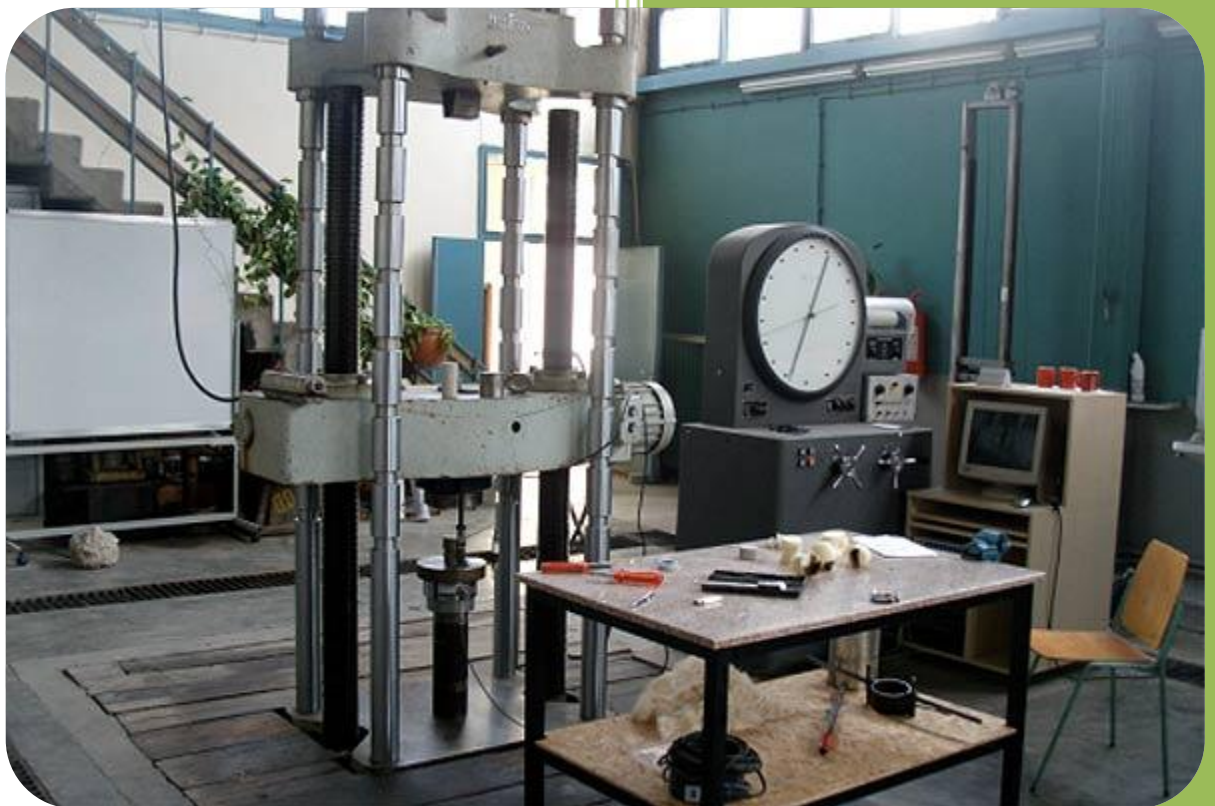


مروری بر آزمایش‌های مکانیک سنگ



محسن محبی

هادی شاهرخی فرد

مروری بر آزمایش‌های مکانیک سنگ

مولفان:

محسن محبی

هادی شاهرخی فرد

شناسنامه موقت اثر

عنوان: مروری بر آزمایش‌های مکانیک سنگ

صاحب اثر: محسن محبی-هادی شاهرخی فرد

شابک: ۹۷۸۶۰۰۰۴۷۰۱۲۸

نوبت چاپ: اول

سال نشر: ۱۳۹۵

تعداد صفحه: ۱۳۹

تیراژ: ۳۰۰

سرشناسه	: محبی، محسن، ۱۳۶۳ -
عنوان و نام پدیدآور	: مروری بر آزمایش‌های مکانیک سنگ/مولفان محسن محبی، هادی شاه‌رخ‌فرد.
مشخصات نشر	: تهران: هادی شاه‌رخ‌فرد، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	: ۱۳۹ ص.
شابک	: 978-600-04-7012-8
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
موضوع	: مکانیک سنگ
موضوع	: Rock mechanics
موضوع	: سنگ‌ها و صخره‌ها -- آزمایش‌ها
موضوع	: Rocks -- Testing
شناسه افزوده	: شاه‌رخ‌فرد، هادی، ۱۳۶۲ -
رده بندی کنگره	: TAV۰۶/۵/م۴م۴ ۱۳۹۵
رده بندی دیویی	: ۶۲۴/۱۵۱۳۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۶۱۶۰۴۰

استانداردهای آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ

آزمایش‌های مکانیک سنگ را به دو دسته آزمایش‌های برجا و آزمایش‌های آزمایشگاهی تقسیم می‌کنند. برای اینکه بخواهیم انجام این آزمایش‌ها در مکان‌های مختلف نتایج یکسان و هماهنگی را به همراه داشته باشند استانداردهایی را برای نمونه مورد آزمایش، دستگاه انجام آزمایش و نحوه انجام آزمایش تعیین کرده‌اند. یکی از این استانداردها را انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) تعریف کرده است که در این گزارش به بیان این استانداردها در مورد آزمون‌های آزمایشگاهی می‌پردازد.

این تالیف در ابتدا با کمال افتخار تقدیم به خانواده‌هایمان می‌شود و سپس به شهدای سرزمینمان، ایران.

محسن مجبی، هادی شاهرخی فرد

Geotechnique.1983@gmail.com

فهرست عناوین

۳	آماده سازی نمونه
۱۲	درصد رطوبت، تعیین تخلخل و چگالی
۲۳	آزمایش چکش اشمیت
۳۰	اندیس بار نقطه‌ای
۳۷	آزمایش مقاومت فشاری تک محوری
۵۰	آزمایش مقاومت فشاری سه محوری
۶۰	آزمایش مقاومت برشی مستقیم
۷۷	آزمایش دوام سنگ
۸۴	آزمایش مقاومت کششی مستقیم
۹۱	آزمایش برزیلی
۹۹	آزمایش اندازه‌گیری سرعت صوت
۱۱۱	آزمایش آماده سازی نمونه سنگ‌های آماسی
۱۱۵	آزمایش تعیین تنش‌های آماسی محوری
۱۲۴	آزمایش تخمین کرنش آماسی محوری و شعاعی آزاد
۱۳۰	آزمایش تخمین کرنش آماسی محوری وابسته به تنش آماسی محوری

آماده سازی نمونه



عنوان: آماده سازی نمونه

۱- هدف:

سنگ مصرفی در ساخت ساختمان‌های سنگی از کوه تأمین می‌شود که در صورت بزرگ بودن توسط پتک یا دیگر ابزار دستی به قطعات کوچکتر تقسیم می‌شود. تهیه نمونه‌های سنگی طبق استاندارد ISRM و به منظور انجام آزمایش‌های مقاومت تک محوری، سه محوری، تست برزیلی، اندیس بار نقطه‌ای، تعیین خواص فیزیکی سنگ، تعیین مقاومت برشی و انجام می‌گیرد. روش آماده سازی این نمونه‌ها در ادامه شرح داده شده است.

۲- تئوری آزمایش:

سنگ یکی از مصالح پیچیده‌ای است که با توجه به محیط تشکیل اولیه، تنش‌های وارده در طول زمان، فرآیند هوازدگی و سایر فرآیندهای زمین شناسی از تنوع بسیاری برخوردار است. گرفتن نمونه معرف از سنگ، جز با رعایت کلیه نکات استاندارد به خصوص در مورد سنگ‌های ضعیف، متخلخل و سنگ‌های سیمان شده سست امکان پذیر نیست. در مورد این سنگ‌ها باید حداکثر دقت را به کار بست تا نمونه مطابق با استاندارد تهیه شود. در صورتی که گرفتن نمونه استاندارد با دقت زیاد ممکن نباشد، موارد قابل اجرای استاندارد به طول کامل اجرا شده و عدم اجرای سایر موارد در گزارشات ارائه می‌گردد. با توجه به اینکه اکثر نمونه‌های مورد آزمایش در آزمایشگاه مکانیک سنگ استوانه‌ای شکل می‌باشند، توسط مته‌های مغزه‌گیر از سنگ نمونه‌های استوانه‌ای تهیه می‌شود. تصویر شماره (۱) نمونه‌ای از مته‌های مغزه‌گیر معمولی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از دستگاه مغزه گیر

پس از عملیات مغزه گیری ابتدا و انتهای آنها توسط اره فولادی یا الماسه بریده شده و بایستی تمام سطوح تمام نمونه صاف و عاری از هر گونه ناهمواری شدید باشد. سطوح انتهایی مغزه استوانه‌ای باید کاملاً با یکدیگر موازی و عمود بر محور مرکزی مغزه طوریکه سطوح نباید ناصافی بیشتر از ۲۵ میکرون داشته باشند. بهترین روش برای صاف نمودن سطوح انتهایی نمونه‌ها سایش آنها است. دو سطح نمونه نباید بیشتر از ۰/۲۵ درجه نسبت به محور طولی نمونه انحراف از قائم و حداکثر ناهمواری‌های جانبی نیز بیشتر از ۰/۵ میلیمتر در طول نمونه نباشد.

۱-۲- تعیین صافی سطح جانبی نمونه:

روش اول: نمونه استوانه‌ای روی یک سطح صاف که حداکثر زبری آن ۱۲ میکرون است دوران داده می‌شود و حداکثر فاصله بین نمونه و سطح صاف توسط یک گیج حساس اندازه گیری می‌شود. چنانچه حداکثر مقدار اندازه گیری شده کمتر از ۰/۵ میلیمتر باشد نمونه از نظر صافی سطح جانبی مناسب است.

روش دوم: نمونه روی یک بلوک ثابت V شکل که دو سطح آن با یکدیگر زاویه ۹۰ درجه دارند و حداکثر ناصافی آنها ۱۳ میکرون است قرار داده می‌شود. یک گیج در امتداد شعاعی کاملاً مماس بر نمونه قرار می‌گیرد.

نمونه از ابتدا تا انتها بدون چرخش در طول بلوک حرکت می کند. تفاضل حداقل و حداکثر قرائت گیج ثبت می شود. آنگاه پس از چرخش ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه ای نسبت به حالت اولیه عملیات مذکور تکرار می شود. حداکثر مقدار تفاضل محاسبه شده نباید بیش از ۰/۵ میلیمتر باشد.

۲-۲- تعیین صافی سطوح انتهایی:

نمونه در بلوک V شکل قرار می گیرد و پایه گیج به صورت افقی و شاخص به صورت عرضی روی یک قطر حرکت می کند و قرائت گیج هر دو میلیمتر ثبت می گردد. در طول مرحله باید پایه با سطح انتهایی بلوک در تماس باشد. منحنی عبور داده شده از بین نقاط داده، باید انحرافی کمتر از ۲۵ میکرون با بهترین برازش به نقاط داشته باشد. سپس نمونه ۹۰ درجه چرخیده و عملیات فوق تکرار می شود. در مرحله بعد انتهای دیگر نمونه مورد بررسی قرار می گیرد. در جدول شماره (۱) انواع مغزه گیرها و قطر استاندارد مغزه ها آورده شده است.

جدول ۱- ابعاد سرمه های استاندارد

نوع مغزه	قطر نمونه (میلیمتر)
AX	۳۰/۱
BY	۴۲
NX	۵۴/۷
NQ	۴۷/۶
HQ	۶۳/۵
PQ	۸۵
BMLC	۳۵/۲
NMLC	۵۱/۹

نسبت طول به قطر نمونه ها باید مطابق با استاندارد باشد. حداقل قطر مغزه های مورد آزمایش ۴۷ میلیمتر است. در سنگ های دانه ای، این قطر باید حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه سنگ بوده و در سنگ های سست که

رفتاری شبیه خاک دارند مانند ماسه سنگ با سیمان شدگی ضعیف قطر مغزه باید حداقل ۶ برابر قطر بزرگترین دانه باشد.

۲-۳- تأثیر خصوصیات سنگ در بازدهی عملیات مغزه گیری:

برخی از خواص سنگ‌ها که در عملیات مغزه گیری موثرند به شرح زیر می‌باشند:

۱- سختی سنگ:

سختی هر سنگ ناشی از سختی مینرال‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد. یکی از کانی‌های سخت سیلیس است که به وفور در سنگ‌ها به همراه سایر کانی‌ها دیده می‌شود. هر چه مقدار سیلیس در سنگ بیشتر باشد، قدرت سایندگی آن بیشتر است و قطعاتی از ماشین آلات معدنی را که با سنگ تماس مستقیم دارند را زودتر فرسوده می‌کند.

۲- ابعاد دانه‌ها:

هر چه سنگ دانه درشت‌تر باشد راحت‌تر می‌توان در آن مغزه گیری نمود. بر حسب نوع دانه بندی حتی اگر کانی‌های سنگ یکسان باشند نتایج عمل در مغزه گیری متفاوت خواهد بود.

۳- مقاومت فشاری سنگ‌ها:

مقاومت سنگ‌های مختلف در مقابل فشار متفاوت است و به همین لحاظ در مقابل مغزه گیری رفتارهای مختلفی از خود نمایش می‌دهند. از آنجا که مقاومت کششی سنگ‌ها حدود ۱۰٪ مقاومت فشاری آنهاست، در حفاری توده سنگ سعی می‌شود که از خاصیت کششی سنگ‌ها استفاده شود.

۴- درزه و شکاف:

سطح مشترک بین لایه‌ها، وجود درزه‌های متفاوت به علت تکتونیک در توده سنگ و وجود گسل‌ها نقاط ضعیفی هستند که به شکستن سنگ کمک می‌کنند و با استفاده از این نقاط ضعف می‌توان در برخی از موارد شکستن سنگ را راحت‌تر توسعه داد. بایستی به این نکته توجه نمود که توسعه عملیات مغزه گیری در سنگ‌های دارای درزه یا شکستگی نمی‌تواند خواص سنگ بکر را به صورت مناسب منعکس نماید.

۳- وسایل آزمایش:

- دستگاه مغزه گیر
- نمونه سنگ
- کولیس
- دستگاه برش
- دستگاه ساب
- پودر کوارتز
- ماژیک
- چکش



شکل ۲- نمایی از دستگاه برش کلوخه‌های سنگی

۴- روش انجام آزمایش:

- از آنجایی که نمونه‌گیری از بلوک‌های سنگی صورت می‌پذیرد لذا بلوک‌هایی باید انتخاب شوند که خلل و فرج کمتری را دارا باشند. چرا که وجود حفرات و یا صفحات ضعیف در فرآیند آماده‌سازی نمونه و سایر مراحل آزمایشات مکانیک سنگ ایجاد مشکل می‌نماید.
- سر مته را در محل مناسب روی سنگ قرار می‌دهند و آنرا ثابت می‌کنند. جریان آب را باز نموده و دستگاه روشن می‌گردد. قبل از روشن کردن دستگاه باید از مناسب بودن میزان جریان سیال و محکم

بودن گیره مطمئن شد. علاوه بر این گیره پشت دستگاه باید محکم شود تا از لرزش دستگاه جلوگیری شود. در عملیات مغزه گیری سرعت مغزه گیری باید متعادل باشد، اگر فشار وارده زیاد شود، علاوه بر کم شدن سرعت حفاری امکان گیر کردن دستگاه نیز وجود دارد و دستگاه دچار لرزش های شدید می گردد. اگر فشار وارده کمتر از حد ایده آل باشد، سرعت حفاری کاسته می گردد و اتلاف انرژی زیاد می شود و راندمان مغزه گیری پایین می آید.

- در حین عملیات مغزه گیری پایین رفتن مته بایستی یکنواخت باشد و از متوقف کردن فشار، و یا پایین بردن سریع سر مته اجتناب شود زیرا منجر می شود که علاوه بر مسائل مطرح شده، سطح جانبی نمونه به صورت پله ای در آید و ناهمواری های شدید بوجود آورد.
- در عملیات مغزه گیری برای جلوگیری از گرم شدن زیاد سر مته نیاز به جریان سیال خنک کننده می باشد که در غیر این صورت، سر مته دچار فرسودگی و خستگی می گردد.
- از آنجا که نمونه ها دارای طول ۲۰ سانتیمتر هستند و متوسط زمان مغزه گیری ۶ دقیقه است و با توجه به طول مغزه و زمان حفاری می توان سرعت حفاری را بدست آورد:

$$V = L/T = 20/6 = 3.3 \text{ cm/min} \quad (1)$$

نشانه توقف عملیات مغزه گیری خروج آب از پایین بلوک سنگی است. بعد از اتمام مغزه گیری، ابتدا سر مته در حال دوران از بلوک سنگی خارج می گردد و سپس دستگاه خاموش می شود. چنانچه مغزه در سر مته گیر کرده باشد می توان به کمک چند ضربه چکش آنرا آزاد نمود. پس از خروج مغزه و خشک کردن آن، به

کمک کولیس ابعاد ۱۳۲ (نمونه های آزمایش تک محوری)، ۱۱۰ (نمونه های آزمایش سه محوری)، ۵۵

(نمونه های آزمایش بار نقطه ای) و ۲۸ (نمونه های آزمایش برزیلی) را بر روی مغزه ها علامت گذاری نموده

و به کمک دستگاه برش نمونه های با نسبت طول به قطر ۲/۵، ۲، ۱ و ۰/۵ آماده می نماییم. علاوه بر این لازم

است که پس از مغزه گیری با سر مته دارای قطع ۱۰ سانتیمتر، نمونه هایی با نسبت طول به قطر ۰/۵ جهت

آزمایش برش مستقیم تهیه گردد. در حین برش بایستی دقت نمود که انتهای برش به صورت موازی باشد تا طول نمونه در تمام جهات یکسان باشد و در مرحله ساب نیز مشکل خاصی رخ ندهد.

جدول ۲- ابعاد استاندارد نمونه‌های آزمایش‌های مختلف

نسبت طول به قطر	قطر نمونه (میلیمتر)	آزمایش
۲/۵	۵۴	مقاومت فشاری تک محوری
۲	۵۴	مقاومت فشاری سه محوری
۱	۵۴	اندیس بار نقطه‌ای
۰/۵	۵۴	برزیلی
۰/۵	۱۰۰	برش مستقیم

سطوح انتهایی نمونه‌های مربوط به آزمایش تک محوری و سه محوری لازم است صیقل گردند. لذا نمونه‌های دارای نسبت طول به قطر برابر با ۲/۵ و ۲ را با دستگاه ساب داده تا سطوح انتهایی آنها بطور کامل صاف و صیقلی و با یکدیگر موازی شوند. بهترین روش برای پرداخت نمودن سطوح انتهایی نمونه، استفاده از صفحه ساینده می‌باشد. در صورتی که سنگ حاوی کانی‌های با سختی بالا باشد، ساینده الماسه استفاده می‌شود. در این حالت از آب برای خنک کاری سطح سایش استفاده می‌گردد. در مورد سنگ‌های ضعیف از ساینده‌های نرم و سیستم خنک کننده بادی کمک گرفته می‌شود.

در هنگام پرداخت سطوح باید سایش سطح به صورت مرحله به مرحله و در جهات مختلف توسعه یابد و از پرداخت سریع و کلی سطح در یک جهت اجتناب شود. زیرا موجب پریده شدن لب نمونه در انتهای کار می‌گردد.

علاوه بر روش فوق برای پرداخت سطوح، می‌توان از پودرهای ساینده استفاده شود. برای این منظور این پودرها بین سطح نمونه و یک صفحه ثابت ریخته و عملیات انجام می‌شود. در این حالت وابسته به مرحله و شدت مورد نیاز برای سایش از پودرهای با ابعاد دانه بندی متفاوت استفاده می‌شود. باید توجه نمود که نمونه‌ها تنها در اثر وزن خودشان سایش یابند و از وارد کردن هرگونه نیروی اضافی خودداری شود. برای نمونه‌هایی که بوسیله دستگاه ساب خورده‌اند، تنها از پودر دانه ریز و در مورد دیگر نمونه‌ها از پودر دانه درشت و بعد از اتمام ساب از پودر دانه ریز استفاده می‌شود. برخی از سنگ‌ها به خاطر ساختار خاصی که دارند و یا به دلیل سستی زیاد، قابلیت پرداخت خوبی ندارند. در چنین شرایطی از اندود کردن (Capping)

استفاده می‌شود. به طور کلی بر خلاف بتن، در آزمایش مغزه‌های سنگی استفاده از عملیات اندود به هیچ وجه پیشنهاد نمی‌شود مگر در مواقعی که ناچار به استفاده از آن باشیم.

۵- بحث و بررسی:

مرحله نمونه‌گیری در فرآیند انجام آزمایشات مکانیک سنگ بسیار مهم است. زیرا چنانچه این مرحله به درستی انجام نگردد و خطاهای گوناگون اعم از انسانی و دستگاهی در آن دخیل شود سایر فرآیندهای آزمایشات را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به نتایج با خلاف واقعیت می‌شود. لذا استفاده از روش‌های نمونه‌گیری که نمونه بهتری را بتوان تهیه کرد توصیه می‌شود. همچنین سعی در حفظ خواص برجای نمونه‌ها مانند رطوبت و ... را تا رسیدن به آزمایشگاه و تعیین خواص آن لازم و ضروری است.

پرداخت کامل و صحیح نمونه تأثیر زیادی در نتیجه آزمایشگاهی مانند تعیین مقاومت فشاری سه محوری و تک محوری دارد. زیرا ناصافی و غیر موازی بودن سطوح سبب توزیع غیر مناسب بار و در نتیجه نتایج غیر واقعی می‌گردد.

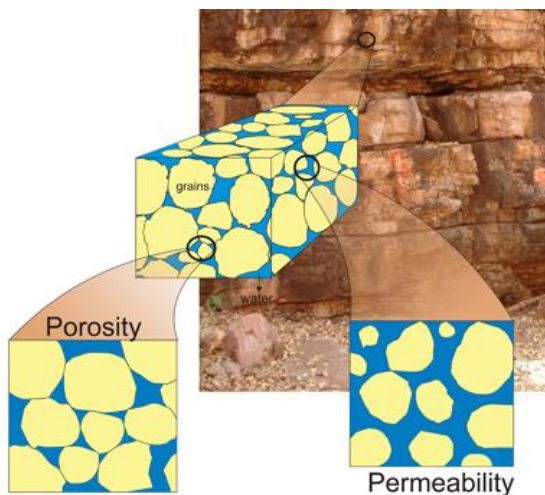
با توجه به موارد ذکر شده در بالا عواملی که ممکن است در آزمایش ایجاد خطا نماید به شرح زیر می‌باشد:

- عدم استفاده از کولیس و دقت نکردن در قرائت صحیح اعداد آن
- عدم بارگذاری یکنواخت و موجدار شدن نمونه
- عدم دقت در مسطح کردن سطوح بالایی و پایینی نمونه که خطاهایی را در مراحل بعدی همراه خواهد داشت.

آزمایش

درصد رطوبت، تعیین

تخلخل و چگالی



عنوان آزمایش: درصد رطوبت نمونه‌های سنگی، تعیین تخلخل و چگالی.

در این آزمایش سه خاصیت فیزیکی سنگ در سه مرحله و به روش‌های مختلف به دست می‌آید. برای این منظور لازم است چهار آزمایش مجزا انجام شود.

۱- آزمایش اول: آزمایش محاسبه درصد رطوبت یک نمونه سنگی.

۱-۱- هدف:

تعیین درصد رطوبت نمونه سنگی.

۱-۲- تئوری آزمایش:

رطوبت از جمله عوامل موثر در میزان مقاومت سنگ‌ها می‌باشد، طوری که با افزایش میزان رطوبت نمونه سنگ، میزان مقاومت آن به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر میزان رطوبت موجود در یک نمونه سنگی با مقدار تخلخل و چگالی سنگ نیز رابطه معناداری دارد.

۱-۳- وسایل مورد نیاز:

- گرمخانه^۱ با قابلیت تولید درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد با دقت ± 3 درجه سانتیگراد.
- یک ظرف سالم با درب کاملاً کیپ شده.
- دسیکاتور.
- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم.

¹Oven

۴-۱- روش انجام آزمایش:

اندازه گیری میزان رطوبت یک نمونه سنگی در آزمایشگاه بسیار ساده است. برای این منظور ابتدا نمونه مورد نظر را با ترازو وزن کرده و وزن آن را یادداشت می کنیم. سپس نمونه ها را در گرمخانه با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار می دهیم. پس از آن، نمونه ها را از گرمخانه خارج کرده و آنها را در دسیکاتور قرار می دهیم تا سرد شود. پس از سرد شدن نمونه ها، آنها را مجدداً با همان ترازو وزن می کنیم.

۵-۱- داده ها و محاسبات:

میزان رطوبت یک نمونه سنگی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

که در آن w درصد رطوبت موجود در نمونه، M_w وزن آب موجود در نمونه و M_s وزن خشک نمونه می باشد.

وزن آب موجود در نمونه با تفاضل وزن طبیعی نمونه از وزن خشک نمونه بدست می آید:

$$M_w = M - M_s \quad (2)$$

بنابراین بر اساس اطلاعات بدست آمده از وزن کردن نمونه ها درصد رطوبت آنها با استفاده از فرمول های بالا قابل محاسبه می باشد.

۶-۱- بحث و بررسی:

نمونه های مورد استفاده در این آزمایش مدت زیادی در محیط آزمایشگاه نگهداری شده اند بنابراین رطوبت اندازه گیری شده در این آزمایش رطوبت طبیعی این نمونه ها نمی باشد، بلکه این رطوبت، رطوبت آزمایشگاه می باشد. در عمل پس از آنکه نمونه مورد نظر در محل کارگاه آماده شد آن را در داخل فویل مخصوصی پیچیده و به آزمایشگاه منتقل می کنند. در آزمایشگاه نیز به سرعت باید وزن شده و آزمایش تعیین رطوبت را انجام دهند.

۲- آزمایش دوم: تعیین درصد تخلخل و چگالی بر اساس روش اشباع و کلیپر.

۲-۱- هدف:

تعیین درصد حجمی فضاهای خالی سنگ و تعیین جرم واحد حجم.

۲-۲- تئوری آزمایش:

آگاهی از چگالی سنگ‌ها نقش مهمی در طراحی مهندسی پروژه‌های عمرانی و معدنی ایفا می‌کند. مقادیر چگالی و تخلخل در ارزیابی ذخایر معدنی، انتخاب نوع وسایل حفاری، طراحی سیستم حمل و نقل، محاسبه میزان مواد منفجره مصرفی و همچنین برای تعیین تنش قائم ناشی از وزن سنگ‌های روباره در اعماق مختلف توده سنگ به کار می‌رود.

تخلخل در سنگ‌ها به دلایل مختلفی از جمله شرایط تشکیل (تخلخل اولیه) و فرآیندهای ثانویه ای مثل هوازدگی، دگرسانی، انحلال کانی‌ها، تبلور مجدد و ... (تخلخل ثانویه) به وجود می‌آید. رابطه نزدیکی بین چگالی و تخلخل سنگ‌ها وجود دارد، طوری که هر چه چگالی نمونه سنگی بیشتر باشد تخلخل آن کمتر می‌باشد. لذا برای پروژه‌های مهندسی تعیین دقیق مقدار تخلخل و چگالی از اهمیت خاصی برخوردار است. به عنوان مثال تخلخل یکی از پارامترهای مهم و اساسی در ارزیابی خصوصیات پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری محسوب می‌شود.

روش‌های متعددی برای تعیین چگالی و تخلخل به کار می‌روند که عبارتند از:

روش اشباع و اندازه‌گیری مستقیم ابعاد نمونه‌ها^۱

روش اشباع و غوطه‌ورسازی^۲

روش تغییر حجم جیوه و جرم مخصوص دانه‌ها^۳

¹ Saturation and caliper techniques

² Saturation and buoyancy techniques

³ Mercury displacement and grain specific gravity techniques

روش تغییر حجم جیوه و قانون بویل^۱

همگی این روش‌ها امروزه نیز برای تعیین چگالی و تخلخل نمونه‌های سنگی در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود اما روش‌های جدیدتری نیز برای این مهم شناسایی شده‌اند.

امروزه در صنعت نفت، تخلخل با استفاده از روش تزریق گاز هلیم بر نمونه‌های مغزه (پلاگ) به دست می‌آید. با این وجود تمامی چاه‌های یک میدان دارای مغزه نیستند. البته این مساله تنها به خاطر گران بودن مغزه‌گیری و انجام آزمایش‌های تزریق هلیم و جیوه جهت اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی نیست. بلکه در برخی چاه‌ها مانند چاه‌های افقی مغزه‌گیری عملاً غیر ممکن است. ولی تقریباً از تمامی چاه‌ها نمودارگیری صورت می‌گیرد. بنابراین استفاده از روش‌هایی که بتوانند از روی نمودارهای چاه‌نگاری به تخمین پارامترهای فوق‌پردازند بسیار مفید خواهد بود. امروزه از منطق فازی به عنوان یک رهیافت جدید جهت تخمین پارامترهای تخلخل، تراوایی و گروه‌های سنگی در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب کشور استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد منطق فازی در تخمین پارامترهای فوق‌موفق بوده است.

روش دیگری که امروزه برای تعیین درصد تخلخل سنگ‌ها پیشنهاد می‌شود استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان رابطه‌ای بین داده‌های لاگ (به عنوان ورودی‌های شبکه) و تخلخل مغزه (به عنوان خروجی شبکه) برقرار نمود. پس از آموزش شبکه با دادن داده‌های ورودی به آن می‌توان خروجی را بدست آورد. برای این منظور از داده‌های پتروفیزیکی یک چاه برای ساختن یک مدل بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی در یکی از میادین نفتی جنوب ایران استفاده شده است. از چاه دوم که در ساختن مدل فوق‌نقشی نداشته برای سنجش اعتبار مذکور استفاده شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد بسیار خوب شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین تخلخل است.

۲-۳- وسایل مورد نیاز:

- گرمخانه با قابلیت تولید درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد با دقت ± 3 درجه سانتیگراد.
- دسیکاتور.

¹ Mercury displacement and Boyle's low techniques

- کولیس با دقت ۰/۱ میلیمتر.
- سیستم اشباع در خلاء که بتوان نمونه را تحت خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال به مدت حداقل ۱ ساعت نگهداری کرد.
- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم.

۲-۴- روش انجام آزمایش:

روش کلیبر برای نمونه‌هایی که دارای شکل هندسی منظمی هستند استفاده می‌شود. در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای برای تعیین چگالی و تخلخل استفاده می‌شود. ابتدا ابعاد نمونه مورد نظر را با کولیس اندازه‌گیری می‌کنیم. این اندازه‌گیری عبارت است از اندازه‌گیری قطر در شش قرائت و اندازه‌گیری طول در چهار قرائت و به کمک ابعاد میانگین بدست آمده حجم نمونه را تعیین می‌کنیم. سپس نمونه را در داخل گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار می‌دهیم تا کاملاً خشک شود. پس از ۲۴ ساعت نمونه را از گرمخانه خارج کرده و در دسیکاتور قرار می‌دهیم تا کاملاً سرد شود. پس از سرد شدن نمونه آن را وزن کرده و وزن آن را یادداشت می‌نماییم. برای تعیین تخلخل نمونه در این آزمایش از روش اشباع استفاده می‌کنیم لذا پس از وزن کردن نمونه آن را در ظرف مخصوص اشباع (همراه با پمپ خلاء) به مدت یک ساعت قرار می‌دهیم. در نهایت نمونه‌ها را از ظرف اشباع خارج کرده و وزن می‌کنیم. تعیین چگالی و تخلخل، به صورت زیر می‌باشد.

۲-۵- داده‌ها و محاسبات:

با استفاده از داده‌های حاصل از مراحل فوق، حجم نمونه (V)، حجم فضای خالی در سنگ (V_v)، تخلخل (n) و چگالی ذرات نمونه‌ها را محاسبه می‌کنیم.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot l \quad (۳)$$

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (۴)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (5)$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_v} \quad (6)$$

۳- آزمایش سوم: تعیین درصد تخلخل و چگالی بر اساس روش اشباع و غوطه‌ورسازی.

۳-۱- هدف:

تعیین چگالی و تخلخل نمونه‌هایی که داری شکل هندسی منظمی نمی‌باشند.

۳-۲- وسایل مورد نیاز:

- گرمخانه با قابلیت تولید درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد با دقت ± 3 درجه سانتیگراد.
- دسیکاتور.
- سیستم اشباع در خلاء که بتوان نمونه را تحت خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال به مدت حداقل ۱ ساعت نگهداری کرد.
- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم.
- وان غوطه‌ور و یک سیم نازک.

۳-۳- روش انجام آزمایش:

انجام این آزمایش نیز تا حدودی مانند آزمایش قبلی است به طوری که در آزمایشگاه این آزمایش‌ها را همزمان انجام می‌دهند. نمونه مورد استفاده در این آزمایش شامل ۱۰ قطعه سنگ با شکل هندسی نامنظم (یا منظم) است که هر یک حداقل وزنی معادل ۵۰ گرم دارند.

