک، تراورتن، مرمر، آهک دولومیتی، مارن	لوماسل با تخلخل‌های متفاوت

آزمایش پانچ بلوکی

مشخصات دستگاه آزمایش پانچ بلوکی

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق بر اساس دستگاه معرفی شده در روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ISRM برای آزمایش پانچ بلوکی ساخته شد. در شکل ۸ شمای کلی دستگاه ساخته شده و مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۸: شمای کلی از دستگاه پانچ بلوکی ساخته شده برای این تحقیق

این محققین با استفاده از رابطه جدید معیار شکست هوک-براون و مجموعه داده‌های استفاده شده جهت انتشار این رابطه، ارتباط بین این سه پارامتر را نشان دادند (رابطه ۲-۶).

$$\text{رابطه ۲-۶} \quad \frac{C_{HB}}{UCS} = 0.4414 m_i^{-0.3824}$$

با وارد کردن مقدار معادل به دست آمده برای C_{HB} (0.8 BPI) این معادله را به صورت رابطه ۲-۷ ارائه دادند.

$$\text{رابطه ۲-۷} \quad UCS = A \times BPI_c$$

که مقدار A عبارت است از:

$$\text{رابطه ۲-۸} \quad A = 0.8 \times 2.266 (m_i)^{0.3824}$$

این دو محقق پیشنهاد کردند تا برای بالا بردن ارزش عملی استفاده از این فرمول، برای تعیین مقادیر m_i از جدولی که توسط خود ارائه دهندگان رابطه معیار شکست هوک-براون برای سنگهای مختلف ارائه شده (Hoek 2007)، استفاده گردد.

شرح آزمایشات

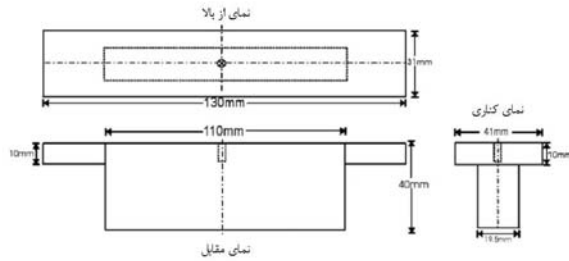
به منظور انجام این تحقیق حدود ۶۳ نوع سنگ متفاوت انتخاب و برای انجام آزمایشهای پانچ بلوکی، پانچ استوانه‌ای، آزمون مقاومت فشاری تک محوری، آزمایش بار نقطه‌ای، تعیین سرعت موج فراصوتی و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی؛ از این سنگها نمونه‌های لازم تهیه گردید. برای تهیه نمونه از بلوک‌های سنگی موجود از دستگاه مغزه‌گیر موجود در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. همچنین برای برش نمونه‌های مغزه تهیه شده به طولهای مختلف و مورد نیاز، از دستگاه برش دارای یک تیغه الماسه دوار استفاده گردید. برای صاف کردن یا سایش سطوح نمونه هم دستگاه ساب به شکل دایره ای مورد استفاده قرار گرفت.

در این تحقیق از نتایج مجموع ۶۲۰ آزمایش پانچ بلوکی و استوانه‌ای، ۳۰۰ آزمایش بار نقطه‌ای، ۱۵۰ آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و به همین تعداد آزمایش تعیین سرعت موج و خصوصیات فیزیکی نمونه‌های سنگی استفاده شده است به عبارت دیگر این تحقیق حاصل نتایج حدود ۱۴۰۰ آزمایش متفاوت بر روی نمونه سنگهای بدست آمده می باشد.

دسته بندی و توصیف سنگهای مورد آزمایش

سنگهای استفاده شده در این تحقیق را می توان در چهار دسته عمده تقسیم بندی کرد؛ سنگهای آذرین، سنگهای رسوبی - آواری، سنگهای رسوبی شیمیایی و سنگهای زیست تخریبی (لوماسل) (جدول ۱).

جدا می‌گردد. قسمت بالایی پانچ کننده هم به گونه‌ای طراحی شده است تا بتواند با داشتن فاصله حدود ۰/۲۵ میلیمتر برای آزادی عمل درون این شیار وارد گردد. این بخش پانچ کننده خود توسط جای پیچی که در آن تعبیه شده است به قسمت نگهدارنده بالایی چارچوب دستگاه برزیلین متصل و ثابت می‌شود. در شکل ۱۰ ابعاد و اندازه‌های مورد استفاده برای ساخت بلوک پانچ کننده بالایی نشان داده شده است.



شکل ۱۰: شکل شماتیک و ابعاد قسمت پانچ کننده بالایی دستگاه مورد استفاده (Ulusay & Gokceoglu 2001)

شرح آزمایش پانچ بلوکی و مشاهدات این تحقیق

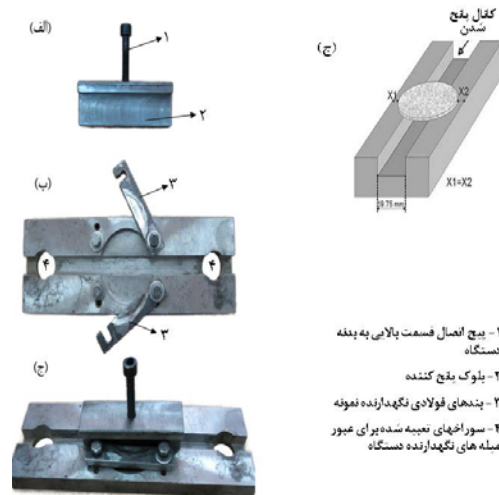
بر اساس استاندارد پیشنهادی ISRM برای انجام آزمایش پانچ بلوکی سنگ باید نمونه‌هایی با ضخامت ۵ تا ۱۵ میلیمتر از مغزه‌های استاندارد و استوانه‌ای شکل تهیه گردد. باید دقت داشت که قطر مغزه‌های مورد استفاده نباید از قطر مغزه‌های BX یا همان ۴۲ میلیمتر کمتر باشد. برای آماده سازی نمونه هیچ روش خاصی نیاز نیست و فقط باید دقت کرد که دو سطح بالا و پایین نمونه حتی‌المقدور موازی یکدیگر و دارای سطح ملایم و فاقد هرگونه بی‌نظمی یا بهم ریختگی مشخص باشد. برای این امر می‌توان از یک دستگاه ساب دهنده سطح نمونه استفاده کرد (Ulusay & Gokceoglu 2001).

بین سطح بالایی نمونه و قسمت پانچ کننده دستگاه نباید توسط هیچ ماده پوشش دهنده‌ای آلوده شود (Ulusay & Gokceoglu 2001).

