دانشگاه شهید باهنر کرمان
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی معدن

دستورالعمل آزمایشگاه مکانیک سنگ

گردآورندگان:

مهندس حمید رضا محمدی

دکتر حمید منصوری

نیمسال اول تحصیلی ۹۰ - ۸۹

فهرست

عنوان شماره صفحه

مقدمه ۲

۱- آماده سازی نمونه‌های استوانه‌ای ۳

۲- آزمایش تعیین خواص فیزیکی سنگ ۵

۳- آزمایش تعیین شاخص پوکی ۱۵

۴- آزمایش تعیین شاخص دوام وارفتگی ۱۷

۵- آزمایش تعیین سرعت صوت و ثابت‌های الاستیک دینامیکی ۲۰

۶- آزمایش تعیین سختی اشمیت ۲۴

۷- آزمایش بار نقطه ای ۲۹

۸- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ۳۶

۹- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته ۴۰

۱۰- مقاومت فشاری سه محوره ۴۴

۱۱- آزمایش تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم(روش برزیلی) ۴۸

۱۲- آزمایش مقاومت برشی مستقیم ۵۱

۱۳- آزمایش تعیین نفوذپذیری ۵۸

مقدمه

علم مکانیک سنگ در مقایسه با علوم مهندسی مشابه مانند مکانیک خاک، علم بسیار جوانی است. اگرچه فعالیتهای عمرانی و معدنی از زمانهای بسیار دور با سنگ سر و کار داشته اند، اما دانش مهندسی در این زمینه و در مقایسه با سایر رشته های مهندسی، تا سالهای اخیر نیز نظام مند و دارای سازمانی منسجم نبوده است. این وضعیت تا چند دهه قبل ادامه داشت و بعد از آن تلاش شد زبان مشترکی بین کلیه مهندسین و محققینی که با علم مهندسی مکانیک سنگ در ارتباط هستند برقرار شود و موضوعات مختلفی که با این رشته مرتبط می باشند، به صورت منسجم و تحت نظامی واحد تدوین و ارائه شوند.

اولین و مهمترین نیازی که در این زمینه احساس گردید، ایجاد هماهنگی در ارزیابی ویژگیهای مهندسی سنگ بود. این نیاز باعث شد تا در اولین کنگره بین المللی مکانیک سنگ کمیته ای با هدف استاندارد کردن آزمونهای آزمایشگاهی و صحرایی تشکیل گردد. حاصل کار این کمیته منجر به چاپ کتاب "روشهای پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ برای آزمایش و رفتارسنجی سنگها" در سال ۱۹۸۱ میلادی گردید. از آن پس این روند همچنان ادامه داشت و روشهای تعیین بسیاری از خواص فیزیکی و مکانیکی سنگها در قالب آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی به صورت استاندارد در آمد. جزوه حاضر دستورالعمل پرکاربردترین آزمایشات آرمایشگاهی می باشد.

۱- آماده سازی نمونه‌های استوانه‌ای

۱-۱- هدف: سنگ یکی از مصالح مهندسی پیچیده‌ای است که با توجه به محیط تشکیل اولیه، تنشهای وارده در طول زمان، فرایند هوازدگی وسایر فرآیندهای زمین‌شناسی از تنوع بسیاری برخوردار است. گرفتن نمونه استوانه‌ای معرف از یک سنگ با رعایت کلیه نکات استاندارد همیشه امکانپذیر نیست، به خصوص در مورد سنگ‌های ضعیف، متخلخل، سنگ‌های سیمان شده سست و سنگ‌هایی که دارای عوارض ساختاری ویژه‌ای هستند. در مورد این گونه سنگ‌ها باید حداکثر دقت انجام گیرد تا نمونه، مطابق با استاندارد تهیه شود. در صورتی که با وجود دقت زیاد گرفتن نمونه مطابق با استاندارد غیرممکن باشد، موارد قابل اجرای استاندارد به طور کامل اجرا شده و عدم اجرای سایر موارد در گزارش قید می‌گردد.

نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش‌های زیر باید با مشخصات آن استاندارد مطابقت داشته باشد.

- آزمایش مقاومت کششی مستقیم نمونه‌های مغزه‌ای سنگ بکر

- آزمایش مقاومت فشاری سه محوره

- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ای مغزه‌ای سنگ بکر

- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر در فشار تک محوری

- آزمایش تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مغزه‌ای سنگ بکر

- آزمایش خزش سه محوری و تک محوری نمونه‌های استوانه‌ای سنگ نرم و سخت.

در جدول (۱-۱) انواع مغزه گیرهای استاندارد و قطر نمونه مغزه‌گیری شده آورده شده است.

۱-۲- مشخصات نمونه‌های آزمایشی

نمونه‌های آزمایشی استوانه‌هایی با مقطع دایره بوده که سر و ته آنها توسط اره فولادی یا الماسه بریده شده و تولرانس ناصافی سطوح آنها حداکثر به میزانی باشد که در این استاندارد پیشنهاد شده است. نسبت طول به قطر نمونه‌ها مطابق با پیشنهاد استاندارد مورد استفاده برای آزمایش می‌باشد. قابل ذکر است که حداقل قطر مغزه‌های مورد آزمایش ۴۷ میلیمتر می‌باشد. در سنگ‌های دانه‌ای، این قطر باید حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه سنگ بوده و در سنگ‌های سست که رفتاری شبیه خاک دارند (مثل ماسه سنگ با سیمان شدگی ضعیف) قطر مغزه باید حداقل ۶ برابر قطر بزرگترین دانه باشد. چنان چه آزمایش بنا به دلایلی روی مغزه‌ای با قطر کمتر انجام گرفت باید در گزارش قید گردد.

جدول ۱-۱- انواع مغزه‌گیرها و قطر استاندارد مغزه‌ها

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

سطح جانبی نمونه باید صاف و عاری از هر گونه ناهمواری شدید بوده و حداکثر ناهمواری در طول نمونه ۰/۵ میلیمتر باشد. جهت تعیین صافی سطح جانبی نمونه، نمونه استوانه‌ای روی یک سطح صاف که دارای زبری بیش از ۱۳ میکرون نمی‌باشد دوران داده می‌شود و حداکثر فاصله بین نمونه و سطح صاف توسط یک گیج حساس اندازه‌گیری می‌شود. چنان چه حداکثر مقدار اندازه‌گیری شده کمتر از ۰/۵ میلیمتر باشد، نمونه از نظر صافی سطح جانبی مناسب است.

سطوح انتهایی مغزه‌های استوانه‌ای باید کاملا با یکدیگر موازی و عمود بر محور مرکزی مغزه باشند. این سطوح نباید ناصافی بیش از ۲۵ میکرون داشته باشند. قابل ذکر است که بهترین روش برای صاف نمودن سطح انتهایی نمونه، سایش آنها می‌باشد.

۲- آزمایش تعیین خواص فیزیکی سنگ

۲-۱- تعیین جرم جامد (دانه ای)

۲-۱-۱- هدف

این روش برای تعیین جرم دانه های جامد سنگ به کار می رود. جرم جامد یک نمونه (Ms) عبارتست از جرم نمونه پس از خشک شدن در دمای $105^{\circ}c$. این مقدار برای محاسبه چگالی خشک نمونه مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۱-۲- وسایل مورد نیاز

۱. گرمخانه دارای تهویه که قادر به تولید و ثابت نگهداشتن درجه حرارت $105^{\circ}c$ با دقتی معادل $3^{\circ}c$ در طول حداقل زمان ۲۴ ساعت باشد.
۲. ترازو با دقتی معادل ۰/۱ درصد وزن نمونه.
۳. قوطی فلزی آلومینیمی با درپوشی کاملا بسته که در برابر زنگ زدگی مقاوم بوده و در اثر استفاده مکرر وزن آن کاسته نشود.
۴. دسیکاتور

۲-۱-۳- روش آزمایش

نمونه مورد نظر داخل گرمخانه و با حرارتی معادل $105^{\circ}c$ به مدت ۲۴ ساعت خشک می شود. سپس داخل قوطی قرار گرفته و درپوش آن کاملا بسته می شود. در حین سرد شدن نمونه، برای جلوگیری از جذب رطوبت بهتر است که آن را داخل دسیکاتور قرار داد. در نهایت جرم نمونه خشک شده با دقتی معادل ۰/۱ درصد جرم آن اندازه گیری می شود و به عنوان جرم جامد سنگ گزارش می شود.

۲-۲- تعیین حجم کل

۲-۲-۱- هدف

این روش برای تعیین حجم کل نمونه های سنگی با شکل هندسی منظم یا نامنظم بکار می رود. حجم کل یک نمونه (V) مجموعه ای است از حجم روزنه ها و حجم دانه های موجود در آن نمونه. این حجم برای محاسبه خواص فیزیکی نمونه مانند تخلخل، چگالی حجمی، چگالی خشک، چگالی اشباع و غیره مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۲-۲- وسایل مورد نیاز

۱. کولیس یا میکرومتر

۲. ترازوی ارشمیدس با ظرفیت مناسب و دقت ۰/۱ گرم، که سبد توری محتوی نمونه به راحتی در مخزن آب آن به حالت شناور قرار گیرد.

۳. ترازو با ظرفیت مناسب و دقت ۰/۱ گرم و یا ۰/۰۵ درصد وزن نمونه

۲-۲-۳- روش آزمایش

الف) روش اندازه گیری ابعاد: درصورتی‌که نمونه دارای شکل هندسی منظم باشد، می‌توان مستقیما از طریق اندازه‌گیری ابعاد آن با کولیس یا میکرومتر محاسبه نمود. بدین ترتیب که ابتدا برای تعیین هر بعد، میانگینی از مقادیر مختلف قرائت شده با دقت ۰/۱ میلیمتر محاسبه و سپس حجم کل از طریق روابط هندسی تعیین می‌گردد.

ب)روش غوطه‌ور سازی: حجم نمونه‌هایی که شکل هندسی منظم یا غیر منظم دارند، را می‌توان از طریق اختلاف جرم نمونه اشباع با سطح خشک شده و جرم نمونه اشباع در حالت غوطه‌ور در آب محاسبه نمود(قانون ارشمیدس). قابل ذکر است که این روش برای سنگهای سست و کم دوام که در آب خرد شده و یا دچار تورم می‌گردند، مناسب نیست. نمونه در داخل آب به مدت یک ساعت و با فشار خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال اشباع می‌گردد. می توان از دستگاه دسیکاتور برای این کار استفاده کرد. نمونه ای از دسیکاتور به همراه پمپ خلا در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.

در این مدت باید مرتب نمونه را تکان داد تا حبابهای هوای آن تخلیه شود. نمونه پس از اشباع به داخل سبد متصل به ترازوی ارشمیدس که در آب غوطه‌ور است منتقل گشته و سپس جرم اشباع- غوطه‌ور (M_{sub}) با دقت ۰/۱ گرم از تفاضل بین جرم اشباع- غوطه‌ور سبد و نمونه با جرم اشباع غوطه‌ور سبد خالی بدست می‌آید. سپس وزن اشباع نمونه (M_{sat}) با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود و درنهایت حجم کل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w}$$

که در این رابطه M_{sat} وM_{sub} به ترتیب حجم اشباع و غوطه‌ور نمونه و ρ_w چگالی آب مورد استفاده می‌باشد.

شکل ۲-۱ دسیکاتور به همراه پمپ خلا

ج) روش تغییر حجم آب: روش دیگر محاسبه حجم نمونه که روشی چندان دقیق نیست، استفاده از بشر به همراه مقداری آب می‌باشد. در این روش ابتدا بشری که دارای مقداری آب با حجم مشخص است را آماده نموده و سپس نمونه سنگی اشباع با سطح خشک شده را بداخل بشر انداخته و تغییر حجم حاصل را بعنوان حجم نمونه ثبت می‌کنیم. در مورد نمونه های خشک و نمونه هایی که در آب تخریب می شوند لازم است ابتدا آنها را با موم و یا پلاستیک اندود نمود و سپس حجم آب جابجا شده را اندازه گیری کرد. حجم ماده اندود کننده باید تعیین شده و از حجم بدست آمده کم شود.

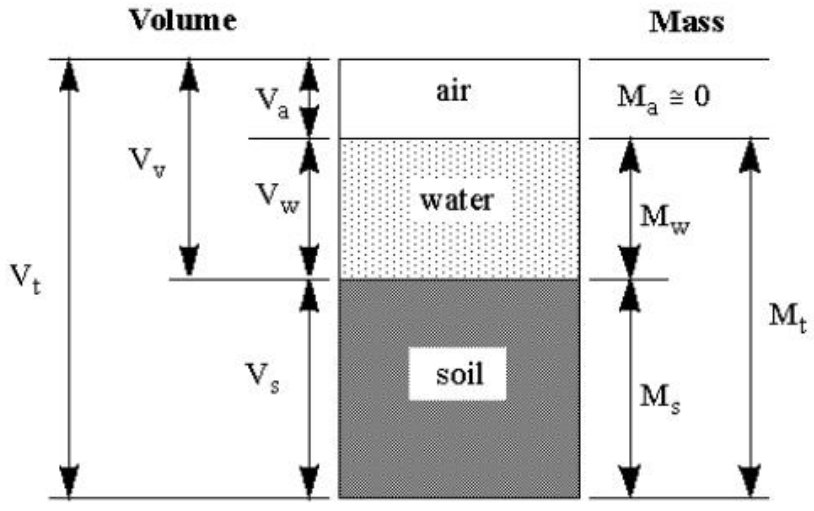
۲-۳- تعیین حجم منافذ (حجم منفذی)

۲-۳-۱- هدف

این روش برای تعیین حجم منافذ و حفرات موجود در نمونه‌های سنگی با شکل هندسی منظم یا نامنظم بکار می‌رود. حجم منفذی (V_v) شامل حجم هوا و آب موجود در نمونه می‌باشد و برای محاسبه خصوصیاتی مثل درجه اشباعیت، تخلخل، نسبت پوکی و چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل (۲-۱)). روشهایی برای تعیین حجم منفذی وجود دارد که یکی از آنها روش اشباع کردن می‌باشد.

۲-۳-۲- وسایل مورد نیاز

۱. گرمخانه دارای تهویه که قادر به تولید و ثابت نگهداشتن درجه حرارت $105^{o}c$ با دقتی معادل $3^{o}c$ در طول حداقل زمان ۲۴ ساعت باشد.
۲. ترازو با دقتی معادل ۰/۱ درصد وزن نمونه.



شکل ۲-۱- حجم منفذی (V_v) شامل حجم هوا و آب موجود در نمونه

۲-۳-۳- روش آزمایش

حجم منافذ را می‌توان از تفاضل بین جرم اشباع با سطح خشک و جرم نمونه خشک‌شده در خشک‌کن بدست آورد. در ابتدا نمونه در خلاء از آب اشباع شده و جرم اشباع با سطح خشک (M_{sat}) با دقت ۰/۱ گرم تعیین می‌گردد، سپس نمونه به مدت ۲۴ ساعت در خشک کن با دمای $105^{\circ}C$ خشک شده و جرم خشک (M_s) آن اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت حجم منفذی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w}$$

که در این رابطه ρ_w چگالی آب مورد استفاده می‌باشد.

۲-۴- درصد رطوبت

منظور از درصد رطوبت یا آب محتوی، نسبت وزن آب موجود در منافذ نمونه سنگ به وزن نمونه کاملا خشک شده بر حسب درصد است. رطوبت موجود در سنگ به علت اندرکنشی که با سطوح کانی‌های تشکیل دهنده دارد و تغییراتی که در مشخصات این سطوح و طبیعت پیوند بین آنها ایجاد می‌کند، مقاومت و مشخصات ژئوتکنیکی سنگ را کاهش می‌دهد. این کاهش ممکن است به خاطر افزایش فشار منفذی و یاکاهش C و$\emptyset$ باشد. از طرفی واکنش‌های شیمیایی که بین آب وفاز جامد سنگ اتفاق می‌افتد باعث تغییر فرمول شیمیایی کانی‌ها شده و اکثر این تغییرات در جهت تضعیف مقاومت سنگ عمل می‌کنند. در سنگ‌های تبخیری نظیر نمک، پتاس، ژیپس و انیدریت، رطوبت کم باعث ایجاد رفتار خزشی در سنگ می‌گردد و با افزایش مقدار رطوبت، پیوند بین اتم‌ها شکسته شده و یونیزه می‌شوند که اصطلاحا گفته می‌شود سنگ در آب حل شده است. بدین ترتیب تعیین درصد رطوبت طبیعی سنگ‌ها برای پیش‌بینی رفتار مهندسی آنها حائز اهمیت است و در اکثر آزمایش‌های مکانیک سنگ باید درصد رطوبت نمونه به دقت تعیین گردد.

۲-۴-۱- هدف

در این روش مقدار آب محتوای نمونه به صورت درصدی از وزن نمونه خشک شده در گرمخانه تعیین می‌گردد. این مقدار برای محاسبه پارامترهایی چون درصد اشباع، تخلخل و چگالی تر و خشک استفاده می‌شود. البته این آزمایش در مورد سنگ‌هایی که دارای مقدار قابل توجهی از کانی‌های مونت موریلونیت و گچ بوده و یا مقدار زیادی املاح محلول، مثل کلرورسدیم و موادآلی دارند، چندان مناسب نمی‌باشد.

۲-۴-۲- وسایل مورد نیاز

۱. گرمخانه با قابلیت تولید وثابت نگه‌داشتن درجه حرارت $105^{\circ}C$ با دقت $3^{\circ}C$ برای مدت زمان حداقل ۲۴ ساعت.

۲. قوطی فلزی مقاوم در برابر خوردگی یا زنگ زدگی به همراه درپوش کاملا محکم قوطی نباید بر اثر سرد و گرم شدن یا در اثر تماس با نمونه دچار تغییر وزن شود.

۳. ترازو با ظرفیت کافی و دقتی معادل ۰/۰۱ درصد وزن نمونه

۴. دسیکاتور با ظرفیت مناسب برای نگهداری نمونه در طول مدت سرد شدن

۲-۴-۳- نمونه مورد آزمایش

نمونه معرف برای این آزمایش عبارتست از ده تکه سنگ از یک نمونه، که هر تکه حداقل وزنی معادل ۵۰ گرم یا حداقل ابعادی معادل ده برابر قطر بزرگترین ذره سنگ داشته باشد(هرکدام که بزرگتر است). در صورتی که درصد رطوبت طبیعی یا برجای سنگ مورد نظر باشد، باید احتیاطهای لازم در نمونه‌گیری، نگهداری و جابجایی صورت گیرد تا درصد رطوبت بیش از یک درصد مقدار اولیه تغییر نکند.

۲-۴-۴- مراحل انجام آزمایش

۱. قوطی و درپوش، کاملا تمیز و خشک شده سپس توزین می‌گردند(A).

۲. نمونه داخل قوطی قرار گرفته و درپوش آن گذاشته می‌شود. سپس جرم نمونه و قوطی (B) تعیین می‌گردد.

۳. قوطی نمونه پس از برداشتن درپوش، درگرمخانه با حرارت ۱۰۵℃ تا رسیدن به وزنی ثابت خشک می‌شود.

۴. نمونه و قوطی به مدت ۳۰ دقیقه در دسیکاتور خنک شده و جرم نمونه خشک و قوطی (C) اندازه‌گیری می‌شود.

