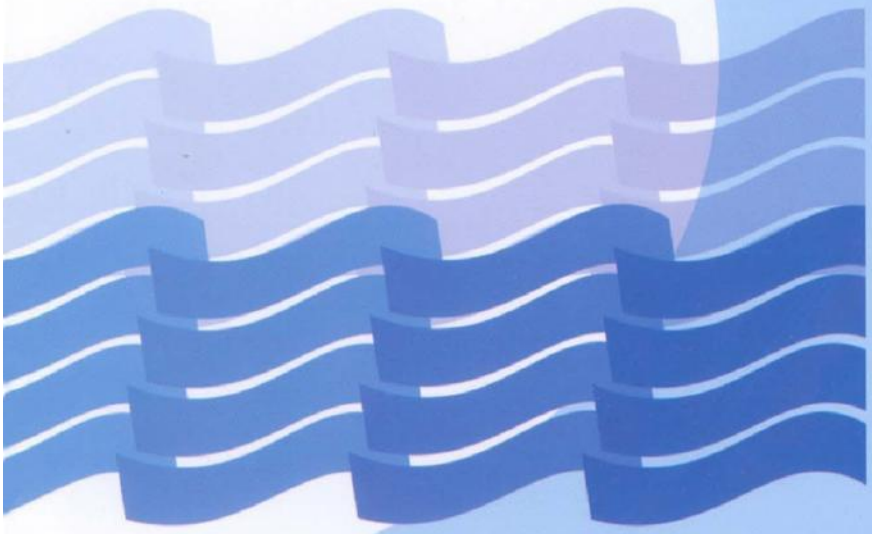
وزارت نیرو
معاونت امور آب و آبفا
دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا

پیش‌نویس

دستورالعمل انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ

(بازنگری اول)



نشریه شماره ۱۴۴ - الف

اردیبهشت ماه ۱۳۹۵

پیش‌نویس

دستورالعمل انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ

(بازنگری اول)

نشریه شماره ۱۴۴ - الف

اردیبهشت ۱۳۹۵

بسمه تعالی

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به‌کارگیری مناسب و مستمر آن‌ها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب‌ناپذیر ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی - تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب و آبفا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از این رو طرح تهیه ضوابط ومعیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو با همکاری سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور به منظور تامین اهداف زیر اقدام به تهیه استانداردهای صنعت آب و آبفا نموده است:

- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرح‌ها
- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور

تدوین استانداردهای صنعت آب و آبفا با در نظر داشتن موارد زیر صورت می‌گیرد:

- استفاده از تخصص‌ها و تجارب کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و ماخذ معتبر و استانداردهای بین المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- توجه به اصول و موازین مورد عمل سازمان ملی استاندارد ایران و سایر موسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

استانداردها ابتدا به صورت پیش‌نویس برای نظرخواهی منتشر شده و نظرات دریافتی پس از بررسی تیم تهیه‌کننده و گروه نظارت در نسخه نهایی منظور خواهد شد.

امید است کارشناسان و صاحب‌نظرانی که فعالیت آن‌ها با این رشته از صنعت آب و آبفا مرتبط می‌باشد، با توجهی که مبذول می‌فرمایند این پیش‌نویس را مورد بررسی دقیق قرارداده و با ارائه نظرات و راهنمایی‌های ارزنده خود به دفتر طرح، این دفتر را در تنظیم و تدوین متن نهایی یاری و راهنمایی فرمایند.

تهیه و کنترل«دستورالعمل انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ (بازنگری اول)» [نشریه شماره ۱۴۴- الف]

اعضای گروه تهیه‌کننده:

فرزان رفیعا	شرکت مهندسین مشاور کاوشگران	فوق‌لیسانس مهندسی معدن (مکانیک سنگ)
مصطفی شریف‌زاده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مکانیک سنگ
محمدحسین صدقیانی	دانشگاه صنعتی شریف	دکترای مکانیک سنگ
سعید غیاثی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی معدن
مرتضی قارونی نیک	دانشگاه علم وصنعت ایران	دکترای مکانیک سنگ
ابوالفضل مهین راد	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندس معدن
مهدی موسوی	دانشکده فنی - دانشگاه تهران	دکترای مکانیک سنگ
کاظم نجم	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مکانیک سنگ
مهیار نوربخش پیربازاری	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس مهندسی ژئوتکنیک
علی یوسفی	شرکت مهندسین مشاور زمین آب پی	فوق‌لیسانس مهندسی معدن و زمین‌شناسی مهندسی

شایان ذکر است مسوولیت تجمیع این دستورالعمل‌ها در سال ۱۳۷۴ به عهده آقای مهندس رفیعا بوده و در هنگام بررسی، کمیته از نظرات ارزشمند آقایان مهندس احدی منافی، مهندس خاکباز، مهندس طاهری و مهندس شفیعی‌فر برخوردار بوده است.

در ضمن، یادآور می‌گردد که آقای مهندس علی یوسفی و آقای مهندس میثم رازی‌فر در ویرایش و بازبینی نهایی این دستورالعمل، همکاری‌های بایسته را با کمیته تخصصی سد و تونل‌های انتقال در سال ۱۳۹۴ به عمل آورده‌اند.

اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی سد و تونل‌های انتقال طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):

مسعود حدیدی مود	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق لیسانس مهندسی مکانیک
رضا راستی اردکانی	دانشگاه شهید بهشتی	دکترای مهندسی عمران
سیدمهدی زندیان	شرکت مدیریت منابع آب ایران	فوق‌لیسانس مدیریت ساخت
محمدطاهر طاهری بهبهانی	شرکت مهندسین مشاور توان‌آب	فوق لیسانس مهندسی منابع آب (هیدرولیک)
تقی عبادی	وزارت نیرو- دفتر استانداردهای آب و آبفا	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های آبی
محمدرضا عسکری	شرکت مهندسین مشاور بندآب	دکترای مهندسی عمران

نجمه فولادی	طـرح تهیــه ضــوابط و معیارهــای فنــی صنعت آب کشور – وزارت نیرو	کارشناس ارشد مهندسی عمران - آب
علی یوسفی	شرکت مهندسین مشاورزمین آب‌پی	فوق لیسانس مهندسی معدن و زمین‌شناسـی مهندسی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	**۱**
فصل اول - دستورالعمل انجام آزمایش‌های تعیین شاخص‌های فیزیکی سنگ	**۳**
۱-۱- تعاریف	۵
۱-۱-۱- چگالی	۵
۱-۱-۲- چگالی خشک	۵
۱-۱-۳- تخلخل	۵
۱-۱-۴- آب محتوی (درصد رطوبت)	۶
۱-۱-۵- چگالی نسبی (جرم مخصوص)	۶
۱-۱-۶- چگالی اشباع (جرم حجمی اشباع)	۶
۱-۱-۷- درجه اشباع	۷
۱-۱-۸- نسبت پوکی	۷
۱-۱-۹- روابط بین خواص فیزیکی سنگ	۷
۱-۲- دستورالعمل آزمایش تعیین درصد رطوبت آب محتوی سنگ	۷
۱-۲-۱- اهمیت و موارد استفاده	۸
۱-۲-۲- ابزار آزمایش	۸
۱-۲-۳- مراحل انجام آزمایش	۸
۱-۲-۴- محاسبات	۹
۱-۲-۵- گزارش نتایج	۱۰
۱-۳- دستورالعمل آزمایش تعیین تخلخل و چگالی خشک سنگ	۱۰
۱-۳-۱- اهمیت و موارد استفاده	۱۱
۱-۳-۲- آزمایش با استفاده از روش اندازه‌گیری ابعاد و اشباع نمونه	۱۱
۱-۳-۳- آزمایش برپایه روش اشباع و غوطه‌وری	۱۴
۱-۳-۴- آزمایش براساس روش تغییر حجم جیوه و جرم مخصوص دانه‌ها	۱۶
۱-۳-۵- آزمایش براساس روش تغییر حجم جیوه و قانون بویل	۲۱
۱-۳-۶- نکته‌های کلی	۲۵
۱-۴- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص دوام وارفتگی	۲۵

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱-۴-۱- اهمیت و موارد استفاده	۲۶
۱-۴-۲- ابزار آزمایش	۲۶
۱-۴-۳- مراحل انجام آزمایش	۲۶
۱-۴-۴- محاسبات	۲۷
۱-۴-۵- گزارش نتایج	۲۸
۱-۴-۶- نکته‌های کلی	۲۹
۱-۵- دستورالعمل آزمایش تعیین مقاومت به سایش سنگ‌دانه‌ها با استفاده از ماشین لس‌آنجلس	۳۰
۱-۵-۱- اهمیت و موارد استفاده	۳۰
۱-۵-۲- ابزار آزمایش	۳۰
۱-۵-۳- مراحل انجام آزمایش	۳۱
۱-۵-۴- محاسبات	۳۲
۱-۵-۵- گزارش نتایج	۳۲
۱-۶- دستورالعمل آزمایش تعیین سرعت صوت در سنگ	۳۳
۱-۶-۱- اهمیت و موارد استفاده	۳۳
۱-۶-۲- روش موج صوتی با بسامد بالا	۳۴
۱-۶-۳- روش موج صوتی با بسامد پایین	۳۹
۱-۶-۴- روش فرکانس تشدید	۴۱
۱-۶-۵- گزارش نتایج	۴۲
فصل دوم- دستورالعمل انجام آزمایش‌های مکانیکی سنگ	**۴۵**
۲-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری نامحصور (تک محوری) ماده سنگ و ضرایب تغییر شکل‌پذیری آن	۴۷
۲-۱-۱- آزمایش مقاومت فشاری نامحصور (تک محوری) ماده سنگ	۴۷
۲-۱-۲- تعیین ضرایب تغییر شکل‌پذیری ماده سنگ در فشار نامحصور (تک‌محوری)	۵۰
۲-۲- دستورالعمل تعیین مقاومت کششی ماده سنگ به روش غیرمستقیم «آزمایش برزیل»	۵۷
۲-۲-۱- هدف	۵۸
۲-۲-۲- اهمیت و موارد استفاده	۵۸
۲-۲-۳- محدویت آزمایش	۵۸

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۲-۴- ابزار آزمایش	۵۸
۲-۲-۵- آماده‌سازی نمونه	۵۹
۲-۲-۶- مراحل انجام آزمایش	۶۰
۲-۲-۷- محاسبات	۶۱
۲-۲-۸- گزارش نتایج	۶۱
۲-۳- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص بار نقطه‌ای	۶۲
۲-۳-۱- هدف	۶۲
۲-۳-۲- اهمیت و موارد استفاده	۶۲
۲-۳-۳- دستگاه آزمایش	۶۳
۲-۳-۴- مراحل انجام آزمایش	۶۵
۲-۳-۵- محاسبات	۶۹
۲-۳-۶- گزارش نتایج	۷۲
۲-۳-۷- نکته‌های کلی	۷۶
۲-۴- دستورالعمل آزمایش تعیین سختی واجهشی سنگ به‌وسیله چکش اشمیت	۷۹
۲-۴-۱- هدف	۸۰
۲-۴-۲- ابزار آزمایش	۸۰
۲-۴-۳- آماده‌سازی نمونه	۸۲
۲-۴-۴- مراحل انجام آزمایش	۸۲
۲-۴-۵- محاسبات	۸۴
۲-۴-۶- گزارش نتایج	۸۴
۲-۵- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص آماس سنگ‌ها	۸۵
۲-۵-۱- هدف	۸۵
۲-۵-۲- ابزار آزمایش	۸۵
۲-۵-۳- آماده‌سازی نمونه	۸۶
۲-۵-۴- مراحل انجام آزمایش	۸۷
۲-۵-۵- محاسبات	۸۷

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۵-۶- گزارش نتایج	۸۷
۲-۶- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص کرنش آماسی در شرایط محصور شعاعی تحت فشار محوری	۸۸
۲-۶-۱- هدف	۸۸
۲-۶-۲- ابزار آزمایش	۸۸
۲-۶-۳- آماده‌سازی نمونه	۸۸
۲-۶-۴- مراحل انجام آزمایش	۸۹
۲-۶-۵- محاسبات	۸۹
۲-۶-۶- گزارش نتایج	۸۹
۲-۷- آزمایش کرنش آماسی در نمونه‌های سنگی نامحصور	۹۰
۲-۷-۱- هدف	۹۰
۲-۷-۲- ابزار آزمایش	۹۰
۲-۷-۳- آماده‌سازی نمونه	۹۱
۲-۷-۴- مراحل انجام آزمایش	۹۱
۲-۷-۵- محاسبات	۹۲
۲-۷-۶- گزارش نتایج	۹۲
۲-۸- دستورالعمل آزمایش مقاومت فشاری سه محوری سنگ	۹۳
۲-۸-۱- هدف	۹۳
۲-۸-۲- اهمیت و موارد استفاده	۹۴
۲-۸-۳- محدودیت آزمایش	۹۴
۲-۸-۴- ابزار آزمایش	۹۴
۲-۸-۵- آماده‌سازی نمونه	۹۷
۲-۸-۶- مراحل انجام آزمایش	۹۸
۲-۸-۷- محاسبات	۱۰۱
۲-۸-۸- گزارش نتایج	۱۰۲
۲-۸-۹- نکته‌های کلی	۱۰۴
۲-۸-۱۰- تفسیر و نتیجه‌گیری	۱۰۶

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل سوم- دستورالعمل انجام آزمایش‌های صحرایی مکانیک سنگ	**۱۰۷**
۳-۱- دستورالعمل اندازه‌گیری بر جای تغییر شکل سنگ توسط آزمایش بارگذاری صفحه‌ای با صفحات تغییرشکل‌پذیر	۱۰۹
۳-۱-۱- هدف	۱۰۹
۳-۱-۲- اهمیت و موارد استفاده	۱۰۹
۳-۱-۳- تجهیزات	۱۰۹
۳-۱-۴- مراحل انجام آزمایش	۱۱۱
۳-۱-۵- محاسبات	۱۱۵
۳-۱-۶- گزارش نتایج	۱۱۷
۳-۱-۷- نکته‌های کلی	۱۱۷
۳-۲- دستورالعمل اندازه‌گیری برجای تغییرشکل سنگ توسط آزمایش بارگذاری صفحه‌ای با صفحات صلب	۱۱۸
۳-۲-۱- هدف	۱۱۸
۳-۲-۲- اهمیت و موارد استفاده	۱۱۸
۳-۲-۳- تجهیزات	۱۱۹
۳-۲-۴- مراحل انجام آزمایش	۱۲۱
۳-۲-۵- محاسبات	۱۲۵
۳-۲-۶- گزارش نتایج	۱۲۶
۳-۲-۷- نکته‌های کلی	۱۲۷
۳-۳- دستورالعمل تعیین مدول‌های تغییرشکل‌پذیری سنگ با استفاده از دیلاتومتر (اتساع‌سنج) انعطاف‌پذیر و اندازه‌گیری جابه‌جایی شعاعی (روش LNEC)	۱۲۸
۳-۳-۱- هدف	۱۲۸
۳-۳-۲- اهمیت و موارد استفاده	۱۲۸
۳-۳-۳- تجهیزات	۱۲۹
۳-۳-۴- مراحل انجام آزمایش	۱۳۱
۳-۳-۵- محاسبات	۱۳۳
۳-۳-۶- گزارش نتایج	۱۳۵

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۳-۷- نکته‌های کلی	۱۳۵
۳-۴- دستورالعمل تعیین تنش برجا و مدول تغییرشکل‌پذیری با استفاده از روش جک مسطح	۱۳۷
۳-۴-۱- هدف	۱۳۷
۳-۴-۲- اهمیت و موارد استفاده	۱۳۷
۳-۴-۳- تعاریف	۱۳۸
۳-۴-۴- ملاحظات و فرضیات	۱۳۸
۳-۴-۵- تجهیزات	۱۳۹
۳-۴-۶- مراحل انجام آزمایش	۱۴۰
۳-۴-۷- محاسبات	۱۴۳
۳-۴-۸- گزارش نتایج	۱۴۷
۳-۴-۹- نکته‌های کلی	۱۴۹
۳-۵- دستورالعمل تعیین تنش بر جا در سنگ با استفاده از روش شکست هیدرولیکی	۱۵۰
۳-۵-۱- هدف	۱۵۰
۳-۵-۲- اهمیت و موارد استفاده	۱۵۰
۳-۵-۳- اصطلاحات کلیدی	۱۵۱
۳-۵-۴- روش آزمایش	۱۵۱
۳-۵-۵- فرضیات	۱۵۲
۳-۵-۶- تجهیزات	۱۵۲
۳-۵-۷- روش انجام آزمایش	۱۵۵
۳-۵-۸- محاسبات	۱۵۶
۳-۵-۹- گزارش نتایج	۱۵۹
۳-۵-۱۰- نکته‌های کلی	۱۶۱
۳-۶- دستورالعمل اندازه‌گیری تنش برجا به روش آزمایش مغزه‌گیری محیطی با استفاده از کرنش‌سنج CSIR	۱۶۲
۳-۶-۱- هدف	۱۶۲
۳-۶-۲- اهمیت و موارد استفاده	۱۶۲
۳-۶-۳- تجهیزات	۱۶۳

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۶-۴- مراحل انجام آزمایش	۱۶۴
۳-۶-۵- محاسبات	۱۶۷
۳-۶-۶- گزارش نتایج	۱۶۸
۳-۶-۷- نکته‌های کلی	۱۶۸
۳-۷- دستورالعمل تعیین مقاومت برشی مستقیم بر جای توده سنگ	۱۶۹
۳-۷-۱- هدف	۱۶۹
۳-۷-۲- اهمیت و موارد استفاده	۱۶۹
۳-۷-۳- تجهیزات	۱۶۹
۳-۷-۴- مراحل انجام آزمایش	۱۷۱
۳-۷-۵- محاسبات	۱۷۶
۳-۷-۶- گزارش نتایج	۱۷۸
۳-۷-۷- نکته‌های کلی	۱۷۹
منابع و مراجع	**۱۸۱**

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- برگه برای ارائه گزارش نتایج تعیین درصد رطوبت سنگ ۱۰
جدول ۱-۲- برگه گزارش نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر به روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد ۱۳
جدول ۱-۳- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر به‌روش اشباع و غوطه‌وری ۱۶
جدول ۱-۴- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل کل با روش تغییر حجم جیوه و جرم مخصوص دانه‌ها ۲۰
جدول ۱-۵- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر به روش تغییر حجم جیوه و قانون بویل ۲۵
جدول ۱-۶- رده‌بندی سنگ‌ها براساس شاخص دوام آبدیدگی دومین مرحله (Gamble ،۱۹۷۱) ۲۸
جدول ۱-۷- رده‌بندی سنگ‌ها براساس شاخص دوام وارفتگی دور اول (Franklin & Chandre ،۱۹۷۲) ۲۸
جدول ۱-۸- برگه ثبت آزمایش تعیین شاخص دوام وارفتگی سنگ ۲۹
جدول ۱-۹- دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات بزرگ‌تر از ۱۹ میلی‌متر ۳۱
جدول ۱-۱۰- دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچک‌تر از ۳۸ میلی‌متر ۳۱
جدول ۱-۱۱- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس ۳۳
جدول ۱-۱۲- برگه گزارش نتایج آزمایش تعیین ثابت‌های کشسان دینامیکی ۴۴
جدول ۲-۱- برگ ثبت نتیجه‌های آزمایش تعیین مقاومت فشاری نامحصور (تک‌محوری) و ضرایب تغییر شکل‌پذیری آن ۵۵
جدول ۲-۲- برگ گزارش تعیین مقاومت فشاری نامحصور (تک‌محوری) ماده سنگ و ضرایب تغییر شکل‌پذیری آن ۵۶
جدول ۲-۳- گزارش آزمایش مقاومت کششی ۶۲
جدول ۲-۴- نمونه ثبت نتایج آزمایش بار نقطه‌ای ۷۴
جدول ۲-۵- برگ ثبت آزمایش بار نقطه‌ای ۷۵
جدول ۲-۶- تصحیح نشانه‌های آزمایش چکش برای ضربه‌های غیرافقی ۸۳
جدول ۲-۷- جدول پیشنهادی برای تهیه گزارش آزمایش ۱۰۳
جدول ۳-۱- مشخصات تجهیزات و وسایل آزمایش جک مسطح ۱۴۳
جدول ۳-۲- ثبت قرائت‌ها در آزمایش جک مسطح ۱۴۴
جدول ۳-۳- نسبت تنش سطحی به فشار لازم برای برگشت جابه‌جایی‌ها برای جک مسطح با مساحت یک مترمربع ۱۴۵
جدول ۳-۴- برگه پیش‌نویس ورودی اطلاعات برای آزمایش برش برجا ۱۷۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- دستگاه تخلخل‌سنج Washburn-Buoting با روش تغییر حجم جیوه	۱۸
شکل ۱-۲- نمایی شماتیک از تخلخل‌سنج قانون بویل نوع کوبه	۲۳
شکل ۱-۳- دو نوع مدار مختلف برای انجام آزمایش	۳۵
شکل ۱-۴- نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده روی نمونه در آزمایش با موج فرکانس بالا	۳۷
شکل ۱-۵- نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده روی نمونه در آزمایش با موج فرکانس پایین	۴۰
شکل ۱-۶- نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده روی نمونه در آزمایش بسامد تشدید	۴۱
شکل ۲-۱- منحنی تنش محوری بر حسب کرنش‌های محوری و قطری	۵۳
شکل ۲-۲- روش‌های محاسبه مدول یانگ از منحنی تنش – کرنش محوری	۵۴
شکل ۲-۳- ابزار آزمایش برزیل	۵۹
شکل ۲-۴- دستگاه قابل حمل بار نقطه‌ای	۶۳
شکل ۲-۵- نمای فک و شعاع نوک کروی	۶۴
شکل ۲-۶- شرایط هندسی نمونه‌ها در آزمایش بارگذاری محوری	۶۶
شکل ۲-۷- حالت‌های شکست نمونه‌ها در آزمایش بار نقطه‌ای برای آزمایش قابل قبول و غیرقابل قبول	۶۷
شکل ۲-۸- جهت‌های بارگذاری در آزمایش نمونه	۶۸
شکل ۲-۹- روش تعین $I_{s(50)}$ از روی مجموعه نتایج به‌دست آمده روی نمونه‌های با قطر D_e متفاوت با ۵۰ میلی‌متر	۷۱
شکل ۲-۱۰- ضریب تصحیح شاخص بار نقطه‌ای بر حسب قطر مغزه معادل	۷۲
شکل ۲-۱۱- الف- تصویری از چکش اشمیت نوع L و ب- پایه‌های نگه‌دارنده	۸۱
شکل ۲-۱۲- سندان فولادی واسنجی چکش اشمیت	۸۲
شکل ۲-۱۳- نمودار وابستگی مقاومت فشاری سنگ به عنوان تابعی از تعداد سختی واجهشی اشمیت و چگالی خشک	۸۴
شکل ۲-۱۴- سلول و نمونه آماده شده برای انجام آزمایش تعیین فشار آماسی در شرایط بدون تغییر حجم	۸۶
شکل ۲-۱۵- سلول و نمونه آماده شده برای انجام آزمایش آماسی غیرمحصور	۹۰
شکل ۲-۱۶- روش‌های مختلف آزمایش مقاومت فشاری سه محوری سنگ	۹۳
شکل ۲-۱۷- سه نوع مختلف از محفظه سه محوری و اجزای آن‌ها	۹۵
شکل ۲-۱۸- شمای ساده دستگاه آزمایش سه محوری	۹۶
شکل ۲-۱۹- نمودار شماتیک نتیجه‌های آزمایش به روش ب (شکست چند مرحله‌ای)	۹۹
شکل ۲-۲۰- نمودار شماتیک نتیجه آزمایش به روش ج (شکست پیوسته)	۱۰۰
شکل ۲-۲۱- نمودار شماتیک پوش‌های مقاومت نهایی و پسماند	۱۰۱
شکل ۳-۱- نحوه قرارگیری تجهیزات در داخل فضای زیرزمینی در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای	۱۱۰

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۳-۲- نمونه‌ای از نحوه تعیین موقعیت نقاط درگیر نسبت به شرایط زمین‌شناسی توده سنگ در گمانه ابزاربندی	۱۱۲
شکل ۳-۳- تغییر شکل سطح سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری	۱۱۳
شکل ۳-۴- تغییر شکل سطحی سنگ برحسب زمان در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای	۱۱۴
شکل ۳-۵- جابه‌جایی محوری برحسب عمق، نسبت به عمیق‌ترین نقطه درگیر، تحت فشار ۶/۹ مگاپاسکال	۱۱۵
شکل ۳-۶- نحوه قرارگیری تجهیزات در آزمون بارگذاری صفحه‌ای صلب	۱۱۹
شکل ۳-۷- صفحات بارگذاری صلب با قطر ۱۲ اینچ	۱۲۱
شکل ۳-۸- ابعاد مجاز سطح سنگ و بالشتک بتنی	۱۲۲
شکل ۳-۹- تغییر شکل سطح سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری	۱۲۴
شکل ۳-۱۰- تغییر شکل سطحی سنگ برحسب زمان در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای صلب	۱۲۵
شکل ۳-۱۱- دیلاتومتر نوع LNEC	۱۳۰
شکل ۳-۱۲- منحنی‌های فشار در مقابل اتساع مربوط به چهار سنجش‌گر نصب شده در یک دیلاتومتر LNEC	۱۳۳
شکل ۳-۱۳- آرایش تجهیزات اندازه‌گیری جک مسطح در اطراف شکاف	۱۴۱
شکل ۳-۱۴- اصطلاحات هندسی در روش جک مسطح	۱۴۳
شکل ۳-۱۵- نمونه‌ای از نتایج فشار – زمان، میزان جریان – زمان در ضمن شکست هیدرولیکی	۱۵۲
شکل ۳-۱۶- طرح شماتیک از مجموعه گمانه و تجهیزات سطحی برای شکست هیدرولیکی	۱۵۴
شکل ۳-۱۷- تجهیزات پیشنهادی داخل گمانه‌ای و سطحی برای اعمال فشار در شکست هیدرولیکی	۱۵۶
شکل ۳-۱۸- الف- نحوه قرارگیری سه دسته کرنش‌سنج در پیرامون محفظه ب- یک دسته کرنش‌سنج تا چهار عددی	۱۶۴
شکل ۳-۱۹- سلول کرنش سه محوره‌ی CSIR	۱۶۵
شکل ۳-۲۰- مراحل مختلف انجام آزمایش مغزه‌گیری محیطی	۱۶۶
شکل ۳-۲۱- نمایش تجهیزات مورد نیاز بر حسب محل قرارگیری در آزمایش برش برجا	۱۷۰
شکل ۳-۲۲- نحوه عبور محور اعمال نیرو از مرکز سطح در آزمایش برش برجا	۱۷۱
شکل ۳-۲۳- منحنی تحکیم بار عمودی	۱۷۳
شکل ۳-۲۴- منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی و جابه‌جایی عمودی - جابه‌جایی برشی در آزمایش برش برجا	۱۷۶
شکل ۳-۲۵- پوش گسیختگی نهایی و ماندگار در آزمایش برجا	۱۷۸

مقدمه

علم مکانیک سنگ در مقایسه با سایر علوم مهندسی نسبتا جوان می‌باشد. آزمایش‌های مکانیک سنگ که با انجام آن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ به‌دست می‌آید نیاز به هماهنگی و شبیه‌سازی در مراحل اجرایی دارد. در اولین کنگره بین‌المللی مکانیک سنگ این نیاز احساس شد و کمیته‌ای با هدف استاندارد کردن آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی تشکیل شد. پس از چندین سال تلاش، منجر به چاپ اولین مجموعه درخصوص روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای آزمایش و رفتارسنجی سنگ‌ها در سال ۱۹۸۱ شد. این تلاش همچنان ادامه دارد.

- هدف

انجام پروژه‌های عمرانی در سنگ، در کشور ایران در حال افزایش است. بنابرین مطالعات ژئوتکنیکی برای ساخت سازه در سطح و درون سنگ افزایش یافته است. ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه نمونه، اجرای آزمایش و گزارش آزمایش امری ضروری است، تا سفارش دهنده آزمایش (کارفرما)، مجری آزمایش (پیمانکار) و مفسر نتایج آزمایش (مشاور) از یک روش مشخص تبعیت کنند.

- دامنه کاربرد

تهیه دستورالعمل استاندارد انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ اولین گام برای هماهنگی فعالیت‌های اجرایی خواهد بود. در تهیه این دستورالعمل از جمع‌بندی دستورالعمل‌های بین‌المللی و کشوری استفاده شده است تا دستورالعملی یکسان برای کشور منتشر شود.

فصل ۱

دستورالعمل انجام آزمایش‌های تعیین شاخص‌های فیزیکی سنگ

۱-۱- تعاریف

باتوجه به این‌که در این دستورالعمل خواص و شاخص‌های فیزیکی در سنگ مانند: چگالی، چگالی خشک، تخلخل، رطوبت، چگالی نسبی، چگالی اشباع، درجه اشباع و نسبت پوکی مورد بحث قرار گرفته است، بنابرین ابتدا تعاریف آن‌ها و سپس روابط بین این خواص فیزیکی شرح داده شده است.

۱-۱-۱- چگالی

جرم واحد حجم سنگ را چگالی[۱] (جرم حجمی) گویند. این مقدار تابعی از ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و مقدار آب موجود در سنگ است.

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{Ms + Mw}{V} \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه:

ρ = چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)،

M = جرم کل نمونه سنگ (کیلوگرم)،

Ms = جرم اجزای جامد نمونه سنگ (کیلوگرم)،

Mw = جرم آب موجود در منافذ (کیلوگرم)،

V = حجم کل نمونه سنگ (مترمکعب).

۱-۱-۲- چگالی خشک

جرم واحد حجم سنگ در حالت خشک را گویند.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه ρ_d چگالی خشک (کیلوگرم بر مترمکعب) است.

۱-۱-۳- تخلخل

حاصل تقسیم حجم منافذ به حجم کل نمونه را که به صورت درصد بیان می‌شود، تخلخل گویند.

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \qquad (۳-۱)$$

در این رابطه:

n = تخلخل،

۱- در نشریه ۵۶- ن (اسفند ۱۳۷۴) طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، معادل واژه Density «جرم حجمی» گزیده شده است.

V_v = حجم منافذ در نمونه،

v = حجم نمونه.

۱-۱-۴- آب محتوی (درصد رطوبت)[۱]

نسبت جرم آب موجود در منافذ به جرم کلی نمونه کاملا خشک شده را، آب محتوی یا درصد رطوبت گویند، (بر حسب درصد)

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \qquad (۴-۱)$$

در این رابطه:

W = درصد آب موجود در نمونه یا درصد رطوبت است.

۱-۱-۵- چگالی نسبی (جرم مخصوص)[۲]

نسبت چگالی نمونه به چگالی آب در دمای $4^{\circ}C$ را چگالی نسبی (جرم مخصوص) گویند.

$$d = \frac{\rho}{\rho_w} \qquad (۵-۱)$$

در این رابطه:

d = چگالی نسبی (بدون بعد)،

ρ_w = چگالی آب در دمای $4^{\circ}C$.

۱-۱-۶- چگالی اشباع (جرم حجمی اشباع)

جرم واحد حجم سنگ در حالت اشباع را چگالی اشباع گویند.

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_v \rho_w}{V} \qquad (۶-۱)$$

در این رابطه:

ρ_{sat} = چگالی اشباع (کیلو گرم بر مترمکعب).

۱- در نشریه ۵۶- ن (اسفند ۱۳۷۴) طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، معادل ترکیب واژه Water Content «درصد رطوبت» گزیده شده است.

۲- در نشریه ۵۶- ن (اسفند ۱۳۷۴) طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، معادل ترکیب واژه Relative Density «جرم حجمی نسبی – تراکم نسبی» گزیده شده است. ISRM این ترکیب واژه را با Specific Gravity مترادف می‌داند.

۱-۱-۷- درجه اشباع

نسبت حجم آب موجود در منافذ به حجم منافذ را درجه اشباع (درصد آب جذب شده) گویند.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \qquad (۷-۱)$$

در این رابطه:

S_r = درجه اشباع، بدون بعد و برحسب درصد است.

۱-۱-۸- نسبت پوکی

نسبت حجم منافذ به حجم جامد نمونه را نسبت پوکی یا شاخص پوکی گویند.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad (۸-۱)$$

در این رابطه:

e = نسبت پوکی بدون بعد،

V_s = حجم جامد نمونه (مترمکعب)

۱-۱-۹- روابط بین خواص فیزیکی سنگ

خواص فیزیکی تعریف شده در بالا، با یکدیگر ارتباط داشته و در صورت مشخص بودن تعدادی از آن‌ها، سایر خواص قابل محاسبه خواهد بود. در صورت مشخص شدن مقادیر سه خاصیت فیزیکی یعنی آب محتوا، چگالی خشک و تخلخل، می‌توان دیگر خواص را با روابط زیر تعیین کرد:

$$S_r = \frac{100 W \rho_d}{n \rho_w} \qquad (۹-۱)$$

$$e = \frac{n}{100 - n} \qquad (۱۰-۱)$$

$$\rho = (1 + \frac{W}{100})\rho_d \qquad (۱۱-۱)$$

۱-۲- دستورالعمل آزمایش تعیین درصد رطوبت آب محتوی سنگ

با انجام این آزمایش نسبت جرم آب موجود در منافذ یک نمونه سنگ به جرم کاملا خشک شده همان نمونه بر حسب درصد به‌دست خواهد آمد. دستورالعمل این آزمایش براساس روش پیشنهادی ISRM [3] و استاندارد ASTM D2216 [2] تهیه شده است.

۱-۲-۱- اهمیت و موارد استفاده

این آزمایش را می‌توان با استفاده از نمونه استاندارد و یا نمونه به صورت قلوه‌سنگ (با اشکال متفاوت) انجام داد. با انجام این آزمایش میزان رطوبت نمونه تعیین خواهد شد. به‌طور کلی رفتار مکانیکی سنگ بستگی به میزان رطوبت آن‌ها دارد. این تاثیر در سنگ‌های مختلف، بسته به ترکیب کانی‌شناسی و بافت آن‌ها بسیار متغیر است. بنابراین بررسی و رفتار مکانیکی سنگ در شرایطی میسر است که رابطه بین آب محتوا و ویژگی مکانیکی سنگ خاص (مثلا مقاومت فشاری تک محوری) با انجام آزمون‌های مکانیکی در شرایط مختلف از رطوبت تعریف شده باشد. این دستورالعمل برای تعیین درصد رطوبت سنگ‌ها تهیه شده ولی برای سنگ‌هایی که دارای مقادیر قابل توجهی از کانی‌های هالوزیت، مونت موریلونیت و انیدریت بوده و یا مقدار زیادی املاح محلول (مانند کلرورسدیم) و یا مواد آلی دارند، چندان مناسب نیست [۱].

۱-۲-۲- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- گرم‌خانه[1] دارای تهویه که توان تولید دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد با دقتی معادل $\pm 3^{\circ}C$ و ثابت نگهداشتن آن در طول زمان حداقل ۲۴ ساعت باشد،
- ترازو با دقتی معادل ۰/۰۱ درصد وزن نمونه،
- ظرف آلومینیومی با درپوشی کاملا بسته که در برابر زنگ‌زدگی مقاوم بوده و در اثر استفاده مکرر وزن آن کاسته نشود،
- دسیکاتور (همراه با مواد خشک‌کن) با ابعاد مناسب برای نگهداشتن نمونه در طول مدت سرد شدن.

۱-۲-۳- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این روش آزمایش اجرا می‌شود:

- ابتدا ظرف فلزی و در آن‌را کاملا تمیز و خشک کرده و آن‌را با ترازو کرده و این وزن را A می‌نامیم.
- سپس از بلوک سنگ مورد آزمایش ده قطعه به وزن هر قطعه حدود ۵۰ گرم جدا می‌نماییم. درصورتی‌که نمونه بلورین یا کریستاله باشد اندازه قطعات باید حداقل ۱۰ برابر بزرگ‌ترین بعد کریستال‌های نمونه باشد. باید دقت شود بلوک‌ها در مکانی انبار شود که میزان رطوبت طبیعی بلوک بیش از $\pm ۰/۱٪$ تغییر نکند.
- ۱۰ قطعه نمونه تهیه شده را در داخل ظرف فلزی قرار داده و سپس در آن‌را می‌بندیم. ظرف را همراه با قطعات توزین کرده و این مقدار را B می‌نامیم.
- در مرحله بعد در ظرف را برداشته و ظرف فلزی را همراه با نمونه‌ها در داخل گرم‌خانه قرار می‌دهیم. درجه

1- Oven

حرارت گرم‌خانه را در حدود ۱۰۵ درجه ثابت نگه می‌داریم تا نمونه‌ها کاملا خشک شوند. پس از خشک شدن نمونه‌ها، ظرف فلزی را از گرم‌خانه خارج و در آن‌را روی آن قرار می‌دهیم. این مجموعه را وزن کرده و این مقدار را C می‌نامیم. با انجام این کار مراحل اجرایی آزمایش به پایان می‌رسد.

یادآوری‌ها

یادآوری ۱- توزین نمونه در حالت خشک و تر باید با یک ترازو و یک حساسیت انجام گیرد.

یادآوری ۲- نمونه گرم باعث چرخش جریان هوای گرم و درنتیجه ایجاد خطا در توزین می‌شود.

یادآوری ۳- نمونه داخل گرم‌خانه زمانی به وزن ثابت رسیده است که پس از دوبار توزین به فاصله نیم‌ساعت، کاهش جرم کم‌تر از ۰/۱ درصد باشد.