پس از خارج کردن نمونه‌ها از دسیکاتور و تعیین وزن خشک نمونه‌ها، آنها را در ظرف اشباع به مدت ۱ ساعت قرار می‌دهیم تا کاملاً اشباع شود. پس از اشباع کامل نمونه، آن را به سبد داخل وان آب که به ترازو

آویزان است منتقل شده و جرم اشباع- غوطه‌ور سبد و نمونه (M_{sub}) با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه را از ظرف خارج کرده و آن را وزن می‌کنیم تا جرم اشباع نمونه (M_{sat}) بدست آید. در ادامه به کمک قانون ارشمیدس حجم نمونه را بدست می‌آوریم و در محاسبه تخلخل و چگالی استفاده می‌کنیم.

۳-۴- داده‌ها و محاسبات:

از مزیت‌های این آزمایش اینست که می‌توان برای نمونه‌هایی که دارای شکل هندسی منظمی نیستند نیز انجام داد. بنابراین در این آزمایش هم از نمونه‌ها استوانه‌ای و هم از نمونه‌های دارای شکل هندسی نامنظم استفاده کرده‌ایم. داده‌های این آزمایش عبارتند از:

وزن خشک نمونه (M_s)، وزن نمونه اشباع (M_{sat})، وزن نمونه غوطه‌ور (M_{sub}) و در نهایت با استفاده از قانون ارشمیدس حجم نمونه (V) را تعیین کرده و سپس به کمک روابط زیر حجم فضای خالی سنگ‌ها (V_v)، تخلخل (n) و چگالی (ρ_d) نمونه‌ها را محاسبه می‌نماییم.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_v} \quad (7)$$

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (8)$$

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (9)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (10)$$

۳-۵- بحث و بررسی:

بدون شک نحوه تعیین حجم نمونه‌ها در این آزمایش تأثیر بسیار زیادی روی میزان چگالی و تخلخل نمونه می‌گذارد. در آزمایش فوق دو روش کلی جهت تعیین حجم نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در روش اول اندازه‌گیری حجم بوسیله اندازه‌گیری ابعاد نمونه و روش دوم از طریق اندازه‌گیری حجم نمونه با استفاده از قانون ارشمیدس. قطعاً استفاده از قانون ارشمیدس برای تعیین حجم نمونه‌ها خطای کمتری دارد. برای مقایسه این دو

روش، نمونه دارای شکل استوانه‌ای منظم را هم به روش اندازه‌گیری ابعاد و هم به روش غوطه‌وری تعیین حجم نموده و چگالی و تخلخل آنها را با هم مقایسه می‌نماییم.

۴- آزمایش چهارم: تعیین چگالی و تخلخل نمونه‌های سنگی به روش تغییر حجم آب.

۴-۱- هدف:

تعیین وزن مخصوص دانه‌ای و تخلخل کلی نمونه‌های سنگی.

۴-۲- تئوری آزمایش:

در این آزمایش وزن مخصوص دانه‌ای نمونه سنگی را بدست می‌آوریم. این پارامتر در مورد سنگ‌ها کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و عمدتاً برای خاک‌ها استفاده می‌شود. لذا چنانچه بخواهیم این پارامتر را در مورد سنگ‌ها تعیین کنیم در ابتدا لازم است که نمونه سنگی را به صورت پودر دریاوریم.

دیگر پارامتری که در این آزمایش تعیین می‌شود تخلخل نمونه سنگی می‌باشد. در دو آزمایش قبلی از اشباع نمونه‌ها برای اندازه‌گیری حجم فضاهاى خالی نمونه سنگی استفاده کردیم در نتیجه تخلخل بدست آمده در آزمایش‌های قبلی تخلخل موثر نمونه‌ها محسوب می‌شد ولی تخلخلی که در این آزمایش اندازه‌گیری می‌شود تخلخل کلی نمونه محسوب می‌شود و انتظار داریم که این تخلخل بیشتر از تخلخل موثر نمونه باشد.

۴-۳- وسایل مورد نیاز آزمایش:

- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم.
- سیستم اشباع نمونه در خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال.
- پیکنومتر.

۴-۴- روش انجام آزمایش:

در ابتدا نمونه‌های مورد نظر را پودر کرده و ۲۵ گرم از پودر نمونه را در پیکنومتری که دارای ظرفیت ۵۰۰ میلی‌لیتر است، میریزیم. روند اضافه کردن آب به پودر را تا آنجا ادامه می‌دهیم که حجم آب و پودر دقیقاً ۵۰۰ میلی‌لیتر شود. مهمترین و وقت‌گیرترین بخش این آزمایش همین قسمت اضافه کردن آب و اشباع نمونه می‌باشد چراکه اضافه کردن آب باید در چندین مرحله انجام شود. باید به این نکته اشاره نمود که هر مرحله اشباع توسط پمپ خلاء انجام می‌گیرد. به طور کلی در این مرحله از آزمایش به ۳۰ دقیقه از زمان احتیاج خواهیم داشت. پس از اشباع کامل نمونه، نمونه به همراه آب موجود در پیکنومتر وزن شده و سپس وزن آن را یادداشت می‌کنیم.

۴-۵- داده‌ها و محاسبات:

تخلخل بر اساس روابط زیر قابل تخمین می‌باشد.

$$M_T = M_{pw} + M_s \quad (11)$$

$$M = M_T - M_{pw} \quad (12)$$

$$\rho_{ws} = \frac{M_{pw} - M_p}{V} \quad (13)$$

$$V_s = \frac{M}{\rho_{ws}} \quad (14)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (15)$$

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \quad (16)$$

در روابطه فوق (M_p) بیانگر وزن ظرف خالی، (M_{pw}) وزن ظرف پر از آب (ظرف به حجم رسیده)، (M_s) ناحیه پودر، و (M_{spw}) وزن ظرف و پودر و آب می‌باشد.

۴-۶- نتیجه گیری:

در این آزمایش از روش‌های مختلفی جهت تعیین چگالی و تخلخل نمونه‌های سنگی استفاده شده است. از مقایسه چگالی‌های بدست آمده حاصل از آزمایش‌های غوطه‌وری و کلیپر انتظار می‌رود اختلاف چگالی بدست آمده از این دو آزمایش زیاد باشد، اما عملاً این اختلاف در حد قابل قبول نمی‌باشد (اختلاف بیش از 10 kg/m^3 می‌باشد). علت اصلی این اختلاف خطای قابل ملاحظه تعیین حجم نمونه‌های دارای شکل هندسی منظم در آزمایش کلیپر می‌باشد. زیرا در این آزمایش فرض بر اینست که نمونه مورد استفاده دارای شکل هندسی منظمی می‌باشد ولی اندازه‌گیری‌های متعدد ابعاد نمونه‌ها نشان داد که این نمونه‌ها دارای شکل هندسی منظمی نیستند و این مسئله روی تعیین حجم دقیق نمونه تأثیر بسزایی دارد. اگرچه برای تعیین حجم نمونه از میانگین اندازه‌گیری‌های متعدد ابعاد نمونه استفاده شده است اما علیرغم این، حجم تعیین شده با حجم بدست آمده از قانون ارشمیدس (که از دقت قابل قبولی برخوردار است) اختلاف زیادی دارد. بنابراین برای تعیین چگالی نمونه‌ای مختلف یا باید از روش غوطه‌وری استفاده کنیم و یا اینکه نمونه مربوطه را با دقت قابل قبولی به شکل هندسی منظمی در بیاوریم.

آزمایش

چکش اشمیت



عنوان آزمایش:

چکش اشمیت.

۱- هدف:

در این آزمایش هدف تخمین مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته سنگ توسط انجام یک آزمایش سریع و غیرمخرب است.

۲- تئوری آزمایش:

اساس آزمایش فوق بر این اصل استوار است که بازتاب یک جرم ارتجاعی به سختی سطح در مقابل جرمی که به آن برخورد می کند وابسته است. در چکش اشمیت جرمی به فنر متصل شده که با کشیدن فنر تا نقطه مشخصی، مقدار انرژی ثابتی به آن داده می شود که این کار توسط فشار دادن چکش به سطح سنگ انجام می گردد. بعد از آزاد کردن، جرم تحت اثر بازتاب میله چکش (که هنوز در تماس با سطح سنگ است) قرار می گیرد. مسافتی که توسط جرم طی می کند برحسب درصدی از انبساط اولیه فنر بیان می شود که به آن عدد بازتاب گویند.

این مقدار توسط یک نشانه که در طول یک مقیاس مدرج حرکت می کند، نشان داده می شود. عدد بازتاب یک اندازه مطلق است، چون به انرژی ذخیره شده در فنر و به اندازه جرم وابسته می باشد.

سادگی و قابل حمل بودن چکش اشمیت (SH) آنرا به یکی از دستگاه های اندیس ایده آل با کاربرد و محبوبیت وسیع در زمینه های متفاوت کاری تبدیل نموده است. مقدار سختی واجهش (R)^۱ احتمالاً پرکاربردترین اندیس در عملیات اجرایی مکانیک سنگ جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و مدول الاستیسیته (E) سنگ بکر در هر دو شرایط آزمایشگاهی و برجا می باشد. (SH) بصورت وسیعی برای تخمین (UCS) در

¹Rebound

دیواره‌های ناپیوستگی‌ها، ارزیابی کاربردی بودن، قابلیت حفاری و چالزنی سنگ‌ها به وسیله ابزار مکانیکی (برش، جلا، آسیا، خردایش و فرآیندهای قطعه‌سازی در سنگ‌ها ساختمانی، و تونل‌زنی) استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده که سختی سنگ‌ها با مقاومت فشاری تک محوری و مدول کشسانی سنگ‌ها در ارتباط است. در واقع سختی یکی از مفاهیم رایج برای توصیف رفتاری سنگ‌ها بکار می‌رود. سختی تابعی از عوامل ذاتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب و اندرکنش این عوامل، تعیین کننده سختی یک سنگ است. روش‌های متعددی جهت تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده که یکی از این روش‌ها بکارگیری وسیله‌ای به نام چکش اشمیت است که معروف به آزمایش‌های واجهشی یا دینامیکی می‌باشد. در این دسته از آزمایش‌ها از یک چکش یا وزنه برای ضربه زدن به سطح سنگ استفاده می‌شود و ارتفاع واجهش وزنه مقیاسی برای سنجش سختی است. هرگونه رفتار پلاستیک یا تغییر شکل بر اثر ضربه، انرژی الاستیک واجهش چکش را کاهش می‌دهد. این آزمایش برای تعیین سختی سنگ و بتن با استفاده از چکش اشمیت در صحرا و یا آزمایشگاه بکار می‌رود. با استفاده از این سختی می‌توان خصوصیات دیگر سنگ و بتن را مانند مقاومت فشاری، تخمین زد. این روش توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ ISRM به صورت استاندارد در آمده است. در مورد سنگ‌های خیلی نرم یا خیلی سخت دارای محدودیت‌هایی بوده است و نتایج قابل اطمینانی ارائه نمی‌دهد.

۳- وسائل آزمایش:

- چکش بازتاب (اشمیت).
- نمونه سنگ برجا از منطقه.
- سندان یا صفحه فولادی از جنس فولاد بسیار سخت با قطر ۱۵ سانتیمتر جهت کالیبراسیون.

۴- روش انجام آزمایش:

- ۱- قبل از انجام آزمایش دستگاه بایستی کالیبره شود.

۲- نمونه مورد استفاده بایستی معرف نمونه باشد از اینرو در صورت امکان قطعات بزرگتر سنگ برای آزمایش استفاده شود.

۳- سطح نمونه در محل آزمایش بایستی صاف و مسطح باشد. این سطح تا عمق ۶ cm باید عاری از درزه و شکاف و ناپیوستگی باشد.

۴- نمونه‌ها باید در زمان انجام آزمایش در جای خود محکم شوند. طوری که هیچگونه ارتعاش و حرکتی ایجاد نگردد. بدین منظور در آزمایشگاه نمونه بایستی روی صفحه فلزی با وزن بیش از ۲۰ Kg قرار داده شود.

۵- دست کم ۲۰ آزمایش بر روی نمونه انجام شود. محل آزمایش‌ها حداقل به اندازه قطر انتهای چکش از هم بایستی فاصله داشته باشد. در صورت ایجاد خوردگی و یا شکستگی در محل انجام آزمایش نتیجه مورد قبول نیست.

ضریب تصحیح قرائت‌ها با توجه به کالیبراسیون چکش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = \frac{R_s}{R} \quad (1)$$

R_s : مقدار سختی استاندارد ویژه سندان

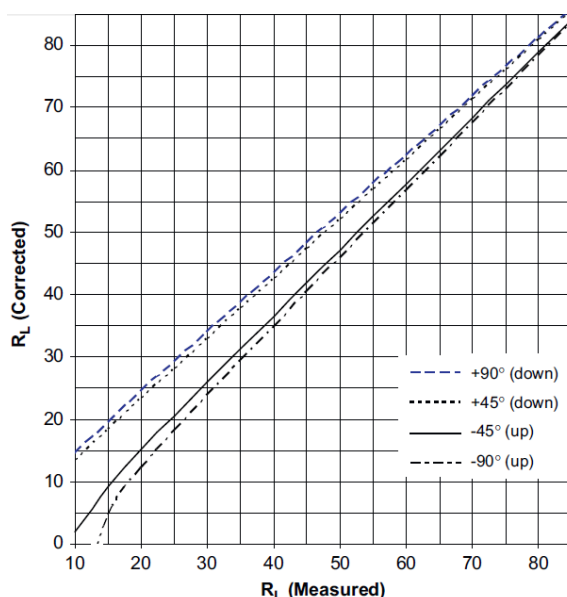
R : میانگین ۱۰ قرائت انجام شده روی سندان کالیبراسیون

برای تعیین سختی اشمیت با توجه به اینکه احتمال وجود خطا در مقادیر پایین بیشتر است، ابتدا داده‌ها بترتیب صعودی نوشته شده و سپس نیمی از داده‌ها که کمترین مقدار را دارند، حذف و از بقیه داده‌ها میانگین گرفته می‌شود. این میانگین در ضریب تصحیح ضرب شده و عدد حاصل به عنوان سختی واجهشی اشمیت در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از سختی واجهشی اشمیت، می‌توان بر اساس جداول ارائه شده توسط کارخانه سازنده و زاویه برخورد چکش به نمونه، مقاومت فشاری سنگ را تخمین زد.

چکش در زمان برخورد با سطح مورد آزمایش باید بر آن عمود باشد. در غیر اینصورت احتمال لغزش اصطکاکی نوک چکش، کنده شدن مواد و انتقال تنها بخشی از انرژی برخورد به چکش وجود دارد. پس بسیار مهم است که چکش عمود بر سطح آزمایش قرار گیرد.

۵- استانداردسازی مقدار عدد واجهش با توجه به راستای برخورد افقی

تابع تحلیلی استانداردسازی مشخص کننده مقدار واجهش در راستای افقی توسط باسو و آیدین (۲۰۰۴) ارائه شده است. شکل ۱ بر این مبنا مقدار تصحیح در عدد واجهش قرائت شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار تصحیح عدد واجهش نسبت به زاویه چکش از راستای افقی در زمان برخورد (آیدین، ۲۰۰۸)

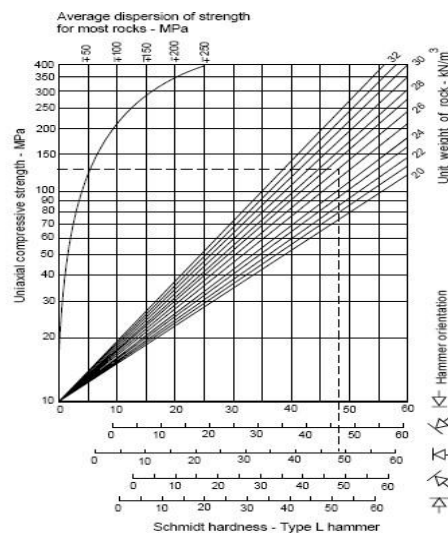
روابط متعددی برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته گزارش شده است. برخی از این روابط در جدول ۱ آمده است. در این جدول γ وزن مخصوص بر حسب (grcm^{-3}) و N سختی یا عدد واجهش چکش اشمیت است. همچنین شکل ۲ نحوه تعیین مقاومت فشاری تک محوره توسط نمودار را نشان می‌دهد. در صورت انجام آزمایش بر روی نمونه‌های صحرایی نزدیک به سطوح ناپیوستگی باید توجه داشت که اگر نرم‌شدگی یا نوع دیگری از هوازدگی بر روی ناپیوستگی مشاهده شود، آنگاه مقاومت فشاری را می‌توان توسط رابطه زیر تخمین زد. بارتن و چویی (۱۹۷۷) نحوه استفاده از تست چکش اشمیت در تخمین مقاومت فشاری سنگ مجاور ناپیوستگی را بررسی نمودند و رابطه تجربی زیر را ارائه دادند:

$$\log_{10} \sigma_d \approx 0.88\gamma R + 1.01 \quad (2)$$

γ وزن مخصوص ماده سنگ (MNm^{-3})، R عدد واجهش چکش و σ_d مقاومت فشاری بر حسب MPa است که معمولاً بین ۲۰ تا حدوداً ۳۰۰ MPa بدست می آید.

جدول ۱- روابط بین سختی اشپیت و مقاومت فشاری تک محوره (ترابی و همکاران ۲۰۱۰)

Equation	R	Rock type
$UCS = 10^{(0.00014\gamma N + 31.6)}$	0.94	Three base rock types
$UCS = 6.9 \times 10^{[1.348 \log(\gamma N) + 1.86]}$		Three base rock types
$UCS = 12.74 \exp[0.0185\gamma N]$		Three base rock types
$UCS = 0.447 \exp[0.045(N + 3.5) + \gamma]$	0.72	Rock coal
$UCS = 2N$	0.94	30 Sedimentary units
$UCS = 0.4N - 3.6$	0.7	20 Sedimentary units
$UCS = 0.994N - 0.383$	0.87	10 Sedimentary units
$UCS = 0.88N - 12.11$	0.77	Coal
$UCS = 702N - 11040$ (psi)	0.88	Sandstone, siltstone, limestone and anhydrite
$N = 0.2329UCS + 15.7244$	0.81	33 Lithological units (marble, limestone, dolomite)
$UCS = \exp(aN + b)$ a, b coefficient depend on rock type	0.91	Mica-schist, prasinite, serpentinite, gabbro, mudstone
$UCS = 4.3 \times 10^{-2}(N\gamma) + 1.2$		Sandstones
$UCS = 1.8 \times 10^{-2}(N\gamma) + 2.9$		Carbonates
$UCS = 0.0001N^{3.2658}$	0.84	Marl
$UCS = 1.31N - 2.52$	0.55	Gabbro and basalt
$UCS = 4.5 \times 10^{-4}(N\gamma)^{2.46}$	0.93	10 Lithological units
$\ln UCS = 0.792 + 0.067N \pm 0.231$	0.96	7 Different rock types
$UCS = 6.97 \exp(0.014N\gamma)$		48 different rocks
$UCS = \exp(0.818 + 0.059N)$	0.98	Gypsum
$UCS = 4 \times 10^{-6} N^{4.2917}$		Two types of limestone, two types of marble, sandstone and basalt
$UCS = 4.24 \exp[0.059N]$		6 igneous rocks, 3 metamorphose rocks and 2 sedimentary rocks
$UCS = 0.0137N^{2.2721}$	0.97	19 Different rock types



شکل ۲- تعیین مقاومت فشاری تک محوره از روی نمودار

۶- بحث و بررسی:

پارامترهای تأثیرگذار بر روی نتایج آزمایش بصورت زیر می‌باشد:

- ۱- نوع چکش
- ۲- نرمالسازی عدد اشمیت
- ۳- شرایط نمونه
- ۴- هواز دگی
- ۵- رطوبت نمونه شرایط آزمایش
- ۶- دمای هوا
- ۷- خطاهای انسانی
- ۸- خطاهای ناشی از وسایل آزمایشگاهی

۷- نتیجه گیری:

آزمایش چکش اشمیت یک آزمایش ارزان، سریع و قابل انجام در محل است که مقدار پارامترهای سنگ را تخمین می‌زند. دقت نتایج حاصل وابسته به نحوه انجام آزمایش و شرایط نمونه است. روابط متعددی برای تخمین پارامترها ارائه شده است.

آزمایش

اندیس بار نقطه‌ای



عنوان آزمایش:

اندیس بار نقطه‌ای.

۱- هدف:

آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای در واقع روشی جهت تقسیم بندی سنگ‌ها بر اساس مقاومت آنهاست. همچنین به کمک این روش می‌توان سایر پارامترهای مکانیک سنگی را به صورت مرتبط با این اندیس (مانند کشش تک محوره و مقاومت فشاری سنگ) را تعیین نمود.

آزمایش مذکور اندیس مقاومت بار نقطه‌ای سنگ ($I_s(50)$) و اندیس آنیزوتروپی مقاومتی آنها را ($I_a(50)$) (که در واقع نرخ مقاومت بار نقطه‌ای در جهات حداکثر و حداقل مقاومت می‌باشد) اندازه‌گیری می‌کند. به این منظور تعدادی نمونه به صورت استوانه‌ای (آزمایش قطری و محوری)، و نمونه‌های با اشکال غیر مشخص نیاز است. در این روش نیازی به آماده سازی نمونه نمی‌باشد.

باتوجه به اینکه دستگاه آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای سنگ قابل حمل است، این آزمایش را می‌توان هم در صحرا و هم در آزمایشگاه انجام داد.

۲- تئوری آزمایش:

چنانچه در هدف این آزمایش بیان شد از اندیس بار نقطه‌ای می‌توان برای تخمین مقاومت تک محوری فشاری و مقاومت کششی توده سنگ استفاده کرد. از طرف دیگر انجام دقیق آزمایش تک محوری فشاری و بخصوص آزمایش مقاومت کششی سنگ مشکل و وقت گیر می‌باشد، لذا استفاده از آزمایش ساده بار نقطه‌ای برای تخمین مقاومت فشاری و کششی توده سنگ بسیار مغتنم است. آماده سازی نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش قطری بسیار ساده می‌باشد. از سوی دیگر دستگاه انجام آزمایش بار نقطه‌ای قابل حمل بوده و به راحتی می‌توان آن را در محل مورد استفاده قرار داد.

آزمایش بار نقطه‌ای در مرسوم‌ترین شیوه خود روی مغزه‌های سنگی و به صورت قطری انجام می‌شود، اما پروتودیاکونف و وبلیکوف^۱ در سال ۱۹۵۸ این آزمایش را روی کلوخه‌های سنگی انجام دادند. آنها ابراز داشتند که باید حداقل ۱۰ قطعه نمونه نامنظم با این روش مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین برای نمونه‌های غیر قطری نیز فاصله‌ای تحت عنوان قطر معادل معرفی می‌شود که در اینجا با D_e آمده است.

مقدار اندیس بار نقطه‌ای طبق استاندارد انجام این آزمایش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (1)$$

I_s اندیس بار نقطه‌ای، P مقدار نیرو در لحظه گسیختگی و D_e فاصله فک‌های دستگاه در لحظه گسیختگی نمونه است.

از جمله عوامل تأثیر گذار بر روی مقدار اندیس بار نقطه‌ای اندازه نمونه مورد آزمایش می‌باشد، لذا برای یکسان بودن اندیس نمونه‌های مختلف از یک نوع سنگ، انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای انجام این آزمایش نمونه‌های قطری به قطر ۵۰ میلیمتر را پیشنهاد می‌کند و از طرفی برای اینکه در انجام این آزمایش محدودیتی پیش نیاید برای نمونه‌هایی که دارای ابعادی غیر از ۵۰ میلیمتر هستند ضریب تصحیحی را پیشنهاد می‌کند.

$$I_{s(50)} = I_s \times F = I_s \times \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.5} \quad (2)$$

بنابراین $I_{s(50)}$ به عنوان مقاومت بار نقطه‌ای به صورت استاندارد تعریف می‌شود.

فرانکلین^۲ و بیناوسکی^۳ برای تخمین مقاومت تک محوری فشاری و مقاومت فشاری سنگ روابط زیر را پیشنهاد کردند.

$$\sigma_c = 24 \times I_{s(50)} \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{I_{s(50)}}{0.8} \quad (4)$$

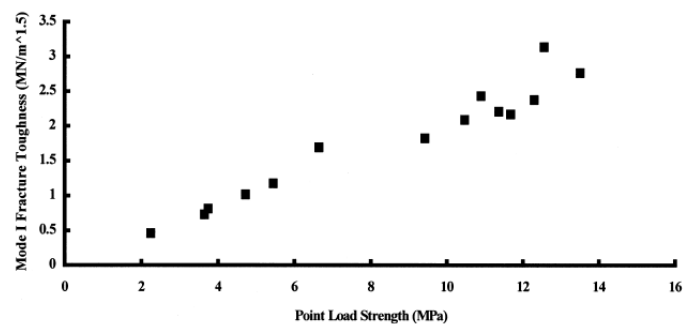
¹ Protodyakonov & Voblicov

² Franklin

³ Bieniawski

علاوه بر تخمین مقاومت کششی و مقاومت تک محوری فشاری که به سادگی به کمک آزمایش بار نقطه‌ای امکان پذیر می‌باشد، بررسی‌ها نشان داده که مقاومت بار نقطه‌ای با میزان زبری درزه‌ها نیز رابطه معناداری دارد. برمن^۱ در تحقیق خود به این مسئله اشاره می‌کند. کیفیت زبری درزه‌ها در تحلیل پایداری درزه‌ها و تخمین مقاومت برشی آنها از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. از طرف دیگر تعیین میزان زبری درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها به صورت کمی کار بسیار مشکلی است که برمن به کمک مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌های سنگی این کار را انجام داده است.

دیاگرام زیر ثمره تحقیق برمن می‌باشد. در این دیاگرام رابطه بین اندیس بار نقطه‌ای و ضریب کیفیت زبری درزه‌ها به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۱- کیفیت زبری درزه‌ها بر حسب مقاومت بار نقطه‌ای در آزمایش‌های متعدد بار نقطه‌ای

در این شکل رابطه بین مقاومت بار نقطه‌ای و کیفیت زبری درزه‌ها بیان شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده یک رابطه تقریباً خطی بین مقاومت بار نقطه‌ای و کیفیت زبری درزه‌ها به عنوان یک معیار کمی وجود دارد. برمن رابطه زیر را برای این منظور ارائه نمود.

$$K_{IS} = 0.199I_{s(50)} \quad (5)$$

که در آن K_{IS} ضریبی جهت تعیین کیفیت زبری درزه‌ها می‌باشد. به عبارت ساده می‌توان نوشت:

$$K_{IS} = 0.2I_{s(50)} \quad (6)$$

¹ Bearman

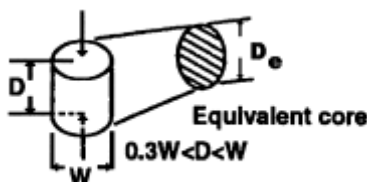
۳- وسایل مورد نیاز:

- دستگاه مخصوص آزمایش بار نقطه‌ای که شامل قسمت‌های زیر می‌باشد:
سیستم بارگذاری یا جک بارگذاری به همراه فک‌های قابل تنظیم است. محدوده بین فک‌ها ۱۵ تا ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد و باید ظرفیت بارگذاری کافی را داشته باشد. فک‌های دستگاه دارای زاویه مخروطی ۶۰ درجه و شعاع انحناء ۵ میلیمتر است. فک‌ها باید از فلزی با سختی ۵۸ را کول^۱ باشند. معمولاً فک بالایی ثابت و فک پایینی متحرک می‌باشد.
سیستم اندازه‌گیری بار که باید در لحظه گسیختگی با دقتی معادل ۵ درصد صورت گیرد. این سیستم قابلیت اندازه‌گیری جابه‌جایی فاصله بین فک‌ها را دارد. سیستم اندازه‌گیری جابجایی زمانی تنظیم است که در حالت مماس بودن فک‌ها عدد صفر را نشان دهد.
- کولیس برای اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها.

۴- روش انجام آزمایش:

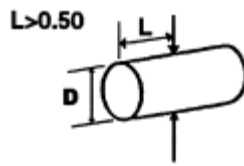
برای انجام این آزمایش می‌توان از نمونه‌های مختلفی استفاده کرد. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش بسته به آنکه دارای چه شکلی باشند و اینکه چگونه در دستگاه قرار بگیرند به انواع زیر تقسیم می‌شوند. در شکل‌های زیر نحوه اعمال نیرو به نمونه‌ها و نوع آن نشان داده شده است.

۱- نمونه‌های طولی با شکل استوانه‌ای

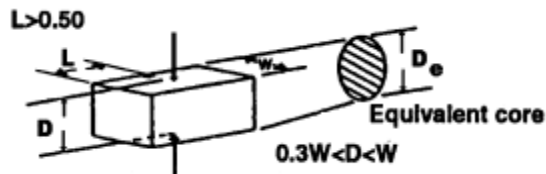


¹ Hardness Rockwell

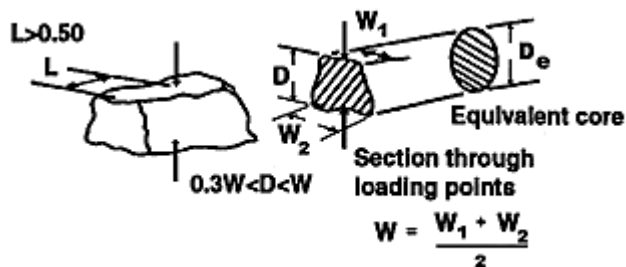
۲- نمونه‌های قطری با شکل استوانه‌ای



۳- نمونه‌های مکعبی شکل



۴- نمونه‌های نامنظم با شکل تقریبی مکعب مستطیل



اگر نمونه‌ها مغزه‌ای یا بلوکی باشند حداقل ۱۰ نمونه و چنانچه به شکل کلوخه‌ای باشند حداقل ۲۰ نمونه باید آزمایش شوند. در این آزمایش ۵ نمونه طولی، ۳ نمونه قطری و ۷ نمونه کلوخه‌ای که همه آنها از نوع سنگ مرمر می‌باشند مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

همانطور که در بالا اشاره شد انجام آزمایش بار نقطه‌ای بسیار ساده می‌باشد. در این آزمایش پس از تهیه نمونه‌ها هر یک از آنها را جداگانه در دستگاه بار نقطه‌ای گذاشته و بین دو فک دستگاه گیر داده می‌شود و با سرعت ثابت بر روی نمونه داخل دستگاه بارگذاری انجام می‌شود.

انجام آزمایش برای انواع نمونه‌ها تقریباً یکسان است و تنها تفاوت بین آنها نحوه قرار دادن نمونه در داخل دستگاه می‌باشد. مثلاً در آزمایش قطری نمونه طوری داخل دستگاه قرار داده می‌شود تا نوک دستگاه در امتداد قطر با نمونه تماس برقرار کند. فاصله نقاط اتصال فک‌ها به نمونه تا نزدیکترین انتهای آزاد آن نباید از شعاع مغزه کمتر باشد. بار به طور پیوسته افزایش می‌یابد تا نمونه در مدت ۱۰ تا ۶۰ ثانیه بشکند. بار در لحظه گسیختگی

یادداشت می‌شود. اگر سطح شکست فقط از یک نقطه بارگذاری بگذرد نتیجه آزمایش غیر قابل قبول است. به همین ترتیب برای سایر نمونه‌ها این آزمایش را انجام می‌گردد.

ابعاد نمونه‌های دارای شکل منظم قبل از انجام آزمایش به کمک کولیس قابل اندازه‌گیری است، اما در مورد نمونه‌های کلوخه‌ای ابعاد نمونه توسط خط کش خود دستگاه قبل از انجام آزمایش اندازه‌گیری می‌شود.

۵- بحث و بررسی:

در آزمایش قطری بار نقطه‌ای، قطری که در رابطه با اندیس بار نقطه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد فاصله بین دو فک دستگاه پس از گسیختگی می‌باشد، ولی در آزمایش فوق قطر نمونه قبل از گسیختگی نمونه اندازه‌گیری شده که البته خطای زیادی را در محاسبات وارد نمی‌کند.

جهت تحلیل مقاومت‌های بدست آمده حاصل از آزمایش‌های انجام شده باید از مقاومت‌های بار نقطه‌ای بدست آمده میانگین گرفت. به این منظور از بزرگترین و کوچکترین مقاومت‌ها صرف نظر شده و از بقیه مقاومت‌ها میانگین‌گیری می‌کنیم.

۶- نتیجه‌گیری:

مقادیر مقاومت تک محوری فشاری و مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت‌های قطری، طولی و کلوخه‌ای اختلاف زیادی با هم دارند و اصلاً نمی‌توان تخمین مناسبی را روی این داده‌ها انجام داد. علت اصلی اینست که تعداد آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها خیلی کم می‌باشد. بنابراین شاید بهترین تخمین را نمونه‌های کلوخه‌ای بدست می‌دهند چرا که تعداد آزمایش‌ها روی نمونه‌های کلوخه‌ای بیشتر است.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری



عنوان آزمایش:

مقاومت فشاری تک محوری^۱ و تغییر شکل پذیری سنگ.