دقت شود که توزین نمونه در حالت خشک و تر باید با یک ترازو ویک حساسیت انجام گیرد. نمونه گرم باعث چرخش جریان هوای گرم و در نتیجه ایجاد خطا در توزین می‌گردد.

۲-۴-۵- محاسبات

درصد رطوبت یا آب محتوی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = \frac{M_v}{M_S} \times 100 = \frac{B - C}{C - A} \times 100$$

که در آن :

Mv: جرم آب منفذی (gr)　　Ms: جرم جامد (gr)

W: درصد رطوبت(٪)　　B: وزن نمونه تر و قوطی (gr)

C : وزن نمونه خشک و قوطی (gr)　　A: وزن قوطی خالی و درپوش(gr)

۲-۴-۶- گزارش نتایج

درصد رطوبت با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌گردد. نحوه نمونه‌گیری و نگهداری سنگ و کلیه تدابیری که برای ثابت نگه داشتن درصد رطوبت طبیعی نمونه صورت گرفته است در گزارش قید می‌گردد. در صورتی که نمونه در دمایی غیر از دمای ذکر شده در این روش خشک شده باشد در گزارش عنوان می‌گردد.

۲-۵- چگالی و تخلخل

چگالی سنگ تابع منافذ، درزه ها، شکاف ها و سایر فضاهای باز موجود در سنگ می باشد. چگالی یک نمونه سنگ مشخص با افزایش عمق بیشتر می شود، زیرا با افزایش عمق و در نتیجه فشار سنگهای فوقانی درزه ها و ترک های موجود در سنگ بتدریج بسته می شود. همچنین سن سنگ نیز رابطه مستقیمی با چگالی سنگ دارد. از طرف دیگر هوازدگی سنگ باعث کاهش چگالی آن می شود. اختلاف در چگالی سنگها بیشتر مربوط به تخلخل آنها است، زیرا چگالی دانه ای اکثر کانیها نزدیک به هم می باشد. بدین ترتیب همبستگی زیادی بین چگالی و تخلخل وجود دارد.

تخلخل در سنگها به دلایل مختلفی از جمله شرایط تشکیل و فرایند های ثانویه ای مانند هوازدگی، دگرسانی، انحلال کانیها، تبلور مجدد و غیره بوجود می آید. تخلخل سنگ بستگی به شکل و توزیع ابعاد دانه ها، استحکام دانه ها، سمت و سوی دانه ها، درجه تراکم و سیمان شدگی دانه ها بستگی دارد. در سنگ های رسوبی با افزایش سن و عمق و با فرض یکسان بودن سایر شرایط، تخلخل کاهش می یابد. به منافذی که با یکدیگر و با سطح بیرون ارتباط داشته باشند، روزنه های باز و مرتبط و به آنهایی که مسدود هستند، روزنه های بسته و منقطع می گویند. با این تعریف اگر تمام روزنه های موجود مد نظر گیرند تخلخل کل و اگر تنها روزنه های باز مد نظر باشد تخلخل موثر بدست می آید.

پارامترهای مورد استفاده در این قسمت عبارتند از:

وزن حجمی‌کل: وزن کل به حجم کل نمونه

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V}$$

وزن حجمی خشک: وزن خشک به حجم نمونه

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

وزن حجمی اشباع: وزن اشباع به حجم نمونه

$$\gamma_{Sat} = \frac{W_{Sat}}{V}$$

وزن مخصوص: نسبت وزن حجمی کل نمونه به وزن حجمی آب

$$G = \frac{\gamma_t}{\gamma_w}$$

درجه اشباعیت: نسبت حجم آب موجود در سنگ به حجم فضاهای خالی

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

تخلخل: نسبت حجم خلل و فرج سنگ به حجم کل

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$

نسبت پوکی: نسبت حجم فضاهای خالی به حجم جامد

$$e = \frac{V_v}{V_s} \times 100$$

۲-۵-۱- روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد (ISRM)

۲-۵-۱-۱- وسایل مورد نیاز

۱. گرمخانه با قابلیت تولید و نگه‌داشتن درجه حرارت $105^{\circ}C$ با دقت $3^{\circ}C$ برای مدت زمانی حداقل ۲۴ ساعت
۲. دسیکاتور برای نگهداری نمونه در طول مدت سرد شدن
۳. ترازو با ظرفیت کافی و دقتی معادل ۰/۰۱ درصد وزن نمونه
۴. سیستم اشباع در خلاء که بتوان نمونه را تحت خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسگال برای مدت زمانی حداقل یک ساعت در آن به حالت غوطه ور در آورد.
۵. وسیله اندازه‌گیری طول مثل کولیس با دقت ۰/۱ میلیمتر

۲-۵-۱-۲- نمونه موردآزمایش

این روش برای نمونه‌هایی به کار برده می‌شود که اشکال هندسی منظم دارند. نمونه معرف این آزمایش شامل حداقل ۳ قطعه سنگ با جرم تقریبی ۵۰ گرم و یا ابعادی حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه سنگ می‌باشد.

۲-۵-۱-۳- مراحل انجام آزمایش

۱. ابعاد نمونه به وسیله کولیس با دقتی معادل ۰/۱ میلیمتر اندازه‌گیری شده و برای هر بعد میانگینی در نظر گرفته می‌شود. حجم کل نمونه (V) با توجه به شکل نمونه از روش‌های هندسی تعیین می‌گردد.
۲. نمونه داخل آب و در خلاء حداکثر ۸۰۰ پاسکال به مدت یک ساعت اشباع می‌شود.
۳. سطح نمونه پس از خروج از آب توسط پارچه مرطوب طوری خشک می‌شود که هیچ ذره‌ای از سنگ جدا نگردد و سپس جرم نمونه اشباع با سطح خشک شده (M_{sat}) اندازه‌گیری می‌شود.
۴. نمونه در گرمخانه با درجه حرارت $105^{\circ}C$ تا رسیدن به وزنی ثابت باقی می‌ماند، سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دسیکاتور خنک شده و جرم جامد یا خشک نمونه (M_s) اندازه‌گیری می‌گردد.

۵. مراحل فوق برای تک تک نمونه‌ها تکرار می‌گردد.

۲-۵-۱-۴- محاسبات

چگالی خشک و تخلخل نمونه از روابط زیر به دست می آیند:

$$V_V = \frac{M_{sat} - Ms}{\rho_w}$$

$$\rho_d = \frac{Ms}{V}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$

که در آنها:

V: حجم کل (cm^3)

n: تخلخل (%)

Vv: حجم منافذ (cm^3)

M_{sat}: جرم اشباع با سطح خشک شده (gr)

ρ: چگالی خشک (gr/cm^3)

M_s: جرم خشک نمونه (gr)

۲-۵-۱-۵- گزارش نتایج

نتایج به دست آمده از حداقل سه نمونه مجزا از هر نوع سنگ و همچنین مقادیر میانگین محاسبه شده آنها باید گزارش گردد. مقادیر چگالی با دقت kg/cm^3 ۱۰ و تخلخل با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌شوند. همچنین در گزارش، باید قید شود که حجم کل به روش اندازه گیری ابعاد محاسبه شده و حجم منافذ توسط روش اشباع با آب بدست آمده است .

۲-۵-۲- روش اشباع و غوطه‌ور سازی(ISRM)

۲-۵-۲-۱- وسایل مورد نیاز

۱. گرمخانه با قابلیت تولید و نگه‌داشتن درجه حرارت $105^{\circ}C$ با دقت $3^{\circ}C$ برای مدت زمانی حداقل ۲۴ ساعت
۲. دسیکاتور برای نگهداری نمونه در طول مدت سرد شدن
۳. ترازو با ظرفیت کافی و دقتی معادل ۰/۰۱ درصد وزن نمونه
۴. سیستم اشباع در فشار خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال
۵. وان آب و یک سبد سیمی برای غوطه‌ور کردن نمونه: سبد با یک سیم نازک به رکاب ترازو آویزان می‌شود.
۶. قوطی فلزی از جنس مقاوم در برابر خوردگی، زنگ‌زدگی و تغییر وزن همراه با درپوش محکم.

۲-۵-۲-۲- نمونه مورد آزمایش

این روش برای نمونه‌های سنگی با اشکال هندسی منظم یا نامنظم و یا مصالح سنگی به کار می‌رود. قابل ذکر است که روش مذکور در مورد سنگ‌هایی کاربرد دارد که در حضور آب تورم محسوس ندارند و در حین غوطه‌وری یا در مدت زمان خشک شدن خرد نمی‌شوند. نمونه معرف برای این آزمایش شامل حداقل ۱۰ قطعه سنگ با اشکال هندسی منظم یا نامنظم است که هر یک حداقل وزنی معادل ۵۰ گرم یا ابعادی حداقل ۱۰ برابر بزرگترین دانه سنگ داشته باشند.

۲-۵-۲-۳- مراحل انجام آزمایش

۱. نمونه با آب شسته می‌شود تا گرد و غبار سطحی آن برطرف گردد.
۲. نمونه در داخل آب و در خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال به مدت یک ساعت اشباع می‌شود. در این مدت باید نمونه را به طوری متناوب حرکت داد تا حبابهای هوای آن خارج گردد.
۳. نمونه به سبد داخل وان آب که ترازو آویزان است منتقل شده و جرم اشباع غوطه‌ور سبد و نمونه با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود. جرم اشباع- غوطه‌ور نمونه از تفاضل جرم اشباع- غوطه‌ور سبد و نمونه از جرم غوطه‌ور سبد به دست می‌آید.
۴. قوطی و درپوش کاملا تمیز و خشک شده و جرم آن اندازه‌گیری می‌شود.
۵. نمونه از داخل وان آب خارج شده و سطح آن با دستمال مرطوب خشک می‌شود باید مراقب بود که فقط آب سطحی خشک شده و هیچ ذره‌ای از سنگ جدا نشود. نمونه در قوطی قرار گرفته و جرم آن اندازه‌گیری می‌شود.
۶. نمونه در درجه حرارت $105^{\circ}C$ تا رسیدن به وزنی ثابت خشک شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دسیکاتور خنک می‌شود. جرم نمونه خشک و قوطی اندازه گرفته می‌شود.
۷. مراحل فوق برای تک تک نمونه‌ها تکرار می‌شود.

۲-۵-۲-۴- محاسبات

چگالی خشک و تخلخل نمونه‌ها از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$Msat = B - A$$

$$Ms = C - A$$

$$V = \frac{Msat - Msub}{\rho_w}$$

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w}$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}$$

$$n = \frac{100V_v}{V}$$

که در آنها:

V: حجم کل (cm^3)

Msub: جرم اشباع غوطه‌ور نمونه (gr)

Vv: حجم منافذ (cm^3)

Msat: جرم اشباع با سطح خشک شده (gr)

ρ_d: چگالی خشک (gr/cm^3)

B: جرم اشباع نمونه + قوطی (gr)

N: تخلخل (٪)

C: جرم خشک نمونه+ قوطی (gr)

Ms: جرم خشک نمونه(gr)

A: جرم قوطی (gr)

۲-۵-۲-۵- گزارش نتایج

گزارش باید شامل مقادیر چگالی خشک و تخلخل نمونه باشد. مقدار چگالی با دقت ۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقدار تخلخل با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌شود. در گزارش باید قید شود که حجم کل و حجم منافذ با چه روشی به دست آمده است.

۳- آزمایش تعیین شاخص پوکی

شاخص پوکی عبارتست از نسبت وزن آب موجود در منافذ سنگ در حالت اشباع به وزن خشک نمونه بر حسب درصد. شاخص پوکی معیاری برای سنجش میزان تخلخل سنگ‌هاست که در مطالعه ویژگی‌های اولیه آنها به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص به درجه هوازدگی و دگرسانی سنگ نیز بستگی دارد. مطالعات و تحقیقات نشان داده است که بین شاخص پوکی و نوع وسن سنگ رابطه نزدیکی وجود دارد.

۳-۱- هدف

این آزمایش برای تعیین شاخص پوکی یا میزان جذب سریع آب (Iv) سنگ‌هایی به کار می‌رود که با قرار گرفتن در آب متلاشی نمی‌شوند.

۳-۲- وسایل مورد نیاز

۱. قوطی نمونه از جنس فلز مقاوم در برابر خوردگی به همراه درپوش کاملا محکم: قوطی باید برای قرارگرفتن نمونه احاطه شده با سیلیکاژل رطوبت‌گیر ظرفیت کافی داشته باشد.
۲. مقدار کافی بلورهای جاذب رطوبت سیلیکاژل
۳. ترازو با ظرفیت کافی و دقت ۰/۵ گرم
۴. برس مویی

۳-۳- نمونه مورد آزمایش

نمونه معرف برای این آزمایش شامل ۱۰ قطعه سنگ است که هر یک حداقل ۵۰ گرم وزن داشته ویا ابعادی حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه سنگ داشته باشد.

۳-۴- مراحل انجام آزمایش

۱. نمونه‌هایی که در هوا خشک شده‌اند را طوری داخل قوطی قرار دهید که از یکدیگر جدا بوده و توسط بلورهای جاذب رطوبت سیلیکاژل احاطه شوند. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت به این حالت باقی می‌مانند.
۲. پس از گذشت زمان مذکور نمونه‌ها از قوطی خارج شده و ذرات سست سنگ و بلورهای سیلیکاژل توسط برس از نمونه جدا شده و جرم نمونه (A) با دقت ۰/۵ گرم اندازه‌گیری می‌شود.
۳. نمونه را به داخل قوطی برگردانید و آنقدر آب بریزید تا سطح نمونه با آب پوشیده شود قوطی را تکان دهید تا حبابهای هوای داخل نمونه خارج شود. نمونه به مدت یک ساعت به همین حال گذاشته می‌شود.

۴. نمونه از قوطی خارج و سطح آن با یک دستمال مرطوب خشک می‌شود. مراقب باشید که فقط آب سطحی نمونه خشک گردد و هیچ ذره‌ای از سنگ جدا نشود. جرم نمونه با سطح خشک (B) با دقت ۰/۵ گرم اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۵- محاسبات

شاخص پوکی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_V = \frac{B-A}{A} \times 100$$

که در آن:

I_v : شاخص پوکی (٪)

B: حجم نمونه پس از یک ساعت غوطه‌وری درآب (gr)

A: جرم نمونه خشک شده توسط سیلیکاژل (gr)

۴- آزمایش تعیین شاخص دوام وارفتگی

وارفتگی(شکفتگی) از ویژگی‌های اساسی سنگ‌های ضعیف و به خصوص سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی می‌باشد. یکی از مسائل مهم در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی و معدنی، قابلیت وارفتگی سنگ‌های غنی از رس و تاثیرپذیری آنها از فرآیندهای هوازدگی است. فرایندهای مثل پوسته پوسته شدن، هیدراسیون، وارفتگی، انحلال، اکسیداسیون، سایش وغیره از جمله عواملی هستند که باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شده وقابلیت باربری آنها را کاهش می‌دهند.

در برخی شیل‌ها وسنگ‌های آتشفشانی، سطوح تازه بلافاصله پس از قرار گرفتن در معرض هوا دچار تخریب کیفی شدیدی می‌گردند. خوشبختانه این تغییرات فقط سطحی بوده و تاثیر محسوسی بر متن سنگ ندارد. با توجه به مطالب عنوان شده، وجود یک شاخص مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در مقابل دگرسانی ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که با هیچ آزمایشی نمی‌توان کلیه شرایط قابل انتظار را ارزیابی نمود، شاخص‌های دگرسانی اساسا برای رده‌بندی نسبی دوام سنگ‌ها مفید هستند.

یک شاخص بسیار مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در مقابل تر و خشک شدن متوالی و تاثیرات شیمیایی آب، شاخص دوام وارفتگی است که روش تعیین آن توسط فرانکلین و چاندرا درسال ۱۹۷۲ ارایه گردید. این آزمایش در سال ۱۹۷۹ توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ بصورت استاندارد در آمد و به روشهای دو مرحله ای و تک مرحله‌ای تقسیم گردید. رده بندی سنگها بر اساس شاخص دوام در جدول (۴-۱) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱- رده بندی سنگها بر اساس شاخص دوام اولین و دومین مرحله

شاخص دوام وارفتگی اولین مرحله (٪)	رده بندی	شاخص دوام وارفتگی دومین مرحله (٪)	رده بندی
۰-۲۵	خیلی ضعیف	۰-۳۰	خیلی ضعیف
۲۵-۵۰	ضعیف	۳۰-۶۰	ضعیف
۵۰-۷۵	متوسط	۶۰-۸۵	متوسط
۷۵-۹۰	مقاوم	۸۵-۹۵	کمی مقاوم
۹۰-۹۵	خیلی مقاوم	۹۵-۹۸	مقاوم
۹۵-۱۰۰	شدیدا مقاوم	۹۸-۱۰۰	خیلی مقاوم

۴-۱- هدف

این روش آزمایش برای تعیین میزان مقاومت یک نمونه سنگی تحت تاثیر دو مرحله تر و خشک شدن متوالی به کار می‌رود. شاخص دوام وارفتگی، مقدار درصد وزنی باقیمانده نمونه پس از این دو مرحله تر و خشک شدن می‌باشد که نشانگر میزان پایداری سنگ در برابر هوازدگی طبیعی است. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، میزان فرسایش،

انحلال و خرد شدن سنگ در برابر هوازدگی کمتر است. انجام این آزمایش روی سنگ‌هایی که در بدنه یا کرانه‌های سد قرار می‌گیرند ویا سنگ‌های مصرفی در ساخت موج شکن‌ها الزامی است.

۴-۲- وسایل مورد نیاز

۱. ظرف استوانه‌ای مشبک که از تور سیمی ۲ میلیمتری ساخته شده است. این استوانه دارای ۱۰۰ میلیمتر طول و ۱۴۰ میلیمتر قطر می‌باشد. دو انتهای استوانه باید ازصفحات فلزی سخت ساخته شود و یکی از آنها قابل برداشتن باشد. این ظرف باید دارای مقاومت کافی بوده تا در طول آزمایش دچار تغییر شکل نگردد. همچنین باید بتواند دمای ۱۰۵°C را تحمل کند.

۲. یک تشت آب به طوری که ظرف استوانه‌ای متصل به محور افقی دوار را در برگیرد. تشت باید طوری از آب پر شود که فاصله سطح آب تا محور دوران ظرف استوانه‌ای ۲۰ میلیمتر باشد. ضمنا عمق تشت باید به اندازه‌ای باشد که کف آن از ظرف استوانه‌ای ۴۰ میلیمتر فاصله داشته باشد.

۳. یک موتور محرک که بتواند ظرف استوانه‌ای مشبک را با سرعت ۲۰ دور در دقیقه بچرخاند. این سرعت باید در طول ۱۰ دقیقه با دقت ۵ درصد ثابت بماند.

۴. گرمخانه با قابلیت تولید و ثابت نگه‌داشتن دمای ۱۰۵°C در مدت زمان حداقل ۱۲ ساعت.

۵. ترازو با ظرفیت ۲ کیلوگرم و دقت ۰/۵ گرم.