قطر نمونه با میانگین‌گیری از دو مقدار اندازه‌گیری شده در دو راستای عمود برهم با دقت ۰/۱ میلیمتر محاسبه می‌شود. برای اندازه‌گیری ضخامت نمونه هم پیشنهاد شده که از دو مقدار اندازه‌گیری شده در دو راستای عمود برهم با همان دقت مورد استفاده در قطر میانگین گرفته شود. در این تحقیق اندازه‌گیری قطر به منظور دقت در محاسبه قطر و همچنین تشخیص ناهمواری‌های غیر قابل قبول در سطح نمونه، در چهار نقطه انجام گرفت (Ulusay & Gokceoglu 2001).

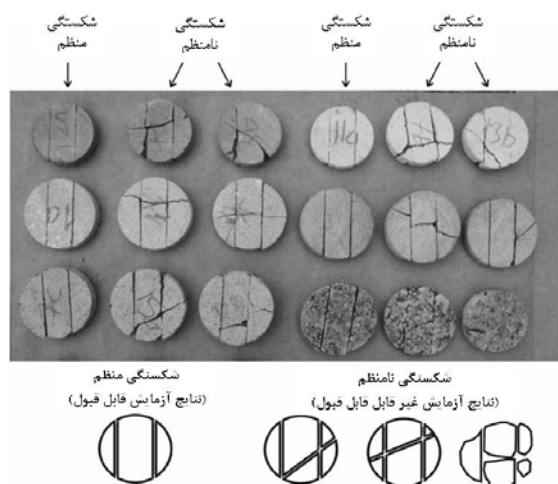
این دستگاه از دو قسمت اصلی تیغه پانچ کننده و بخش نگهدارنده پایینی تشکیل شده است که هر دو قسمت از جنس فولاد سخت کاری شده با سختی ۴۰ ساخته شده است تا بتوانند در مقابل تنش‌های اعمالی بالا مقاومت کرده و تغییر شکل زیادی از خود نشان ندهند. در این دستگاه اعمال بار توسط حرکت قسمت پایینی به سمت بالا صورت می‌گیرد.

دستگاه به طوری ساخته شده است که بتوان به راحتی توسط سوراخهایی که در دو طرف آن تعبیه شده است در دستگاه بارگذاری آزمایش برزیلین جایگذاری گردد. دستگاه طراحی شده ظرفیت انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی تا قطر بیش از هشت سانتیمتر را بر اساس قطر شیار دایره‌ای تعبیه شده در قسمت نگهدارنده نمونه دارا می‌باشد. در شکل ۹ به طور جداگانه هر دو قسمت بالایی و پایینی دستگاه نمایش داده شده است.



شکل ۹: نمای شامل جزئیات بیشتر دستگاه پانچ بلوکی؛ قسمت بالایی یا بلوک پانچ کننده (الف)، یک نمای کلی از بخش نگهدارنده پایینی قبل از بستن گیره‌های نمونه (ب)، قسمت بالایی و پایینی دستگاه در حالت قرارگیری بر روی یکدیگر (ج)؛ شکل شماتیک کانال پانچ شدن بلوک طراحی شده در بخش نگهدارنده پایینی

در بخش نگهدارنده پایینی دستگاه، دو نوار باریک فولادی برای قفل کردن نمونه در آن تعبیه شده است که پس از جایگذاری نمونه در این بخش این دو نوار به صورت چرخشی به روی نمونه گذاشته شده و توسط پیچ‌های موجود تا حدی که از حرکت نمونه به طور آزدانه جلوگیری کند محکم می‌گردند. در امتداد بخش پایینی دستگاه و در قسمت میانی آن شیاری کشیده تعبیه شده است که قسمت پانچ شده نمونه درون آن فرو می‌رود و از دو قسمت کناری باقیمانده در قسمت نگهدارنده

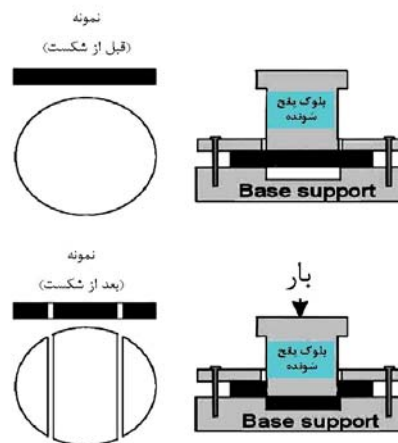


شکل ۱۲: انواع شکستگی‌های قابل مشاهده در نمونه‌ها بعد از آزمایش و معیار قبول یا رد نتایج آزمایشات در کارهای گذشته (Sulukcu & Ulusay 2001)

طبق مشاهدات محقق هنگام انجام آزمایشات؛ در اکثر آزمایشاتی که بخصوص بر روی نمونه‌های دارای سطوح ضعف و یا بر نمونه‌های دارای مقاومت نسبتاً زیاد صورت می‌پذیرد، استحصال شکل منظم در انتهای آزمایش در نمونه شکسته شده ممکن نیست یا به ندرت اتفاق می‌افتد و در بیشتر آزمایشات شکست نمونه‌ها با ایجاد ترکهای متقاطع در آن همراه است. دلیل بروز چنین شکستگی‌هایی هم در سنگهای دارای سطوح ضعف که راستایی متقاطع با راستای پانچ شدن سنگ دارد را می‌توان در تمرکز تنش حین بارگذاری و بلافاصله بعد از شکست نمونه بر روی این سطوح ضعف دانست که در نهایت به علت پایین بودن مقاومت سنگ در امتداد آن سطوح، باعث ایجاد شکستگی‌های متقاطع در سنگ خواهد شد. در سنگهایی که مقاومت آنها نسبتاً بالا می‌باشد بر اثر ذخیره تنش بسیار زیاد تا آستانه حد مقاومت نهایی سنگ، بعد از وقوع شکست در سنگ این تنش که در کل حجم نمونه ذخیره شده است به یکباره آزاد می‌گردد و این آزادی تنش ناگهانی در نهایت باعث شکستگی‌های متعددی در سنگ می‌شود که هم می‌توان به موازات سطوح برش باشد و هم می‌تواند با آن زاویه‌های مختلفی بسازد. نشانه چنین آزادی تنشی را می‌توان به صدای بسیار زیادی که هنگام شکستگی این نمونه‌ها ایجاد می‌شود دانست به علاوه در برخی از آنها دستگاه آزمایش هم در هنگام شکست بر اثر همین آزادی تنش به شدت تکان می‌خورد. چنین می‌توان تصور کرد که می‌توان آن دسته از ترکهایی را که قبل از شکست

نمونه‌ها باید در شرایط رطوبت طبیعی و یا خشک شده در هوای آزاد آزمایش شوند و حتی‌المقدور فاصله بین نمونه برداری و انجام آزمایشات کم باشد (Ulusay & Gokceoglu 2001).