۱- هدف:

تعیین مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون نمونه‌های سنگی و طبقه بندی سنگ‌ها با استفاده از این پارامترها.

هدف دیگر این آزمایش طبقه بندی نمونه‌های مورد آزمایش است. یکی از قدیمی ترین طبقه بندی‌هایی که در آنها ملاک طبقه بندی مقاومت تک محوری فشاری به حساب می آید، طبقه بندی دیر و میلر^۲ (۱۹۵۵) است. می توان با استفاده از این معیار، حدود مقاومتی نمونه‌های سنگی را توصیف نمود.

۲- تئوری آزمایش:

از مهمترین و مرسوم ترین آزمایش‌های مربوط به مطالعات مکانیک سنگی آزمایش مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد. از جمله پارامترهای مهمی که از این آزمایش بدست می آید می توان به مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون اشاره کرد. در اکثر پروژه‌های مکانیک سنگی مقاومت فشاری تک محوری از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. لزوم تعیین این پارامتر در طراحی‌های مهندسی کاملاً مشهود است. به عنوان مثال برای ارزیابی مقاومت پایه‌های سنگی در معادن زیر زمینی، تعیین مشخصات عملیات آتشکاری و حفاری در معادن، پیش بینی زمان وقوع خرابی در اثر فشار یا برش در اطراف فضای زیر زمینی و غیره. از طرف دیگر مقاومت فشاری تک محوری یکی از مهمترین پارامترها در طبقه بندی مهندسی سنگ‌ها می‌باشد.

¹ Uniaxial Compressive Strength

² Deere & Miller

علی رغم ظاهر ساده آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، انجام دقیق این آزمایش بسیار مشکل می باشد، زیرا پارامترهای زیادی بر روی مقدار مقاومت فشاری تک محوری نمونه های سنگی تاثیر می گذارد. در ادامه برخی از عوامل موثر بر مقاومت فشاری تک محوری که از اهمیت بیشتری نسبت به سایر عوامل برخوردار است ذکر می شود.

۱- ترکیب کانی شناسی:

اگر بخواهیم مقاومت سنگی را بدون انجام آزمایش تخمین بزنیم بی شک مهمترین عاملی که توجه ما را به خود جلب می کند، ترکیب کانی شناسی سنگ است. هر چه کانی های تشکیل دهنده یک سنگ دارای مقاومت بیشتری باشند آن سنگ از مقاومت بیشتری برخوردار خواهد بود. همچنین نوع بافت سنگ را هم باید در نظر گرفت، به طوری که هر چه دانه های تشکیل دهنده سنگ ها ریزتر باشند سنگ دارای مقاومت فشاری بیشتری است.

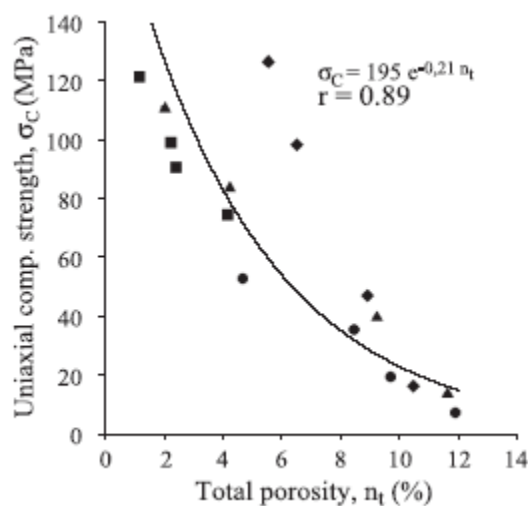
۲- چگالی و تخلخل:

تحقیقات متعددی جهت بررسی رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و میزان چگالی و درصد تخلخل نمونه های سنگی صورت گرفته است. نتیجه عمده این تحقیقات حاکی از این است که با افزایش تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری افزایش می یابد. فهیمی فر (۱۳۷۸) در تحقیق خود که به منظور طبقه بندی مهندسی سنگ ها انجام داده است، تأثیر تخلخل بر مقاومت تک محوری فشاری سنگ (برای تعدادی نمونه خاص) را در حالت اشباع اینگونه بیان می کند:

$$\sigma_c = 101.3 - 31.14 \ln(n)$$

تاگرو^۱ (۲۰۰۴) نیز تأثیر تخلخل بر مقاومت تک محوری فشاری را مورد بررسی قرار داده و دیاگرام زیر را به این منظور ارائه می نماید.

¹ Tugrul



شکل ۱- تأثیر تخلخل بر مقاومت مقاومت تک محوری فشاری

تاگروول در تحقیق خود از چند نوع سنگ مختلف (ماسه سنگ، سنگ آهک، بازالت و گرانودیوریت) استفاده کرد و دیاگرام فوق را ارائه نمود.

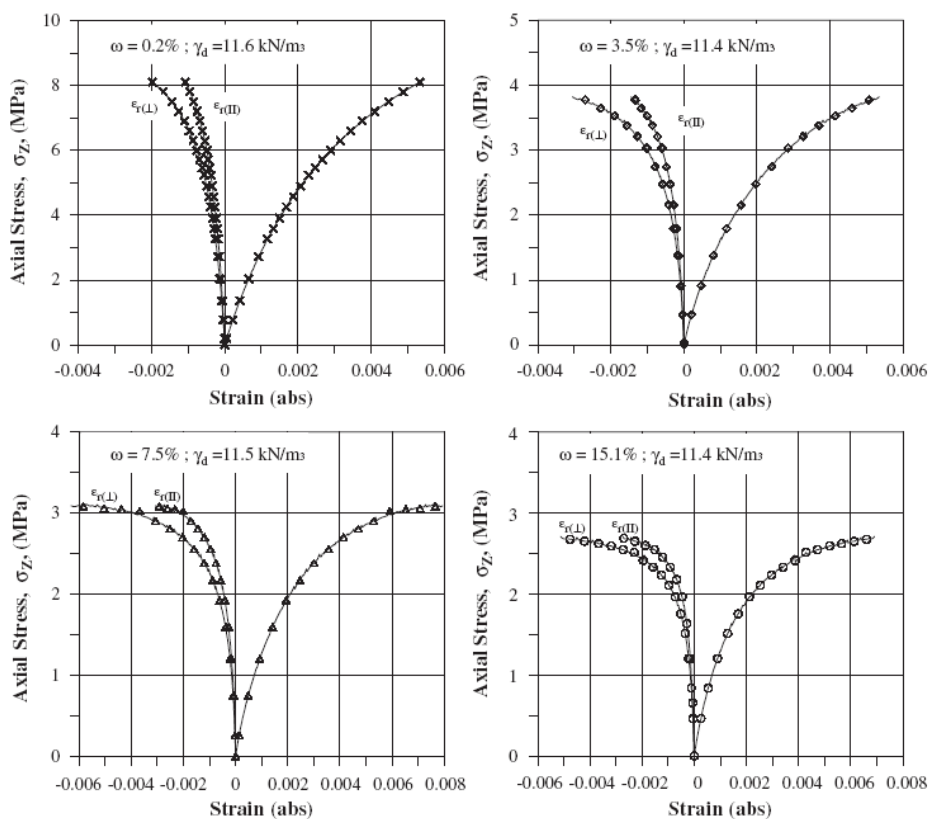
این دیاگرام به خوبی نشان می دهد افزایش تخلخل باعث کاهش مقاومت فشاری تک محوری نمونه های سنگی می شود.

چگالی نمونه های سنگی تأثیر قوی تری نسبت به تخلخل بر روی مقاومت فشاری تک محوری نمونه های سنگی دارد. به طور کلی مقاومت فشاری تک محوری با افزایش چگالی افزایش می یابد.

۳- رطوبت موجود در نمونه ها:

میزان رطوبت موجود در نمونه های سنگی نیز تأثیر بسزایی بر روی مقاومت فشاری تک محوری می گذارد. تالسینیک^۱ (۲۰۰۶) تأثیر میزان رطوبت نمونه های سنگی بر مقاومت فشاری تک محوری را بر روی چالک های پر تخلخل بررسی کرده و در نهایت نمودارهای زیر را برای این منظور ارائه نمود.

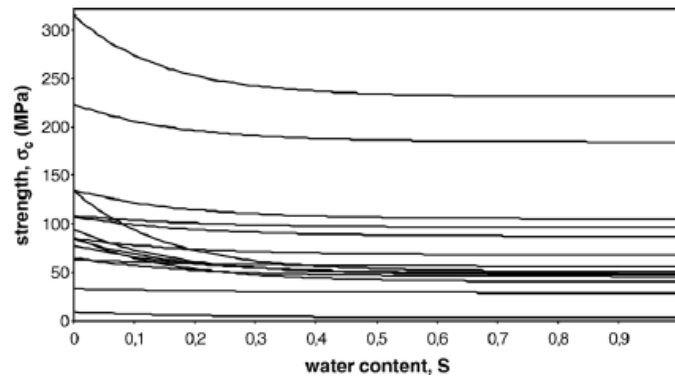
¹ Talesnick



شکل ۲- تأثیر میزان رطوبت بر مقاومت فشاری تک محوری

این نمودارها به خوبی اثر میزان رطوبت بر مقاومت فشاری نمونه‌های سنگی را نشان می‌دهد. تأثیر فوق به این صورت است که با افزایش میزان رطوبت نمونه‌های سنگی مقاومت فشاری آن کاهش پیدا می‌کند. واسارلی^۱ (۲۰۰۶) نیز تأثیر رطوبت نمونه‌ها بر مقاومت سنگ‌ها را بررسی کرده که در نهایت دیاگرام زیر را ارائه می‌دهد.

^۱. Vásárhelyi



شکل ۳- تأثیر میزان آب موجود در نمونه بر مقاومت تک محوری فشاری

این دیاگرام نشان دهنده کاهش مقاومت سنگ با افزایش میزان آب نمونه است.

۴- ابعاد نمونه:

از دیگر عوامل موثر بر مقاومت نمونه‌های سنگی، اندازه نمونه‌ها می‌باشد. تأثیر اندازه نمونه نیز در تحقیقات متعددی بررسی شده است. حسینی (۱۳۸۵) که با انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی از جنس دولومیت، سنگ آهک و ماسه سنگ دارای قطر ثابت ۵۴ میلیمتر و طول‌های مختلف (۱۶۲، ۱۰۸، ۵۴، ۴۱، ۲۷، ۱۷، ۱۴، ۱۱) تأثیر ابعاد نمونه‌ها را بر مقاومت سنگی بررسی کرده، نتیجه را به صورت زیر بیان می‌کند.

جدول ۱- تأثیر اندازه نمونه بر مقاومت تک محوری فشاری

نسبت D/L		نوع سنگ						
۵	۴	۳	۲	۱/۳۳	۱	-/۵	۰/۳۳	دولومیت
۳۴۰/۶	۳۰۲/۵	۲۶۶/۸	۲۰۹/۶	۱۵۹/۴	۱۳۱/۰	۱۰۴/۴	۸۲/۸	سنگ آهک
۱۹۶/۵	۱۷۲/۵	۱۴۶/۳	۱۱۷/۹	۱۰۲/۶	۷۰/۴	۶۰/۷	۵۲/۴	ماسه سنگ
۵۰۷/۵	۴۲۵/۸	۳۹۳/۱	۳۲۸/۳	۲۶۲/۰	۲۴۰/۲	۲۰۸/۰	۱۹۰/۵	

جدول فوق به خوبی رابطه بین ابعاد نمونه‌ها و مقاومت آنها را بیان می‌کند و نشان دهنده این واقعیت است که افزایش حجم نمونه باعث کاهش مقاومت فشاری تک محوری آن می‌شود.

۵- سرعت بار گذاری:

سرعت بار گذاری نیز یکی دیگر از عوامل موثر بر مقاومت نمونه‌های سنگی است. به طور کلی هرچه سرعت بار گذاری بیشتر باشد نمونه دارای مقاومت بیشتری خواهد بود. بنابراین در استانداردهای مختلف حد معینی را برای آهنگ بار گذاری روی نمونه انتخاب می‌کنند. علاوه بر عوامل فوق نحوه آماده سازی نمونه هم تأثیر بسزایی بر مقاومت نمونه خواهد گذاشت که در بخش شرح آزمایش بیشتر در این مورد صحبت خواهد شد.

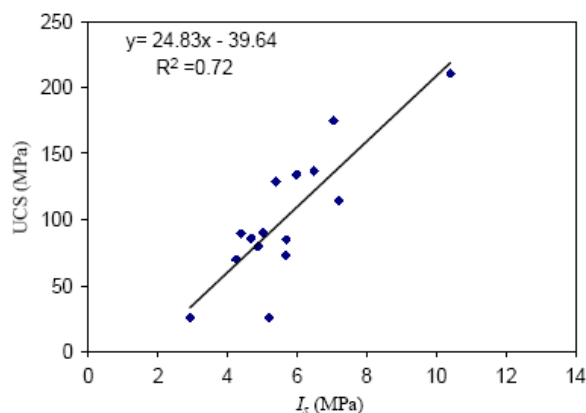
به علت مشکلات انجام آزمایش فشاری تک محوری، تلاش‌های زیادی برای پیدا کردن روش‌های ساده‌تر برای تعیین مقاومت تک محوری فشاری انجام شده است. یکی از روش‌هایی که از مدتها قبل برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گرفته استفاده از اندیس بار نقطه‌ای می‌باشد. اما نکته جالب توجه در این مورد اینست که عواملی همچون تخلخل، رطوبت و چگالی (که تأثیر زیادی بر نتیجه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری دارند) بر روی رابطه بین اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک محوری نیز تأثیر می‌گذارند که این مطلب نقطه ضعف بزرگی برای آزمایش بار نقطه‌ای به جهت پیش بینی مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد. کارامان^۱ (۲۰۰۵) تأثیر تخلخل بر رابطه بین اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت تک محوری فشاری را بررسی کرده و در نهایت به این مطلب اشاره کرده است که برای دو نمونه با تخلخل متفاوت نمی‌توان رابطه واحدی را بین اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت تک محوری فشاری بدست آورد. کارامان برای دو نوع سنگ یکی با درصد تخلخل کمتر از یک و دیگری با درصد تخلخل بیشتر از یک، روابط زیر را ارائه می‌دهد.

$$\text{For } n < 1\% \quad UCS = 24.83I_s - 39.64$$

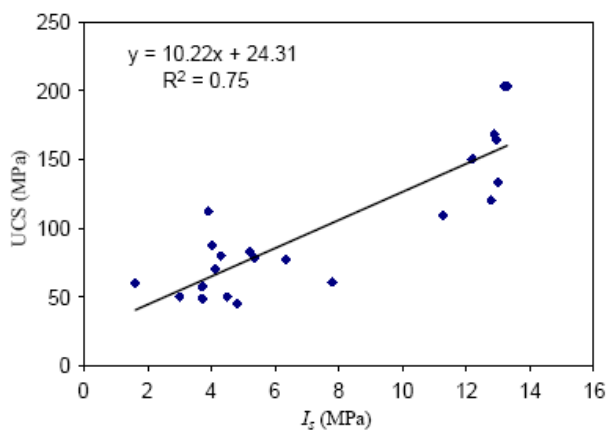
$$\text{For } n > 1\% \quad UCS = 10.22I_s + 24.31$$

که این دو رابطه تفاوت زیادی با هم دارند.

¹ Kahraman



شکل ۴-الف- رابطه بین اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت تک محوری فشاری برای سنگ‌های دارای تخلخل کمتر از ۱٪.



شکل ۴-ب- رابطه بین اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت تک محوری فشاری برای سنگ‌های دارای تخلخل بیشتر از ۱٪.

بنابراین استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای برای پیش بینی مقاومت تک محوری فشاری همیشه و برای همه نوع سنگی به سادگی نیست و همواره نمی‌توان از یک رابطه واحد برای این منظور استفاده کرد. به همین دلیل شاید استفاده از روش‌های منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی بهترین روش غیر مستقیم برای تخمین مقاومت تک محوری فشاری باشد.

۳- وسایل مورد نیاز:

- دستگاه بارگذاری برای اعمال بار محوری به نمونه و اندازه گیری آن. این دستگاه باید دارای ظرفیت کافی باشد و بتواند بار را با سرعت ۰/۵ تا ۱ مگا پاسکال بر ثانیه بر نمونه اعمال نماید.

- دستگاه مورد استفاده در این آزمایش ساخت شرکت هایکو^۱ هند است. دقت این دستگاه ۱ کیلو نیوتن بوده و آهنگ اعمال بار به نمونه در این آزمایش ۰/۵۹ مگا پاسکال بر ثانیه می باشد.
- صفحات فولادی با سختی ۵۸ راکول، قطر صفحات بارگذاری باید حداقل مساوی قطر نمونه و حداکثر ۲ میلیمتر بزرگتر از آن باشد. ضخامت این صفحات نیز باید حداقل ۱۵ میلیمتر یا یک سوم قطر نمونه و ناصافی صفحات نباید از ۰/۵۰۰ میلیمتر بیشتر شود.
- گیج های مخصوص اندازه گیری جابجایی نمونه در حین تغییر شکل.
- در این آزمایش از ۴ گیج مندرج^۲ برای اندازه گیری تغییر شکل نمونه استفاده می شود. یکی از این گیج ها جابجایی های قائم نمونه را اندازه گیری کرده و بقیه جابجایی جانبی یا قطری نمونه را اندازه گیری می کنند. این سه گیج دقیقاً در مرکز نمونه به گونه ای جا سازی می شود که با هم زاویه ۱۲۰ درجه بسازند.
- کولیس برای اندازه گیری ابعاد نمونه ها.
- نمونه پیشنهادی استاندارد انجام این آزمایش^۳ استوانه ای است که نسبت ارتفاع به قطر آن ۲/۵ تا ۳ و حداقل قطر آن ۵۴ میلیمتر می باشد. بر اساس این پیشنهاد قطر نمونه باید حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه سنگ باشد.
- سطوح انتهایی نمونه باید موازی یکدیگر بوده و با دقت ۰/۰۲ میلیمتر صاف بوده و از امتداد عمود بر محور نمونه بیش از ۰/۰۱ رادیان انحراف نداشته باشد.
- جوانب نمونه باید صاف باشد و حداکثر ناهمواری در طول نمونه از ۰/۵ میلیمتر نباید تجاوز کند.
- تعداد نمونه های مورد آزمایش باید از مشاهدات محلی تعیین شود ولی حداقل ۵ نمونه توصیه می شود.
- قطر نمونه با دقت ۰/۱ میلیمتر با میانگین گیری از قطرهای اندازه گیری شده در پایین، وسط و بالای نمونه تعیین می شود. این قطر برای محاسبه مساحت مقطع نمونه مورد استفاده قرار گرفته و ارتفاع نمونه با دقت ۰/۱ میلیمتر تعیین شده است.

¹ HEICO

² Dial Gage

³ ISRM

- نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش نمونه‌هایی استوانه‌ای از سنگ مرمر دارای قطر تقریبی ۵۴ میلیمتر و با نسبت طول به قطر تقریباً ۲ است. همچنین در این آزمایش از ۳ نمونه جهت انجام آزمایش استفاده می‌شود.

۴- روش انجام آزمایش:

در ابتدا نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش را آماده می‌کنیم. همانطور که در تئوری آزمایش اشاره کردیم آماده سازه نمونه تأثیر زیادی بر نتیجه آزمایش می‌گذارد، لذا سطوح جانبی نمونه‌ها ابتدا با دستگاه سایش نمونه‌ها کاملاً صیقل داده شده و سپس ابعاد آنها اندازه‌گیری و یادداشت می‌شود.

پس از آماده سازی نمونه، دور تا دور نمونه با یک لایه سلفون پوشیده می‌شود که هدف از این کار جلوگیری از پاشیدگی نمونه پس از شکست است. نمونه باید به گونه‌ای در دستگاه آزمایش قرار گیرد که کاملاً در مرکز دستگاه باشد. سپس تعدادی صفحات فولادی که تقریباً هم قطر با نمونه هستند بر روی نمونه قرار داده می‌شود. نقش این صفحات کم کردن فاصله بین نمونه و جک دستگاه می‌باشد زیرا این دستگاه فقط در یک کورس ۵ سانتی متری می‌تواند جابجا شود.

پس از آنکه نمونه در دستگاه قرار داده شد گیج‌های مندرج جهت اندازه‌گیری جابجایی قائم و افقی نمونه بر روی نمونه نصب می‌شوند. یکی از این گیج‌ها بر روی قاعده نمونه قرار داده می‌شود تا جابجایی قائم نمونه را اندازه‌گیری نماید و بقیه گیج‌ها (سه عدد گیج مشابه) بر روی محیط استوانه‌ای نمونه طوری قرار داده می‌شوند که با هم زاویه ۱۲۰ درجه بسازند و جابجایی جانبی نمونه را اندازه‌گیری نمایند.

در این مرحله دستگاه ثبت نتایج کنترل می‌شود تا میزان بار اعمالی، جابجایی نمونه و زمان انجام آزمایش به دقت ثبت شود.

در این مرحله، بارگذاری با آهنگی ثابت شروع می‌شود. همانطور که در بالا اشاره شد آهنگ افزایش تنش وارد بر نمونه باید بین ۰/۵ تا ۱ مگا پاسکال باشد و از آنجایی که این دستگاه را نمی‌توان بر اساس آهنگ تنش تنظیم کرد لازمست تا آهنگ مناسب نیرو را برای انجام این آزمایش بدست آوریم.

$$\dot{\sigma} = \frac{\dot{F}}{A}$$

$$0.5MPa \leq \dot{\sigma} \leq 1MPa$$

$$D = 54mm$$

از رابطه بالا آهنگ افزایش نیرو به راحتی بدست می آید.

$$1.15KN \leq \dot{F} \leq 2.30KN$$

در این آزمایش بار با آهنگ ۱/۳۵ کیلو نیوتون بر ثانیه به نمونه اعمال می شود. این مقدار بار معادل ۰/۵۹ مگاپاسکال بر ثانیه می باشد که در محدوده استاندارد انجام آزمایش قرار دارد. تنظیم آهنگ بار به وسیله دستگاه مورد استفاده در این آزمایش کار ساده ای نیست و نیاز به تجربه کافی استفاده از دستگاه دارد. در واقع این دستگاه از دو فک تشکیل شده است که یکی در پایین و دیگری در بالا قرار دارد به طوری که فک پایینی ثابت بوده و فک بالایی متحرک است. حرکت فک بالایی را فشار روغن ایجاد می کند. بر روی دستگاه آزمایش تک محوری شیری وجود دارد که مربوط به دبی ورودی روغن به دستگاه می باشد. هر چه دبی عبوری روغن به دستگاه بیشتر باشد سرعت حرکت فک بالایی بیشتر شده و در نتیجه آهنگ اعمال بار بر نمونه بیشتر خواهد بود. لذا برای تنظیم بار اعمالی به نمونه دبی روغن ورودی به دستگاه باید آنقدر کم و زیاد شود تا آهنگ اعمال بار به حد استاندارد برسد. پس از آنکه آهنگ اعمال بار به حد استاندارد انجام آزمایش رسید دبی روغن تا پایان آزمایش باید ثابت باشد.

بارگذاری بر روی نمونه با آهنگ محاسبه شده تا شکست کامل نمونه ادامه پیدا می کند. شکست نمونه به صورت ناگهانی بوده و احتمال پرتاب تکه های نمونه پس از شکست هم وجود دارد. پس از آنکه نمونه شکسته شد کلیه اطلاعات مربوط به تغییر شکل پذیری نمونه و نیروهای اعمالی را به صورت زیر تحلیل می کنیم.

۵- داده ها و محاسبات:

داده های این آزمایش عبارتند از میزان بار، جابجایی محوری و جابجایی جانبی نمونه در هر ثانیه تا شکست کامل نمونه. به علت حجم زیاد داده های آزمایش در این بخش فقط محاسبات انجام شده روی داده ها را بیان می کنیم. برای بدست آوردن مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها کافیست که بار در لحظه شکست نمونه بر سطح مقطع نمونه تقسیم شود. به عبارت دیگر

$$\sigma_c = ucs = \frac{F_{max}}{A}$$

که در آن F_{max} بار در لحظه گسیختگی نمونه می باشد. A سطح مقطع نمونه و σ_c مقاومت تک محوری فشاری است.

برای بدست آوردن مقاومت فشاری تک محوری از مقاومت های بدست آمده میانگین گرفته می شود.

$$\sigma_{av} = \frac{73.28 + 105.94 + 88.91}{3} = 89.38 MPa$$

شکل شکست نمونه ها در ضمیمه آمده است.

برای تعیین مدول الاستیسته و ضریب پواسون نمونه ها باید دیاگرام تنش وارده بر نمونه ها نسبت به کرنش به وجود آمده رسم شود. این دیاگرام ها نسبت به کرنش طولی و کرنش جانبی رسم می شوند. برای محاسبه کرنش طولی از رابطه زیر استفاده می کنیم.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l}$$

که در آن ε_a کرنش طولی نمونه می باشد.

همچنین کرنش جانبی نمونه ها از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\varepsilon_d = -\frac{\Delta d}{d}$$

که در آن ε_d کرنش جانبی نمونه می باشد. در این آزمایش برای تعیین جابجایی های جانبی از سه گیج استفاده شده است. بنابراین برای هر نمونه سه کرنش جانبی خواهیم داشت. لذا برای رسم نمودار تنش کرنش نمونه ها، از کرنش های جانبی بدست آمده میانگین گرفته می شود.

نمودارهای تنش کرنش مربوط به هر یک از نمونه ها به صورت زیر می باشد. هدف از ترسیم نمودار تنش کرنش تعیین مدول الاستیسته و ضریب پواسون نمونه ها است. برای تعیین مدول الاستیسته سه روش وجود دارد.

۱. روش تانژانت:

در ۵۰٪ مقاومت ماکزیمم نمونه ها خطی را بر نمودار تنش کرنش مماس می شود. شیب خط مماس شده

معرف مدول الاستیسته نمونه می باشد (مدول مماسی E_{150}).

۲. روش متوسط:

در محدوده الاستیک نمودار بهترین خط مماس بر نمودار رسم می شود. شیب خط مماس رسم شده معرف مدول الاستیسیته می باشد (مدول میانگین E_{av}).

۳. روش سکانت:

از نقطه صفر منحنی خطی را به نقطه مقاومت ۵۰٪ مقاومت ماکزیمم وصل می کنیم. شیب خط رسم شده معرف مدول الاستیسیته می باشد (مدول وتری E_{s50}).

۶- بحث و بررسی:

با وجود اینکه نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش شرایط تأثیر گذار یکسانی را دارند (رطوبت، سرعت بارگذاری و ...) اما همچنان مقاومت و مدول‌های به دست آمده می‌تواند تا حدودی متفاوت باشد. این اختلاف ناشی از تفاوت بافت نمونه‌ها می‌باشد.

اندک بودن مقادیر ضریب پواسون می‌تواند ناشی از دقیق نبودن گنج‌های مورد استفاده در این آزمایش باشد. اعداد بدست آمده از این گنج‌ها باید کاملاً یکسان باشد در غیر اینصورت، برای رسم نمودار تنش کرنش از مقادیر کرنش‌های جانبی میانگین گرفته شده است.

۷- نتیجه‌گیری:

نتایجی که از انجام این آزمایش بدست می‌آید عبارتند از: بافت سنگ از جمله عواملی موثر بر مقاومت سنگ‌ها می‌باشد. به طوری که هر چه سنگ دارای بافت ریزتری باشد مقاومت آن بیشتر خواهد بود. این مسئله به این دلیل است که هر چه بافت سنگ ریزتر باشد سطح تماس بین دانه‌های سنگ بیشتر بوده و در نتیجه چسبندگی دانه‌ها بیشتر خواهد بود.

آزمایش مقاومت فشاری سه محوری



عنوان آزمایش:

آزمایش مقاومت فشاری سه محوری^۱.

۱- هدف:

تعیین مقاومت فشاری سه محوری، چسبندگی ذاتی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های سنگی.

۲- تئوری آزمایش:

آزمایش مقاومت سه محوری یکی از اساسی‌ترین آزمایش‌های مکانیک سنگ می‌باشد که معمولاً جهت بررسی وضعیت سازه‌های مهندسی استفاده می‌شود. چنانچه می‌دانیم سنگ‌ها در طبیعت و در شرایط واقعی تحت تنش سه محوری قرار دارند و از طرفی برای تعیین نگهداری فضاها و زیر زمینی لازمست تا مقاومت سنگ در شرایط فشار جانبی محل مورد بررسی قرار گیرد.

در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مقاومت نمونه در حالتی که هیچ فشار جانبی به آن اعمال نمی‌شود بدست می‌آید و همچنین مقادیر ضریب پواسون و مدول الاستیسیته از طریق این آزمایش بدست می‌آیند، اما در آزمایش مقاومت فشاری سه محوری مقاومت نمونه در فشار جانبی معینی محاسبه می‌شود و مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذاتی سنگ بدست می‌آید.

ساده‌ترین و متداول‌ترین روش دسترسی به تنش سه محوری در آزمایشگاه، اعمال فشار جانبی هیدرولیکی همراه با تنش محوری به نمونه استوانه‌ای است. این نوع آزمایش سه محوری حالت خاصی از تنش سه محوری می‌باشد که در آن تنش اصلی متوسط مساوی تنش اصلی حداقل است. اگر چه تعدادی از محققین بر این عقیده هستند که این آزمایش (آزمایش بر روی نمونه استوانه‌ای با فشار هیدرولیکی جانبی) نوعی آزمایش دو محوری

^۱ Triaxial Compressive Strength

می باشد که برای انجام آزمایش سه محوری باید از نمونه های منشوری استفاده شود، اما با این وجود امروزه از این آزمایش به عنوان آزمایش مقاومت سه محوری استفاده گسترده ای می شود.

۳- عوامل موثر بر مقاومت فشاری سه محوری:

واضح است تقریباً همه عوامل موثر بر مقاومت فشاری تک محوری که در آزمایش قبلی توضیح داده شد بر مقاومت فشاری سه محوری نیز تأثیر گذار هستند^۱. لذا در گزارش حال حاضر این عوامل ذکر نمی شوند و فقط عواملی که بر روی آزمایش سه محوری تأثیر بیشتری دارند، ذکر می شود.

۱. فشار جانبی:

مهمترین عاملی که بر مقاومت فشاری سه محوری تأثیر می گذارد فشار جانبی اعمالی بر نمونه می باشد. تحقیقات متعددی به همین منظور صورت گرفته و همگی این تحقیقات بیان کننده این واقعیت هستند که افزایش فشار جانبی بر نمونه باعث افزایش مقاومت نمونه می شود. در آزمایش فوق این تأثیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

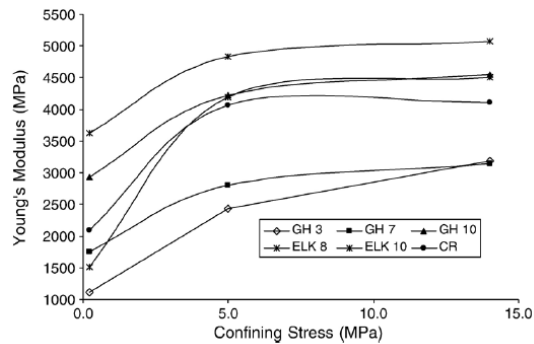
حسینی (۱۳۸۵) در تحقیق خود که بر روی سه نوع سنگ دولومیت، سنگ آهک و ماسه سنگ انجام داده است، تأثیر فشاری جانبی را بر مقاومت فشاری سه محوری نمونه های مورد آزمایش بررسی کرده و در نهایت جدول زیر را ارائه می نماید.

جدول ۱- تأثیر فشار جانبی اعمالی بر مقاومت نمونه های استوانه ای در آزمایش سه محوری (حسینی ۱۳۸۵)

فشار جانبی (MPa)	۲	۵	۸	۱۱	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵	نوع سنگ
	۱۳۱	۱۴۳/۲	۱۷۰/۳	۱۹۲/۱	۲۲۲/۷	۲۸۰/۳	۳۲۷/۵	۳۶۶/۴	۳۹۸/۳	دولومیت
	۸۶/۱	۱۰۲/۳	۱۱۷	۱۳۰/۱	۱۵۰/۲	۱۷۵/۵	۲۰۰/۲	۲۲۲/۸	۲۴۰/۰	سنگ آهک
	۲۲۲/۷	۲۸۴/۸	۳۰۹/۵	۳۳۳/۳	۳۶۷/۱	۴۱۸	۴۵۲/۸	۴۸۰/۲	۵۰۵/۶	ماسه سنگ

۱. بی شک تأثیر این عوامل در آزمایش سه محوری و تک محوری الزاماً به یک اندازه نمی باشند.