یادآوری ۴- برخی مواد آلی ممکن است در دمای استاندارد ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان یاد شده تجزیه شوند. همچنین برخی کانی‌ها مانند ژیپس ممکن است در این دما آب از دست داده و به انیدریت تبدیل شوند. در چنین مواردی بهتر است که نمونه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و یا در دمای اتاق و در دسیکاتوری که دارای مواد رطوبت‌گیر خاص می‌باشد، خشک شود.

یادآوری ۵- در مورد سنگ‌هایی که آب درون آن‌ها دارای مواد محلول (مثل نمک موجود در رسوبات دریایی) است، نتایج به‌دست آمده از این روش قابل اطمینان نیست، زیرا جرم جامد حل شده در آب، پس از خشک شدن نمونه به جرم خشک آن افزوده می‌شود. در چنین مواردی یا باید با روشی خاص این نهشته‌ها از سنگ جدا شود و یا این‌که مقدار آن محاسبه شده و نتایج نهایی بر آن اساس تصحیح شود.

یادآوری ۶- در این روش برای خشک شدن کامل نمونه، مدت زمان زیادی لازم است.

۱-۲-۴- محاسبات

درصد رطوبت با آب محتوی نمونه سنگی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W = \frac{M_w}{Ms} \times 100 = \frac{B - C}{C - A} \times 100 \qquad (۱-۱۲)$$

که در آن:

Mw = جرم آب موجود در سنگ (گرم)،

Ms = جرم بخش جامد سنگ (گرم)،

W = درصد رطوبت (درصد)،

B = مجموع وزن نمونه تر و ظرف (گرم)،

C = مجموع وزن نمونه خشک و ظرف (گرم)،

A = وزن ظرف خالی و درپوش (گرم).

یادآوری:

دامنه تغییرات درصد رطوبت سنگ‌های مختلف، از صفر برای سنگ‌های خشک یا بسیار متراکم تا ۱۷ درصد برای سنگ‌های بسیار متخلخل، مانند گل سفید و توف در حالت اشباع متغیر است.

۱-۲-۵- گزارش نتایج

درصد رطوبت با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌شود. نحوه نمونه‌گیری و نگهداری سنگ و کلیه تدابیری که برای ثابت نگه داشتن آب محتوی طبیعی نمونه صورت گرفته است در گزارش قید می‌شود. درصورتی‌که نمونه در دمایی به جز دمای یاد شده در این دستورالعمل خشک شده باشد، باید در گزارش قید شود.

نمونه‌ای از برگه گزارش نتایج این آزمایش در جدول (۱-۱) ارائه شده است.

جدول ۱-۱- برگه برای ارائه گزارش نتایج تعیین درصد رطوبت سنگ

آزمایش تعیین درصد رطوبت سنگ						
شماره کار:				**تاریخ نمونه‌گیری:**		
نام پروژه:				**تاریخ انجام آزمایش:**		
متقاضی:				**شماره نمونه:**		
ردیف	**شماره ظرف**	**وزن ظرف (گرم)**	**وزن ظرف + نمونه تر (گرم)**	**وزن ظرف + نمونه خشک (گرم)**	**وزن آب (گرم)**	**درصد رطوبت (در صد)**
میانگین درصد آب محتوی:				آزمایش کننده:		

۱-۳- دستورالعمل آزمایش تعیین تخلخل و چگالی خشک سنگ

این آزمایش به‌منظور اندازه‌گیری مقدار تخلخل و چگالی خشک نمونه سنگ انجام می‌شود. با این آزمایش همچنین می‌توان حداکثر درصد جذب آب (اشباع) را در نمونه سنگی به‌دست آورد. دستورالعمل آزمایش براساس روش پیشنهادی ISRM[3] تهیه شده است.

۱-۳-۱- اهمیت و موارد استفاده

چگالی سنگ بستگی به وجود منافذ، درزه‌ها، شکاف‌ها و فضاهای باز در سنگ دارد. همچنین سن سنگ نیز رابطه‌ای مستقیم با چگالی آن دارد. هوازدگی باعث کاهش چگالی سنگ خواهد شد. اگرچه چگالی دانه‌ای بیش‌تر کانی‌ها به‌هم نزدیک است، ولی اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیش‌تر مربوط به تخلخل آن‌ها است، بنابراین ارتباط مستقیمی بین چگالی و تخلخل وجود دارد. تخلخل سنگ معمولا به دو صورت «کلی» و «موثر» در نظر گرفته می‌شود. اگر تنها روزنه‌های باز و مرتبط به یکدیگر مورد نظر باشد، «تخلخل موثر» به‌دست می‌آید. با انجام این آزمایش می‌توان سایر خواص مرتبط را نیز به‌دست آورد.

از آن‌جا که نمونه‌های سنگی تحت اثر آب و یا خشک شدن رفتار مختلفی از خود نشان می‌دهند و از سوی دیگر ممکن است نمونه‌ها دارای شکل هندسی مشخص و یا نامشخص باشند، بنابرین برحسب وضعیت نمونه روش‌های آزمایش متفاوت است. آزمایش استاندارد به چهار روش زیر انجام می‌شود:

- اندازه‌گیری ابعاد و تکنیک اشباع،
- اشباع و غوطه‌وری،
- تغییر حجم جیوه و جرم مخصوص دانه‌ها،
- د- تغییر حجم جیوه و قانون بویل [۱].

۱-۳-۲- آزمایش با استفاده از روش اندازه‌گیری ابعاد و اشباع نمونه

این آزمایش برای اندازه‌گیری تخلخل، چگالی خشک و خواص وابسته در نمونه‌های سنگ دارای شکل هندسی منظم به‌کار می‌رود. این روش تنها برای نمونه‌هایی باید به‌کار گرفته شود که شکننده نبوده، دارای چسبندگی بین ذرات در حدی باشد که بتوان با ماشین برش و سایش آن‌ها را شکل داد، در ضمن در اثر خشک شدن در گرم‌خانه و یا غوطه‌وری در آب دچار تورم و یا فروپاشی قطعات نشود. این روش برای مواردی که نمونه‌های با شکل منظم برای سایر آزمایش‌ها آماده می‌شود، توصیه می‌شود.

۱-۳-۲-۱- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

الف- گرم‌خانه با توان تولید دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با دقتی معادل ۳± درجه سانتی‌گراد و ثابت نگهداشتن آن در طول زمان حداقل ۲۴ ساعت،

ب- دسیکاتور برای نگهداری نمونه در طول مدت سرد شدن،

ج- ترازو با ظرفیت کافی و دقتی معادل ۰/۰۱ درصد جرم نمونه،

د- سامانه اشباع در خلا که بتوان نمونه را تحت خلا کم‌تر از ۸۰۰ پاسکال (۶ تور[1]) برای مدت دست کم یک ساعت در آن به حالت غوطه‌ور درآورد.

۱-۳-۲-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این روش آزمایش اجرا می‌شود:

الف- حداقل ۳ نمونه معرف از سنگ با استفاده از ابزار ماشینی تا حد امکان به شکل منشور یا استوانه قائم آماده می‌شود. ابعاد هریک از نمونه‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که یا دست‌کم جرم ۵۰ گرم برای نمونه به‌دست آید (برای سنگ‌هایی با چگالی متوسط، مکعبی به ضلع ۲۷ میلی‌متر دارای جرم کافی خواهد بود) و یا کم‌ترین بعد آن ۱۰ برابر اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه در سنگ باشد. از بین این دو مقدار، آن‌که بزرگ‌تر است ملاک تهیه نمونه خواهد بود.

ب- هریک از ابعاد نمونه به‌وسیله‌ی کولیس با دقتی معادل ۰/۱ میلی‌متر چندبار اندازه‌گیری شده و برای هر بعد میانگین آن‌ها درنظر گرفته می‌شود. حجم کل نمونه (V) با توجه به شکل نمونه از روش‌های هندسی تعیین می‌شود.

ج- نمونه را داخل آب و در خلا با بیشینه ۸۰۰ پاسکار (۶ تور) به مدت دست کم یک ساعت قرار داده تا اشباع شود. برای رها شدن هوای محبوس هرازچندگاه نمونه باید در آب جابه‌جا شود،

د- سطح نمونه پس از خروج از آب توسط پارچه مرطوب به گونه‌ای خشک می‌شود که هیچ ذره‌ای از سنگ جدا نشود و سپس جرم نمونه‌ی اشباع با سطح خشک شده (Msat) اندازه‌گیری می‌شود،

هـ- نمونه در گرم‌خانه با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزنی ثابت باقی می‌ماند، سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دسیکاتور خنک شده و جرم جامد یا خشک نمونه (Ms) اندازه‌گیری می‌شود،

و- مراحل بالا برای تک‌تک نمونه‌ها تکرار می‌شود.

۱-۳-۲-۳- محاسبات

چگالی خشک و تخلخل موثر نمونه از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

$$V_v = \frac{Msat - Ms}{\rho_w} \qquad (۱-۱۳)$$

$$\rho_d = \frac{Ms}{V} \qquad (۱-۱۴)$$

$$n_e = \frac{V_v}{V} \times 100\% \qquad (۱-۱۵)$$

1- Torr

که در آن‌ها:

V = حجم کل (سانتی‌مترمکعب)،

V_v = حجم منافذ موثر (سانتی‌مترمکعب)،

ρ_d = چگالی خشک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)،

ρ_w = چگالی آب مورد استفاده،

n_e = تخلخل موثر (درصد)،

Msat = جرم اشباع با سطح خشک شده (گرم)،

Ms = جرم خشک نمونه (گرم).

نکته: تخلخل موثر سنگ‌ها از صفر برای سنگ‌های کاملا سخت و فشرده تا بیش از ۵۰ درصد برای سنگ‌های با حفره‌های زیاد مثل گل سفید یا سنگ‌های آذرین بیرونی تغییر می‌کند.

۱-۳-۲-۴- گزارش نتایج

گزارش باید شامل موارد زیر باشد:

نتایج به‌دست آمده از دست کم سه نمونه‌ی مجزا از هر نوع سنگ و همچنین مقادیر میانگین محاسبه شده آن‌ها باید گزارش شود. مقادیر چگالی با دقت ۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب (معادل ۰/۰۰۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب) و تخلخل موثر با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌شود. همچنین در گزارش باید قید شود که حجم کل به روش اندازه‌گیری ابعاد محاسبه شده و حجم منافذ توسط روش اشباع با آب به‌دست آمده است. نمونه‌ای از برگه گزارش این آزمایش در جدول (۱-۲) ارائه شده است.

جدول ۱-۲- برگه گزارش نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر به روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد

آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر سنگ **روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد**					
شماره کار:				**شماره نمونه:**	
نام پروژه:				**عمق:**	
متقاضی:				**شماره گمانه:**	
شماره	No	۱	۲	۳	
طول نمونه (سانتی‌متر)	L				
قطر یا عرض (سانتی‌متر)	D				
حجم نمونه (سانتی‌مترمکعب)	V				
جرم اشباع با سطح خشک شده (گرم)	M_{sat}				
حجم منافذ (سانتی‌مترمکعب)	V_v				میانگین
چگالی خشک (سانتی‌مترمکعب)	ρ_d				
تخلخل موثر (درصد)	n_e				
نوع سنگ:					
توضیحات:					
تاریخ آزمایش:				آزمایش کننده:	

۱-۳-۳- آزمایش برپایه روش اشباع و غوطه‌وری[1]

هدف از انجام این آزمایش، تعیین تخلخل، چگالی خشک و دیگر خواص وابسته به آن است. این روش برای نمونه‌های سنگی با اشکال هندسی منظم، نامنظم و یا قطعات سنگی استفاده می‌شود. همچنین نمونه نباید ترد و شکننده باشد و بدون تورم بوده و به‌دلیل قرار گرفتن در آب یا گرم‌خانه تجزیه و متلاشی نشود.

۱-۳-۳-۱- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- گرم‌خانه با قابلیت تولید و نگه‌داشتن درجه حرارت۱۰۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۳ ± درجه سانتی‌گراد برای مدت زمانی دست کم ۲۴ ساعت،
- دسیکاتور با مواد خشک‌کن برای نگهداری نمونه در طول مدت سرد شدن،
- ترازو با ظرفیت کافی و دقتی معادل ۰/۰۱ درصد وزن نمونه،
- سامانه اشباع در فشار خلا کم‌تر از ۸۰۰ پاسکال (۶ تور)،
- وان آب و یک سبد سیمی برای غوطه‌ور کردن نمونه که سبد با یک سیم نازک به رکاب ترازو آویزان می‌شود،
- ظرف فلزی با درپوش محکم از جنس مقاوم در برابر خوردگی، زنگ زدگی و تغییر وزن.

۱-۳-۳-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- دست کم ۱۰ قطعه نمونه معرف سنگ برای این آزمایش با اشکال هندسی منظم یا نامنظم که هریک وزنی کم‌تر یا معادل ۵۰ گرم یا ابعادی دست کم ۱۰ برابر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه (هرکدام که بزرگ‌تر باشد) داشته باشند، تهیه می‌شود،

ب- نمونه با آب شسته می‌شود تا گرد و غبار سطحی آب برطرف شود،

ج- نمونه در داخل آب و در خلا کم‌تر از ۸۰۰ پاسکال (۶ تور) به مدت دست کم یک ساعت قرار داده می‌شود تا اشباع گردد. در این مدت باید نمونه را به طور متناوب حرکت داد تا حباب‌های هوای آن خارج شود.

د- نمونه را به داخل سبد گذاشته و آن‌ها را وارد وان آب کرده در این حالت سبد با سیم به ترازو آویزان می‌شود. جرم اشباع غوطه‌ور سبد و نمونه با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود. جرم اشباع – غوطه‌ور نمونه (Msub) از تفاضل جرم اشباع – غوطه‌ور سبد و نمونه از جرم غوطه‌ور سبد به‌دست می‌آید،

هـ- ظرف و درپوش آن کاملا تمیز و خشک شده و جرم آن (A) اندازه‌گیری می‌شود،

1- Saturation and Buoyancy Techniques

و- نمونه از داخل وان آب خارج شده و سطح آن با دستمال مرطوب خشک می‌شود. باید مراقب بود که تنها آب سطحی خشک شده و هیچ ذره‌ای از سنگ جدا نشود. نمونه در ظرف قرار گرفته و جرم آن (B) اندازه‌گیری می‌شود،

ز- نمونه در درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزنی ثابت خشک شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دسیکاتور قرار داده تا خنک شود. جرم نمونه خشک و ظرف اندازه گرفته می‌شود (C)،

ح- مراحل بالا برای تک‌تک نمونه‌ها تکرار می‌شود.

۱-۳-۳-۳- محاسبات

چگالی خشک و تخلخل موثر نمونه‌ها از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

$$Msat = B - A \qquad (۱۶-۱)$$

$$Ms = C - A \qquad (۱۷-۱)$$

$$V = \frac{Msat - Msub}{\rho_W} \qquad (۱۸-۱)$$

$$V_v = \frac{Msat - Ms}{\rho_w} \qquad (۱۹-۱)$$

$$\rho_d = \frac{Ms}{V} \qquad (۲۰-۱)$$

$$n_e = \frac{V_v}{V} \times V \qquad (۲۱-۱)$$

که در آن‌ها:

V = حجم کل (سانتی‌مترمکعب)،

V_v = حجم منافذ (سانتی‌مترمکعب)،

ρ_d = چگالی خشک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)،

n_e = تخلخل موثر (درصد)،

Ms = جرم خشک نمونه (گرم)،

ρ_w = چگالی آب مورد استفاده،

$Msub$ = جرم اشباع غوطه‌ور نمونه (گرم)،

$Msat$ = جرم اشباع با سطح خشک شده (گرم)،

B = جرم اشباع نمونه + ظرف (گرم)،

C = جرم خشک نمونه + ظرف (گرم)،

A = جرم ظرف (گرم).

۱-۳-۳-۴- گزارش نتایج

گزارش باید شامل موارد زیر باشد:

گزارش باید شامل مقادیر چگالی خشک و تخلخل موثر نمونه‌ها باشد. مقدار چگالی با دقت ۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۰/۰۰۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب) و مقدار تخلخل با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌شود. در گزارش باید قید شود که حجم کل با روش غوطه‌وری و حجم منافذ با روش اشباع در آب به‌دست آمده است. یک نمونه برگه مربوط به گزارش و ثبت نتایج این آزمایش در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول ۱-۳- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر به‌روش اشباع و غوطه‌وری

آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر سنگ به روش اشباع و غوطه‌وری												
شماره کار:											**شماره نمونه:**	
نام پروژه:											**عمق:**	
متقاضی:											**شماره گمانه:**	
پارامتر	واحد	نمونه رابطه و نماد										
جرم اشباع غوطه‌ور سبد + نمونه	گرم	D										
جرم اشباع غوطه‌ور سبد	گرم	E										
جرم اشباع غوطه‌ور نمونه	گرم	$F = D - E$										
جرم ظرف	گرم	A										
جرم ظرف + نمونه اشباع با سطح خشک	گرم	B										
جرم نمونه اشباع با سطح خشک	گرم	$Msat = B - A$										
جرم نمونه خشک + ظرف	گرم	C										
جرم نمونه خشک	گرم	$Ms = C - A$										
حجم کل	سانتی‌مترمکعب	$V = \frac{Msat - Msub}{\rho_w}$										
حجم منافظ	سانتی‌مترمکعب	$V_v = \frac{Msat - Ms}{\rho_w}$										
چگالی خشک	گرم بر سانتی‌مترمکعب	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$										
تخلخل موثر	درصد	$n_e = \frac{V_v}{V} \times 100$										

۱-۳-۴- آزمایش براساس روش تغییر حجم جیوه و جرم مخصوص دانه‌ها[1]

این روش برای آن گروه از نمونه‌های سنگی که در آب متورم، تجزیه و یا متلاشی می‌شوند، مناسب است. نمونه‌ها می‌توانند با شکل هندسی منظم و یا نامنظم و یا قطعات سنگی باشند. لازم به یادآوری است با انجام این آزمایش تخلخل کلی نمونه سنگی به‌دست می‌آید.

1- Mercury Displacement & Grain Specific Gravity Techniques

۱-۳-۴-۱- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- گرم‌خانه، با قابلیت تولید و نگه داشتن درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۳ ± درجه سانتی‌گراد در دوره زمانی حداقل ۲۴ ساعت و مجهز به سامانه تهویه مکشی و تخلیه به هوای آزاد،
- دسیکاتور با مواد خشک‌کن برای نگهداری نمونه در طول مدت سرد شدن،
- یک ترازو با ظرفیت کافی و دقت معادل ۰/۰۰۱ گرم برای تعیین وزن دانه‌ها (نمونه پودر شده) و یک ترازو با دقت ۰/۰۱ درصد وزن نمونه برای توزین نمونه‌ی پودر نشده،
- سامانه اشباع نمونه در خلا کم‌تر از ۸۰۰ پاسکال (۶ تور)،
- وسیله اندازه‌گیری حجم با روش تغییر حجم جیوه با توان اندازه‌گیری حجم نمونه با دقت ۰/۵ درصد (شکل ۱-۱)،
- یک فلاسک حجمی واسنجی شده (پیکنومتر) به همراه درپوش معمولا با ظرفیت ۵۰ سانتی‌مترمکعب،
- برس مویی نرم،
- ظرف فلزی با درپوش از جنس مقاوم در برابر خوردگی برای قرار دادن نمونه در آن.

۱-۳-۴-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- ابتدا دست کم ۱۰ قطعه نمونه معرف سنگ به‌نحوی تهیه می‌شود که شکل و اندازه آن‌ها متناسب با ظرفیت دستگاه اندازه‌گیری حجم قطعه سنگ باشد. هر قطعه باید دست کم ۵۰ گرم وزن یا ابعادی معادل ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه داشته باشد (هرکدام که بیش‌تر است). نمونه‌های شکننده یا متورم شونده باید به‌گونه‌ای نمونه‌گیری و نگهداری شوند که درصد آب محتوی آن‌ها پیش از انجام آزمایش بیش از یک درصد مقدار طبیعی آن تغییر نکند،

ب- نمونه باید طوری با برس تمیز شود که کلیه ذرات سست آن جدا شود. سپس حجم آن (V) توسط سامانه تغییر حجم جیوه اندازه‌گیری می‌شود. بعد از تعیین حجم، جیوه‌های چسبیده به نمونه کاملا تمیز می‌شود. باید مراقب بود تا هیچ ذره‌ای از سنگ جدا نشود،

ج- ظرف نمونه و درپوش آن کاملا تمیز و خشک شده و جرم آن اندازه‌گیری می‌شود (A)،

د- نمونه داخل ظرف قرار گرفته و پس از گذاشتن درپوش، جرم ظرف و نمونه با رطوبت اولیه اندازه‌گیری می‌شود (B)،

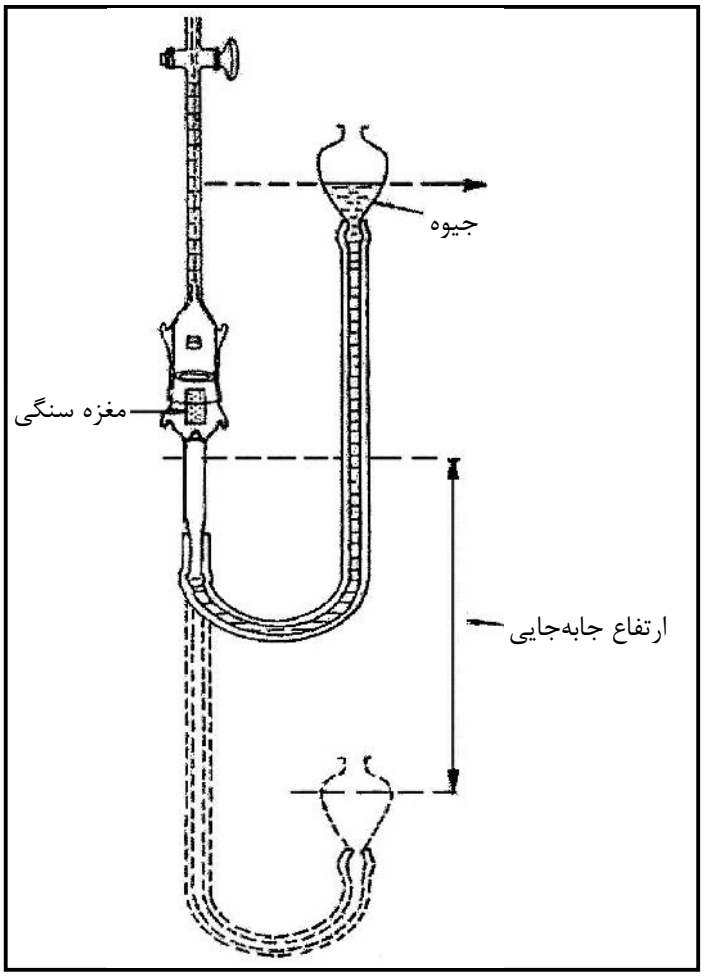
هـ- نمونه پس از برداشتن درپوش در درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزنی ثابت، خشک و به مدت دست کم ۳۰ دقیقه در داخل دسیکاتور قرار داده می‌شود تا خنک شود. سپس جرم نمونه خشک و ظرف اندازه‌گیری می‌شود (C)،

و- مراحل یاد شده در بالا برای تک‌تک نمونه‌ها تکرار شده وجرم‌های به‌دست آمده یادداشت می‌شوند،

ز- نمونه‌ها پس از مخلوط شدن، توسط دستگاه سنگ‌شکن خرد شده و از آن‌ها پودری با ابعاد دانه‌ای زیر ۱۵۰ میکرون تهیه می‌شود. از پودر حاصل تعدادی نمونه ۱۵ گرمی انتخاب و در گرم‌خانه خشک می‌شود.

ح- جرم یک فلاسک حجمی تمیز و خشک به همراه درپوش آن (D) با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود،

ط- فلاسک با مایعی مثل تولوئن که با دانه‌ها هیچ‌گونه واکنشی ندارد پر می‌شود. فلاسک داخل تشت آبی با دمای ثابت قرار داده می‌شود تا به حد تعادل برسد. سپس باید سطح مایع دقیقا به درجه ۵۰ سانتی‌مترمکعب رسانده شود. درپوش فلاسک را گذاشته و وزن آن با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود (E).



شکل ۱-۱- دستگاه تخلخل‌سنج Washburn-Buoting با روش تغییر حجم جیوه [۳].

ی- نمونه در فلاسک خالی و خشک ریخته شده و توزین می‌شود (F). سپس برای مرطوب کردن نمونه مقدار کافی مایع افزوده می‌شود. به منظور خروج حباب‌های هوا از نمونه باید در هنگام افزودن به فلاسک آن‌را تکان داد. فلاسک در تشت آب گرم با دمای ثابت قرار داده شده و سطح مایع دقیقا روی درجه ۵۰ سانتی‌مترمکعب تنظیم می‌شود.

ک- فلاسک با درپوش آن و محتویات آن پس از خنک شدن با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین می‌شود (G).

ل- مراحل یاد شده بالا برای تمام نمونه‌های پودری تکرار می‌شود.

۱-۳-۴-۳- محاسبات

روابط زیر برای تعیین چگالی و تخلخل کل مورد استفاده قرار می‌گیرند:

$$W = \frac{B - C}{C - A} \times 100\% \quad (۲۲-۱)$$

$$\rho_s = \frac{F - D}{V_f (1 - \frac{G - F}{E - D})} \quad (۲۳-۱)$$

$$Ms = C - A \quad (۲۴-۱)$$

$$\rho_d = \frac{Ms}{V} \quad (۲۵-۱)$$

$$n = \frac{100(\rho_s - \rho_s)}{\rho_s} \quad (۲۶-۱)$$

که در آن‌ها:

w = درصد رطوبت اولیه (درصد)،

ρ_s = چگالی دانه‌ای (گرم بر سانتی‌مترمکعب)،

V_f = حجم فلاسک واسنجی شده (سانتی‌مترمکعب)،

Ms = جرم خشک نمونه (گرم)،

ρ_d = چگالی خشک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)،

n = تخلخل کل (درصد)،

A = جرم ظرف (گرم)،

B = جرم ظرف و نمونه با رطوبت اولیه (گرم)،

C = جرم ظرف و نمونه خشک (گرم)،

D = جرم فلاسک و درپوش (گرم)،

E = جرم فلاسک + مایع (گرم)،

F = جرم فلاسک، مایع و نمونه (گرم)،

G = جرم فلاسک، مایع و نمونه (gr)،

V = حجم کل (سانتی‌مترمکعب).

۱-۳-۴-۴- گزارش نتایج

در گزارش این آزمایش باید موارد زیر قید شود:

- مقادیر چگالی خشک و تخلخل کل کلیه نمونه‌ها و نیز مقدار میانگین آن‌ها. مقادیر چگالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب و مقادیر تخلخل با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌شوند.
- یادآوری شود که حجم کل با استفاده از روش تغییر حجم جیوه و تخلخل کل به روش اندازه‌گیری حجم دانه‌ای نمونه‌ها و با پودر کردن آن‌ها به‌دست آمده است.
- چگالی دانه‌ای یا چگالی نسبی دانه‌ای نمونه و درصد رطوبت نمونه به هنگام اندازه‌گیری حجم کل باید گزارش شود و این‌که آیا این مقدار همان درصد آب محتوا طبیعی است یا خیر.

در جدول (۱-۴) نمونه‌ای از برگه گزارش این آزمایش نشان داده شده است.

جدول ۱-۴- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل کل با روش تغییر حجم جیوه و جرم مخصوص دانه‌ها

آزمایش تعیین چگالی و تخلخل کل سنگ روش تغییر حجم جیوه و جرم مخصوص دانه‌ها													
شماره کار:											**شماره نمونه:**		
نام پروژه:											**عمق:**		
متقاضی:											**شماره گمانه:**		
پارامتر	واحد	نمونه رابطه و نماد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
جرم ظرف	گرم	A											
جرم ظرف + نمونه رطوبت اولیه	گرم	B											
جرم ظرف + نمونه خشک	گرم	C											
جرم فلاسک و درپوش	گرم	D											
جرم فلاسک + مایع	گرم	E											
جرم فلاسک + مایع + پودر شده	گرم	F											
جرم فلاسک + مایع + نمونه	گرم	G											
حجم فلاسک	سانتی‌مترمکعب	V_f											
درصد رطوبت اولیه	درصد	$W=\frac{(B-C)}{(C-A)}$											
چگالی دانه‌ای	گرم بر سانتی‌مترمکعب	$\rho_s=\frac{F-D}{V_f(1-\frac{G-F}{E-D})}$											
جرم خشک	گرم	$Ms=C-A$											
چگالی خشک	گرم بر سانتی‌مترمکعب	$\rho_d=\frac{Ms}{V}$											
تخلخل کل	درصد	$n=\frac{(\rho_s-\rho_d)}{\rho_s}\times 100$											
نوع سنگ:		تاریخ آزمایش:	آزمایش کننده:										

۱-۳-۵- آزمایش براساس روش تغییر حجم جیوه و قانون بویل[1]

این روش برای آن گروه از نمونه‌های سنگی که در طول زمان خشک شدن در گرم‌خانه انبساط محسوسی ندارند مناسب است. برای به‌دست آوردن نتایج دقیق، معمولا نمونه‌هایی به شکل و اندازه خاص هماهنگ با شکل محفظه دستگاه آزمایش مورد نیاز است. لازم به یادآوری است با انجام این آزمایش، «تخلخل موثر» تعیین خواهد شد.

۱-۳-۵-۱- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- گرم‌خانه با قابلیت ایجاد و حفظ درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۳ درجه سانتی‌گراد در دوره زمانی دست کم ۲۴ ساعت،
- دسیکاتور برای نگهداری نمونه در طول مدت سرد شدن،
- ترازو با ظرفیت مناسب و دقتی معادل ۰/۰۱ درصد وزن نمونه،
- سامانه اشباع در خلا کم‌تر از ۸۰۰ پاسکال (۶ تور)،
- ظرف فلزی از جنس فلز مقاوم در برابر خوردگی به همراه درپوش،
- تخلخل‌سنج قانون بویل نوع کوبه[2] (شکل ۱-۲)، معمولا در این آزمایش از نوع تک محفظه‌ای استفاده می‌شود که دارای قسمت‌های زیر است:

- پمپ جیوه با پیستون پیچشی به منظور اندازه‌گیری تغییر حجم جیوه با دقت ۰/۰۱ سانتی‌مترمکعب که به درجه‌بندی میکرومتری مجهز است. معمولا یک دور چرخاندن پیچ پیستون، حجم محفظه را به اندازه‌ی یک سانتی‌مترمکعب تغییر می‌دهد،
- محفظه دارای کلاهک (درپوش) قابل برداشتن برای قرارگیری نمونه در داخل آن،
- یک شیشه شفاف کوچک برای دیدن ستون جیوه به همراه یک خط مرجع یا یک شاخص الکتریکی برای نشان دادن سطح فرضی اولیه جیوه در کلاهک،
- شیر ورودی و خروجی گاز به‌علاوه‌ی منبع گاز ورودی (مثلا هلیم). در این سیستم می‌توان از هوای کاملا خشک نیز استفاده کرد، ولی این روش با اندکی کم‌دقتی همراه است،
- ترانسدیوسر (یا گیج دقیق فشار) که قابلیت اندازه‌گیری فشارهایی از ۱۰۰ تا حدود ۴۰۰ کیلوپاسکال را داشته باشد.

1- Mercury Displacement and Boyle's Low Techniques
2- Kobe Boyle's Low Prosimeter

۱-۳-۵-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- با توجه به شکل محفظه که معمولا به شکل استوانه است، حداقل سه نمونه از مغزه‌های استوانه‌ای که دست کم جرمی معادل ۵۰ گرم و یا ابعادی معادل ده برابر قطر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه (هرکدام که بیش‌تر است) را داشته باشند، آماده می‌شوند. قطر نمونه‌ها باید اندکی از قطر محفظه‌ای که نمونه در آن قرار می‌گیرد، کوچک‌تر باشد.

ب- قوطی نمونه و درپوش آن کاملا تمیز وخشک شده و جرم آن اندازه‌گیری می‌شود (A).

ج- نمونه داخل قوطی قرار گرفته و تا رسیدن به وزنی ثابت در حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود. سپس درپوش قوطی برداشته شده و نمونه را به مدت دست کم ۳۰ دقیقه در داخل دسیکاتور قرار داده تا خنک شود. جرم نمونه خشک با قوطی اندازه گرفته می‌شود (B).

د- برای استفاده از تخلخل‌سنج، قرائت اولیه پمپ جیوه در آغاز هر سیکل فشار یا تغییر حجم، به عنوان «نقطه شروع»[1] در نظر گرفته می‌شود. در این هنگام شیرهای ورودی و خروجی بسته بوده و فشار اولیه (P_1) معادل فشار اتمسفر است. مقدار «نقطه شروع» و فشار در انتهای سیکل (P_2) معمولا با توجه به استاندارد مربوط به نوع دستگاه انتخاب می‌شوند. در پایان هر سیکل باید مطمئن شد که نمونه روی سطح جیوه شناور بوده و به داخل آن فرو نرفته باشد.

هـ- برای پر کردن محفظه از گاز، ابتدا شیر ورودی بسته و شیر خروجی باز می‌شود. سپس میزان پمپاژ افزایش می‌یابد تا سطح جیوه در شیشه شفاف به سطح فرضی اولیه برسد. خروجی، نیمه‌بسته شده و وردی باز می‌شود. سپس پمپ تا گذر از «نقطه شروع» فشرده می‌شود. سرانجام شیر ورودی و بعد از آن شیر خروجی بسته می‌شوند.

و- برای تعیین ضریب فشردگی محفظه، ابتدا باید آن را با گاز پر کرد. در این حالت شیر خروجی باز شده و پمپ تا رسیدن به «نقطه شروع» فشرده می‌شود و درحالی‌که فشار داخل محفظه (P_1) برابر فشار اتمسفر است، شیر خروجی بسته می‌شود. دوباره پمپ فشرده شده تا فشار به مقدار P_2 برسد. در این حالت میکرومتر مقدار C_0 را نشان می‌دهد. محفظه دوباره با گاز پر شده و درحالی‌که شیر خروجی باز است، پمپ فشرده می‌شود تا به نقطه شروع دیگری که ۱۰ سانتی‌مترمکعب بیش‌تر از نقطه شروع اولیه است، برسد.

شیر خروجی درحالی‌که فشار داخل محفظه فشار اتمسفر (P_1) است بسته می‌شود. دوباره پمپ فشرده می‌شود تا فشار به P_2 برسد. میکرومتر در این حالت مقدار C_1 را نشان می‌دهد. ضریب فشردگی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$C_f = \frac{10}{10-(C_0-C_1)}$$ رابطه (۱-۲۷)

این ضریب بستگی به فشار محیط[2] داشته و باید به‌طور ادواری کنترل شود.

1- Start point
2- Ambient Pressure

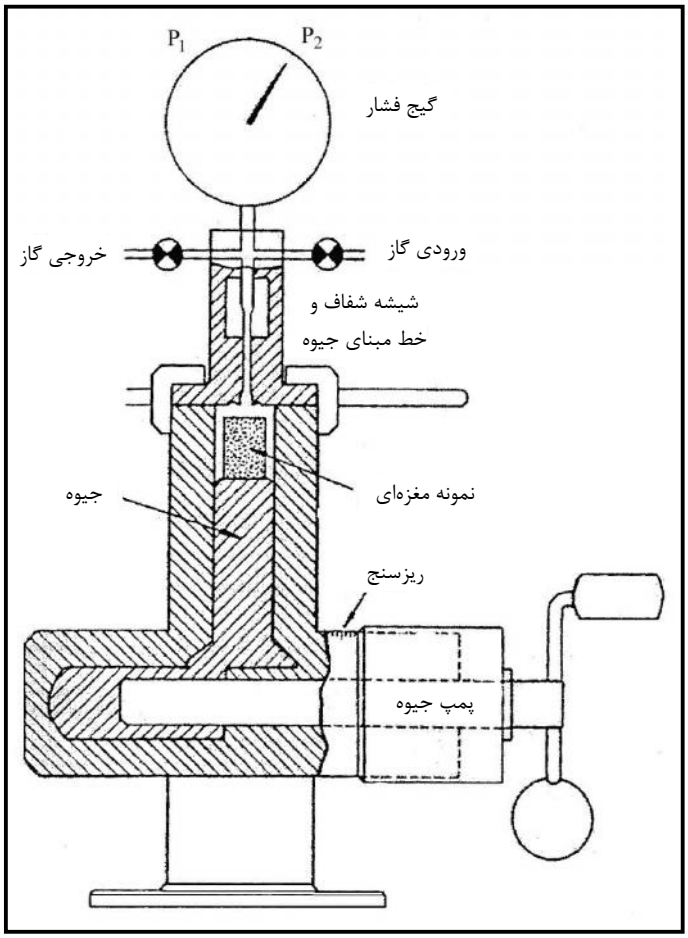
ز- هر آزمایش شامل یک تغییر حجم و به‌دنبال آن تغییر فشار با محفظه خالی می‌باشد (یعنی راه‌اندازی دستگاه بدون نمونه). سپس همین تغییر حجم و تغییر فشار در حالتی صورت می‌گیرد که نمونه داخل محفظه باشد.

ح- درحالی‌که شیر ورودی بسته و شیر خروجی باز است، پمپاژ تا رسیدن جیوه به سطح فرضی اولیه افزایش می‌یابد. در این حالت میکرومتر مقدار R_1 را نشان می‌دهد.

ط- محفظه با گاز پر می‌شود، پمپ به «نقطه شروع» برده شده و شیرها درحالی‌که فشار داخل محفظه فشار اتمسفر (P_1) است، بسته می‌شوند. پمپاژ افزایش می‌یابد تا میکرومتر عدد R_2 را نشان دهد، در این هنگام فشار به P_2 رسیده است.