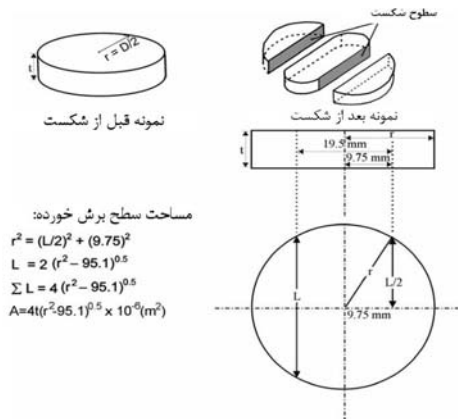
پس از آماده سازی نمونه‌های مورد نیاز و جاگذاری دستگاه پانچ بلوکی درون چارچوب دستگاه آزمایش برزیلین، نمونه‌ها را تک تک درون دستگاه قرار داده و به گونه‌ای بار به آن اعمال می‌شود که پانچ شدگی در فاصله زمانی بین ۱۰ تا ۶۰ ثانیه مانند آنچه توسط ISRM برای آزمایش بارنقطه‌ای پیشنهاد شده است، صورت پذیرد. به دنبال اعمال بار و رخداد پانچ شدگی در سنگ، نمونه به واسطه دو شکستگی موازی یکدیگر به سه قسمت جدا از هم تبدیل می‌شود که دو قسمت کناری در جای خود و در زیر بندهای فولادی نگهدارنده باقی می‌مانند و قسمت پانچ شده میانی به داخل شیار یا کانال موجود در قسمت میانی دستگاه فرو می‌رود (شکل ۱۱) (Ulusay & Gokceoglu 2001).



شکل ۱۱: شکل شماتیک نحوه پانچ شدن نمونه در داخل دستگاه (Sulukcu & Ulusay 2001)

مقدار بار نهایی لازم برای شکست نمونه یاد داشت می‌گردد تا در محاسبات آتی برای تعیین شاخص پانچ بلوکی سنگ مورد استفاده قرار گیرد.

در روش پیشنهادی ISRM و تمامی کارهایی که در گذشته به خصوص توسط محققان ترک انجام گرفته است، نتایج به دست آمده به دو دسته قابل قبول و غیرقابل قبول تقسیم می‌شوند. نتایجی قابل قبول است که شکستگی حاصل از آزمایش در نمونه به صورت منظم باشد و در صورت ناقص بودن شکستگی یا وجود ترکهای متقاطع شکستگی نامنظم تلقی و در نتیجه؛ نتیجه آزمایش هم غیر قابل قبول فرض خواهد شد (شکل ۱۲) (Sulukcu & Ulusay 2001).



شکل ۱۳: نحوه تعیین رابطه محاسبه مساحت سطوح برش خورده در نمونه آزمایش شده توسط دستگاه پانچ بلوکی (Ulusay & Gokceoglu 2001)

که در آن با توجه به اینکه قطر ۵۰ و ضخامت ۱۰ میلیمتر به عنوان مناسبترین مقادیر در نظر گرفته شده است با به کار بردن ضریب اصلاح ضخامت K_t و ضریب اصلاح قطر K_D ، مقدار $F_{t,D}$ یا بار وارده به نمونه با قطر و ضخامت متفاوت به $F_{10,50}$ بار معادل برای نمونه با قطر ۵۰ و ضخامت ۱۰ میلیمتر تبدیل می‌شود. روابط ۳-۴ و ۵ روش محاسبه این ضرایب را با توجه به قطر و ضخامت نمونه نشان می‌دهد (Ulusay & Gokceoglu 2001).

$$K_t = 13.74 t^{-1.1265} \quad \text{رابطه ۳-۴}$$

$$K_D = 234.53 t^{-1.3926} \quad \text{رابطه ۳-۵}$$

که این روابط هم بر اساس نتایج نمونه‌هایی که از یک نوع سنگ و با قطرهای مختلف و ضخامتهای متفاوت تهیه گردیده بود به دست آمده است. در این تحقیق به دلیل محدودیت در تهیه مغزه‌های با قطرهای مختلف از یک نوع نمونه سنگی و در کل محدودیت در حجم نمونه‌های موجود، بررسی روش به کار رفته برای تعیین مقادیر K_t و K_D مقدور نبود. در نهایت با قرار دادن مقادیر ضرایب اصلاحی در رابطه ۳-۳، رابطه کلی ۳-۶ برای تعیین BPI_s یا شاخص پانچ بلوکی اصلاح شده براساس اندازه به دست می‌آید (Ulusay & Gokceoglu 2001).

$$BPI_s = 3499D^{-1.3926} t^{-1.1265} F_{t,D} \quad \text{رابطه ۳-۶}$$

که در آن مقادیر D و t بر حسب میلیمتر و مقدار $F_{t,D}$ بر حسب کیلونیوتن بوده و واحد BPI_s هم مگاپاسکال می‌باشد. مقدار BPI_s برای نمونه‌های تهیه شده از هر نوع سنگ به صورت تک تک محاسبه شد و در نهایت از مجموع نتایج به دست آمده برای یک نوع سنگ، بیشترین و کمترین مقدار در صورت داشتن تفاوت زیاد نسبت به بقیه مقادیر، حذف و از مابقی آنها میانگین گرفته شد که در نهایت این مقدار میانگین

نهایی و پانچ شدن سنگ در نمونه به وجود می‌آیند، عامل ایجاد خطا در برآورد مقاومت نهایی سنگ دانست نه آنهایی را که حین یا بعد از شکست نهایی در سنگ ایجاد می‌گردند. یا به عبارت دیگر تصدیق اعتبار نتایج آزمایشات را نمی‌توان فقط با استفاده از نتیجه ظاهری به دست آمده در انتهای آزمایش انجام داد بلکه باید کاربر یا ناظری که در حال انجام آزمایشات هستند با دقت به عقربه گیج نشان دهنده میزان بار وارده به دستگاه و همچنین گوش کردن به صداهای تولید شده در هنگام آزمایش، شکستگیهای قبل از شکست نهایی را تشخیص داده و ثبت نمایند چرا که بروز شکستگی در هنگام آزمایش معمولاً با افت موقتی و چند کیلونیوتنی در عقربه نیرو سنج و همچنین ایجاد صدای شکستگی واضح همراه بود که هر دوی آنها به راحتی قابل تشخیص می‌باشند.