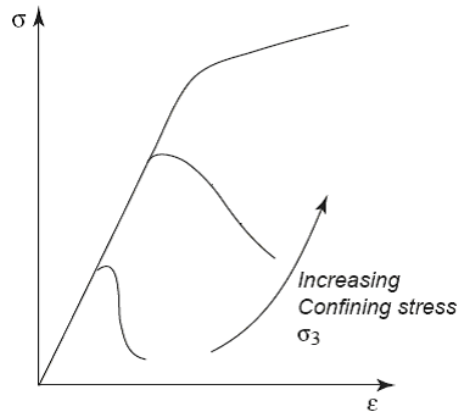
علاوه بر تأثیری که فشار جانبی بر مقاومت نمونه‌ها می‌گذارد بر روی مدول الاستیسیته نمونه‌ها نیز تأثیر گذار است. جنتزیس^۱ (۲۰۰۶) در تحقیقی که بر روی خواص ژئومکانیکی زغال سنگ‌های منطقه غرب کانادا انجام داد، تأثیر فشار جانبی بر مدول الاستیسیته زغال سنگ را بررسی می‌کند و در نهایت افزایش مدول الاستیسیته را با افزایش فشار جانبی گزارش می‌دهد. این مسئله در شکل ۱ به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱- تأثیر فشار جانبی بر مدول الاستیسیته زغال سنگ‌های غرب کانادا: افزایش فشار جانبی باعث افزایش مدول الاستیسیته زغال سنگ می‌شود.

البته تأثیر فشار جانبی بر مدول الاستیسیته در سنگ‌های ضعیف مانند زغال سنگ بسیار مشهود می‌باشد و هر چه سنگ دارای مقاومت بیشتری باشد تأثیر فشار جانبی بر مدول الاستیسیته کمتر شده و در نهایت برای سنگ‌های دارای مقاومت خیلی زیاد این تأثیر از بین می‌رود. یعنی در سنگ‌های دارای مقاومت بالا افزایش فشار جانبی تغییری در مدول الاستیسیته سنگ ایجاد نمی‌کند. در شکل ۲ نمودار تنش کرنش یک سنگ با مقاومت بالا نشان داده شده است. نمودار تنش کرنش این سنگ نشان دهنده ثابت ماندن مدول الاستیسیته با افزایش فشار جانبی بر روی نمونه می‌باشد.

¹ Gentzsis

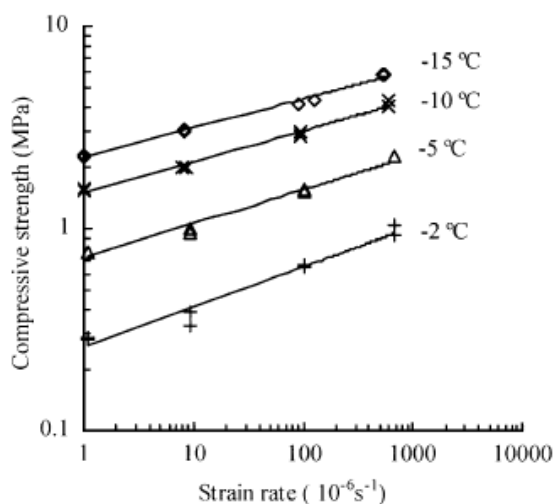


شکل ۲- تأثیر افزایش فشار جانبی بر مقاومت و مدول الاستیسیته نمونه‌های سنگی با مقاومت بالا: افزایش فشار جانبی باعث افزایش مقاومت سنگ شده ولی تأثیری بر مدول الاستیسیته سنگ ندارد.

۲. درجه حرارت:

از دیگر پارامترهایی که بر روی مقاومت سه محوری فشاری تأثیر گذار است، درجه حرارت محیط می‌باشد. آزمایشات متعدد نشان داده که افزایش دما باعث کاهش مقاومت سه محوری می‌شود. این تأثیر نه تنها در دماهای بالا به خوبی مشهود است، بلکه حتی در دماهای زیر صفر درجه نیز روی مقاومت سنگ اثر گذار است. های پنگ لی^۱ (۲۰۰۴) در آزمایش‌هایی که بر روی سنگ‌های رسی یخ زده انجام داد، تأثیر چگالی، آهننگ کرنش و درجه حرارت را بررسی کرد و در نهایت تأثیر معکوس درجه حرارت بر مقاومت نمونه‌ها را نتیجه گرفت. شکل ۳ بیانگر این واقعیت می‌باشد. در این شکل علاوه بر تأثیر عامل درجه حرارت تأثیر عامل آهننگ کرنش نیز نشان داده شده است.

¹ Haipeng Li



شکل ۳- تأثیر درجه حرارت و آهنگ کرنش بر مقاومت سنگ‌های رسی: افزایش دما باعث کاهش مقاومت و افزایش آهنگ کرنش باعث افزایش مقاومت سنگ‌های رسی می‌شود.

۳. فشار منفذی:

فشار منفذی عبارتست از فشار آب موجود در حفرات سنگ که در جهت عکس فشار جانبی عمل می‌کند. بنابراین هر چه فشار منفذی آب موجود در حفرات در یک فشار جانبی معین بیشتر باشد، مقاومت فشاری سنگ کمتر خواهد بود. نکته جالب توجه این که مقدار فشار جانبی اعمالی به نمونه بر مقدار فشار منفذی تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر اگر مقدار آب موجود در یک نمونه ثابت باشد این نمونه در دو فشار جانبی متفاوت فشار منفذی متفاوتی خواهد داشت. زیرا عاملی که باعث ایجاد فشار منفذی می‌شود همین فشار جانبی است.

یکی از معیارهای معروف که برای شکست سنگ در نظر گرفته می‌شود، معیار شکست موهر کولمب است. به طور خلاصه این معیار را می‌توان در حالت تئوری به صورت رابطه خطی زیر بیان کرد.

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \cdot m$$

اگر خط فوق در سیستم مختصات تنش اصلی حداکثر بر حسب تنش اصلی حداقل رسم شود کلیه نقاطی که در بالا یا روی این خط قرار بگیرند، باعث شکست سنگ خواهند شد. در این رابطه m شیب و σ_c عرض از مبدأ خط رسم شده می‌باشد، و بنا بر قانون موهر-کولمب از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$m = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

در این روابط c و ϕ به ترتیب چسبندگی ذاتی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های سنگی هستند. هدف از انجام این آزمایش بدست آوردن این دو پارامتر می‌باشد که در زیر به آن پرداخته شده است.

۴- وسایل مورد نیاز:

- دستگاه بارگذاری برای اعمال بار محوری به نمونه و اندازه‌گیری آن. این دستگاه باید دارای ظرفیت کافی باشد تا بتواند بار را با سرعت ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه بر نمونه اعمال نماید.
- محفظه سه محوری که شامل قسمت‌های مختلف بدنه، غشاء انعطاف‌پذیر، صفحات بارگذاری و سطوح کروی است. سلول مورد استفاده در این آزمایش معروف به سلول هوک^۱ می‌باشد.
- صفحات فولادی با سختی ۵۸ راکول. قطر صفحات بارگذاری باید حداقل مساوی قطر نمونه و حداکثر ۲ میلی‌متر بزرگتر از آن. ضخامت این صفحات نیز باید حداقل ۱۵ میلی‌متر یا یک سوم قطر نمونه ضمن اینکه ناصافی صفحات نباید از ۰/۵۰۰ میلی‌متر بیشتر باشد.
- کولیس برای اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها.
- بر اساس استاندارد انجام آزمایش^۲ نمونه‌های این آزمایش باید به شکل استوانه‌ای قائم بوده و دارای نسبت ارتفاع به قطر ۲ تا ۳ می‌باشند. حداقل قطر نمونه‌ها باید ۵۴ میلی‌متر باشد و قطر نمونه‌ها نباید از ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه سنگ کمتر باشد.

¹ Hock Cell

² ISRM

- سطوح انتهایی نمونه تا ۰/۰۲ میلیمتر صاف بوده و انحراف از قائم آن نسبت به محور نمونه نباید از ۰/۰۰۱ رادیان بیشتر باشد.
- سطوح جانبی نمونه‌ها باید صاف و عاری از هرگونه ناهمواری بوده و حداکثر زبری در طول کل نمونه از ۰/۰۳ میلیمتر تجاوز نکند.
- قطر نمونه با دقت ۰/۱ میلیمتر با میانگین گیری از قطرهای اندازه گیری شده در پایین، وسط و بالای نمونه تعیین می شود. این قطر برای محاسبه مساحت مقطع نمونه مورد استفاده قرار می گیرد. ارتفاع نمونه نیز باید با دقت ۱ میلیمتر تعیین شود.
- در این آزمایش از ۳ نمونه استوانه‌ای سنگ مرمر با قطر تقریبی ۵۴ میلیمتر و نسبت طول به قطر تقریبی ۲ و درای رطوبت یکسان ۰/۰۵ درصد برای هر نمونه، برای انجام آزمایش استفاده می شود. سطوح جانبی این نمونه‌ها نیز بر اساس استاندارد بیان شده کاملاً صیقل داده شده‌اند.

۵- روش انجام آزمایش:

ابتدا نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش را آماده سپس سطوح جانبی نمونه‌ها با دستگاه سایش نمونه‌ها کاملاً صیقل داده می شود آنگاه ابعاد آنها اندازه گیری و یادداشت می شود.

پس از آماده سازی نمونه، دور تا دور نمونه با یک لایه سلفون پوشیده می شود که هدف جلوگیری از پاشیدگی نمونه پس از شکست است. در این مرحله نمونه داخل محفظه مخصوص آزمایش سه محوری قرار داده شده، سپس تمام سطوح کروی روغن کاری و محفظه سه محوری را از سیال هیدرولیکی که معمولاً روغن می باشد پر می شود. از طریق سوراخ هواگیری هوای داخل آن خارج شده و سپس دریچه هواگیری بسته می شود.

محفظه در داخل دستگاه قرار داده شده و تا زمانی که به فشار جانبی مورد نظر برسیم بار محوری و جانبی به طور همزمان و برابر افزایش می یابند. پس از آنکه به فشار جانبی از پیش تعیین شده رسیدیم آن را با دقت ۲ درصد ثابت نگه می داریم. اعمال فشار جانبی به کمک دستگاه مخصوصی که برای همین منظور تهیه شده است تأمین می شود.

پس از آنکه فشار جانبی روی نمونه اعمال شد بار محوری به طور پیوسته افزایش یافته و با نرخ تنش ثابت اعمال می گردد. بارگذاری را تا لحظه شکست نمونه ادامه داده و در نهایت حداکثر بار محوری در لحظه گسیختگی نمونه یادداشت می شود.

این آزمایش سه بار در فشارهای جانبی ۵ مگاپاسکال، ۷ مگاپاسکال و ۲/۵ مگاپاسکال انجام می شود.

۶- داده‌ها و محاسبات:

جهت بدست آوردن مقاومت هر یک از نمونه‌ها، مقدار بار حداکثر اعمالی در لحظه شکست نمونه را بر سطح مقطع نمونه تقسیم می کنیم.

$$\sigma(GPa) = \frac{f_{\max}(KN)}{A(mm^2)}$$

در این آزمایش سه نمونه با مشخصات فوق مورد آزمایش قرار می گیرند. از این سه آزمایش سه زوج داده بدست می آید. این زوج داده‌ها تنش‌های جانبی و محوری هر سه نمونه در لحظه شکست می باشند. بر اساس قانون موهر-کولمب این داده‌ها روی یک خط قرار دارند. با رسم این خط می توان به راحتی مقدار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های سنگی و چسبندگی آنها را بدست آورد.

پس از ترسیم نمودار تنش محوری نسبت به تنش جانبی به کمک رابطه‌هایی که در قسمت تئوری آزمایش بیان شد می توان مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذاتی نمونه‌های سنگی را بدست آورد.

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{m-1}{m+1} \right)$$

$$m = \tan \psi$$

به همین ترتیب چسبندگی ذاتی از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$c = \sigma_c \cdot \left(\frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \right)$$

از طرف دیگر می توان با استفاده از نرم افزار راک لب^۱ مقادیر مقاومت تک محوری فشاری، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذاتی نمونه ها را بدست آوریم. در این نرم افزار با وارد کردن مقادیر تنش های محوری و جانبی بر حسب مگاپاسکال مقادیر فوق بدست می آیند.

۷- بحث و بررسی:

با مقایسه مقادیر بدست آمده از روش دستی و روش نرم افزاری، اختلاف زیادی بین مقادیر بدست آمده از این دو روش مشاهده می شود. دلیل این مطلب را می توان به صورت زیر بیان کرد.

در معیار موهر-کولمب، پوش کولمب که بر دواير موهر مماس است، در حالت تئوری خطی در نظر گرفته می شود حال آنکه در عمل این پوش کاملاً به صورت خطی نبوده و در تنش های جانبی کم، تمایل بیشتری به سمت مبدأ مختصات دارد. در روش دستی این پوش کاملاً به صورت خطی در نظر گرفته می شود ولی در نرم افزار راک لب این پوش به صورت خطی در نظر گرفته نمی شود. به همین دلیل مقدار بدست آمده از طریق نرم افزار به واقعیت نزدیکتر می باشد.

در آزمایش سه محوری برای فشارهای جانبی مختلف مقاومت های متفاوتی بدست می آید. ولی در فشار های جانبی مختلف برای سنگ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی واحدی را بدست می آوریم.

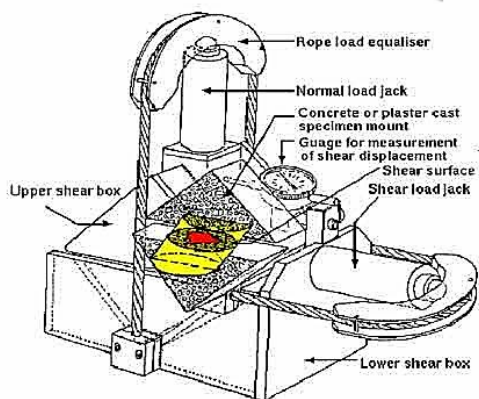
۸- نتیجه گیری:

مهمترین نتیجه ای که از انجام این آزمایش حاصل می شود، اینست که مقاومت نمونه های مورد آزمایش با افزایش فشار جانبی روی نمونه افزایش می یابد.

¹ Rock Lab

آزمایش

مقاومت برشی مستقیم



عنوان آزمایش:

مقاومت برشی مستقیم^۱ سطوح ناپیوستگی.

۱- هدف:

تعیین مقاومت برشی مستقیم سطوح ناپیوستگی نمونه‌های سنگی، چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح برش در تنش‌های قائم مختلف.

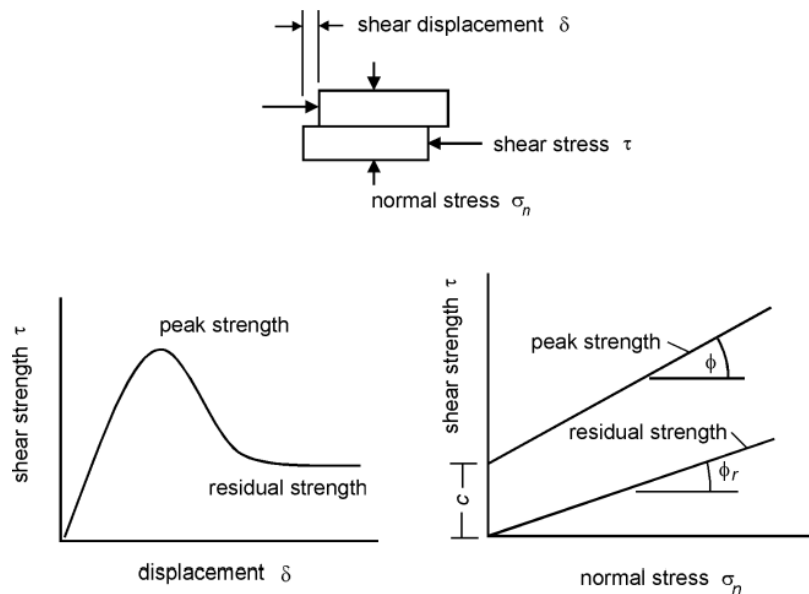
۲- تئوری آزمایش:

سنگ‌ها معمولاً شامل صفحاتی هستند که ناپیوستگی نام دارد. ویژگی این صفحات متفاوت بودن پارامترهای مقاومتی آنها نسبت به سایر نقاط توده سنگ است. این صفحات شامل لایه بندی، صفحات درزه، زون‌های برشی و گسل‌ها می‌باشند. در اعماق کم زمین معمولاً تنش‌ها مقادیر کمی دارند و در این اعماق گسیختگی سنگ بکر حداقل است. عموماً رفتار سنگ با لغزش بر روی سطوح ناپیوستگی کنترل می‌شود، بنابراین برای آنالیز پایداری چنین سیستم سنگی ضروری است که عوامل مهم تأثیر گذار بر مقاومت برشی سنگ‌ها را که باعث جدایش بلوک‌های سنگی از یکدیگر می‌شود را بیابیم. در این آزمایش مقاومت برشی مستقیم و ماندگار سطوح مختلف سنگ را تحت بارهای نرمال مختلف تعیین می‌کنیم.

۳- مقاومت برشی سطوح صفحه‌ای (مسطح):

¹ Direct Shear Strength

اگر تعدادی نمونه سنگی را برای آزمایش برش در نظر بگیریم، هر کدام از نمونه‌ها دارای سطوح لایه بندی هستند که اصطلاحاً سیمانته^۱ شده‌اند. به عبارتی دیگر با اعمال تنش کششی بر نمونه‌ها، از ناحیه این سطوح گسیخته می‌شوند. همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، در آزمایش برش نمونه‌ها تحت تنش عمودی σ_n قرار می‌گیرند و تنش برشی لازم τ برای ایجاد جابجایی δ اندازه‌گیری می‌شود. تنش برشی سریعاً تا رسیدن به پیک مقاومتی افزایش می‌یابد. این مقاومت به مقاومت برشی مجموع سیمان‌های موجود بین لایه‌ها و زاویه اصطکاک داخلی سطوح وابسته است. با ایجاد جابجایی در نمونه سنگی تنش برشی کاهش خواهد یافت تا به یک مقدار ثابت به نام تنش باقیمانده^۲ برسد. با ترسیم پیک مقاومتی برش سنگ به ازای تنش‌های نرمال متفاوت نمودارهایی مطابق با شکل ۱ ایجاد می‌شود. در رابطه با سطوح ناپیوستگی هموار و صاف این خط به صورت مستقیم می‌باشد. شیب این خط برابر با ϕ و عرض از مبدا آن برابر با C می‌باشد. همچنین مقاومت برشی باقیمانده دارای شیبی برابر با ϕ_r است.



شکل ۱- نمایش شماتیک تست برش مستقیم و نمودارهای مربوطه

رابطه میان پیک مقاومت برشی τ_p و تنش نرمال σ_n توسط موهر-کولمب به صورت زیر بیان شده است:

^۱ Cementation
^۲ Residual stress

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

که در این رابطه c بیانگر چسبندگی سطوح سیمانته شده و ϕ زاویه اصطکاک است.

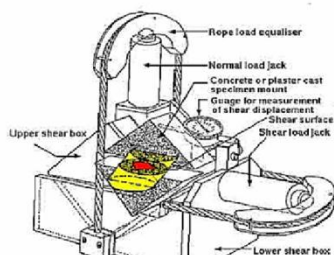
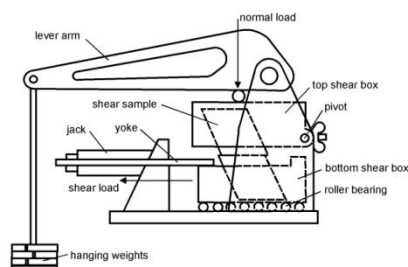
در حالت مقاومت باقیمانده چسبندگی c برابر با صفر بوده که این رابطه به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_b \quad (2)$$

زاویه اصطکاک اصلی (ϕ_b پایه) مقدار ϕ_b مقداری است که برای درک مقاومت برشی ناپیوستگی به کار می‌رود. این مقدار در واقع همان مقدار ϕ_r یا زاویه اصطکاک باقیمانده است که اغلب در آزمایشات برجا تعیین می‌گردد. به هر حال با انجام آزمایشات مربوطه، خط تولید شده دارای رابطه‌ای به صورت زیر است:

$$\phi_r = \sigma_n \tan \phi_b \quad (3)$$

ماشین‌های ویژه‌ای که برای این منظور به کار می‌رود در شکل ۲ آمده است. نمونه‌ای از این ماشین مکانیسمی بسیار ساده دارد. بازوی اعمال بار در ماشین فوق این اطمینان را حاصل می‌کند که اعمال بار نرمال در طول آزمایش ثابت بماند. اعمال بار ثابت همزمان با انجام آزمایش بسیار اهمیت دارد و اغلب انجام این مهم توسط روش‌های هیدرولیکی و پنوماتیکی دشوار است. در طول آزمایش برش سنگ، باید در تراز کردن سطح برش بسیار دقت کرد تا برای تفسیر نتایج نیاز به تصحیحات اضافی نداشته باشیم.



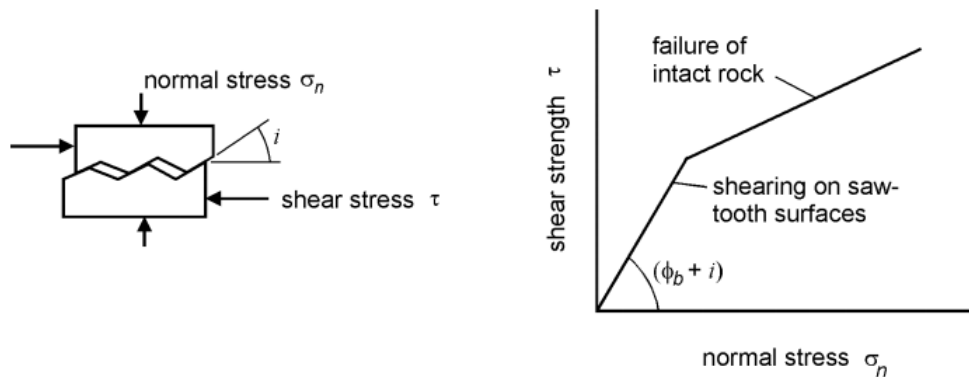
شکل ۲- ماشین‌های اعمال بار در آزمایش برش سنگ

اغلب ناپیوستگی‌های موجود در سنگ‌ها هموار نبوده و از درجه زبری برخوردار هستند. معمولاً در رابطه با این نوع نمونه‌ها نیز آزمایش به روش مطرح شده انجام گرفته و نهایتاً میزان زبری سطح ناپیوستگی توسط فاکتورهای تصحیح به نتایج مربوط به این سطوح تبدیل می‌شوند.

۳-۱- مقاومت برشی سطوح زبر:

طبیعت سطوح ناپیوستگی در سنگ‌های سخت اغلب زبر و خشن می‌باشند و نسبت به آن چیزی که در تعیین زاویه اصطکاک پایه فرض شد، متفاوتند. زبری سطوح درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها بر رفتار برشی آنها تأثیر بسزایی دارد. به صورت طبیعی این زبری مقاومت برشی را افزایش می‌دهد و این افزایش مقاومت بر پایداری حفریات سنگی بسیار موثر است.

پاتون (۱۹۶۰) این تأثیر را با آزمایش برش بر سطوح دندانه دار (شکل ۳) بررسی کرد. جابجایی چنین نمونه‌ای با حرکت رو به بالای سطوح و یا پدیده اتساع همراه است.



شکل ۳- تست برش و نمودار مربوطه در حالت حضور سطوح منظم زبری

رابطه مقاومت برشی که ایشان بیان کرد به صورت زیر می‌باشد:

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (۴)$$

در این رابطه ϕ_b زاویه اصطکاک پایه و i زاویه سطوح زبری می‌باشد.

الف. تخمین بارتون از مقاومت برشی:

رابطه ۴ فقط به ازای تنش‌های نرمال کم و تا زمانی که جابجایی برشی به خاطر لغزش سطوح مایل بر روی یکدیگر باشد صادق است. در مقادیر تنش نرمال بالاتر، چنانچه تنش از مقاومت مواد بکر تجاوز کند لغزش جای خود را به برش دندانها می‌دهد که رفتار مشاهده شده در این حالت بیشتر از آنکه به خصوصیات اصطکاکی سطوح وابسته باشد به مقاومت مواد بکر وابسته است.

علیرغم اینکه رابطه پاتون ساده و گویاست اما در مقادیر بالای تنش نرمال صحت ندارد. بارتون (۱۹۷۳-۱۹۷۶) با مطالعه رفتار سنگ‌های درزه دار به رابطه زیر برای مقاومت برشی درزه دست یافت:

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق JRC بیانگر ضریب زبری درزه و JCS بیانگر مقاومت فشاری سطح درزه است.

بنابراین بارتون با استفاده از ϕ_r نخستین معیار غیر خطی سنگ‌های درزه دار را بیان کرد. بارتون و چوبی بر پایه نتایج تست برش مستقیم بر ۱۳۰ نمونه رابطه زیر را برای سنگ‌های درزه ای هوازده تغییر دادند:

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (6)$$

که در این رابطه ϕ_r زاویه اصطکاک باقیمانده می‌باشد. بارتون و چوبی پیشنهاد دادند که ϕ_r بر اساس رابطه زیر تعیین می‌گردد:

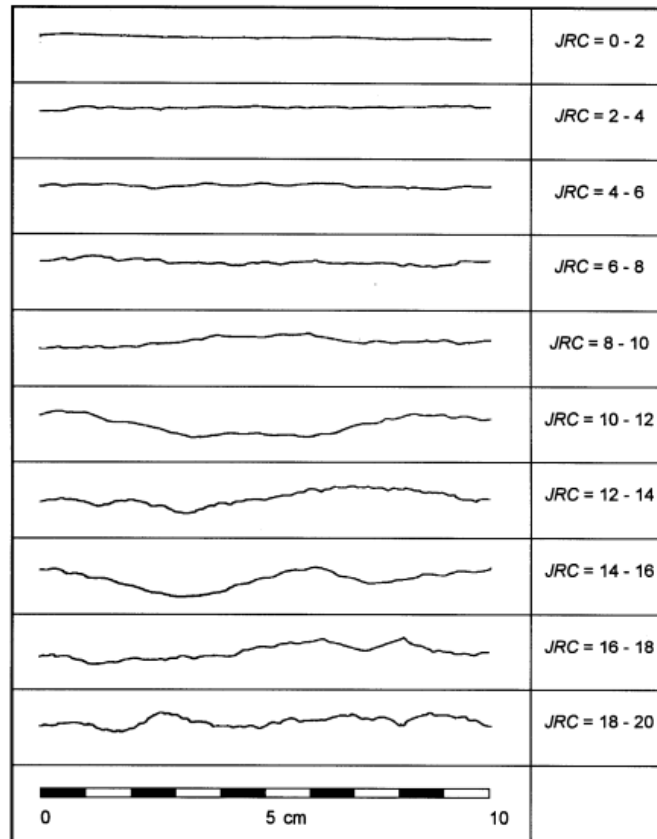
$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R) \quad (7)$$

که در آن r نتیجه تست چکش اشمیت بر سطح هوازده مرطوب، و R نتیجه برای سطوح غیر هوازده خشک و هموار است. روابط بالا به جزئی از معیار بارتون- بندیس برای مقاومت سنگ درزه دار تبدیل شده است.

ب. تخمین مقادیر JRC:

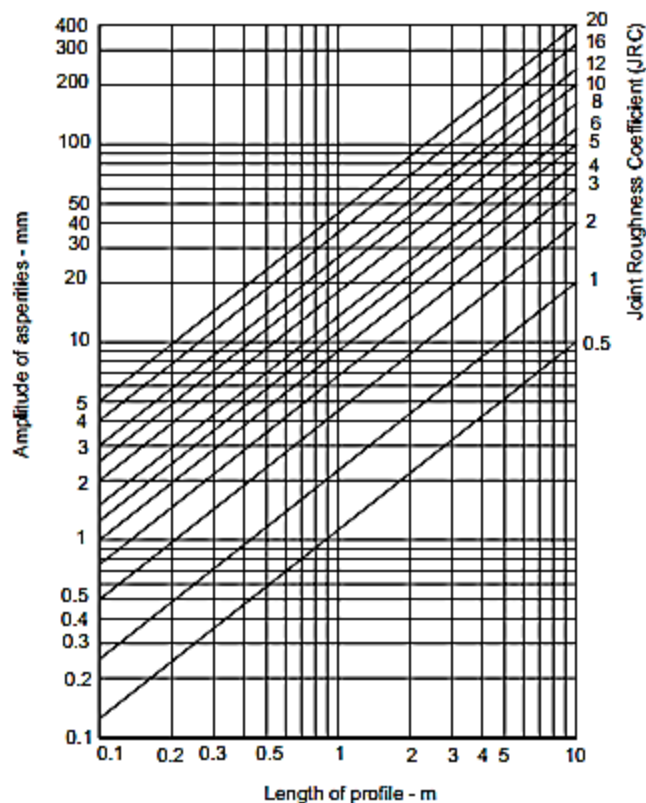
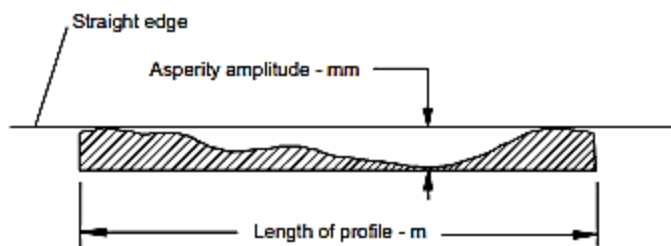
JRC اندیسی است که می‌تواند با مقایسه سطح ناپیوستگی با استانداردهای بارتون و دیگران بیان شود. نمونه‌ای از این استانداردها در شکل ۴ آمده است. ظاهر سطح ناپیوستگی با الگوهای مذکور به صورت چشمی

مقایسه شده و نزدیکترین الگو به سطح انتخاب می‌شود و اندیس مربوط به آن به عنوان JRC سطح تعیین می‌گردد.



شکل ۴- پروفیل‌های استاندارد بارتون برای تخمین ضریب JRC

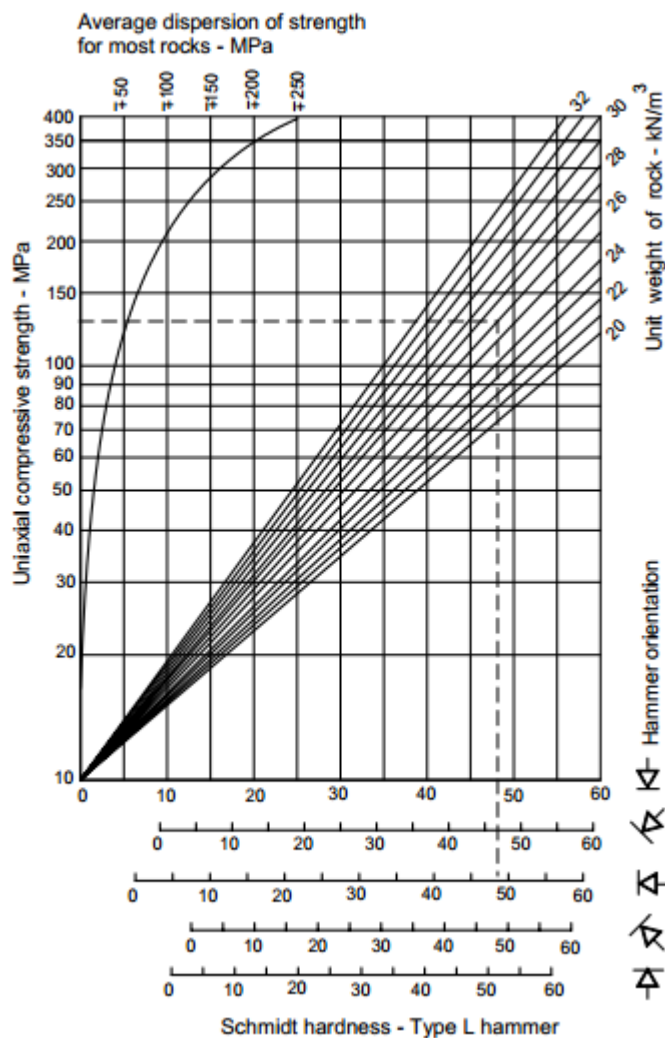
از الگوهای ذکر شده در شکل ۴ معمولاً برای تعیین JRC در نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. اما برای تعیین این ضریب در صحرا و به صورت برج‌ها در نمونه‌های با طول زیاد (چندین متر) از الگوی نموداری موجود در شکل ۵ استفاده می‌شود.



شکل ۵- نمودار تخمین صحرایی ضریب زبری JRC

ج. تخمین صحرایی JCS:

برای تخمین صحرایی ضریب JCS از روشی تحت عنوان روش دیر و میلر (۱۹۶۶) استفاده می‌شود. در این روش به کمک چکش اشمیت مقاومت فشاری دیواره ناپیوستگی در جهات خاص تعیین می‌گردد. اصول این روش در نمودار شکل ۶ آمده است.