ی- نمونه از داخل دسیکاتور به محفظه منتقل می‌شود. محفظه با گاز پر شده و مرحله‌ی (ح) تکرار می‌شود. در زمانی‌که سطح جیوه به سطح فرضی اولیه می‌رسد، مقدار میکرومتر، R_3 قرائت می‌شود.

ک- مرحله (ط) تکرار می‌شود. این‌بار زمانی که فشار دوباره به P_2 می‌رسد، مقدار میکرومتر R_4 را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- نمایی شماتیک از تخلخل‌سنج قانون بویل نوع کوبه [۳]

۱-۳-۵-۳- محاسبات

برای به‌دست آوردن چگالی خشک و تخلخل موثر نمونه از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$V = R_3 - R_1 \quad (۲۸-۱)$$

$$V_s = C_f (R_4 - R_2) \quad (۲۹-۱)$$

$$M_s = B - A \quad (۳۰-۱)$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (۳۱-۱)$$

$$n_e = \frac{V - V_s}{V} \times 100 \quad (۳۲-۱)$$

که در آن‌ها:

C_f = ضریب فشردگی محفظه،

V = حجم کل (سانتی‌مترمکعب)،

V_s = حجم جامد (سانتی‌مترمکعب)،

Ms = جرم جامد (گرم)،

ρ_d = چگالی خشک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)،

n_e = تخلخل موثر (درصد)،

B = جرم نمونه خشک و ظرف (گرم)،

A = جرم ظرف (گرم).

۱-۳-۵-۴- گزارش نتایج

در گزارش این آزمایش باید موارد زیر قید شود:

چگالی خشک و تخلخل موثر هر قطعه سنگ نمونه به همراه میانگین کل نمونه‌ها باید در گزارش آورده شود. مقادیر چگالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب و مقادیر تخلخل با دقت ۰/۱ درصد گزارش می‌شوند. در ضمن در گزارش باید قید شود که حجم کل به روش تغییر حجم جیوه و تخلخل موثر به روش اندازه‌گیری حجم جامد با کمک قانون بویل تعیین شده است. نمونه‌ای از برگه گزارش و ثبت داده‌های این آزمایش در جدول (۱-۵) آمده است.

جدول ۱-۵- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر به روش تغییر حجم جیوه و قانون بویل

آزمایش تعیین چگالی و تخلخل موثر سنگ روش تغییر حجم جیوه و قانون بویل					
شماره کار:				**شماره نمونه:**	
نام پروژه:				**عمق:**	
متقاضی:				**شماره گمانه:**	
پارامتر	رابطه	۱	۲	۳	
R_1	-				
R_2	-				
R_3	-				
R_4	-				
ضریب فشردگی	C_f				
حجم کل (سانتی‌مترمکعب)	$V = R_3 - R_1$				میانگین
حجم جامد (سانتی‌مترمکعب)	$V_s = C_f (R_4 - R_2)$				
جرم جامد (گرم)	Ms				
چگالی خشک (سانتی‌مترمکعب)	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$				
تخلخل (درصد)	$n = \frac{V - Vs}{V} \times 100$				
نوع سنگ:					
توضیحات:					
تاریخ آزمایش:			آزمایش کننده:		

۱-۳-۶- نکته‌های کلی

نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمایش مطرح‌اند؛ به قرار زیر است:

- در تعیین تخلخل نمونه سنگی تفکیک تخلخل موثر و تخلخل کلی از یکدیگر مهم است. از دستورالعمل‌های ۱-۳-۲، ۱-۳-۳ و ۱-۳-۵ تخلخل موثر و ۱-۳-۴، تخلخل کلی تعیین خواهد شد. با توجه به اهمیت هر دو نوع تخلخل، توصیه می‌شود تخلخل موثر در یکی از روش‌ها و تخلخل کلی از روش ۱-۳-۴ تعیین شوند.
- تخلخل کلی همواره بزرگ‌تر از تخلخل موثر است.

۱-۴- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص دوام وارفتگی

با انجام این آزمایش روی نمونه سنگی که در معرض یک یا دو مرحله تر و خشک شدن متوالی قرار گرفته، میزان مقاومت نمونه در برابر وارفتگی (شکفتگی) مشخص می‌شود. این دستورالعمل براساس آزمایش به روش پیشنهادی [۴] ISRM و [۲] ASTM D644 تهیه شده است.

یادآوری: در مورد سنگ‌های بسیار ضعیف، آزمایش‌های رده‌بندی خاک مانند تعیین حدود اتربرگ، هیدرومتری و دانه‌بندی تر انجام شود. همچنین در خصوص مارن‌ها و رس سنگ‌ها، آزمایش آماس‌سنجی[1] انجام می‌شود.

۱-۴-۱- اهمیت و موارد استفاده

در سنگ‌های ضعیف و یا دارای کانی‌های رسی، در اثر تماس آب و یا هوازدگی پدیده وارفتگی[2] رخ خواهد داد. وارفتگی باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شده و ظرفیت باربری آن‌ها را کاهش می‌دهد. تعیین شاخص دوام وارفتگی برای سنگ‌هایی که در تکیه‌گاه، بدنه و اطراف سدها قرار داشته و مصالح سنگی مورد مصرف در ساخت موج‌شکن‌ها الزامی است [۱].

۱-۴-۲- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- ظرف استوانه‌ای مشبک که از تور سیمی ۲ میلی‌متری (نمره ۱۰) ساخته شده است. این استوانه دارای ۱۰۰ میلی‌متر طول و ۱۴۰ میلی‌متر قطر است. دو انتهای استوانه (قاعده ظرف) باید از صفحات فلزی سخت به‌گونه‌ای ساخته شود که یکی از قاعده‌ها بازشو باشد. این ظرف باید دارای استحکام کافی باشد و در طول آزمایش دچار تغییر شکل نشود. همچنین باید بتواند دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند،
- یک تشت آب به‌طوری‌که ظرف استوانه‌ای آزمایش متصل به محور افقی دوار را دربرگیرد. تشت باید طوری از آب پر شود که فاصله سطح آب تا محور دوران ظرف استوانه‌ای ۲۰ میلی‌متر باشد. درضمن عمق تشت باید به‌اندازه‌ای باشد که کف آن از سطح توری ظرف استوانه‌ای ۴۰ میلی‌متر فاصله داشته باشد،
- یک موتور محرک که بتواند ظرف استوانه‌ای مشبک و نمونه‌های داخل آن را با سرعت ۲۰ دور در دقیقه بچرخاند. این سرعت باید در مدت ۱۰ دقیقه با دقت ۵ درصد ثابت بماند،
- گرم‌خانه با قابلیت تولید و ثابت نگه داشتن دمای ۱۰۵ ± ۳ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان دست کم ۱۲ ساعت،
- ترازو با ظرفیت ۲ کیلوگرم و دقت ۰/۵ گرم.

۱-۴-۳- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شوند:

الف- ابتدا ۱۰ قطعه سنگ ۴۰ تا ۶۰ گرمی که در کل وزنی معادل ۴۵۰ تا ۵۵۰ گرم داشته باشد، از سنگ مورد نظر تهیه می‌شود. بیش‌ترین ابعاد سنگ‌دانه‌های مورد آزمایش نباید از ۳۰ میلی‌متر بیش‌تر باشد. این قطعات ممکن است

1- Swelling Measurement
2- Slaking

به‌صورت طبیعی یا مصنوعی (با خرد کردن) تهیه شوند. شکل آن‌ها باید تا حد امکان کروی بوده و گوشه‌های تیز آن‌ها گرد شود. نمونه‌ها باید پیش از آزمایش با ماهوت پاک‌کن از قطعات سست و غبار زدوده شوند،

ب- قطعات سنگی داخل ظرف استوانه‌ای مشبک ریخته شده و تا رسیدن به وزنی ثابت در گرم‌خانه با حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند. سپس مجموع جرم ظرف استوانه‌ای با نمونه‌های داخل آن اندازه‌گیری می‌شود (A)،

ج- ظرف استوانه‌ای مشبک در تشت قرار گرفته و محور آن به موتور متصل می‌شود،

د- تشت تا ۲۰ میلی‌متر زیر محور استوانه از مایع مورد نظر که معمولا آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد است پر می‌شود. اگر در طبیعت شرایط خاصی بر نمونه حکم‌فرما باشد، مایع مورد استفاده مطابق با این شرایط تهیه و به‌کار برده می‌شود. ظرف استوانه‌ای با سرعت ۲۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه دوران داده می‌شود (با دقت ۰/۵ دقیقه)،

هـ- بلافاصله پس از اتمام دوران، ظرف استوانه‌ای از داخل تشت خارج و سپس در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزنی ثابت خشک می‌گردد. جرم ظرف استوانه‌ای و قسمت‌های باقی‌مانده نمونه پس از سرد شدن اندازه‌گیری می‌شود[۱] (B)،

و- در آزمون‌های دو مرحله‌ای، گام‌های ج تا ه یک‌بار دیگر تکرار شده و در نهایت جرم ظرف استوانه‌ای و نمونه خشک باقی‌مانده اندازه‌گیری می‌شود (C)،

ز- ظرف استوانه‌ای کاملا تمیز و خشک شده و جرم آن اندازه‌گیری می‌شود (D).

۱-۴-۴- 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:

$$Id_2 = \frac{C-D}{A-D}\times 100 \qquad (۳۳-۱)$$

که در آن:

Id_2 = شاخص دوام وارفتگی (درصد)،

A = جرم خشک اولیه استوانه و نمونه (گرم)،

D = جرم استوانه مشبک (گرم)،

C = جرم خشک نهایی استوانه و نمونه (گرم) می‌باشند.

شاخص دوام وارفتگی دور دوم درصورتی‌که با استفاده از آب معمولی ۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آید به عنوان شاخصی برای رده بندی سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رده‌بندی در جدول (۱-۶) ارائه شده است.

۱- توجه شود که اگر در تعیین A درپوش روی ظرف قرار داشته است در تعیین B و D نیز باید به همین گونه باشد.

جدول ۱-۶- رده‌بندی سنگ‌ها براساس شاخص دوام آبدیدگی دومین مرحله (Gamble، ۱۹۷۱)

شاخص دوام – وارفتگی دور دوم (٪)	رده‌بندی
۰-۳۰	خیلی ضعیف
۳۰-۶۰	ضعیف
۶۰-۸۵	متوسط
۸۵-۹۵	کمی مقاوم
۹۵-۹۸	مقاوم
۹۸-۱۰۰	بسیار مقاوم

در مورد سنگ‌هایی که شاخص دور دوم آن‌ها بین صفر تا ده درصد است، مشخصات دقیق‌تر نمونه را می‌توان با تعیین شاخص دوام دور اول به صورت زیر بررسی کرد:

$$Id_1 = \frac{B - D}{A - D} \times 100 \qquad (۳۴-۲)$$

که در آن:

B= مجموع جرم خشک استوانه و نمونه پس از مرحله اول بر حسب گرم می‌باشد.

در ضمن، [۲] Franklin & Chandre (۱۹۷۲)، سنگ‌ها را براساس شاخص دوام اولین مرحله رده‌بندی کردند که این رده‌بندی در جدول (۱-۷) ارائه شده است.

جدول ۱-۷- رده‌بندی سنگ‌ها براساس شاخص دوام وارفتگی دور اول (Franklin & Chandre، ۱۹۷۲)

شاخص دوام – وارفتگی دور اول (٪)	رده‌بندی
۰-۲۵	خیلی ضعیف
۲۵-۵۰	ضعیف
۵۰-۷۵	متوسط
۷۵-۹۰	مقاوم
۹۰-۹۵	بسیار مقاوم
۹۵-۱۰۰	فوق‌العاده مقاوم

۱-۴-۵- گزارش نتایج

هر گزارش باید شامل موارد زیر باشد:

- توصیف شکل ظاهری قطعات باقی‌مانده در ظرف استوانه‌ای مشبک و قطعات یا ذرات رد شده از آن،
- نوع و درجه حرارت مایع مورد استفاده،
- درصد رطوبت (آب محتوای) نمونه،
- شاخص دوام وارفتگی مرحله دوم با دقت ۰/۱ درصد.

بهتر است از مصالح باقی‌مانده عکس گرفته و به گزارش پیوست شود. یک نمونه برگه گزارش نتایج این آزمایش در جدول (۱-۸) نشان داده شده است.

جدول ۱-۸- برگه ثبت آزمایش تعیین شاخص دوام وارفتگی سنگ

آزمایش تعیین شاخص دوام گرفتگی									
شماره کار:						**شماره گمانه:**			
نام پروژه:						**عمق:**			
متقاضی:						**تعداد دور:**			
شماره نمونه	درصد رطوبت (درصد)	وزن نمونه خشک + استوانه			وزن استوانه D (گرم)	شاخص دوام وارفتگی	درجه حرارت (سانتی گراد)	محلول مورد استفاده	توصیف شکل ظاهری نمونه باقی‌مانده در استوانه و رد شده از آن
		قبل از آزمایش A (گرم)	پس از مرحله اول B (گرم)	پس از مرحله دوم C (گرم)		$Id_2 = \frac{C-D}{A-D} \times 100$			
نوع سنگ:				توضیحات:					
تاریخ آزمایش:				آزمایش کننده:					

۱-۴-۶- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح‌اند، به شرح زیر می‌باشند:

- در استاندارد ASTM D4644 تعیین درصد رطوبت اولیه نمونه‌ها مورد تاکید قرار گرفته، اما در ISRM اشاره‌ای به این موضوع نشده است. به‌هرحال مقدار درصد رطوبت طبیعی نمونه پیش از آزمایش، به‌جز در مورد سنگ‌های سست و ضعیف، تاثیر چندانی روی نتایج آزمایش ندارد. توصیه می‌شود درصد رطوبت نمونه پیش از آغاز آزمایش مشخص شود.
- در مورد زمان خشک شدن نمونه در گرم‌خانه، استاندارد ASTM D4644 مدت ۱۶ ساعت را پیشنهاد کرده است که پس از آن نمونه باید به مدت ۲۰ دقیقه در دمای محیط سرد شود. درصورتی‌که روش پیشنهادی ISRM زمان لازم برای خشک شدن نمونه را ۲ تا ۶ ساعت مشخص کرده است. درخصوص نمونه‌هایی‌که دارای آب طبیعی مانند ژیپس هستند، توصیه می‌شود روش ASTM D4644 اجرا شود.
- استاندارد ASTM D4644 در هر حالتی آب مقطر را برای انجام این آزمایش پیشنهاد می‌کند و تاکید دارد که دمای آب برابر دمای محیط بوده و حتما در گزارش قید شود. اما روش پیشنهادی ISRM هیچ محدودیتی در

این زمینه قائل نشده و یادآوری کرده که مایع مورد استفاده ممکن است آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد، آب مقطر، آب معدنی، آب دریا، اسید رقیق یا هر محلول دیگری باشد. توصیه می‌شود مایع مورد استفاده شرایط آب موجود در محل نمونه و یا در شرایط بهره‌برداری طرح را داشته باشد.

۱-۵- دستورالعمل آزمایش تعیین مقاومت به سایش سنگ‌دانه‌ها با استفاده از ماشین لس‌آنجلس

با انجام این آزمایش مقاومت مصالح سنگی (و یا خرد شده توسط دستگاه) در برابر اثر هم‌زمان سایش همراه با ضربه تعیین می‌شود. این دستورالعمل با استفاده از دستورالعمل [۵] ISRM، [۲] ASTM C 131، [۳] ASTM C 535 تهیه شده است.

۱-۵-۱- اهمیت و موارد استفاده

سایش به واکنش سنگ نسبت به عوامل مخرب فیزیکی گفته می‌شود. این سایش ممکن است در اثر عوامل طبیعی مثل آب، باد و برخورد سنگ‌ها با هم رخ دهد. سایش ملاکی برای سنجش کیفیت مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بتن، آسفالت و زیرسازی بوده و همچنین ملاکی برای پیش‌بینی واکنش سنگ در برابر عملیات حفاری، آتش‌کاری و سنگ‌بری است [۱].

۱-۵-۲- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- دستگاه لس‌آنجلس که از یک استوانه فولادی توخالی دوطرف مسدود تشکیل شده است. قطر داخلی استوانه ۵ ± ۷۱۱ میلی‌متر است. این استوانه از دو سمت دارای دو محور عمودی متصل به دو قاعده استوانه است که بر روی پایه‌های محکمی که به فاصله کمی از دو طرف آن قرار گرفته‌اند سوار می‌شود و در این حالت می‌تواند به راحتی حول محور افقی خود (بیش‌ترین شیب مجاز محور افقی یک درصد است)، دوران کند. در بدنه استوانه دریچه‌ای نصب شده است که می‌توان نمونه مورد آزمایش را از آن طریق به استوانه وارد و یا از آن خارج کرد. درپوش این دریچه با یک لایه نفوذناپذیر و توسط چند پیچ کاملا محکم می‌شود به‌نحوی‌که گرد و غبار از آن به خارج نشت نکند. دریچه به‌گونه‌ای ساخته می‌شود که یکنواختی سطح داخلی استوانه کاملا حفظ شود؛ به این‌صورت‌که یک قطعه فولادی در مقابل دریچه طوری قرار داده شود که از فروافتادن گوی‌های فولادی به داخل دریچه جلوگیری می‌کند. یک زایده فولادی به ارتفاع ۲ ± ۸۹ و طول ۵ ± ۵۰۸ میلی‌متر روی سطح داخلی استوانه قرار دارد. ضخامت این زایده به اندازه‌ای است که در اثر ضربه تغییر شکل ندهد. زایده در محلی قرار دارد که فاصله محیطی آن تا دریچه در جهت چرخش از ۱/۲۷ متر کم‌تر نیست. این زایده از جنس فولاد با روکش مقاوم بوده و مقطع آن کاملا عمود بر سطح داخلی استوانه است،

- ترازو با دقت ۰/۱ درصد بار آزمایش در محدوده مورد نیاز برای این آزمون،
- گوی‌های فولادی ساینده؛ تعداد و وزن گوی‌ها بستگی به دانه‌بندی نمونه دارد و طبق جدول‌های (۱-۹) و (۱-۱۰) تعیین می‌شود،
- الک‌هایی مطابق با مشخصات یاد شده در ASTMEll [۴]،
- گرم‌خانه با قابلیت تولید درجه حرارت ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد.

۱-۵-۳- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- اگر سنگ مورد آزمایش به صورت قطعات بزرگ باشد، ابتدا باید آن‌ها را در سنگ‌شکن خرد کرد، حال از سنگ خرد شده و یا مصالح آماده نمونه‌گیری انجام می‌شود. اگر اندازه دانه مصالح بزرگ‌تر از الک ۱۹ میلی‌متر باشد، براساس جدول (۱-۹) به مقدار ۱۰۰ ± ۱۰۰۰ گرم نمونه و اگر اندازه دانه مصالح کوچک‌تر از الک ۳۸ میلی‌متر باشد بر پایه جدول (۱-۱۰) به مقدار ۱۰ ± ۵۰۰۰ گرم نمونه انتخاب می‌شود.

جدول ۱-۹- دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات بزرگ‌تر از ۱۹ میلی‌متر [۴]

اندازه الک با سوراخ‌های مربعی (میلی‌متر)		وزن قسمت‌های انتخابی از هر الک (گرم)		
رد شده از الک	مانده روی الک	نوع دانه‌بندی		
		۱	۲	۳
۷۵	۶۳	۲۵۰۰ ± ۵۰	-	-
۶۳	۵۳	۲۵۰۰ ± ۵۰	-	-
۵۳	۳۸	۵۰۰۰ ± ۵۰	۵۰۰۰ ± ۵۰	
۳۸	۲۵/۴	-	۵۰۰۰ ± ۲۵	۵۰۰۰ ± ۲۵
۲۵/۴	۱۹	-	-	۵۰۰۰ ± ۲۵
مجموع		۱۰۰۰ ± ۱۰۰	۱۰۰۰ ± ۷۵	۱۰۰۰ ± ۵۰
تعداد گلوله		۱۲	۱۲	۱۲
وزن گلوله		۵۰۰۰ ± ۲۵	۵۰۰۰ ± ۲۵	۵۰۰۰ ± ۲۵

جدول ۱-۱۰- دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچک‌تر از ۳۸ میلی‌متر

اندازه الک با سوراخ‌های مربعی (میلی‌متر)		وزن قسمت‌های انتخابی از هر الک (گرم)			
رد شده از الک	مانده روی الک	نوع دانه‌بندی			
		الف	ب	ج	د
۳۸	۲۵/۴	۱۲۵۰ ± ۲۵	-	-	-
۲۵/۴	۱۹	۱۲۵۰ ± ۲۵	-	-	-
۱۹	۱۳/۲	۱۲۵۰ ± ۱۰	۲۵۰۰ ± ۱۰	-	-
۱۳/۲	۹/۵	۱۲۵۰ ± ۱۰	۱۲۵۰ ± ۱۰	-	-
۹/۵	۵/۶	-	-	۲۵۰۰ ± ۱۰	-
۵/۶	۴/۷	-	-	۲۵۰۰ ± ۱۰	-
۴/۷	۲/۳	-	-	-	۵۰۰۰ ± ۱۰
مجموع		۵۰۰۰ ± ۱۰	۵۰۰۰ ± ۱۰	۵۰۰۰ ± ۱۰	۵۰۰۰ ± ۱۰
تعداد گلوله		۱۲	۱۱	۸	۶
وزن گلوله		۵۰۰۰ ± ۲۵	۴۵۸۴ ± ۲۵	۳۳۳۰ ± ۲۰	۲۵۰۰ ± ۱۵

ب- نمونه به همراه مقدار گوی‌های فولادی لازم (جدول ۱-۹ یا ۱-۱۰)، را به داخل دستگاه لس‌آنجلس ریخته و استوانه با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه حول محول افقی به چرخش درمی‌آید. استوانه برای مصالح کوچک‌تر از ۳۸ میلی‌متر ۵۰۰ دور و برای مصالح بزرگ‌تر از ۱۹ میلی‌متر ۱۰۰۰ دور دوران می‌کند. حرکت استوانه باید منظم و با سرعت یکنواخت باشد. چنان‌چه زایده فولادی دارای یک وجه شیب‌دار است، جهت چرخش باید طوری باشد که گوی‌های فلزی هنگام دوران، به سمت قائم آن برخورد کنند،

ج- پس از پایان دوران، مواد از داخل استوانه خارج شده و با الک ۱/۷ میلی‌متر (نمره ۱۲) جداسازی می‌شود. قسمت مانده روی الک ۱/۷ میلی‌متر شسته شده و در دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزنی ثابت خشک شده و سپس با دقت یک گرم وزن می‌شوند،

د- برای به‌دست آوردن اطلاعاتی در مورد یکنواختی سایشی نمونه می‌توان در مورد آزمایش‌های ۵۰۰ دوری، درصد افت وزنی را پس از ۱۰۰ دور و برای آزمایش‌های ۱۰۰۰ دوری پس از ۲۰۰ دور تعیین نمود. درصد افت وزنی باید بدون شستن مصالح مانده روی الک ۱/۷ میلی‌متر محاسبه شود. در طول این عملیات نباید هیچ قسمتی از نمونه از دست برود و تمام نمونه تا انتهای آزمایش باید حفظ شود.

۱-۵-۴- محاسبات

درصد افت وزنی در اثر سایش از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{درصد افت وزنی در اثر سایش} = \frac{\text{وزن نهایی نمونه} - \text{وزن اولیه نمونه}}{\text{وزن اولیه نمونه}} \times ۱۰۰ \qquad (۳۵-۲)$$

درصورتی‌که از روش توصیف شده در بند (د) استفاده می‌شود، ضریب یکنواختی سایش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{ضریب یکنواختی سایشی} = \frac{\text{درصد افت وزنی پس از ۱۰۰ یا ۲۰۰ دور}}{\text{درصد افت وزنی پس از ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ دور}} \qquad (۳۶-۲)$$

۱-۵-۵- گزارش نتایج

گزارش باید شامل اطلاعات زیر باشد:

- محل و توصیف زمین‌شناسی نمونه مورد آزمایش،
- نوع دانه‌بندی نمونه،
- تعداد وزن گوی‌های فولادی مورد استفاده،
- درصد افت وزنی در اثر سایش با دستگاه لس‌آنجلس،
- نسبت یکنواختی سایشی با دستگاه لس‌آنجلس (در صورت نیاز).

یک نمونه برگه ثبت نتایج این آزمایش در جدول ۱-۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱۱- برگه ثبت نتایج آزمایش تعیین افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس

آزمایش سایش به روش لس‌آنجلس								
شماره کار:						شماره نمونه:		
نام پروژه:						عمق:		
متقاضی:						شماره گمانه:		
اندازه الک‌ها (میلی‌متر)		۵۰۰ دور				۱۰۰۰ دور		
رد شده	مانده	الف	ب	ج	د	۱	۲	۳
۷۵	۶۳							
۶۳	۵۳					۲۵۰۰ گرم		
۵۳	۳۸					۲۵۰۰ گرم		
۳۸	۲۵/۴	۱۲۵۰ گرم				۵۰۰۰ گرم	۵۰۰۰ گرم	
۲۵/۴	۱۹	۱۲۵۰ گرم					۵۰۰۰ گرم	۵۰۰۰ گرم
۱۹	۱۳/۲	۱۲۵۰گرم	۲۵۰۰ گرم					۵۰۰۰ گرم
۱۳/۲	۹/۵	۱۲۵۰ گرم	۲۵۰۰ گرم					
۹/۵	۵/۶			۲۵۰۰ گرم				
۵/۶	۴/۷			۲۵۰۰ گرم				
۴/۷	۲/۳				۵۰۰۰ گرم			
تعداد گلوله		۱۲	۱۱	۸	۶	۱۲	۱۲	۱۲
وزن گلوله								
توضیحات:								

شماره آزمایشگاهی نمونه	نوع دانه‌بندی	وزن نمونه قبل از آزمایش	وزن نمونه مانده بر الک ۱/۷ میلی‌متر	افت وزنی نمونه	درصد افت وزنی
		گرم	گرم	گرم	٪
تاریخ آزمایش:			آزمایش کننده:		

۱-۶- دستورالعمل آزمایش تعیین سرعت صوت در سنگ

در این آزمایش سرعت انتشار امواج کشسان در سنگ اندازه‌گیری می‌شود که از روی آن با انجام محاسبات ضرایب کشسان دینامیک سنگ به‌دست خواهد آمد. این دستورالعمل با استفاده از [۳] ISRM و [۲] ASTM D2845 تهیه شده است.

۱-۶-۱- اهمیت و موارد استفاده

با پیشرفت علوم مهندسی در حال حاضر استفاده از روش‌های دینامیکی (آزمایش‌های غیرمخرب) به‌دست آوردن ویژگی‌های سنگ معمول شده است. عوامل (پارامترهای) ژئومکانیکی سنگ می‌توان مدول یانگ، نسبت پواسون و مدول برشی را نام برد که در مطالعات علمی و طراحی‌های سازه در سنگ اهمیت فراوانی را دارند.

یکی از روش‌های دینامیکی برای تعیین پارامترهای یاد شده اندازه‌گیری سرعت امواج کشسان ارسالی به درون سنگ است. از نکات مهم این روش دقت و سرعت انجام آن در آزمایشگاه و در محل است. از عوامل موثر بر سرعت انتشار امواج

در سنگ‌ها می‌توان به نوع کانی، بافت، چگالی، تخلخل، ناهمسان‌گردی، سطح تنش، درصد رطوبت و دما اشاره کرد. سرعت امواج صوتی در سنگ متناسب با سرعت صوت در کانی‌های تشکیل دهنده آن است [۱].

این آزمایش را به سه روش: موج صوتی با بسامد (فرکانس) بالا، روش موج صوتی با بسامد پایین و روش تشدید می‌توان انجام داد. به علت آن‌که در روش موج صوتی با بسامد بالا محدودیت در رابطه با نسبت طول به قطر وجود ندارد، بنابر این بیش‌تر استفاده می‌شود. دو روش دیگر به‌دلیل محدودیت در رعایت نسبت طول به قطر نمونه، کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۶-۲- روش موج صوتی با بسامد بالا

در این روش با ارسال امواج فشارشی (P) و برشی (S) با بسامد بالا به داخل نمونه، سرعت آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

۱-۶-۲-۱- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- ژنراتور مولد پالس: این ژنراتور باید دارای مشخصات زیر باشد:
  - شکل پالس: سینوسی، مربعی، پله‌ای،
  - عرض پالس: یک تا ده ثانیه،
  - دامنه بسامد: ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز،
  - بسامد تکرار: ۱۰ تا ۱۰۰۰ تکرار در هر ثانیه،
  - ولتاژ پالس: قابل تطبیق با نوع ترانس دیوسر (باید تا حد امکان بالا باشد)،
  - مولد باید دارای یک رابطه انتقال پالس خروجی به اسیلوسکوپ باشد.
- ترانسدیوسرها:[1]
  - فرستنده: برای تبدیل پالس‌های الکتریکی به مکانیکی،
  - گیرنده: برای تبدیل پالس‌های مکانیکی به الکتریکی،
  - دامنه بسامد کاری: از ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز.

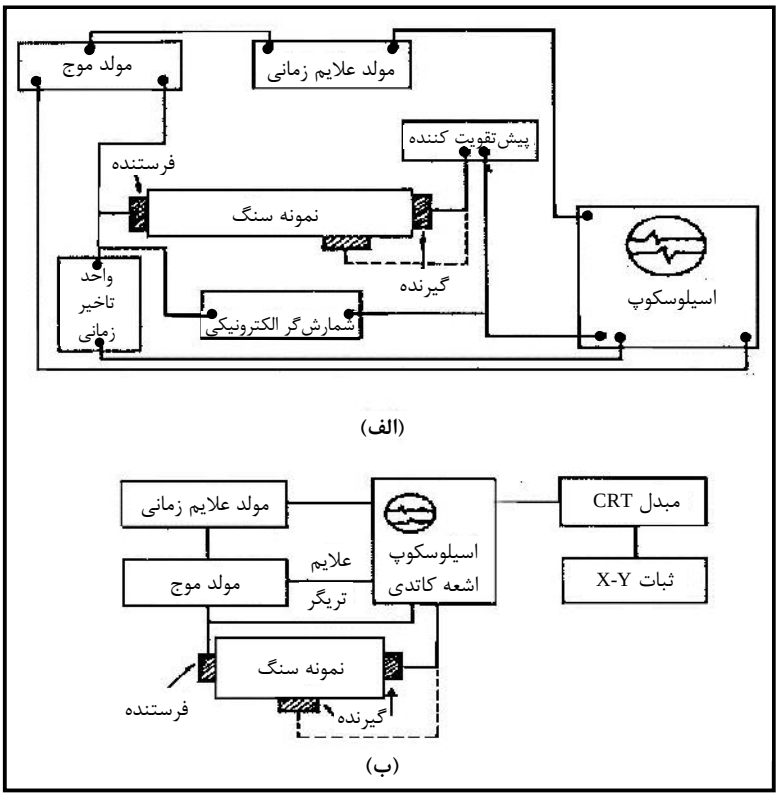
شرایط محیطی مثل دما و درجه رطوبت هوا، آب محتوی و ضربه در انتخاب المان ترانسدیوسر موثر هستند. برای این منظور می‌توان از سرامیک‌های پیزوالکتریک (مثل تیتانات باریم یا تیتانات زیرکونات سرب) به شکل دیسکی، لوله‌ای، حلقوی یا کروی که بتوانند فرکانس بین ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز تولید کنند، استفاده کرد. معمولا نیاز است که برای تولید و دریافت امواج فشاری و برشی از پیزوالکتریک‌های مختلف استفاده شود. به‌این ترتیب که برای ارسال و دریافت امواج فشاری می‌توان از دیسک‌های استوانه‌ای (با شعاع خیلی بزرگ‌تر از ضخامت) کمک

1- Transducers

گرفت که از حرکت طولی و شعاعی استفاده می‌کنند. همچنین می‌توان برای ارسال و دریافت امواج عرضی از قرص‌های برشی استفاده کرد که با حرکت برشی عمل می‌کنند. این قرص‌ها ممکن است از جنس المنت‌های تراشیده شده‌ی کوارتز یا سرامیک‌هایی با تراش مخصوص باشند.

- صافی‌های میان‌گذر و بالاگذر[1] با بسامدهای یاد شده در بالا برای حذف رزونانس‌های نامطلوب ناشی از ارتعاش بیش از اندازه ترانسدیوسرها،
- پیش‌تقویت‌کننده باند عریض و نویز پایین[2]،
- مولد علایم زمانی برای کنترل تکرار پالس برای گرفتن علایم زمانی در اسیلوسکوپ اشعه کاتدی (CRO)[3]،
- اسیلوسکوپ اشعه کاتدی: برای این منظور اسیلوسکوپ اشعه کاتدی نوع دو ستونی پیشنهاد می‌شود که سرعت پوشش[4] آن حداکثر ۰/۱ میکروثانیه بر سانتی‌متر و عرض باند آن از DC تا ۵ مگاهرتز یا بیش‌تر باشد.
- شمارنده الکترونیکی با امکان اندازه‌گیری وقفه‌های زمان[5]،

در شکل (۱-۳) دو نوع مدار الکترونیکی مربوط به این روش ارائه شده است.



شکل ۱-۳- دو نوع مدار مختلف برای انجام آزمایش

1- Band Pass & High Pass
2- Wide Band Low Noise Pre-Amplifier
3- Cathode Ray Oscilloscope
4- Sweeprate
5- Time in Tervals

۱-۶-۲-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر در مورد این روش آزمایش اجرا می‌شود:

الف- نمونه‌های مورد آزمایش شامل بلوک‌های راست گوشه، مغزه‌های استوانه‌ای و حتی نمونه‌های کروی (برای تعیین تقارن کشسان در سنگ‌های ناهمسان‌گرد) می‌باشد. عرض نمونه یا بعد جانبی در جهت عمود بر انتشار موج نباید کم‌تر از ۵ برابر طول موج باشد.

برای به کمینه رساندن صدمات مکانیکی باید در مغزه‌گیری، برش، حمل و نقل، ساییدن و پرداخت کردن نمونه دقت کافی صورت گیرد. سطح زیر هر ترانسدیوسر باید به اندازه‌ای صاف باشد که وقتی ترانسدیوسر به‌طور مستقیم روی آن قرار می‌گیرد، نتوان صفحه نازکی به ضخامت ۰/۰۲۵ میلی‌متر را از بین آن‌ها عبور داد. دو سطح انتهایی نمونه که ترانسدیوسرها 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 ترانسدیوسرها با سطوح جانبی نمونه برمی‌گردد.

دستورالعمل ISRM مسافت عبور موج از نمونه یعنی فاصله ترانسدیوسرها را دست کم ۱۰ برابر میانگین ابعاد سنگ‌دانه‌ها تعیین کرده است. ابعاد سنگ‌دانه‌ها، بسامد رزونانس طبیعی ترانسدیوسرها و کم‌ترین بعد جانبی نمونه عواملی هستند که روی نتیجه آزمایش موثرند، درصورتی‌که تعیین سرعت موج در شرایط رطوبت طبیعی مدنظر باشد، باید کاملا مراقب بود که درصد رطوبت در هنگام تهیه نمونه و نقل و انتقال آن تغییر نکند. پیشنهاد می‌شود که نمونه‌ها داخل کیسه‌های ضد رطوبت[1] نگهداری شوند. برای برش دادن و پرداخت کردن نمونه می‌توان از روش‌های آماده‌سازی خشک استفاده کرد.

در مورد نمونه‌های اشباع باید آن‌ها را تا زمان انجام آزمایش در آب نگهداری کرد. اما در مورد نمونه‌هایی که در حالت خشک مورد آزمایش قرار می‌گیرند، این نکته قابل توجه است که حرارت دیدن نمونه می‌تواند تاثیرات منفی بر نتایج آزمایش داشته باشد.

توصیه می‌شود که نمونه‌ها در دسیکاتور خشک شوند. در صورت نیاز به خشک کردن نمونه در گرم‌خانه، درجه حرارت آن نباید بیش‌تر از ۶۶ درجه سانتی‌گراد باشد.

بسیاری از سنگ‌هایی که متخلخل، کمی هوازده و یا حاوی ریزترک‌های میکروسکوپی هستند، نسبت به فشار وارده و همچنین حالت اشباع بسیار حساس بوده و بنابراین باید در این زمینه دقت لازم به‌عمل آید.

ب- محل قرار گرفتن ترانسدیوسرها 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، یعنی فاصله مرکز تا مرکز ترانسدیوسرها، با دقت ۰/۱ درصد اندازه گرفته می‌شود.

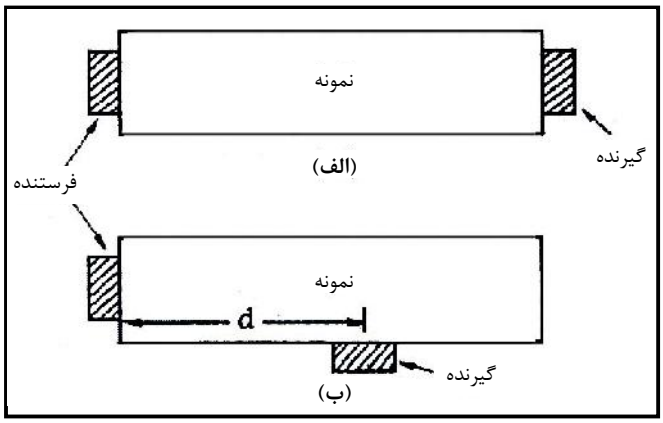
1- Moisture Proof Bags

ج- ترانسدیوسرها در محل علامت‌گذاری شده قرار گرفته و فرستنده با فشاری معادل ۱۰ نیوتن بر سانتی‌متر مربع به نمونه فشرده می‌شود. مقدار انرژی عبوری از ترانسدیوسر به نمونه را با روش‌های زیر می‌توان افزایش داد:

- پرداخت کردن دقیق سطوح انتهایی،
- استفاده از یک لایه نازک گریس، وازلین، گلیسیرین، بطانه یا روغن بین سطح ترانسدیوسرها و نمونه،
- ایجاد اتصال محکم بین نمونه و ترانسدیوسرها با چسب اپوکسی یا فنیل سالی سیلات.