برای محاسبه میزان شاخص پانچ اصلاح نشده از رابطه ۳-۱ استفاده می‌گردد (Ulusay & Gokceoglu 2001). که در آن BPI همان شاخص پانچ اصلاح نشده و $F_{t,D}$ مقدار بار وارد شده بر حسب کیلونیوتن (که با ضرب کردن 10^{-3} تبدیل به مگانیوتن می‌شود) و A هم مساحت سطح پانچ شده سنگ بر حسب متر مربع می‌باشد.

$$BPI = (F_{t,D} \times 10^{-3}) / A \quad \text{رابطه ۳-۱}$$

مقدار $F_{t,D}$ که به صورت مستقیم از روی نیروسنج متصل به دستگاه قرائت می‌شود ولی A یا مجموع مساحت دو سطح برش خورده می‌باشد از رابطه ۳-۲ محاسبه می‌گردد (Ulusay & Gokceoglu 2001).

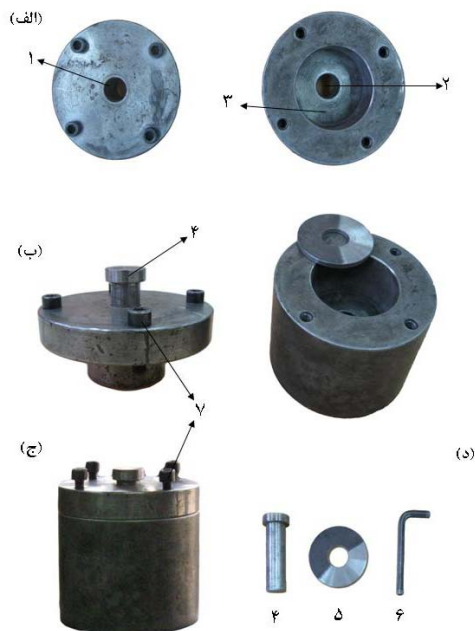
$$A = 4t(r^2 - 95.1)^{0.5} \times 10^{-6} (\text{m}^2) \quad \text{رابطه ۳-۲}$$

نحوه به دست آمدن رابطه ۳-۲ به منظور تعیین مساحت سطوح برش در شکل ۱۳ به صورت شماتیک توضیح داده شده است.

از آنجا که تغییرات در ابعاد نمونه تاثیر گذار بر نتایج آزمایشات و مقدار BPI محاسبه شده می‌باشد، در روش پیشنهادی توسط ISRM روشی برای اصلاح تاثیرات اندازه و به دست آوردن مقدار اصلاح شده شاخص پانچ بلوکی یا BPI_s ارائه شده است. در این روش مقدار بار مورد استفاده در فرمول محاسبه BPI توسط اعمال دو ضریب تصحیح مربوط به قطر و ضخامت اصلاح می‌گردد (رابطه ۳-۳) (Ulusay & Gokceoglu 2001).

$$BPI_{10,50}(BPI_s) = \frac{F_{10,50}}{A_{10,50}} = \frac{F_{t,D} \times 10^{-3} \times K_t \times K_D}{912 \times 10^{-6}} \quad \text{رابطه ۳-۳}$$

بالایی به شکل قرصی به داخل سوراخ تعبیه شده در ته محفظه رانده می‌شود. همانگونه که در شکل ۱۵ می‌توان مشاهده نمود دستگاه به طور کلی به دو قسمت بدنه اصلی، درپوش بالایی و استوانه بارگذاری تقسیم می‌شود. بدنه اصلی دارای محفظه‌ای به قطر ۸۰ میلی‌متر می‌باشد که بعد از نصف ارتفاع آن به سوراخی ختم می‌شود که استوانه اعمال بار می‌تواند با فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر در دوطرف، درون آن حرکت کند. همین سوراخ در قسمت درپوش هم وجود دارد علاوه بر این که خود درپوش هم یک قسمت استوانه‌ای به قطر ۷۹ میلی‌متر دارد که درون محفظه بدنه اصلی قرار گرفته و در بسته شدن این دو قسمت بر روی هم، بین انتهای این استوانه و کف محفظه، به اندازه ۱۵ میلی‌متر فضا به منظور قرارگیری نمونه خالی می‌ماند. از آنجا که گاهی اکثر نمونه‌ها قطری کمتر از این مقدار دارد یک صفحه فولادی با ضخامت ۶ میلی‌متر ساخته شد تا بتواند فضای خالی مانده شده را پر کرده و نمونه را در جای خود محکم کند.



۱- محل عبور پیستون در قسمت بالایی ۲- حفره مخصوص ورود قرص سنگی
 ۳- محل قرارگیری نمونه ۴- پیستون استوانه‌ای اعمال بار
 ۵- صفحه چیران کننده کمبود ضخامت نمونه در مقابل فضای موجود بین دو قسمت بالایی و پایینی
 ۶- آچار آلن مخصوص سفت کردن بیج‌های دستگاه
 ۷- بیجهای محکم کننده دو قسمت بالایی و پایینی به یکدیگر

شکل ۱۵: قسمتهای مختلف دستگاه پنج استوانه‌ای؛ نمای بدنه و درپوش از بالا (الف)، نمای سه بعدی درپوش و بدنه (ب)، دستگاه وقتی درپوش در سر جای خود قرار گرفته است (ج) و اجزای جانبی مورد استفاده (د)

به عنوان مقدار شاخص پانچ بلوکی سنگ مورد نظر در نظر گرفته می‌شود.

آزمایش پانچ استوانه‌ای

مشخصات دستگاه آزمایش پانچ بلوکی

دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای از لحاظ نحوه عملکرد به طور تقریبی شباهتهایی با دستگاه ساخته شده توسط مزنتی و سورز (شکل ۱ الف) برای بررسی تاثیر بارهای متمرکز بر پی‌های سنگی قرار گرفته بر روی لایه‌های سست‌تر دارا می‌باشد.

این دستگاه به صورتی طراحی شده که می‌تواند در اکثر دستگاه‌های بارگذاری قائم جایگذاری شده و مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق برای اعمال بار قائم مورد نیاز برای انجام آزمایش از دستگاه بارگذاری مخصوص انجام آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) استفاده گردید. بارگذاری در این دستگاه به صورت از پایین به سمت بالا می‌باشد که توسط حلقه نیروی نیروسنج تعبیه شده در قسمت بالای آن می‌توان میزان نیروی اعمال شده را محاسبه کرد. در شکل ۱۴ تصویر کلی دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای نمایش داده شده است.