شکل ۶- تعیین JCS با توجه به زاویه برخورد چکش اشمیت

د. تأثیر مقیاس بر JCS و JRC:

بارتون و بندیس (۱۹۸۲) بر اساس رابطه زیر تصحیحی را برای مقیاس در تعیین JRC تعریف کرده اند. در این رابطه JRC_0 و L_0 با مقیاس آزمایشگاهی و JRC_n و L_n با مقیاس بلوکی برجای سنگ مرتبط اند.

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} \quad (۸)$$

به دلیل ضعف بیشتر در سطوح بزرگتر معقولانه است که JCS با افزایش مقیاس کاهش یابد. رابطه بارتون و بندیس برای تصحیح مقیاس JCS به صورت زیر است.

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03 JRC_0} \quad (9)$$

در این حالت نیز JCS_0 و L_0 مرتبط با مقیاس آزمایشگاهی هستند که JCS_0 و L_n با مقیاس بلوکی برجای سنگ (صحرائی) در ارتباطند.

۳-۲- مقاومت برشی در ناپیوستگی‌های پر شده:

در تمامی موارد ذکر شده فرض شد که سطوح ناپیوستگی فاقد ماده پر کننده است. اما همانگونه که می‌دانیم اغلب ناپیوستگی‌ها دارای پوشش‌هایی از مواد پر کننده (همانند رس یا کلسیت) هستند که مقاومت برشی را به شدت کاهش می‌دهند. به این منظور بارتون (۱۹۷۴) مقادیر مقاومت برشی را برای مواد مختلف پر کننده تعیین کرد که در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱- مقاومت برشی مواد پرکننده مختلف

Rock	Description	Peak c' (MPa)	Peak ϕ°	Residual c' (MPa)	Residual ϕ°
Basalt	Clayey basaltic breccia, wide variation from clay to basalt content	0.24	42		
Bentonite	Bentonite seam in chalk Thin layers Triaxial tests	0.015 0.09-0.12 0.06-0.1	7.5 12-17 9-13		
Bentonitic shale	Triaxial tests Direct shear tests	0-0.27	8.5-29	0.03	8.5
Clays	Over-consolidated, slips, joints and minor shears	0-0.18	12-18.5	0-0.003	10.5-16
Clay shale	Triaxial tests Stratification surfaces	0.06	32	0	19-25
Coal measure rocks	Clay mylonite seams, 10 to 25 mm	0.012	16	0	11-11.5
Dolomite	Altered shale bed, \pm 150 mm thick	0.04	14.5	0.02	17
Diorite, granodiorite and porphyry	Clay gouge (2% clay, $P_1 = 17\%$)	0	26.5		
Granite	Clay filled faults Sandy loam fault filling Tectonic shear zone, schistose and broken granites, disintegrated rock and gouge	0-0.1 0.05 0.24	24-45 40 42		
Greywacke	1-2 mm clay in bedding planes			0	21
Limestone	6 mm clay layer 10-20 mm clay fillings <1 mm clay filling	0.1 0.05-0.2	13-14 17-21	0	13
Limestone, marl and lignites	Interbedded lignite layers Lignite/marl contact	0.08 0.1	38 10		
Limestone	Marlaceous joints, 20 mm thick	0	25	0	15-24
Lignite	Layer between lignite and clay	0.014-0.03	15-17.5		
Montmorillonite Bentonite clay	80 mm seams of bentonite (montmorillonite) clay in chalk	0.36 0.016-0.02	14 7.5-11.5	0.08	11
Schists, quartzites and siliceous schists	100-150 mm thick clay filling Stratification with thin clay Stratification with thick clay	0.03-0.08 0.61-0.74 0.38	32 41 31		
Slates	Finely laminated and altered	0.05	33		
Quartz / kaolin / pyrolusite	Remoulded triaxial tests	0.042-0.09	36-38		

۳-۳- تأثیر فشار آب:

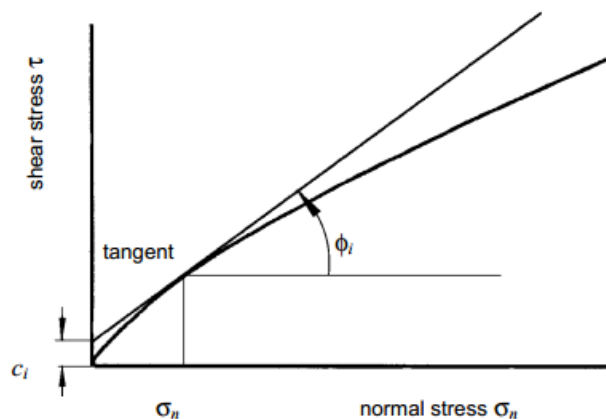
هنگامی که توده سنگ تحت تنش آب حفره‌ای قرار گیرد، فشار آب به عاملی برای کاهش تنش نرمال وارده بر ناپیوستگی تبدیل می‌گردد. در شرایط پایا که زمان کافی برای اعمال فشار آب بر سنگ وجود دارد کاهش تنش نرمال به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sigma' = (\sigma_n - u) \quad (10)$$

که در آن u تنش آب حفره‌ای، σ'_n تنش نرمال موثر است.

۳-۴- چسبندگی و زاویه اصطکاک مماسی:

تا کنون تلاش‌های زیادی به منظور یافتن فاکتور ایمنی در برابر لغزش سنگ انجام گرفته است. این تلاش‌ها منجر به یافتن پارامترهای چسبندگی موهر-کولمب (c) و زاویه اصطکاک داخلی گردیده که پیشتر بیان شد. از دهه ۱۹۷۰ تشخیص داده شد که رابطه میان مقاومت برشی و تنش نرمال شبیه به آن چیزی که بارتون بیان کرده بود به یک رابطه غیر خطی نزدیک‌تر است (شکل ۷).



شکل ۷- تخمین بارتون از نمودار تنش برشی در برابر تنش نرمال

در این حالت اگر در قسمت‌های مختلف نمودار غیر خطی، مماسی را رسم کنیم به ازای مقادیر مختلف σ_n می‌توانیم زاویه اصطکاک و چسبندگی را تعیین کنیم که در این حالت آنها را زاویه اصطکاک مماسی و چسبندگی مماسی می‌نامیم. مقادیر حاصله در روابط معیارهای موهر-کولمب می‌توانند به جای مقادیر σ_n و τ وارد شوند.

البته باید توجه داشت که رابطه ۶ به ازای تنش نرمال برابر با صفر صادق نیست و این رابطه تحت شرایط زیر معنادار است.

$$\phi_r + \text{JRC} \log(\text{JCS}/\sigma_n) > 70^\circ \quad (11)$$

این محدودیت می‌تواند برای تعیین مقدار حداقل تنش نرمال به کار رود. بیشترین مقدار تنش نرمال نیز در واقع همان JCS است.

در کاربردهای تجربی خاص برای حل معادله مذکور و برای یافتن زاویه اصطکاک و چسبندگی مماسی از الگوریتم‌های توسعه یافته در این رابطه بهره گرفته می‌شود. قسمت‌هایی از این برنامه را در جدول ۲ می‌توان دید. این برنامه برای یافتن ϕ_i به ازای تنش σ_n از روابط زیر کمک می‌گیرد:

$$\phi_i = \arctan \left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan \left(\text{JRC} \log \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \phi_r \right) - \frac{\pi \text{JRC}}{180 \ln 10} \left[\tan^2 \left(\text{JRC} \log \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \phi_r \right) + 1 \right] \quad (13)$$

در این حالت چسبندگی مماسی c_i از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$c_i = \tau - \sigma_n \tan \phi_i \quad (14)$$

بایستی توجه کرد که برای به کار بردن این روش میانگین تنش‌های نرمال σ_n وارده بر صفحات ناپیوستگی محاسبه و به برنامه وارد می‌شود.

جدول ۲- بخشی از الگوریتم توسعه یافته در تعیین زاویه اصطکاک و چسبندگی

Input parameters:

Basic friction angle (PHIB) - degrees	29
Joint roughness coefficient (JRC)	16.9
Joint compressive strength (JCS)	96
Minimum normal stress (SIGNMIN)	0.360

Normal stress (SIGN) MPa	Shear strength (TAU) MPa	dTAU/dSIGN (DTDS)	Friction angle (PHI) degrees	Cohesive strength (COH) MPa
0.360	0.989	1.652	58.82	0.394
0.720	1.538	1.423	54.91	0.513
1.440	2.476	1.213	50.49	0.730
2.880	4.073	1.030	45.85	1.107
5.759	6.779	0.872	41.07	1.760
11.518	11.344	0.733	36.22	2.907
23.036	18.973	0.609	31.33	4.953
46.073	31.533	0.496	26.40	8.666

Cell formulae:

$$\text{SIGNMIN} = 10^{((\text{LOG}(\text{JCS}) - (70 - \text{PHIB}) / \text{JRC}))}$$

$$\text{TAU} = \text{SIGN} * \text{TAN}((\text{PHIB} + \text{JRC} * \text{LOG}(\text{JCS} / \text{SIGN})) * \text{PI}() / 180)$$

$$\text{DTDS} = \text{TAN}((\text{JRC} * \text{LOG}(\text{JCS} / \text{SIGN}) + \text{PHIB}) * \text{PI}() / 180) - (\text{JRC} / \text{LN}(10))$$

$$* (\text{TAN}((\text{JRC} * \text{LOG}(\text{JCS} / \text{SIGN}) + \text{PHIB}) * \text{PI}() / 180) ^ 2 + 1) * \text{PI}() / 180$$

$$\text{PHI} = \text{ATAN}(\text{DTDS}) * 180 / \text{PI}()$$

$$\text{COH} = \text{TAU} - \text{SIGN} * \text{DTDS}$$

۴- وسایل آزمایش:

وسایل مورد نیاز برای تهیه نمونه از سنگ شامل موارد زیر است:

- وسایل مربوط به برش نمونه مانند مته مغزه گیر با قطر بزرگ (۱۰ سانتیمتر)، به همراه وسایل اندازه گیری شیب، جهت شیب، زبری و غیره.
- سیم برای بستن یا نگاه داشتن نمونه.
- مواد برای نگهداری نمونه در برابر صدمات مکانیکی و تغییر درصد رطوبت در حین انتقال به آزمایشگاه.

همچنین برای قرار دادن نمونه در دستگاه به موارد زیر نیاز است:

- وسیله قالب گیری نمونه که ممکن است استوانه ای یا مکعبی باشد.
- سیمان، گچ، رزین یا سایر مواد قالب گیری مقاوم.
- ظرف مناسب برای مخلوط کردن سیمان یا رزین.

آماده سازی نمونه بایستی با دقت و حوصله انجام گیرد. وسایل اعمال بار قائم باید به گونه‌ای باشد که بتواند بار را به صورت یکنواخت به صفحه آزمایش اعمال کند. برآیند نیروی اعمالی باید از مرکز سطح گذشته و بر آن کاملاً عمود باشد. سیستم باید بار را در طول آزمایش با دقت ۲ درصد ثابت نگه دارد. وسیله اعمال بار برشی نیز بایستی بار را به طور یکنواخت به یک نیمه از نمونه اعمال کند. برآیند این نیروی برشی باید در صفحه برش عمل نماید.

دستگاه‌های اعمال بار باید به سیستم اندازه‌گیری مستقل با دقتی بیش از ۲ درصد حداکثر نیروی اعمالی مجهز باشند. در تمام آزمایشات باید از آخرین نتایج کالیبراسیون تجهیزات و زمان کالیبره کردن آنها مطلع بود.

۵- روش انجام آزمایش:

نمونه مورد آزمایش ممکن است یک درزه طبیعی و یا درزه مصنوعی ایجاد شده توسط اهر باشد. جهت گیری نمونه نسبت به توده سنگ و نحوه قرار گیری آن در دستگاه برش باید حتی الامکان به نحوی باشد که سطح ناپیوستگی بر صفحه برش منطبق گردد. در صورتی که سطح ناپیوستگی نسبت به صفحه برش شیب دار باشد باید این زاویه را در محاسبات لحاظ کرد. البته باید گفت که سطح ناپیوستگی علاوه بر درزه، صفحه لایه بندی و کلیواژ، می‌تواند تماس بین سنگ و خاک و یا سنگ و بتن باشد.

نمونه تهیه شده را پس از آماده سازی در جعبه برش قرار داده و کلیه دستگاه‌ها را نصب و کنترل می‌نماییم. بار قائم مورد نظر به صورت پیوسته و یکنواخت به نمونه اعمال می‌گردد. پس از رسیدن به حد دلخواه میزان بار قائم خوانده و ثبت می‌شود.

اکنون نیروی برشی به نمونه به طور پیوسته و به طریقی که سرعت جابجایی برشی قابل کنترل باشد اعمال می‌شود. تا زمانی که نیروی برشی به صورت صعودی حرکت می‌کند به معنای آنست که سطح درزه حرکتی ندارد و در زمان حرکت سطح درزه حرکت صعودی نیروی برشی متوقف شده، در این لحظه مقدار نیروی برشی قرائت و ثبت می‌گردد. با ثبت داده‌ها نمودارهای تنش برشی - جابجایی برشی و مقاومت برشی - تنش قائم ترسیم می‌گردد.

۶- داده‌ها و محاسبات:

پس از آنکه اطلاعات هر سه مرحله آزمایش به طور کامل ثبت شد با رسم نمودار تنش برشی بر حسب جابجایی برشی می توان تنش برشی حداکثر و تنش برشی ماندگار^۱ را روی سطح درزه در فشارهای عمودی مختلف بدست آورد. در این آزمایش به دلیل نداشتن اطلاعات کافی از لحظات بعد از تنش، حداکثر پوش مقاومت ماندگار را نمی توان رسم کرد، بنابراین فقط پوش مقاومت حداکثر را رسم می کنیم.

با ترسیم زوج داده‌های حاصل از هر مرحله از آزمایش (مقاومت برشی، تنش نرمال) و درون یابی خطی میان آنها، خطی که به طور تقریبی از نقاط استخراج شده می گذرد دارای عرض از مبدا تقریبی صفر مگاپاسکال و شیب مثبتی می باشد. با مقایسه این اعداد با فرمول موهر- کولمب به راحتی چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح درزه بدست می آید.

۷- بحث و بررسی:

برای رسم دقیق نمودار پوش موهر- کولمب انجام سه آزمایش بسیار کم است. به عبارت دیگر اگر بخواهیم چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی را با دقت خوبی بدست آوریم باید تعداد آزمایشات بیشتری انجام شود.

در این آزمایش بدلیل نداشتن اطلاعاتی در مورد مقاومت برشی ماندگار، بدست آوردن زاویه اصطکاک ماندگار امکان پذیر نمی باشد و فقط نمودار تنش برشی بر حسب جابجایی برشی در مرحله اول دارای شکل مناسبی برای تعیین مقدار مقاومت ماندگار می باشد که نمودار آن در شکل نشان داده شده است.

۸- نتیجه گیری:

همانطور که در تئوری آزمایش گفته شد میزان زبری سطوح ناپیوستگی بر مقدار مقاومت برشی این سطوح تأثیر مستقیم دارد. در این آزمایش بدلیل زبری کم سطح ناپیوستگی مقدار مقاومت برشی بدست آمده در فشارهای قائم مختلف کم می باشد.

^۱ Residual strength

انجام آزمایش طی سه مرحله در فشارهای قائم مختلف نشان دهنده افزایش مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی با افزایش فشارهای قائم می‌باشد. لذا مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی با افزایش فشار قائم افزایش می‌یابد.

آزمایش

دوام سنگ



عنوان:

اندازه گیری اندیس مقاومت سنگ در برابر حل شونده گی^۱.

۱- هدف:

تعیین دوام سنگ در برابر هوازدگی و وارفتگی ناشی از تر و خشک شدن.

۲- تئوری آزمایش:

سازه‌هایی که در معرض فرآیند هوازدگی، تر و خشک شدن و انجماد و ذوب متناوب هستند همواره در معرض تخریب ناشی از وارفتگی قرار دارند. این وضعیت در مورد سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی شدیدتر می‌باشد. یکی از مسائل مهم در طراحی و اجرای پروژه‌های معدنی و عمرانی، قابلیت وارفتگی سنگ‌های غنی از رس و تأثیر آنها از فرآیندهای هوازدگی است.

یک معیار مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در برابر تر و خشک شدن متوالی و تأثیرات شیمیایی آب، شاخص دوام وارفتگی است. این شاخص توسط فرانکلین و چاندر^۲ در سال ۱۹۷۲ معرفی شد و در سال ۱۹۷۹ توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ به صورت استاندارد درآمد.

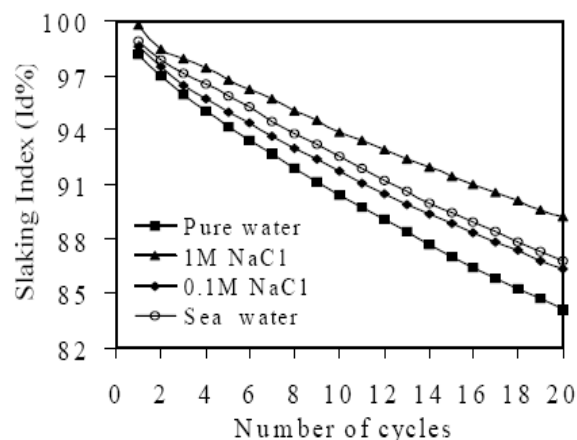
از دیگر کاربردهای این آزمایش بررسی وضعیت دوام مصالح سنگی مورد استفاده در بتن می‌باشد. یعنی قبل از اینکه مصالح مورد استفاده در بتن برای ساخت با هم مخلوط شوند روی آنها آزمایش دوام وارفتگی صورت می‌گیرد تا دوام آنها را در برابر تر و خشک شدن‌های مداوم بررسی کنند. نکته‌ای که به آن باید اشاره کرد اینست که برای بررسی وضعیت دوام بتن از این آزمایش استفاده نمی‌کنند.

^۱Slake-Durability Index

^۲Franklin & chandra

بدون شك تخریب سازه‌های بتنی بر اثر سیکل‌های یخ زدن و آب شدن یکی از مسایل اساسی بتن سازی در مناطق سردسیر محسوب می‌شود. عوامل زیادی بر دوام بتن در مقابل یخبندان تأثیر می‌گذارند که می‌توان به مواردی از قبیل مقدار آب مصرفی، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، شرایط عمل آوری، میزان هوای بتن و تعداد سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن اشاره کرد. از جمله آزمایش‌هایی که برای بررسی وضعیت دوام بتن در برابر یخ زدگی و ذوب شدگی مداوم مورد استفاده قرار می‌گیرد، آزمایش ذوب و انجماد براساس استاندارد ASTM C666B می‌باشد که بر اساس آن می‌توان در مورد دوام بتن در برابر یخ زدن و ذوب شدن مداوم نتایج مناسبی را بدست آورد.

در استاندارد ISRM برای نوع آب مصرفی در این آزمایش هیچ محدودیتی ذکر نشده است. این در حالی است که در استاندارد ASTM قید شده است که آزمایش فوق باید در آب مقطر انجام شود. تأثیر نوع آب مورد استفاده در این آزمایش در تحقیقاتی که بر روی توف‌های جوش خورده^۱ انجام شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی نمونه‌های توف را در آزمایش‌های متعدد بوسیله مایع‌های مختلف (آب خالص، آب دریا و محلول کلرید سدیم ۰/۱ مولار تا ۱ مولار) مورد آزمایش قرار داده‌اند و تأثیر نوع مایع مورد استفاده در این آزمایش را به صورت زیر گزارش کرده‌اند.



¹ Welded Tuff

شکل ۱- تأثیر نوع آب مورد استفاده در آزمایش بر روی شاخص دوام وارفنگی

همانطور که در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است هر چه درصد اسیدیته آب مورد استفاده بیشتر باشد شاخص دوام وارفنگی کمتر خواهد بود. این بررسی به خوبی نشان می‌دهد که نوع آب مورد استفاده در این آزمایش بر روی اندیس دوام تأثیر می‌گذارد در صورتی که در استاندارد ISRM هیچ محدودیتی برای آن ذکر نشده است.

اگر چه تعیین شاخص دوام وارفنگی به کمک این آزمایش در عمل ساده است، اما عملاً آزمایشی وقت گیر و طاقت فرسا می‌باشد. به همین دلیل روش‌های جدیدی برای تعیین دوام وارفنگی سنگ پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های جایگزین برای تعیین دوام سنگ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی^۱ می‌باشد.

۳- وسایل مورد نیاز:

- ظرف استوانه‌ای فلزی مشبک با شبکه توری $2\text{mm} * 2\text{mm}$ و $D=140\text{mm}$ و $L=100\text{mm}$.
- ظرف مکعبی تشت آب.
- الکتروموتور با قدرت ۲۰Rpm (این سرعت باید در طول ۱۰ دقیقه با دقت ۵ درصد ثابت بماند).
- ترازو با ظرفیت ۲ کیلوگرم و دقت نیم گرم.
- گرمخانه با قابلیت تولید و ثابت نگه داشتن دمای ۱۰۵ درجه در مدت زمان حداقل ۱۲ ساعت.

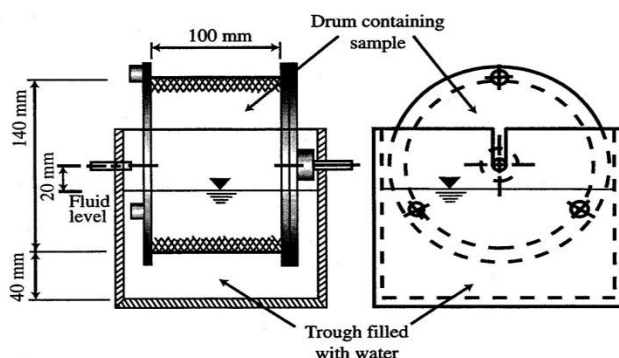
۴- روش انجام آزمایش:

روش انجام این آزمایش بسیار ساده می‌باشد. ابتدا نمونه‌های این آزمایش را تهیه می‌کنیم. نمونه‌های این آزمایش شامل ۱۰ قطعه سنگ ۴۵ تا ۶۰ گرمی است که در کل وزنی معادل ۴۵۰ تا ۵۵۰ گرم دارند. حداکثر ابعاد دانه‌های سنگ مورد آزمایش نباید از ۳ میلیمتر بیشتر باشد. شکل نمونه‌ها باید حتی الامکان کروی بوده و

¹ Artificial Neural Networks (ANN)

گوشه‌های تیز آن گرد شود. همچنین نمونه‌ها را قبل از آزمایش باید گردگیری کرد. این وزن را با نماد D نشان می‌دهیم.

این نمونه‌ها را در داخل ظرف استوانه‌ای فلزی مشبک که در شکل ۲ نشان داده شده است می‌ریزیم و در داخل گرمخانه با دمای ۱۰۵ سانتیگراد به مدت ۲ تا ۶ ساعت قرار می‌دهیم.



شکل ۲- ظرف استوانه‌ای مشبک و تشت آب دستگاه آزمایش اندیس پایداری (ابعاد استاندارد تجهیزات آزمایش دوام و ارتنگی طبق استاندارد ISRM نشان داده شده است).

پس از آنکه نمونه‌ها را از داخل گرمخانه خارج کردیم آنها را با ترازو وزن کرده و سپس یادداشت می‌کنیم. این وزن با A نشان داده می‌شود. ظرف استوانه‌ای را در داخل تشت آب قرار داده و محور آن را به موتور وصل می‌کنیم. موتور دستگاه به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰ Rpm دوران می‌کند. پس از ۱۰ دقیقه استوانه مشبک را از داخل تشت آب خارج کرده و در داخل گرمخانه با همان شرایط قبلی قرار می‌دهیم. بعد از خشک شدن کامل نمونه‌ها، آنها را خارج و با همان ترازو وزن کرده و یادداشت می‌کنیم. این وزن با حرف B نمایش داده می‌شود.

مرحله دوم آزمایش را همانند مرحله قبلی انجام می‌دهیم و در نهایت وقتی نمونه‌ها را از گرمخانه خارج کردیم، آنها را وزن می‌کنیم. وزن فوق را با نماد C نمایش می‌دهیم. محاسبه اندیس دوام نمونه به صورت زیر می‌باشد.

۵- داده‌ها و محاسبات:

اندیس دوام سنگ در مرحله اول از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Id_1 = \frac{B - D}{A - D} \times 100 \quad (1)$$

به همین ترتیب اندیس دوام سنگ را در سیکل دوم بدست می‌آوریم.

$$Id_2 = \frac{C - D}{A - D} \times 100 \quad (2)$$

۶- بحث و بررسی:

معمولاً طبقه‌بندی کردن سنگ‌ها شناخت آنها را برای ما راحت‌تر می‌کند. در هر طبقه‌بندی معیاری برای امتیاز دهی به سنگ‌ها در نظر گرفته می‌شود که یکی از این معیارها می‌تواند اندیس دوام سنگ‌ها باشد. طبقه‌بندی‌های متعددی بر اساس اندیس دوام سنگ‌ها صورت گرفته که در زیر به طبقه‌بندی گمبل اشاره می‌شود.

۱- طبقه‌بندی گمبل (۱۹۷۱)

این طبقه‌بندی بر اساس شاخص دوام مرحله اول و دوم می‌باشد.

DURABILITY	Cycle 1 (% retained)	Cycle 2. (% retained)
Very High	>99	>98
High	98-99	95-98
Medium-High	95-98	85-95
Medium	85-95	60-85
Low	60-85	30-60
Very Low	<60	<30

۲- طبقه‌بندی فرانکلین و چاندررا

Classification of durability	Slake durability index Id_2 (%)	Slaking $100 - Id_2$ (%)	
------------------------------	-----------------------------------	--------------------------	--

S	very low	0-25	100-75
O	low	25-50	75-50
I	medium	50-75	50-25
L	high	75-90	25-10
R O	very high	90-95	10-5
C K	extremely high	95-100	5-0

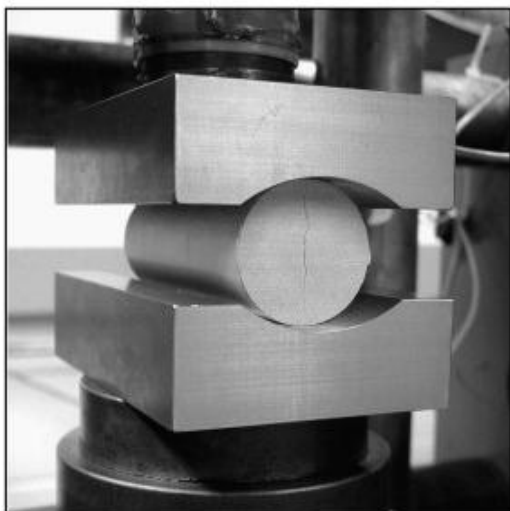
۷- نتیجه گیری:

بر اساس طبقه‌بندی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت سنگ مورد آزمایش چگونه است. البته باید توجه داشت که اگر آب شهری در این آزمایش مورد استفاده قرار گیرد، به دلیل خاصیت اسیدی، اندک تأثیری بر نتایج خواهد گذاشت.

به عنوان یک نکته، در مبحث هشتم از مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای ساختمان‌های با مصالح بنایی)، ضریب نرم شدن سنگ در آب عبارتست از نسبت مقاومت فشاری نمونه خیس شده در آب به مدت حداقل ۲۴ ساعت به مقاومت فشاری همان سنگ در حالت خشک.

آزمایش

مقاومت کششی مستقیم



عنوان:

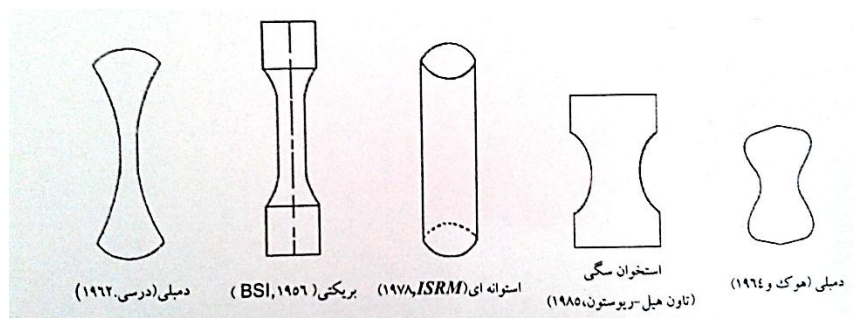
آزمایش اندازه گیری مقاومت کششی مستقیم سنگ.

۱- هدف:

در این آزمایش هدف اندازه گیری مستقیم مقاومت تک محوری کششی نمونه های سنگی دارای شکل هندسی منظم می باشد. نتایج این آزمایش به صورت اساسی برای طبقه بندی سنگ بکر قابل کاربرد است.

۲- تئوری آزمایش:

روش ساده برای اندازه گیری مقاومت کششی نمونه سنگ روش مستقیم نامیده می شود. در این روش نمونه های با اشکال استاندارد (شکل ۱) به صورت مستقیم تحت کشش قرار می گیرند تا به گسیختگی برسند. اعمال کشش مستقیم بر روی نمونه های سنگی بسیار دشوار است و نیاز به تجهیزات مخصوصی دارد. مطالعات زیادی برای رفع این مشکل انجام شده است. نمونه ای از این مطالعات پیشنهاد اشکال مختلف نمونه است که انواع آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. با تهیه این نمونه ها مشکل چگونگی اتصال دستگاه به نمونه تا حدی حل شد.



شکل ۱- انواع نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش کشش مستقیم.

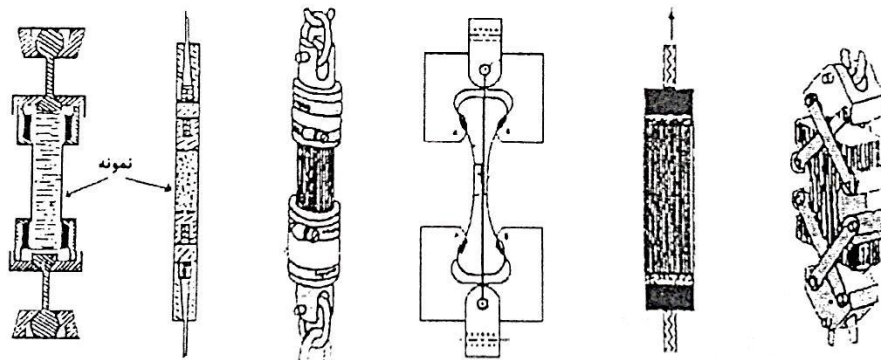
آماده سازی ویژه نمونه یک مشکل اساسی در این نوع آزمایش است. در تهیه نمونه‌های دمبلی شکل از مواد شکننده ای مانند سنگ، نمونه هنگام تراش و آماده سازی شکسته و از بین می رود. حتی در صورت تهیه نمونه مناسب در هنگام آزمایش مشکلات خاصی مانند گسیختگی در محل تماس نمونه با دستگاه بوجود می آید. از میان انواع نمونه، نمونه‌های استخوان سگی مناسب تر بوده و در مقایسه با دیگر نمونه دارای مزایای زیر است:

- آماده سازی آنها بسیار ساده و ارزان است.
- تمرکز تنش یا تأثیرات انتهایی نمونه به شدت نمونه‌های استوانه ای نیست.
- آماده کردن نمونه‌های استخوان سگی باعث تهیه همزمان نمونه‌های استوانه ای می گردد که می تواند در آزمایشات دیگر به کار آید.

در انجام این آزمایش، نمونه‌های استوانه ای قائم با نسبت $L/D = 3 - 2/5$ و قطر حداقل ۵۴ میلیمتر می باشند. قطر نمونه بستگی به ابعاد دانه‌های سنگ دارد و باید حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه باشد. سطوح انتهایی نمونه باید تقریباً صاف و مسطح باشند، البته صاف و صیقلی بودن سطوح در آزمایش کششی مستقیم خیلی حساس نیست و تنها بریده شدن سطوح انتهایی توسط اره کفایت می کند و حتی پرداخت زیاد نمونه ممکن است اثر منفی بر روی چسبندگی نمونه به کلاهدک بگذارد.

کلاهدک فلزی کشش، طوری به نمونه چسبانده می شود که محور آنها بر محور طولی نمونه منطبق باشد. برای چسباندن می توان از چسب اپوکسی با مقاومت کششی تقریباً ۲۰/۶۹ تا ۲۷/۵۸ مگاپاسکال استفاده کرد. همچنین می توان از سیمان با استحکام بالا استفاده نمود. نمونه و کلاهدک ها پس از چسباندن، در داخل فک یا هر وسیله دیگر قرار داده می شود تا کاملاً محکم شود.

ضخامت لایه چسب باید از ۱/۵ میلیمتر تجاوز نکند و در سراسر سطح نمونه یکنواخت باشد به گونه‌ای که سطح کلاهک و نمونه با هم موازی باشند. این مورد با اندازه‌گیری در سه جهت با زاویه ۱۲۰ نسبت به هم کنترل می‌شود که میزان اختلاف قابل قبول زیر ۰/۱ میلیمتر به ازای هر ۲۵ میلیمتر قطر نمونه است. پس از آنکه چسب محکم شد و مقاومتی بیش از مقاومت کششی سنگ پیدا کرد، نمونه داخل گیره قرار می‌گیرد. سپس انتقال بار صورت می‌گیرد. انواع مختلف گیره در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- انواع گیره‌های مورد استفاده در آزمایش کشش مستقیم.