نمونه ای از دستگاه آزمایش دوام سنگ در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

۴-۳- نمونه مورد آزمایش

نمونه مورد نیاز برای این آزمایش شامل ۱۰ قطعه سنگ ۴۰ تا ۶۰ گرمی است که در کل وزنی معادل ۴۵۰ تا ۵۵۰ گرم داشته باشد. حداکثر ابعاد دانه‌های سنگ مورد آزمایش نباید از ۳ میلیمتر بیشتر باشد. این قطعات ممکن است به صورت طبیعی یا مصنوعی تهیه شوند. شکل آنها باید حتی‌الامکان کروی بوده و گوشه‌های تیزآنها گرد شود.

شکل ۴-۱- نمونه ای از دستگاه آزمایش دوام سنگ

۴-۴- مراحل انجام آزمایش

۱. درصورتی که رطوبت اولیه نمونه حائز اهمیت باشد، به روش گفته شده تعیین می‌گردد.
۲. قطعات سنگی داخل ظرف استوانه‌ای مشبک ریخته شده و تا رسیدن به وزنی ثابت در گرمخانه با حرارت ۱۰۵℃ خشک می‌شوند. سپس جرم ظرف استوانه‌ای به اضافه نمونه (A) اندازه‌گیری می‌گردد.
۳. ظرف استوانه‌ای مشبک در تشت قرار گرفته و محور آن به موتور متصل می‌گردد.
۴. تشت تا ۲۰ میلیمتر زیر محور استوانه از مایع مورد نظر که معمولا آب ۲۰ ˚C است پر می‌شود. اگر در طبیعت شرایط خاصی بر نمونه حکم فرما باشد، مایع مورد استفاده مطابق با این شرایط تهیه و بکار برده می‌شود. ظرف استوانه‌ای با سرعت ۲۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه دوران داده می‌شود.
۵. بلافاصله پس از اتمام دوره چرخش، ظرف استوانه‌ای از داخل تشت خارج و درپوش آن برداشته می‌شود وسپس در گرمخانه با دمای ۱۰۵˚C تا رسیدن به وزنی ثابت خشک می‌گردد. جرم ظرف استوانه‌ای و قسمتهای باقیمانده نمونه پس از سرد شدن اندازه‌گیری می‌شود.
۶. به منظور انجام مرحله دوم آزمایش مراحل (۳) تا (۵) یکبار دیگر تکرار شده و در نهایت جرم ظرف استوانه‌ای و نمونه خشک باقیمانده (C) اندازه‌گیری می‌شود.
۷. ظرف استوانه‌ای مشبک کاملا تمیز و خشک شده و جرم آن اندازه‌گیری می‌شود(D).

۴-۵- محاسبات

شاخص دوام وارفتگی پس از دو مرحله تر و خشک شدن به صورت درصدی از نسبت جرم خشک نهایی باقیمانده به جرم خشک اولیه نمونه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Id_2 = \frac{C - D}{A - D} \times 100$$

Id_2: شاخص دوام وارفتگی(٪)　　A: جرم خشک اولیه استوانه و نمونه (gr)

D: جرم استوانه مشبک(gr)　　C: جرم خشک نهایی استوانه و نمونه (gr)

۴-۶- گزارش نتایج:

گزارش باید حاوی اطلاعات زیر باشد:

۱. گزارش دوام وارفتگی مرحله دوم
۲. درصد رطوبت اولیه نمونه
۳. توصیف شکل ظاهری قطعات باقیمانده در ظرف استوانه ای مشبک و قطعات رد شده از آن

۵- آزمایش تعیین سرعت صوت و ثابت‌های الاستیک دینامیکی

امروزه استفاده از روش‌های دینامیکی برای برآورد دقیق وسریع ثابت‌های الاستیک در مهندسی سنگ کاملا پذیرفته شده است و ازآنجایی که این آزمایش‌ها غیر مخرب هستند، مورد استقبال زیادی قرار گرفته‌اند. روش کار عبارت است از ارسال امواج الاستیک به داخل نمونه و اندازه‌گیری سرعت امواج فشاری (اتساعی یا طولی) و برشی(پچشی یا عرضی) درآن. سرعت این امواج بستگی به مقاومت فشاری و کششی سنگ یا به طور کلی کیفیت سنگ دارد. بنابراین رابطه مستقیمی بین ثابت‌های الاستیک سنگ وسرعت امواج الاستیک وجود دارد. البته ثابت‌هایی که با این روش تعیین می گردند مربوط به کرنش‌های بسیار کم هستند، چرا که المان‌های پیروزالکتریک مورد استفاده در این روش‌ها قادر نیستند سطح تنش بالایی در نمونه به وجود آورند. سرعت امواج فشاری و برشی با توجه به زمان گذر موج از فرستنده به گیرنده در طول نمونه محاسبه می‌گردد و معمولا سرعت امواج برشی دو سوم سرعت امواج فشاری می‌باشد.

در روش‌های فوق ممکن است نمونه در ابتدای آزمایش تحت تاثیر یک بار فشاری معادل شرایط برجا قرار گیرد. سرعت امواج الاستیک با افزایش تنش فشاری محوری افزایش می‌یابد. در برخی حالات مشاهده شده است که وقتی تنش از حد معینی بیشتر می‌گردد، این سرعت شروع به کاهش می‌کند که دلیل آن گسترش ترکها در نمونه است.

از عوامل موثر بر سرعت انتشار امواج صورتی وثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگ می‌توان به نوع سنگ، بافت، چگالی، تخلخل، ناهمسانگردی، سطح تنش، درصد رطوبت و درجه حرارت اشاره نمود. سرعت امواج صورتی در سنگ متناسب با سرعت صوت در کانی‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد، البته در صورتی که تاثیر عواملی مثل اندازه یا جهت‌گیری دانه ها در نظر گرفته نشود.

سرعت امواج الاستیک در سنگ به اندازه دانه‌ها نیز بستگی دارد و با ریزدانه شدن بافت سنگ افزایش می‌یابد. عمدتاً افزایش چگالی باعث افزایش سرعت می‌گردد و رابطه بین این دوپارامتر ممکن است خطی یا غیرخطی باشد. سرعت انتشار امواج الاستیک با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. در سنگ‌های لایه‌ای سرعت امواج در امتداد لایه‌ها بیشتر از جهت عمود بر لایه‌هاست. افزایش فشار جانبی در این گونه سنگ‌ها موجب کم شدن میزان ناهمسانگردی و در نتیجه بالا رفتن سرعت موج می‌گردد. مرطوب بودن سنگ معمولا باعث بالا رفتن سرعت امواج طولی می‌شود. ولی از آنجایی که امواج عرضی از بخش جامد سنگ عبور می‌کند، میزان رطوبت تاثیر چندانی روی سرعت آنها ندارد. در صورتی که سنگ کاملا اشباع فرض شود، سرعت امواج در سنگ‌هایی که تخلخل زیاد دارند کمتر از سنگ‌هایی است که تخلخل کمی دارند، چرا که سرعت امواج طولی درآب کمتر از متن سنگ است. معمولا با افزایش درجه حرارت، سرعت موج و نیز ثابت‌های الاستیک سنگ کاهش می‌یابد. دلیل این امر ایجاد گسستگی در مرز کانی‌ها به خاطر انبساط ناهمسانگرد آنهاست. با سرد شدن مجدد سنگ فقط بخشی از این کاهش سرعت جبران می‌شود. وقتی درجه حرارت سنگ‌های مرطوب تا زیرنقطه انجماد آب کاهش یابد، سرعت امواج سریعا افزایش می‌یابد.

تفاوت اصلی روش‌های استاتیکی و دینامیکی برای تعیین ثابت‌های الاستیک سنگ، اختلاف در میزان کرنش تولید شده است. ثابت‌های الاستیک دینامیکی در واقع مدول‌های مماسی هستند که در کرنش‌های خیلی پایین به دست می آیند. بنابراین با مدول‌های استاتیکی که در آنها کرنش تا حدود 10^{-2} نیز می‌رسد قابل مقایسه نمی‌باشند. این اختلاف به خصوص زمانی آشکار می‌شود که آزمایش روی سنگ‌هایی انجام گیرد که تخلخل بالایی دارند. به همین دلیل مقایسه مدول‌های استاتیکی و دینامیکی فقط زمانی مفهوم پیدا می‌کند که به ازاء مقادیر مشابه تنش یا کرنش اندازه گیری شده باشند. به طور کلی مقادیری که از روش دینامیکی به دست می‌آیند بیشتر از مقادیری است که از روش‌های استاتیکی حاصل می‌شوند. هر چه مقدار چگالی سنگ بیشتر باشد احتمال یکسان شدن ثابت‌های الاستیک استاتیکی و دینامیکی بیشتر می‌شود.

۵-۱- هدف

این روش آزمایش برای تعیین سرعت انتقال امواج فشاری (P) و برشی(S) با فرکانس بالا از داخل نمونه‌های سنگی که در مقایسه با طول موج پالس، ابعاد موثر نامحدودی دارند به کار می‌رود. ابعاد نمونه زمانی نامحدود تلقی می‌شود که میانگین اندازه دانه‌ها کوچکتر از طول موج و طول موج کوچکتر از کوچکترین بعد نمونه باشد.

۵-۲- وسایل مورد نیاز

۱. ژنراتور مولد پالس: این ژنراتور باید دارای مشخصات زیر باشد
۲. ترانس دیوسرها که شامل فرستنده برای تبدیل پالس‌های الکتریکی به مکانیکی و گیرنده برای تبدیل پالس‌های مکانیکی به الکتریکی می باشد و دامنه فرکانس کاری آن از ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز باشد(شکل (۵-۱)).

شکل ۵-۱- دستگاه اندازه گیری سرعت امواج صوتی در سنگ

۵-۳- نمونه مورد آزمایش

برای به حداقل رساندن صدمات مکانیکی باید در مغزه‌گیری، برش، حمل و نقل، ساییدن و پرداخت کردن نمونه دقت کافی صورت گیرد. سطح زیر هر ترانس دیوسر باید به اندازه‌ای صاف باشد که وقتی ترانس دیوسر مستقیما روی آن قرار می‌گیرد، نتوان صفحه نازکی به ضخامت ۰/۰۲۵ میلیمتر را از بین آنها عبور داد. دو سطح انتهایی نمونه که ترانس دیوسرها روی آنها قرار می‌گیرند باید با دقت ۰/۱ میلیمتر در هر ۲۰ میلیمتر بعد جانبی با هم موازی باشند. اگر سرعت موج در امتداد قطر مغزه اندازه‌گیری می‌شود، این دقت به موازی بودن خطوط تماس ترانس دیوسرها با سطوح جانبی نمونه برمی‌گردد. نمونه‌های مورد آزمایش شامل بلوکهای راست گوشه، مغزه‌های استوانه‌ای و حتی نمونه‌های کروی می‌باشد. عرض نمونه یا بعد جانبی در جهت عمود بر انتشار موج نباید کمتر از ۱۰ برابر طول موج باشد. مسافت گذر موج از نمونه باید حداقل ۱۰ برابر میانگین ابعاد دانه‌های سنگ باشد. ابعاد دانه‌های سنگ، فرکانس رزنانس طبیعی ترانس دیوسرها و حداقل بعد جانبی نمونه عواملی هستند که روی نتیجه آزمایش موثرند.

۵-۴- مراحل انجام آزمایش

۱- برای انجام این آزمایش بایستی ابتدا نمونه مورد نظر را کالیبره نمود. برای این منظور از استوانه فولادی که برای این منظور ایجاد شده است، استفاده می‌شود. برای کالیبراسیون دستگاه، نمونه فولادی که زمان حرکت موج در داخل آن ۲۵/۸ میکروثانیه است، را بین پولکهای فلزی گذاشته و با فشاری در حدود ۱۰ نیوتن بر سانتیمتر مربع قرار می‌دهیم. سپس با استفاده از کلیدهای تعبیه شده بر روی دستگاه، آنقدر این کلیدها را حرکت می‌دهیم تا زمان حرکت موج به ۲۵/۸ میکروثانیه برسد. حال دستگاه برای اندازه‌گیری سرعت موج آماده می‌باشد

۲- محل قرار گرفتن ترانس دیوسرها طوری روی سطوح انتهایی نمونه علامت زده می‌شود که محور عبوری از مراکز آنها با محور مرکزی نمونه بیش از ۲ درجه اختلاف نداشته باشد. سپس مسافت حرکت موج که فاصله مرکز تا مرکز ترانس دیوسرهاست با دقت ۰/۱ درصد اندازه گرفته می‌شود.

۳- ترانس دیوسرها در محل علامتگذاری شده قرار گرفته وفرستنده با فشاری معادل ۱۰ نیوتن بر سانتیمتر مربع به نمونه فشرده می‌شود. مقدار انرژی عبوری از ترانس دیوسر به نمونه را با روش‌های زیر می‌توان افزایش داد:

۱. پرداخت کردن دقیق سطوح انتهایی

۲. استفاده از یک لایه نازک گریس، وازلین، گلیسیرین، بطانه یا روغن بین سطح ترانس دیوسرها و نمونه

۴- سرعت امواج طولی و عرضی با تقسیم فاصله بین ترانس دیوسرها به زمان گذر موج محاسبه می‌گردد.

۵-۵- محاسبات:

حال می‌توان سرعت موج را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$V_p = \frac{d}{t_p}$$

که در این رابطه Vp سرعت موج، d طول نمونه و t_p مدت زمان عبور موج می‌باشد.

درصورتیکه از دستگاههایی که قادر به اندازه‌گیری موج S نیز می‌باشند استفاده شود، می‌توان ثابتهای دینامیکی را با توجه به روابط زیر محاسبه نمود.

$$E = \rho V_s^{\,2} \frac{(3V_p^{\,2} - 4V_s^{\,2})}{V_p^{\,2} - V_s^{\,2}}$$

$$G = \rho V_s^{\,2}$$

$$K = \rho \frac{(3V_p^{\,2} - 4V_s^{\,2})}{3}$$

$$\nu = \frac{V_p^{\,2} - 2V_s^{\,2}}{2(V_p^{\,2} - 2V_s^{\,2})}$$

که در این روابط V_p و V_s به ترتیب سرعت امواج P و S بر حسب متر بر ثانیه، ρ چگالی برحسب کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب، G, K,،E به ترتیب مدول یانگ، مدول بالک، مدول برشی برحسب پاسکال یا گیگاپاسکال و ϑ ضریب پواسون می‌باشد.

۵-۶- گزارش نتایج:

گزارش باید حاوی اطلاعات زیر باشد:

۴. مشخصات نمونه شامل نوع سنگ و محل نمونه برداری
۵. ابعاد نموه و شکل آن
۶. نحوه بدست آمدن نمونه
۷. توصیف سنگ شناسی، ساخت و بافت نمونه
۸. نحوه آماده سازی نمونه
۹. توصیف روش آزمایش
۱۰. ویژگیهای فیزیکی سنگ
۱۱. سرعت موج فشاری و برشی
۱۲. چگالی نمونه

۶- آزمایش تعیین سختی اشمیت

سختی یکی از مفاهیم رایجی است که برای توصیف رفتاری سنگها به کار می رود. سختی تابعی از عوامل ذاتی مقاومتی 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. با وجود اینکه سختی یکی از مشخصه‌های رفتاری سنگ می‌باشد، زمانی می‌توان آنرا کمی کرد که طبق روشهای آزمایشی خاص و تحت شرایطی یکسان عمل شود. بنابراین مهم است که بدانیم با توجه به اهداف مورد نظر از چه روشی برای تعیین سختی استفاده می‌کنیم که هم با طبیعت سنگ و هم با توجه به نیاز مهندسی ما تناسب داشته باشد. روشهای متعددی برای تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده است که بسیاری از این روشها فقط برای اهداف ویژه‌ای بوده و استفاده عمومی ندارد. برخی دیگر ممکن است فقط توسط سازمان مهندسی خاصی استفاده شده باشند.

در بین روشهای موجود برای تعیین سختی سنگ، روش چکش اشمیت بدلیل سادگی، در دسترس بودن وسایل آزمایش و ارتباط بسیار خوب نتایج آن با سایر ویژگیهای سنگ، متداولترین روشها می‌باشند. سختی اشمیت کاربردهای مختلفی در طبقه‌بندی سنگها و تعیین خواص مهندسی آنها دارد. دیر و میلر در سال ۱۹۶۵ در مطالعاتی که برای طبقه‌بندی سنگها انجام دادند از سختی اشمیت استفاده نمودند. این مطالعات توسط چکش اشمیت نوع L روی نمونه‌های مغزه‌ای از ۲۸ محل مختلف که دامنه وسیعی از سنگها را پوشش می‌داد انجام گرفت. آنها دریافتند که سختی اشمیت با مقاومت فشاری تک محوره، ضریب همبستگی معادل ۰/۸۸ دارد. کاربرد دیگر سختی اشمیت برآورد مقاومت زغالسنگ در حالت برجا می‌باشد، زیرا انجام آزمایش تعیین مقاومت زغالسنگ بسیار مشکل است.. بارتون در روش پیشنهادی خود برای برآورد مقاومت برشی درزه‌های سنگی، برای تعیین مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS) که یکی از پارامترهای مورد نظر وی می‌باشد، از چکش اشمیت نوع L استفاده نمود. سطح درزه در حالت برجا اغلب تا عمق چند میلیمتر هوازده است. از آنجایی که آزمایشهای متداول برای تعیین مقاومت فشاری روی چنین ابعاد کوچکی غیر ممکن یا بسیار مشکل است، استفاده از چکش اشمیت ضروری بنظر می‌رسد. بارتون ۱۰ یا تعداد بیشتری آزمایش در نقاط مختلف سطح درزه را پیشنهاد کرده است. یکی دیگر از کاربردهای سختی اشمیت در پیش‌بینی عملکرد دستگاه TBM می‌باشد. البته در این زمینه ترکیبی از سختی اشمیت و قابلیت سایش تیبر برای توصیف کلی سختس سنگ بکار برده می‌شود.

۶-۱- هدف

این روش آزمایش برای تعیین سختی سنگ با استفاده از چکش اشمیت در صحرا و یا آزمایشگاه بکار می‌رود. این روش توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) بصورت استاندارد درآمده است.در شکل (۶-۱) چکش اشمیت به همراه سندان کالیبراسیون نشان داده شده است.

شکل۶-۱- چکش اشمیت به همراه سندان کالیبراسیون

۶-۲- وسایل مورد نیاز:

۱- چکش اشمیت: پلانژر یا میله چکش بر روی نمونه قرار گرفته و با فشار دادن چکش به سنگ، بداخل بدنه چکش فرو می‌رود. این عمل باعث فشرده شدن فنر داخل چکش می‌گردد. ضامن فنر در سطح انرژی تراکمی مشخصی آزاد شده و به وزنه‌ای که روی پلانژر قرار گرفته ضربه می‌زند. ارتفاع واجهش وزنه از روی خط کش چکش قرائت شده و بعنوان مقیاسی برای تعیین سختی استفاده می‌شود. این وسیله قابل حمل بوده و در صحرا و در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدلهای گوناگونی از چکش اشمیت با سطوح انرژی تراکمی متفاوت ساخته شده‌اند. چکش نوع L که انرژی ضربه ای معادل ۰/۷۴ نیوتن متر تولید می کند معمولا استفاده می شود.

۲- قائده فولادی به وزن حداقل ۲۰ کیلوگرم که نمونه را محکم در خود نگه می‌دارد. نمونه‌های استوانه‌ای شکل داخل یک غلاف V شکل یا استوانه‌ای شکل با شعاعی برابر با شعاع مغزه قرار می‌گیرند.