د- قرار دادن گیرنده روی نمونه به دو روش مختلف امکان‌پذیر است:

- روش انتشار موج[1]: در این روش گیرنده در سطح مقابل فرستنده و به صورت هم مرکز با آن قرار می‌گیرد. به‌این ترتیب سرعت امواج طولی و عرضی با تقسیم فاصله بین ترانسدیوسرها به زمان گذر موج محاسبه می‌شود (شکل ۱-۴- الف).
- روش مقطع لرزه‌ای[2]: در این روش گیرنده در وجه جانبی نمونه قرار می‌گیرد. با تغییر فاصله‌ی بین گیرنده و فرستنده (d) می‌توان منحنی زمان گذر موج در مقابل فاصله را برای هر دو نوع موج S و P به‌دست آورد. سرعت امواج S و P با استفاده از شیب این منحنی‌ها محاسبه می‌شود (شکل ۱-۴- ب).



شکل ۱-۴- نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده روی نمونه در آزمایش با موج فرکانس بالا
الف- روش انتشار موج ب- روش مقطع لرزه‌ای

هـ- با تغییر ولتاژ خروجی مولد موج، قدرت آمپلی‌فایر و حساسیت اسیلوسکوپ و شمارنده به مقدار بهینه، می‌توان زمان گذر موج را به طور قابل قبولی اندازه‌گیری کرد. این مقدار بهینه درست کم‌تر از مقداری است که نوفه[3] الکترومغناطیسی نامطلوب می‌کند و یا شمارنده را در پایین‌ترین حد حساسیت آن تحریک کرده و به راه می‌اندازد. مقدار نوفه نباید از یک دهم مقدار اولین اوج دریافت شده بیش‌تر باشد. با اتصال مدارهای تاخیر

1- Pulse Transmission Technique
2- Seismic Profiling Technique
3- Noise

زمانی[1] به اسیلوسکوپ یا تنظیم شمارنده روی بالاترین دقت، می‌توان زمان عبور موج فشاری را با دقت یک درصد و زمان گذر موج برشی را با دقت ۲ درصد اندازه‌گیری کرد،

و- اسیلوسکوپ با مدار تاخیر زمانی برای اندازه‌گیری زمان اولین دریافت موج و مدت زمان گذر آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. منحنی انتقال که توسط اسیلوسکوپ نشان داده می‌شود از ولتاژ صفر به صورت افقی شروع شده و به حالت کم و بیش خطی با شیب زیاد ادامه می‌یابد. زمان اولین شکستی که در حالت ثابت رخ می‌دهد به عنوان مبدا آزمایش یا زمان صفر انتخاب می‌شود. این نقطه در شروع منحنی انتقال و یا در محل تقاطع ولتاژ صفر با قسمت خطی اولین دریافت انتخاب می‌شود،

ز- شمارنده با ارسال اولین موج توسط فرستنده شروع به کار کرده و با دریافت اولین موج توسط گیرنده متوقف می‌شود. از آن‌جایی‌که شمارنده برای شروع کار نیاز به یک تغییر ولتاژ دارد، نمی‌تواند به طور دقیق اولین شکست موج را آشکار سازد. برای داشتن بیش‌ترین دقت در اندازه‌گیری زمان انتقال، حساسیت شمارنده باید بدون تولید نوفه‌های الکتریکی خارجی به مقدار بهینه افزایش داده شود،

ح- زمان صفر مدار که شامل ترانسدیوسرها و ابزار اندازه‌گیری زمان عبور موج است، تعیین شده و با کمک آن زمان‌های عبور اندازه‌گیری شده تصحیح می‌شود. اگر مشخصات مدار تغییر نکند، این ضریب برای یک نمونه سنگ و یک سطح تنش مشخص، ثابت خواهد ماند. زمان صفر با یکی از روش‌های زیر تعیین می‌شود:

- قرار دادن ترانسدیوسرها در تماس مستقیم با یکدیگر و اندازه‌گیری تاخیر زمانی به طور مستقیم (این روش در مورد قرص‌های برشی که قرارگیری غیرمحوری آن‌ها باعث ایجاد خطاهای زیاد در نتایج شده، پیشنهاد نمی‌شود)،
- اندازه‌گیری زمان انتقال پالس در ماده‌ای یکنواخت (مثل فولاد) به صورت تابعی از فاصله و ترسیم خط عبوری از این نقاط (مقدار عرض از مبدا این منحنی یعنی زمان انتقال در فاصله صفر به عنوان ضریب تصحیح استفاده می‌شود. این روش اختصاصا برای امواج برشی کاربرد دارد).

ط- ازآن‌جایی‌که اولی موج دریافتی از نوع فشاری است، بررسی آن نسبتا ساده می‌باشد. اما موج برشی دریافتی، ممکن است توسط ارتعاشات ناشی از طنین ترانسدیوسرها و یا انعکاس موج فشاری محو شود. بزرگی موج برشی را می‌توان با استفاده از ترانسدیوسرهایی با المان ضخیم‌تر در مقایسه با موج فشاری افزایش داد و زمان را به طور دقیق‌تری اندازه‌گیری کرد. این نوع المان به نحوی انرژی فشاری تولید می‌کند که امواج طولی و عرضی در آن قابل تشخیص است،

1- Time Delay Circuits

ی- در نمونه‌هایی که تحت تنش تک محوری هستند، معمولا اولین دریافت موج فشاری کاملا مشخص است. اما با توجه به انعکاس‌های ایجاد شده در سطوح آزاد نمونه، تعیین زمان دقیق اولین دریافت موج برشی برای نمونه‌های تحت تنش کمی پیچیده بوده و نیاز به دقت بیش‌تری دارد،

ک- تشخیص زمان دریافت موج عرضی بستگی به ابعاد نمونه نیز دارد. به عنوان مثال تشخیص زمان گذر موج عرضی در نمونه‌ای با نسبت طول به عرض ۲ به مراتب راحت‌تر از نمونه‌ای با نسبت طول به عرض ۱ است.

۱-۶-۲-۳- محاسبات

سرعت عبور امواج فشاری و برشی با توجه به زمان‌های عبور موج و فاصله بین ترانسدیوسرها از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

$$V_P = \frac{d}{t_P} \qquad (۳۷-۱)$$

$$V_S = \frac{d}{t_S} \qquad (۳۸-۱)$$

که در آن‌ها:

V_P = سرعت موج فشاری (میلی‌متر بر ثانیه)،

V_S = سرعت موج برشی (میلی‌متر بر ثانیه)،

t_P = زمان گذر موج فشاری (ثانیه)،

t_S = زمان گذر موج برشی (ثانیه)،

d = فاصله بین فرستنده و گیرنده (متر) می‌باشد.

۱-۶-۳- روش موج صوتی با بسامد پایین

این روش برای اندازه‌گیری سرعت امواج اتساعی و پیچشی[1] در نمونه‌های سنگی استوانه‌ای یا میله‌ای شکل[2] به‌کار می‌رود. این روش در مورد نمونه‌هایی که طول آن‌ها در مقایسه با قطرشان زیاد است، مناسب می‌باشد. همچنین نسبت طول موج به قطر نمونه باید بزرگ‌تر از ۵ باشد.

۱-۶-۳-۱- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- ژنراتور مولد پالس: این ژنراتور باید دارای مشخصات زیر باشد:
  - دامنه بسامد: ۲ تا ۳۰ کیلوهرتز،

1- Dilational & Torsional Waves
2- Bar or Rod Like Rock Specimens

- بسامد تکرار: ۱۰ تا ۱۰۰ تکرار در هر ثانیه،
- ولتاژ پالس: قابل تطبیق با نوع ترانسدیوسر (باید تا حد امکان بالا باشد)،

– ترانسدیوسرها

- فرستنده: از جنس سرامیک‌های پیزوالکتریک یا المان‌های خاص مغناطیسی که قادرند در دامنه بسامد ۲ تا ۳۰ کیلوهرتز پالس‌هایی با طول موج بالا تولید کنند،
- گیرنده: از جنس سرامیک‌های پیزوالکتریک یا المان‌های خاص مغناطیسی با بسامد آرام[1] در محدوده‌ی ۲ تا ۳۰ کیلوهرتز،

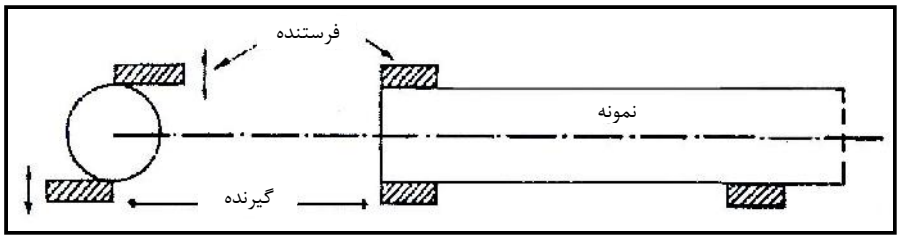
– صافی، آمپلی فایر، CRO و زمان‌سنج قابل استفاده در بسامدهای پایین

۱-۶-۳-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر در مورد این روش آزمایش اجرا می‌شود:

الف- نمونه مورد آزمایش، استوانه‌ای با نسبت طول به قطر بزرگ‌تر از ۳ بوده که دست‌کم قطر آن ۱۰ سانتی‌متر باشد. سطوح انتهایی نمونه باید کاملا تخت بوده و با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر در هر میلی‌متر (۰/۵ میلی‌متر در ۱۰ سانتی‌متر) طول نمونه موازی باشند. شرایط نمونه‌گیری، حمل و نقل و حالت رطوبت نمونه مشابه آنچه در روش قبل عنوان شده است.

ب- نمونه در داخل فک‌های مربوط قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری سرعت موج طولی (V_P)، فرستنده با تنشی تقریبا معادل ۱۰ نیوتن بر سانتی‌متر مربع به یکی از سطوح انتهایی نمونه و به‌طور عمود بر محور مغزه فشرده می‌شود. برای اندازه‌گیری سرعت موج عرضی (V_S) پیشنهاد می‌شود که فرستنده به روش نشان داده شده در شکل (۱- ۵) روی نمونه قرار گیرد.



شکل ۱- ۵- نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده روی نمونه در آزمایش با موج فرکانس پایین

۱-٦-۳-۲-۱- برای قرار دادن گیرنده روی نمونه از دو روش می‌توان استفاده کرد:

– روش انتشار موج: در این روش، گیرنده در انتهای دیگر مغزه و روبروی فرستنده قرار می‌گیرد. بنابراین دو سطوح انتهایی نمونه باید با دقت یک درجه با هم موازی باشند،

1- Flat

- روش مقطع لرزه‌ای: در این حالت، گیرنده روی سطح جانبی مغزه و در امتدادی موازی محور آن حرکت می‌کند،
- ادامه مراحل کاملا همانند زیربند مراحل انجام آزمایش از بند ۱-۶-۲-۲ تا آخر است.

۱-۶-۳-۳- محاسبات

سرعت‌های عبور امواج فشاری و برشی از روابط ۱-۳۷ و ۱-۳۸ یاد شده محاسبه خواهد شد.

۱-۶-۴- روش فرکانس تشدید

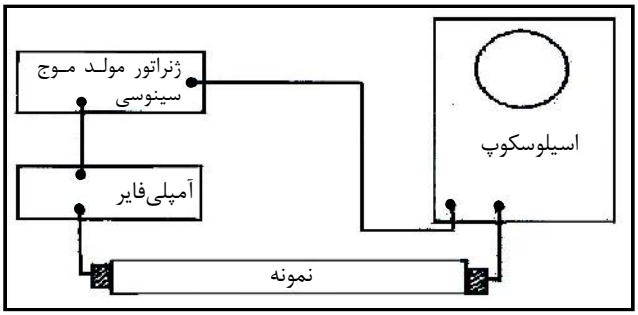
این روش آزمایش برای تعیین سرعت انتشار امواج یک بعدی (اتساعی و پیچشی) در نمونه‌های استوانه‌ای یا میله‌ای شکل به کار می‌رود. این روش در مورد نمونه‌هایی که نسبت طول به قطر بالایی دارند، مناسب است. همچنین نسبت طول به قطر نمونه باید بزرگ‌تر از ۶ باشد.

۱-۶-۴-۱- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- ژنراتور مولد موج سینوسی با دامنه فرکانسی بین ۱ تا ۱۰۰ کیلوهرتز و ولتاژ پالس معادل روش‌های اول و دوم
- ترانسدیوسرها:
  - فرستنده: سرامیک‌های پیزوالکتریک یا المان‌های خاص مغناطیسی با بسامد آرام در محدوده ۱ تا ۱۰۰ کیلوهرتز،
  - گیرنده: سرامیک‌های پیزوالکتریک با ظرفیت بالا و بسامد آرام در محدوده ۱ تا ۱۰۰ کیلوهرتز.
- CRO و آمپلی فایر.

در شکل (۱-۶) نحوه قرارگیری وسایل الکتریکی نسبت به نمونه نشان داده شده است.



شکل ۱-۶- نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده روی نمونه در آزمایش بسامد تشدید

۱-۶-۴-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در این آزمایش اجرا می‌شوند:

الف- نمونه مورد آزمایش، استوانه‌ای با نسبت طول به قطر بزرگ‌تر از ۳ است. سطوح انتهایی نمونه باید تا ۰/۰۰۱ میلی‌متر پرداخت شده و با دقت ۰/۱ میلی‌متر در هر ۲۰ میلی‌متر طول نمونه موازی باشند. شرایط نمونه‌گیری، حمل و نقل و حالت رطوبت نمونه باید مشابه آنچه در ۱-۶-۲-۲ عنوان شده است، باشد.

ب- نمونه داخل فک‌های مربوط قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری بسامد تشدید طولی، هر دو ترانسدیوسر توسط فنرهای نرم و با نیروی بیشینه ۱۰ نیوتن به مرکز سطوح انتهایی نمونه فشار داده می‌شود تا به‌این ترتیب شرایط انتهایی آزاد فراهم شود.

ج- بسامد فرستنده آن‌قدر بالا برده می‌شود تا CRO بیش‌ترین مقدار را نشان دهد. کم‌ترین بسامد تشدید در سه حالت اولیه[1] یادداشت می‌شود.

د- برای اندازه‌گیری بسامد تشدید پیچشی، فرستنده باید طوری قرار داده شود که بتواند ارتعاشی پیچشی تولید کند.

نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده روی نمونه در شکل (۱-۶) ارائه شده است.

۱-۶-۴-۳- محاسبات

سرعت موج تک‌بعدی (لوله‌ای) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_d = 2lf_0 \qquad (۳۹-۱)$$

که در آن‌ها:

V_d = سرعت موج تک بعدی (میلی‌متر بر ثانیه)

l = طول نمونه (متر)

f_0 = بسامد تشدید در حالت صفر برای ارتعاش اتساعی یا پیچشی (عکس ثانیه) می‌باشد.

یادآوری: نتایج حاصل از هر سه روش نشان داده است که به دلیل طبیعت ناهمگن نمونه‌ها (سنگ‌ها) نتایج یکسان به‌دست نخواهد آمد. بنابر این وجود ناهم‌خوانی در نتایج آزمایش ناشی از تغییر نمونه، تغییر شخص انجام دهنده و تغییر محل آزمایش امری طبیعی و نتایج قابل قبول است.

۱-۶-۵- گزارش نتایج

گزارش کامل هر یک از سه روش آزمایش باید حاوی اطلاعات زیر باشد:

1- This First tree modes

- مشخصات نمونه شامل نوع سنگ و محل دقیق نمونه‌برداری (به عنوان مثال: کشور، منطقه، سازند زمین‌شناسی، کارگاه، عمق نمونه‌گیری، مشخصات ویژه زمین‌شناسی و عوارض ساختاری موجود در نقطه نمونه‌گیری)،
- ابعاد نمونه و شکل آن،
- نحوه به‌دست آمدن نمونه (مانند: آتش‌کاری در کارگاه، حفاری در سطح سالم یا هوازده سنگ)،
- توصیف سنگ‌شناسی، ساخت، بافت و نحوه توزیع ریز ترک‌ها،
- نحوه آماده‌سازی نمونه (شامل کیفیت مغزه، کیفیت سطوح انتهایی، تعداد مغزه‌های گرفته شده از یک بلوک، جهت‌گیری مغزه‌ها نسبت به ناهمسان‌گردی‌های زمین‌شناسی)،
- توصیف روش آزمایش، مشخصات مولد موج الکتریکی، مشخصات ترانسدیوسرها و نحوه اتصال ترانسدیوسرها به نمونه (توصیه می‌شود حتما یک نمودار دامنه – فرکانس ارائه شود)،
- تنش اولیه وارد بر نمونه،
- ویژگی‌های فیزیکی سنگ (به‌خصوص تخلخل و نفوذپذیری)،
- سرعت‌های به‌دست آمده در شرایط عادی (دمای اتاق، فشار اتمسفر و نمونه خشک شده در هوای اتاق)،
- قابلیت تکرار،
- تغییر سرعت‌ها در شرایط ثابت آزمایش، سرعت‌های میانگین، خطای متوسط و انحراف بیشینه،
- منحنی زمان عبور – فاصله (در روش مقطع لرزه‌ای)،
- نموداری از خروجی CRO یا چاپگر در صفحه مختصات x-y،
- روشی که برای قرائت زمان گذر استفاده شده است (مثل اولین انحراف موج فرستنده، تا اولین انحراف موج گیرنده روی CRO، اولین نقطه‌ی ماکزیمم در موج دریافتی و ...)،
- داده‌های سرعت – تنش (در صورت اندازه‌گیری)،
- سرعت موج فشاری (V_P) و موج برشی (V_S) بر حسب متر بر ثانیه،
- سرعت موج تک‌بعدی (اتساعی و پیچشی) بر حسب متر بر ثانیه،
- چگالی بر حسب گرم بر سانتی‌مترمکعب،
- تنش بر حسب پاسکال،
- ثابت‌های اولتراسونیک (در صورت نیاز و درصورتی که درجه ناهمسان‌گردی بیش از حد نباشد).

نمونه‌ای از برگه نتایج این آزمایش در جدول (۱-۱۲) ارائه شده است.

جدول ۱- ۱۲- برگه گزارش نتایج آزمایش تعیین ثابت‌های کشسان دینامیکی

آزمایش تعیین ثابت‌های کشسان دینامیکی روش آزمایش:..... شماره کار:			شماره گمانه:		
نام پروژه:			عمق:		
متقاضی:			شماره نمونه:		
توصیف سنگ‌شناسی:			توصیف ساخت و بافت:		
	پارامتر	نماد	رابطه	واحد	مقدار
روش نمونه‌گیری صحرایی:	فاصله ترانسدیوسرها	d	-	میلی‌متر	
کیفیت سطوح انتهایی نمونه:	طول نمونه	L	-	میلی‌متر	
تعداد مغزه‌های گرفته شده از یک بلوک:	قطر نمونه	D	-	میلی‌متر	
جهت‌گیری نمونه نسبت به ناهمسان‌گردی:	جرم نمونه	m	-	گرم	
شرایط رطوبت نمونه:	چگالی	ρ	$\frac{4m}{\pi D^2 L}\times 10^3$	کیلوگرم بر مترمکعب	
دمای محیط آزمایشگاه:	زمان گذر موج فشاری	t_P	-	میکروثانیه	
فشار هوا:	سرعت موج فشاری	V_P	$(\frac{d}{t_P})\times 10^3$	متر برثانیه	
درصد رطوبت نمونه:	زمان گذر موج برشی	t_S	$(\frac{d}{t_P})\times 10^3$	متر برثانیه	
مشخصات مولد موج:	سرعت موج برشی	V_S	$(\frac{d}{t_S})\times 10^3$	متر برثانیه	
مشخصات ترانسدیوسرها:	نسبت سرعت موج فشاری به برشی	-	$\frac{V_P}{V_S}$	-	
نحوه اتصال ترانس دیوسر به نمونه:	ضریب پواسون	ν_D	$\frac{V_P^2-2V_S^2}{2(V_P^2-V_S^2)}$	-	
تنش اعمالی اولیه:	مدول برشی	G_D	ρV_S^2	پاسکال	
روش قرائت زمان گذر:	مدول یانگ	E_D	$\rho V_S^2 \frac{3V_P^2-4V_S^2}{V_P^2-V_S^2}$	پاسکال	

فصل ۲

دستورالعمل انجام آزمایش‌های مکانیکی سنگ

۲-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری نامحصور[1] (تک محوری)[2] ماده سنگ[3] و ضرایب تغییر شکل‌پذیری آن

۲-۱-۱- آزمایش مقاومت فشاری نامحصور (تک محوری) ماده سنگ

۲-۱-۱-۱- هدف

هدف از این آزمایش تعیین مقاومت فشاری نامحصور نمونه‌های استوانه‌ای شکل از ماده سنگ است.

۲-۱-۱-۲- اهمیت و موارد استفاده

این آزمایش از مهم‌ترین و متداول‌ترین آزمایش‌های مکانیک سنگ است و نتایج به‌دست آمده از آن به‌ویژه در موارد زیر به‌کار می‌رود:

- مقایسه کمی استحکام سنگ‌های مختلف برای طبقه‌بندی آن‌ها از دیدگاه مقاومت فشاری نامحصور،
- به‌دست آوردن اندازه مقاومت فشاری سنگ به عنوان یک پارامتر شاخص[4] مهم در مهندسی سنگ،
- کاربری به عنوان یک پارامتر مهم در طبقه‌بندی توده سنگ‌ها از دیدگاه مهندسی،
- ارزیابی تاثیر رطوبت بر مقاومت فشاری نامحصور سنگ و مقایسه مقاومت‌های مختلف یک سنگ در درصدهای گوناگون رطوبت.

۲-۱-۱-۳- محدودیت آزمایش

انجام این آزمایش اغلب برای تعیین مقاومت اشباع سنگ‌های نرم، واروندهٔ[5] و سنگ‌های حساس به تغییر میزان رطوبت میسر نیست.

۲-۱-۱-۴- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- دستگاه بارگذاری باید برای اعمال و اندازه‌گیری بار محوری مناسب بوده و توان کافی برای اعمال بار محوری بر نمونه آزمایش[6] را مطابق شرایط مندرج در بند ۲-۱-۱-۶ این دستورالعمل داشته باشد. این دستگاه باید با مشخصات ثبت شده در یکی از استانداردهای بین‌المللی مطابقت داشته باشد،

1- Unconfined
2- Uniaxial
3- Rock Material
4- Index Parameter
5- Slaky
6- Specimen

- دیسک‌های فولادی با حداقل سختی ۵۸ راکول HRC، که در دو انتهای نمونه آزمایش قرار می‌گیرند. اندازه قطر این صفحه‌ها باید دست کم معادل قطر نمونه و تا میزان بیشینه ۲ میلی‌متر بیش‌تر از آن باشد. ضخامت دیسک‌ها باید دست‌کم برابر ۱۵ میلی‌متر یا $\frac{۱}{۳}$ قطر نمونه آزمایش بوده و رویه آن‌ها با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر صاف باشد.
- صفحه بارگذاری دستگاه با یک مفصل کروی[1] که روی سطح نمونه قرار می‌گیرد همراه است. این مفصل باید کمی روغن‌کاری شود، به‌گونه‌ای که پس از برداشتن بار (جدا شدن صفحه بارگذاری از آن) ثابت باقی بماند. نمونه آزمایش، صفحه‌های دیسکی شکل و مفصل کروی باید نسبت به یکدیگر و نسبت به صفحه بارگذاری به دقت تنظیم شده و در یک راستای محوری قرار گیرند. مرکز انحنای مفصل باید بر مرکز سطح مقطع نمونه آزمایش منطبق باشد.

۲-۱-۱-۵- آماده‌سازی نمونه

نمونه آزمایش باید طبق مشخصات مندرج در زیر آماده گردد:

- نمونه مورد آزمایش باید به شکل استوانه قائم با نسبت طول به قطر ۲ تا ۳ باشد و بهتر است قطر آن از قطر مغزه‌های با اندازه NX (حدود ۵۴ میلی‌متر) کم‌تر نباشد. قطر نمونه آزمایش باید دست کم ۱۰ برابر اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه تشکیل دهنده آن باشد،
- دو انتهای نمونه آزمایش باید با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر تخت بوده و نباید از امتداد عمود بر محور نمونه بیش از ۰/۰۰۱ رادیان (در حدود ۳/۵ دقیقه) یا ۰/۰۵ میلی‌متر در ۵۰ میلی‌متر انحراف داشته باشد،
- سطح جانبی نمونه آزمایش باید صاف و بدون هرگونه ناهمواری قابل ملاحظه باشد. سطح جانبی نمونه در تمام طول آن نباید بیش از ۰/۳ میلی‌متر انحراف داشته باشد،
- استفاده از هرگونه مواد پوششی یا هر نوع کار اصلاحی، بجز از صیقل دادن، در دو انتهای نمونه آزمایش مجاز نیست.
- قطر نمونه آزمایش باید با دقت ۰/۱ میلی‌متر در دو راستای عمود بر هم در سه مقطع (بخش‌های بالایی، میانی و پایینی نمونه) اندازه‌گیری شده میانگین آن‌ها برای محاسبه مساحت سطح مقطع مورد استفاده قرار گیرد. اندازه‌گیری طول نمونه آزمایش با دقت ۱/۰ میلی‌متر کافی است،
- نمونه‌های آزمایش باید در انبار به‌گونه‌ای نگهداری شوند که تا حد امکان رطوبت طبیعی خود را تا زمان آماده‌سازی نمونه حفظ کنند. طول مدت انبارداری نباید از ۳۰ روز بیش‌تر باشد. رطوبت نمونه آزمایش باید در انطباق با یکی از روش‌های استاندارد تعیین و گزارش شود،

1- Spherical Seat

- تعداد نمونه‌های آزمایش باید با توجه به مواردی مانند نوع سنگ، ویژگی‌های آن و دقت مورد نظر تعیین شود ولی بهتر است از پنج نمونه آزمایش کم‌تر نباشد.

۲-۱-۱-۶- مراحل اجرای آزمایش

مراحل زیر، در مورد روش آزمایش اجرا می‌شود:

الف- پیش از انجام هر آزمایش، ابتدا باید توانایی مفصل‌ها نسبت به گردش آزادانه در محل خود کنترل شود.

ب- صفحات بارگذاری بالایی و پایینی و سطوح نمونه را باید به‌طور کامل تمیز کرده و نمونه را روی صفحه پایین به‌طوری قرار داد که محور نمونه با مرکز دوران مفصل‌های کروی در یک امتداد قرار گیرد. در همان حال که بار به تدریج روی نمونه وارد می‌شود، قسمت متحرک مفصل کروی را باید به‌شکلی تنظیم کرد که سطح نمونه را به طور کامل بپوشاند.

ج- بار باید به طور پیوسته و بدون اعمال ضربه و با آهنگی ثابت بر نمونه آزمایش وارد شود تا یک آهنگ کم و بیش ثابت بارگذاری یا تغییر شکل به‌دست آمده و شکست[1] نمونه در طول مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه رخ دهد. به‌جای آن می‌توان آهنگ بارگذاری بین ۰/۵ تا ۱/۰ مگاپاسکال بر ثانیه را اختیار نمود.

د- بیش‌ترین بار وارد بر نمونه آزمایش، باید بر حسب نیوتن (کیلونیوتن یا مگانیوتن، بر حسب مورد) و با دقت ۱٪ یادداشت شود.

۲-۱-۱-۷- محاسبات

مقاومت فشاری نامحصور نمونه از تقسیم بیشینه بار وارده بر نمونه آزمایش بر مساحت سطح مقطع اولیه نمونه به‌دست می‌آید.

۲-۱-۱-۸- گزارش نتایج

گزارش آزمایش باید شامل اطلاعات زیر باشد:

- توصیف سنگ‌شناسی نمونه آزمایش،
- محل نمونه‌برداری (موقعیت جغرافیایی، عمق و جهت‌داری[2])، روش و تاریخ نمونه‌گیری و همچنین تاریخ انجام آزمایش و وضعیت نگهداری نمونه در انبار،
- قطر و ارتفاع نمونه،
- درصد رطوبت و درجه اشباع نمونه در زمان انجام آزمایش،

1- Failure
2- Orientation

- طول مدت آزمایش و آهنگ بارگذاری یا تغییر شکل،
- جهت محور بارگذاری نسبت به امتداد ناهمسانی نمونه همانند صفحات لایه‌بندی، تورق[1] و قاچ (کلیواژ)،
- تعداد نمونه‌های آزمایش شده،
- نوع دستگاه آزمایش،
- نوع شکست از قبیل برش، قاچ طولی[2] و ...،
- هر نوع اطلاعات فیزیکی موجود یا قابل مشاهده مانند وزن مخصوص، تخلخل و تراوایی با ذکر روش تعیین هرکدام،
- مقاومت فشاری نامحصور برای هریک از نمونه‌های آزمایشگاهی همراه با میانگین نتیجه‌ها برای هر نوع سنگ و با یک عدد شامل ۳ رقم و با دقت ۱ درصد (به عنوان مثال ۲/۰۷ یا ۲۰/۷ یا ۲۰۷) محاسبه می‌شود. تنش و مقاومت باید بر حسب پاسکال (کیلوپاسکال یا مگاپاسکال بر حسب مورد) بیان شود،
- اگر در مواردی آزمایش نمونه‌ها درست براساس مشخصات دستورالعمل حاضر میسر نباشد، موارد تفاوت باید در گزارش آزمایش بیان شود.

۲-۱-۲- تعیین ضرایب تغییر شکل‌پذیری ماده سنگ در فشار نامحصور (تک‌محوری)

۲-۱-۲-۱- هدف

این آزمایش به منظور ترسیم منحنی‌های تنش–کرنش، تعیین مدول یانگ (کشسانی)[3] و نسبت پواسن برای یک نمونه آزمایشگاهی ماده سنگ دارای شکل هندسی منظم، تحت فشار تک محوری به‌کار می‌رود. آزمایش مورد نظر به‌طور عمده با هدف طبقه‌بندی و تعیین مشخصه‌های رفتاری ماده سنگ انجام می‌شود.

۲-۱-۲-۲- اهمیت و موارد استفاده

اهمیت و موارد استفاده از این آزمایش، به قرار زیر می‌باشد:

- شناسایی نوع و حالت رفتار سنگ (کشسان خطی، کشسان غیرخطی، غیرکشسان)،
- شناسایی نقاط تغییر و دامنه رفتار سنگ در حالت‌های بارگذاری و باربرداری،
- تعیین انواع مدول یانگ (مماسی، وتری، میانگین)،
- ارزیابی کیفی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مانند تخلخل، سختی و شکنندگی.

1- Foliation
2- Axial Cleavage
3- Elastic

۲-۱-۲-۳- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

الف- لوازم و تجهیزات مندرج در مورد آزمایش مقاومت فشاری نامحصور ماده سنگ،

ب- کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی[1]، جابه‌جایی‌سنج‌های موسوم به LVDT[2]، فشردگی‌سنج‌ها[3]، ابزار نوری یا دیگر ابزار اندازه‌گیری مناسب. این ابزار که به فاصله‌های یکسان روی نمونه نصب می‌شود، هریک از کرنش‌های محوری و جانبی را در گام‌های مختلف بارگذاری به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌کند. طراحی این ابزار باید به‌گونه‌ای باشد که بتوان میانگین کرنش‌های محوری و کرنش‌های جانبی اندازه‌گیری شده را به‌طور جداگانه در هر گام بارگذاری تعیین نمود. این ابزار باید دارای استحکام و دوام کافی بوده و حساسیت سنجش کرنش در حد ۵×۱۰^{-۶} را داشته باشد.

دقت اندازه‌گیری کرنش‌های محوری و جانبی باید بیش‌تر از ۲درصد باشد و قرائت آن با دقت ۰/۲ درصد دامنه اندازه‌گیری مورد استفاده، صورت گیرد. اگر برای اندازه‌گیری از کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی استفاده شود، اندازه طولی که کرنش‌های محوری و جانبی روی آن تعیین می‌شود باید دست کم ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه باشد و فاصله کرنش‌سنج از انتهای نمونه نباید کم‌تر از $\frac{D}{۲}$ باشد (D قطر نمونه مورد آزمایش است)،

اگر برای اندازه‌گیری تغییر شکل محوری ناشی از بارگذاری از میکرومتر عقربه‌ای[4] یا LVDT استفاده شود، این ابزار باید با دقت دست کم ۰/۰۰۲ میلی‌متر در دامنه ۰/۰۲ میلی‌متری و یا ۰/۰۰۵ میلی‌متر در دامنه ۰/۲۵ میلی‌متری (برای قرائت واحدهای ۰/۰۰۲ میلی‌متری) مدرج شود. میکرومتر عقربه‌ای یا LVDT نیز نباید در فاصله $\frac{D}{۲}$ از هر انتهای نمونه نصب شود،

- ابزاری برای ثبت بار و تغییر شکل‌ها، استفاده از یک ثبات X-Y که بتواند منحنی‌های بار – تغییر شکل را به‌طور مستقیم ترسیم نماید ترجیح داده می‌شود.

۲-۱-۲-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- با توجه به مراحل انجام آزمایش مقاومت فشاری نامحصور (تک‌محوری) ماده سنگ،

ب- رطوبت ممکن است تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر شکل‌پذیری نمونه آزمایشگاهی داشته باشد. در صورت امکان باید رطوبت طبیعی نمونه را تا زمان آزمایش حفظ کرد. هرگاه ضریب تغییر شکل‌پذیری ماده سنگ در شرایط

1- Electrical Resistance Strain Gauges
2- Linear Variable Differential Transducer
3- Compressometers
4- Dial Gauge

متغیر از خشک تا اشباع مورد نیاز باشد، اندازه رطوبت باید با دقت مناسب به‌گونه‌ای تعیین شود که بتوان رابطه بین تغییرشکل‌پذیری و درصد رطوبت نمونه را بیان کرد. اگر نمونه دارای رطوبت بیش از حد باشد، کرنش‌سنج به‌خوبی به آن نمی‌چسبد، در این حالت می‌توان رطوبت نمونه را کاهش داد. درصد رطوبت را باید طبق استاندارد تعیین درصد رطوبت نمونه گزارش نمود،

ج- بار باید با آهنگ ثابت تنش، به‌طور پیوسته به نمونه وارد شود، به‌طوری‌که نمونه در مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه از آغاز بارگذاری بشکند. روش دیگر آن است که آهنگ تنش در محدوده ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه قرار گیرد،

د- درصورتی‌که ثبت نتایج به‌صورت پیوسته میسر نباشد، اندازه بار و کرنش‌ها (تغییر شکل‌ها)ی محوری و محیطی باید در فاصله‌های زمانی یکسان در هنگام بارگذاری ثبت شود،

هـ- برای ترسیم منحنی‌های تنش – کرنش محوری و قطری، باید دست کم دو قرائت در طول بارگذاری انجام شود،

و- گاهی اجرای چند چرخه[1] بارگذاری و باربرداری پیشنهاد می‌شود که مطابق این روش قابل اجرا است،

ز- تعداد نمونه‌های مورد آزمایش در شرایط مشخص، باتوجه به ملاحظات عملی تعیین می‌شود ولی برای آزمایش دست کم ۵ نمونه پیشنهاد می‌شود.

۲-۱-۲-۵- محاسبات

مقادیر کرنش‌های محوری، قطری و محیطی و نیز مدول‌های یانگ مماسی، میانگین و وتری و نسبت پورسون ماده سنگ، با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

- کرنش محوری (ε_a) و کرنش قطری (ε_d) را می‌توان به‌طور مستقیم به وسیله انواع کرنش‌سنج‌ها ثبت کرد، یا این‌که از تغییر شکل‌های قرائت شده محاسبه کرد که این مورد به نوع ابزار اندازه‌گیری مورد استفاده بستگی دارد (بند ۲-۱-۲-۳).
- کرنش محوری از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

l_0 = طول محوری اولیه اندازه‌گیری شده،

Δl = تغییر طول محوری اندازه‌گیری شده که براساس تعریف کاهش در طول، مثبت در نظر گرفته می‌شود.

- کرنش قطری را می‌توان با اندازه‌گیری تغییر قطر نمونه یا با اندازه‌گیری کرنش محیطی تعیین کرد. در صورت اندازه‌گیری تغییر قطر (Δd_m) کرنش قطری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

1- Cycle

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d_m}{d_0} \qquad (۲-۲)$$

که در آن:

d_0 = قطر اولیه نمونه قبل از تغییر شکل،

Δd_m = تغییر در قطر که براساس تعریف افزایش قطر، منفی در نظر گرفته می‌شود.

$\Delta d_m = \Delta d_1 + \Delta d_2$ و Δd_2 مقادیر تغییر قطر هستند که در دو انتهای یک قطر از نمونه واقع در وسط طول نمونه اندازه‌گیری می‌شوند.