بار کششی بایستی به طول پیوسته تا مرحله گسیختگی کاملاً خطی اعمال شود. سرعت بارگذاری باید ثابت و به گونه‌ای باشد که نمونه در مدت ۵ دقیقه بشکند. بار اعمالی بر نمونه بایستی با دقت یک درصد خوانده شود. نرخ بارگذاری ۱-۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه است.

در این آزمایش معمولاً گسیختگی در نزدیکی کلاهک‌ها اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایش‌هایی که گسیختگی به طور موضعی و یا داخل چسب اتفاق بیفتد، قابل قبول نیست. مقاومت کششی سنگ از تقسیم بار وارده در لحظه شکست بر سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

σ : مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال.

P : بار وارده در لحظه گسیختگی بر حسب کیلونیوتن.

A : سطح مقطع نمونه بر حسب متر مکعب.

۳- وسایل آزمایش:

ماشین مناسب برای اعمال و اندازه گیری بارگذاری محوری بر نمونه. این ماشین باید ظرفیت اعمال بار با نرخ منطبق با استانداردهایی که در این آزمایش مطرح می شود را داشته باشد.

کلاهک فلزی استوانه‌ای که به سطوح انتهایی نمونه به گونه‌ای متصل می شود که قابلیت اعمال بار مستقیم کششی به نمونه تحت آزمایش فراهم گردد. قطر کلاهک فلزی نباید کمتر از قطر نمونه تحت آزمایش باشد و نیز قطر مذکور نباید به میزان ۲ میلیمتر از قطر نمونه بیشتر باشد. لازم است که ضخامت این کلاهک حداقل ۱۵ میلیمتر باشد. کلاهک با اتصالی مناسب به گونه‌ای به نمونه متصل می شود که امکان انتقال بار از کلاهک بدون اعمال تنش‌های خمشی و یا پیچشی فراهم گردد. طول اتصالات در هر دو سمت نمونه باید حداقل برابر با دو برابر قطر کلاهک فلزی باشد.

۴- انجام آزمایش:

نمونه مورد آزمایش باید استوانه‌ای مدور و مستقیم با نسبت طول به قطر ۳-۲/۵ باشد. قطر این نمونه بهتر است که از ابعاد استاندارد مغزه‌ای NX (حدوداً ۵۴ میلیمتر) کمتر نباشد. قطر نمونه با نسبت حداقل ۱۰:۱ با قطر بزرگترین دانه موجود در نمونه مرتبط است.

سطوح انتهایی نمونه باید صاف و صیقلی باشد. این سطوح نباید بیشتر از محدوده ۰/۰۰۱ رادیان و یا ۰/۰۵ میلیمتر در ۵۰ میلیمتر نسبت به محور اصلی نمونه از حالت قائم خارج شود.

وجوه جانبی نمونه باید مستقیم و فاقد هر گونه ناهمواری و بی نظمی باشد. میزان ناهمواری‌های مجاز در این سطوح حداکثر برابر با ۰/۱ میلیمتر در کل طول نمونه می باشد.

قطر نمونه تحت آزمایش باید با دقت ۰/۱ میلیمتر از میانگین گیری در دو سمت نمونه اندازه گیری شود. میانگین حاصل در محاسبه سطح مقطع نمونه شرکت می نماید. ارتفاع نمونه با دقت ۱ میلیمتر اندازه گیری می شود.

لازم است که نمونه‌ها به مدت زمانی بیش از ۳۰ روز از زمان نمونه برداری برجا به منظور نگهداری و حفظ شرایط طبیعی از جمله آب محتوی، نگهداری نشوند. با توجه به شرایط آماده سازی نمونه‌ها، می‌توانند به مدت زمان ۵ الی ۶ روز در شرایط محیطی با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و میزان رطوبت ۵۰ درصد نگهداری شوند. شرایط رطوبت نمونه باید به صورت دقیق بر اساس آزمایش تعیین رطوبت گزارش شود.

کلاهک‌های فلزی باید به گونه‌ای به نمونه تحت آزمایش متصل شوند که جهت گیری محور آن با محور نمونه کاملاً منطبق باشد. این اتصال توسط سیمان برقرار می‌شود. ضخامت لایه سیمانی نباید در هر سطح از ۱/۵ میلیمتر تجاوز نماید. بعد از سفت شدن سیمان و رسیدن مقاومت آن به حدی بالاتر از مقاومت کششی سنگ، نمونه آزمایش در زیر دستگاه قرار می‌گیرد. در قرار دادن نمونه باید دقت کرد که بارگذاری کاملاً محوری اعمال گردد.

لازم است که بار کششی وارده بر نمونه با نرخ ثابت اعمال و اندازه گیری شود. این نرخ به گونه‌ای تنظیم می‌شود که شکست نمونه به مدت زمان حدوداً ۵ دقیقه به طول بیانجامد. نرخ مناسب را می‌توان در بازه ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه قرار داد.

با رسیدن تغییرات بار به کمتر از ۰/۱٪، حداکثر بار وارده بر نمونه قابل قرائت است.

تعداد نمونه‌های تحت آزمایش در رابطه با هر تیپ سنگی بر اساس ملاحظات تجربی تعیین می‌گردد. با این وجود حداقل ۵ نمونه باید مورد آزمایش قرار بگیرد.

۵- بحث و نتیجه گیری:

مقاومت کششی نمونه در آزمایش کششی مستقیم به راحتی از تقسیم کردن حداکثر بار اعمالی بر سطح مقطع نمونه قابل محاسبه است. در این آزمایش لازم است که موارد زیر به عنوان گزارش به همراه مقاومت اندازه گیری شده گزارش گردد:

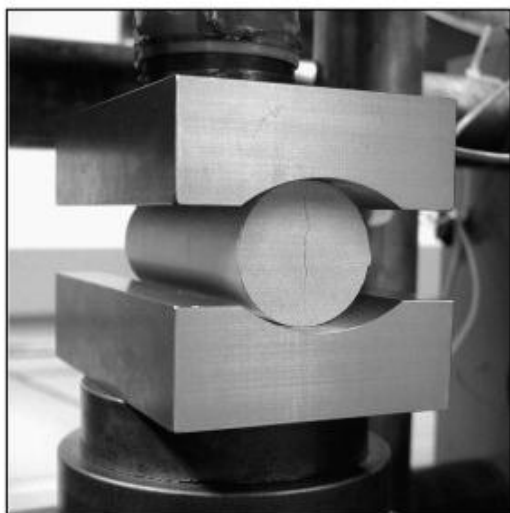
۱- توصیف سنگ شناسی نمونه.

۲- جهت گیری محور بارگذاری با توجه به اینزوتروپی، لایه بندی و ساختارهای مشابه احتمالی موجود در نمونه.

- ۳- اطلاعات محل نمونه‌گیری شامل موقعیت جغرافیایی، عمق و جهت‌گیری تاریخ و شرایط محیطی محل.
- ۴- تعداد نمونه‌هایی که مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و با توجه به آنها مقاومت تخمین زده شده است.
- ۵- قطر نمونه و ارتفاع آن.
- ۶- آب محتوی و درجه اشباع نمونه در زمان آزمایش.
- ۷- مدت زمان آزمایش و یا نرخ تنش.
- ۸- تاریخ آزمایش و نوع دستگاه‌های به کار گرفته شده در آزمایش.
- ۹- نوع شکست نمونه شامل موقعیت و جهت‌گیری سطح شکست.
- ۱۰- سایر مشاهدات و داده‌های فیزیکی مانند گرانش ویژه نمونه، تخلخل، نفوذپذیری، با توضیح دقیق روش‌های اندازه‌گیری هر یک از آنها.
- ۱۱- مقاومت کششی هر یک از نمونه‌ها و مقاومت کلی اندازه‌گیری شده از مجموع آزمایشات. برای ارائه نتیجه مقاومت، دیمانسیون پاسکال (Pa) یا کیلوپاسکال (KPa) و یا مگاپاسکال (MPa) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آزمایش

برزیلی



عنوان: آزمایش برزیلی.

۱- هدف:

این آزمایش به منظور اندازه مقاومت کششی تک محوره نمونه سنگ به صورت غیر مستقیم گسترش یافته است. دلیل انجام آزمایش این واقعیت است که اغلب سنگ‌ها در میدان‌های تنش دو محوره در قالب تنش‌های کششی یک محوره گسیخته می‌شوند. این امر به صورت بارز در میدان‌های تنش که یکی از محورهای اصلی تنش به صورت کششی و سایر محورهای اصلی به گونه‌ای فشاری باشند که از سه برابر تنش کششی کمتر باشد، رخ می‌دهد.

۲- وسایل آزمایش:

- دستگاهی مناسب برای اعمال و اندازه‌گیری بار فشاری بر نمونه. دستگاه باید قابلیت اعمال فشار را با نرخ ثابت داشته باشد (شکل ۱).

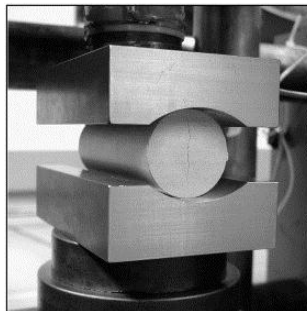
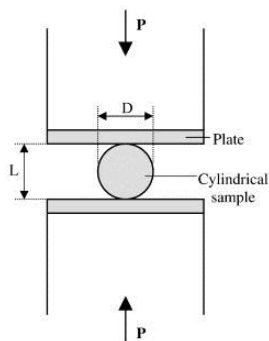


شکل ۱- نمونه ای از دستگاه اعمال بار فشاری در آزمایش برزیلی.

در این آزمایش برای اعمال بار به دو فک فولادی (شکل ۲) که بتواند نمونه دیسکی شکل را با زاویه تماس ۱۰ درجه به صورت قطری نگه دارد نیاز است. پارامترهای مهمی که در این رابطه می تواند در نتیجه آزمایش تأثیر گذار باشد عبارتند از:

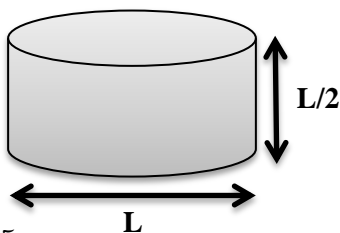
شعاع انحنا فک ها = (شعاع نمونه $\times 1/5$)، عرض فک ها (ضخامت نمونه $\times 1/1$).

طول پین های اتصالی بین فک ها: این پین ها باید به گونه ای باشد که فک ها بتوانند آزادانه در حدود ۲۵ میلیمتر به سمت یکدیگر حرکت کنند. اعمال فشار به فک بالایی توسط مفصل کروی (نیم کره) با قطر ۲۵ میلیمتر انجام می گیرد.



شکل ۲- فک های مورد استفاده در آزمایش برزیلی

- تعدادی نمونه قرصی شکل: طبق استاندارد حداکثر قطر نمونه ۵۴ mm و نسبت قطر به ضخامت نمونه بایستی حدوداً ۲ باشد (شکل ۳).



شکل ۳- ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش برزیلی

- پوشش چسبیده برای پوشاندن سطوح جانبی نمونه.
 - تکیه گاه کرووی برای اعمال بار بر فک بالایی. دو فک دستگاه باید کاملاً موازی با یکدیگر قرار داشته باشند.
- ترجیح داده می‌شود تجهیزاتی را به همراه دستگاه به کار برد که قادر باشد در لحظات بارگذاری کرنش را اندازه گیری کند و از این اندازه گیری‌ها بتوان نمودار بار-جابجایی را ترسیم کرد.

۳- تئوری آزمایش:

عموماً سنگ‌ها در برابر نیروهای وارده رفتارهای گوناگونی را از خود نشان می‌دهند. این رفتارها وابسته به جهت، مقدار و نوع نیروهای وارده، جنس سنگ‌ها و دیگر شرایط طبیعی متفاوت است.

بارگذاری نیرو بر سنگ در نهایت باعث گسیختگی آن می‌گردد. اگر تنش‌های وارده بر سنگ از نوع کششی باشند گسیختگی‌های کششی و اگر فشارشی باشند گسیختگی‌های مرتبط با فشارش در سنگ رخ می‌دهد. عموماً تحمل سنگ‌ها در برابر کشش نسبت به فشارش کمتر است و تحت بارگذاری کمتری نسبت به فشارش دچار گسیختگی می‌گردند. علت وقوع اکثر گسیختگی‌ها و ریزش‌ها در معادن و سایر حفاریات زیرزمینی ایجاد تنش کششی در آنها می‌باشد، که این موارد اهمیت شناخت مکانیزم گسیختگی کششی و نحوه تحلیل و مقابله با آنها را آشکار می‌سازد.

مقاومت کششی عبارتست از حداکثر تنش کششی که یک ماده قادر است تحمل نماید تا به مرحله گسیختگی برسد. به طور کلی آگاهی از مقاومت کششی سنگ‌ها یکی از پیش فرض‌های مهم موفقیت در طراحی معادن، تونل‌ها، شیروانی‌ها و کنترل موثر لایه‌ها و طبقات زمین می‌باشد. این آگاهی مقدمه مطالعه پیرامن اصول شکست و ناپایداری در حفاریات زیرزمینی می‌باشد.

وابسته به امکانات موجود روش‌های مختلفی برای به دست آوردن مقاومت کششی سنگ توسعه یافته است که در زیر به دو نوع از آنها اشاره می‌کنیم:

۳-۱- آزمایش کششی غیرمستقیم:

با وجود تلاش‌های زیادی که در راستای اجرای دقیق آزمایش کشش مستقیم شده است، اما اساساً این آزمایش از نظر تکنیکی مشکل بوده و هزینه فراوانی دارد. به همین دلیل گرایش به سمت آزمایش‌های غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی بیشتر است. تا به حال روش‌های مختلفی برای تعیین مقاومت کششی سنگ به طور غیرمستقیم توسعه یافته است، که اساس همه آنها بر این اصل استوار است که اعمال یک نیروی فشاری در راستایی خاص باعث ایجاد نیروی کششی در جهت عمود بر آن می‌گردد. عمده روش‌های مختلف ارائه شده برای تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم عبارتند از:

- آزمایش خمشی
- آزمایش کشش هیدرولیکی
- آزمایش فشار قطری دیسک‌ها

از بین روش‌های غیرمستقیم، روش برزیلی یکی از روش‌های متداول و مرسوم آزمایشگاهی برای تعیین مقاومت کششی سنگ است. البته از روش‌های دیگر مانند آزمایش خمش سه نقطه‌ای و یا چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مکعبی، استوانه‌ای، همچنین فشار قطری استوانه‌ای، کره‌ای، آزمایش حلقوی و غیره استفاده می‌شود. آزمایش برزیلی بر این واقعیت تجربی استوار است که با اعمال فشار قطری به نمونه‌های استوانه‌ای سنگ، تنش کششی در امتداد عمود بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که این تنش از مقاومت کششی سنگ بیشتر

شود، نمونه دچار گسیختگی می گردد. در آزمایش برزیلی نمونه‌های دیسکی شکل با نسبت طول به قطر برابر با ۰/۷۵-۰/۵ در فک بار گذاری قرار می گیرند و بار اعمالی در لحظه گسیختگی نمونه ثبت می گردد و از طریق فرمول مربوطه مقاومت کششی محاسبه می شود.

۴- استاندارد دستگاه‌های تست برزیلی:

دستگاه‌های تست برزیلی وابسته به ظرفیت اعمال بار و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش به انواع زیر تقسیم

می شوند:

جدول ۱- استاندارد دستگاه تست برزیلی

Catalogue No.	Capacity in kN	Central Bore mm	Collapsed Height mm	Std. test rod
HR72.400	100	21	155	M20
HR72.405	150	21	170	M20
HR72.410	200	40	185	M39
HR72.415	600	52	430	M39
HR72.420	1200	52	365	M39

Adopters

HR72.450.1	Thread size M20LH
HR72.450.2	Thread size M25LH
HR72.450.3	Thread size M30LH
HR72.450.4	Thread size M32LH

۵- روند انجام آزمایش:

ابتدا نمونه‌هایی استوانه‌ای با نسبت قطر به ضخامت برابر با ۲ تهیه کرده و آنها را با آب می شویم. سطح جانبی استوانه باید فاقد هر نوع علامت و یا جسم اضافی باشد (هر نوع بی نظمی در سطوح جانبی نمونه باید ابعادی کمتر از ۰/۲۵ میلیمتر را داشته باشد). سطوح بالایی و پایینی باید کاملاً صاف و هموار باشند و حداکثر زاویه بین این دو سطح برابر با ۰/۲۵ درجه باشد. طبق استاندارد ISRM حداکثر قطر نمونه برابر با ۵۴ میلیمتر است و شعاع نمونه با ضخامت نمونه باید برابر باشد.

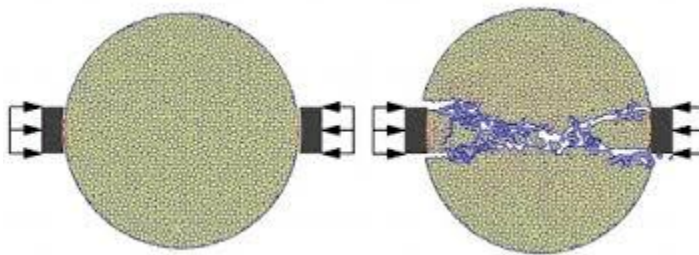
برای انجام آزمایش ابتدا میزان آب محتوی نمونه اندازه گیری می شود. سپس سطوح جانبی نمونه توسط لایه‌ای از مواد پوششی، پوشانده شده و نمونه به صورت جانبی و در راستای قطر میان جک‌های منحنی دستگاه قرار می گیرد. بایستی توجه کرد که اعمال بار به نمونه کاملاً قطری انجام گیرد (شکل ۶).



شکل ۶- نحوه اعمال بار در روش برزیلی

بارگذاری با یک نرخ ثابت (طبق استاندارد ISRM نرخی برابر با ۲۰۰ نیوتن بر ثانیه) بر نمونه اعمال می‌گردد. در آزمایش‌های استاندارد نمونه اغلب در بازه زمانی ۱۵-۳۰ ثانیه گسیخته می‌شود. چنانچه اندازه‌گیری بار و جابجایی به صورت مداوم انجام گیرد، مقاومت اولیه شکست با تغییر در روند صعودی منحنی خودش را نشان می‌دهد (اگر چه ممکنست در ادامه اعمال بار نمودار روند صعودی خود را تا گسیختگی نهایی حفظ کند). در غیر این صورت مقاومت سنگ در لحظه‌ای که دچار گسیختگی می‌شود با توقف کوتاهی در قرائت جابجایی بروز می‌یابد.

در آزمایش برزیلی نمونه‌های مورد آزمایش معمولاً به صورت قطری در راستای اعمال فشار دچار گسیختگی می‌شوند، بنابراین چنانچه آزمایش به درستی انجام گیرد باید انتظار چنین رفتاری را از سنگ داشت (شکل ۷).



شکل ۷- چگونگی شکست نمونه تحت بارگذاری در روش برزیلی

طبق استاندارد ISRM، تعداد نمونه‌های پیشنهادی برای انجام آزمایش حدود ۱۰ نمونه است. اغلب بالاترین و پایین‌ترین قرائت فیلتر و سایر قرائت‌ها در محاسبات شرکت می‌کنند.

۶- محاسبات آزمایش:

مقاومت کششی نمونه σ_t ، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_t = \frac{0.636 P}{D \times t} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

در رابطه فوق P بار در لحظه گسیختگی بر حسب نیوتن، D قطر نمونه بر حسب میلیمتر، t ضخامت نمونه در مرکز بر حسب میلیمتر و σ_t مقاومت کششی نمونه بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. بر اساس استانداردهای انجام آزمایش معمولاً با فرض جنس نمونه مشابه، بیشترین مقدار به عنوان داده خارج از ردیف یا پرت در نظر گرفته و حذف می‌گردد.

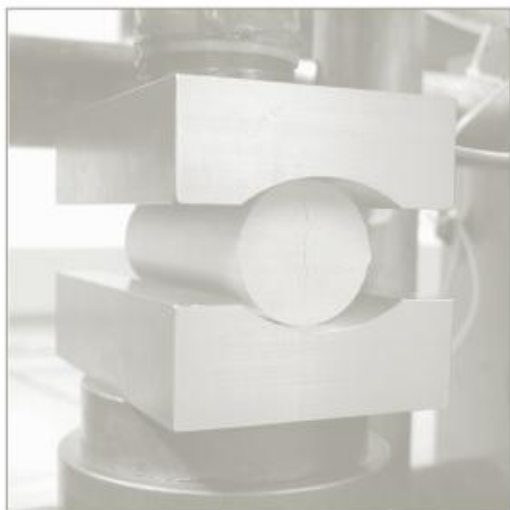
۷- بحث و نتیجه گیری:

در آزمایش برزیلی با بررسی الگوی شکست نمونه می‌توان از صحت انجام آزمایش اطمینان یافت. برای این منظور لازم است که سطح گسیختگی نمونه‌ها به صورت قطری در جهت اعمال بار باشد. در این آزمایش، پارامترهای مختلفی مانند نحوه اعمال بار (که باید کاملاً قطری به نمونه وارد شود)، زاویه تماس بین فک‌ها و نمونه، نرخ بارگذاری و حتی خطاهای انسانی و دستگاهی می‌تواند در نتایج به دست آمده دخیل باشند و آنها را از نتایج واقعی دور کند. بنابراین باید حتی الامکان بر اساس استانداردها این موارد را مد نظر قرار داد.

همانگونه که در تئوری آزمایش بیان شد نمونه باید توسط چسب مخصوص پوشانده و تحت بارگذاری قرار گیرد. عدم لحاظ این مورد نیز می‌تواند در ایجاد نتایج متفاوت نسبت به استاندارد های مربوطه موثر باشد. لازم است که برای مطالعه رفتار نمونه‌ها، نتایج به دست آمده از این آزمایش با سایر تست‌ها نظیر مقاومت تک محوری، سه محوری، بار نقطه‌ای و ... مقایسه شود.

آزمایش

اندازه‌گیری سرعت صوت



عنوان

اندازه گیری سرعت صوت.

۱- هدف:

در این آزمایش هدف، اندازه گیری سرعت انتشار امواج الاستیک در نمونه های آزمایشگاهی می باشد. در اینجا سه راهکار اساسی برای اندازه گیری این پارامتر گزارش می شود. این موارد شامل روش پالس اولتراسونیک فرکانس بالا، تکنیک پالس اولتراسونیک فرکانس پایین و روش رزونانت می باشد.

۲- وسایل مورد نیاز:

وسایل مورد نیاز در این آزمایش با توجه به سه الگوی آزمایش باید به گونه ای انتخاب شود که قابلیت توسعه سه روش را داشته باشد. در این سه روش، نمونه های مشابهی تحت آزمایش قرار می گیرد اما لازم است که فرکانس های مربوطه در هر یک از این روش ها به صورت دقیق پیاده گردد. امیدانس تجهیزات الکتریکی باید به گونه ای مطابق باشد که بازدهی انتقال انرژی تضمین گردد. به منظور جلوگیری از آسیب تجهیزات لازم است که ولتاژ ورودی از حد مجاز تجاوز نکند.

روش اول:

الف: واحد تولید پالس

نوع پالس: سینوسی، مربعی، پالس موج دارای گام

عرض پالس: ۱-۱۰ ثانیه

محدوده فرکانسی: ۱۰۰-۲ کیلوهرتز

فرکانس تکرار: ۱۰-۱۰۰۰ تکرار در ثانیه

ولتاژ پالس: وابسته به مبدل مورد استفاده، حداکثر ولتاژ مجاز

تولید کننده پالس باید قدرت ارسال پالس خروجی به دستگاه های نمایش دهنده سیگنال همچون

اسیلوسکوپ را داشته باشد.

ب: مبدل

فرستنده واحدی است که پالس الکتریکی را به پالس مکانیکی تبدیل می نماید.

گیرنده: واحدی است که پالس مکانیکی را به پالس الکتریکی تبدیل می نماید.

پاسخ فرکانسی: در صورت ممکن از ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز

شرایط محیطی نظیر درجه حرارت، رطوبت و فشار هوا در انتخاب واحد مبدل باید مورد بررسی قرار گیرد.

سرامیک های پیزوالکتریکی به شکل صفحه، دیسک، میله، حلقه و یا کره به منظور تولید پالس ها در محدوده

فرکانسی ۱۰۰ کیلو هرتز تا ۲ مگاهرتز پیشنهاد می شود. به صورت معمول لازم است از مبدل های پیزوالکتریکی

متفاوت برای انتشار و یا دریافت امواج فشاری و برشی استفاده گردد. پیشنهاد می شود دیسک های استوانه ای

(شعاع بزرگتر از ضخامت) با ضخامت یا صفحات قاعده فعال برای ارسال و دریافت امواج فشاری و از صفحات

برشی فعال در حالت برش، برای ارسال و دریافت امواج برشی استفاده گردد.

ج: فیلترهای پایین گذر یا بالاگذر متناسب با فرکانس هایی که در بالا به آنها اشاره شد.

د: پیش تقویت کننده (آمپلی فایر) دارای نویز کم و پهنای باند زیاد.

ه: تولید کننده های وابسته به زمان به منظور کنترل پالس تکرار و به منظور ارسال داده ها اسیلوسکوپ اشعه

کاتدی (CRO)

و: اسیلوسکوپ اشعه کاتدی (CRO): اسیلوسکوپ های دارای پرتو دو گانه پیشنهاد می شود.

حداکثر نرخ رفت و برگشت: ۰/۱ میکروثانیه بر سانتیمتر.
پهنای باند: لازم است که پاسخ هموار از d.c تا ۵ مگاهرتز و بالاتر داشته باشد.
ز: شمارنده الکتریکی با قابلیت اندازه گیری مطلوب بازه های زمانی.
دو الگوی کلی از اجزای الکتریکی در اشکال ذیل نمایش داده شده است.

روش دوم:

تکنیک پالس اولتراسونیک فرکانس پایین برای نمونه های نواری با بعد جانبی حداکثر ۱۰ سانتیمتر.

الف: واحد تولید کننده پالس (سیگنال ژنراتور)

محدوده فرکانسی: ۲-۳۰ کیلوهرتز (چنانچه ژنراتور بیان شده در روش اول دارای محدوده فرکانسی پایین باشد می تواند در اینجا مورد استفاده قرار گیرد.

فرکانس تکرار: ۱۰-۱۰۰ تکرار در ثانیه

ولتاژ پالس: همانند روش اول

ب: مبدل

۱- فرستنده: سرامیک پیزوالکتریک و یا عناصر مغناطیسی که قابلیت هدایت پالس های با دامنه بالا را داشته باشند (وابسته به نوع سنگ و ابعاد نمونه) در محدوده فرکانسی ۲-۳۰ کیلوهرتز.

۲- گیرنده: سرامیک پیزوالکتریک با پاسخ فرکانسی هموار در محدوده ۲-۳۰ کیلوهرتز و یا عناصر مغناطیسی

۳- فیلترها، امپلیفایرها، CRO و سنجنده های زمانی همانند روش اول با فرکانس پایین.

روش سوم:

الف: ژنراتور تولید کننده موج سینوسی (سیگنال ژنراتور) با محدوده فرکانسی ۱-۱۰۰ کیلوهرتز و ولتاژ پالس

مشابه با روش های اول و دوم

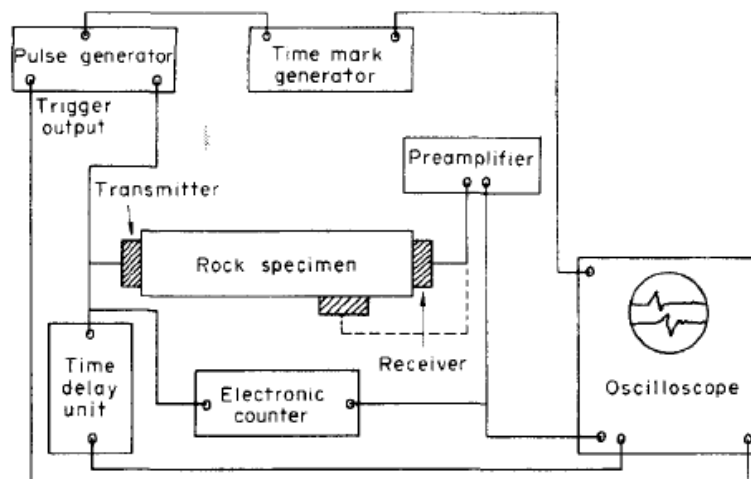
ب: مبدل

الف: فرستنده: سرامیک پیزوالکتریک و یا عناصر مغناطیسی با پاسخ فرکانسی هموار در محدوده ۱-۱۰۰ کیلوهرتز

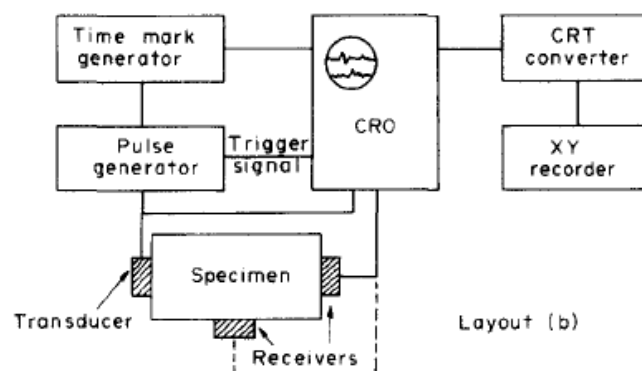
ب: گیرنده: سرامیک پیزوالکتریک همانند فرستنده یا سنجنده خازنی (همانند میکروفن) با پاسخ فرکانسی هموار در محدوده ۱-۱۰۰ کیلوهرتز (اولین فرکانس رزونانسی ممکن در هر حالت باید بزرگتر از ۱۰۰ کیلوهرتز باشد).

ج: آمپلی فایر CRO

الگوی اجزای الکتریکی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

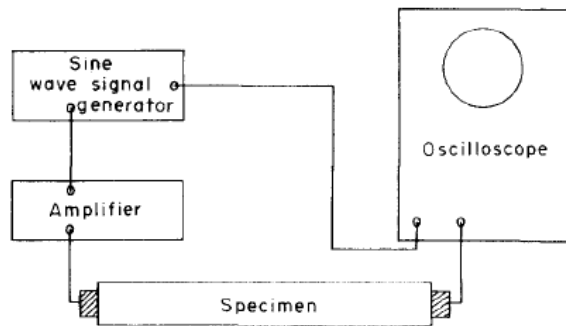


Layout (a)



Layout (b)

شکل ۱- دو الگوی کلی از اجزای الکتریکی به کار رفته در روش اول.



شکل ۲- الگوی اجزای الکتریکی در روش سوم.

۳- روش انجام آزمایش:

اولین نکته ای که در آزمایش سنجش سرعت صوت باید مد نظر قرار داده شود این است که لازم است مراحل مغزه گیری، برش، صیقل و به صورت کلی آماده سازی نمونه کاملاً دقیق به گونه ای انجام پذیرد که هیچ نقص مکانیکی در نمونه وجود نداشته باشد.

خشک کردن نمونه توسط دسیکاتور انجام می پذیرد. چنانچه آزمایشات در حالت اشباع انجام شود لازم است نمونه ها تا زمان آزمایش به صورت غوطه ور در آب باقی بمانند. چنانچه سرعت در شرایط برجا اندازه گیری شود، در آماده سازی نمونه تمهیدات لازم جهت حفظ شرایط محیطی برجا باید مد نظر قرار بگیرد. پیشنهاد می گردد کلوخه های صحرایی و نمونه های آزمایشگاهی آماده شده در جعبه های ایزوله به منظور حفظ رطوبت قرار داده شوند. در این حالت بسته به نتایج مورد نظر ممکن است قبل از آزمایش، نمونه خشک شود.

الف- روش اول:

این روش برای اندازه گیری سرعت های امواج فشاری (اتساعی، طولی، P) و برشی (چرخشی، عرضی، S) در نمونه های سنگی با طول قابل توجه نسبت به طول موج پالس ارسالی به کار گرفته می شود. شرایط طولی نامحدود در حالتی در این نمونه ها برقرار می شود که میانگین ابعاد دانه ها کمتر از طول موج پالس ورودی و پالس ورودی کمتر از حداقل بعد نمونه مورد آزمایش باشد. بلوک های مکعبی، مغزه های استوانه ای و یا حتی کروی (برای

تخمین شرایط تقارن الاستیک سنگ‌های انیزوتروپ) به عنوان نمونه‌های آزمایش پیشنهاد می‌شود. پیشنهاد می‌شود که کمترین بعد جانبی (عمود بر جهت انتشار موج) کمتر از ۱۰ برابر طول موج نباشد. فاصله حرکت و عبور پالس از نمونه سنگی لازم است که حداقل ۱۰ برابر میانگین ابعاد دانه‌ها باشد.