۳- سندان فولادی استاندارد برای کالیبره کردن چکش

۶-۳- نمونه مورد آزمایش

نمونه آزمایشی باید معرف سنگ مورد مطالعه باشد. در صورت امکان بهتر است که از قطعات بزرگتر برای آزمایش استفاده شود. چکش اشمیت نوع L باید روی مغزه‌های ۵۴ میلیمتر یا بزرگتر و یا نمونه‌های بلوکی شکل که هر ضلع آنها حداقل ۶ سانتیمتر باشد مورد استفاده قرار گیرد.

۶-۴- مراحل انجام آزمایش

۱- در ابتدا بایستی چکش اشمیت را قبل از هر آزمایش توسط سندان استاندارد کالیبره نمود. میانگین ۱۰ قرائت بر روی سندان استاندارد قرائت شده و از آن برای تعیین ضریب تصحیح استفاده می‌شود.

۲- سطحی از نمونه که زیر پلانژر قرار می‌گیرد بایستی کاملا صاف و پرداخت شده باشد. این سطح و همچنین ماده سنگی زیر آن تا عمق ۶ سانتیمتری باید عاری از ترک یا هرگونه ناپیوستگی موضعی مربوط به توده سنگ باشد.

۳- مقدار سختی بدست آمده بستگی به راستای قرارگیری چکش دارد. طبق استاندارد ISRM بهتر است که چکش در یکی از سه وضعیت قائم به سمت بالا، افقی و یا قائم به سمت پایین قرار گیرد. در هر حالت مقدار انحراف چکش نباید بیش از $\pm 5^{\circ}$ باشد. در صورتی که امکان انجام آزمایش در هیچ یک از جهات ذکر شده نباشد، می‌توان آزمایش را با زاویه‌ای دلخواه انجام داد و سپس نتایج را برای حالت قائم یا افقی تصحیح نمود. در جدول (۶-۱) تصحیح مربوط به نتایج در حالت غیر افقی مشاهده می‌شود. زاویه قرارگیری چکش و هرگونه تصحیح انجام شده بر روی نتایج باید یادداشت و گزارش گردد.

۴- حداقل ۲۰ آزمایش مجزا باید روی هر نمونه سنگ انجام گیرد. نقاط مورد آزمایش باید حداقل به اندازه قطر پلانژر از هم فاصله داشته باشند. درصورت ایجاد هرگونه درز و ترک در سنگ بر اثر ضربه وارده، نتایج آزمایش باطل و نمونه مربوطه برای آزمایش‌های بعدی غیر قابل مصرف خواهد بود. وجود هر نوع خطا در آماده‌سازی نمونه و روش آزمایش باعث ایجاد مقادیر پایین‌تر سختی می‌شود.

۶-۵- محاسبات

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

میانگین ۱۰ قرائت انجام شده روی آنویل کالیبراسیون / مقدار سختی استاندارد ویژه آنویل= ضریب تصحیح

برای تعیین سختی اشمیت باتوجه به اینکه احتمال وجود خطا در مقادیر پایین بیشتر است، ابتدا نیمی از داده‌ها که کمترین مقدار را دارند حذف شده و از بقیه داده‌ها میانگین گرفته می‌شود. این میانگین در ضریب تصحیح ضرب شده و عدد حاصل بعنوان سختی واجهشی اشمیت درنظر گرفته می‌شود (H_S).

با استفاده از روابط زیر مقدار مقاومت فشاری یک محوره و مدول الاستیسیته را بر حسب مگا پاسکال محاسبه می‌شود:

$$\sigma_c = 127.4e^{0.0125(H_s-\gamma_a)}$$

$$E_z = 192(H_s \times \gamma_a{}^2) - 1271$$

که γ_a وزن مخصوص نمونه بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد.

جدول ۶-۱- تصحیح سختی اشمیت برای واجهشهای غیر افقی

مقدار واجهش R	مقدار تصحیح به ازاء زاویه انحراف			
	به سمت بالا		به سمت پایین	
	+۹۰	+۴۵	−۴۵	−۹۰
۱۰	−	−	+۲/۴	+۳/۲
۲۰	−۵/۴	−۳/۵	+۲/۵	+۳/۴
۳۰	−۴/۷	−۳/۱	+۲/۳	+۳/۱
۴۰	−۳/۹	−۲/۶	+۲/۰	+۲/۷
۵۰	−۳/۱	−۲/۱	+۱/۶	+۲/۲
۶۰	−۲/۳	−۱/۶	+۱/۳	+۱/۷

اگر تعداد ۲۰ آزمایش در یک نقطه تکرار شود، بدین وسیله می‌توان ایندکس پلاستیسیته را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$I_{pl} = \frac{H_{s(20)} - H_{s(1)}}{H_{s(1)}} \times 100$$

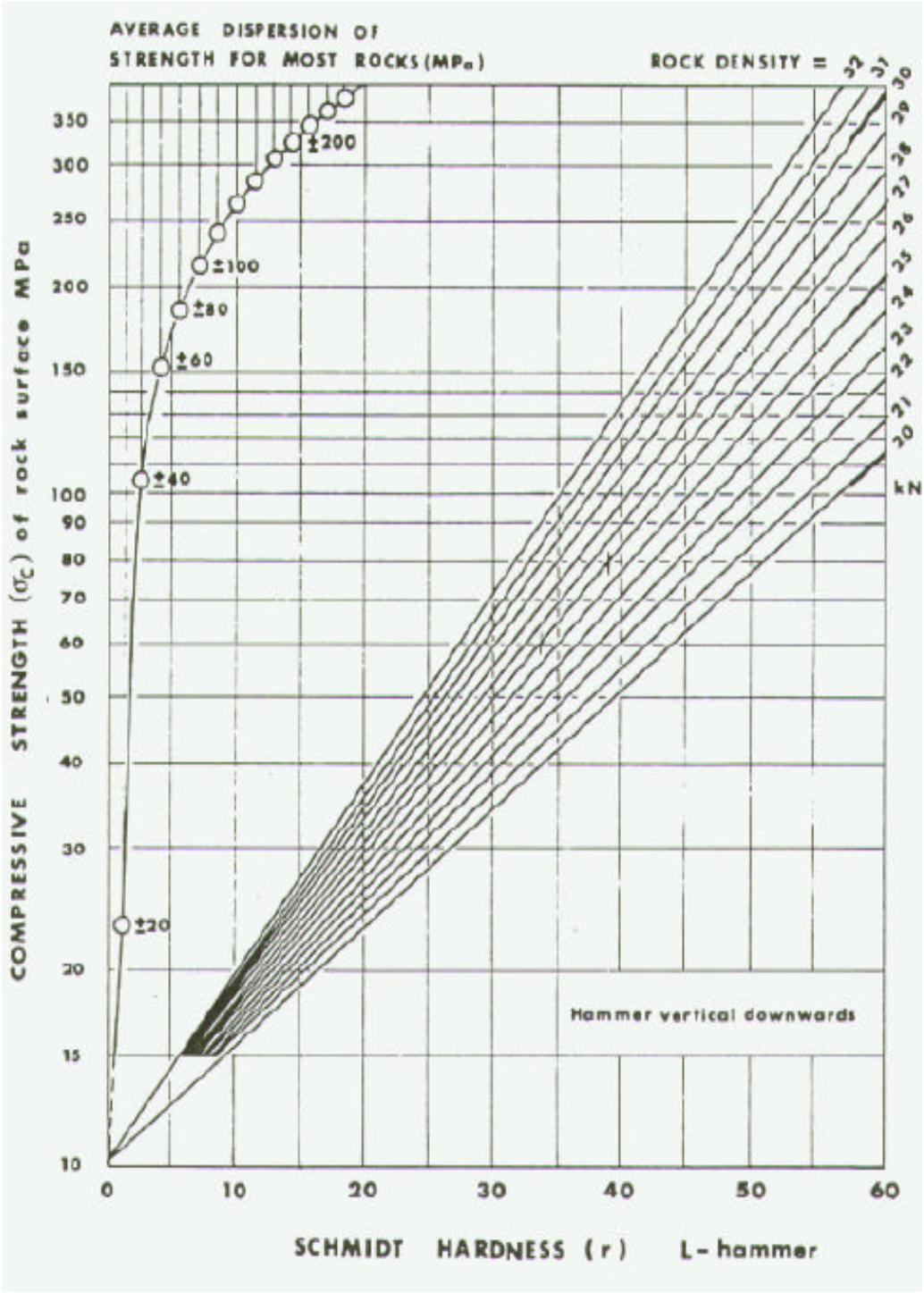
که $H_{s(1)}$ و $H_{s(20)}$ به ترتیب سختی اشمیت در اولین و بیستمین ضربه چکش می‌باشند.

همچنین می توان با استفاده از شکل (۶-۲) مقاومت فشاری تک محوره سنگ را بدست آورد.

۶-۶- گزارش نتایج:

گزارش باید حاوی اطلاعات زیر باشد:

۱۳. تشریح نظری سنگ، منشا نمونه شامل محل جغرافیایی، عمق و جهت نمونه گیری
۱۴. نوع نمونه (مغزه، نمونه بدست آمده از آتشباری و یا نمونه برجا) همراه با شکل و ابعاد آنها
۱۵. تاریخ نمونه گیری، تاریخ آزمایش و شرایط نگهداری نمونه
۱۶. جهت گیری محور چکش در حین آزمایش
۱۷. مقدار سختی اشمیت



شکل۶-۲- رابطه بین سختی اشمیت و مقاومت فشاری و دانسیته

۷- آزمایش بار نقطه ای

مقاومت فشاری تک محوری یکی از مهمترین پارامترهایی است که در اکثر پروژه‌های مهندسی مورد نیاز بوده و تعیین می‌گردد. اما انجام آزمایش تک‌محوری مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن دستگاه‌های گران و حساس می‌باشد و در عین حال نتایج حاصل وابستگی شدیدی به شیوه بارگذاری دارد. بنابراین انجام دقیق و صحیح آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری پر هزینه و وقت‌گیر است. به منظور رفع مشکلات فوق و تعیین سریع شاخصی برای نشان‌دادن مقاومت سنگ، آزمایش بار نقطه‌ای پیشنهاد گردید. این آزمایش در مرسوم‌ترین شیوه خود روی مغزه‌های سنگی و بصورت قطری انجام می‌گیرد، اما تلاشهای زیادی صورت گرفته است تا کاربرد این روش برای نمونه‌هایی با شکلهای دیگر تعمیم داده شود. استفاده از کلوخه‌های سنگی نامنظم برای تعیین مقاومت، در سال ۱۹۵۸ توسط پرتودیاکنف و وبلیکوف ارائه گردید. آنها ابراز داشتند که باید در حدود ۱۰ قطعه نمونه نامنظم از هر سنگ با این روش مورد آزمایش قرار گیرد. در این رابطه مقرر گردید که ۱۵ تا ۲۰ نمونه با حجم ۱۰۰ سانتیمتر مکعب و نسبت طول به عرض ۱/۵ مورد آزمایش قرار گرفته و در جهت طولی شکسته شوند. در این آزمایش بار به بخش بسیار کوچکی از نمونه اعمال شده و بنابراین عملا یک آزمایش بار نقطه‌ای به‌حساب می‌آید. ایراد بزرگ این روش حساسیت نتایج به شکل و اندازه نمونه‌هاست.

۷-۱- هدف

هدف از این آزمایش، تعیین یک شاخص مقاومتی می‌باشد که در طبقه‌بندی و تعیین خصوصیات سنگ بکار می‌رود. این آزمایش برای تعیین شاخص مقاومت بار نقطه‌ای سنگ بکار می‌رود و بدلیل قابل حمل بودن دستگاه می‌توان آنرا در صحرا یا آزمایشگاه انجام داد. این روش در مورد سنگهای سخت با مقاومت بالای ۱۵ مگاپاسکال کاربرد دارد. با داشتن شاخص مقاومت بار نقطه‌ای می‌توان مقاومت فشاری تک محوری سنگ را برآورد نمود. بنابراین در مواقعی که انجام آزمایشهای متعدد برای کسب اطلاعات اولیه و مقدماتی مورد نیاز است، بدلیل وقت‌گیر و پرهزینه بودن آزمایش تک‌محوری، می‌توان از آزمایش بار نقطه‌ای استفاده نمود. در این آزمایش آماده‌سازی نمونه بسیار مختصر بوده و یا اصلا لازم نمی‌باشد. نتایج آزمایش بار نقطه‌ای بعنوان شاخصی برای طبقه‌بندی ماده‌سنگ بوده و نباید از آن به منظور طراحی یا تجزیه و تحلیل مهندسی استفاده نمود. با این روش علاوه بر تعیین شاخص بار نقطه ای می توان شاخص ناهمسانگردی مقاومت بار نقطه ای را نیز تعیین نمود. این شاخص عبارت است از نسبت مقاومت های بار نقطه ای در جهاتی که حداکثر و حداقل مقاومت را دارند.

در سال ۱۹۷۲ براش و فرانکلین با تحقیقاتی که در مورد این آزمایش انجام دادند، رابطه ساده زیر را ارائه نمودند:

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

که در آن I_s شاخصی برای مقاومت، P بار وارده و D فاصله بین فک‌هاست.

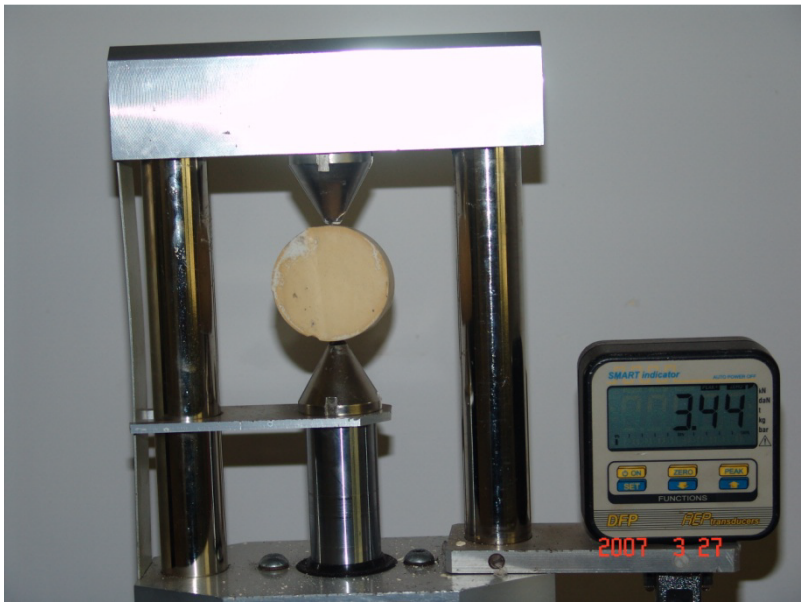
براش و فرانکلین با انجام طیف وسیعی از آزمایشها نشان دادند که در روش قطری، تاثیر اندازه کاملا مشهود است و بنابراین قطر ۵۰ میلیمتر را بعنوان قطر استاندارد معرفی نمودند و نمودارهایی را برای تصحیح سایر قطرها ارائه دادند.

بینیاویسکی در سال ۱۹۷۵ قطر ۵۴ میلیمتر را مرجع بهتری برای آزمایش قطری دانست و پیشنهاد کرد که آزمایش بار نقطه‌ای روی نمونه‌هایی با قطر کمتر از ۴۲ میلیمتر انجام نگیرد.

۷-۲- وسایل مورد نیاز:

۱- کولیس یا میکرومتر

۲- دستگاه بار نقطه‌ای: این دستگاه شامل سیستم بارگذاری، فک‌ها و وسیله اندازه‌گیری بار می‌باشد. این وسایل بایستی نسبت به ضربه و لرزش مقاوم باشند، تا دقت قرائت‌ها تحت تاثیر منفی تکرار آزمایش قرار نگیرد. در شکل (۷-۱) دستگاه آزمایش بار نقطه ای نشان داده شده است.



شکل ۷-۱- دستگاه آزمایش بار نقطه ای

۷-۳- نمونه مورد آزمایش

نمونه‌های سنگی براساس نوع سنگ و مقاومت تخمینی گروه‌بندی می‌شوند. اگر نمونه‌ها مغزه‌ای یا بلوکی باشند، حداقل ۱۰ نمونه و چنان‌چه به شکل کلوخه‌ای باشند، حداقل ۲۰ نمونه آزمایش می‌شود. برای رسیدن به طبقه‌بندی دقیق‌تر، نمونه‌های مغزه‌ای پیشنهاد می‌شود. ابعاد نمونه‌ها نباید از ۳۰ میلیمتر کمتر و از ۸۵ میلیمتر بیشتر باشد. ابعاد حدود ۵۰ میلیمتر بعنوان استاندارد پیشنهاد شده است. سطح جانبی نمونه‌ها باید عاری از ناهمواریهای زیاد که باعث تمرکز تنش می‌شوند، باشد. در این آزمایش نیاز چندانی به آماده‌سازی نمونه نمی‌باشد.

از آنجایی که مقاومت بار نقطه‌ای تحت تاثیر رطوبت قرار دارد، لازم است که پس از هر آزمایش درصد رطوبت را نیز تعیین نمود. در آزمایشهای معمول برای طبقه‌بندی سنگ، نمونه در حالت اشباع یا رطوبت طبیعی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. قبل از آزمایش جهت بارگذاری روی نمونه علامت‌گذاری می‌شود. این خطوط جهت قرار دادن نمونه در مرکز دستگاه و همچنین بعنوان مرجعی برای اندازه‌گیری ضخامت و قطر نمونه استفاده می‌گردد.

۷-۴- مراحل انجام آزمایش

الف) آزمایش قطری:

برای انجام آزمایش قطری از نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر بزرگتر از ۱ استفاده می‌گردد. نمونه در داخل دستگاه قرار گرفته و فک‌ها بسته می‌شوند تا در امتداد قطر با نمونه تماس برقرار کند. فاصله نقاط اتصال فک‌ها به نمونه تا نزدیک‌ترین انتهای آزاد آن (L) نباید از شعاع مغزه کمتر باشد(شکل ۷-۲-a). مقادیر D و L اندازه‌گیری و یادداشت می‌گردد. بار بطور پیوسته افزایش می‌یابد تا نمونه در مدت ۱۰ تا ۶۰ ثانیه بشکند. بار در لحظه گسیختگی (P) یادداشت می‌گردد. اگر سطح شکست فقط از یک نقطه بارگذاری بگذرد، نتیجه آزمایش مردود است.