در صورت اندازه‌گیری کرنش محیطی ε_c، با توجه به آن‌که محیط نمونه $C = \pi d$ است، بنابراین تغییر در محیط $\Delta C = \pi \Delta d$ می‌باشد. درنتیجه، کرنش محیطی (ε_c) توسط رابطه زیر با کرنش قطری (ε_d) مرتبط خواهد بود:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta_c}{C_o} = \frac{\Delta_{d_m}}{d_o} \qquad (۳-۲)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_d \qquad (۴-۲)$$

بنابراین:

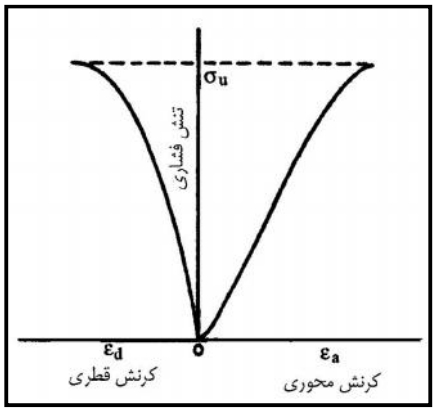
در این روابط، C_o و d_o به ترتیب محیط و قطر اولیه نمونه می‌باشند.

د- تنش فشاری در نمونه آزمایش (σ)، از طریق تقسیم بار فشاری (P) بر مساحت اولیه مقطع نمونه (A_o) بر طبق فرمول زیر دست می‌آید،

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \qquad (۵-۲)$$

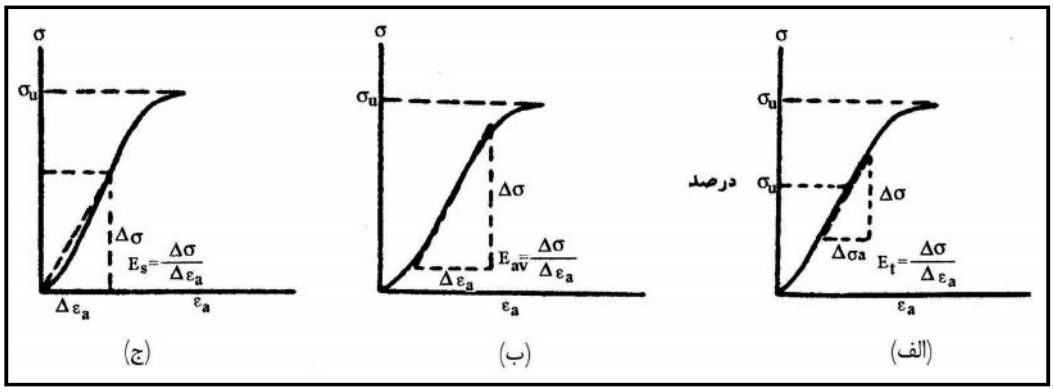
در این آزمایش، تنش‌های فشاری و کرنش‌های متناظر آن، مثبت در نظر گرفته می‌شود.

- شکل (۲-۱) نمونه‌ای از منحنی تنش محوری بر حسب کرنش‌های محوری و قطری می‌باشد. این منحنی‌ها، نمونه‌هایی از رفتار ماده‌سنگ از تنش صفر تا مقاومت نهایی (σ_u) می‌باشند. منحنی‌های کامل، بهترین توصیف را برای دگرشکلی سنگ‌هایی که در ترازهای پایین و بالای تنش رفتار تنش – کرنش غیرخطی دارند، ارائه می‌نمایند.



شکل ۲-۱- منحنی تنش محوری بر حسب کرنش‌های محوری و قطری

– مدول محوری یانگ (E) را می‌توان به یکی از روش‌های قابل قبول، متناسب با مورد کاربرد، مطابق شکل (۲-۲) محاسبه کرد:



شکل ۲-۲- روش‌های محاسبه مدول یانگ از منحنی تنش – کرنش محوری

- مدول یانگ مماسی (E_t)، در تراز تنشی که درصد ثابتی از مقاومت نهایی سنگ است اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۲-۲- الف)، به‌طور کلی این تراز تنش معادل ۵۰ درصد مقاومت فشاری نهایی در نظر گرفته می‌شود،
- مدول یانگ میانگین (E_{av})، از روی شیب بخش نسبتا مستقیم منحنی تنش – کرنش محوری به‌دست می‌آید (شکل ۲-۲- ب)،
- مدول یانگ وتری (E_s)، عبارت است از شیب خط رابط بین نقطه تنش صفر و نقطه مربوط به تراز تنش مورد نظر (شکل ۲-۲- ج) که اغلب در ۵۰ درصد مقاومت نهایی نمونه اندازه‌گیری می‌شود،
- مدول یانگ محوری (E)، بر حسب واحدهای تنش بیان می‌شود، که متداول‌ترین آن گیگاپاسکال ($GPa = 10^9 Pa$) می‌باشد.

– نسبت پواسن (ν) را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\nu = \frac{\text{شیب منحنی تنش محوری – کرنش محوری}}{\text{شیب منحنی تنش محوری – کرنش قطری}} = \frac{E}{\text{شیب منحنی قطری}}$$

شیب منحنی قطری از روی منحنی تنش محوری – کرنش قطری محاسبه می‌شود. باید توجه داشت که نسبت پواسن در این معادله دارای ارزش مثبت است، زیرا شیب منحنی قطری براساس علامت قراردادی در این روش منفی است.

– کرنش حجمی (ε_v)، برای یک تراز تنش مشخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_d \qquad (۷-۲)$$

۲-۱-۲-۶- گزارش نتایج

گزارش آزمایش باید موارد زیر را در برگیرد:

– تمام زیربندهای ۲-۱-۱-۸ [آزمایش مقاومت فشاری نامحصور (تک‌محوری) ماده سنگ]،

- اندازه بارهای وارده و مقادیر تنش و کرنش، به‌صورت جدول نتیجه‌ها یا به‌گونه‌ای که روی نمودار ثبت شده‌اند،
- مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسن برای هر نمونه سنگ همراه با میانگین آن برای هر نوع سنگ با یک عدد شامل سه رقم و با دقت ۱ درصد بیان می‌شود (به عنوان مثال ۰/۲۰۷ یا ۲/۰۷ یا ۲۰/۷ یا ۲۰۷)،
- شیوه محاسبه مدول یانگ و تراز تنش محوری (درصدی از مقاومت نهایی) که این مدول در آن تراز محاسبه شده است،
- اگر در مواردی، آزمایش نمونه‌هایی لازم باشد که با مشخصات بالا انطباق کامل ندارند، موارد تفاوت باید در گزارش آزمایش ثبت شود.

نمونه جدول ثبت نتیجه‌های آزمایش، در جدول‌های (۲-۱) و (۲-۲) ارائه شده است.

جدول ۲-۱- برگ ثبت نتیجه‌های آزمایش تعیین مقاومت فشاری نامحصور (تک‌محوری) و ضرایب تغییر شکل‌پذیری آن

شماره برگ . . .			**تاریخ . . .**			**نوع دستگاه آزمایش . . .**			
مشخصات نمونه			**اندازه نمونه (میلی‌متر)**		$\frac{L}{D}$	A **سطح مقطع (میلی‌متر مربع)**	**درصد اشباع** - . . . ٪		
جنس	**شماره**	**محل**	**نوع**[1]	**طول L**	**قطر D**		**وزن مخصوص:**		
							درصد تخلخل - . . . ٪		
ردیف	**قرائت‌ها**					**محاسبات**			
	F(kN)	Δ_1	Δd_1	Δd_2	Δd_m	ε_a	ε_d	σ_a	ν
۱									
۲									
۳									
۴									
۵									
۶									
۷									
۸									
۹									
۱۰									
۱۱									
۱۲									
۱۳									
۱۴									
۱۵									
۱۶									
۱۷									
۱۸									
۱۹									
۲۰									
نتیجه‌های آزمایش									
محدوده الاستیک از $\sigma_i = \ldots$ MPa الی $\sigma_f = \ldots$MPa							مقاومت فشاری تک‌محوری = ... MPa		
$\sigma_i =$	$\sigma_f =$	$\varepsilon_i =$	$\varepsilon_f =$	$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$	$\gamma = -\varepsilon_d / \varepsilon_a$		مدل الاستیسیته = ... GPa		
$\Delta\sigma = \sigma_f - \sigma_i =$		$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f - \varepsilon_i =$		$= \ldots$ GPa			نسبت پواسون = . . .		
آزمایش کننده				مسوول آزمایشگاه:			تایید کننده:		

۱- نوع نمونه شامل مغزه، کلوخه و قطعه (بلوک) است.

جدول ۲-۲- برگ گزارش تعیین مقاومت فشاری نامحصور (تک‌محوری) ماده سنگ و ضرایب تغییر شکل‌پذیری آن

شماره برگ:												تاریخ:							
ردیف	مشخصات نمونه		مشخصات نمونه‌برداری			اندازه نمونه (میلی‌متر)		$\frac{L}{D}$	سطح مقطع A (میلی‌متر مربع)	زاویه محور نمونه با سطح ناهمسانی (درجه)	مقاومت فشاری نامحصور (مگا پاسکال)	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	ضریب پواسون	حالت شکست[۲]	اطلاعات تکمیلی		
	جنس	شماره	محل	نوع[۱]		طول L	قطر D								وزن مخصوص (مگا نیوتن بر مترمکعب)	درصد تخلخل (٪)	درصد اشباع (٪)
۱																	
۲																	
۳																	
۴																	
۵																	
۶																	
۷																	
۸																	
۹																	
۱۰																	
۱۱																	
۱۲																	
۱۳																	
۱۴																	
۱۵																	
آزمایش کننده: نام و امضا و تاریخ:							مسوول آزمایشگاه: نام و امضا و تاریخ:				تایید کننده: نام و امضا و تاریخ:						

۱- نوع نمونه شامل مغزه، کلوخه و قطعه (بلوک) است.

۲- حالت‌های شکست شامل: برشی، قاچ خوردگی طولی، چند برشی و خرد شدگی است.

۲-۲- دستورالعمل تعیین مقاومت کششی ماده سنگ به روش غیرمستقیم «آزمایش برزیل»

برای تعیین مقاومت کششی ماده سنگ، انجام آزمایش به دو روش مستقیم و غیرمستقیم پیشنهاد شده است:

در روش مستقیم نیروی کششی در امتداد محور طولی نمونه (عمود بر سطح مقطع نمونه) وارد می‌شود. تعیین مقاومت کششی به روش مستقیم از نظر اجرای آزمایش با مشکلات خاصی مواجه است. در پانوشت متن «روش پیشنهادی برای تعیین مقاومت کششی به روش مستقیم» که توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[1] منتشر شده است، در مورد مشکلات اجرایی این روش چنین آمده است:

«مطابق استاندارد آمریکایی آزمایش‌ها و مواد[2] شماره D2936-71، زنجیر توپی یا حلقه‌ای[3] با ظرفیت باربری مناسب در آزمایش کشش مستقیم عملکرد خوبی داشته است. از آن‌جا که زنجیر توپی تنها در یک صفحه می‌تواند خم شود، قطعات زنجیرهای بالایی و پایینی در امتداد یکدیگر قرار می‌گیرند که این امر موجب کاهش خمش در نمونه می‌گردد. مشخص شده است که هرزه‌گرد[4] یا کابل یا نظایر آن به‌دلیل آن‌که تمایل به خمش و پیچش دارند و درنتیجه نمی‌توانند نیروی کششی محض را به نمونه انتقال دهند، برای اتصال صفحات جک به نمونه مناسب نیستند».

افزون بر این در آزمایش کشش به روش مستقیم، نمونه به‌وسیله دو صفحه فلزی که با چسب مناسب به سر و ته آن چسبانده می‌شود، به زنجیر کششی متصل می‌گردد. در این میان، کنترل ضخامت لایه‌چسب (بیشینه ۱/۵ میلی‌متر) و هم‌راستا بودن محور صفحات فلزی با محور طولی نمونه بسیار دشوار است. همچنین انتقال یکنواخت تنش کششی از صفحات فلزی به نمونه به آسانی امکان‌پذیر نیست. برای آزمایش تعیین مقاومت کششی ماده سنگ به روش غیرمستقیم نیز، دو شیوه کم و بیش متفاوت وجود دارد.

روش غیرمستقیم که در آن نیروی فشاری در راستای صفحه محوری نمونه اعمال می‌شود، نمونه تحت تنش کششی القا شده در جهت عمود بر صفحه محوری می‌شکند. در روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ که به «آزمایش برزیل» موسوم است، نیروی جک به‌وسیله دو فک منحنی شکل که با دو میله هادی[5] با یکدیگر درگیر می‌شوند، به نمونه انتقال می‌یابد. درحالی‌که در استاندارد آمریکایی آزمایش‌ها و مواد، شماره D3967-92، برای تعیین مقاومت کششی سنگ‌بکر، جک‌های بارگذاری به‌طور مستقیم یا توسط صفحات بارگذاری مسطح یا منحنی شکل مجزا روی نمونه‌های استوانه‌ای قرار می‌گیرند.

این دو روش در مواردی همچون دقت‌های لازم در آماده‌سازی نمونه، امتداد و آهنگ بارگذاری تا حدود زیادی مشابه یکدیگرند. در روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ضخامت نمونه آزمایش تقریبا معادل شعاع آن است درحالی‌که در استاندارد آمریکایی آزمایش‌ها و مواد، نسبت ضخامت به شعاع نمونه بین ۱ تا ۱/۵ متغیر است.

1- International Society for Rock Meckanics
2- American Society for Testing and Materials
3- Roller or Link Chain
4- Ball & Socket
5- Guide Pin

باتوجه به نکات گفته شده، تعیین مقاومت کششی به روش غیرمستقیم به دلیل راحتی اجرا از یک سو و نتیجه‌های قابل قبول از سوی دیگر، به روش مستقیم ترجیح داده می‌شود. درمقایسه روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و استاندارد آمریکایی آزمایش‌ها و مواد (ASTM)، با توجه به توزیع یکنواخت‌تر تنش در نمونه در آزمایش به روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، استاندارد ارائه شده در این دستورالعمل، منطبق بر روش گفته شده است.

۲-۲-۱- هدف

هدف از «آزمایش برزیل»، اندازه‌گیری مقاومت کششی نامحصور نمونه‌های آماده شده از ماده سنگ، به‌طور غیرمستقیم است.

۲-۲-۲- اهمیت و موارد استفاده

براساس شواهد تجربی، در میدان‌های تنش دو محوری، هنگامی‌که یک تنش اصلی کششی و تنش اصلی دیگر فشاری و کم‌تر از سه برابر تنش اصلی کششی باشد، بیش‌تر سنگ‌ها در کشش و در مقاومت کششی نامحصورشان می‌شکنند. اهمیت و موارد استفاده این آزمایش به شرح زیر است:

- تعیین مقاومت کششی سنگ،
- تدقیق پارامترهای مقاومتی سنگ.

۲-۲-۳- محدویت آزمایش

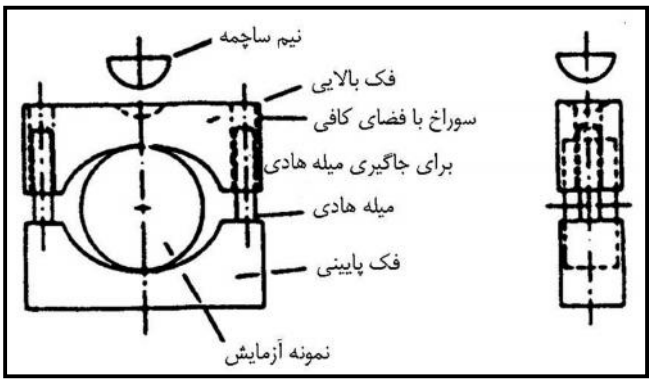
نتیجه‌های این آزمایش روی نمونه‌های با تخلخل زیاد، اسفنجی، دانه درشت و دارای سطوح ناهمسان، دقت کافی ندارد.

۲-۲-۴- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- دو فک بارگذاری فولادی دستگاه به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که با یک نمونه سنگ به شکل دیسک، در دو سطح به‌طور قطری متقابل، در کمانی با زاویه تقریبی ۱۰ درجه در لحظه شکست تماس داشته باشند. ابزار پیشنهادی در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. مشخصات این ابزار به شرح زیر است:
  - شعاع انحنای فک‌ها باید ۱/۵ برابر شعاع نمونه آزمایشگاهی باشد،

- لقی[1] میله‌های هادی باید به‌قدری باشد که یک فک نتواند نسبت به دیگری بیش از ۴×۱۰^{-۳} رادیان خارج از صفحه ابزار آزمایش چرخش داشته باشد. به‌عبارت دیگر به ازای ۲۵ میلی‌متر طول درگیری میله‌های هادی، میزان لقی بیش از ۰/۱ میلی‌متر نباشد،
- پهنای فک‌ها باید دست کم ۱/۱ برابر ضخامت نمونه باشد،
- فک بالایی باید شامل یک نشستگاه نیم‌کره به قطر ۲۵ میلی‌متر باشد.



شکل ۲-۳- ابزار آزمایش برزیل

- نوار چسبی با پهنای اندکی بیش از ضخامت نمونه آزمایشگاهی با ضخامت ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر لازم است.
- دستگاه آزمایش برای اعمال و اندازه‌گیری بار فشار وارد بر نمونه با سرعت‌های سازگار با مشخصات مندرج در بند ۲-۲-۶ این استاندارد باید دارای ظرفیت کافی باشد. دستگاه بارگذاری باید در فاصله‌های زمانی مناسب، با یکی از استانداردهای بین‌المللی مانند ASTM[2] یا BS[3] یا DIN[4] بازرسی و با سایر ابزار آزمایش هماهنگی داشته باشد.
- نشستگاه[5] دستگاه بارگذاری باید به‌گونه‌ای در محل خود ثابت شود که دو سطح بارگذاری دستگاه با یکدیگر موازی باشند.
- دستگاه بارگذاری بهتر است به یک سیستم ثبت داده‌ها مجهز باشد تا بار وارده و جابه‌جایی ایجاد شده را ثبت و بار شکست را با دقت بیش‌تری اندازه‌گیری نماید. این کار به اندازه‌گیری بار شکست کمک می‌کند.

۲-۲-۵- آماده‌سازی نمونه

نمونه‌های آزمایشگاهی با توجه به موارد زیر آماده‌سازی می‌گردند:

1- Clearance
2- ASTM-E4
3- BS 1610- Grade A
4- DIN 51220, DIN 51223 – Klasse 1.
5- Seat

- نمونه‌های آزمایشگاهی باید با استفاده از آب تمیز، بریده و آماده شوند. سطح جانبی نمونه استوانه‌ای باید بدون آثار آشکار ابزار مورد استفاده بوده و پستی و بلندی ناهمواری‌های روی آن نباید بیش از ۰/۰۲۵ میلی‌متر باشد. سطوح انتهایی نمونه باید با دقت ۰/۲۵ میلی‌متر صاف بوده و ضمن عمود بودن بر محور نمونه، با دقت ۰/۲۵ درجه با یکدیگر موازی باشند.
- توجیه فضایی نمونه نسبت به سطوح ناهمسانی موجود باید مشخص شود. درصد رطوبت نمونه نیز باید کنترل یا اندازه‌گیری شده و گزارش آن براساس «روش پیشنهادی برای تعیین درصد رطوبت یک نمونه سنگ» تهیه شود.
- قطر نمونه آزمایشگاهی نباید کم‌تر از اندازه مغزه NX بوده (به‌طور تقریب ۵۴ میلی‌متر) و ضخامت آن باید در حدود اندازه شعاع نمونه باشد. بیش‌ترین قطر نمونه، به اندازه فک‌های قوی شکل بستگی دارد و اغلب در محدوده قطر مغزه‌های رایج حفاری است.

۲-۲-۶- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این روش آزمایش، اجرا می‌شود:

الف- دور نمونه آزمایشگاهی باید با یک لایه نوارچسب پوشانده شده و سپس به طور عمودی در دستگاه آزمایش قرار گیرد، به‌گونه‌ای که بار توسط صفحات منحنی شکل، به صورت قطری بر نمونه وارد شود. در این حالت، محورهای دوران[1] نمونه و دستگاه آزمایش باید بر یکدیگر منطبق باشند،

ب- بار باید به‌طور پیوسته و با آهنگ یکنواخت بر نمونه وارد شود، به‌گونه‌ای که در ضعیف‌ترین سنگ‌ها شکست نمونه بین ۱۵ تا ۳۰ ثانیه رخ دهد. آهنگ بارگذاری باید در حدود ۲۰۰ نیوتن بر ثانیه باشد،

ج- اگر دستگاه بارگذاری به سامانه ثبات «بار – تغییر مکان» مجهز باشد، باید در هنگام آزمایش، بار متناظر ایجاد نخستین ترک در نمونه به دقت ثبت شود (در برخی موارد پس از نخستین شکست در نمونه چون تکه‌های جدا شده هنوز توان باربری دارند، بارگذاری ادامه می‌یابد). اگر دستگاه به سامانه ثبات مزبور مجهز نباشد، باید سعی کرد تا باری که در آن نخستین شکست اولیه رخ می‌دهد، به دقت تعیین گردد. در لحظه ایجاد نخستین شکست، توقفی کوتاه در حرکت سوزن شاخص بار دیده می‌شود. به‌هرحال تفاوت میان مقدار بار در لحظه نخستین شکست و مقدار بیشینه آن در مقاومت نهایی نمونه، حداکثر حدود ۵ درصد است.

د- شمار نمونه‌های مورد آزمایش از هر نمونه صحرایی باید با رعایت ملاحظات عملی تعیین شود، اما به‌طور معمول برای آزمایش ۱۰ نمونه لازم است،

هـ- سطح شکست در این آزمایش، به‌طور معمول عمود بر سطح مقطع نمونه و در راستای بارگذاری می‌باشد. در غیراین‌صورت، ضمن بررسی علت آن، نتیجه آزمایش باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد.

1- Axes of Rotation

۲-۲-۷- محاسبات

مقاومت کششی نمونه آزمایشگاهی، (σ_t) باید با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

$$\sigma_t = \frac{0.636\ P}{Dt}\ (MPa) \qquad (۸-۲)$$

که در آن:

P = بار در لحظه شکست بر حسب نیوتن،

D = قطر نمونه آزمایشگاهی بر حسب میلی‌متر،

t = ضخامت نمونه آزمایشگاهی در مرکز آن بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

۲-۲-۸- گزارش نتایج

گزارش نتیجه‌های آزمایش باید دست کم شامل موارد زیر باشد:

- اطلاعات مربوط به نمونه‌برداری شامل: موقعیت جغرافیایی، عمق، توجیه فضایی، تاریخ، روش نمونه‌برداری و در صورت لزوم نقشه‌ای که نقاط نمونه‌برداری روی آن نشان داده شده باشد،
- تشریح لیتولوژیکی نمونه آزمایش به‌ویژه اندازه دانه‌های تشکیل دهنده سنگ،
- تشریح جزییات روش آماده‌سازی نمونه آزمایش و همچنین گزارش وضعیت محیطی دوران انبارداری شامل رطوبت، حرارت و غیره باید پیوست شود،
- راستای محور بارگذاری نسبت به ناهمسانی، لایه‌بندی، کلیواژ، تورق و ...،
- میزان رطوبت و درصد اشباع نمونه در زمان آزمایش،
- تشریح دستگاه آزمایش شامل: سامانه اعمال و اندازه‌گیری بار،
- تاریخ انجام آزمایش،
- قطر و ارتفاع نمونه آزمایش،
- مدت زمان آزمایش و آهنگ بارگذاری،
- سایر اطلاعات مانند جرم حجمی، تخلخل با بیان روش تعیین هر یک،
- جدول نتیجه‌ها شامل: ستون‌های کد شناسایی نمونه آزمایش، ارتفاع نمونه آزمایش، قطر نمونه آزمایش، مقاومت کششی برای هریک از نمونه‌های آزمایشگاهی گرفته شده از هر نمونه صحرایی با یک عدد سه رقمی و با دقت ۱ درصد، همراه با میانگین نتیجه‌ها، برای هر نمونه صحرایی.

جدول پیشنهادی برای تهیه گزارش آزمایش در جدول (۲-۳) ارائه شده است.

جدول ۲-۳- گزارش آزمایش مقاومت کششی

شماره کار:	**مقاومت کششی (آزمایش برزیل)**	**تاریخ:**
پروژه:		
توضیحات:		

شماره آزمایشگاهی نمونه	مشخصات نمونه		بار شکست (گسیختگی)	مقاومت کششی	ملاحظات
	قطر	ضخامت		$\sigma_t = \frac{0.636\ P}{Dt}$	
	D	t	P	σ_t	
	میلی‌متر	میلی‌متر	نیوتن	مگاپاسکال	

۲-۳- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص بار نقطه‌ای

۲-۳-۱- هدف

آزمایش بار نقطه‌ای[1] به‌منظور تعیین شاخص برای رده‌بندی مقاومتی ماده سنگ (سنگ بکر) انجام می‌شود. از این شاخص می‌توان برای تخمین دیگر پارامترهای مقاومتی مانند مقاومت کششی و فشاری تک‌محوری استفاده کرد.

با اندازه‌گیری شاخص مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌های سنگی ($I_{s(50)}$) در جهت‌های مختلف، شاخص ناهمسانی مقاومت ($I_{a(50)}$) که عبارت است از نسبت بیش‌ترین مقاومت بار نقطه‌ای به کم‌ترین مقدار آن، به‌دست می‌آید.

۲-۳-۲- اهمیت و موارد استفاده

این آزمایش از متداول‌ترین آزمایش‌های مکانیک سنگ است و نتایج به دست آمده از آن، برای رده‌بندی توده سنگ‌ها به کار می‌رود:

- این آزمایش به‌طور کلی به آماده‌سازی نمونه نیازی ندارد و می‌توان نمونه‌های سنگی با شکل‌های متفاوت مانند مغزه (آزمایش قطری یا محوری[2])، قطعه[3] بریده شده منظم یا به صورت کلوخه نامنظم[4] را مورد آزمایش قرار داد. آزمایش بر حسب نوع نامگذاری می‌شود.
- دستگاه آزمایش اغلب قابل حمل است. بنابراین می‌توان آزمایش‌ها را افزون بر آزمایشگاه، در محل طرح یا ساختگاه نیز انجام داد.

1- Point Load Test
2- Diametral or axial
3- Block
4- Irregular Lump

- نتیجه این آزمایش می‌تواند برای رده‌بندی نسبی مقاومت سنگ‌های مختلف در ساختگاه‌ها و همچنین به عنوان یکی از پارامترهای لازم برای طبقه‌بندی توده سنگ‌ها از دیدگاه مهندسی به‌کار رود، (مانند RMR).[1]

۲-۳-۳- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش (شکل ۲-۴)، شامل یک سامانه[2] بارگذاری (برای نوع قابل حمل، مرکب از یک قاب بارگذاری، پمپ، جک و فک‌ها)، یک سامانه اندازه‌گیری بار نهایی (P) با ظرفیت لازم و یک سامانه برای اندازه‌گیری فاصله بین دو فک (D) می‌باشد.

شکل ۲-۴- دستگاه قابل حمل بار نقطه‌ای

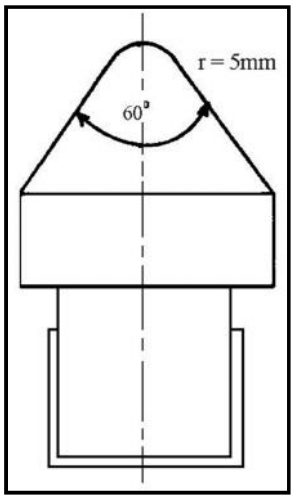
۲-۳-۳-۱- سامانه بارگذاری

سامانه بارگذاری باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- فاصله بین دو فک در سامانه بارگذاری، باید در حدی باشد که بتوان نمونه‌هایی در اندازه‌های مطلوب را آزمایش نمود. این فاصله برای نمونه‌های کوچک و بزرگ باید قابل تنظیم بوده و اغلب بین ۱۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر است،
- ظرفیت بارگذاری باید برای شکستن بزرگ‌ترین و مقاوم‌ترین نمونه‌های مورد آزمایش کافی باشد،

1- Rock Mass Rating
2- System

- دستگاه آزمایش باید طوری طراحی و ساخته شود که با وارد کردن حداکثر بار به دفعات، تغییر شکل دایم ندهد و همچنین در طول آزمایش، فک‌ها با تقریب ۰/۲± میلی‌متر به صورت هم‌محور باقی بمانند. در سامانه بارگذاری نباید از نشستگاه کروی یا دیگر اجزای غیرصلب استفاده شود. صلبیت سامانه بارگذاری برای پرهیز از مشکلاتی مانند لغزیدن نمونه‌های نامنظم در هنگام آزمایش، ضروری است،
- فک‌های مخروطی با نوک کروی از نظر هندسی باید مطابق شکل (۲-۵) ساخته شده باشد. راس مخروط ۶۰ درجه و فک کروی به شعاع ۵ میلی‌متر باید بر هم مماس باشد [۴]. فک‌ها باید از مواد سختی[1] مانند تنگستن کار باید[2] یا فولاد خشک[3] ساخته شوند تا به سبب آزمایش آسیب نبینند.



شکل ۲-۵- نمای فک و شعاع نوک کروی

۲-۳-۳-۲- سامانه اندازه‌گیری بار

سامانه اندازه‌گیری بار، از ابزاری مانند بارسنج یا فشارسنج هیدرولیکی یا سنجش‌گر الکتریکی تشکیل می‌شود که به جک متصل شده و باید با آن بتوان بار لازم برای شکست نمونه (P) را تعیین کرد. این سامانه باید مشخصات زیر را داشته باشد:

- وسیله اندازه‌گیری بار P، بدون توجه به اندازه و مقاومت نمونه، باید دست کم دارای دقت با ۵P%± شد،
- سامانه اندازه‌گیری باید در مقابل تغییرات ناگهانی فشار هیدرولیکی[4] و لرزش مقاوم باشد، به‌گونه‌ای که دقت قرائت با تکرار آزمایش تغییر نکند،
- شکست نمونه اغلب به طور ناگهانی صورت می‌گیرد. پس لازم است که سامانه اندازه‌گیری بار بتواند بار بیشینه را در لحظه شکست ثبت کند. به این ترتیب می‌توان بار شکست را پس از انجام هر آزمایش قرائت کرد.

۱- سختی مورد نظر در استاندارد ASTM D – 5731 معادل 58HRC تعریف شده است.

2- Tungsten Carbide
3- Hardened Steel
4- Hydraulic Shock

۲-۳-۳-۳- سامانه اندازه‌گیری فاصله (بین دو فک)

سامانه اندازه‌گیری فاصله به‌طور معمول شامل یک خط‌کش مدرج است که روی ستون ثابت دستگاه نصب می‌شود و با کمک آن می‌توان جابه‌جایی فک متحرک را به‌طور مستقیم قرائت نمود. این جابه‌جایی را می‌توان با یک جابه‌جایی‌سنج الکتریکی نیز اندازه‌گیری نمود. این ابزار باید دارای مشخصات مندرج در زیر باشد:

- اندازه‌گیری D بدون توجه به ابعاد نمونه آزمایش باید حداقل دارای دقت $\pm 2\%D$ باشد،
- سامانه اندازه‌گیری باید در مقابل تغییرات ناگهانی فشار هیدرولیکی (ضربه) و لرزش مقاوم باشد، به‌گونه‌ای که دقت قرائت با تکرار آزمایش تغییر نکند،
- وسیله اندازه‌گیری فاصله فک‌ها باید در حالتی که نوک فک‌ها با یکدیگر در تماس هستند، عدد صفر را نمایش دهد،
- برای اندازه‌گیری عرض نمونه‌ها (W) در تمام آزمایش‌های قطری، می‌توان از یک کولیس[1] یا خط‌کش فولادی استفاده کرد.

۲-۳-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این روش آزمایش، اجرا می‌شود:

۲-۳-۴-۱- انتخاب و آماده‌سازی نمونه

نمونه آزمایش، با توجه به موارد زیر انتخاب و آماده‌سازی می‌شود:

- براساس تعریف، نمونه آزمایش به مجموعه نمونه‌های سنگی با مقاومت مشابه گفته می‌شود که باید برای آن‌ها یک مقدار مقاومت بار نقطه‌ای تعیین شود،
- نمونه آزمایش، از مغزه یا کلوخه‌های سنگی تهیه می‌شود و باید شامل تعداد نمونه کافی برای آزمایش باشد. اندازه و شکل مورد نیاز برای آزمایش‌های قطری، محوری و قطعه یا کلوخ نامنظم، باید براساس مشخصات گفته شده در این استاندارد باشد،
- برای آزمایش‌های معمول و همچنین برای رده‌بندی مقاومتی، نمونه‌ها باید در حالت اشباع کامل و یا با رطوبت طبیعی آزمایش شوند.

۲-۳-۴-۲- واسنجی دستگاه

دستگاه آزمایش باید به‌طور متناوب و با استفاده از یک بارسنج استاندارد و دو بلوک در بالا و پایین آن برای انتقال بار واسنجی شود. قرائت بار P و فاصله D در کل دامنه بارگذاری و جابه‌جایی‌های مربوط به آزمایش باید کنترل شود.

1- Caliper

۲-۳-۴-۳- آزمایش قطری

این روش آزمایش، با توجه به موارد زیر، انجام می‌گیرد:

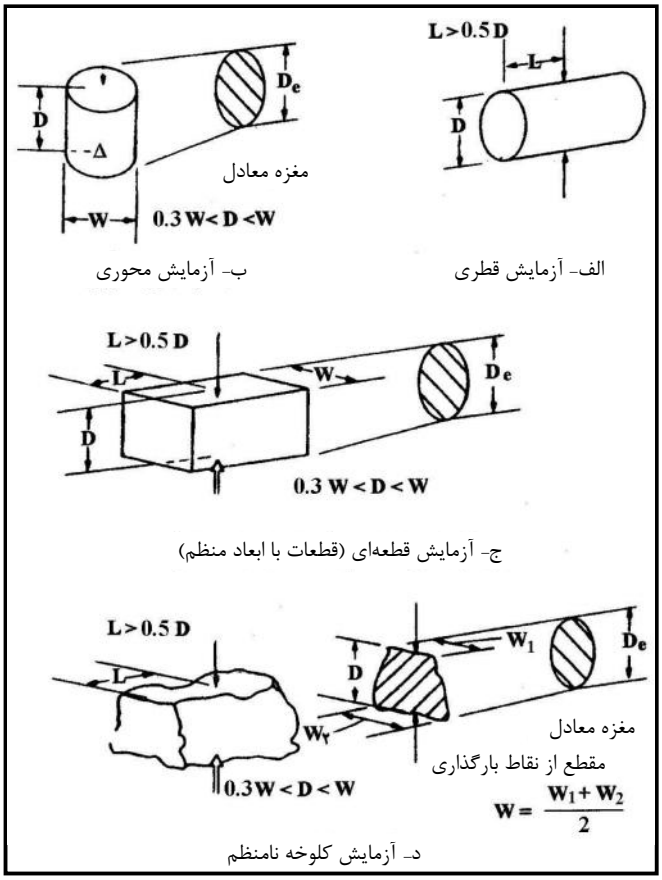
الف- برای آزمایش قطری، نمونه‌های مغزه‌ای با نسبت طول به قطر بزرگ‌تر از ۱، مناسب می‌باشند،

ب- بهتر است دست کم ۱۰ آزمایش روی هر نمونه انجام شود. در صورت ناهمگن و ناهمسان بودن نمونه‌ها، تعداد آزمایش بیش‌تری لازم است،

ج- نمونه طوری بین فک‌ها قرار داده می‌شود که فک‌ها با مغزه در امتداد قطر آن تماس داشته باشد و اطمینان حاصل شود که فاصله L بین نقاط تماس و نزدیک‌ترین انتهای آزاد نمونه دست کم برابر شعاع مغزه باشد. شکل (۲-۶-الف)،

د- فاصله D باید با تقریب ±2D% ثبت شود،

هـ- بار باید به‌طور یکنواخت افزایش یابد، به‌گونه‌ای که شکست بین ۱۰ تا ۶۰ ثانیه اتفاق بیفتد. در این لحظه، باید بار شکست (P) ثبت شود. اگر سطح شکست در امتداد نقاط تماس نمونه با دو فک نباشد، نتیجه آزمایش قابل قبول نیست. شکل (۲-۷-د)



شکل ۲-۶- شرایط هندسی نمونه‌ها در آزمایش بارگذاری محوری

۲-۳-۴-۴- آزمایش محوری

این روش آزمایش، با توجه به موارد زیر، انجام می‌گیرد:

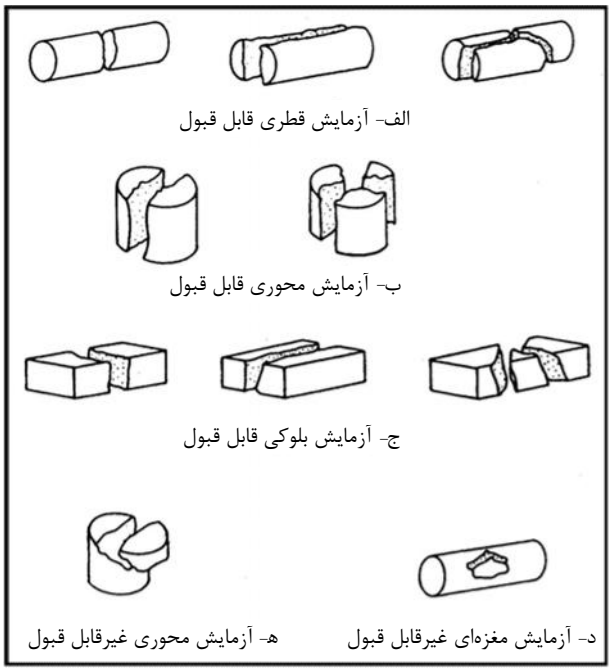
الف- نمونه‌های مغزه‌ای با نسبت طول به قطر ۰/۳ تا ۱/۰، برای آزمایش محوری شکل (۲-۶- ب) مناسب هستند. نمونه‌های بلندتر را می‌توان به صورت قطری آزمایش کرد تا طول قطعات به‌دست آمده پس از آزمایش، برای آزمایش‌های محوری مناسب باشد (مشروط بر آن‌که این قطعات براثر آزمایش قطری تضعیف نشده باشند). نمونه‌های مناسب را می‌توان به‌وسیله اره یا اسکنه[1] نیز تهیه کرد،

ب- بهتر است دست کم ۱۰ آزمایش روی هر نمونه سنگ انجام شود. در صورت ناهمگن و ناهمسان بودن نمونه‌ها، تعداد آزمایش بیش‌تری لازم است،

ج- نمونه طوری بین فک‌ها قرار داده می‌شود که امتداد بارگذاری، بر سطوح انتهایی مغزه سنگ عمود باشد (در مورد سنگ‌های ناهمسان، محور مغزه باید طبق بند (۲-۳-۴-۶- ج) و شکل (۲-۸) باشد،

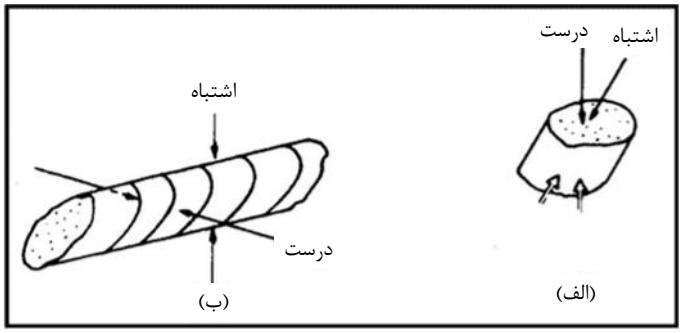
د- فاصله بین نقاط تماس فک‌ها با نمونه (D)، باید با تقریب ±%2D ثبت شود. عرض نمونه (W)، عمود بر جهت بارگذاری بوده و باید با تقریب ±%5W ثبت شود،

هـ- بار باید به‌طور یکنواخت افزایش یابد، به‌گونه‌ای که شکست بین ۱۰ تا ۶۰ ثانیه اتفاق بیفتد. در این لحظه باید بار شکست (P) ثبت شود. درصورتی‌که سطح شکست در امتداد نقاط تماس نمونه با دو فک نباشد، نتیجه آزمایش قابل قبول نیست شکل‌های (۲-۷- د) و (۲-۷- هـ).