شکل ۱۴: تصویر ابزار آزمایش پانچ استوانه‌ای جایگذاری شده در دستگاه CBR

این ابزار به طور کلی محفظه‌ای را برای نگهداری نمونه دیسکی شکل در درون خود تشکیل می‌دهد و توسط پیستون استوانه‌ای شکلی که قابلیت بارگذاری قائم بر روی نمونه را داراست در نمونه سنگ مورد آزمایش شکستگی به شکل دایره ایجاد می‌کند. قسمت شکسته شده هم بر اثر فشار استوانه

شرح آزمایش پانچ استوانه‌ای و مشاهدات این تحقیق

در راستای انجام این تحقیق بر روی ۲۴ نوع سنگ از مجموع کل انواع سنگ مورد مطالعه، آزمایش شاخص پانچ استوانه‌ای یا CPI (Cylindrical Punch Index) انجام گردید. در مجموع ۱۱۰ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. روش آماده سازی نمونه‌های این آزمایش و آزمایش پانچ بلوکی تفاوتی با یکدیگر نداشته و می‌توان از نمونه‌های دیسکی تهیه شده برای هر دو نوع آزمایش استفاده نمود.

یکی از نکاتی که باید در هنگام قرار دادن نمونه درون دستگاه به آن دقت کرد هم مرکز بودن نمونه و سوراخ زیرین دستگاه می‌باشد تا تقارن نمونه در هنگام شکست حفظ شود.

بعد از قرار دادن نمونه درون دستگاه و محکم کردن درپوش، دستگاه را در محل بارگذاری قرار داده و همانگونه که در آزمایش پانچ بلوکی و بار نقطه‌ای رعایت می‌شد بارگذاری به نحوی اعمال می‌شود که نمونه در فاصله زمانی بین ۱۰ تا ۶۰ ثانیه شکسته شود. در هنگام آزمایش با توجه به برگشت‌های احتمالی عقربه نیروسنج و همچنین صدای شکستگی شنیده شده قبل از شکست اصلی در سنگ می‌توان وقوع شکست‌های پیش از شکست اصلی را تشخیص داد و در نتیجه نتایج چنین آزمایش‌هایی را باید مردود دانست.

پس از انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای نمونه‌ها به چند قسمت تقسیم می‌شوند که مهمترین قسمت آن بخش قرص مانند میانی است که معمولاً شکل کامل و سالم خواهد داشت و قسمت‌های اطراف آن به اندازه‌های مختلف متحمل شکستگی‌های شعاعی می‌شوند (شکل ۱۶).



شکل ۱۶: تصویری از نمونه‌های شکسته شده توسط دستگاه پانچ استوانه‌ای

برای محاسبه شاخص پانچ استوانه‌ای یا CPI در واحد مگاپاسکال از رابطه ۳-۷ استفاده گردید.

رابطه ۳-۷

$$CPI = F \times 10^{-3} / A$$

که در آن F همان مقدار نیروی لازم برای شکست نمونه به کیلونیوتن (که با ضرب شدن در 10^{-3} تبدیل به مگانیوتن می‌شود) و A سطح شکست واقع شده در نمونه سنگ به متر مربع می‌باشد که از رابطه ۳-۸ محاسبه می‌گردد.

$$A = 2\pi r t \times 10^{-6} \quad \text{رابطه ۳-۸}$$

که در آن r همان شعاع استوانه بارگذاری به میلی‌متر و t هم ضخامت نمونه با واحد میلی‌متر می‌باشد.

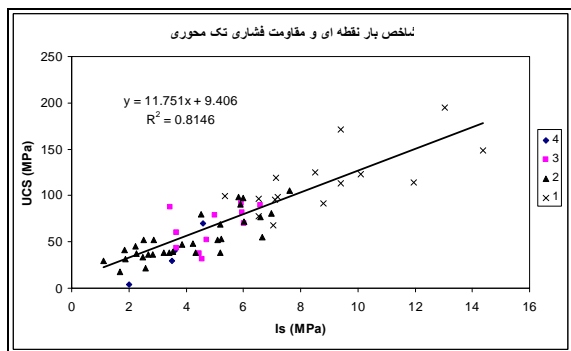
در حقیقت سطح برش خورده مورد نظر در این آزمایش همان سطح دایره‌ای خارجی قرص شکسته شده می‌باشد. به نظر می‌رسد که سازوکار شکست در این آزمایش با شکستگی در آزمایش پانچ بلوکی شبیه به هم باشند به عبارت دیگر عامل اصلی شکستگی در سنگ در هر دو آزمایش، برش ایجاد شده در سطوح شکست می‌باشد.

تجزیه و تحلیل اطلاعات

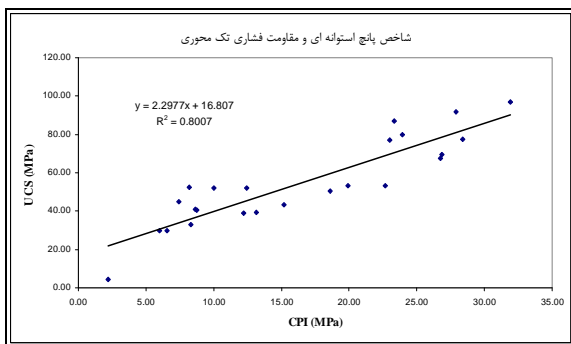
پس از انجام آزمایشات مختلف بر روی نمونه‌های سنگی تهیه شده از سنگهای توصیف شده، نتایج آنها برای به دست آوردن ارتباط بین آنها و تعیین میزان دقت هر کدام از آزمایشها در تخمین مقاومت فشاری تک محوری مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت که در این بخش به تشریح نتایج این بررسی‌ها پرداخته می‌شود. همچنین روش پیشنهادی سال ۲۰۰۸ (Sonmez & Tunusluoglu 2008) مورد آزمون قرار گرفت تا میزان دقت این روش هم در تخمین مقاومت فشاری تک محوری با استفاده از شاخص پانچ بلوکی مورد بررسی قرار گیرد. در آخر نیز با استفاده از روابط به دست آمده بین مقاومت فشاری تک محوری و شاخص پانچ سنگهای مورد مطالعه، جایگزین نمودن مقاومت فشاری تک محوری با شاخص پانچ در رده بندی ژئومکانیکی توده سنگ مورد بررسی قرار گرفت.