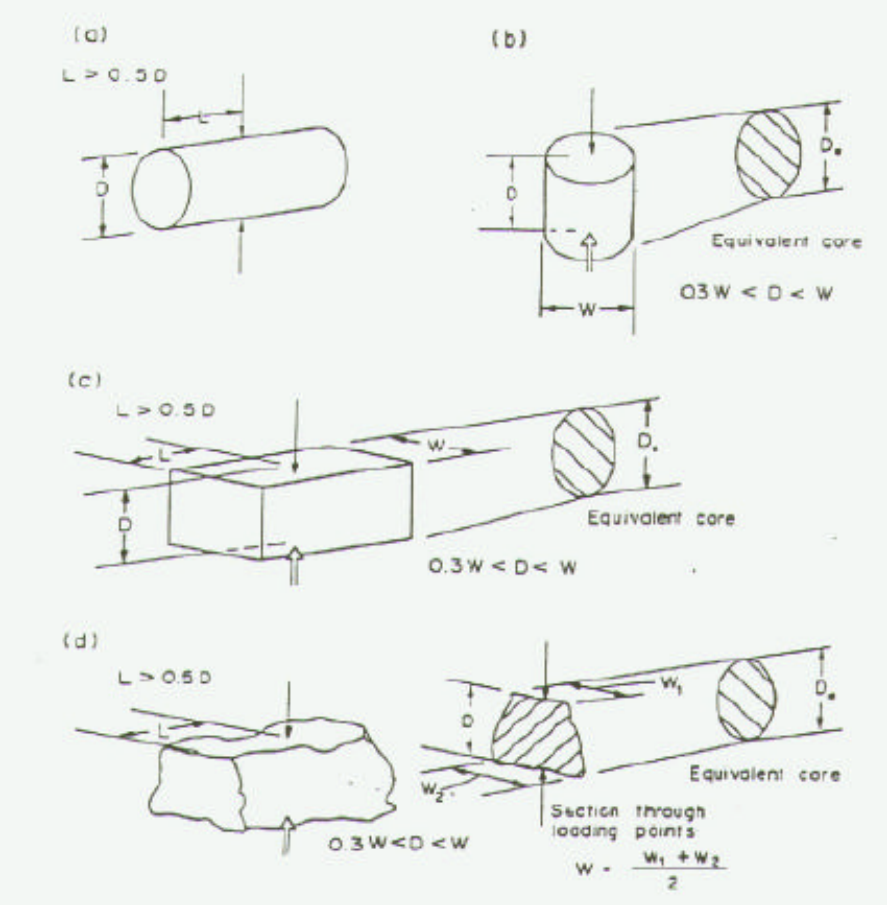
ب) آزمایش محوری:

نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۱به ۳ تا ۱ به ۱ برای آزمایش محوری مناسب هستند. نمونه در داخل دستگاه قرار گرفته و فک‌ها طوری بسته می‌شوند که عمود بر سطح انتهایی نمونه و در امتداد محور مغزه قرار گیرند(شکل ۷-۲-b). فاصله نقاط تماس فک‌ها (D) و همچنین عرض نمونه در جهت عمود بر محور بارگذاری (W) اندازه‌گیری می‌شود. بار به آرامی افزایش داده می‌شود تا نمونه در مدت ۱۰ تا ۶۰ ثانیه بشکند. بار در لحظه گسیختگی (P) یادداشت می‌گردد.

ج) آزمایش نمونه‌های بلوکی و کلوخه‌ای:

بلوکها یا کلوخه‌های نامنظم سنگی از ۳۰ تا ۸۵ میلیمتر همانطور که در شکل (۷-۲-d) نشان داده شده است، برای این روش مناسب هستند. نسبت D به W باید بین ۱ به ۳ تا ۱ به ۱ و ترجیحا ۱ به ۱ باشند. فاصله L نیز باید حداقل۰/۵D باشد. نمونه‌ها در داخل دستگاه قرار گرفته و فک‌ها طوری بسته می‌شوند که با کمترین بعد نمونه تماس حاصل کنند و از لبه‌ها و گوشه‌ها دور باشند. فاصله بین نقاط اتصال (D) و همچنین کمترین بعد بلوک یا کلوخه در جهت عمود بر محور بارگذاری (W) اندازه‌گیری و یادداشت می‌شود. اگر سطوح موازی نباشند، W از رابطه $\frac{(W_1+W_2)}{2}$ مانند شکل بدست می‌آید. این عرض برای محاسبه شاخص مقاومت بار نقطه‌ای بدون توجه به حالت واقعی شکست بکار می‌رود.

بار به آرامی افزایش می‌یابد تا گسیختگی در مدت ۱۰ الی ۶۰ ثانیه اتفاق بیفتد. سپس بار در لحظه گسیختگی P یادداشت می گردد.



شکل۷-۲- ابعاد نمونه در آزمایش بار نقطه ای

۷-۵- محاسبات

شاخص بار نقطه‌ای تصحیح نشده را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

I_s: شاخص بار نقطه‌ای تصحیح نشده برحسب مگاپاسکال

P: بار در لحظه گسیختگی بر حسب نیوتن

D_e: قطر معادل مغزه برحسب میلیمتر می‌باشد.

در آزمایش قطری $D_e^2 = D^2$ که D قطر نمونه می باشد و در آزمایش های محوری، بلوکی و کلوخه ای $D_e^2 = \frac{4WD}{\pi}$ می‌باشد.

شاخص مقاومت بار نقطه‌ای در آزمایش قطری بصورت تابعی از D و در آزمایشهای محوری، بلوکی و کلوخه‌ای بصورت تابعی از D_e تغییر می‌کند. به منظور بدست آوردن شاخص مقاومت بار نقطه‌ای برای استفاده در طبقه‌بندی مقاومتی سنگها نیاز به تصحیح اندازه نمونه می‌باشد. شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح شده $I_{s(50)}$ عبارتست از مقدار I_s بدست آمده از آزمایش قطری روی نمونه‌ای به قطر ۵۰ میلیمتر.

در مواقعی که طبقه‌بندی دقیق سنگ مورد نیاز می‌باشد، بهترین روش بدست آوردن $I_{s(50)}$ ، انجام آزمایش قطری روی نمونه‌ای به قطر ۵۰ میلیمتر یا نزدیک آن است. در این صورت نیازی به تصحیح اندازه نمونه نمی‌باشد. اما حقیقت این است که بیشتر آزمایشهای بار نقطه‌ای بر روی نمونه‌هایی با سایر ابعاد و قطرها صورت می‌گیرد. در چنین مواردی لازم است که تصحیح اندازه با استفاده از رابطه زیر انجام می گیرد:

$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

که در آن F ضریب تصحیح بوده که از رابطه زیر بدست می آید:

$$F = (\frac{D_e}{50})^{0.45}$$

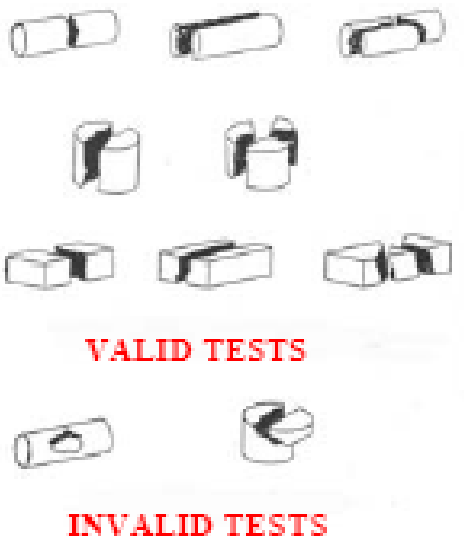
که برای نمونه هایی با قطر نزدیک به ۵۰ میلی متر داریم:

$$F = \sqrt{D_e / 50}$$

شکست نمونه در صورتی صحیح است که نمونه کاملا از وسط بشکند نه اینکه فقط تکه ای کوچک از آن جدا شود. همانطور که در شکل (۷-۳) نشان داده شده است.

شاخص ناهمسانگردی مقاومت بار نقطه‌ای $I_{a\ (50)}$ عبارتست از نسبت میانگین‌های $I_{s(50)}$ اندازه‌گیری شده در جهت عمود و موازی صفحات ضعیف که در واقع از تقسیم بالاترین مقدار به کمترین مقدار مقاومت بار نقطه‌ای:

$$I_{a50} = \frac{I_{s50(Max)}}{I_{s50(Min)}}$$



شکل ۷-۳- روش صحیح شکست نمونه

با استفاده از اندیس بارنقطه ای بدست آمده می توان مقاومت فشاری تک محوری سنگ را تعیین کرد.

$$\sigma_c = CI_{s50}$$

C ضریبی است که بستگی به رابطه خاص بین $I_{s(50)}$ و σ_c داردکه می‌توان آنرا از جدول(۲-۱) یا از طریق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\sigma_c = (14 + 0.175D)I_{s(50)}$$

جدول۶-۱- مقادیر ضریب C

اندازه نمونه mm	مقدار C
۲۰	۱۷/۵
۳۰	۱۹
۴۰	۲۱
۵۰	۲۳
۵۴	۲۴
۶۰	۲۴/۵

۷-۶- گزارش نتایج

گزارش کامل آزمایش بار نقطه ای باید شامل مطالب زیر باشد:

۱. منشا نمونه شامل موقعیت جغرافیایی و محل نمونه گیری و در صورت امکان شرایط نگهداری در انبار
۲. توصیف فیزیکی نمونه شامل نوع سنگ، موقعیت و جهت ناپیوستگی ها مثل سطوح ضعیف، لایه بندی و تورق
۳. تاریخ نمونه گیری و آزمایش
۴. شرایط رطوبت نمونه
۵. ضخامت متوسط و قط متوسط نمونه ها
۶. حداکثر بار وارده
۷. مقدار D یا D_e یا هر دو
۸. جهت بارگذاری (موازی یا عمود بر سطوح ضعیف)
۹. تعداد نمونه های آزمایش شده
۱۰. مقادیر شاخص بار نقطه ای اصلاح نشده و اصلاح شده
۱۱. مقدار تخمینی مقاومت فشاری تک محوره
۱۲. محاسبه مقدار شاخص ناهمسانگردی مقاومت
۱۳. نوع و محل سطح گسیختگی و در صورت امکان عکسی از نمونه قبل و بعد از آزمایش

۸- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یا نامحصور مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام گرفته و به ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌ای مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز نباشد. اگرچه این آزمایش عمدتا به عنوان شاخصی برای مقایسه سنگ‌ها شناخته می‌شود، لیکن کاربردهای وسیع دیگری نیز در حل مسائل عملی مکانیک سنگ پیدا کرده است که برخی از این کاربردها به شرح زیر می‌باشد:

۱) برآورد یاپیش‌بینی زمان وقوع خرابی در اثر فشار یا برش در اطراف فضاهای زیرزمینی

۲) ارزیابی مقاومت پایه‌های سنگی در معادن زیرزمینی

۳) تخمین مقاومت فشاری سه محوری با استفاده از معیارهای شکست مثل هوک و براون

۴) تعیین مدول‌های اساسی سنگ جهت پیش‌بینی میزان تغییر شکل یا نشست در نقاط مختلف آن

۵) تعیین ظرفیت مجاز باربری و مقاومت برشی جانبی پی‌های عمیق

۶) تعیین نوع و مشخصات دستگاه حفاری

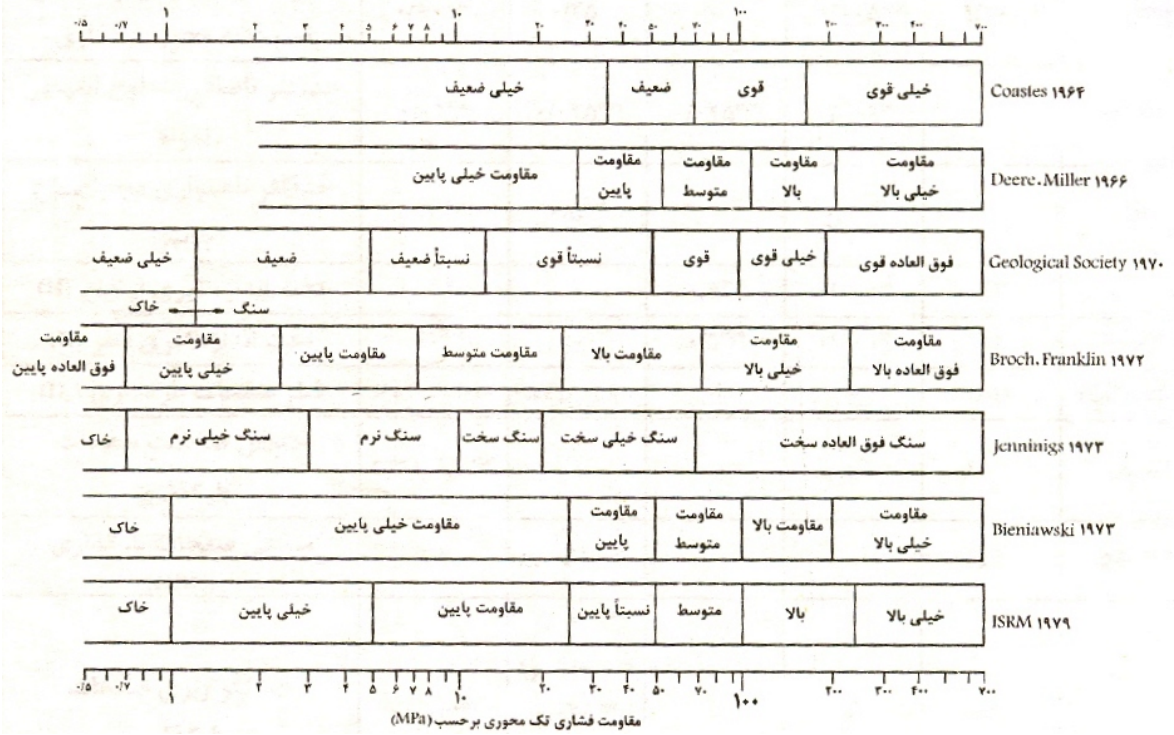
۷) تعیین مشخصات عملیات آتشباری

مقاومت ماده سنگی یا سنگ بکر به عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت سنگ بکر حد بالای مقاومت توده سنگ می‌باشد.

طبقه‌بندی پیشنهادی توسط دیر ومیلر(۱۹۶۶) در سطحی وسیع به عنوان روشی واقع گرایانه و مناسب برای استفاده محدود در مکانیک سنگ شناخته شده است. کمیسیون طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، رده‌های مختلفی از امتیازها را برای مقاومت سنگ بکر توصیه کرده است (شکل (۸-۱)). دلیل اصلی برای ارایه رده‌های جدید، این اعتقاد بود که طبقه‌بندی دیرومیلر فرقی برای مقادیر مختلف مقاومت پایین‌تر از ۲۵ مگاپاسکال قائل نشده است. در حالی که مقادیر کمتر از این حد فاصله زیادی تا مقاومت خاک دارند. در نظریه جدید ISRM مقدار یک مگاپاسکال به عنوان پایین‌ترین حد مقاومت فشاری تک محوری برای مواد سنگی در نظر گرفته شده است. بنابراین مواد با مقاومت کمتر از یک مگاپاسکال را باید به عنوان خاک در نظر گرفت و براساس علم مکانیک خاک بررسی نمود.

۸-۱- هدف

این آزمایش برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های استوانه‌ای سنگ به کار می‌رود این آزمایش اساساً برای طبقه‌بندی و تعیین مشخصات سنگ بکر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۸-۱- طبقه بندیهای مقاومتی مختلف برای سنگ بکر

۸-۲- وسایل مورد نیاز

۱- دستگاه بارگذاری برای اعمال بار محوری به نمونه و اندازه‌گیری آن : این وسیله باید دارای ظرفیت کافی بوده و قادر باشد بار را با سرعت مورد نظر اعمال نماید. این دستگاه باید در فواصل زمانی مناسب کالیبره شود. نمونه ای از دستگاه بارگذاری در شکل (۸-۲) نشان داده شده است.

۲- صفحات بارگذاری: دستگاه باید مجهز به دو صفحه بارگذاری فولادی با سختی راکول حداقل HRC ۵۸ باشد. یکی از این صفحات دارای نشیمنگاه کروی بوده و دیگری صفحه‌ای صلب وثابت است. نشیمنگاه کروی که در بالای نمونه قرار می‌گیرد باعث می‌شود که صفحات بارگذاری کاملا روی سطوح نمونه نشسته وبار به صورت محوری اعمال شود.

۸-۳- نمونه مورد آزمایش

۱- نسبت ارتفاع به قطر نمونه بین ۲/۵ تا ۳ و حداقل قطر نمونه ۵۴ میلیمتر می‌باشد. همچنین قطر نمونه باید حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه سنگ باشد.

۲- دو انتهای نمونه با دقت ۰/۰۲ میلیمتر صاف بوده و از امتداد عمود بر محور نمونه بیش از ۰/۰۰۱ رادیان یا ۰/۰۵ میلیمتر در هر ۵۰ میلیمتر انحراف نداشته باشد.

۳- جوانب نمونه نیز باید صاف و یکنواخت بوده و حداکثر ناهمواری در طول نمونه از ۰/۳ میلیمتر تجاوز نکند.

۴- شرایط رطوبت نمونه در لحظه آزمایش تاثیر مشخصی روی مقاومت سنگ دارد. بهتر است که آزمایش همواره در شرایط رطوبت طبیعی انجام گیرد. در صورتی که نیاز به انجام آزمایش در شرایط رطوبت طبیعی نباشد، معمولا آزمایش روی نمونه های کاملا خشک و کاملا اشباع انجام می گیرد.

۵- تعداد نمونه های مورد آزمایش باید از مشاهدات محلی تعیین گردد. اما حداقل ۵ نمونه توصیه می گردد.

۶- قبل از انجام آزمایش 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 استفاده می شود. ارتفاع نمونه نیز با دقت یک میلیمتر تعیین می گردد.

شکل ۸-۲- نمونه ای از دستگاه بارگذاری

۸-۴- مراحل انجام آزمایش

۱- قبل از انجام آزمایش، نشیمنگاه کروی کنترل شده و از حرکت آزادانه آن اطمینان حاصل می‌شود.

۲- صفحات بارگذاری و سطوح نمونه کاملا تمیز شده و نمونه روی صفحه پایینی به نحوی قرار می‌گیرد که محور آن با مرکز دوران نشیمنگاه کروی در یک امتداد قرار گیرد. سپس در حالی که تدریجا به نمونه بار اعمال می‌گردد، صفحه متحرک طوری حرکت داده می‌شود که کاملا روی سطح نمونه بنشیند.

۳- بار به طور پیوسته و بدون وارد آمدن ضربه با نرخی تقریبی ثابت به نمونه اعمال می‌گردد. گسیختگی نمونه باید در مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه پس از شروع بارگذاری اتفاق بیفتد. همچنین می‌توان سرعت بارگذاری را بین ۰/۵ تا یک مگاپاسکال بر ثانیه اختیار نمود. نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط محققین مختلف نشان داده است که استفاده از سرعت‌های فوق باعث می‌شود نتایج آزمایش به طور قابل قبولی مستقل از سرعت بارگذاری باشد.

۴- حداکثر بار وارد بر نمونه بر حسب نیوتن، کیلونیوتن یا مگانیوتن با دقت یک درصد یادداشت می‌گردد.