شکل ۲-۷- حالت‌های شکست نمونه‌ها در آزمایش بار نقطه‌ای برای آزمایش قابل قبول و غیرقابل قبول

1- Chisel



شکل ۲-۸- جهت‌های بارگذاری در آزمایش نمونه

۲-۳-۴-۵- آزمایش قطعات با اضلاع منظم و کلوخه‌های نامنظم

این آزمایش با توجه به موارد زیر انجام می‌گیرد:

الف- قطعات سنگی یا کلوخه‌های نامنظم با اندازه ۳۵ ± ۵۰ میلی‌متر، براساس شکل‌های (۲-۶- ج) و (۲-۶- د) برای آزمایش مناسب هستند. نسبت $\frac{D}{W}$ باید بین ۰/۳ تا ۱/۰، ترجیحا حدود ۱/۰ باشد. اندازه طول L در شکل‌های (۲-۶- ج) و (۲-۶- د) باید دست کم به اندازه 0.5W باشد. نمونه‌ها با این اندازه و شکل ممکن است یا به طور مستقیم انتخاب و یا به وسیله اره یا اسکنه از قطعات بزرگ تهیه شود،

ب- بهتر است دست کم ۱۰ آزمایش روی هر نمونه انجام شود. درصورت ناهمگن و ناهمسان بودن نمونه‌ها، تعداد آزمایش بیش‌تری لازم است،

ج- نمونه طوری بین فک‌های دستگاه بسته می‌شود که فک‌ها با کوچک‌ترین بعد آن تماس داشته باشد. لازم است از قرار دادن فک‌ها در گوشه‌ها و کناره‌های نمونه خودداری شود شکل‌های (۲-۶-ج) و (۲-۶-د).

د- فاصله بین نقاط تماس فک‌ها (D) باید با دقت ±2D%5 و کوچک‌ترین عرض نمونه (W) در جهت عمود بر محور بارگذاری با دقت ±5W% اندازه‌گیری شود. اگر دو طرف نمونه موازی نباشند، عرض (W) از رابطه $(\frac{W_1 + W_2}{2})$ براساس شکل (۲-۶- د) به‌دست می‌آید،

هـ- بار باید به‌طور یکنواخت افزایش یابد، به‌گونه‌ای که شکست بین ۱۰ تا ۶۰ ثانیه اتفاق بیفتد. در این لحظه باید بار شکست (P) ثبت شود. درصورتی‌که سطح شکست در امتداد نقاط تماس نمونه با دو فک نباشد نتیجه آزمایش قابل قبول نیست (شکل‌های ۲-۷- د و ۲-۷- هـ).

۲-۳-۴-۶- آزمایش سنگ‌های ناهمسان[1]

این آزمایش با درنظر گرفتن موارد زیر انجام می‌گیرد:

الف- وقتی نمونه سنگ از جنس شیل بوده یا دارای لایه‌بندی، تورق یا ناهمسانی قابل مشاهده باشد، نمونه باید در جهت‌هایی که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار مقاومت را داشته و به‌طور کلی موازی و عمود بر صفحات ناهمسانی هستند آزمایش شود،

ب- اگر نمونه، مغزه حفاری دارای صفحات ضعیف باشد، ابتدا باید یک مجموعه آزمایش‌های قطری در فاصله‌های مناسب انجام شود تا بتوان قطعات ایجاد شده را به‌صورت محوری آزمایش کرد،

ج- بهترین نتیجه‌ها در حالتی به‌دست می‌آید که محور حفاری عمود بر صفحات ضعیف باشد. بنابراین حفاری در صورت امکان باید در این جهت صورت گیرد. زاویه بین محور مغزه و عمود بر صفحات ضعیف، بهتر است از ۳۰ درجه بیش‌تر نباشد،

د- برای اندازه‌گیری کم‌ترین مقدار I_S باید توجه شود که بار در راستای یک صفحه ضعیف وارد شود. همچنین هنگام آزمایش برای اندازه‌گیری بیش‌ترین مقدار I_S، باید توجه شود که بار در جهت عمود بر صفحات ضعیف وارد شود (شکل ۲-۸)،

ه- اگر نمونه به‌صورت قطعه یا کلوخه باشد، باید به عنوان دو نمونه فرعی[2] آزمایش شود، یعنی بار اعمال شده ابتدا در راستای عمود و سپس در راستای موازی با صفحات ضعیف قابل مشاهده وارد گردد. در این مورد نیز حداقل مقدار مقاومت در حالتی خواهد بود که دو فک در راستای یک صفحه ضعیف قرار گیرد.

۲-۳-۵- محاسبات

۲-۳-۵-۱- مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح نشده

مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح نشده I_s به صورت $\frac{P}{D_e^2}$ محاسبه می‌شود که در این رابطه D_e برابر «قطر مغزه معادل» است و از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید:

(۲-۹) برای آزمایش‌های قطری: $D_e^2 = D^2$

(۲-۱۰) برای آزمایش‌های محوری روی قطعه و کلوخ: $D_e^2 = \frac{4A}{\pi}$

و کم‌ترین سطح مقطع عرضی از صفحه‌ای که از نقاط تماس بین فک‌ها می‌گذرد برابر است با:

(۲-۱۱) $A = WD$

1- Anisotropic Rock
2- Sub-Sample

۲-۳-۵-۲- تصحیح شاخص بار نقطه‌ای

شاخص بار نقطه‌ای با در نظر گرفتن نکته‌های زیر تصحیح می‌گردد:

- مقدار I_s در آزمایش‌های قطری به‌عنوان تابعی از اندازه D و در آزمایش‌های محوری، قطعه و کلوخ نامنظم تابعی از D_e می‌باشد. بنابراین برای به‌دست آوردن یک مقدار واحد برای مقاومت بار نقطه‌ای در نمونه‌های سنگی باید یک تصحیح بر حسب ابعاد نمونه صورت گیرد. از این شاخص تصحیح شده می‌توان برای رده‌بندی سنگ‌ها نیز استفاده کرد.
- شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح شده $I_{S(50)}$، براساس تعریف معادل مقاومت بار نقطه‌ای به‌دست آمده از نمونه‌ای با قطر $D = 50$ میلی‌متر می‌باشد.
- هرگاه که تعیین شاخص برای رده‌بندی سنگ ضروری باشد، معتبرترین روش برای تعیین $I_{s(50)}$، آزمایش قطری روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر حدود ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در این صورت نیازی به تصحیح اندازه ($D = 50$ میلی‌متر) نیست و خطای قابل ملاحظه‌ای رخ نمی‌دهد. برای مثال، آزمایش قطری روی مغزه‌های NX با قطر حدود ۵۴ میلی‌متر را می‌توان یادآور شد. به‌هرحال، آزمایش‌های بالا، فقط برای تعیین $I_{s(50)}$ نیست. آزمایش‌های بار نقطه‌ای، به‌طور عمده روی نمونه‌هایی با شکل و اندازه‌هایی به جز $D = 50$ میلی‌متر انجام می‌شود. در چنین مواردی تصحیح شاخص باید براساس ردیف‌های زیر انجام شود:

- معتبرترین روش تصحیح، انجام آزمایش روی چندین نمونه با اندازه‌های D یا D_e مختلف و رسم نمودار تغییرات P برحسب D_e^2 است. اگر از محورهای لگاریتمی (log-log) استفاده شود، این رابطه به‌طور معمول به صورت یک خط راست خواهد بود (شکل ۲-۹). نقاطی که به‌طور قابل ملاحظه‌ای خارج از خط راست قرار دارد، ($D_{50} = 50$ میلی‌متر) می‌توان با درون‌یابی[1] به‌دست آورد. اگر به برون‌یابی[2] نیاز باشد، اندازه شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح شده به صورت $\frac{P_{50}}{50^2}$ محاسبه می‌شود.
- اگر هیچ‌کدام از ردیف‌های یاد شده کاربرد نداشته باشد (برای مثال زمانی که آزمایش روی مغزه‌هایی یکسان با قطری به جز ۵۰ میلی‌متر انجام شود یا هنگامی که تعداد محدودی قطعات کوچک برای آزمایش وجود داشته باشد)، تصحیح اندازه را می‌توان با استفاده از رابطه زیر انجام داد:

$$I_{s(50)} = F.I_s \qquad (۱۲-۲)$$

$$F = (\frac{D_e}{50})^{0.45} \qquad (۱۳-۲)$$

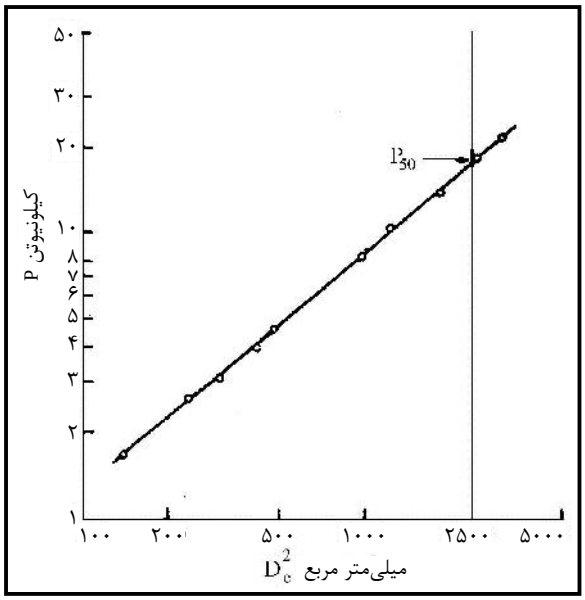
ضریب تصحیح F را می‌توان از نمودار شکل (۲-۱۰) یا از رابطه مقابل به‌دست آورد:

1- Interpolation
2- Extrapolation

برای آزمایش نمونه‌های نزدیک به اندازه استاندارد ۵۰ میلی‌متر، می‌توان از رابطه تقریبی زیر و با خطای اندک استفاده کرد:

$$F = \sqrt{(\frac{D_e}{50})} \qquad (۱۴-۲)$$

- روش‌های تصحیح شاخصی که در این بخش بیان شده‌اند، صرف‌نظر از درجه ناهمسانی I_s و امتداد بارگذاری، نسبت به صفحات ضعیف قابل استفاده می‌باشند و این کاربردی است که به‌طور چشمگیری سودمند بودن این آزمایش را تایید می‌کند.

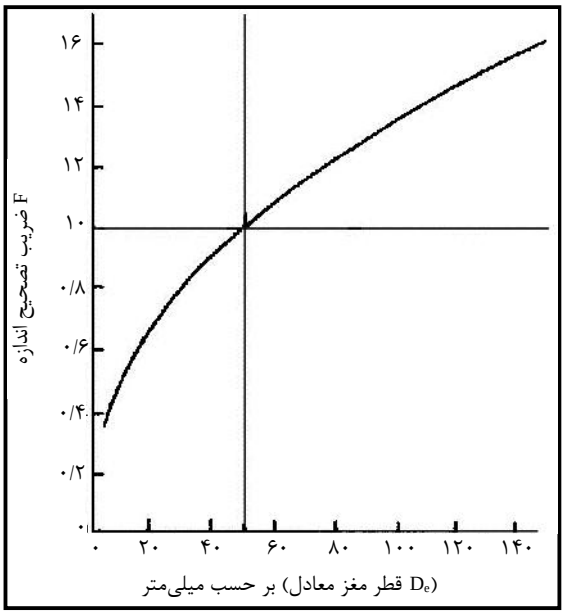


شکل ۲-۹- روش تعین $I_{s(50)}$ از روی مجموعه نتایج به‌دست آمده روی نمونه‌های با قطر D_e متفاوت با ۵۰ میلی‌متر

۲-۳-۵-۳- محاسبه میانگین مقادیر

میانگین مقادیر $I_{s(50)}$ به شرح زیر محاسبه می‌شود:

- مقادیر متوسط $I_{s(50)}$، همان‌گونه که در زیر تعریف شده است، برای رده‌بندی نمونه‌ها با توجه به شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و شاخص ناهمسانی مقاومت بار نقطه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- اگر، دست‌کم نتیجه ۱۰ آزمایش معتبر در دست باشد، میانگین $I_{s(50)}$ با حذف دو عدد بیشینه و دو عدد کمینه از میان نتیجه‌ها محاسبه می‌شود. اگر تعداد نتیجه‌های معتبر، به‌طور قابل توجهی کم‌تر از ۱۰ آزمایش باشد، تنها کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار حذف و میانگین باقی مانده نتیجه‌ها محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۱۰- ضریب تصحیح شاخص بار نقطه‌ای بر حسب قطر مغزه معادل

۲-۳-۵-۴- شاخص ناهمسانی مقاومت بار نقطه‌ای

شاخص ناهمسانی مقاومت بار نقطه‌ای $[I_{a(50)}]$، براساس تعریف عبارت است از: نسبت دو مقدار میانگین $I_{s(50)}$ که یکی در جهت عمود و دیگری موازی با صفحات ضعیف اندازه‌گیری شده باشند. به عبارت دیگر، نسبت بیش‌ترین مقدار شاخص مقاومت بار نقطه‌ای به کم‌ترین مقدار آن می‌باشد. شاخص ناهمسانی مقاومت بار نقطه‌ای $[I_{a(50)}]$ برای سنگ‌های کم و بیش همسان، برابر ۱ و برای سنگ‌های ناهمسان بیش‌تر از ۱ است.

۲-۳-۶- گزارش نتایج

نتیجه آزمایش‌های قطری، محوری، قطعه‌ای، کلوخی نامنظم و آزمایش‌های در جهت عمود و موازی صفحات ضعیف، باید در جدول‌های جداگانه‌ای ثبت شود. جدول (۲- ۴) چگونگی تکمیل برگ ثبت نتیجه آزمایش‌ها و جدول (۲- ۵)، تکمیل شده برگ ثبت نتیجه آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. گزارش باید شامل داده‌های واسنجی دستگاه و دست کم شامل اطلاعات زیر برای هر نمونه باشد:

- شماره نمونه، محل و موقعیت نمونه‌برداری، طبیعت و نوع سنگ، توجیه فضایی صفحات ناهمسانی یا صفحات ضعیف در محل، تاریخ نمونه‌گیری و تاریخ انجام آزمایش، شرایط نگهداری نمونه در انبار،
- اطلاعات مربوط به میزان رطوبت نمونه در زمان آزمایش،

- اطلاعات مربوط به جهت بارگذاری روی نمونه به صورت موازی (∥)، عمودی (⊥)، یا جهات نامعین و کاتوره‌ای[1] نسبت به صفحات ضعیف،
- جدولی که مقادیر P، D (W و D_e^2 و D_e در صورت لزوم)، I_s، (F در صورت لزوم) و $I_{s(50)}$ برای هر نمونه از کل نمونه‌ها را نشان دهد،
- برای همه نمونه‌های همسان، جدول خلاصه مقادیر میانگین $I_{s(50)}$ ثبت شود،
- برای همه نمونه‌های ناهمسان، مقادیر میانگین $I_{s(50)}$ در بارگذاری عمودی و موازی با صفحات ضعیف محاسبه و همراه با مقدار نسبت آن‌ها $I_{a(50)}$ در جدول خلاصه‌ای ثبت شود،
- ترسیم شکل شکست نمونه.

1- Random

جدول ۲-۴- نمونه ثبت نتایج آزمایش بار نقطه‌ای

یک نمونه قطعه‌ای از یک معدن روباز از نوع ماسه سنگ‌های ذغال‌دار خاکستری با رگه‌های متعدد ذغال در امتداد سطوح لایه‌بندی افقی

نمونه‌های ۱ تا ۶: قطعات تهیه شده با اسکنه، خشک شده در هوا به مدت دو هفته،

نمونه‌های ۷-۱۰: قطعات اره شده، خشک شده در هوا به مدت دو هفته،

نمونه‌های ۱۱-۱۵: مغزه، خشک شده در هوا به مدت دو هفته،

نمونه‌های ۱۶-۲۰: مغزه، خشک شده در هوا به مدت دو هفته.

- آزمایش شده در آزمایشگاه:

شماره	نوع نمونه	W (میلی‌متر)	D (میلی‌متر)	P (کیلونیوتن)	D_e^2 (میلی‌متر مربع)	D_e (میلی‌متر)	I_s	F	$I_{s(50)}$
۱									
۲									
۳									
۴									
۵									
۶									
۷									
۸									
۹									
۱۰									
۱۱									
۱۲									
۱۳									
۱۴									
۱۵									
۱۶									
۱۷									
۱۸									
۱۹									
۲۰									

۳/۳۸	$I_{s(50)}$ ⊥ میانگین
۱/۹۸	$I_{s(50)}$ □ میانگین
۱/۷۱	$I_{s(50)}$

عمودی = ⊥ قطری = d

موازی با صفحات ضعیف = □ محوری = a

آزمایش کلوخ‌های نامنظم = i قطعه‌ای = b

جدول ۲ – ۵- برگ ثبت آزمایش بار نقطه‌ای

آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای

نام پروژه:
شماره کار:
متقاضی:

شرایط آزمایش: خشک ☐ اشباع ☐

تاریخ نمونه‌برداری:
تاریخ آزمایش:

روابط محاسباتی:

$$I_{s(50)} = \frac{P}{D_e^2} \times F$$

$$D_e = \sqrt{(\frac{4A}{\pi})}$$

قطر مغزه معادل بر حسب میلی‌متر

ضریب تصحیح $F = (\frac{D}{50})^{0.45}$

شماره نمونه	نوع نمونه	D فاصله بین دو فک (میلی‌متر)	W عرض نمونه (میلی‌متر)	L نصف طول نمونه (میلی‌متر)	(D/W)	A سطح مقطع عرضی (میلی‌متر مربع)	De قطر مغزه معادل	P بار شکست	I_S شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح نشده	F ضریب تصحیح	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح شده (مگاپاسکال) $I_{S(50)}$	شرط	نمونه
												L/D>1	قطری
												0.3<D/W<1	محوری
												0.3<D/W<1	قطعه‌ای
												۲ – تا لبه نمونه مطابق شکل باید D>0.50 باشد.	

۲-۳-۷- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح‌اند، به قرار زیر می‌باشند:

- آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای در ابتدا برای پیش‌بینی مقاومت تک‌محوری پیشنهاد گردید. ولی پس از چندی، به عنوان آزمایشی استاندارد با هدف کلی رده‌بندی مقاومتی سنگ شناخته شد. از آن‌جا که با اجرای درست آزمایش بار نقطه‌ای می‌توان با سرعت بیش‌تری به نتیجه قابل اطمینانی دست یافت، امروزه این آزمایش در بیش‌تر موارد، جایگزین آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. چون رابطه $I_{s(50)}$ با مقاومت فشاری تک محوری رابطه‌ای تقریبی است، برای رده‌بندی مقاومتی سنگ باید به طور مستقیم از $I_{s(50)}$ استفاده کرد. مقاومت فشاری تک‌محوری حدود ۲۰ تا ۲۵ برابر مقاومت بار نقطه‌ای است. با این حال در آزمایش روی انواع گوناگون سنگ‌ها، این نسبت می‌تواند بین ۱۵ تا ۵۰ به‌ویژه برای سنگ‌های ناهمسان تغییر کند. بنابراین احتمال بروز خطاهای بیش از ۱۰۰ درصد، در استفاده از مقدار نسبت دلخواه برای پیش‌بینی مقاومت فشاری از روی مقاومت بار نقطه‌ای وجود دارد. آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای، نوعی آزمایش کششی غیرمستقیم به‌شمار می‌رود، ولی این موضوع ارتباط چندانی با نقش اصلی این آزمایش در رده‌بندی و تعیین ویژگی‌های مقاومتی سنگ ندارد. $I_{s(50)}$ در حدود ۰/۸ برابر مقاومت کششی تک‌محوری مستقیم یا مقاومت کششی برزیل می‌باشد.
- از چهار گزینه این آزمایش، آزمایش قطری و آزمایش محوری با سطوح ارهبر[1]، درصورتی‌که روی مغزه‌های استاندارد حدود ۵۰ میلی‌متری انجام شود، دارای بیش‌ترین دقت است و زمانی‌که مغزه در دسترس باشد، این نوع آزمایش ترجیح داده می‌شود. نمونه‌های لازم برای آزمایش محوری با سطوح ارهبر را می‌توان به‌راحتی با مغزه‌گیری از یک قطعه سنگ بزرگ در آزمایشگاه تهیه کرد. چنین نمونه‌هایی، به‌ویژه در مورد سنگ‌های ناهمسان و در مواردی که راستای سطوح ضعف باید مدنظر قرار گیرد، بسیار مناسب است.
- برای نمونه‌های بزرگ از سنگ‌های سخت، اغلب بارهایی تا ۵۰ کیلونیوتن لازم است. بنابراین بیش‌ترین اندازه نمونه قابل آزمایش با یک دستگاه خاص، با توجه به ظرفیت بارگذاری دستگاه و کم‌ترین آن بر مبنای دقت اندازه‌گیری فاصله بین دو فک تعیین می‌شود.

انجام آزمایش روی نمونه‌هایی با اندازه کوچک‌تر از $D = 25$ میلی‌متر، به مقدمات خاصی به منظور اطمینان از دقت مقادیر اندازه‌گیری شده نیاز دارد. دامنه بار لازم برای آزمایش روی هر نوع سنگ، باید پیش از انجام آزمایش با توجه به مقاومت تقریبی سنگ تخمین زده شود تا از سازگاری ظرفیت بارگذاری و دقت دستگاه مطمئن شد.

در عمل، ممکن است وسیله اندازه‌گیری بار با بارسنج دستگاه عوض شود و یا آزمایش روی نمونه‌های بزرگ‌تر یا کوچک‌تری که با ظرفیت و دقت دستگاه موجود سازگاری دارد، انجام شود.

1- Saw Cut

- هدف از طرح مخروطی سطح بارگذاری، رسیدن به شرایط استاندارد نفوذ در نمونه سنگ‌های نرم‌تر است. وقتی آزمایش محدود به سنگ‌های سخت با نفوذ کم (کم‌تر از ۲ میلی‌متر) باشد، طرح مخروطی اهمیت چندانی ندارد، به شرط آن‌که شعاع نوک مخروط به میزان استاندارد ۵ میلی‌متر باقی بماند. برای چنین آزمایشی، سطح بارگذاری را می‌توان با نشاندن یک گلوله از فولاد سخت یا تنگستن کارباید (کربور تنگستن) در یک خمیره از فلزی نرم‌تر، با هر شکل هندسی، به‌طوری‌که فقط نوک سطح بارگذاری در تماس با سنگ قرار گیرد، ساخت.
- اگر برای کاهش زمان تاخیر بین دو آزمایش، از جک‌هایی با برگشت سریع استفاده شود، مجموع نیروی فنر بازگرداننده و اصطکاک پیستون جک باید کم‌تر از ۵ درصد کم‌ترین باری باشد که در هنگام آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. درغیراین‌صورت، برای تعیین بار وارده به جای اندازه‌گیری فشار هیدرولیکی سامانه با فشارسنج روغنی، باید از یک بارسنج مستقل استفاده کرد. هنگام آزمایش روی سنگ‌های ضعیف‌تر و نمونه‌های کوچک‌تر، نیروهای مقاوم یاد شده قابل ملاحظه خواهد بود.
- اگر عمق نفوذ سطح بارگذاری قابل ملاحظه باشد، اندازه D که در محاسبات مقاومت بار نقطه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید با مقدار D' که فاصله نقاط بارگذاری در لحظه شکست می‌باشد، جایگزین شود. این مقدار از اندازه اولیه‌ای که در بندهای ۲-۳-۴-۳، ۲-۳-۴-۴ و ۲-۳-۴-۵ پیشنهاد شده کوچک‌تر خواهد بود.

در مواردی‌که نمونه مستحکم یا بزرگ باشد، خطای ناشی از به‌کار بردن D به‌جای D' ناچیز است. اگر بتوان مقدار D' را نیز اندازه‌گیری کرد، همواره بهتر است به جای D اولیه نمونه از آن استفاده نمود. به عنوان مثال وقتی امکان استفاده از دستگاه‌های الکتریکی اندازه‌گیری حداکثر جابه‌جایی و بار وجود دارد، پیشنهاد می‌شود از مقدار D' استفاده شود. در مواردی که نمونه‌های کوچک‌تر از ۲۵ میلی‌متر مورد آزمایش قرار می‌گیرند، مانند آزمایش روی سنگ‌دانه‌ها[1]، دستگاه آزمایش باید به سامانه قرائت الکتریکی مجهز باشد تا بتوان اندازه‌گیری‌ها را با دقت مورد نیاز انجام داد. این دستگاه باید بتواند مقدار D' را نیز اندازه‌گیری کند.

اندازه‌های W یا D در جهت عمود بر خط واصل بین نقاط بارگذاری متاثر از آزمایش نیست و مقادیر اولیه خود را حفظ می‌کند. بنابراین مقدار بعد موثر D_e برای محاسبه مقاومت، از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید:

در آزمایش روی نمونه مغزه: $$D_e^2 = D \times D' \qquad (۱۵-۲)$$

برای شکل‌های دیگر: $$D_e^2 = \frac{4}{\pi}(W \times D') \qquad (۱۶-۲)$$

- از آن‌جا که هدف این آزمایش، به‌طور کلی انجام آزمایشی ساده و عملی برای رده‌بندی صحرایی سنگ‌های بکر است، شرایط آزمایش مانند اندازه و شکل نمونه، تعداد آزمایش‌ها و ... را می‌توان برای برطرف کردن

1- Aggregate Particles

محدودیت‌های عملی، درصورت لزوم تغییر داد. این تغییرات، باید به‌وضوح در گزارش بیان شود. به‌هرحال، بهتر آن است که برای مقاومت نمونه‌ها، اعداد و ارقامی حتی با قابلیت اعتماد کم‌تر بیان شود، تا هیچ‌مقداری برای مقاومت ارائه نشود. به‌عنوان مثال، سنگ‌ها اغلب شکسته‌تر یا متورق‌تر از آن هستند که بتوان از آن‌ها نمونه‌هایی با اندازه و شکل ایده‌آل تهیه کرد. هنگام آزمایش تعیین مقاومت مغزه حفاری نیز اغلب در تعداد نمونه‌ها محدودیت وجود دارد. در پیمایش مغزه‌ها، «نمونه»[1] مفهوم واقعی خود را ندارد بلکه آزمایش بسته به یکنواختی یا تغییرات ظاهری سنگ و طول کلی گمانه، بیش‌تر در فاصله‌های اختیاری (به‌عنوان نمونه هر ۱ متر یا ۳ متر یک آزمایش) انجام می‌شود.

- مانند همه آزمایش‌های تعیین مقاومت سنگ‌ها، مقاومت بار نقطه‌ای نیز با تغییر درصد رطوبت نمونه‌ها تغییر می‌کند. این تغییرات، به‌ویژه در درجه‌های اشباع کم‌تر از ۲۵ درصد قابل ملاحظه است. برای مثال، اغلب، مقاومت نمونه‌های خشک شده در گرم‌خانه بسیار بیش‌تر از مقاومت نمونه‌های مرطوب همان سنگ است. در درجه‌های اشباع بیش از ۵۰ درصد، مقاومت نسبت به تغییرات اندک در میزان رطوبت نمونه تحت تاثیر کم‌تری قرار می‌گیرد، بنابراین پیشنهاد می‌شود که آزمایش در این دامنه رطوبت انجام پذیرد، مگر در مواردی که به‌طور خاص، آزمایش روی سنگ خشک مورد نیاز باشد.

تمام نمونه‌های گرفته شده از یک نمونه سنگ، باید با درصد رطوبت‌های مشخص و مشابه مورد آزمایش قرار گیرند. درصد رطوبت باید متناسب با شرایط طراحی باشد که داده‌ها برای آن مورد نیاز است. آزمایش‌های صحرایی روی نمونه‌هایی که با قلم و چکش[2] گرفته شده و تحت تاثیر سیال حفاری قرار نگرفته‌اند، روش مناسبی برای آزمایش با درصد رطوبت واقعی (طبیعی) می‌باشد.

در صورت امکان، باید مقادیر عددی درصد رطوبت نمونه و درجه اشباع آن، در زمان آزمایش مشخص شود. به این منظور، باید برای تعیین درصد رطوبت از روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[3] (I.S.R.M) استفاده کرد. در هر حال، درصد رطوبت تعیین بشود یا نشود، شرایط نگهداری نمونه‌ها در انبار و زمان تاخیر بین نمونه‌برداری و آزمایش باید در گزارش ثبت شود.

- برخی از محققین معتقدند که اندازه واقعی W کوچک‌ترین بعد نمونه پس از شکست است و قطر نمونه قبل از آزمایش ملاک نمی‌باشد (به‌عنوان مثال استاندارد آلمان). اما چون مقاومت بار نقطه‌ای با استفاده از این‌دو مقدار مختلف W تغییرات کمی را نشان داده است، بنابراین اندازه W در این روش پیشنهادی، کم‌ترین قطر نمونه پیش از شکست می‌باشد. این پیشنهاد، اول به دلیل اندازه‌گیری سریع و آسان W و دوم به علت امکان از بین رفتن قطعات نمونه در صحرا می‌باشد.

1-Sample
2- Chisel-Cut
3- International Society for Rock Mechanics

- در نمونه‌هایی که دارای ناهمسانی هستند، اغلب کوتاه‌ترین اندازه در راستای عمود بر صفحات ضعیف می‌باشد.
- نمودار ضریب تصحیح اندازه (شکل ۲-۱۰) که یک ضریب میانگین است، از نتیجه آزمایش‌های انجام شده روی مغزه‌ها به روش قطری و محوری و نیز قطعات و کلوخ‌های نامنظم سنگ با مقاومت‌های مختلف به‌دست آمده است. استفاده از این نمودار ممکن است با مشخصات بعضی از سنگ‌ها مطابقت نداشته باشد. بنابراین استفاده از آن هرچند برای رده‌بندی عملی بیش‌تر سنگ‌ها کافی می‌باشد، باید به عنوان یک روش تقریبی تلقی شود. وقتی قرار است تعداد زیادی آزمایش روی سنگ مشخصی انجام شود، بهتر است ابتدا تعدادی آزمایش روی نمونه‌های سنگ با اندازه‌های متفاوت انجام شود تا نمودار نیرو – قطر ($P-D_e^2$) به‌دست آید (شکل ۲-۹). اگر شیب این نمودار لگاریتمی «n» باشد، ضریب تصحیح اندازه برابر با $(\frac{D_e}{50})^m$ است که در آن $m=2(1-n)$ می‌باشد. مقدار n را می‌توان به‌طور مستقیم محاسبه کرد یا از نمودار به‌دست آورد.
- وقتی تعداد داده‌ها کم است، با حذف مقادیر بیشینه و کمینه، اغلب، میانگین آن‌ها نتیجه بهتری می‌دهد.

۲-۴- دستورالعمل آزمایش تعیین سختی واجهشی سنگ به‌وسیله چکش اشمیت[1]

سختی[2] سنگ، عبارت است از مقاومت سنگ در برابر نیروی ایجاد شده در اثر تماس، سایش یا ضربه جسم دیگر بر آن. برحسب این‌که نیرو به شکل تدریجی یا ناگهانی به سنگ وارد شود، سختی آن به دو صورت سختی استاتیکی و سختی دینامیکی تعریف می‌شود.

در حالت کلی، سختی استاتیکی و سختی دینامیکی سنگ‌ها، لزوما با هم برابر نیستند. سختی کانی‌ها به‌طور کیفی نسبت به یکدیگر تعریف شده و بر پایه جدول استاندارد موس[3] تعیین می‌شود.

سختی استاتیکی سنگ‌ها مانند سایر جامدات، با ایجاد خراش یا نفوذ تدریجی ابزار آزمایش (جسم دیگر) تعیین می‌شود. افزون بر روش موس، آزمایش‌های براینل[4] (نفوذ نوک نیمکره‌ای فولادی در نمونه تحت آزمایش)، ویکرز[5] (نفوذ الماس هرمی شکل) و راکول[6] (نفوذ نوک تیز در اثر اعمال دو نوع بار به صورت متوالی) برای تعیین سختی استاتیکی، به‌ویژه در مورد فلزات و آلیاژهای صنعتی به‌کار می‌روند.

سختی دینامیکی سنگ، واکنش آن در برابر ضربه است که با آزمایش‌هایی مانند چکش اشمیت[7] و اسکلروسکوپ شور[8] تعیین می‌شود.

1- Schmidt Rebound Hardness
2- Hardness
3- Mohs
4- Brinell
5- Vickers
6- Rockwell
7- Schmidt Hammer
8- Shore Scleroscope

درجه سختی دینامیکی، تابعی است از مقادیر انرژی از دست رفته در تغییر شکل پلاستیک و شکست سنگ در نقطه اعمال ضربه. اگر نقطه اعمال ضربه، در نزدیکی ترک یا لبه نمونه باشد، مقدار انرژی به‌هدررفته بیش‌تر خواهد بود. سختی سنگ‌ها اعم از استاتیکی و دینامیکی، به نوع کانی‌های سازنده، خمیره در برگیرنده کانی‌ها و میزان هوازدگی آن بستگی دارد. در مورد سنگ‌های ناهمسان (آنیزوتروپ) و لایه‌ای، سختی هر لایه ممکن است با سختی لایه‌های دیگر تفاوت داشته و همچنین سختی یک لایه در جهت‌های مختلف نیز متفاوت باشد.

سختی سنگ در انتخاب نوع و روش اجرای عملیات در سنگ، یکی از عامل‌های مهم به‌شمار می‌رود. به عنوان مثال، سرعت حفاری و فرسودگی ابزار کار، تابع سختی سنگ بوده و روابط تجربی متعددی در مورد رابطه بین سختی سنگ و سرعت حفاری و فرسودگی ابزار کار ارائه شده است. با استفاده از نتیجه‌های آزمایش چکش اشمیت، می‌توان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ را به‌صورتی ساده و ارزان و به‌طور تقریبی برآورد نمود. از این روش، بیش‌تر در برآورد مقاومت فشاری سطوحی که دسترسی به آن‌ها به‌صورت نمونه جدای از توده سنگ اصلی میسر نیست (مانند سطح ناپیوستگی‌ها) استفاده می‌شود.

چکش اشمیت، در آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی سنگ و بتن، به‌طور گسترده به‌کار برده می‌شود. از کاربردهای دیگر چکش اشمیت، برآورد پارامتر JCS (مقاومت فشاری سنگ دیواره درزه‌ها) در تخمین مقاومت برشی درزه‌ها است. باتوجه به کاربرد وسیع و اهمیت تعیین سختی سنگ با این ابزار، در این نشریه، دستورالعمل آزمایش تعیین سختی سنگ به‌وسیله چکش اشمیت ارائه می‌شود.

۲-۴-۱- هدف

هدف، تعیین سختی واجهشی سنگ‌ها با استفاده از چکش اشمیت است. این روش برای سنگ‌های بسیار نرم یا بسیار سخت مناسب نیست.