در ابتدا به مقایسه بین خصوصیات فیزیکی به دست آمده از سنگها پرداخته می‌شود. در نمودار شکل ۱۷ رابطه بین تخلخل و چگالی سنگهای مورد بررسی نشان داده شده است. نمودار نشان‌دهنده رابطه خوب میان این دو پارامتر می‌باشد. در تحقیقات گذشته هم این مسئله مشاهده شده است به گونه‌ای که طغرل و ظریف (Tugrul & Zarif 1999) رابطه تجربی را برای تخمین این دو پارامتر با استفاده از دیگری برای سنگهای گرانیتی ترکیه ارائه دادند (رابطه ۴-۱) (Zhang 2005).

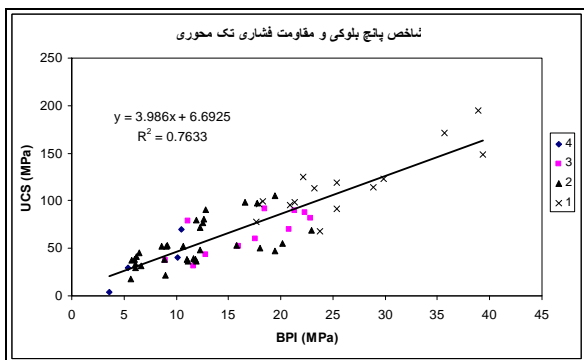
$$\rho_d = 2695 - 25.48 n \quad (r^2=0.74) \quad \text{رابطه ۴-۱}$$



شکل ۱۸: نمودار ارتباط بین شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک محوری



شکل ۱۹: نمودار ارتباط شاخص پانچ استوانه‌ای و مقاومت فشاری تک محوری



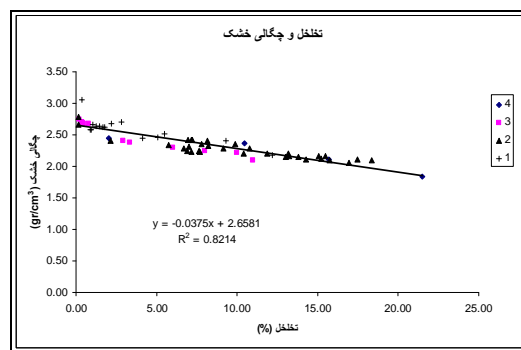
شکل ۲۰: نمودار ارتباط شاخص پانچ بلوکی سنگ و مقاومت فشاری تک محوری سنگ

به طریق مشابه از جدول ۲ می‌توان دریافت که برای تخمین ضریب الاستیسیته می‌توان به ترتیب از سرعت عبور موج فشاری و شاخص پانچ بلوکی با دقت بیشتری نسبت به سایر پارامترها استفاده نمود که در شکل ۲۱ و ۲۶ نمودار مربوط به این دو پارامتر نمایش داده شده است.

طغرول در سال ۲۰۰۴ رابطه دیگری را برای سنگهای ماسه-سنگ، آهک، بازالت و گرانئودیوریت موجود در ترکیه ارائه داد (رابطه ۴-۲) (Zhang 2005).

$$\rho_d = 2765 - 33.64 n \quad (r^2=0.94) \quad \text{رابطه ۴-۲}$$

که در هر دو رابطه ۱-۴ و ۲-۴ تخلخل بر حسب درصد و چگالی بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب بیان شده است.



شکل ۱۷: نمودار رابطه بین چگالی خشک و درصد تخلخل سنگ

استفاده از نتایج آزمایشات در تخمین مقاومت فشاری تک محوری و ضریب الاستیسیته سنگ

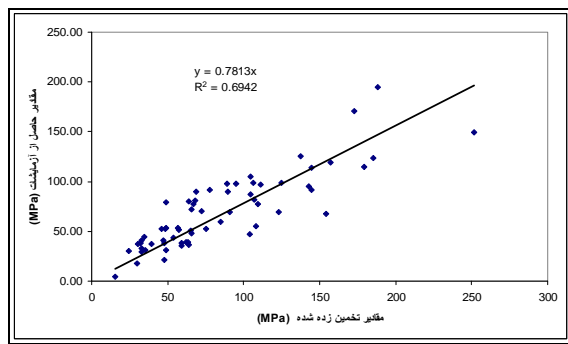
به عنوان هدف اصلی تحقیق، ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری سنگ با سایر پارامترهای حاصل از آزمایشات مختلف به خصوص شاخص پانچ‌های بلوکی و استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که در این بخش روابط به دست آمده از این مقایسه و بررسی به صورت جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: روابط به دست آمده از روشهای مختلف برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری تک محوری
$E = 0.41 n + 11.1, (R=0.68)$	$UCS = 91 - 3.38 n, (R=0.61)$
$E = 10.34 pd - 16.88, (R=0.69)$	$UCS = 94.87pd - 159.55, (R=0.71)$
$E = 0.0022 Vp - 0.21, (R=0.86)$	$UCS = 0.02 Vp - 1.731, (R=0.69)$
$E = 0.88 Is + 3.17, (R=0.73)$	$UCS = 11.75 Is + 9.4, (R=0.90)$
$E = 0.34 BPI + 2.522, (R=0.83)$	$UCS = 3.986 BPI + 6.69, (R=0.87)$
$E = 0.24 CPI + 2.81, (R=0.69)$	$UCS = 2.3 CPI + 16.81, (R=0.89)$

همانگونه که در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد از بین پارامترهایی که در این مقایسه استفاده شده است، در تخمین مقاومت فشاری تک محوری، شاخص بار نقطه‌ای و شاخص پانچ استوانه‌ای و بلوکی به ترتیب از دقت بیشتری نسبت به سایر پارامترها برخوردار می‌باشند. روابط مربوط به این سه پارامتر به صورت نمودارهایی در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ قابل مشاهده می‌باشد.

مستقیم مقاومت فشاری تک محوری سنگ، پیشنهاد گردیده است که با ضرب کردن یک ضریب (A) که با استفاده از مقادیر پیشنهادی m_i و فرمول ۲-۸ محاسبه می‌گردد به مقادیر شاخص پانچ بلوکی سنگ، مقاومت فشاری تک محوری سنگ تخمین زده شود. در این تحقیق نیز با توجه به جنس سنگهای مورد آزمایش و با استفاده از جدول پیشنهادی توسط هوک (Hoek 2007)، مقادیر m_i متناسب با جنس سنگها مشخص و با استفاده از رابطه ۲-۷ و مقادیر شاخص پانچ بلوکی اندازه‌گیری شده در آزمایشات، مقاومت فشاری تک محوری تخمینی سنگها محاسبه گردید. برای ارزیابی میزان دقت این روش مقادیر تخمین زده شده توسط این روش با مقادیر اندازه‌گیری شده به صورت مستقیم توسط آزمایشات فشار تک محوری مورد مقایسه قرار گرفت که نتیجه این مقایسه به صورت نموداری در شکل ۲۴ قابل مشاهده می‌باشد.