فرستنده بر روی مرکز صفحه عمود بر جهت انتشار موج با فشاری حدود ۱۰ نیوتن بر سانتیمتر مربع قرار داده می‌شود. انتقال انرژی میان مبدل‌ها و نمونه آزمایشگاهی با رعایت موارد زیر تضمین می‌شود:

- لمس کردن سطوح انتهایی نمونه برای اطمینان از هموار و صیقلی بودن آنها.

- استفاده از لایه نازکی از گریس، گلیسیرین، وازلین یا روغن در سطوح نمونه.

- اتصال مبدل‌ها به نمونه از طریق چسب اپوکسی یا سالیلات فنیل.

دو امکان برای نصب گیرنده وجود دارد:

الف: تکنیک انتقال پالس: گیرنده بر روی سطح روبروی سطحی که فرستنده قرار داده شده است قرار می‌گیرد. شکل (۳الف). سرعت‌های امواج S و P ، از طریق زمان عبور و فاصله میان این دو مبدل اندازه‌گیری تخمین زده می‌شود.

ب: تکنیک پروفایل لرزه‌ای: گیرنده در وجوه نمونه نصب می‌شود. (شکل ۳ب). با تغییر فاصله d میان فرستنده و گیرنده امکان ترسیم منحنی زمان عبور موج نسبت به فاصله d در رابطه با امواج S و P ایجاد می‌شود. سرعت‌ها بر اساس این منحنی‌ها محاسبه می‌شود. چنانچه ابعاد نمونه مناسب باشد روش اخیر پیشنهاد می‌شود.

با جایگذاری مبدل‌های آزمایش، ولتاژ خروجی ژنراتور پالس، حساسیت اسیلوسکوپ و ضرایب تقویت کننده بر روی مقادیر بهینه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که پالس‌های واضح تر رویت شود و اجازه انجام اندازه‌گیری دقیق وابسته به زمان فراهم گردد. سطوح بهینه باید به گونه‌ای باشد که اعوجاجات الکترومغناطیس را به حداقل برساند. سطح اعوجاجات نباید بیشتر از یک دهم دامنه پیک اول از سیگنال دریافتی گیرنده باشد. لازم است که دقت اندازه‌گیری زمان عبور با دقت یک به صد در رابطه با امواج فشاری و با دقت یک به پنجاه در رابطه با امواج برشی با افزایش حساسیت شمارنده گردد.

اسیلوسکوپ به صورت معمول به منظور نمایش پالس‌های مستقیم و زمان اولین پالس عبوری و همچنین برای اندازه‌گیری زمان‌های عبور با تأخیر دهنده‌های جریان به کار گرفته می‌شوند. اولین چیزی که در اسیلوسکوپ

رویت می‌شود، یک انتقال منحنی شکل از روندی افقی ولتاژ صفر تا روندی شیب دار تقریباً خطی است. به منظور اندازه‌گیری زمان صفر، اولین شکست آشکار انتخاب می‌شود. این انتخاب یا در ابتدای ناحیه انتقال منحنی شکل و یا در محل قطع شدن ولتاژ صفر بخش خطی منحنی اولین دریافت انجام می‌شود.

سنجش با اعمال پالس مستقیمی به فرستنده شروع و با رسیدن اولین پالس به گیرنده متوقف می‌شود. با توجه به اینکه برای سنجش، نیاز به تغییر ولتاژ وجود دارد، اولین قطع شدگی پالس به صورت دقیق مشخص نخواهد بود. به منظور ایجاد بیشترین دقت در اندازه‌گیری‌های بازه‌های زمانی، حساسیت سنجنده به بهینه‌ترین حالت به گونه‌ای افزایش داده می‌شود که اغتشاشات دریافت نگردد.

در این مرحله زمان صفر جریان با لحاظ اثر مبدل‌ها سنجنده‌های زمان عبور اندازه‌گیری می‌شود و اصلاحاتی بر روی آن انجام می‌پذیرد. این فاکتور برای سنگ مذکور و سطح تشی اعمالی در حالتی که خواص جریان ثابت باشد، تغییری نمی‌کند. برای اندازه‌گیری مراحل زیر دنبال می‌شود:

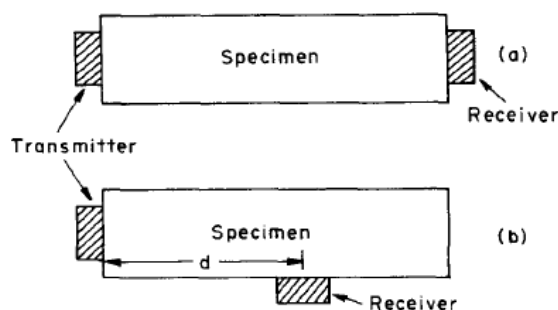
۱- مبدل‌ها را به نحو مناسبی بر روی یکدیگر قرار می‌دهیم و تأخیر مبدل‌ها را به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌کنیم.

۲- سرعت عبور موج از یک ماده همگن (مانند استیل) به صورت تابعی از طول اندازه‌گیری می‌شود و سپس با استفاده از محل تقاطع منحنی حاصل با محور طول برابر با صفر، فاکتور تصحیح محاسبه می‌شود. (این روش بخصوص برای امواج برشی پیشنهاد می‌شود).

از آنجایی که اولین موج دریافت شده از نوع طولی می‌باشد، تشخیص آن به صورت نسبی آسان است. رسیدن امواج برشی ممکن است به دلیل لرزه‌های مبدل‌ها و انعکاس امواج فشاری پنهان شود. با به کارگیری المان‌های ضخامتی مبدل برشی، دامنه امواج برشی، در برابر امواج فشاری ممکن است افزایش یابد و زمان دریافت آن با دقت بیشتری تخمین زده شود. این نوع از المان‌ها الگویی از انرژی فشاری را تولید می‌نمایند که بر اساس آن هر دو نوع موج قابل شناسایی خواهد بود. انتقال انرژی میان نمونه و هر یک از مبدل‌ها توسط لایه‌ای نازک از موادی نظیر گریس یا رزین و با اعمال فشار به آنها بهبود می‌یابد.

در رابطه با نمونه‌هایی که تحت تنش‌های تک محوری هستند، اولین دریافت پالس امواج فشاری معمولاً به خوبی انجام می‌شود. با این وجود، تخمین دقیق اولین پالس دریافتی از امواج برشی پیچیده می‌باشد.

تشخیص اولین پالس دریافتی امواج برشی به صورت ساده تر می تواند در نمونه هایی که طول آنها بهینه است انجام گردد. به عنوان مثال نسبت طول به عرض برابر با ۲ در برابر نسبت طول به عرض برابر با ۱ ترجیح داده می شود.



شکل ۳- قرار گیری فرستنده و گیرنده بر نمونه های آزمایش (روش اول)

ب- روش دوم:

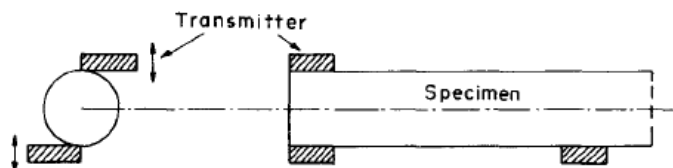
این روش به منظور تخمین سرعت امواج اتساعی و چرخشی در نمونه های میله ای سنگ به کار می رود. نمونه هایی برای این آزمایش مناسب است که طول آنها نسبت به قطرشان بزرگ باشد (طول به قطر بزرگتر از ۳) بعلاوه طول موج پالس به کار گرفته شده نیز باید نسبت به قطر نمونه بزرگ باشد (نسبت طول موج به قطر بزرگتر از ۵).

در رابطه با تکنیک انتقال پالس و تکنیک فرکانس رزونانسی هر دو سطح انتهایی نمونه باید صاف و صیقلی و با دقت $0.05/0$ mm نسبت به بعد جانبی موازی باشند. مغزه های سنگی در نگهدارنده نمونه دستگاه اکوستیک قرار داده می شود. این مغزه ها حداقل دارای نسبت طول به قطر بزرگتر از ۳ هستند. فرستنده موج سینوسی با طول موج بزرگتر از ۵ برابر قطر مغزه را بر روی صفحه عمود بر محور مغزه سنگی با فشاری حدود ۱۰ نیوتن بر سانتیمتر مربع برای اندازه گیری سرعت موج طولی ارسال می نمایند. در رابطه با اندازه گیری سرعت موج برشی، قرار گیری فرستنده بهتر است بر اساس شکل ۴ انجام پذیرد.

دو حالت ممکن برای قرار دادن گیرنده بر نمونه وجود دارد:

۱- انتقال پالس: گیرنده بر صفحه تخت روبروی مغزه قرار داده می‌شود. دو صفحه انتهایی لازم است در محدوده کمتر از یک درجه موازی باشند.

۲- پروفایل لرزه‌ای: گیرنده در طول سطح مغزه، موازی با محور آن حرکت داده می‌شود. بقیه روند همانند آنچه که در روش اول ارائه گردید می‌باشد.



شکل ۴- قرار گیری فرستنده و گیرنده در روش دوم.

ج- روش سوم:

با تخمین فرکانس رزونانس ارتعاشات اتساعی و چرخشی نمونه مغزه‌های استوانه‌ای دارای نسبت طول به قطر بزرگتر از ۳ (نسبت طول موج به قطع بزرگتر از ۶)، سرعت امواج اتساعی و چرخشی قابل تخمین است. ابعاد در این روش همانند آنچه که در روش قبل گفته شد می‌باشد. در رابطه با تکنیک انتشار پالس و تکنیک فرکانس رزونانتی هر دو صفحه انتهایی نمونه باید صاف و در محدوده 0.05 mm از ابعاد جانبی موازی باشند.

مغزه‌های سنگی با نسبت طول به قطر بیشتر از ۳ در قطعه نگهدارنده نمونه قرار داده می‌شود. لازم است هر دو صفحه انتهایی به میزان 10^{-3} میلیمتر صیقلی و تا میزان ۱ درجه موازی باشند. به منظور تخمین فرکانس رزونانت طولی، هر دو مبدل فرستنده و گیرنده در مرکز صفحات با فنرهای نرم (حداکثر بار ۱۰ نیوتن) قرار می‌گیرند تا شرایط مرز آزاد برای نمونه برقرار گردد (با توجه به هدف، گیرنده‌های خازنی پیشنهاد می‌گردد). تمهیدات لازم در جهت قرار دادن نمونه و لحاظ شرایط مرزهای آزاد باید در نظر گرفته شود.

فرکانس فرستنده برای دریافت قرائت حداکثر بر روی CRO تغییر می‌یابد. حداقل اولین الگوی فرکانس رزونانتی ثبت می‌شود.

برای تخمین فرکانس رزونانتی چرخشی، باید فرستنده به گونه‌ای نصب شود که لرزه‌های چرخشی را ایجاد نماید.

۴- محاسبات آزمایش:

در محاسبات این آزمایش، یک یا سه معادله ابعادی انتشار موج به کار برده می‌شود:

روش اول و دوم:

سرعت‌ها بر اساس زمان عبور موج و فاصله d میان فرستنده و گیرنده بر اساس معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$v_p = d \cdot t_p^{-1} \quad (1)$$

$$v_s = d \cdot t_s^{-1}$$

که در آن v_p بیانگر سرعت موج طولی، v_s سرعت موج برشی، t_p و t_s زمان‌هایی می‌باشند که به ترتیب امواج P و S از فاصله d عبور می‌نمایند.

اگر تکنیک پروفایل لرزه‌ای به کار رود سرعت‌ها از شیب نمودار زمان عبور نسبت به فاصله عبور محاسبه می‌شود.

روش سوم:

سرعت‌های موج نواری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_d = 2lf_0 \quad (2)$$

که در این رابطه، l طول نمونه و f_0 فرکانس رزونانسی مد صفر در حالت لرزه‌های اتساعی و چرخشی می‌باشد.

۵- نتایج آزمایش:

در نتایج آزمایش تعیین سرعت امواج صوتی لازم است موارد زیر مد نظر قرار داده شود. نوع سنگ، موقعیت نمونه گیری (مکان، زمان، شرایط زمین شناسی، عمق حفاری، ابعاد نمونه و هندسه نمونه).

روش نمونه گیری (انفجار، حفاری یا نمونه گیری سطحی).
توصیف سنگ شناسی، فابریک و میکرو کرک های موجود در نمونه.
آماده سازی نمونه (کیفیت مغزه ها، تعداد مغزه ها، جهت گیری مغزه ها با توجه به ساختارهای اصلی زمین شناسی منطقه).

توصیف نوع آزمون آزمایشگاهی توسعه یافته: اطلاعات منبع پالس الکتریکی، اطلاعات مبدل ها، اطلاعات مواد غشایی میان مبدل ها و سطوح نمونه، میدان تنش وارده بر نمونه.
تمامی خواص فیزیکی در دسترس نمونه.
داده های سرعت در شرایط نرمال (دمای اتاق، فشار اتمسفر و ...).
تکرار پذیری آزمایش.

تغییرپذیری سرعت در نمونه ها در شرایط ثابت آزمایش، سرعت میانگین، خطای میانگین و انحراف حداکثر در حالت پرو فایل لرزه ای نمودار زمان گذر-فاصله.
یک تصویر از CRO و یا نموداری از رکوردهای دستگاه.
تکنیک های به کار گرفته شده برای دریافت قرائت های زمان عبور.
داده های سرعت-تنش.

سرعت امواج طولی بر حسب متر بر ثانیه.
سرعت امواج برشی بر حسب متر بر ثانیه.
سرعت امواج نواری: اتساعی بر حسب متر بر ثانیه، چرخشی بر حسب متر بر ثانیه.
دانسیته بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب.
تنش بر حسب پاسکال.
ابعاد هندسی بر حسب میلی متر.

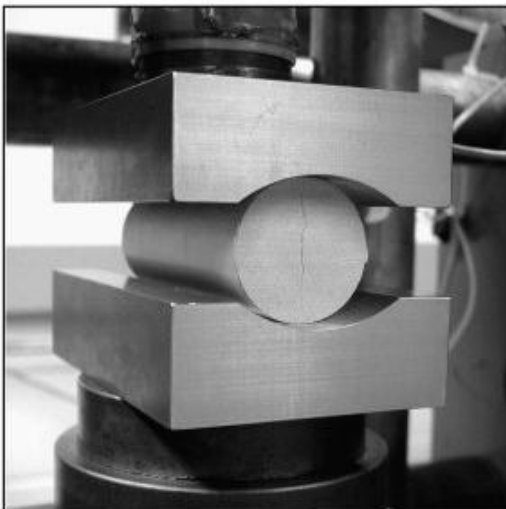
۶- بحث و بررسی:

در این آزمایش روش‌های تعیین مولفه‌های اصلی سرعت موج در نمونه‌های سنگی مورد بحث قرار گرفت. باید توجه کرد که بسیاری از سنگ‌های متخلخل، به آرامی هوازده شده‌اند و دارای میکرو ترک‌ها می‌باشند. این نمونه‌ها بسیار نسبت به نرخ تنش‌های اعمالی و شرایط اشباع محیط حساس هستند به گونه‌ای که اعمال شرایط دقیق تنش و درجه اشباع برجا در این آزمایشات با چالش‌هایی روبرو است.

آزمایش

آماده سازی نمونه

سنگ‌های آماسی



عنوان:

آزمایش آماده سازی نمونه سنگ‌های آماسی.

۱- هدف:

این آزمایش تکنیک‌هایی را شرح می‌دهد که برای نمونه‌گیری، نگهداری و آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز برای توسعه آزمون‌های آزمایشگاهی روی سنگ‌های آماسی مورد توجه قرار می‌گیرد. نمونه‌های آماسی به صورت ویژه شامل سنگ‌هایی است که شامل رس و یا آنیدریت می‌باشند.

۲- نمونه‌گیری:

برای ایجاد نتایج معنادار در آزمایشات نمونه‌های آماسی، لازمست شرایط دانسیته و آب محتوی برجای نمونه حفظ شود. بهتر است نمونه‌های سنگی از مغزه‌های حاصل از حفاری تهیه گردد. فرآیند مغزه‌گیری برجا بهتر است توسط فشار هوا و یا با به کارگیری مواد افزودنی ضد آماس در سیال خنک‌کننده انجام شود. دلیل این مسئله، حفظ شرایط طبیعی نمونه می‌باشد.

مغزه‌گیری باید توسط سرمت‌های دوجداره انجام شود. از نظر ابعادی، مغزه‌ها باید دارای حداقل قطر NX و ترجیحاً برابر با ۱۰۰ میلیمتر باشند. طول مغزه‌گیری باید به گونه‌ای انتخاب شود که حداقل تعداد سه نمونه آزمایشگاهی و چند نمونه به جهت تخمین سایر خواص فیزیکی از درون آن قابل استحصال باشد.

چنانچه نمونه‌گیری بلوکی انجام می‌شود، ابعاد نمونه کلوخه‌ای نیز باید در حدودی باشد که تعداد سه نمونه آزمایشگاهی و نمونه‌های لازم برای تعیین سایر خواص فیزیکی از درون آن قابل تولید باشد. مشخصات مغزه‌ها و بلوک‌های برداشت شده باید به صورت دقیق توسط مهندسان زمین‌شناس و با بهره‌گیری از تصویر برداری ثبت

شوند. در سنگ‌هایی که حاوی رس و مینرال‌های سولفات‌هسته (آندریت و ژپس)، فابریک و نرخ مینرال‌های رس - سولفات به عنوان مهمترین پارامتری که بر خواص آماسی سنگ تأثیر گذارند شناخته می‌شود. بعد از نمونه برداری برجا، لازمست لایه گلی که احتمالاً بر روی نمونه‌ها وجود دارد تمیز گردد. علاوه بر این شرایط آنها شامل شکستگی‌های مکانیکی، حضور لایه‌های گل بر روی سطوح مغزه و یا بلوک و همچنین حضور رگه‌های مواد رصد و گزارش شود. شکستگی‌های طبیعی در صورت حضور، باید به صورت دقیق شناسایی گردند. بعد از نمونه‌گیری برجا، نمونه‌ها توسط لایه غشاء ضد آب پوشانده می‌شود. پیشنهاد می‌شود از لایه‌های نازک پلاستیکی و بر روی آنها از ورقه‌های آلومینیومی اندود شده توسط ترکیبی شامل ۲۵٪ موم و ۷۵٪ پارافین استفاده شود. این فرآیند پوششی باید در کمترین زمان ممکن بعد از نمونه‌گیری برجا انجام گردد. مغزه‌ها و بلوک‌های پوشانده شده با اطلاعات دقیق موقعیت نمونه‌گیری، عمق، ارتفاع و ... برچسب گذاری می‌شوند. به منظور کاهش شکست مغزه‌ها و یا بلوک‌ها در طول فرآیند حمل و نقل از محل برداشت به آزمایشگاه، نمونه‌ها در محفظه‌هایی قرار داده می‌شوند که فضای بین آنها توسط اسفنج و یا سایر مواد ارتجاعی پر می‌شود. دمای نمونه باید در محدود ۳۰-۵ درجه سانتیگراد حفظ شود.

۳- نگهداری نمونه‌ها:

در رابطه با شرایط نگهداری نمونه‌های برداشت شده تا زمان انجام آزمایش باید به نکات زیر توجه کرد: زمان نگهداری به حداقل زمان ممکن کاهش یابد. نگهداری در دمای اتاق ثابت (۲۰ درجه سانتیگراد) انجام گردد. نمونه‌ها نباید در زیر نور مستقیم خورشید قرار گیرند. چنانچه به هر دلیلی نگهداری طولانی مدتی نیاز است، باید شرایط رطوبت در محل نگهداری نمونه به گونه‌ای تنظیم گردد که تغییرات رطوبت اولیه نمونه برداشت شده به حداقل ممکن برسد.

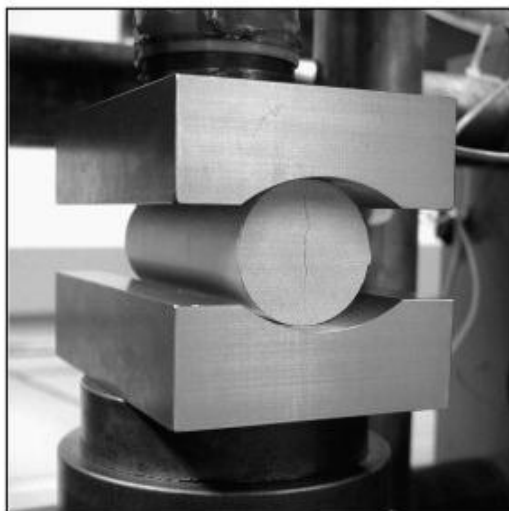
۴- آماده سازی نمونه:

در ابتدای فرآیند آماده‌سازی نمونه، لاگ‌ها و یا تصاویر تهیه شده در مرحله نمونه‌گیری به صورت دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد تا نمونه‌ای انتخاب شود که از نظر شکل، اندازه و ... ویژگی‌های لازم را داشته باشد. همه نمونه‌های آزمایشگاهی باید از یک نمونه صحرایی تهیه گردند. حداقل دو نمونه برای آزمایش و یک نمونه مرجع برای تعیین آب محتوی، دانسیته ذرات، دانسیته و درجه اشباع لازم است. تعداد دقیق نمونه‌های هر یک از این تست‌ها به میزان مواد در دسترس و شرایط آزمایش دارد. یک نمونه سالم باید برای انجام مطالعات مینرالوژیکی نگه داشته شود.

باید توجه شود که فرآیند آماده‌سازی نمونه کمترین زمان ممکن را به خود اختصاص دهد. چنانچه در آماده‌سازی به برش و یا مغزه‌گیری دوباره نیاز است، باید فرآیند خنک‌سازی دستگاهی توسط هوا و یا با به کارگیری مواد ضد آماسی (همانند آنتی سول) در آب خنک‌کننده انجام پذیرد. در این زمینه باید بهترین راهکاری که منجر به حفظ شرایط طبیعی نمونه شود، اتخاذ می‌شود. به صورت عمومی بهتر است که از مغزه‌گیری دوباره پرهیز شود.

نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایشات تعیین تنش‌های محوری آماسی، کرنش‌های محوری و شعاعی آماسی و تنش‌های آماسی به صورت تابعی از کرنش، که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد به شکل یک دیسک دایروی قائم تهیه می‌گردند. آزمایشات نشان می‌دهد در نمونه‌های با قطر ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر، ضخامتی میان ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر بهترین نتایج را ارائه می‌نماید. آزمایش تعیین کرنش محوری و شعاعی آماسی می‌تواند توسط نمونه‌های دیگری نیز تحت آزمایش قرار گیرد. به عنوان مثال نمونه‌های کلوخه‌ای نامنظم و بدون آماده‌سازی می‌تواند در این زمینه به کار گرفته شود ولی روند و تجهیزات آزمایش لازمست به صورت اقتباسی پیاده گردد.

آزمایش تعیین تنش‌های آماسی محوری

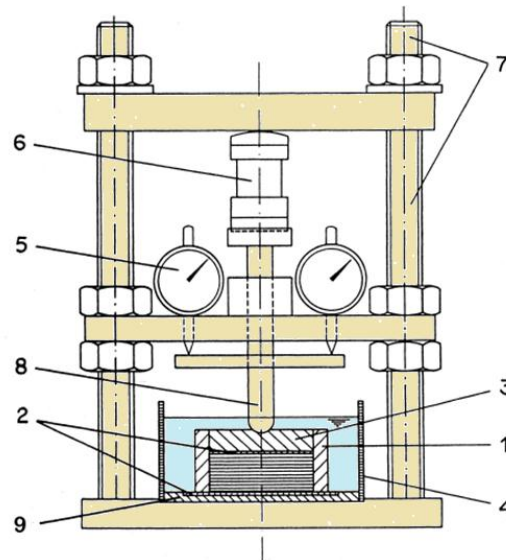


عنوان

آزمایش تعیین تنش‌های آماسی محوری.

۱- هدف:

در این آزمایش هدف اندازه‌گیری تنش‌های آماسی وابسته به زمان در نمونه‌های سنگی محصور شعاعی با غوطه‌ور شدن نمونه در آب است. در صورت ممکن حداکثر تنش آماسی اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱- دستگاه اندازه‌گیری تنش آماسی محوری، ۱- فولاد ضد زنگ، ۲- صفحات فلزی متخلخل، ۳- صفحه فولادی ضد زنگ بارگذاری، ۴- ظرف نمونه، ۵- گیج‌های اندازه‌گیری (متصل شده به انتهای ظرف نمونه)، ۶- دستگاه اندازه‌گیری بار، ۷- چارچوب صلب، ۸- پیستون بارگذاری، ۹- صفحه فولادی ضد زنگ

۲- دستگاه آزمایش:

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش بر اساس آنچه که در شکل (۱) نمایش داده شده است باید شامل موارد زیر باشد:

رینگ فولاد ضد زنگ (۱ در شکل ۱)، به منظور ایجاد صلیبیت شعاعی در نمونه. سطوح داخلی رینگ باید صاف و صیقلی باشد. ضخامت دیواره آن به سایر ابعاد آن وابسته است و باید بر اساس آنها و حداکثر تنش جانبی پیش بینی شده محاسبه شود. به صورت معمول ضخامت بین ۵ تا ۱۰ میلیمتر مقادیر مناسبی است. در این آزمایش لازمست که رینگ‌های متعددی در دسترس باشد تا بر اساس ابعاد نمونه، بهترین آنها انتخاب شود.

دو صفحه متخلخل (۲ در شکل ۱)، صفحات متخلخل باید توسط مواد با مدول‌های قابل توجه ساخته شده باشند. صفحات متخلخل فولاد ضد زنگ بهترین انتخاب برای این قطعات می‌باشد. به صورت نسبی، صفحاتی از فولاد ضد زنگ که درون آنها تعدادی حفره کوچک (با قطر ۰/۱ میلیمتر) ایجاد شده باشد، مناسب است. در این حالت، کانال‌های کوچکی که این حفرات کوچک را به منبع آب متصل می‌نماید باید تعبیه گردد. یک صفحه متخلخل برای قرارگیری روی نمونه و یک صفحه مشابه برای قرارگیری در کف نمونه مورد نیاز است. صفحه تحتانی ضخامتی در حدود ۵ میلیمتر بزرگتر از ضخامت خارجی رینگ نمونه دارد و صفحه بالایی به اندازه‌ای می‌باشد که به درون رینگ به صورت کامل منطبق است.

صفحه بارگذاری فولاد ضد زنگ (۳ در شکل ۱)، دارای قطر تحتانی برابر با قطر صفحه متخلخل فوقانی دارد، تا حدودی مخروطی شکل بوده و بر بالای صفحه متخلخل قرار داده می‌شود. ضخامت صفحه بارگذاری باید به اندازه کافی باشد تا بتوان کرنش را در آن برابر با صفر در نظر گرفت. در رابطه با نمونه‌های با قطر میان ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر، ضخامت برابر با ۱۰ میلیمتر کافی است.

ظرف نمونه (۴ در شکل ۱)، با قطر ۱۵ سانتیمتر برای جمع‌نمونه. اشباع‌سازی آن تا سطحی بیشتر از سطح نمونه.

دو گیج اندازه‌گیری کرنش (۵ در شکل ۱)، با دقت ۲/۵ میکرومتر برای اندازه‌گیری میزان آماس محوری و یا جابجایی فشاری نمونه. گیج‌ها به انتهای ظرف نمونه متصل می‌شود (۴).

دستگاه سنجش بار (۶ در شکل ۱)، سلول بار الکترومکانیکی با قابلیت اندازه‌گیری بار با دقت ۰/۵ چارچوب صلب (۷ در شکل ۱) با سیستم بارگذاری پیوسته.

پیستون بارگذاری (۸ در شکل ۱) با انتهای مدور برای قرارگیری بر روی صفحه بارگذاری.

۳- انجام آزمایش:

آزمایش باید در محیطی انجام پذیرد که بتوان در آن دما را در محدوده 20 ± 2 ثابت نگه داشت.

ضخامت h_0 نمونه که پیشتر در رابطه با مقدار آن بحث شد باید حداقل در سه قسمت از ابتدا تا انتهای نمونه با دقتی حدود $0.1 \pm$ اندازه گیری شود.

قطر نمونه d باید حداقل در سه قسمت در راستای قطر اندازه گیری شود. دقت اندازه گیری بهتر است $0.1 \pm$ باشد.

جرم نمونه M_1 باید با دقت 0.1 g اندازه گیری شود.

رینگ نمونه گیر باید کاملاً تمیز باشد و وزن آن M_0 اندازه گیری شود.

نمونه در درون رینگ قرار داده می شود به نحویکه نمونه کاملاً به رینگ بچسبد.

تجهیزات آزمایش بر روی یکدیگر بسته می شوند. رینگ حاوی نمونه بر روی صفحه متخلخل پایینی قرار دارد و صفحه متخلخل بالایی بر روی آن قرار می گیرد و صفحه بارگذاری بر روی این صفحه متخلخل نصب می شود. صفحه بارگذاری طوری قرار می گیرد که صفحه کوچکتر آن به سمت بالا باشد. پیستون در حالت تماس با صفحه بالایی قرار دارد.

بارگذاری محوری اولیه برابر ۲۵ کیلوپاسکال است. قرائت اولیه گیج های میکرومتر ثبت آنگاه محفظه نمونه توسط آب تا سطح صفحه متخلخل فوقانی پر و سپس توسط دیسک پلاستیکی به منظور به حداقل رساندن میزان تبخیر آب داخل محفظه پوشانده می شود.

نیروی محوری N و جابجایی محوری δ اندازه گیری و به صورت تابعی از زمان سپری شده ثبت می شود.

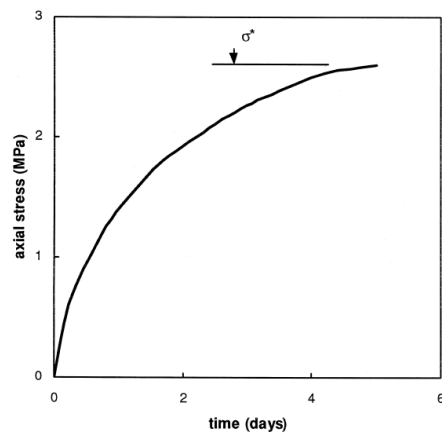
بر اساس شرایط مینرال های نمونه میزان اندکی از کرنش بر اساس روندی مرحله ای با افزایش نیروی محوری جبران می شود. این مراحل باید کوچکترین حالت ممکن باشد.

آزمایش تا زمانی ادامه می یابد که حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در نمونه قابل اندازه گیری باشد.

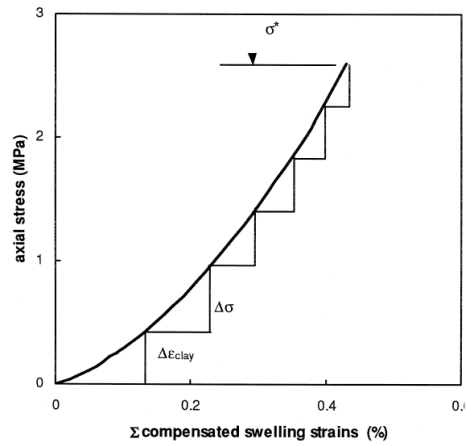
رینگ حاوی نمونه از درون محفظه خارج (بعد از خارج کردن آب و بارزدایی)، میزان آب جذب شده و وزن ثانویه M_2 اندازه گیری می شود. دقت شود که برای سنگ های به شدت آماسی، آب قبل از بارزدایی زهکشی شود. در مرحله فوق شرایط نمونه ثبت می شود.

چنانچه نمونه تست شده آرژیلیکی محض باشد (بدون ژپس)، نمونه حاوی رینگ تحت گرما قرار می گیرد تا تحت دمای 105 ± 2 درجه سانتیگراد به جرم ثابتی دست یابد. سپس این نمونه و رینگ در دسیکاتور خنک سپس وزن خشک M_3 تخمین زده می شود. به صورت نسبی نمونه بدون رینگ نیز می تواند تحت گرما قرار گیرد.

چنانچه نمونه تحت آزمایش حاوی کانی های رسی آنیدریت یا ژپس باشد، یک قسمت از نمونه برای تخمین میزان آب محتوی بعد از آزمایش مورد استفاده قرار می گیرد.