۸-۵- محاسبات

مقاومت فشاری تک محوری از تقسیم حداکثر بار وارد بر نمونه در آزمایش به سطح مقطع اولیه آن محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

σ_c: مقاومت فشاری تک محوری (Pa یا kPa یا MPa) F: حداکثر بار وارده (N یا Kn یا MN)

A: سطح مقطع اولیه نمونه (m^2)

۸-۶- گزارش نتایج

گزارش کامل این آزمایش باید شامل موارد زیر باشد:

۱- توصیف سنگ شناسی نمونه

۲- زاویه محور بارگذاری با سطوح ناهمسانگردی نمونه از قبیل صفحات لایه بندی، تورق و غیره

۳- منشا نمونه شامل نام پروژه، موقعیت جغرافیایی، محل نمونه برداری، عمق، تاریخ و روش نمونه گیری، تاریخ ورود به انبار و نحوه نگهداری

۴- تعداد نمونه های آزمایش شده

۵- درصد رطوبت و درجه اشباع در لحظه آزمایش

۶- طول مدت آزمایش و نرخ بارگذاری

۷- تاریخ انجام آزمایش و نوع ماشین آزمایش

۸- نوع شکست از قبیل برشی و یا شکستگی در امتداد محور

۹- سایر مشاهدات یا اطلاعات فیزیکی موجود مانند وزن مخصوص، تخلخل و نفوذپذیری

۱۰- مقاومت فشاری تک محوره کلیه نمونه ها به همراه میانگین آنها بر حسب مگاپاسکال

۹- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

۹-۱- هدف

این آزمایش برای ترسیم منحنی های تنش محوری- کرنش محوری و تنش محوری- کرنش جانبی و نیز محاسبه مدول الاستیسیته و و ضریب پواسون نمونه های مغزه ای سنگ بکر در فشار تک محوری بکار می رود.

۹-۲- وسایل مورد نیاز

۱- دستگاه بارگذاری: مشخصات این دستگاه مشابه دستگاهی است که در آزمایش تک محوره گفته شد.

۲- صفحات بارگذاری: مشخصات این صفحات در قسمت آزمایش تک محوره گفته شد.

۳- وسایل اندازه گیری تغییر شکل ها: برای اندازه گیری تغییر شکل ها یا کرنش های محوری و جانبی می توان از کرنش سنج های مقاومت الکتریکی، مبدل های تفاضل متغیر خطی (LVDT)، تراکم سنج ها و یا سایر وسایل استفاده کرد.این وسایل باید بنحوی روی نمونه قرار گیرند که بتوان در هر دو جهت محوری و جانبی حداقل دو اندازه گیری با فواصل مساوی انجام داد.

۴- وسیله ای برای ثبت بارها و تغییرشکل ها:ترجیحا یک ثبات x-y که بتواند منحنی های بار- تغییرشکل را مستقیما ترسیم نماید.

۹-۳- نمونه مورد آزمایش

نمونه باید از مغزه هایی انتخاب گردد که که نمایانگر ویژگی های میانگینی از نوع سنگ باشد. روش آماده سازی و مشخصات نمونه کاملا مشابه با مشخصات ذکر شده در آزمایش تک محوره می باشد.

۹-۴- مراحل انجام آزمایش

۱- قبل از انجام آزمایش، نشیمنگاه کروی کنترل شده و از حرکت آزادانه آن اطمینان حاصل می‌شود.

۲- صفحات بارگذاری و سطوح نمونه کاملا تمیز شده و نمونه روی صفحه پایینی به نحوی قرار می‌گیرد که محور آن با مرکز دوران نشیمنگاه کروی در یک امتداد قرار گیرد.

۳- وسایل اندازه گیری تغییر شکل یا کرنش ممکن است قبل یا بعد از قرارگیری نمونه در داخل جک، روی آن نصب گردد.

۴- بار به طور پیوسته و بدون وارد آمدن ضربه با نرخی تقریبی ثابت به نمونه اعمال می‌گردد. گسیختگی نمونه باید در مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه پس از شروع بارگذاری اتفاق بیفتد. همچنین می‌توان سرعت بارگذاری را بین ۰/۵ تا یک مگاپاسکال بر ثانیه اختیار نمود.

۵- در صورتیکه ثبت پیوسته داده ها توسط ثبات انجام نگیرد، بارها و تغییر شکل های محوری و جانبی در فواصل زمانی یکسان، باید در خلال بارگذاری یادداشت گردد. قابل ذکر است که حداقل ۱۰ قرائت باید در طول آزمایش ثبت گردد.

۹-۵- محاسبات

الف) کرنش محوری (ε_a) یا مستقیما توسط کرنش سنج ها اندازه گیری شده و یا اینکه با توجه به تغییر شکلهای قرائت شده به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L_0}$$

که در آن:

ε_a: کرنش محوری L_0: طول اولیه نمونه

ΔL: تغییر طول نمونه

قابل ذکر است که ΔL برای کاهش طول مثبت و برای افزایش طول منفی در نظر گرفته می‌شود.

ب) کرنش جانبی (ε_d) نیز ممکن است مستقیما با وسایل کرنش سنج اندازه‌گیری شود. در غیر این صورت می‌توان آنرا با توجه به تغییرات قطری یا محیطی نمونه محاسبه نمود. در صورتی که تغییرات قطری اندازه‌گیری شود، کرنش قطری از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$$

ε_d: کرنش قطری d_0: قطر اولیه نمونه

Δd: تغییر قطر نمونه

پ) تنش فشاری (σ) از تقسیم بار فشاری بر سطح مقطع اولیه نمونه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

σ: تنش فشاری(kPa,Pa یا MPa) P: بار فشاری(kN,N یا MN)

A: سطح مقطع اولیه (m2)

در این روابط کرنش‌ها و تنش‌های فشاری مثبت در نظر گرفته می‌شوند.

ت) نمونه‌ای از منحنی‌های تنش محوری – کرنش محوری و تنش محوری – کرنش جانبی در شکل نشان داده شده است. این منحنی‌ها رفتار سنگ را از تنش صفر تا مقاومت نهایی نشان می‌دهند. رسم منحنی تنش – کرنش بهترین توصیف را از نحوه تغییر شکل سنگ‌ها در سطوح مخلف تنش ارایه می‌دهد. این منحنی‌ها معمولا در سطوح بالا و پایین تنش غیرخطی هستند. پاره‌ای از کاربردهای منحنی کامل تنش- کرنش به شرح زیر می‌باشد:

۱- استفاده در طراحی پایه‌های معدنی در روش معدنکاری اتاق وپایه

۲- استفاده در پیش‌بینی رفتارسنگ در دراز مدت

۳- استفاده در پیش‌بینی رفتار سازه تحت بارهای تناوبی

۴- استفاده به منظور ارزیابی رفتار توده‌های سنگی

۵- استفاده در پیش‌بینی عکس‌العمل توده سنگ در مقابل حفاری‌های زیرزمینی

ث) مدول الاستیسیته یا یانگ را می‌توان با هر یک از روش‌های مورد قبول در کارهای مهندسی محاسبه نمود. روش محاسبه مدول‌های یانگ مماسی، میانگین و وتری می باشد.

مدول یانگ با واحد تنش یعنی پاسکال بیان می‌گردد. بهتر است که از ضرایب بزرگتر مثل گیگاپاسکال به عنوان واحد مدول یانگ استفاده گردد.

ج) ضریب پواسون (υ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

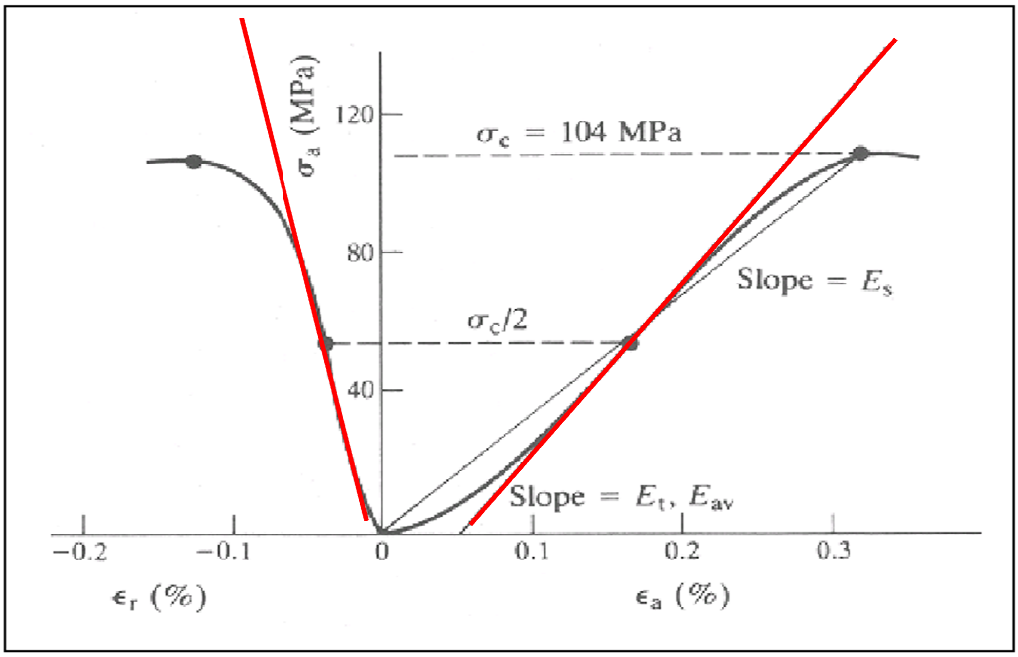
$$\upsilon = \frac{\text{شیب منحنی تنش — کرنش محوری}}{\text{شیب منحنی تنش — کرنش جانبی}} = \frac{E}{\text{شیب منحنی تنش — کرنش جانبی}}$$

شیب منحنی تنش- کرنش جانبی نیز به همان روش‌هایی که برای تعیین مدول یانگ گفته شد تعیین می‌گردد. قابل ذکر است که به دلیل منفی بودن شیب منحنی تنش- کرنش جانبی، ضریب پواسون همواره مثبت خواهد بود (شکل(۹-۱)).

چ) کرنش حجمی برای یک سطح تنش مشخص و برای مغزه‌های استوانه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

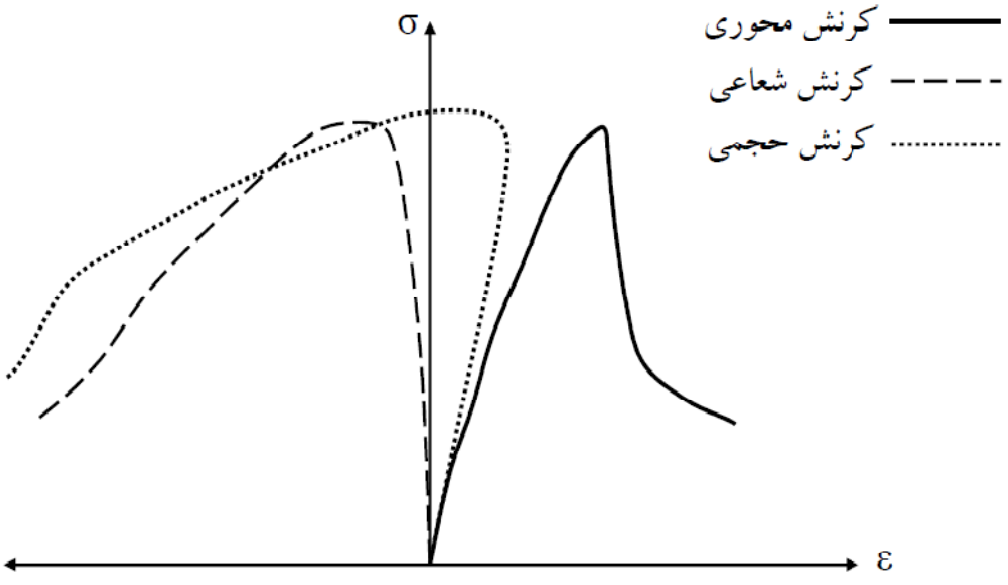
$$\varepsilon_{\upsilon} = \varepsilon_a + ۲\varepsilon_d$$

نمودار تنش بر حسب کرنشهای محوری، شعاعی و حجمی در شکل ۹-۲- نشان داده شده است.



$$\nu_{50\%} = \frac{\text{slope of axial stress-strain curve at 50\% of } \sigma_c}{\text{slope of lateral stress-strain curve at 50\% of } \sigma_c}$$

شکل ۹-۱- روش تعیین ضریب پواسون



شکل ۹-۱- نمودار تنش بر حسب کرنشهای محوری، شعاعی و حجمی

۹-۶- گزارش نتایج

گزارش نتایج مانند آزمایش مقاومت فشاری تک محوره می باشد.

۱۰- مقاومت فشاری سه محوره

ازآنجایی که سنگ‌ها در طبیعت و در شرایط واقعی تحت تنش سه محوری قرار دارند، تعیین مقاومت آنها در چنین شرایطی برای محاسبه ظرفیت مجاز باربری پی‌سنگ‌ها، طراحی سدها، مطالعه مکانیزم ایجاد گسل‌ها و چین خوردگی‌ها و حفاری‌های زیرزمینی حائز اهمیت بسیاری است. آزمایش سه محوری سالهاست که برای نیل به چنین اهدافی طراحی و اجرا شده است. با انجام این آزمایش، پوش گسیختگی سنگ ترسیم وبراساس آن پارامترهای مقاومتی سنگ تعیین می‌گردد. محققین با استفاده از این آزمایش دریافتند که شکست شکننده تنها مکانیزم شکست سنگ نمی‌باشد، بلکه بسیاری از سنگ‌ها در فشارهای جانبی بالا رفتاری کاملا انعطاف‌پذیر نشان می‌دهند. این نوع آزمایش سه محوری، حالت خاصی از تنش سه محوری است که درآن تنش اصلی میانه با تنش اصلی کوچکتر برابر می‌باشد.

۱۰-۱- هدف

با این آزمایش اطلاعات مورد نیاز برای رسم پوش گسیختگی و درنتیجه تعیین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تعیین می‌شود. همچنین با این آزمایش می‌توان مقاومت برشی و مدولهای تغییرشکل پذیری سنگ را در فشارهای جانبی مختلف تعیین نمود. این آزمایش در شرایط زهکشی نشده و بدون اندازه‌گیری فشار منفذی انجام می‌گیرد.

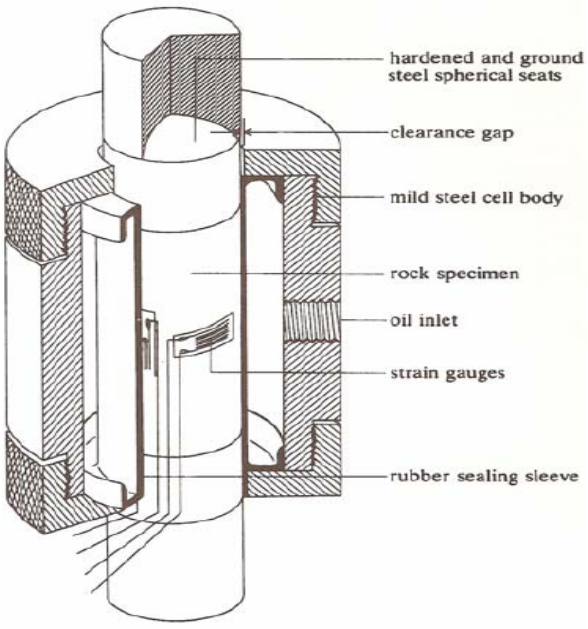
۱۰-۲- وسایل مورد نیاز

۱. محفظه سه محوره: این محفظه دارای قسمتهای زیر است (شکل (۱۰-۱)):
   ۱. بدنه محفظه که نمونه در داخل آن تحت فشار جانبی قرار می گیرد.
   ۲. غشاء انعطاف پذیر از جنسی مناسب که بتواند سیال محصور کننده را از نمونه کاملا جدا کند.
   ۳. صفحات بارگذاری از جنس فولاد سخت که در دو انتهای نمونه قرار می گیرند.
   ۴. سطوح کروی که مرکز انحنای آنها با مرکز سطح مقطع نمونه و صفحات بارگذاری منطبق است.
۲. دستگاه اعمال و کنترل بار محوری
۳. دستگاه اعمال فشار جانبی
۴. در صورت نیاز به اندازه گیری کرنش محوری، باید به نمونه کرنش سنج متصل گردد.

نمای کلی دستگاه آزمایش مقاومت فشاری سه محوره در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است.

۱۰-۳- نمونه مورد آزمایش

مانند مشخصات ذکر شده در آزمایش مقاومت فشاری تک محوره می باشد.



شکل ۱۰-۱- قسمتهای مختلف سلول سه محوره یا سلول هوک

شکل ۱۰-۲- نمای کلی دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

۱۰-۴- مراحل انجام آزمایش

۱. کلیه وسایل اندازه‌گیری کنترل و آماده می‌گردند.

۲. سپس غشاء در محفظه و بین صفحات فولادی قرار داده شده و نمونه در داخل غشاء لاستیکی قرار داده می‌شود. صفحات بارگذاری و سطوح محوری باید کاملا هم‌محور باشند.
۳. محفظه سه‌محوری با روغن پر شده و از طریق سوراخ هواگیری، هوای داخل آن خارج می‌گردد. سپس دریچه هواگیری بسته می‌شود.
۴. محفظه در دستگاه بارگذاری قرار داده می‌شود.
۵. بار محوری و فشار جانبی بطور همزمان افزایش می‌یابند، بطوریکه تقریباً در هر لحظه تا رسیدن فشار جانبی مورد نظر با هم برابر باشند. پس از رسیدن به فشار جانبی از پیش تعیین شده، این مقدار با دقت ۲ درصد ثابت نگه‌داشته می‌شود.
۶. بار محوری بطور پیوسته و با نرخ تنش ثابت اعمال می‌گردد، بنحوی که نمونه ظرف ۵ الی ۱۵ دقیقه بشکند. همچنین می‌توان نرخ تنش را بین ۰/۵ تا ۱ مگا پاسکال بر ثانیه در نظر گرفت.
۷. حداکثر بار محوری مورد نیاز برای گسیختگی نمونه در هر فشار جانبی یادداشت می‌گردد.

۱۰-۵- محاسبات:

الف) مقاومت فشاری سه محوری نمونه از تقسیم حداکثر بار محوری بر سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}$$

ب) تعیین میزان چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)به طریق زیر انجام می‌گیرد:

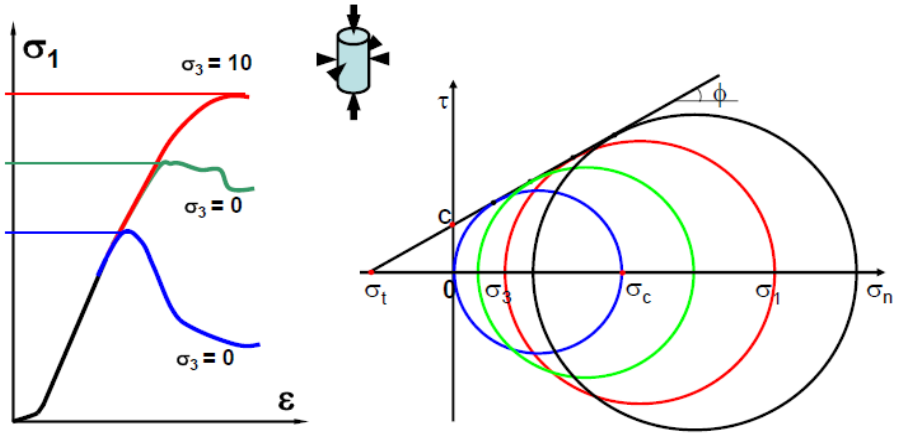
استفاده از دوایر موهر و پوش گسیختگی موهر- کولمب: در این روش ابتدا دوایر موهر مربوط به آزمایشهای انجام شده رسم می‌گردد. برای هر آزمایش به مرکز $\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}$ و به شعاع $\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}$ در یک دستگاه مختصات تنش برشی - تنش عمودی ترسیم شده و سپس بهترین خط ممکن به این دوایر مماس می‌گردد. اگر پوش بصورت خطی مستقیم باشد، زاویه این خط با افق زاویه اصطکاک و عرض از مبدا آن چسبندگی سنگ می‌باشد. چنانچه منحنی پوش غیرخطی باشد، برای تعیین c و ϕ لازم است که در نقطه تماس پوش با هر دایره موهر خطی به پوش مماس شده و زاویه شیب و عرض از مبدا آن بعنوان بعنوان c و ϕ در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب برای هر فشار جانبی یک چسبندگی و یک زاویه اصطکاک داخلی مجزا خواهیم داشت. بعبارتی در این مورد c و ϕ به سطح تنش عمودی و سطح تنش جانبی بستگی دارد (شکل(۱۰-۳)).