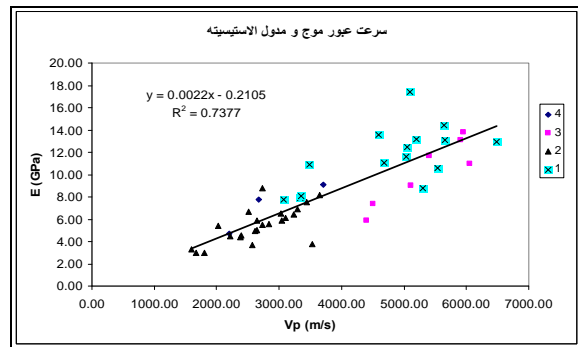
شکل ۲۴: نمودار ارتباط بین مقادیر تخمین زده شده UCS با استفاده از رابطه سال ۲۰۰۸ و مقادیر حاصل از آزمایشات

با توجه به نمودار به دست آمده مشخص گردید که مقادیر حاصل از نتایج آزمایشات تعیین مقاومت فشاری تک محوری کوچکتر از مقادیر تخمین زده شده با استفاده از این روش می‌باشد. هر چند که مقدار ضریب تعیین نمودار نسبتاً قابل قبول می‌باشد.

جایگزینی مقاومت فشاری تک محوری با شاخص پانچ

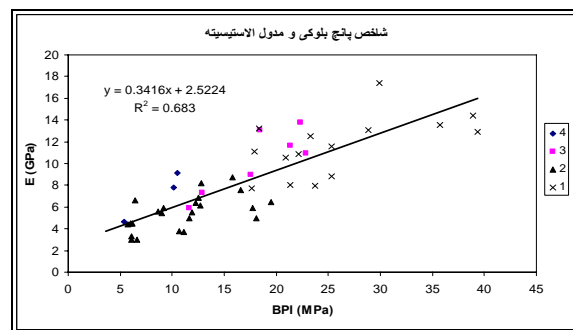
بلوکی در رده بندی ژئومکانیکی سنگها

از آنجا که یکی از مهمترین کاربردهای پارامتر مقاومت فشاری تک محوری در رده‌بندی توده‌های سنگی است، و از آنجا که با توجه به نتایج این تحقیق و همچنین تحقیقات انجام شده در گذشته شاخص پانچ بلوکی یکی از شاخص‌هایی است که با دقت خوبی قابلیت تخمین مقاومت فشاری تک محوری را دارا

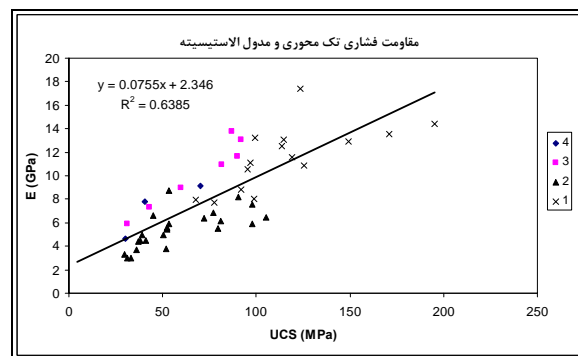


شکل ۲۱: نمودار ارتباط بین سرعت سیر موج فشاری و ضریب الاستیسیته سنگ

در یک مقایسه دیگر می‌توان رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته را بررسی کرد که نمودار مربوط به بررسی انجام شده در این تحقیق در شکل ۲۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۲: نمودار ارتباط شاخص پانچ بلوکی و مدول الاستیسیته



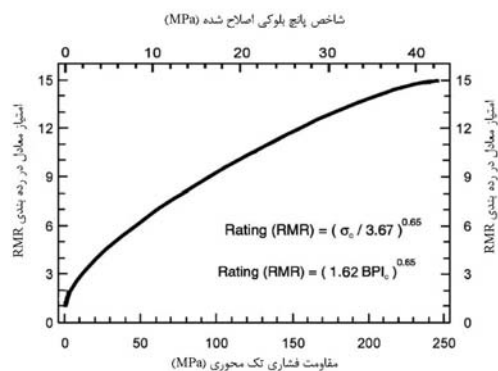
شکل ۲۳: نمودار ارتباط بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوری

ارزیابی روش پیشنهادی سال ۲۰۰۸

همانگونه که در بخش ۲ اشاره شد در تازه‌ترین تحقیق در خصوص استفاده از نتایج آزمایش پانچ برای تخمین غیر

می‌باشد، به نظر می‌رسد در مواردی که دقت تخمین به اندازه کافی بالا باشد بتوان برای سهولت انجام کار، رده بندی سنگ را با توجه به ضریب تبدیل این دو پارامتر، بر مبنای شاخص پانچ بلوکی بازسازی کرد تا به طور مستقیم از شاخص پانچ سنگ در رده بندی استفاده شود.

از میان رده بندی‌های معمول و پرکاربرد می‌توان به رده بندی ژئومکانیکی سنگ یا RMR، شاخص مقاومت زمین شناسی GSI و اندیس شاخص کیفی تونل سازی Q اشاره کرد. طبقه بندی ژئومکانیکی یا سیستم امتیازدهی به توده سنگ (RMR) اولین بار در انجمن تحقیقات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی توسط بنیواسکی (۱۹۷۳) معرفی شد. روشی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، بر اساس نسخه سال ۱۹۸۹ طبقه بندی RMR بنیواسکی می‌باشد. برای طبقه بندی توده‌های سنگی با این سیستم از شش پارامتر استفاده می‌گردد که عبارتند از: مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، اندیس درجه کیفی توده سنگ (RQD)، فاصله بین ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی، شرایط آب زیرزمینی، جهت یابی ناپیوستگی‌ها.



شکل ۲۶: امتیاز دهی در رده بندی RMR برای مقاومت فشاری تک محوری و شاخص پانچ بلوکی ماسه سنگهای سازند قرمز فوقانی

نتیجه گیری

از تجزیه و تحلیل اطلاعات مربوط به تحقیق حاضر نتایج ذیل حاصل گردید:

۱- برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری سنگ های لایه دار و سست دارای ناپیوستگی استفاده از نتایج آزمایش پانچ می تواند مفید باشد.

۲- آزمایش پانچ استوانه‌ای که در این تحقیق برای اولین بار معرفی گردید از کارایی مناسبی در تخمین مقاومت فشاری تک محوری برخوردار است.