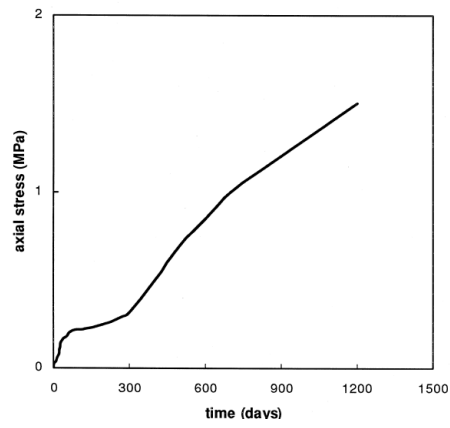
(الف)



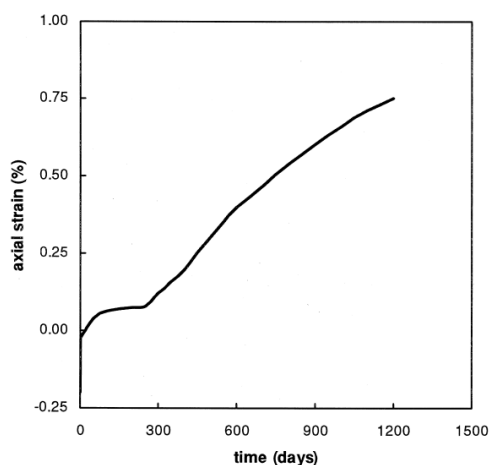
(ب)

شکل ۲- الف: پلات تنش محوری در برابر زمان در سنگ‌های آرزلیکی. σ^* : حداکثر تنش محوری

ب: پلات تنش محوری در برابر کرنش آماسی محوری جبران شده برای سنگ‌های آرزلیکی. σ^* : حداکثر تنش محوری.



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف: پلات تنش محوری در برابر زمان برای سنگ‌های رس - سولفات (آنیدریت).

ب: پلات کرنش آماسی محوری در اثر عدم جبران ارتفاع نمونه در برابر زمان برای سنگ‌های رس - سولفات (آنیدریت).

۴- محاسبات آزمایش:

در این آزمایش، پارامترهای زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرد: سطح مقطع نمونه A ، تنش محوری σ ، کرنش‌های جبران شده آماسی ϵ_{clay} و کرنش‌های غیر جبران شده ϵ_{gypsum} سطح مقطع نمونه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

که در آن d قطر نمونه می‌باشد. تنش محوری σ بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2)$$

N نیروی محوری اندازه‌گیری شده می‌باشد. میزان افزایش کرنش آماسی جبران شده $\Delta\epsilon_{clay}$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta\epsilon_{clay} = \frac{\Delta\delta_{clay}}{h_0} \quad (3)$$

در رابطه فوق $\Delta\delta_{clay}$ افزایش جابجایی ایجاد شده توسط آماس رس و h_0 ضخامت اصلی نمونه است.

افزایش کرنش آماسی غیر جبران شونده تبدیل آندیریت به ژپس $\Delta\varepsilon_{gypsum}$ عبارت خواهد بود از:

$$\Delta\varepsilon_{gypsum} = \frac{\Delta\delta_{gypsum}}{h_0} \quad (4)$$

در این رابطه $\Delta\delta_{gypsum}$ افزایش جابجایی ناشی از تبدیل آندیریت به ژپس و h_0 ضخامت اصلی نمونه می‌باشد.

دانسیته، آب محتوی اولیه و ثانویه و درجه اشباع بر اساس روندهای گزارش شده در آزمایشات مربوطه محاسبه می‌گردند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری:

آزمایش حاضر باید نتایج زیر را در رابطه با هر نمونه، مورد گزارش قرار دهد:

- ۱- توصیف منحصر به فردی از هر نمونه صحرایی و نمونه‌های آزمایشگاهی آماده شده.
- ۲- اطلاعاتی راجع به موقعیت جغرافیایی، لیتولوژی، فابریک و در صورت امکان، مینرالوژی و شیمی آب حفره‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی و صحرایی.
- ۳- زمان و روش نمونه برداری صحرایی.
- ۴- روش آب‌بندی و نگهداری نمونه‌ها.
- ۵- روش آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی.
- ۶- جهت‌گیری محور نمونه‌ها نسبت به جهت‌گیری آنیزوتروپی با نگرشی ویژه بر صفحات لایه‌بندی و جهات تنش‌های برجا.
- ۷- ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی.
- ۸- دانسیته، آب محتوی، دانسیته ذرات و درجه اشباع نمونه‌های آزمایشگاهی قبل از تست آماس.
- ۹- دانسیته نهایی، آب محتوی و درجه اشباع نمونه‌ها بعد از انجام تست آماس.
- ۱۰- دمای آزمایش.
- ۱۱- بارگذاری اعمالی.

۱۲- ویژگی‌های آب به کار گرفته شده.

۱۳- پلات تنش محوری در برابر زمان سپری شده همانند اشکال ۲ الف و ۳ الف.

۱۴- پلات کرنش آماسی محوری در برابر زمان سپری شده همانند شکل ۳ ب.

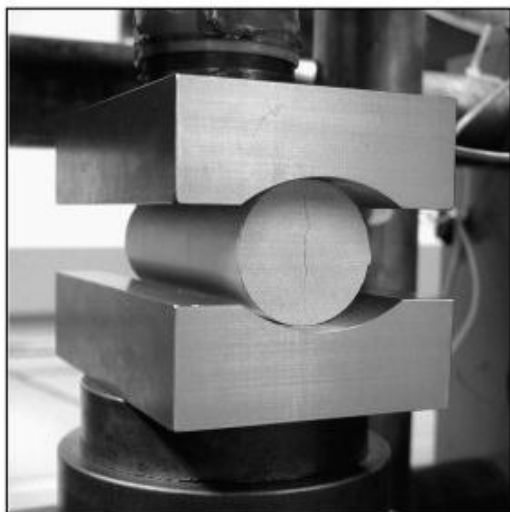
همچنین در رابطه با سنگ‌های آرژیلیکی باید موارد زیر را نیز در ارائه گزارش مد نظر قرار داد:

۱۵- پلات تنش محوری در برابر کرنش آماسی جبران شده همانند شکل ۲ ب.

۱۶- کرنش کل جبران شده آماسی.

آزمایش

تخمین کرنش آماسی محوری و شعاعی آزاد



عنوان:

آزمایش تخمین کرنش آماسی محوری و شعاعی آزاد.

۱- هدف:

در این آزمایش هدف اندازه‌گیری کرنش آماسی محوری و شعاعی آزاد در زمان‌بندی که نمونه‌های غیرمحصور در آب غوطه‌ورند.

۲- تجهیزات:

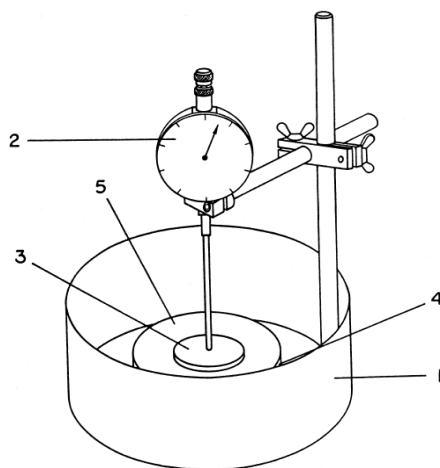
تجهیزات این آزمایش همانگونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است عبارتند از:
ظرف نمونه (به قطر ۱۵ سانتیمتر) (۱ در شکل ۱).

یک گیج میکرومتر با حساسیت ۲/۵ میکرون، که برای اندازه‌گیری جابجایی آماسی در محور مرکزی نمونه به کار گرفته می‌شود (۲ در شکل ۱).

صفحه شیشه‌ای که در محل اندازه‌گیری توسط گیج قرار داده می‌شود (۳ در شکل ۱).

باند فولاد ضد زنگ منعطف و نازک ۰/۱ میلی‌متر که به نمونه توسط باند لاستیکی متصل است. باند فولادی

در بازه‌های ۰/۱ میلی‌متر کالیبره می‌گردد و به منظور تخمین تغییر شکل پذیری آماسی شعاعی مورد استفاده قرار داده می‌شود (۴ در شکل ۱).



شکل ۱- تجهیزات اندازه‌گیری کرنش آماسی.

۱- محفظه نمونه ۲- گیج اندازه‌گیری ۳- صفحه شیشه‌ای ۴- باند فولادی ضد زنگ ۵- نمونه آزمایش

۳- انجام آزمایش:

آزمایش فوق باید در محیطی اجرا شود که بتوان دمای محیط را در 2 ± 20 درجه سانتیگراد ثابت نگه داشت. ضخامت h_0 نمونه‌ای که همانند آنچه در آزمایش تنش محوری آماسی گفته شد باید حداقل در سه موقعیت، در میان دو ابتدا و انتهای نمونه با دقت ± 0.1 ، همچنین قطر نمونه d_0 حداقل در سه موقعیت شعاعی با دقتی برابر ± 0.1 و نیز جرم نمونه M_1 با دقت 0.1 g اندازه‌گیری شود.

باند فولاد ضد زنگ متصل می‌گردد و نمونه و گیج درون محفظه قرار داده می‌شوند. محفظه آزمایش توسط آب تا سطحی بالاتر از نمونه پر، سپس توسط دیسک پلاستیکی به منظور به حداقل رساندن تبخیر پوشانده می‌شود.

جابجایی آماسی محوری δ_{ax} به عنوان تابعی از زمان سپری شده تا زمانی که حداکثر مقدار آن حاصل شود و بتوان اندازه‌گیری نمود، ثبت می‌شود.

بعد از تخمین کرنش آماسی و همچنین قبل از خروج نمونه از محفظه آزمایش، افزایش محیط ΔC توسط باند فولادی ضد زنگ اندازه‌گیری می‌شود.

در مرحله بعد نمونه از محفظه خارج، آب اضافه زدوده، باند استیل از روی نمونه جدا، و جرم M_2 تخمین زده می‌شود. در این مرحله شرایط نمونه بررسی و مجدداً ثبت می‌گردد.

چنانچه سنگ مورد آزمایش به صورت مطلق آرژیلیکی باشد، نمونه در آون تحت گرمای 2 ± 105 درجه سانتیگراد تا زمانی که جرم آن ثابت شود قرار داده می‌شود. سپس به این نمونه اجازه داده تا در دسیکاتور خنک و در انتها جرم خشک M_3 اندازه‌گیری می‌شود.

اگر نمونه سنگی حاوی رس و آئیدریت/ژیپس باشد، قسمتی از نمونه برای تخمین میزان آب حفره‌ای بعد از انجام آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴- محاسبات آزمایش:

کرنش آماسی محوری ε_{ax} و کرنش آماسی شعاعی ε_{rad} در این آزمایش تخمین زده می‌شود.

کرنش آماسی محوری توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\delta_{ax}}{h_0} \quad (1)$$

در اینجا δ_{ax} جابجایی محوری و h_0 ضخامت اولیه نمونه می‌باشد.

کرنش آماسی شعاعی را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد:

$$\varepsilon_{\text{rad}} = \frac{\delta_{\text{rad}}}{d_0} \quad (2)$$

d_0 قطر اولیه نمونه و :

$$\delta_{\text{rad}} = \frac{\Delta C}{\pi} \quad (3)$$

که در آن ΔC افزایش محیط نمونه‌ای است که توسط باند استیل اندازه‌گیری شده است. دانسیته، آب محتوی اولیه و نهایی و درجه اشباع بر اساس آزمون‌های مربوطه محاسبه و گزارش می‌شود.

۵- بحث و نتیجه‌گیری:

به منظور ارائه گزارش حاصل از انجام این آزمایش، باید موارد زیر در گزارش مد نظر قرار داده شود:

- ۱- توصیفی منحصر به فرد از نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده و نمونه‌های صحرایی به صورت مجزا.
- ۲- اطلاعاتی راجع به موقعیت جغرافیایی، لیتولوژی، فابریک، و در صورت امکان، مینرالوژی و شیمی آب حفره‌ای نمونه‌های صحرایی و آزمایشگاهی.
- ۳- تاریخ و روش نمونه برداری صحرایی.
- ۴- روش آب بندی و نگهداری نمونه.
- ۵- روش آماده سازی نمونه.
- ۶- جهت گیری محور نمونه وابسته به آنیزوتروپی نمونه به خصوص با نگرشی ویژه بر صفحات لایه بندی و جهات تنش‌های برجا.
- ۷- ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی.
- ۸- دانسیته آب محتوی، دانسیته ذرات و درجه اشباع نمونه قبل از توسعه تست آماس.

۹- دانسیته نهایی، آب محتوی و درجه اشباع نمونه بعد از توسعه تست آماس.

۱۰-دمای آزمایش.

۱۱-بار وارده بر نمونه.

۱۲-خواص آب به کار گرفته شده در آزمایش.

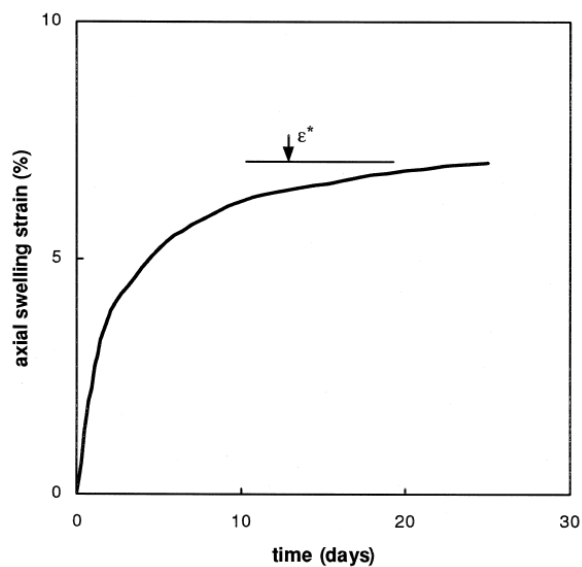
۱۳-پلات کرنش محوری در برابر زمان سپری شده همانند اشکال ۵ الف و ۵ ب.

۱۴-حداکثر کرنش آماسی محوری.

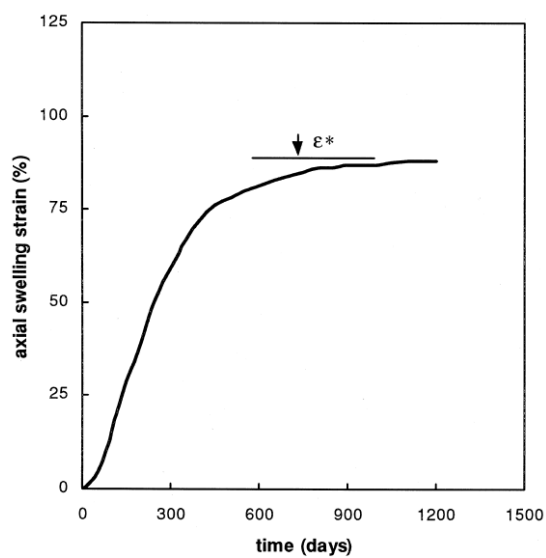
۱۵-حداکثر کرنش آماسی شعاعی.

۱۶-کرنش حجمی، محاسبه شده توسط کرنش آماسی شعاعی برای اشکال منظم نمونه و یا تخمین زده شده

به روش حجم سیال جابجا شده.



(الف)

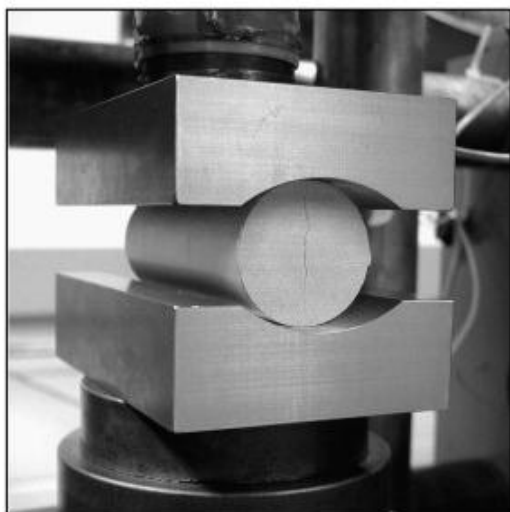


(ب)

شکل ۲- الف: کرنش آماسی محوری در برابر زمان (مثالی از نمونه‌های آرژیلیکی). ϵ^* = حداکثر کرنش محوری.
 ب: کرنش آماسی محوری در برابر زمان (مثالی از نمونه‌های رس - سولفات (آنیدریت)). ϵ^* = حداکثر کرنش محوری.

آزمایش

تخمین کرنش آماسی محوری وابسته به تنش آماسی محوری



عنوان:

آزمایش تخمین کرنش آماسی محوری وابسته به تنش آماسی محوری.

۱- هدف:

در این آزمایش هدف اندازه‌گیری کرنش آماسی محوری لازم برای کاهش تنش آماسی محوری در نمونه‌های محصور شده شعاعی نمونه‌های سنگی غوطه ور شده، از میزان حداکثر تا میزانی که در کاربردهای

خاص قابل قبول است. این آزمایش برای مطالعات تأثیر شرایط مرزی به کار می‌رود و فقط بر روی نمونه‌های کاملاً آرژیلیکی انجام می‌پذیرد.

۲- تجهیزات آزمایش:

تجهیزات این آزمایش مطابق با شکل ۱ عبارتند از:

رینگ فولاد ضد زنگ برای ایجاد محدودیت صلب به صورت شعاعی در اطراف نمونه (۱ در شکل ۱). سطح داخلی رینگ باید هموار و صیقلی باشد. ضخامت دیوارهای رینگ به سایر ابعاد آن وابسته است و باید بر اساس آنها و همچنین حداکثر تنش جانبی پیش‌بینی شده طراحی گردد. کرنش شعاعی بیشتر از $0/0001$ مجاز نخواهد بود. ضخامت میان ۵ و ۱۰ میلیمتر به صورت معمول قابل قبول است. رینگ‌های متعدد باید در دسترس باشد تا بهترین رینگ بر اساس ابعاد نمونه انتخاب شود.

دو صفحه متخلخل (۲ در شکل ۱). صفحات متخلخل باید از مواد با مدول‌های بالا ساخته شده باشند. صفحات فولاد ضد زنگ متخلخل بهترین گزینه برای این صفحات خواهد بود. به صورت نسبی، صفحات فولادی ضد زنگی که به صورت دستی درون آنها حفرات (با قطر $0/1$ میلیمتر) ایجاد شده باشند نیز مناسب است. در این حالت، کانال‌های کوچکی که این حفرات کوچک را به منبع آب متصل نماید لازم است.

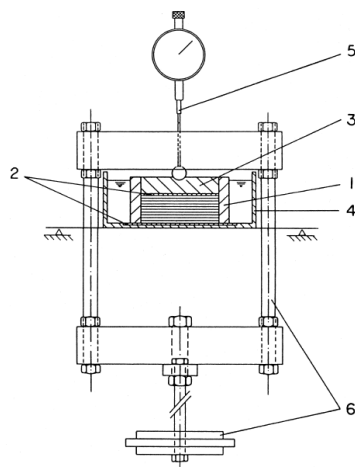
یک صفحه متخلخل برای قرارگیری بر بالای نمونه و یک صفحه مشابه برای قرارگیری در کف نمونه. صفحه تحتانی باید دارای قطری حدوداً ۵ میلیمتر بزرگتر از قطر خارجی رینگ نمونه باشد و همچنین صفحه بالایی باید دارای ابعادی باشد که فقط به درون رینگ تنظیم گردد.

صفحه بارگذاری فولاد ضد زنگ (۳ در شکل ۱). با قطری تحتانی مشابه با صفحه متخلخل بالایی و به شکل مخروطی که بر بالای صفحه متخلخل قرار می‌گیرد. صفحه بارگذاری باید ضخامت کافی را برای ایجاد شرایط صلب کرنش داشته باشد. برای نمونه‌های با قطر ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر یک صفحه با ضخامت ۱۰ میلیمتر کافی است. در وسط این صفحه زائده‌ای برای کره منتقل‌کننده بار وجود دارد.

ظرف نمونه (۴ در شکل ۱). با قطری ۱۵ سانتیمتری جهت قرار دادن نمونه در آن و غوطه‌ور سازی نمونه تا سطحی بالاتر از سطح فوقانی نمونه.

گیج میکرومتر (۵ در شکل ۱). حساسیتی برابر با ۲/۵ میکرون دارد که به پایین ظرف متصل شده و برای اندازه گیری فشارش و آماس در محور مرکزی نمونه به کار می رود.

چارچوب بارگذاری (۶ در شکل ۱). با شرایط مناسب برای اعمال بار فزاینده تا میزان نهایی ۱۰ کیلونیوتن. بارگذاری مستقیم یا غیر مستقیم با به کارگیری اهرم‌های بارگذاری قابل اعمال است. چارچوب بارگذاری، بار را به بالای صفحه فولادی از طریق یک کره صیقلی دارای قطر ۲ سانتیمتر منتقل می نماید.



شکل ۱- تجهیزات لازم برای اندازه گیری تنش آماسی محوری به صورت تابعی از کرنش آماسی محوری.
 ۱- رینگ فولاد ضد زنگ ۲- صفحات فلزی متخلخل ۳- صفحات بارگذاری فولادی ضد زنگ ۴- ظرف نمونه
 ۵- گیج اندازه گیری (متصل شده به پایین محفظه نمونه) ۶- چارچوب بارگذاری

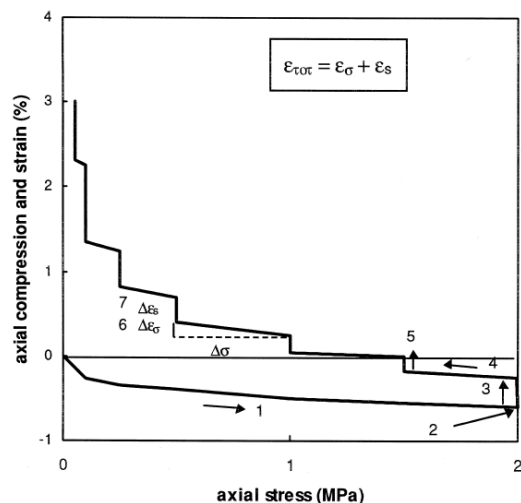
۳- انجام آزمایش:

آزمایش مذکور باید در محیطی انجام پذیرد که دمای آنرا بتوان در 20 ± 2 سانتیگراد ثابت نگه داشت. ضخامت h_0 نمونه آماده سازی شده باید حداقل در سه موقعیت مکانی در حد فاصل دو سر نمونه با دقت ± 0.1 ، قطر نمونه d حداقل در سه موقعیت شعاعی با دقتی بیش از $0.1 \pm$ همچنین جرم نمونه M_1 با دقت g 0.1 اندازه گیری شود.

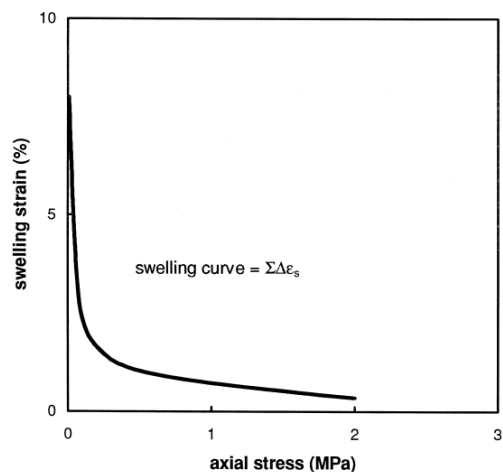
ابتدا رینگ نمونه گیری (M_0) تمیز می گردد و سپس وزن آن اندازه گیری می شود. نمونه را داخل رینگ قرار داده، تجهیزات آزمایش نصب می گردد. رینگ حاوی نمونه بر صفحه متخلخل پایینی قرار داده می شود و بر روی آن صفحه متخلخل بالایی، کره منتقل کننده بار و صفحه بارگذاری قرار داده می شود. نمونه بر اساس روندی پله ای بارگذاری می شود تا با اعمالی تنش محوری دلخواه σ را ایجاد نماید. در این زمینه میزان باری که

معادل با بارهای اعمالی از طرف روباره نمونه برجا باشد کفایت می کند. در این حالت بار و فشردگی نهایی نمونه ثبت می شود (منحنی ۱ از شکل ۲).

محفظه آزمایش تا سطح صفحه متخلخل بالایی از آب پر و میزان آماس اولیه ثبت می شود (قسمت منحنی ۳ از شکل ۲).



شکل ۲- تنش محوری در برابر کرنش کل محوری ۱: منحنی فشردگی بدون تأمین آب ۲: تأمین آب در سطح تنش σ_A (در این آزمایش برابر با ۲ مگاپاسکال) ۳: آماس در سطح تنش σ_A ۴: بار زدایی تا σ_B (در این آزمایش برابر با ۱/۵ مگاپاسکال) ۵: آماس در سطح تنش σ_B ۶: کرنش تغییر شکل ماتریس $\Delta \varepsilon_\sigma$ ۷: کرنش آماسی $\Delta \varepsilon_s$.



شکل ۳- تنش محوری در برابر کرنش آماسی

بار محوری با یک روند کاهشی منظم، زدوده می‌شود. معمول است که بار را در هر مرحله به میزان ۵۰٪ کاهش داد. با این وجود، مقادیر دیگر نیز ممکن است مد نظر قرار داده شود. میزان انبساط آماسی در هر کاهش بار تا زمانی که با کاهش بار هیچ جابجایی رویت نشود اندازه‌گیری می‌شود. کاهش بار و این اندازه‌گیری تا باری که تنش ۲۵ کیلوپاسکال را ایجاد می‌نماید ادامه می‌یابد. در این حالت بارزدایی کامل پیشنهاد نمی‌شود چرا که ممکن است منجر به برآمدگی و بالازدگی‌هایی گردد که توسط آماس به وجود نیامده‌اند.

رینگ و نمونه داخل آن در مرحله بعد، از داخل محفظه آزمایش خارج می‌شوند (بعد از خارج کردن آب و بارزدایی). میزان آب اضافی زدوده می‌شود و وزن M_2 اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. برای سنگ‌های به شدت آماسی، خارج کردن آب محفظه قبل از بارزدایی انجام می‌پذیرد. در این مرحله شرایط نمونه ثبت می‌شود. نمونه و رینگ در آون تحت دمای 105 ± 2 گرم و خشک می‌شوند تا به وزن ثابتی دست یابند. بعد از خشک شدن نمونه و رینگ در دسیکاتور وزن خشک شده M_3 تخمین و ثبت می‌شود. نمونه بدون رینگ نیز می‌تواند تحت فرآیند خشک‌سازی قرار گیرد.

۴- محاسبات آزمایش:

در این آزمایش پارامترهای سطح مقطع نمونه A ، تنش محوری σ ، کرنش محوری تغییرشکل ماتریس $\Delta \varepsilon_\sigma$ و کرنش آماسی محوری $\Delta \varepsilon_s$ مورد محاسبه قرار می‌گیرند. سطح مقطع نمونه با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

که در آن d قطر نمونه می‌باشد. بعلاوه تنش محوری σ به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2)$$

کرنش تغییرشکل ماتریس $\Delta \varepsilon_\sigma$ که با افزایش تنش محوری متناسب است از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta \varepsilon_{\sigma} = \frac{\delta_{\sigma}}{h_0} \quad (3)$$

در این رابطه δ_{σ} جابجایی محوری لحظه‌ای ناشی از تغییر شکل ماتریس به ازای افزایش $\Delta \sigma$ بوده و در این رابطه h_0 ضخامت اصلی نمونه می‌باشد.

دانسیته، آب محتوی اولیه و نهایی و درجه اشباع بر اساس آزمایشات مربوطه مورد محاسبه قرار داده می‌شوند.

۵- نتایج آزمایش:

نتایج این آزمایش باید به ازای هر نمونه موارد زیر را گزارش نماید:

- ۱- توصیفی واحد از نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های برجا.
- ۲- اطلاعاتی راجع به موقعیت جغرافیایی نمونه‌گیری، لیتولوژی، فابریک و در صورت ممکن مینرالوژی و شیمی آب حفره‌ای نمونه آزمایشگاهی و برجا.
- ۳- تاریخ و روش انجام آزمایش.
- ۴- روش آب بندی و نگهداری نمونه.
- ۵- روش آماده سازی نمونه‌های آزمایشگاهی.
- ۶- جهت گیری محور نمونه با توجه به آنیزوتروپی نمونه و به صورت ویژه با توجه به لایه بندی و جهات تنش برجا.
- ۷- ابعاد نمونه تحت آزمایش.
- ۸- دانسیته، دانسیته نهایی آب محتوی، دانسیته ذرات و درجه اشباع نمونه قبل و بعد انجام آزمایش آماس.
- ۹- دمای آزمایش.
- ۱۰- خواص آب به کار رفته در آزمایش.
- ۱۱- پلات تنش محوری در برابر کرنش محوری کل مشابه با شکل ۲. این پلات باید تشخیصی میان $\Delta \varepsilon_{\sigma}$ (۶ در شکل ۲) که کرنش لحظه‌ای را به صورت مستقیم با کاهش تنش محوری از طریق تغییر شکل

ماتریس مرتبط می نماید و $\Delta\varepsilon_s$ (۷ در شکل ۲) که کرنش آماسی ایجاد شده توسط جذب آب است ایجاد نماید. بنابراین کرنش کل به ازای تنش مشخص برابر است با:

$$\Delta\varepsilon_{\text{tot}} = \Delta\varepsilon_{\sigma} + \Delta\varepsilon_s$$

۱۲- پلات کرنش آماسی در برابر تنش محوری همانند آنچه در شکل ۳ آمده است. این نمودار از پلات مقادیر کرنش آماسی $\Delta\varepsilon_s$ در برابر کاهش تنش مربوطه ترسیم می گردد. نمودار حاصل می تواند برای تخمین پتانسیل کرنش آماسی که باید در طراحی ها مد نظر قرار گیرد به کار رود.

۶- پیشنهادات:

روش ارائه شده در این آزمایش ها نسبتاً ساده بوده و باید به صورت گسترده در مطالعات مد نظر قرار داده شود.

لازمست روند آزمایش مذکور در پیشرفت های آینده بهبود یابد. به خصوص پیشنهاد می شود پارامترهای آماسی به صورت سه بعدی تخمین زده شوند.

در حال حاضر، حداکثر تنش آماسی که در طول فرآیند تبدیل آنیدریت به ژپس تولید می شود مشخص نمی باشد. تنش های آماسی تا ۸ مگاپاسکال تاکنون از آزمون های مختلف آزمایشگاهی گزارش شده است.

مراجع

- ۱- فهیمی فر، الف. و سروش، ح. (۱۳۸۰): آزمایش های مکانیک سنگ. مبانی نظری و استانداردها- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران.
 - ۲- فاروق حسینی، م.، گنجی، س. و فولادچی. (۱۳۸۵): مقایسه تأثیر نسبت ابعاد نمونه و فشار جانبی بر مقاومت فشاری تک محوره و سه محوری سنگ. نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۱، صفحه ۴۷-۵۴.
 - ۳- سینگ، ب. و گوپیل، ر.ک. (۱۳۸۲): رده بندی توده سنگ روش کاربردی در مهندسی عمران. ترجمه اجل لوئیان. انتشارات فن آوران. صفحه: ۱۸۷-۱۹۷.
 - ۴- وفائیان، م. (۱۳۷۶): خواص مهندسی سنگ ها تئوری ها و کاربردهای اجرایی. انتشارات ارکان اصفهان.
 - ۵- مستوفی نژاد، د.، حسینیان، س. م. (۱۳۸۴): ارایه روابط تجربی جهت بررسی اثرات یخ زدگی بتن معمولی، نشریه امیرکبیر، تابستان و پائیز ۱۳۸۴، دوره ۱۶، شماره ج- ۶۲، صفحه ۱۱۷-۱۲۸.
1. E.T.Brown (Ed.). (1981). Rock characterization testing & monitoring ISRM suggested methods. Pergamon Press. Pp:125-137.
 2. T. Gentzis, N. Deisman, R. J. Chalaturnyk. (2006). Geomechanical properties and permeability of coals from the Foothills and Mountain regions of western Canada. International Journal of Coal Geology 69 (2007) 153-164.
 3. H. Li, Y. Zhu, J. Zhangc, C. Lin. (2004). Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay. Cold Regions Science and Technology 39 (2004) 39- 45.
 4. C. Derek Martin. (2001). Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository. Based on experiences from Äspö HRL, AECL's URL, tunneling and mining.
 5. Brazilian test apparatus. www.sciencedirect.com
 6. Aydin A, Basu A. The Schmidt hammer in rock material characterization. Eng Geol. 2005; 81:1-14.
 7. Aydin A .ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. Int J of Rock Mech & Min Sci. 2008.
 8. Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock mechanics, 1977; 10: 1-54.
 9. Torabi SR, Ataei M, Javanshir M. Application of Schmidt rebound number for estimating rock strength under specific geological conditions. JME. 2010; 2: 1-8.
 10. G. Grasselli, P. Egger. (2002). Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) Pp 25-40.
 11. S.W. Lee, E.S. Hong, S. Bae, I.M. Lee. (2006) Modelling of rock joint shear strength using surface roughness parameter, Rs. Tunnelling and Underground Space Technology 21 (2006) Pp 239.

12. Ganesh P. Dhakal, Junichi Kodama, Tatsuhiko Goto . Freezing-Thawing effect and Slake Durability of some Argillaceous Clastic Rocks.
13. Einstein, H. "Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks." *Intl J of Rock Mech & Mining Sci & Geomechanic Abs* 26.5 (1989).
14. Franklin, J. A. "A ring swell test for measuring swelling and shrinkage characteristics of rock." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 21. No. 3. Pergamon, 1984.
15. Franklin, J. A., and R. Chandra. "The slake-durability test." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 9. No. 3. Pergamon, 1972.