استفاده از نمودار تنش محوری-فشار جانبی (نمودار $\sigma_1 - \sigma_3$): در این روش فشار جانبی و مقادیر مقاومت مربوط به هر یک از فشارهای جانبی در نموداری مطابق شکل به صورت نقاط مجزا پیاده می شوند (شکل (۱۰-۴)).

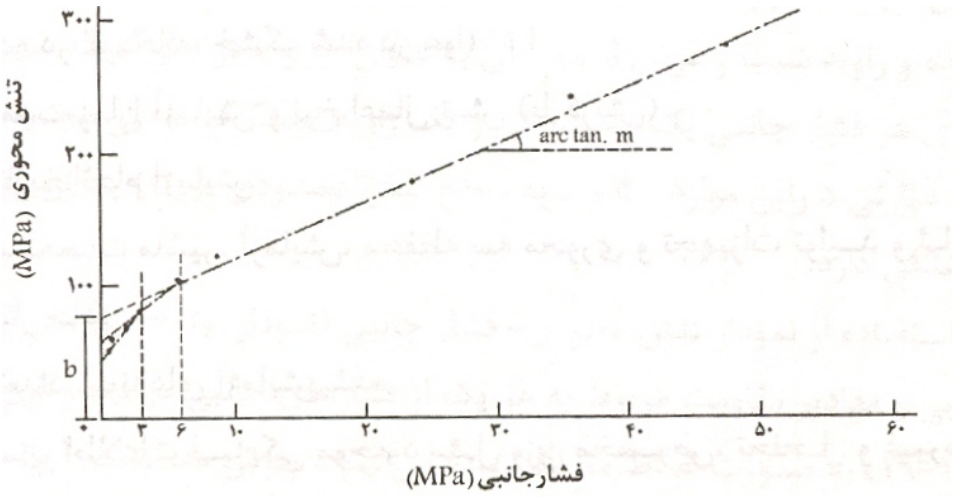
پوش مقاومت ($\sigma_1 - \sigma_3$) از برازش منحنی بر این نقاط بدست می آید. شیب (m) و عرض از مبدا (b) برای هر قسمت خطی تعیین می شود. با داشتن پارامترهای m و b می توان طبق معیار شکست کولمب مقادیر c و ϕ را از روابط زیر تعیین کرد.

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

$$C = b\frac{1-Sin\phi}{2Cos\phi}$$



شکل ۱۰-۳- رسم دوایر موهر و تعیین زاویه اصطکاک و چسبندگی



شکل ۱۰-۴- رسم تنش محوری بر حسب تنش جانبی و تعیین ضرایب m و b

۱۰-۶- گزارش نتایج

گزارش نتایج مانند آزمایش مقاومت فشاری تک محوره می باشد.

۱۱- آزمایش تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم (روش برزیلی)

مقاومت کششی عبارتست از حداکثر تنش کششی که یک ماده قادر است تحمل نماید تا به مرحله گسیختگی برسد. اطلاع از رفتار سنگ‌ها در کشش و میزان مقاومت کششی آنها، در تحلیل پایداری سقف و کف فضاهای زیرزمینی، بررسی پایداری سنگ‌ها در زونهای کششی و همچنین حفاری و آتشکاری اهمیت بسیاری دارد. به طور کلی آگاهی از مقاومت کششی سنگ‌ها یکی از پیش شرطهای مهم موفقیت در طراحی معادن، تونل‌ها، شیروانی‌ها و کنترل موثر لایه‌ها وطبقات زمین می‌باشد و ما را در درک مکانیزم‌های خرابی در چنین حالاتی یاری می‌کند.

سنگ‌ها و به طور کلی تمامی موارد شکننده، ذاتا در کشش بسیار ضعیف‌تر از فشار عمل می‌کنند. بدین ترتیب علت وقوع اکثر گسیختگی‌ها وریزش‌ها در معادن، تونل‌ها، مغازه‌ها وسایر سازه‌های مهندسی، ایجاد تنش‌های کششی در آنها می‌باشد این پدیده‌ها اهمیت شناخت مکانیزم‌های گسیختگی کششی و نحوه تحلیل ومقابله با آنها را به خوبی آشکار می‌سازند.

روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری مقاومت کششی سنگ‌ها ابداع شده‌اند که به طور کلی می‌توان آنها را به دو نوع آزمایش کشش مستقیم وآزمایش‌های کششی غیرمستقیم تقسیم نمود.

بهترین روش اندازه‌گیری مقاومت کششی سنگ، کشیدن مستقیم آن می‌باشد که به آزمایش کشش مستقیم یا کشش تک محوری موسوم است.

انجام دقیق آزمایش کشش مستقیم با مشکلاتی همراه است که استفاده از آنرا به عنوان یک روش آزمایشگاهی متداول محدود نموده است. بنابراین استفاده از روش آزمایش کشش غیر مستقیم پیشنهاد شد.

۱۱-۱- هدف

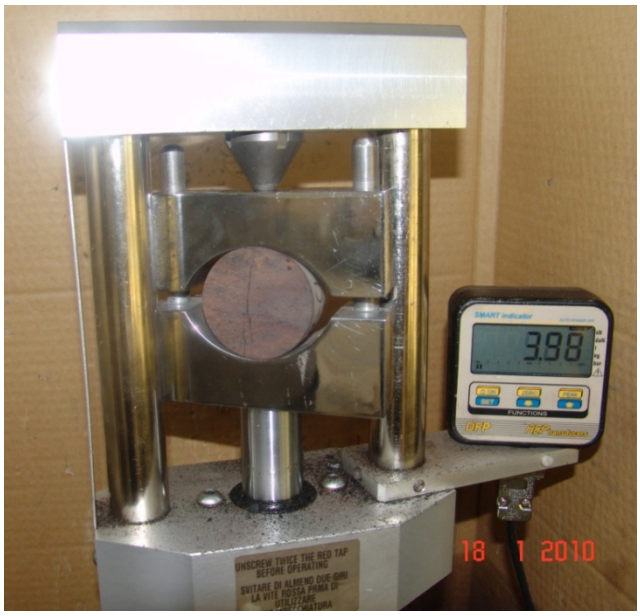
این آزمایش برای تعیین مقاومت کششی نمونه های استوانه ای سنگ بکر به طور غیر مستقیم بکار می رود.توجیه این آزمایش مبتنی بر این واقعیت تجربی است که با اعمال فشار قطری به نمونه های استوانه ای سنگ، تنش کششی بر امتداد عمود بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که این تنشش کششی از مقاومت کشش سنگ بیشتر شود نمونه دچار گسیختگی می گردد.

۱۱-۲- وسایل مورد نیاز

۱. فک های بارگذاری قوسی شکل
۲. نوار چسب کاغذی با ضخامت ۰/۲ تا ۰/۴ میلیمتر و پهنایی بیشتر از ضخامت نمونه
۳. دستگاه مناسب برای اعمال و اندازه گیری بار فشاری

۴. نشیمنگاه کروی و گوی مربوطه

نمونه ای از دستگاه آزمایش برزیلی در شکل (۱۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۱- نمونه ای از دستگاه آزمایش برزیلی

۱۱-۳- نمونه‌های مورد آزمایش

۱. نمونه‌های مورد آزمایش مغزه‌هایی با قطر حداقل ۵۴ میلیمتر می‌باشند که سرو ته آنها توسط اره بریده شده است. ضخامت (ارتفاع) نمونه‌ها باید تقریباً برابر شعاع آنها باشد.
۲. سطح جانبی نمونه‌ها باید عاری ازآثار مته کاری بوده وپستی و بلندی‌های آن از ۰/۰۲۵ میلیمتر تجاوز نکند.
۳. سطوح انتهایی نمونه‌ها باید با دقت ۰/۲۵ میلیمتر صاف بوده و ضمن عمود بودن بر محور نمونه با دقت ۰/۲۵ درجه با یکدیگر موازی باشند.
۴. جهت‌گیری نمونه نسبت به سطوح ناهمسانگردی باید مشخص گردد.
۵. درصد رطوبت نمونه‌ها مطابق با روش‌های استاندارد موجود اندازه‌گیری می‌شود.
۶. تعداد نمونه‌ها با توجه به ملاحظات اجرایی تعیین شده و معمولا ۱۰ نمونه پیشنهاد می‌گردد.

۱۱-۴- مراحل انجام آزمایش

۱. قطر و ضخامت نمونه با دقت ۰/۲۵ میلیمتر و با میانگین‌گیری از حداقل سه اندازه‌گیری تعیین می‌گردد.
۲. دور نمونه آزمایشگاهی یک لایه نوار چسب کاغذی چسبانده می‌شود و سپس روی نمونه به صورت قطری علامت‌گذاری می‌گردد تا جهت بارگذاری مشخص شود.

۳. نمونه به گونه‌ای داخل فک‌های بارگذاری قرار می‌گیرد که بار به صورت قطری به آن وارد شود. سطوح قوسی شکل باید طوری روی سطح جانبی نمونه بنشینند که هیچ منفذی بین آنها وجود نداشته باشد.

۴. بار به طور پیوسته و با آهنگی یکنواخت به نمونه وارد می‌گردد، به نحوی که ضعیف‌ترین سنگ‌ها ظرف ۱۵ تا ۳۰ ثانیه دچار گسیختگی شوند. پیشنهاد می‌گردد نرخ بارگذاری معادل ۲۰۰ نیوتن بر ثانیه انتخاب شود.

۱۱-۵- محاسبات

مقاومت کششی نمونه از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi Dt}$$

که در آن:

σ_t: مقاومت کششی بر حسب (MPa)　　P: بار گسیختگی (N)

D: قطر نمونه (mm)　　t: ضخامت نمونه در مرکز (mm)

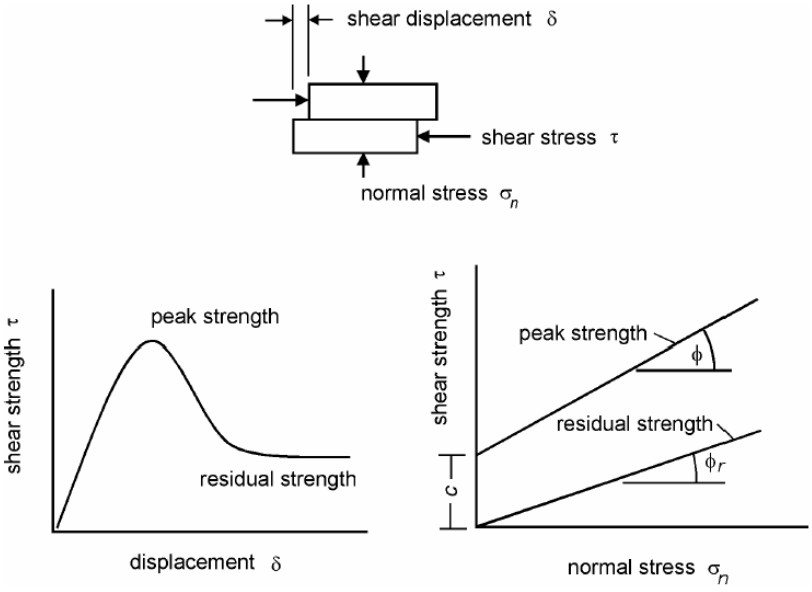
۱۱-۶- گزارش نتایج:

گزارش نتایج مانند آزمایش مقاومت فشاری تک محوره می باشد.

۱۲- آزمایش مقاومت برشی مستقیم

مقاومت برشی ماده سنگ‌ها، سطوح درزها و ناپیوستگی‌ها در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی و سایر سازه‌هایی که در سنگ طراحی و اجرا می‌شوند اهمیت زیادی دارد. تعیین مقاومت برشی در طراحی شیروانی‌های سنگی از قسمت‌های پراهمیت و حساس بوده و تغییر کوچکی در مقاومت برشی می‌تواند ناپایداری شیروانی را به دنبال داشته باشد. انتخاب مقدار مقاومت برشی مناسب نه تنها بستگی به اطلاعات به دست آمده از آزمایش دارد، بلکه لازم است که تفسیر دقیق و استادانه‌ای از این اطلاعات در رابطه با رفتار توده سنگ به دست آورد. از طرفی باید عوامل موثر بر مقاومت برشی سنگ و میزان تاثیر آنها مشخص گردد.

فرض کنید نمونه‌هایی از یک توده سنگ لایه‌ای یا درزدار انتخاب کرده وبخواهیم مقاومت برشی سطح ناپیوستگی را تعیین نماییم. این سطح هنوز دارای چسبندگی است و به عبارت دیگر برای جدا کردن دو نیمه از یکدیگر نیاز به اعمال مقداری تنش کششی می‌باشد. با این فرض که سطح لایه کاملا صاف و عاری از هر گونه زبری باشد و تنشی معادل σ به طور عمودی بر آن وارد گردد، تنش برشی τ برای ایجاد تغییر مکان δ مورد نیاز می‌باشد. بدین ترتیب منحنی تنش برشی – تغییر مکان برشی مشابه شکل (۱۲-۱) است.



شکل ۱۲-۱- منحنی های تنش برشی – جابجایی برشی و تنش برشی – تنش قائم

همانطور که پیداست نمونه پس از یک تغییر شکل تقریبا خطی به مقاومت برشی نهایی رسیده و پس از گسیخته شدن، در مقدار تنش ثابتی، به جابه‌جایی خود ادامه می‌دهد. این تنش، مقاومت برشی ماندگار نامیده می‌شود.

چنانچه مقادیر مقاومت برشی نهایی به دست آمده در آزمایش‌های مختلف نسبت به تنش عمودی ترسیم شود، یک منحنی تقریبا خطی به دست می‌آید که شیب آن نشانگر زاویه اصطکاک حداکثر (ϕ) و عرض آن مبدا آن نشانگر چسبندگی سطح برش(c) می‌باشد. به این ترتیب مقاومت برشی نهایی را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

چنانچه مقاومت برشی ماندگار بر حسب تنش عمودی ترسیم شود، رابطه‌ای خطی به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\tau_r = \sigma \tan \phi_r$$

معمولا زاویه اصطکاک ماندگار (ϕ_r) از زاویه اصطکاک حداکثر (ϕ) کمتر است.

در صورتی که سطح برش حاوی آب تحت فشارباشد، به خاطر تاثیر فشار آب، تنش موثر عمودی و در نتیجه مقاومت برشی کاهش می‌یابد در این حالت مقاومت برشی از رابطه زیرتعیین می‌گردد:

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \phi$$

که درآن u فشار آب در سطح درزه، c چسبندگی و (ϕ) نیز اصطکاک می‌باشد.

۱۲-۱- هدف

با این آزمایش، مقاومت برشی مستقیم حداکثر و ماندگار به صورت تابعی از تنش قائم اعمالی بر صفحه برش تعیین می‌گردد. از نتایج این آزمایش می‌توان در تحلیل تعادل حدی شیروانی‌های سنگی یا تحلیل پایداری پی‌سدها، تونل‌ها، مخازن و مغازها استفاده نمود. مقاومت برشی مستقیم را در صورتی می‌توان در آزمایشگاه تعیین نمود که زبری سطح درز نسبت به ابعاد نمونه کم باشد و بتوان از آن نمونه دست نخورده تهیه کرده و به آزمایشگاه انتقال داد. به عبارت دیگر مقاومت حداکثر به دست آمده از آزمایشگاه را فقط در صورتی می‌توان به کل ناپیوستگی تعمیم داد که از نظر زبری و نوع ناهمواری‌ها مشابه حالت صحرایی باشد در غیراین صورت لازم است که روی نتایج آزمایشگاهی محاسبات مناسبی صورت گرفته وسپس وارد تحلیل‌های پایداری گردد. در بکارگیری نتایج آزمایش برای طراحی مهندسی، چنانچه شرایط فشار آب منفذی و نحوه پیشرفت گسیختگی با شرایط آزمایشگاهی متفاوت باشد، لازم است که این موارد نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱۲-۲- نمونه مورد آزمایش

نمونه آزمایشی ممکن است دارای یک درز طبیعی و یا درز مصنوعی ایجاد شده توسط اره باشد. جهت‌گیری نمونه نسبت به توده سنگ و نحوه قرارگیری آن در دستگاه برش باید حتی‌الامکان به نحوی باشد که سطح ناپیوستگی بر

صفحه برش منطق گردد در صورتی که سطح ناپیوستگی نسبت به صفحه برش شیب‌دار باشد، باید این زاویه را در محاسبات لحاظ نمود. قابل ذکر است که سطح ناپیوستگی علاوه بر درز، صفحه لایه‌بندی و کلیواژ، می‌توان سطح تماس بین سنگ و خاک یا سنگ و بتن نیز باشد.

چنانچه نمونه سنگی ضعیف باشد، می‌توان آزمایش برش را روی نمونه‌های بکر و عاری از صفحات ضعیف نیز انجام داد در این حالت لازم است که قالب در برگیرنده نمونه، مقاومت کافی داشته ونیروی قائم به اندازه ای باشد که مانع از ایجاد ممان پیچشی در نمونه گردد.

۱۲-۳- وسایل مورد نیاز

الف) وسائل مورد نیاز برای تهیه نمونه از سنگ شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. وسائل مربوط به برش نمونه مثل مته مغزه‌گیر با قطر بزرگ، مته‌های ضربه‌ای، اره، پتک و چکش به همراه وسائل اندازه‌گیری شیب، جهت شیب، زبری وسایر مشخصات ظاهری سطح مورد آزمایش.
۲. وسایلی مثل سیم یا نوارهای فلزی برای بستن یا نگه‌داشتن نمونه
۳. مواردی برای حفاظت نمونه در مقابل صدمات مکانیکی و تغییر درصد رطوبت ضمن انتقال به آزمایشگاه و در طول برش. به عنوان مثال استفاده از بسته‌بندی‌های محافظ یا موم‌اندود کردن نمونه ویا هر گونه پوشش ضد آب.

ب) وسایل مورد نیاز برای قرار دادن نمونه در دستگاه که شامل موارد زیر است:

۱. وسیله قالب‌گیری نمونه که ممکن است استوانه‌ای یا مکعبی باشد.
۲. سیمان، گچ، رزین یا سایر مواد قالب‌گیری مقاوم به همراه ظروف مناسب برای مخلوط کردن آنها.