۳- برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری سنگ سه روش شاخص بارنقطه ای، شاخص پانچ استوانه‌ای و شاخص پانچ بلوکی به ترتیب دقت‌های بهتری نسبت به سایر روشها از خود نشان دادند.

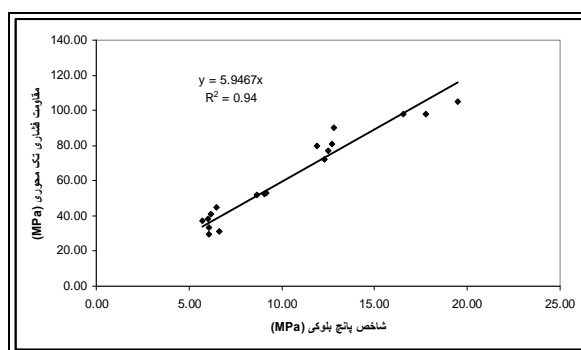
۴- برای تخمین ضریب الاستیسیته سنگ، مقادیر سرعت عبور موج فشاری و شاخص پانچ بلوکی از دقت بیشتری نسبت به سایر روشها برخوردارند.

۵- استفاده از روش پیشنهادی سونمز و تونسلواوگلو سال ۲۰۰۸ میلادی برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری سنگ با استفاده از نتایج آزمایشات پانچ بلوکی، مقادیری بزرگتر از

با توجه به دقتی که این رابطه دارد می‌توان با اطمینان خاطر نسبتاً خوبی از نتایج آزمایش پانچ بلوکی به عنوان جایگزین مقاومت فشاری تک محوری در رده بندی‌های مختلف به خصوص رده بندی ژئومکانیکی سنگ استفاده کرد. بدین منظور و با توجه به مقادیر متناظر مقاومت فشاری تک محوری در رده بندی RMR و همچنین رابطه ۳-۴، نمودار شکل ۲۶ جهت استفاده از مقادیر شاخص پانچ بلوکی در رده بندی توده سنگ به روش RMR ترسیم گردید.

از میان رده بندی‌های معمول و پرکاربرد می‌توان به رده بندی ژئومکانیکی سنگ یا RMR، شاخص مقاومت زمین شناسی GSI و اندیس شاخص کیفی تونل سازی Q اشاره کرد. طبقه بندی ژئومکانیکی یا سیستم امتیازدهی به توده سنگ (RMR) اولین بار در انجمن تحقیقات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی توسط بنیواسکی (۱۹۷۳) معرفی شد. روشی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، بر اساس نسخه سال ۱۹۸۹ طبقه بندی RMR بنیواسکی می‌باشد. برای طبقه بندی توده‌های سنگی با این سیستم از شش پارامتر استفاده می‌گردد که عبارتند از: مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، اندیس درجه کیفی توده سنگ (RQD)، فاصله بین ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی، شرایط آب زیرزمینی، جهت یابی ناپیوستگی‌ها.

با توجه به تعداد قابل توجه نمونه‌های موجود از ماسه سنگهای سازند قرمز فوقانی مقایسه میان مقاومت فشاری تک محوری و شاخص پانچ بلوکی به صورت جداگانه انجام گردید که نمودار آن در شکل ۲۵ نشان داده شده است.



شکل ۲۵: نمودار ارتباط مقاومت فشاری تک محوری و شاخص پانچ بلوکی در ماسه سنگهای سازند قرمز فوقانی

همانگونه که در نمودار هم پیداست این رابطه با توجه به شباهتهایی که در خصوصیات مربوط به این سنگها وجود دارد از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد. بر اساس نمودار شکل ۲۵ می‌توان رابطه به دست آمده را به صورت رابطه ۳-۴ نشان داد.

$$\text{رابطه ۳-۴} \quad \sigma_c = 5.95 \text{ BPI}_c \quad (R^2=0.94)$$

- واقعیت یا همان نتایج آزمایش مستقیم فشاری تک‌محوری به دست می‌دهد.
- ۶- درخصوص ماسه سنگهای سازند قرمز فوقانی با توجه به دقت بالای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از نتایج آزمایش پانچ بلوکی، از شاخص پانچ بلوکی می‌توان به عنوان جایگزینی برای پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری رده بندی ژئومکانیک RMR استفاده کرد.
- ۷- برای تشخیص مردود یا مقبول بودن نتایج آزمایشات پانچ بلوکی بهتر است به جای روش قبلی و قضاوت از روی شکل نمونه شکسته شده، براساس مشاهدات حین انجام آزمایش و تشخیص شکستگی های پیش از شکستگی اصلی که باعث ایجاد خطا در نتایج آزمایش می‌شود، در این مورد قضاوت کرد. این شکستگی ها معمولاً همراه با ایجاد صداهای خفیف و همچنین افت فشار در گیج قرائت نیرو می‌باشد. در مورد پانچ استوانه ای نیز این مسئله صدق می‌کند.

منابع:

- احمدی، م. ۱۳۸۳: بررسی تعیین مقاومت تک‌محوری سنگ آهک با استفاده از دستگاه پانچ، مجموعه مقالات دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران فیهیمی فر ا. ۱۳۸۰: آزمایش‌های مکانیک سنگ. جلد اول. انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران. ویرایش اول
- نیکودل م. ۱۳۸۰: باغبانیان، عباس، کاربرد دستگاه پانچ برای تعیین خصوصیات مقاومتی سنگ‌های ناهمسانگرد، مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران،
- Ardakan F., Ulusay R., Aydin N. 2007: Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification base on a rating system, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **66**: 415–430
- Geokceoglu C., Zorlu, K., A. 2004: Fuzzy Model to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Modulus of Elasticity of a Problematic Rock, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, **17**:61-72
- Hoek E. 2007: Practical rock engineering, <http://www.rocsience.com/roc/Hoek/Hoek.htm>
- ISRM. In 1981: Brown E.T., editor. ISRM suggested method: rock characterization, testing and monitoring, London, Pergamon Press
- Schrier van der J.S. 1988: The block punch index test, *bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, **38**:121–126
- Sonmez H., Tunusluoglu C. 2008: New considerations on the use of block punch index for predicting the uniaxial compressive strength of rock material, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **45**:1007-1014
- Sulukcu S., Ulusay R. 2001: Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, **38**:1091–1111
- Ulusay R., Gokceoglu C., Sulukcu S. 2001: Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **38**:1113–1119
- Vutukuri V.S., Lama, R.D., Saluja S.S., 1974: Handbook on Mechanical Properties of Rocks, vol. 1. *Trans Tech Publications Clausthal, Germany*. 280p.
- Zhang L. , 2005: Engineering Properties of Rocks, *Elsevier Geo-Engineering Book Series*