۲-۴-۲- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

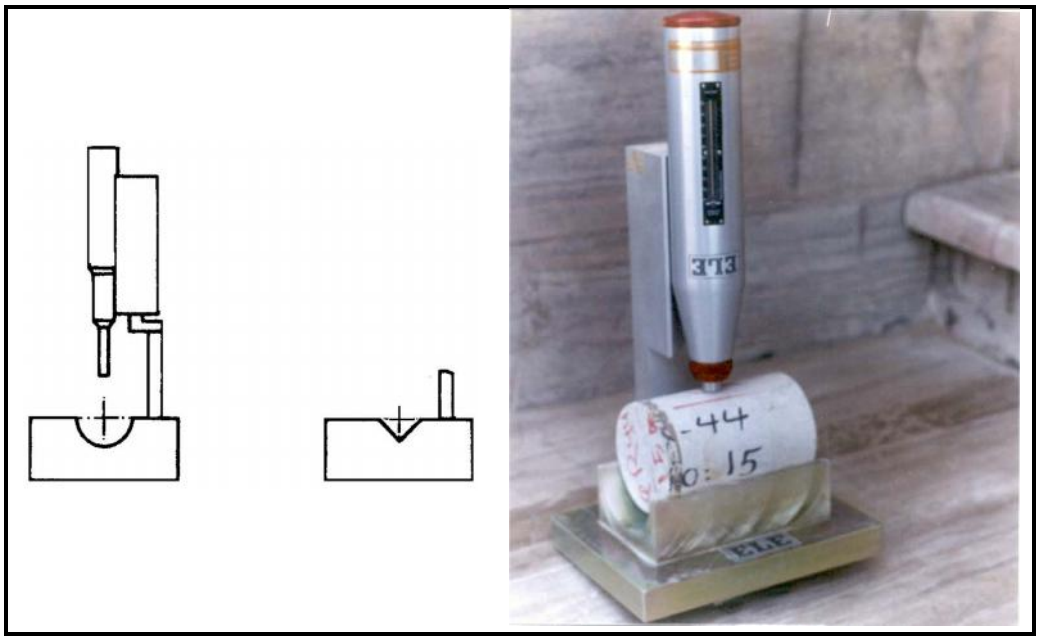
- چکش اشمیت که به‌وسیله آن، سختی واجهشی مصالح مورد آزمایش تعیین می‌شود. برای این‌کار، با فشار دادن قسمت ضربه‌زن چکش روی سطح نمونه، فنر ضربه‌زن داخل چکش به سمت داخل فشرده می‌شود. انرژی پتانسیل حاصل از این فرآیند در این فنر ذخیره خواهد شد. پس از فشرده شدن کامل فنر، ضامن داخلی چکش به‌طور خودکار آزاد شده و ضربه‌زن با یک سطح انرژی از پیش تعیین شده به سطح نمونه ضربه می‌زند. میله ضربه‌زن پس از برخورد به سطح نمونه، در جهت عکس مسیر ضربه برگشت می‌کند. طول برگشت ناشی از این برخورد، مقیاسی برای اندازه‌گیری سختی واجهشی به‌دست می‌دهد. محدوده عدد سختی اشمیت، بین ۱۰ تا ۱۰۰ است.

چکش اشمیت قابل حمل است و استفاده از آن، هم در محیط آزمایشگاه و هم در صحرا به‌سادگی انجام‌پذیر است.

چکش اشمیت در سطوح مختلف انرژی ساخته می‌شود که شامل موارد زیر است:

- نوع L دارای انرژی برخورد ۰/۷۳۵نیوتن متر،
- نوع N دارای انرژی برخورد۲/۲۰۷ نیوتن متر،
- نوع M دارای انرژی برخورد۲۹/۴۳ نیوتن متر.

چکش نوع N به‌طور معمول در عملیات مکانیک سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. چکش نوع L برای سنگ‌هایی که نرم بوده وعدد برگشتی آن ۳۰ یا کم‌تر از آن است مفید می‌باشد. استفاده از این چکش با انرژی کم برای جلوگیری از شکستن سنگ در هنگام آزمایش صورت می‌گیرد (شکل ۲-۱۱-الف). چکش نوع M برای انجام آزمایش روی توده سنگ‌های با حجم‌های بزرگ استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱۱- الف- تصویری از چکش اشمیت نوع L و ب- پایه‌های نگه‌دارنده

- پایه‌ای فلزی، با وزن حداقل ۳۲ کیلوگرم، که نمونه را محکم در خود نگه می‌دارد. برای نمونه‌های مغزه‌ای، از پایه‌هایی که دارای شیاری با مقطع نیم‌استوانه و هم شعاع با اندازه مغزه یا مقطع V شکل باشد استفاده می‌شود (شکل ۲-۱۱- ب).
- دستگاه واسنجی (کالیبراسیون) شامل سندان فولادی به وزن ۳۵ کیلوگرم که در ابعاد و سختی استاندارد، توسط کارخانه سازنده در اختیار قرار می‌گیرد. سختی سندان استاندارد توسط کارخانه اعلام می‌شود (شکل ۲-۱۲).

شکل ۲-۱۲- سندان فولادی واسنجی چکش اشمیت

۲-۴-۳- آماده‌سازی نمونه

در آزمون‌های آزمایشگاهی چکش اشمیت می‌توان از قطعات سنگ باقی‌مانده از دیگر آزمایش‌ها استفاده کرد. در صورت امکان بهتر است از نمونه‌های بزرگ سنگ استفاده شود. به‌عنوان نمونه: چکش نوع L باید روی مغزه‌های NX (حدود ۵۴ میلی‌متر) یا بزرگ‌تر و یا قطعاتی از سنگ که کمینه هربعد آن ۶ سانتی‌متر است به‌کار برده شود. در هر حال، نمونه باید نمایانگر وضعیت سنگ مورد مطالعه باشد. سطحی که ضربه‌زن بر آن فرود می‌آید، چه در نمونه‌های آزمایشگاهی و چه در نمونه‌های صحرایی، باید صاف و هموار باشد. این سطح تا عمق ۶ سانتی‌متری داخل سنگ باید بدون ترک و ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ باشد.

۲-۴-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش، اجرا می‌شود:

الف- پیش از انجام هر مجموعه آزمایش، چکش اشمیت باید توسط سندان مخصوصی واسنجی شود. در آزمایش سندان، میانگین ۱۰ قرائت باید به‌دست آید.

ب- هنگام آزمایش روی قطعات کوچک سنگ، چه در آزمایشگاه و چه در صحرا، برای جلوگیری از حرکت و اطمینان از عدم لرزش نمونه در هنگام انجام کار باید آن را محکم به پایه سخت بست. پایه باید روی سطح صافی که تکیه‌گاه محکمی را ایجاد می‌کند نصب شود.

ج- مقدار سختی به‌دست آمده به راستای برخورد چکش با نمونه بستگی دارد. پیشنهاد می‌شود که چکش در یکی از سه وضعیت قائم رو به بالا، افقی و یا قائم رو به پایین با تقریب ۵± درجه مورد استفاده قرار گیرد. در مواقعی

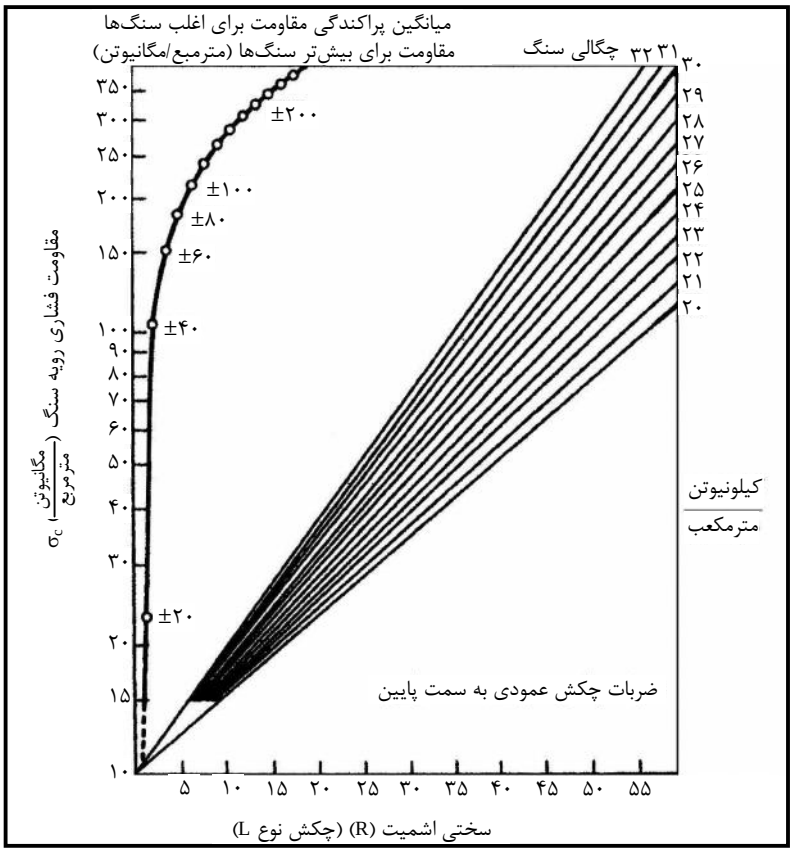
که امکان استفاده از امتدادهای سه‌گانه گفته شده وجود نداشته باشد (به‌عنوان نمونه آزمایش‌های برجا در تونل‌های با مقطع منحنی)، آزمایش باید در زوایای مورد نیاز انجام شده و نتیجه آن‌ها با استفاده از منحنی‌های تصحیح که توسط شرکت سازنده چکش ارائه می‌شود به وضعیت‌های افقی و قائم اصلاح گردد. راستای قرارگیری چکش در آزمایش و هرگونه تصحیح انجام شده در حالت‌های غیرافقی یا غیرقائم باید ثبت و در گزارش نتیجه‌ها آورده شود. در وضعیت سطوح غیرقائم، ISRM جدول (۲-۶) را برای تصحیح نتیجه‌های سختی ارائه کرده است.

جدول ۲-۶- تصحیح نشانه‌های آزمایش چکش برای ضربه‌های غیرافقی

تصحیح برای زاویه انحراف					
مقدار سختی	به سمت پایین		به سمت بالا		افقی
واجهشی R	$\alpha = -90^\circ$	$\alpha = -45^\circ$	$\alpha = +90^\circ$	$\alpha = +45^\circ$	$\alpha = 0^\circ$
۱۰	۰	-۰/۸	-	-	-۳/۲
۲۰	۰	-۰/۹	-۸/۸	-۶/۹	-۳/۴
۳۰	۰	-۰/۸	-۷/۸	-۶/۲	-۳/۱
۴۰	۰	-۰/۷	-۶/۶	-۵/۳	-۲/۷
۵۰	۰	-۰/۶	-۵/۳	-۴/۳	-۲/۲
۶۰	۰	-۰/۴	-۴	-۳/۳	-۱/۷

د- در برخی دستورالعمل‌ها پیشنهاد شده است که تعداد ۵ ضربه چکش در نقطه مورد نظر وارد شود تا اثر ناهمواری‌های کوچک سطح سنگ حذف شده و جواب‌ها از یکنواختی مناسبی برخوردار گردد [۲]. برای هر نمونه سنگ باید دست کم ۲۰ آزمایش انجام شود و محل آزمایش‌ها باید دست کم به اندازه قطر ضربه‌زن از یکدیگر فاصله داشته باشند. اگر در اثر آزمایش ترک یا هر شکستگی قابل مشاهده دیگری ایجاد شود، نتیجه‌های آزمایش پذیرفتنی نبوده و آن نمونه برای آزمایش‌های بعدی قابل استفاده نخواهد بود. خطاهای مربوط به مراحل آماده‌سازی نمونه یا هنگام انجام آزمایش موجب به‌دست آمدن نتیجه‌های کم‌تر از مقدار واقعی برای سختی نمونه خواهد شد.

از سختی واجهشی اشمیت می‌توان مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ را برآورد نمود (شکل ۲-۱۳)



شکل ۲-۱۳- نمودار وابستگی مقاومت فشاری سنگ به عنوان تابعی از تعداد سختی واجهشی اشمیت و چگالی خشک

۲-۴-۵- محاسبات

ضریب تصحیح بر پایه رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{ضریب تصحیح} = \frac{\text{مقدار سختی استاندارد سندان واسنجی (براساس نوع چکش مورد استفاده)}}{\text{میانگین ۱۰ قرائت در آزمایش سندان واسنجی}} \qquad (۲-۱۷)$$

مقادیر اندازه‌گیری شده بر روی سنگ مورد آزمایش به ترتیب نزولی مرتب شده و ۵۰ درصد نتیجه‌های به‌دست آمده که دارای کم‌ترین مقدار می‌باشند، حذف و از بقیه میانگین گرفته می‌شود. این میانگین در ضریب تصحیح ضرب شده و عدد به دست آمده به عنوان مقدار سختی واجهشی اشمیت ارائه می‌شود.

۲-۴-۶- گزارش نتایج

گزارش آزمایش باید شامل موارد زیر باشد:

- توصیف سنگ‌شناسی نمونه آزمایش،
- منشا نمونه آزمایش (محل برداشت نمونه) شامل: موقعیت جغرافیایی، عمق قرارگیری و جهت آن،

- نوع نمونه (مغزه حفاری، قطعات به‌دست آمده از آتش‌کاری یا قطعات شکسته شده و برجا)، اندازه و شکل مغزه یا قطعات نمونه،
- تاریخ نمونه‌برداری، تاریخ انجام آزمایش و شرایط نگهداری نمونه‌ها (به عنوان مثال: قرار دادن نمونه‌ها در معرض دماهای خیلی زیاد، هوای خشک، مرطوب و ...)،
- زاویه اعمال ضربه یا راستای قرارگیری محور چکش در هنگام انجام آزمایش،
- روش مهار نمونه در هنگام انجام آزمایش (استفاده از پایه V شکل یا گیره)،
- مقدار سختی اشمیت به‌دست آمده براساس بند ۲-۴-۵.

۲-۵- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص آماس سنگ‌ها

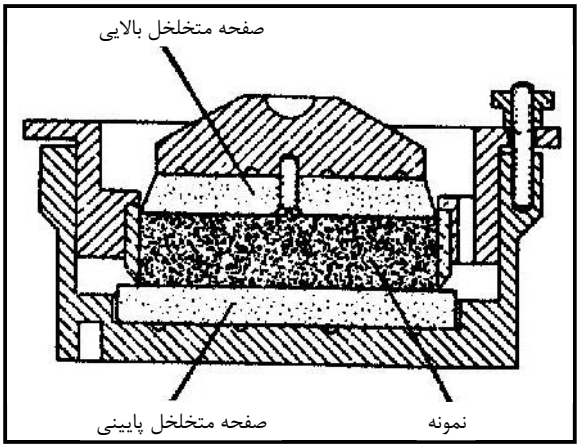
۲-۵-۱- هدف

این آزمایش برای اندازه‌گیری فشار لازم به‌منظور ثابت نگه‌داشتن حجم یک نمونه سالم از ماده سنگ در شرایط کاملا غوطه‌ور انجام می‌شود.

۲-۵-۲- ابزار آزمایش

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش می‌تواند مشابه دستگاهی باشد که در آزمایش تحکیم خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه شامل قسمت‌های اصلی زیر است:

- حلقه‌ای فلزی برای محدود کردن تغییر شکل جانبی نمونه در دستگاه که برای کاهش اصطکاک جانبی آن با نمونه، صیقل داده شده و روغن‌کاری می‌شود. این حلقه دارای حداقل عمق لازم برای جا دادن کامل نمونه است،
- صفحاتی متخلخل که اجازه می‌دهند آب از بالا و پایین به نمونه برسد. قطر صفحه بالایی به اندازه‌ای است که آزادانه درون حلقه فلزی می‌لغزد. می‌توان بین نمونه و صفحات متخلخل کاغذهای صافی قرار داد،
- سلولی که بتوان مجموعه آماده شده بالا را در آن قرار داد. این سلول باید ظرفیت کافی برای پر شدن از آب را تا روی صفحه متخلخل بالایی داشته باشد. مشخصات اصلی این سلول با نمونه‌ای که در آن قرار گرفته در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است،



شکل ۲-۱۴- سلول و نمونه آماده شده برای انجام آزمایش تعیین فشار آماسی در شرایط بدون تغییر حجم

- جابه‌جایی‌سنج عقربه‌ای یا هر وسیله دیگر اندازه‌گیری با دقت ۰/۰۰۲۵ میلی‌متر که برای اندازه‌گیری جابه‌جایی آماسی روی محور مرکزی نمونه نصب می‌شود،
- دستگاه بارگذاری مانند جک‌پیچی[1] که بتوان با تنظیم مداوم بار، حجم نمونه را در هنگام افزایش فشار آماسی ثابت نگه داشت. برای این‌که صفحه متخلخل در طول آزمایش مسطح باقی بماند، نیرو باید به‌وسیله اعضای صلب وارد شود و یک مفصل کروی، دوران صفحه متخلخل بالایی را در هنگام بارگذاری ممکن سازد،
- وسیله‌ای برای اندازه‌گیری بار مورد نیاز برای مقابله با آماس با دقت اندازه‌گیری ۱ درصد بار مزبور.

۲-۵-۳- آماده‌سازی نمونه

نمونه آزمایشی، با رعایت موارد زیر آماده‌سازی می‌گردد:

- برای آزمایش نمونه با درصد رطوبت طبیعی، آماده‌سازی باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که مقدار آب در نمونه با مقدار واقعی آن در محل بیش از ۱ درصد اختلاف نداشته باشد. در مراحل آماده‌سازی از هر نمونه صحرایی برداشت شده از محل، دو نمونه همانند برای آزمایش تهیه می‌شود، یکی از این نمونه‌ها برای تعیین درصد آب و نمونه دیگر برای آزمایش آماس مورد استفاده قرار می‌گیرد،
- برای آزمایش نمونه در شرایطی که درصد آب اولیه به‌طور مصنوعی کنترل می‌شود، می‌توان نمونه را در محیطی با رطوبت ثابت قرار داد، به‌طوری‌که نمونه با جذب رطوبت به درصد آب طبیعی خود در شرایط برجا برسد. از این نمونه صحرایی، دو نمونه آزمایشگاهی همانند تهیه می‌شود، یکی برای آزمایش تعیین درصد آب و دیگری برای آزمایش آماس،

1- Screw Jack

- شکل هندسی نمونه مورد استفاده برای آزمایش، استوانه قائم است. قطر این استوانه نباید از ۲/۵ برابر ضخامت آن کم‌تر باشد. ضخامت استوانه باید از ۱۵ میلی‌متر و یا از ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه در نمونه (هرکدام که بیش‌تر است) بزرگ‌تر باشد. نمونه باید فضای داخلی حلقه را در دستگاه به‌خوبی پر کند،
- باید زاویه لایه‌بندی یا تورق نمونه با امتداد محور آن ثبت شود.

۲-۵-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد روش انجام آزمایش، اجرا می‌شود:

الف- پس از سوار کردن دستگاه، یک نیروی محوری اندک (به‌عنوان مثال معادل فشار حدود ۱۰ کیلوپاسکال در عقربه فشارسنج) به نمونه وارد می‌شود،

ب- محفظه دستگاه تا روی صفحه متخلخل بالایی از آب پر می‌شود،

ج- نیروی وارد بر نمونه باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که از افزایش حجم نمونه (آماس) در طول مدت آزمایش جلوگیری کند. برای این کار، ضخامت نمونه باید با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر ثابت نگه داشته شود،

د- نیروی آماس تا رسیدن به یک مقدار ثابت یا عبور از یک مقدار بیشینه، به صورت تابعی از زمان ثبت می‌شود.

۲-۵-۵- محاسبات

شاخص فشار آماسی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{شاخص فشار آماسی} = \frac{F}{A} \qquad (۱۸-۲)$$

که در آن:

F = بیشینه نیروی آماسی محوری که در طول زمان آزمایش ثبت شده است (کیلو پاسکال)،

A = سطح مقطع نمونه (سانتی‌مترمربع).

۲-۵-۶- گزارش نتایج

گزارش باید شامل نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش روی دست کم سه نمونه آزمایشگاهی از هر نمونه صحرایی باشد. گزارش برای هریک از نمونه‌های مورد آزمایش باید شامل اطلاعات زیر باشد:

- تشریح نظری سنگ و مشخصات محل نمونه‌برداری،
- شاخص فشار آماسی،
- درصد رطوبت اولیه نمونه و این‌که آیا این مقدار همان درصد رطوبت طبیعی نمونه است یا خیر و اگر چنین است، روش نگهداری نمونه تا پیش از انجام آزمایش باید چگونه باشد،
- قطر و ضخامت نمونه همراه با زاویه بین لایه‌بندی یا تورق نمونه با امتداد محور آن.

۲-۶- دستورالعمل آزمایش تعیین شاخص کرنش آماسی در شرایط محصور شعاعی تحت فشار محوری

۲-۶-۱- هدف

این آزمایش برای اندازه‌گیری کرنش آماسی محوری در شرایط فشار یا بار محوری ثابت در نمونه‌های سنگ سالم که در آب غوطه‌ور بوده و از اطراف محصور شده‌اند، انجام می‌شود.

۲-۶-۲- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های اصلی زیر است:

- حلقه‌ای فلزی برای محدود کردن تغییر شکل جانبی نمونه در دستگاه که برای کاهش اصطکاک جانبی آن با نمونه، صیقل داده شده و روغن‌کاری می‌شود و دارای کم‌ترین عمق لازم برای جا دادن کامل نمونه است،
- صفحاتی متخلخل که اجازه می‌دهند آب از بالا و پایین به نمونه برسد. قطر صفحه بالایی به‌اندازه‌ای است که آزادانه درون حلقه فلزی می‌لغزد. می‌توان بین دو نمونه و صفحات متخلخل کاغذهای صافی قرار داد،
- سلولی که بتوان مجموعه آماده شده بالا را در آن قرار داد. این سلول با نمونه‌ای که در آن قرار گرفته در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است،
- یک جابه‌جایی‌سنج عقربه‌ای یا هر وسیله دیگر اندازه‌گیری با دقت ۰/۰۰۲۵ میلی‌متر که برای اندازه‌گیری جابه‌جایی آماسی روی محور مرکزی نمونه نصب می‌شود،
- یک وسیله بارگذاری که ممکن است جرمی نظیر بار مرده یا ترکیبی از بار مرده و سامانه اهرم باشد. این وسیله، باید ظرفیت اعمال فشاری در حدود ۵ کیلوپاسکال به نمونه را داشته باشد. این فشار در مدت تورم نمونه باید با دقتی معادل ۱ درصد ثابت نگه داشته شود. برای این‌که صفحه متخلخل در طول آزمایش مسطح باقی بماند، نیرو باید به وسیله اعضای صلب وارد شود و یک مفصل کروی، دوران صفحه متخلخل بالایی را در هنگام بارگذاری ممکن سازد.

۲-۶-۳- آماده‌سازی نمونه

نمونه آزمایش، با رعایت موارد زیر آماده‌سازی می‌شود:

- برای آزمایش نمونه با درصد آب طبیعی، آماده‌سازی باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که مقدار آب در نمونه با مقدار واقعی آن در محل برجای خود بیش از ۱درصد اختلاف نداشته باشد. در مراحل آماده‌سازی، از هر نمونه برداشت شده از محل، چهار نمونه همانند برای آزمایش تهیه می‌شود؛ یکی از این نمونه‌ها برای تعیین درصد آب و سه نمونه دیگر برای آزمایش آماس،

- برای آزمایش نمونه، در شرایطی که درصد آب اولیه به‌طور مصنوعی کنترل می‌شود، می‌توان نمونه را در محیطی با رطوبت ثابت قرار داد، به‌طوری‌که نمونه با جذب رطوبت، به درصد آب طبیعی خود در شرایط برجا برسد. از این نمونه، چهار نمونه آزمایشگاهی همانند تهیه می‌شود، یکی برای آزمایش تعیین درصد آب و سه نمونه دیگر برای آزمایش آماس،
- شکل هندسی نمونه مورد استفاده برای آزمایش، استوانه قائم است. قطر این استوانه نباید از ۴ برابر ضخامت آن کم‌تر باشد. ضخامت استوانه باید از ۱۵ میلی‌متر یا از ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه در نمونه (هرکدام که بیش‌تر است) بزرگ‌تر باشد. نمونه باید فضای داخلی حلقه را در دستگاه به‌خوبی پر کند،
- زاویه لایه‌بندی یا تورق نمونه باید با امتداد محور آن ثبت شود.

۲-۶-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این روش آزمایش، اجرا می‌شود:

الف- ضخامت و قطر اولیه نمونه با دقت ۰/۱ درصد ثبت می شود،

ب- پس از سوار کردن دستگاه، فشار محوری نمونه تا ۳ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد،

ج- محفظه دستگاه تا روی صفحه متخلخل بالایی از آب پر می‌شود، سپس جابه‌جایی ناشی از آماس نمونه به صورت تابعی از زمان ثبت می‌شود،

د- جابه‌جایی آماسی تا رسیدن به یک مقدار ثابت یا عبور از نقطه اوج منحنی، به صورت مداوم ثبت می‌شود.

۲-۶-۵- محاسبات

شاخص کرنش آماسی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{شاخص کرنش آماسی} = \frac{\delta}{L} \times 100 \quad (\%) \qquad (۱۹-۲)$$

که در آن:

δ = حداکثر جابه‌جایی آماسی ثبت شده در هنگام انجام آزمایش (میلی‌متر)،

L = ضخامت اولیه نمونه (میلی‌متر).

۲-۶-۶- گزارش نتایج

گزارش باید شامل نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش روی دست کم سه نمونه آزمایشگاهی از هر نمونه صحرایی باشد و به روشنی نشان دهد که نمونه در هنگام آزمایش، به‌طور شعاعی کاملا محصور بوده است. گزارش باید برای هریک از نمونه‌های مورد آزمایش شامل اطلاعات زیر باشد:

- تشریح نظری سنگ و مشخصات محل نمونه‌برداری،

- شاخص کرنش آماسی،
- درصد آب اولیه نمونه و این‌که آیا این مقدار همان درصد آب طبیعی نمونه است یا خیر و اگر چنین است روش نگهداری نمونه تا پیش از انجام آزمایش باید چگونه باشد،
- قطر و ضخامت اولیه نمونه، همراه با زاویه بین لایه‌بندی یا تورق با امتداد محور آن.

۲-۷- آزمایش کرنش آماسی در نمونه‌های سنگی نامحصور

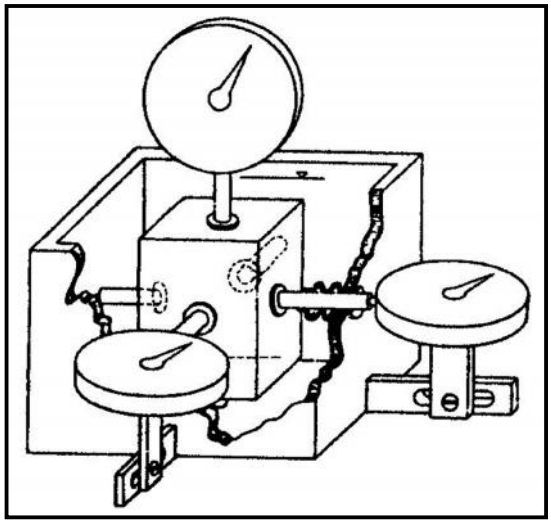
۲-۷-۱- هدف

این آزمایش برای اندازه‌گیری کرنش آماسی نمونه‌های نامحصور سنگ سالم غوطه‌ور در آب انجام می‌شود. این آزمایش تنها در مورد نمونه‌هایی که در اثر جذب آب، وارفتگی یا تغییر شکل هندسی قابل ملاحظه‌ای در آن‌ها اتفاق نمی‌افتد قابل اجرا است. در مورد سنگ‌هایی که دوام[1] کم‌تری دارند، بهتر است از آزمایش کرنش آماسی در شرایط محصور استفاده شود.

۲-۷-۲- ابزار آزمایش

دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- سلولی که نمونه آزمایش درون آن قرار می‌گیرد. ابعاد این سلول باید به‌اندازه‌ای باشد که ظرفیت آبگیری تا سطحی بالاتر از نمونه موجود را داشته باشد. در شکل (۲-۱۵) مشخصات اصلی این سلول و نمونه‌ای که در آن قرار می‌گیرد نشان داده شده است،



شکل ۲-۱۵- سلول و نمونه آماده شده برای انجام آزمایش آماسی غیرمحصور

1- Durable

- یک جابه‌جایی‌سنج عقربه‌ای یا هر وسیله دیگر اندازه‌گیری با دقت ۰/۰۰۲۵ میلی‌متر که برای اندازه‌گیری جابه‌جایی آماسی روی محور مرکزی نمونه نصب می‌شود. برای اندازه‌گیری هم‌زمان جابه‌جایی‌های آماسی در جهت‌های عمود بر راستای محور اصلی نمونه، وسایل اندازه‌گیری دیگری نیز می‌توان نصب کرد،
- صفحات تکیه‌گاهی از جنس شیشه یا دیگر مواد سخت که توسط چسب مقاوم در برابر آب، به نمونه می‌چسبد. اندازه این صفحات در مقایسه با سطح تماس نمونه با آب، باید کوچک باشد. این صفحات در محل قرارگیری وسایل اندازه‌گیری نصب می‌شوند. علت دیگر استفاده از این صفحات، جلوگیری از نفوذ وسایل اندازه‌گیری به داخل نمونه است.

۲-۷-۳- آماده‌سازی نمونه

نمونه آزمایش با رعایت موارد زیر آماده‌سازی می‌گردد:

- برای آزمایش نمونه با درصد آب طبیعی اولیه آن، آماده‌سازی باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که مقدار آب در نمونه با مقدار واقعی آن در محل بر جای خود، بیش از ۱ درصد اختلاف نداشته باشد. در مراحل آماده‌سازی از هر نمونه برداشت شده از محل، دو نمونه همانند برای آزمایش تهیه می‌شود، یکی از این نمونه‌ها برای تعیین درصد آب و نمونه دیگر برای آزمایش آماس،
- برای آزمایش نمونه در شرایطی که درصد آب اولیه به‌طور مصنوعی کنترل شود، می‌توان نمونه را در محیطی با رطوبت ثابت قرار داد، به‌طوری‌که نمونه با جذب رطوبت به درصد آب طبیعی خود در شرایط برجا برسد. از این نمونه، دو نمونه آزمایشگاهی همانند تهیه می‌شود، یکی برای آزمایش تعیین درصد آب و دیگری برای آزمایش آماس،
- نمونه آزمایش باید به شکل یک استوانه قائم یا یک منشور با قاعده مربع درآید. طول کوچک‌ترین ضلع نمونه باید از ۱۵ میلی‌متر یا ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین ذره تشکیل دهنده سنگ (هرکدام که بزرگ‌تر است) بیش‌تر باشد،
- آماده‌سازی نمونه باید با دستگاه مناسب برش و ساب و صیقل صورت گرفته و بهتر است به‌گونه‌ای باشد که یکی از محورهای نمونه بر سطح لایه‌بندی یا تورق آن عمود شود. زاویه بین امتداد اندازه‌گیری آماس و امتداد سطح لایه‌بندی یا تورق باید ثبت شود.

۲-۷-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش، اجرا می‌شود:

الف- محل قرارگیری وسایل اندازه‌گیری جابه‌جایی باید به‌گونه‌ای علامت‌گذاری شود که با محور یا محورهای نمونه منطبق باشد. ابعاد اولیه نمونه در فاصله بین این نقاط، با دقتی بیش از ۰/۱ درصد اندازه‌گیری می‌شوند،

ب- صفحات تکیه‌گاهی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های آماسی، در وضعیتی مناسب روی نقاط علامت‌گذاری شده قرار می‌گیرند و سپس بر دستگاه آزمایش سوار می‌شود. نمونه در این حالت تنها در نقاط اندازه‌گیری، که در امتداد محورهای اصلی نمونه نصب شده‌اند، مهار می‌شود،

ج- محفظه آزمایش، به‌طوری پر می‌شود که آب اطراف و سطح نمونه را به‌خوبی بپوشاند. پس از آن جابه‌جایی‌های آماسی برحسب توابعی از زمان آزمایش ثبت می‌شوند،

د- ثبت جابه‌جایی آماسی باید تا رسیدن به یک اندازه ثابت یا عبور از یک مقدار حداکثر، ادامه پیدا کند.

۲-۷-۵- محاسبات

مقدار آماس نامحصور در هر امتداد اندازه‌گیری، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{کرنش آماسی نامحصور در امتداد } X = \frac{\delta}{L} \times 100 \qquad (۲۰-۲)$$

که در آن:

X = امتداد نسبت به سطح لایه‌بندی یا تورق نمونه،

δ = بیش‌ترین مقدار آماس ثبت شده در امتداد X در هنگام انجام آزمایش (میلی‌متر)،

L = فاصله اولیه بین نقاط اندازه‌گیری در امتداد X (میلی‌متر).

۲-۷-۶- گزارش نتایج

در گزارش آزمایش باید نتیجه آزمایش‌ها روی حداقل سه نمونه آزمایشگاهی به‌دست آمده از نمونه صحرایی ارائه شود. از آن‌جا که نمونه سنگ سالم در این آزمایش، از اطراف محصور نمی‌شود (فشار جانبی صفر است)، در گزارش آزمایش باید به صراحت بیان شود که نمونه در هنگام آزمایش، به‌طور شعاعی محصور نبوده است. در مورد هر نمونه، گزارش آزمایش باید شامل اطلاعات زیر باشد:

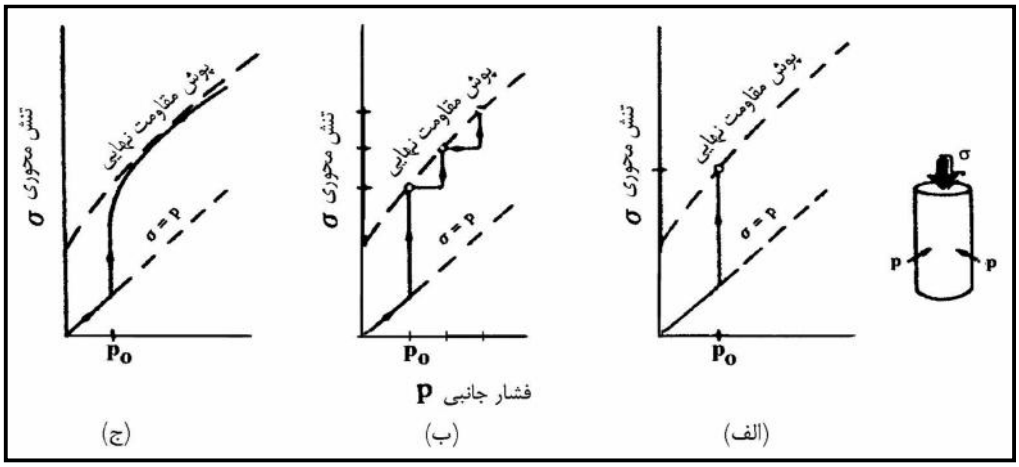
- کرنش‌های آماسی نامحصور و راستای آن‌ها نسبت به سطح لایه‌بندی یا تورق،
- رطوبت اولیه نمونه و مقایسه آن با رطوبت طبیعی آن و چگونگی نگهداری نمونه در انبار تا قبل از انجام آزمایش،
- شکل و ابعاد اولیه نمونه،
- توصیفی از هرگونه تغییر وضعیت قابل مشاهده در نمونه به هنگام جذب آب.

۲-۸- دستورالعمل آزمایش مقاومت فشاری سه محوری سنگ

۲-۸-۱- هدف

هدف از آزمایش مقاومت فشاری سه محوری، تعیین مقاومت فشاری یک نمونه سنگ استوانه‌ای شکل تحت فشار (بارگذاری) سه محوری می‌باشد. نتیجه آزمایش‌ها، ترسیم پوش مقاومت[1] سنگ را ممکن ساخته و سرانجام زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی «ظاهری» (C) قابل محاسبه خواهد بود.

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری، سه روش پیشنهاد شده که تفاوت اصلی آن‌ها در چگونگی به‌دست آوردن پوش مقاومت سنگ به شرح زیر است (شکل ۲-۱۶):



شکل ۲-۱۶- روش‌های مختلف آزمایش مقاومت فشاری سه محوری سنگ

- در روش الف (آزمایش منفرد)[2] مقاومت نهایی چند نمونه از یک سنگ، تعیین‌کننده پوش مقاومت است، درحالی‌که در روش‌های ب (آزمایش شکست[3] چند مرحله‌ای) و ج (آزمایش شکست پیوسته)[4]، پوش مقاومت، از آزمایش روی یک نمونه به‌دست می‌آید،
- میزان اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش روی یک نمونه، به‌ترتیب در روش‌های الف، ب و ج افزایش خواهد یافت،
- دستگاه‌های آزمایش نیز، به‌ترتیب در روش‌های الف، ب و ج مجهزتر خواهند شد.

1- Strength/Failure Envelope
2- Individual Test
3- Multiple Failure State Test
4- Continuous Failure State Test

۲-۸-۲- اهمیت و موارد استفاده

اهمیت و موارد استفاده از این آزمایش به شرح زیر است:

- تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ با شبیه‌سازی شرایط واقعی آن در محل،
- تعیین مقاومت فشاری سنگ در فشارهای جانبی متفاوت،
- تعیین پارامترهای کشسانی[1] سنگ،
- تعیین مقاومت برشی سنگ در فشارهای عمودی متفاوت.

۲-۸-۳- محدودیت آزمایش

از این آزمایش در مواردی استفاده می‌شود که اجزای مصالح سنگی در طرح مورد نظر، چه در هنگام اجرا یا پس از ساخت و بهره‌برداری، در شرایط بارگذاری سه محوری قرار گیرند. میزان بارهای جانبی با توجه به حوزه تنش اعمال شده تعیین خواهد شد.