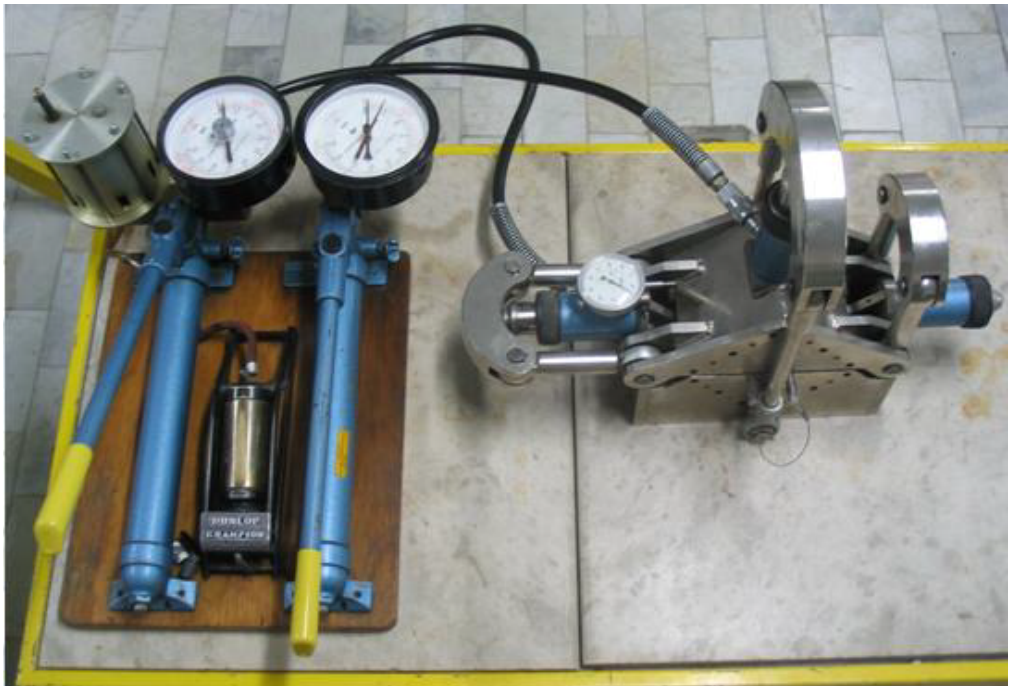
پ) وسایل انجام آزمایش:

۱. جعبه برش که نمونه و قالب داخل آن قرار می‌گیرند.
۲. وسیله اعمال بار قائم از نوع هیدورلیکی، پنوماتیکی یا سیستم وزنه‌ای به طوری که بار را به شکلی کاملا یکنواخت به صفحه آزمایش اعمال نماید برآیند نیروی اعمالی باید از مرکز سطح گذشته و برآن کاملا عمود باشد. ظرفیت جابه جایی قائم سیستم باید بیشتر از مقدار اتساع یا تحکیمی باشد که از نمونه انتظار می‌رود. این سیستم باید بار را در طول آزمایش با دقت ۲ درصد ثابت نگه دارد.
۳. وسیله اعمال بار برشی مثل جک هیدرولیکی یا سیستم مکانیکی دنده‌ای، به طوری که بار را به شکلی یکنواخت به یک نیمه از نمونه اعمال نماید.

۴. تجهیزاتی برای اندازه‌گیری مستقل نیروهای قائم وبرشی با دقتی بیشتر از ۲ درصد حداکثر نیروی اعمالی.

۵. تجهیزاتی برای اندازه‌گیری جابه جایی قائم، برشی و جانبی مثل میکرومتر، گیج عقربه‌ای، LVDT یا ترانس دیوسرهای الکتریکی.

نمای کلی دستگاه آزمایش برش مستقیم در شکل (۱۲-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۱- نمای کلی دستگاه آزمایش برش مستقیم

۱۲-۴- آماده‌سازی نمونه

ابتدا صفحه برش انتخاب شده وسپس شیب، جهت شیب وسایر مشخصات زمین‌شناسی مورد نیاز یادداشت می‌گردد. صفحه برش باید ترجیحاً مربعی با مساحت حداقل ۲۵۰۰ میلیمتر مربع باشد پیوستگی نمونه‌ها با بستن سیم یا نوار به دور آنها حفظ می‌گردد. این سیم یا نوارها بلافاصله قبل از آزمایش باز می‌شوند. تعداد نمونه‌های آزمایشی بستگی به امکان تهیه نمونه داشته و حداقل سه نمونه پیشنهاد می‌شود.

نمونه داخل یکی از قسمت‌های قالب طوری قرار داده می‌شود که صفحه برش در موقعیت و جهت صحیحی حفظ شود. ماده قالب‌گیری ریخته شده و پس از گیرش، قسمت دیگر نمونه به طریقه مشابه قالب‌گیری ریخته شده می‌شود از هر طرف صفحه برش حداقل ۵ میلیمتر نباید قالب‌گیری شود.

به نمونه قالب‌گیری شده فرصت داده می‌شود تا کاملا خشک شده و استحکام لازم را برای آزمایش به دست آورد.

۱۲-۵- مرحله برش

۱. سیم‌های فلزی که دو نیمه نمونه را به یکدیگر متصل نموده‌اند قطع می‌شوند.
۲. نیروی برشی به تدریج افزایش داده می‌شود این نیرو را می‌توان به صورت پله‌ای اعمال نمود، اما بهتر است آنرا به طور پیوسته و به طریقی که سرعت جابه جایی برشی قابل کنترل باشد اعمال کرد.
۳. قبل از رسیدن به مقاومت نهایی تقریبا باید ۱۰ سری قرائت انجام شود. سرعت جابه جایی در شروع آزمایش باید کمتر از ۰/۱ میلیمتر در دقیقه باشد. این سرعت در بین مجموعه قرائت‌ها ممکن است به حداکثر ۰/۵ میلیمتر در دقیقه نیز افزایش یابد، مشروط بر اینکه مقاومت نهایی به طور دقیقی ثبت گردد.
۴. به منظور توصیف بهتر منحنی تنش برشی- جابه جایی برشی می‌توان بعد از عبور از نقطه اوج، به جای فواصل ۰/۵ میلیمتری، در هر ۵ میلیمتر قرائت نمود. سرعت جابجایی در این حالت بسته به شرایط آزمایش ممکن است از ۰/۰۲ تا حداکثر یک میلیمتر در دقیقه تغییر کند.
۵. مقدار مقاومت ماندگار را هنگامی می‌توان تعیین نمود که نمونه تحت اثر تنش عمود ثابت در معرض برش قرار گرفته و حداقل برای چهار مجموعه قرائت متوالی در جابجایی برشی یک سانیتمتری، تنش برشی بیشتر از ۵ درصد تغییر نکند.
۶. برای به دست آوردن پوش مقاومت ماندگار می‌توان تنش قائم را افزایش یا کاهش داد وآزمایش برش را تکرار نمود و برش مطابق آنچه در بندهای بالا گفته شد انجام گیرد. تنش عمودی را بهتر است در صورت امکان افزایش داد، چرا که کاهش نیروی عمودی تا حدودی ساختار صفحه برش را بر هم می‌زند.
۷. بعد از اتمام آزمایش، لازم است که سطح برش به طور کامل توصیف گردد همچنین مساحت صفحه برش، اندازه‌گیری شده و درصورت نیاز از آن عکس گرفته شود. نمونه‌هایی از سنگ مواد پرکننده و خرده‌های حاصل از برش برای انجام آزمایش‌های شاخص برداشته می‌شوند.

۱۲-۶- محاسبات

الف) تعیین مساحت صفحه برش: ابعاد صفحه برش توسط کولیس یا میکرومتر با دقت ۰/۰۲۵ میلیمتر اندازه‌گیری شده و مساحت آن از طریق روابط هندسی محاسبه می‌گردد. چنانچه نمونه استوانه‌ای شکل به صورت مورب در جعبه برش قرار گیرد، مساحت صفحه برش از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$A = \frac{\pi D^2}{4Cos\theta}$$

A: مساحت صفحه برش

D: قطر مغزه

θ: زاویه بین صفحه برش وسطح عرضی نمونه

ب) تنش قائم و برشی از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A}$$

$$\tau = \frac{F_S}{A}$$

σ_n: تنش قائم (kPa)　　τ: تنش برشی (kPa)

F_n: نیروی قائم کل (Kn)　　F_s: نیروی برشی کل (kN)

A: مساحت صفحه برش (m^2)

قابل ذکر است که سطح اولیه براساس مقدار میانگین جابجایی برشی تصحیح می‌گردد.

پ) برای هر نمونه آزمایش، نمودارهای تنش برشی- جابجایی برشی و جابه جایی قائم- جابه جایی برشی ترسیم می‌شوند. مقدار تنش قائم اسمی مربوط به هر نمودار روی آن مشخص شده و هر گونه تغییری در مقدار این تنش در طول برش توجیه می‌گردد. مقادیر مقاومت برشی حداکثر و ماندگار به همراه تنش‌های قائم و جابجایی های مربوطه از این نمودارها استخراج می‌گردد.

ت) منحنی‌های مقاومت برشی حداکثر- تنش قائم و مقاومت برشی ماندگار- تنش قائم مربوط به تمامی آزمایش‌ها ترسیم شده و پارامترهای مقاومت برشی شامل زیر ازآنها استخراج می‌گردد.

ϕ_a: زاویه اصطکاک ناشی از لغزش روی سطح درز　　ϕ_r: زاویه اصطکاک ماندگار

c: چسبندگی سطح درزه

۱۲-۷- گزارش نتایج:

گزارش آزمایش باید شامل موارد زیر باشد:

۱- شکل و مشخصات دستگاه آزمایش و تشریح روش نمونه گیری، بسته بندی، حمل و نقل، نگهداری، آماده سازی و آزمایش نمونه ها
۲- توصیف کامل زمین شناسی سنگ بکر، صفحه برش، مواد پرکننده و خرده سنگها
۳- ارائه شکل و ترجیحا عکس از محل نمونه برداری به همراه شیب و جهت شیب صفحه برش
۴- تارخ نمونه گیری و آزمایش و تعداد نمونه های آزمایشی
۵- نوع ماده قالب گیری

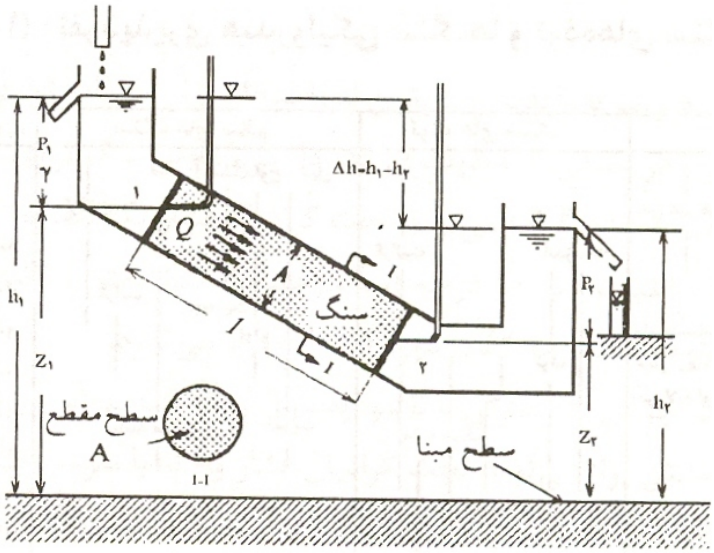
۶- توصیف صفحه برش بعد از آزمایش به همراه عکس

۷- برای هر نمونه آزمایش مجموعه ای از جداول داده ها شامل جابجایی ها و نیروها و نمودارهای تنش قائم و برشی در برابر جابجایی برشی گزارش شود.

۱۳- آزمایش تعیین نفوذپذیری

نفوذپذیری عبارت است از قابلیت سنگ برای عبور دادن مایعات از داخل خود بدون اینکه تغییری در ساختمان آن ایجاد شود. هنگامی که آب زیرزمینی از مواد متخلخل اشباع شده می‌گذرد، دبی جریان (Q) متناسب با سطح مقطع (A) وشیب هیدرولیکی $\left(i=\frac{\Delta h}{L}\right)$ خواهد بود. این قانون که اولین بار توسط هنری دارسی در سال ۱۸۶۵ عنوان شد و به عنوان دارسی مشهور است. همان‌طور که از شکل(۱۳-۱) استنباط می‌گردد، هنگامی که شیب هیدرولیکی به یک نمونه استوانه‌ای سنگ اعمال می‌شود، دبی جریان را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q = VA = kiA = k\frac{\Delta h}{L}A = K\frac{A}{\mu}\frac{\Delta P}{L}$$



شکل ۱۳-۱- جریان آب در سنگ تحت گرادیان هیدرولیکی

که در آن V سرعت، A سطح مقطع نمونه، k ضریب نفوذپذیری، i شیب هیدرولیکی، Δh اختلاف بار پیزومتریک، L طول نمونه، K نفوذپذیری ذاتی، μ گرانروی مایع و ΔP اختلاف فشار در دو انتهای نمونه است. H یا بار پیزومتریک از مجموع بار فشار و بار ارتفاع به دست می‌آید:

$$h = \frac{\rho}{\gamma} + z$$

که درآن γ وزن مخصوص مایع، ρ چگالی مایع و z ارتفاع نسبت به خط مبنا می‌باشد.

ضریب تناسب k با دیمانسیون طول بر زمان $\left(\frac{L}{T}\right)$ ضریب نفوذپذیری نامیده می‌شود و عبارت است از سرعت واحد جریان در واحد شیب هیدرولیکی و برحسب سانیتمتر بر ثانیه یا متر در روز اندازه‌گیری می‌شود. اما اگر عبور سیالی غیر

از آب مورد نظر باشد، آنگاه ضریب رسانایی هیدورلیکی با دیمانسیون $L2$ و واحد دارسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. عامل K نفوذپذیری ذاتی نیز نامیده می‌شود رابطه بین K,k به صورت زیر است:

$$k = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{Kg}{\upsilon}$$

که درآن υ گرانروی سینماتیک سیال می‌باشد.

اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری سنگ بکر در محل متشکل می‌باشد، چرا که حذف اثر درزها و شکاف‌ها امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل مقدار آن از طریق آزمایش نفوذپذیری در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمایش از روش تعیین ضریب نفوذپذیری با بار ثابت استفاده می شود.

۱۳-۱- هدف

این آزمایش به منظور تعیین ضریب نفوذپذیری آزمایشگاهی سنگ انجام می‌گیرد.

۱۳-۲- وسایل مورد نیاز

۱- محفظه نفوذپذیری: این محفظه شامل استوانه‌ای فلزی است که دارای درپوش کاملا محکم در بالا و قیف فلزی در پایین است. جنس محفظه باید از فلزی مقاوم در برابر خوردگی مثل آلومینیوم یا فولاد ضد زنگ باشد و بتواند فشارهای بالا را نیز تحمل نماید. کلیه منافذ بین استوانه، درپوش و قیف باید توسط حلقه‌های لاستیکی و پیچ و مهره کاملا آب‌بندی شود.

۲- منبع آب: می‌توان از یک لوله فلزی یا شیشه‌ای مقاوم در برابر فشار به قطر ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر و طول ۵۰۰ میلیمتر به عنوان منبع آب استفاده کرد. این منبع باید با گیجی دقیق و شیرهای لازم برای ورود و خروج آب و هوای فشرده همراه باشد.

۳- خطوط انتقال فشار: شامل هر نوع لوله پلاستیکی ، لاستیکی یا فلزی مقاوم در فشارهای بالا و کاملا آب‌بندی شده می‌باشد.

۴- سیستم تولید فشار ثابت: هر نوع سیستم تولید فشار را که بتواند فشار ثابتی به مقدار مورد نظر تولید نماید می‌توان مورد استفاده قرار داد. معمولا دامنه فشاری معادل ۵ تا ۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای سنگ‌ها کافی است. میانگین فشار اعمال به آب منبع برابر ۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. در مورد سنگ‌هایی که نفوذپذیری نسبتاً بالایی دارند می‌توان این فشار را تا ۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع کاهش داد و برای نمونه‌های نسبتاً نفوذناپذیر این مقدار تا ۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش داده می‌شود.

۵- گیج فشار با ظرفیت و دقت مناسب برای نشان دادن مقدار فشار اعمال شده روی آب منبع

۶- بورت مدرج برای اندازه‌گیری حجم آب خروجی از نمونه

۷- زمان سنج

۸- دماسنج با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد

۱۳-۳- نمونه مورد آزمایش

نمونه مورد آزمایش شامل مغزه‌های استوانه‌ای سنگ با نسبت‌های طول به قطر مختلف می‌باشد. در این آزمایش هر چه ابعاد نمونه بزرگتر باشد نتایج مطمئن‌تری به دست می‌آید. معمولا برای این آزمایش مغزه‌هایی با قطر ۱۵ سانتیمتر و نسبت ارتفاع به قطر یک با یک مناسب هستند. در صورتی که از محفظه هوک برای این آزمایش استفاده شود، ابعاد نمونه باید متناسب با ابعاد محفظه باشد. سطوح انتهایی نمونه باید کاملا صاف وپرداخت شده باشند. نمونه باید قبل از آزمایش توسط یک برس سیمی کاملا تمیز شود.

۱۳-۴- مراحل انجام آزمایش

۱- سطح نمونه پس از آماده سازی خشک شده و ابعاد آن با دقت ۰/۵ میلیمتر اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه داخل محفظه هوک قرار می‌گیرد.

۲- فضای خالی بین محفظه و نمونه را باید با استفاده از غشاء پلاستیکی و اعمال فشار جانبی روی آن آب‌بندی نمود.

۳- پس از اطمینان ازآب‌بندی شدن کامل نمونه، تجهیزات مطابق شکل سوار شده و مخزن از آب بدون هوا پر می‌گردد.

۴- در حالی که سیستم کاملا ازآب پر می‌باشد، فشار مورد نظر به مخزن اعمال می‌گردد. در همین حال مقدار آب خروجی از نمونه توسط بورت یا استوانه مدرج اندازه‌گیری می‌شود. در زمان‌های مشخصی مقدار آب خروجی از نمونه و قرائت گیج فشار یادداشت می‌شود. در ابتدای آزمایش سرعت آب ورودی به نمونه بیشتر از آب خروجی است، اما پس از گذشت زمان، این دو مقدار به حالت تعادل می‌رسند. در این حالت جریان خروجی به مقدار حداکثر خود می‌رسد. حالت جریان پایدار به زمانی اتلاق می‌شود که سرعت جریان ورودی و خروجی با هم مساوی می‌گردند.

۵- آزمایش نفوذپذیری معمولا به مدت ۱۰۰ ساعت پس از رسیدن به حالت جریان پایدار ادامه می‌یابد و حجم خروجی آب در این دوره زمانی اندازه‌گیری می‌شود.

۶- آزمایش نفوذپذیری باید ترجیحاً در دمای ۲ +۲۷ درجه سانتیگراد انجام شود. درصورتی که امکان انجام آزمایش در دمای مذکور وجود نداشته باشد، آزمایش در دمای موجود انجام وسپس نتایج تصحیح می‌گردد. معمولا به ازای هر ۵ درجه سانتیگراد افزایش دما، ضریب نفوذپذیری ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

۱۳-۵- محاسبات

ضریب نفوذپذیری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k = \frac{q}{A\,t\,i}$$

k: ضریب نفوذپذیری (cm/s) q: حجم آب خروجی از نمونه در دوره زمانی مشخص (ml)

A: سطح مقطع نمونه(cm^2) t: زمانی که در طی آن q اندازه‌گیری شده است(s)

$i = \frac{\Delta h}{L}$: شیب هیدرولیکی (نسبت ارتفاع فشار به ارتفاع نمونه، هر دو بر حسب یک واحد)