- این آزمایش برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی[2] در سنگ‌های سخت، دارای دقت کافی نیست و مقاومت فشاری برای فشار آب موجود در منفذ تصحیح نمی‌گردد،
- در صورت وجود فشار منفذی، آزمایش باید در درصد رطوبت‌های مختلف انجام گیرد و اگر باز هم تاثیر فشار منفذی مشاهده شد، باید تجهیزات مربوط به اندازه‌گیری فشار منفذی را به دستگاه آزمایش اضافه کرد،
- در مورد سنگ‌های نرم، با استفاده از محفظه‌های[3] مجهز به سامانه اندازه‌گیری فشار منفذی، کاستی بالا تا حدودی برطرف خواهد شد.

۲-۸-۴- ابزار آزمایش

مجموعه ابزار آزمایش شامل: دستگاه آزمایش فشار سه محوری، سامانه اعمال و کنترل فشار جانبی و سامانه بارگذاری جانبی می‌باشد.

۲-۸-۴-۱- دستگاه آزمایش فشار سه محوری

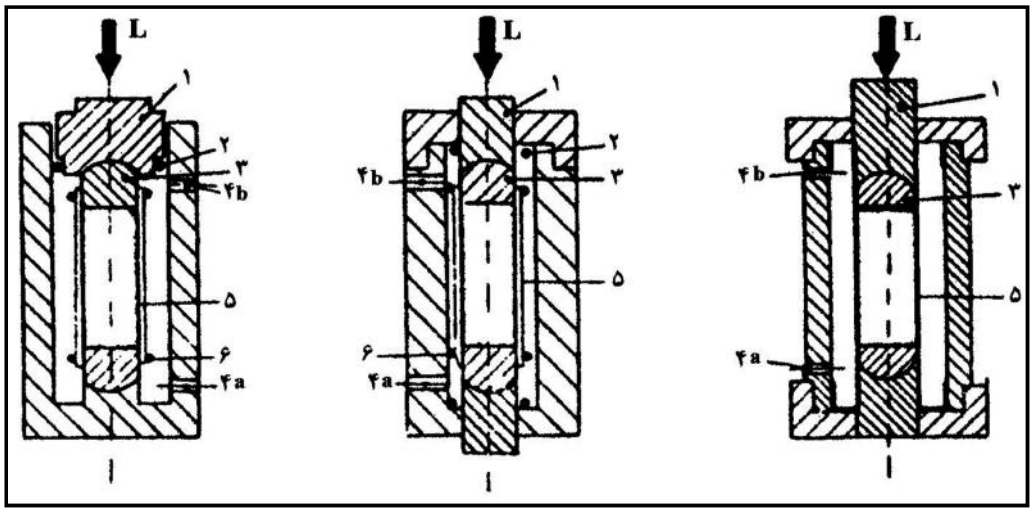
دستگاه آزمایش شامل قسمت‌های زیر است:

- یک دستگاه بارگذاری (ترجیحا صلب[4]): برای اعمال و اندازه‌گیری بار محوری در نمونه سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه باید برای شکست نمونه آزمایش تحت فشار جانبی تعیین شده و قابلیت اعمال تغییر

1- Elastic Parameters
2- Pore Pressure
3- Cells
4- Stiff

شکل نسبی با آهنگ انتخاب شده دارای ظرفیت کافی باشد. دستگاه بارگذاری باید در فاصله زمان‌های مناسب واسنجی شود،

- محفظه سه محوری: برای اعمال فشار جانبی بر نمونه که می‌تواند یکی از انواع نشان داده شده در شکل (۲-۱۷) باشد،
- دیسک‌های انتهایی: با سختی راک‌ول[1] حداقل C_{30}، که در دو انتهای نمونه آزمایش قرار می‌گیرد. اندازه قطر دیسک‌ها باید بین D و 1.02D(قطر نمونه سنگ استوانه‌ای شکل = D) و ضخامت آن‌ها دست کم ۱۵ میلی‌متر (یا $\frac{D}{3}$) بوده و رویه‌ی آن تا ۰/۰۰۵ ± میلی‌متر صیقلی شود،
- مفصل‌های کروی شکل[2]، که مرکز انحنای آن‌ها باید با مرکز سطح مقطع نمونه آزمایش منطبق باشد. برای جلوگیری از اعمال بارهای خارج از محور، مرکز سطح مقطع نمونه آزمایش و دیسک‌های انتهایی باید با مرکز انحنای مفصل کروی در یک راستا قرار گیرند. سطوح محدب و مقعر مفصل‌ها باید پیش از هر آزمایش روغن‌کاری شوند،



۱- پیستون بارگذاری ۲- واشرها ۳- دیسک‌های انتهایی و تشتک‌های کروی ۴- اتصالات هیدرولیکی
۵- غلاف انعطاف‌پذیر ۶- بست‌های واشر حلقوی ۷- منفذ هواگیری**(4a ,4b)**

شکل ۲-۱۷- سه نوع مختلف از محفظه سه محوری و اجزای آن‌ها

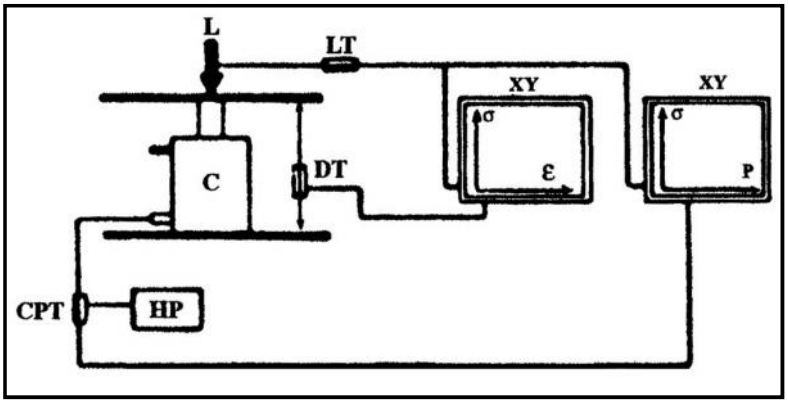
- یک غلاف انعطاف‌پذیر: ساخته شده از مصالح مناسب که باید برای جلوگیری از نفوذ سیال تامین کننده فشار جانبی به نمونه آزمایش استفاده شود. این غلاف نباید در منفذهای سطحی نمونه آزمایش نفوذ کند. درضمن طول آن باید به حدی باشد که دو دیسک انتهایی را نیز بپوشاند. قطر غلاف با کمی کشیدگی باید با قطر نمونه آزمایش برابر باشد.

1- Rockwell Hardness
2- Spheriacal Seatings

۲-۸-۴-۲- سامانه اعمال و کنترل فشار جانبی

سامانه اعمال و کنترل فشار جانبی باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- سامانه اعمال و کنترل فشار جانبی باید ظرفیت کافی داشته و قابلیت بارگذاری با هر آهنگی متناسب با شرایط قید شده در بند ۲-۸-۴-۱ را داشته باشد (شکل ۲-۱۸). آهنگ بارگذاری در فاصله‌های زمانی مناسب باید قابل ارزیابی و کنترل بوده و با استانداردهای متداول[1] مطابقت داشته باشد،
- فشار محوری باید به‌طور مداوم اندازه‌گیری و ثبت شود (ترجیحا در روش الف و بنا به نیاز در روش‌های ب و ج)،
- برای اندازه‌گیری و ثبت مداوم جابه‌جایی محوری، یک جابه‌جایی‌سنج الکتریکی باید مورد استفاده قرار گیرد (ترجیحا در روش الف و در صورت لزوم در روش‌های ب و ج)،



شکل ۲-۱۸- شمای ساده دستگاه آزمایش سه محوری

در این شکل:

L = بار محوری، LT = فشارسنج الکتریکی (محوری)، CPT = فشارسنج الکتریکی (جانبی)، C = محفظه سه‌محوری، HP = دستگاه اعمال فشار جانبی و DT = جابه‌جایی‌سنج الکتریکی (اختیاری در روش الف) می‌باشند.

- در روش الف برای رسم فشار محوری در جابه‌جایی محوری یک ثبات $X-Y$ کافی است. ولی در روش‌های ب و ج، باید از دو ثبات $X-Y$ استفاده کرد که یکی برای ثبت فشار محوری – جابه‌جایی محوری و دیگری برای ثبت فشار محوری – فشار جانبی کاربرد خواهد داشت،
- اگر مفصل‌های کروی شکل بند ۲-۸-۴-۱ با مشخصات مورد نظر انطباق نداشته باشد، باید حذف شده و بارگذاری از طریق دو دیسک بارگذاری کاملا موازی صورت گیرد.

1- ASTM Method 4-64, Verification of Testing Machines

۲-۸-۴-۳- سامانه بارگذاری جانبی

سامانه بارگذاری جانبی باید ویژگی‌های زیر را دارا می‌باشد:

- یک پمپ هیدرولیکی یا افزاینده فشار با ظرفیت کافی که دارای قابلیت نگهداری فشار جانبی ثابت در محدوده ±۱٪ فشار مورد نظر باشد،
- درجه نشان دهنده میزان فشار وارده باید درست و دقیق باشد تا به کمک آن بتوان فشار جانبی اعمال شده را مشاهده و ثبت کرد،
- در روش الف، فشار جانبی ثابت است و احتیاجی به ثبت آن نیست ولی در روش‌های ب و ج به ثبت مداوم فشار جانبی نیاز بوده و بنابراین فشارسنج الکتریکی[1] مورد نیاز است.

۲-۸-۵- آماده‌سازی نمونه

نمونه آزمایشی با رعایت موارد زیر آماده‌سازی می‌گردد:

- نمونه‌های سنگی باید استوانه‌هایی قائم با نسبت ارتفاع به قطر ۲ تا ۳ باشد (با قطری که ترجیح داده می‌شود برابر و بیش‌تر از ۵۴ میلی‌متر باشد = NX). قطر نمونه آزمایش باید دست کم ۱۰ برابر ابعاد بزرگ‌ترین دانه‌های موجود در سنگ باشد،
- سر و ته نمونه آزمایش باید به موازات یکدیگر و عمود بر محور طولی نمونه بریده شده و تا ±۰/۰۱ میلی‌متر صیقل داده شود،
- سر و ته نمونه آزمایش باید با دقت ±۰/۰۰۱ رادیان (حدود ۳/۵ دقیقه یا ۰/۰۵ میلی‌متر در ۵۰ میلی‌متر) یکنواخت و صاف شده و نباید از صفحه عمود بر محور طولی نمونه آزمایش انحراف داشته باشد،
- سطح جانبی نمونه باید صاف و بدون هرگونه ناهمواری قابل مشاهده باشد. این نمونه باید در تمام طول مستقیم بوده و نباید بیش از ۰/۳ میلی‌متر انحراف داشته باشد،
- استفاده از هرگونه مواد پوششی یا هر نوع کار اصلاحی، غیر از صیقل دادن، در دو انتهای نمونه آزمایش مجاز نیست،
- قطر نمونه آزمایش باید با دقت ۰/۱ میلی‌متر در دو راستای عمود بر هم در سه مقطع (بخش‌های بالایی، میانی و پایینی نمونه) اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها برای محاسبه مساحت سطح مقطع مورد استفاده قرار گیرد. اندازه‌گیری طول نمونه آزمایش با دقت ۱/۰ میلی‌متر کافی است،

1- Pressure Transducer

- نمونه‌های آزمایش باید در انبار به‌گونه‌ای نگهداری شوند که تا حد امکان رطوبت طبیعی خود را تا زمان آماده‌سازی نمونه حفظ کنند. مدت انبارداری نباید از ۳۰ روز بیش‌تر باشد. رطوبت نمونه آزمایش باید در انطباق با یکی از روش‌های استاندارد تعیین و گزارش شود،
- تعداد نمونه‌های آزمایش باید برای ترسیم پوش مقاومت سنگ در محدوده فشارهای جانبی مورد نظر کافی باشد. این تعداد به روش آزمایش برگزیده (الف، ب یا ج)، تغییرات ذاتی سنگ و همچنین موارد کاربرد نتایج آزمایش بستگی دارد.

۲-۸-۶- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر در مورد هریک از روش‌های سه‌گانه‌ی آزمایش اجرا می‌شود (شکل ۲-۱۸):

الف- آماده‌سازی دستگاه ثبات $X-Y$ (در صورت استفاده)، انتخاب مقیاس محورها و واسنجی دستگاه مزبور و یا سایر ابزار قرائت داده‌ها،

ب- سوار کردن سامانه شامل: نمونه آزمایش، دیسک انتهایی، غلاف، محفظه سه محوری و ابزارهای اندازه‌گیری فشار و جابه‌جایی. جزییات مراحل اجرای آزمایش به نوع محفظه سه‌محوری و همچنین به نوع و محل قرارگیری ابزارهای اندازه‌گیری بستگی دارد،

ج- اتصال لوله‌های هیدرولیکی و پر کردن سلول سه محوری با روغن، هواگیری و بستن دریچه هواگیری،

د- قرار دادن محفظه سه محوری در دستگاه بارگذاری محوری،

هـ- انتخاب فشار جانبی اولیه.

۲-۸-۶-۱- روش الف (آزمایش شکست منفرد)

مراحل انجام این روش آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

الف- فشار محوری به‌طور معمول، هم‌زمان با فشار جانبی افزایش می‌یابد تا جایی‌که فشار جانبی به اندازه از پیش تعیین شده برسد.

ب- از آن‌جا که آهنگ تغییر شکل نسبی باید ثابت باشد، آهنگ بارگذاری محوری باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که شکست در فاصله زمانی بین ۵ تا ۱۵ دقیقه بارگذاری اتفاق بیفتد. به‌جای آن می‌توان نرخ افزایش تنش را در محدوده‌ی بین ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه اعمال کرد.

ج- بیش‌ترین بار محوری وارد بر نمونه مورد آزمایش و فشار جانبی متناظر آن باید ثبت شود. با این حال، پیشنهاد می‌شود که بار و جابه‌جایی محوری به‌طور پیوسته ثبت شود.

۲-۸-۶-۲- روش ب (آزمایش شکست چند مرحله‌ای)

مراحل انجام این آزمایش به قرار زیر می‌باشد:

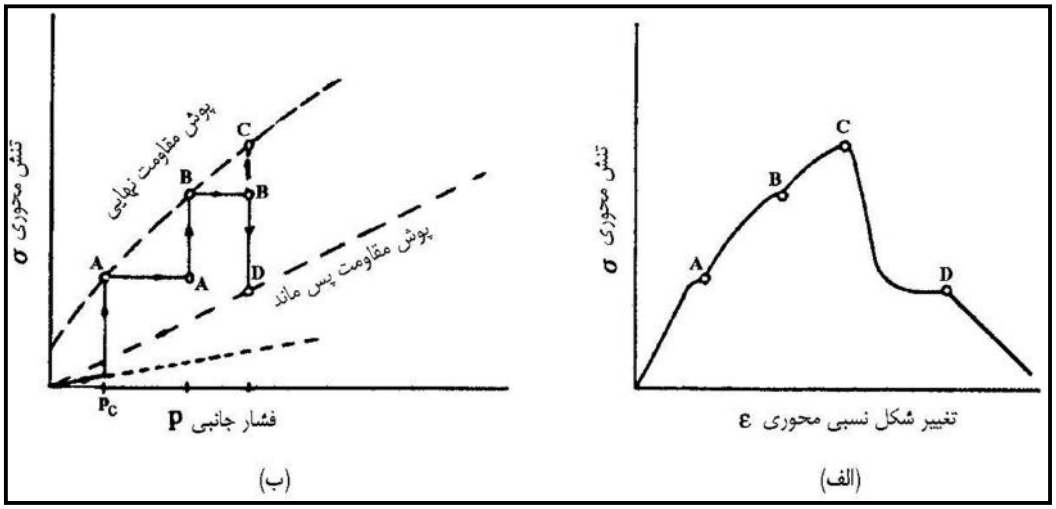
الف- ابتدا فشار جانبی اولیه (P_0) باید اعمال شود. بار محوری و فشار جانبی به‌طور معمول باید هم‌زمان افزایش یابند تا فشار هیدرواستاتیکی به اندازه‌ی فشار جانبی اولیه (P_0) برسد،

ب- با ثابت نگه داشتن فشار جانبی اولیه (P_0)، بار محوری افزایش داده می‌شود تا مقاومت اوج نمونه آزمایش روی منحنی تنش محوری – تغییر شکل نسبی محوری مشاهده شود (نقطه A در شکل ۲-۱۹- الف). بار محوری باید به‌طور پیوسته با آهنگ ثابت تغییر شکل نسبی در محدوده 10^{-2} تا 10^{-5} واحد بر ثانیه افزایش داده شود،

ج- فشار جانبی به طور دستی در یک گام (یا پله)، از نقطه A به A' (شکل ۲-۱۹- ب) افزایش یافته و سپس بار محوری مطابق روش ج افزایش می‌یابد،

هـ- مرحله‌های ب و ج تارسیدن به نقطه‌ی از پیش تعیین شده‌ای چون C (شکل ۲-۱۹) ادامه می‌یابد. پس از آن، درحالی‌که فشار جانبی ثابت نگه‌داشته می‌شود، فشار محوری افزایش می‌یابد. این عمل به شکست نمونه آزمایش منجر شده و تنش محوری تا حد مقاومت پس‌ماند نمونه (نقطه‌ی D در شکل ۲-۱۹) افت می‌یابد،

و- فشار جانبی تا حذف کامل بار از نمونه آزمایش به طور پیوسته کاهش می‌یابد (شکل ۲-۱۹). منحنی تنش محوری بر حسب فشار جانبی از پوش مقاومت پس‌ماند پیروی خواهد کرد،



شکل ۲-۱۹- نمودار شماتیک نتیجه‌های آزمایش به روش ب (شکست چند مرحله‌ای)

یادآوری:

آزمایش نوع ب (که مراحل اجرای آن توضیح داده شد) و نوع ج، امکان ترسیم تمام یا دست کم بخش مهمی از پوش مقاومت اوج را با یک آزمایش میسر می‌سازد. ولی آزمایش نوع ج، ویژگی‌های کنترل بهتری داشته و با این‌حال در مقایسه با آزمایش نوع ب به تخصص بیش‌تری نیاز دارد. این مراتب را باید در انتخاب نوع آزمایش مد نظر قرار داد.

۲-۸-۶-۳- روش ج (آزمایش شکست پیوسته)

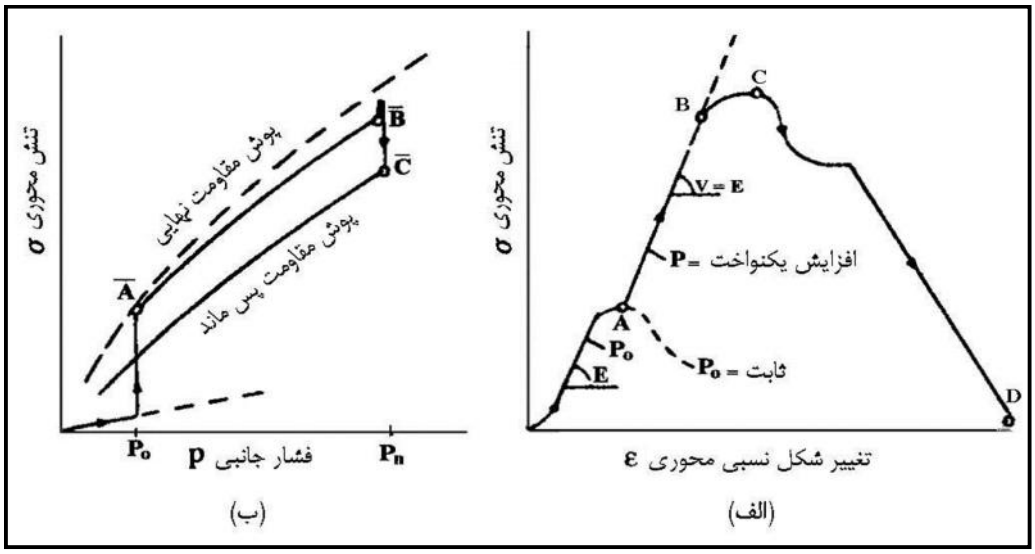
مراحل انجام این آزمایش به شرح زیر است:

الف- فشار جانبی اولیه (P_0) باید اعمال شود. بار محوری و فشار جانبی باید به‌طور هم‌زمان افزایش یابند تا فشار هیدرواستاتیکی به اندازه فشار جانبی اولیه (P_0) برسد،

ب- با ثابت نگه‌داشتن فشار جانبی اولیه (P_0)، بار محوری باید افزایش داده شود تا مقاومت نقطه اوج مربوط روی منحنی تنش محوری - تغییر شکل نسبی محوری مشاهده شود (نقطه‌ی A در شکل ۲-۲۰- الف). بار محوری باید پیوسته با نرخ ثابت تغییر شکل نسبی در محدوده 10^{-2} تا 10^{-5} واحد بر ثانیه افزایش داده شود، طوری‌که نقطه A در مدت ۵ تا ۱۵ دقیقه به‌دست آید،

ج- خط راست AB، به موازات قسمت خطی (کشسان) منحنی بار – تغییر شکل اولیه، از نقطه‌ی اوج A رسم می‌شود که شیب آن (V) معرف مدول کشسانی (E) نمونه خواهد بود،

د- هم‌زمان باافزایش یکنواخت فشار محوری با آهنگ از پیش تعیین شده، فشار جانبی باید طوری افزایش یابد تا قلم ثبات $X-Y$ در راستای خط AB باقی بماند. منحنی بار محوری – فشار جانبی به‌طور پیوسته در ثبات $X-Y$ دیگری ترسیم و ثبت می‌شود،



شکل ۲-۲۰- نمودار شماتیک نتیجه آزمایش به روش ج (شکست پیوسته)

هـ- در نقطه‌ی از پیش تعیین شده‌ی B شکل (۲-۲۰- الف)، فشار جانبی ثابت نگه داشته شده ($P = P_n$) ولی افزایش بارگذاری محوری ادامه می‌یابد. درنتیجه، منحنی رسم شده از خط راست AB منحرف شده و شکست در نقطه‌ی C رخ می‌دهد. هنگامی‌که نمونه آزمایش بیش‌تر فشرده شود، تنش محوری به اندازه تنش پس‌ماند، افت پیدا می‌کند (نقطه‌ی D در شکل ۲-۲۰- الف). فشارهای جانبی به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد تا نمونه

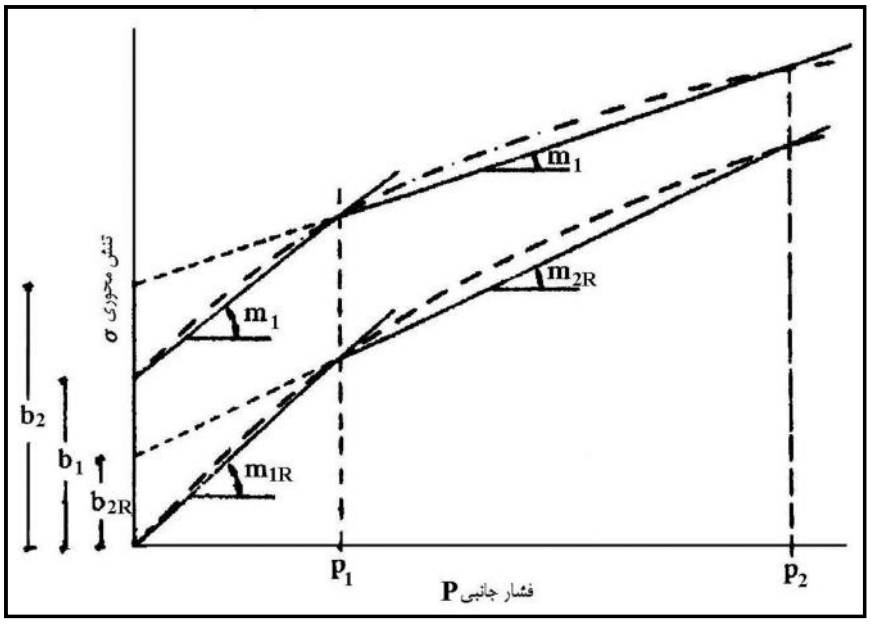
آزمایش کاملا بار زدوده شود (شکل ۲-۲۰- ب). منحنی تنش محوری بر حسب فشار جانبی، پوش مقاومت پس‌ماند را ایجاد می‌کند.

۲-۸-۷- محاسبات

با انجام این آزمایش، مقادیر زاویه‌ای اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی ظاهری (C) سنگ، با رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردد:

- تنش محوری، از تقسیم بار محوری اعمال شده در هنگام آزمایش بر سطح مقطع اولیه‌ی نمونه (براساس مشخصات مندرج در بند ۲- ۸- ۵) محاسبه می‌شود،
- پوش مقاومت نهایی و مقاومت پسماند در روش ج، به‌طور مستقیم در طول آزمایش به‌دست می‌آید و در روش‌های الف و ب با استفاده از نقاط به‌دست آمده رسم می‌شود (شکل ۲-۱۶- الف و ۲-۱۶- ب)،
- پوش‌های مقاومت‌های نهایی و پسماند را می‌توان به‌صورت ریاضی و با معادلات خطی یا در صورت لزوم دوخطی به شکل: $\sigma = m_i P + b_i$ تخمین زد که مقادیر b_i (عرض از مبداء) و m_i (شیب خط) را می‌توان در محدوده فشارهای جانبی اعمال شده براساس شکل (۲-۲۱) به‌دست آورد. با استفاده از پارامترهای m_i و b_i می‌توان زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی ظاهری (C) را به مفهوم مطرح در معیار شکست کولمب محاسبه کرد:

$$\phi_i = \arcsin\frac{m_i - 1}{m_i + 1} \quad , \quad C_i = b_i \frac{1-\sin\phi_i}{2\cos\phi_i}$$



شکل ۲-۲۱- نمودار شماتیک پوش‌های مقاومت نهایی و پسماند

۲-۸-۸- گزارش نتایج

گزارش آزمایش باید دست کم شامل موارد زیر باشد:

- اطلاعات مربوط به نمونه‌برداری شامل: موقعیت جغرافیایی، عمق، جهت داری، تاریخ و روش نمونه‌برداری. در صورت لزوم باید نقشه‌ای که نقاط نمونه‌برداری روی آن نشان داده شده باشد پیوست شود،
- تشریح سنگ‌شناسی نمونه آزمایش به‌ویژه اندازه‌ی دانه‌های تشکیل دهنده‌ی سنگ،
- تشریح جزییات روش آماده‌سازی نمونه آزمایش، همچنین گزارش شرایط محیطی دوران انبارداری شامل رطوبت، دما و ... باید پیوست شود،
- راستای محور بارگذاری نسبت به ناهمسانی، لایه‌بندی، کلیواژ و ...،
- میزان رطوبت و درصد اشباع نمونه در زمان آزمایش،
- تشریح دستگاه آزمایش شامل: سامانه اعمال و اندازه‌گیری بار محوری، محفظه سه محوری، سامانه اعمال و اندازه‌گیری فشار جانبی،
- تاریخ انجام آزمایش،
- قطر و طول نمونه آزمایش،
- مدت زمان آزمایش، آهنگ بارگذاری و جابه‌جایی،
- نمودارهای آزمایش براساس مشخصات مندرج در بندهای ۲-۸-۶-۲ و ۲-۸-۶-۳. برای آزمایش منفرد (روش الف) جدولی نیز باید پیوست شود که در آن کد شناسایی نمونه‌های آزمایش همراه با فشار جانبی و مقاومت فشاری محوری مربوط، برای هریک از نمونه‌ها آورده شده باشد،
- حالت شکسته هر نمونه آزمایش (شکست برشی، قاچ طولی، آماس، خرد شدن و ...)،
- در صورت لزوم، اندازه محاسبه شده‌ی چسبندگی ظاهری (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) برای مقاومت‌های نهایی و پس‌ماند، با ثبت محدوده‌ی فشار جانبی که اندازه‌های محاسبه شده C و ϕ در آن محدوده اعتبار دارند،
- سایر اطلاعات مانند جرم حجمی، تخلخل با بیان روش تعیین مقدار هریک،
- جدول نتیجه‌های آزمایش شامل: ستون‌های کد شناسایی نمونه آزمایش، طول نمونه آزمایش، قطر نمونه آزمایش، فشار جانبی و مقاومت فشاری مربوط (تا سه رقم اعشار)،

تبصره: چنان‌چه نمونه‌ای با این استاندارد مطابقت کامل نداشته و به ضرورت مورد آزمایش قرار گرفته باشد، موارد مغایرت باید در ستون ملاحظات قید شود. نتیجه‌های این گونه آزمایش‌ها تنها برای آگاهی و مقایسه است و نباید به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرد.

جدول پیشنهادی برای تهیه گزارش آزمایش در جدول (۲-۷) ارائه شده است.

جدول ۲-۷- جدول پیشنهادی برای تهیه گزارش آزمایش

آزمایشگاه .....

آزمایش مکانیک سنگ

گزارش آزمایش مقاومت فشاری سه محوری

- نام طرح .....
- نوع دستگاه آزمایش .....
- تاریخ آزمایش .....

مجری آزمایش:

مسئول آزمایشگاه:

ردیف		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
مشخصات نمونه آزمایش	شماره									
	جنس									
	طول (میلی‌متر) L									
	قطر (میلی‌متر) D									
	درصد رطوبت (w) (٪)									
	درصد تخلخل (n) (٪)									
	وزن مخصوص (کیلونیوتن / مترمکعب)									
شرایط و مشخصات آزمایش	امتداد بارگذاری نسبت به ناهمسانی (درجه) β°									
	دمای آزمایشگاه (درجه سانتی‌گراد)									
	فشار جانبی (مگاپاسکال) σ_3									
	بار محوری در زمان شکست (کیلونیوتن) P									
	فشار محوری در زمان شکست (مگاپاسکال) σ_1									
شمای شکست										
اطلاعات تکمیلی										

۲-۸-۹- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح‌اند، به قرار زیر می‌باشند:

- مفهوم مقاومت نهایی، بیشینه تنش محوری است که یک نمونه‌ی سالم[1] می‌تواند در یک فشار جانبی معین تحمل کند،
- در این‌جا تنها تفاوت‌های اصلی بین روش‌های مختلف آزمایش یادآوری شده و جزییات هر روش در بند ۲-۸-۶ آمده است،
- میزان تاثیر فشار منفذی، به نوع سنگ، رطوبت موجود و آهنگ تغییر شکل نسبی بستگی دارد. به این دلیل توصیه‌ای فراگیر برای آزمون‌های آزمایشی[2] یا بررسی تاثیر فشار منفذی قابل ارائه نیست. همچنین تاکنون برای آزمایش و اندازه‌گیری فشار منفذی که در تمام موارد قابل کاربرد باشد یک دستورالعمل اجرایی ارائه نشده است،
- مشخصات سامانه بارگذاری و دستورالعمل واسنجی آن‌ها در برخی از استانداردها[3] توضیح داده شده است،
- صلبیت دستگاه‌های بارگذاری «صلب» بیش‌تر از ۰/۲ مگانیوتن بر میلی‌متر و اغلب بین ۱ تا ۲ مگانیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. اگر صلبیب دستگاه بارگذاری کم‌تر از ۰/۱ مگانیوتن بر میلی‌متر باشد، این دستگاه «غیرصلب»[4] نامیده می‌شود. درضمن، استفاده از دستگاه‌های بارگذاری خودکار[5] پیشنهاد می‌گردد،
- نیمه‌های مقعر تشتک‌های کروی شکل در دستگاه بارگذاری، آزادی حرکت دورانی ندارند. به‌منظور تضمین هم‌محوری، نمونه آزمایش باید همراه با دو تشتک کروی شکل در دو انتها، در دستگاه قرار داده شود،
- غلاف انعطاف‌پذیر با سختی تقریبی ۶۰ تا ۷۰ شور[6]، انعطاف کافی برای مقاومت در مقابل تغییر شکل جانبی نمونه آزمایش را خواهد داشت،
- دقت اندازه‌گیری فشارسنج‌ها باید ۴ تا ۵ برابر میزان نوسان فشار قابل قبول در زمان بارگذاری باشد،
- در پاره‌ای از موارد و برخی از سنگ‌ها، ممکن است انجام آزمایش روی نمونه‌های آزمایش با درصد رطوبت‌های مختلف ضرورت داشته باشد. چنین مواردی باید با بیان شرایط در گزارش نتیجه‌ها مشخص شود،
- روش افزایش فشار جانبی از صفر تا میزان مورد نظر، به دستگاه آزمایش بستگی دارد. در حالت ایده‌آل، بارگذاری اولیه P (بارگذاری هم‌زمان محوری و جانبی) تا فشار جانبی از پیش تعیین شده P_0 باید به‌گونه‌ای باشد که شرایط تنش هیدرواستاتیک را در نمونه ایجاد کند (یعنی: $\sigma = P$ برای بارگذاری اولیه تا رسیدن به $\sigma = P_0$). اگر

1- Intact
2- Tentative Tests

۳- به پاورقی صفحه ۶ مراجعه شود.

4- Non Stiff or Flexible
5- Servo Controlled
6- Shore Hardness

در خلال بارگذاری هیدرواستاتیکی، فشار جانبی بر حسب تصادف از تنش محوری بیش‌تر شود، پیستون بارگذاری ممکن است از نمونه آزمایش جدا شده (به عنوان مثال، تشتک‌های کروی شکل ممکن است از هم جدا شوند) و نمونه آزمایش از حالت هم‌محوری با امتداد بارگذاری خارج شود. اصطکاک بین قطعات دستگاه بارگذاری ممکن است مانع از هم‌محوری مجدد شود. بنابراین افزایش فشار جانبی و بار محوری باید به‌گونه‌ای باشد که تنش محوری در نمونه آزمایش همواره از فشار جانبی تا میزان حداکثر ۱:۱۰ مقاومت فشاری نمونه بیش‌تر باشد. این حالت باید تا رسیدن فشار جانبی به میزان از پیش تعیین شده حفظ شود،

- فشار جانبی باید در محدوده‌ی ۲٪ میزان از پیش تعیین شده حفظ شود،
- نمودارهای زیر را می‌توان بر حسب نیاز ترسیم نمود:
  - بار محوری بر حسب جابه‌جایی محوری،
  - تنش محوری بر حسب تغییر شکل نسبی محوری،
  - هر ترکیب مناسب دیگر.
- انتخاب نمودار به ابزارهای اندازه‌گیری (به‌عنوان مثال، جابه‌جایی‌سنج الکتریکی یا کرنش‌سنج) و روش واسنجی دستگاه بستگی دارد،
- واژه «مقاومت پس‌ماند» در این‌جا برای بیان مقاومت فشاری بعد از شکست نمونه آزمایش به ازای تغییر شکل‌های نسبی قابل دسترسی در آزمایش فشاری سه محوری به کار می‌رود. تغییر شکل‌های نسبی ثبت شده در پاره‌ای از موارد ممکن است برای نشان دادن مقاومت پس‌ماند واقعی برخی از سنگ‌ها کافی نباشند. در این گونه موارد اگر مقاومت پس‌ماند واقعی یا جابه‌جایی زیاد وابسته به آن مورد نیاز باشد باید از روش‌های آزمایش دیگری استفاده شود،
- اختلاف تنش محوری $\Delta\sigma_n$ (افزایش تنش از نقطه‌ی B به C در شکل ۲-۲۰) نشان‌دهنده‌ی اختلاف در مقاومت به‌دست آمده برای سنگ می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۲-۲۰) نشان داده شد، منحنی تنش محوری – فشار جانبی مطابق با شرایط پیش از شکست از مسیر b می‌گذرد. بنابراین با دانستن اختلاف تنش محوری $\Delta\sigma_n$، مسیر b باید با استفاده از رابطه‌ی زیر به‌پوش واقعی مقاومت نمونه سنگ تبدیل شود:

$$\sigma(P) = \Delta\sigma_n \frac{P - P_0}{P_n - P_0} \qquad (۲۱-۲)$$

- درصورت استفاده از دستگاه آزمایش با صلبیت کم یا آزمایش روی نمونه‌های بسیار شکننده[1]، ممکن است شکست ناگهانی و شدید در مقاومت نهایی نمونه آزمایش اتفاق بیفتد. دراین‌صورت تنها منحنی مقاومت نهایی قابل دستیابی است و نمی‌توان منحنی مقاومت پس‌ماند را ثبت و ترسیم کرد،
- تعیین تنش محوری واقعی در هر زمان فقط درصورتی امکان‌پذیر است که جابه‌جایی جانبی و تصحیح هم‌زمان سطح مقطع نمونه آزمایش اندازه‌گیری شود،
- چسبندگی به‌دست آمده با این آزمایش (C)، ارزش فیزیکی معمول را نداشته و تنها برای تشریح پوش شکست به کار می‌آید. به‌خصوص باید توجه شود که محاسبه‌ی مقاومت کششی نمونه سنگ با استفاده از چسبندگی ظاهری C ممکن نیست.

۲-۸-۱۰- تفسیر و نتیجه‌گیری

تفسیر و نتیجه‌گیری از آزمایش به طبیعت طرح، مشاهدات عینی در خلال آزمایش، تخصص و تجربه مفسر بستگی دارد. یادآوری کلیه عوامل موثر درنتیجه به‌دست آمده و مواردی که ممکن است برای تصمیم‌گیری در طرح مورد نظر سودمند باشد، ضروری است.

1- Highly Brittle

فصل ۳

دستورالعمل انجام آزمایش‌های صحرایی مکانیک سنگ

۳-۱- دستورالعمل اندازه‌گیری بر جای تغییر شکل سنگ توسط آزمایش بارگذاری صفحه‌ای با صفحات تغییرشکل‌پذیر

۳-۱-۱- هدف

با انجام آزمایش به روش بارگذاری صفحه‌ای، مدول تغییرشکل‌پذیری بر جای توده سنگ در تونل‌ها و با دیگر فضاهای زیرزمینی کوچک تعیین می‌شود. این دستورالعمل براساس ASTM D43,4[3] یا ISRM[4] تهیه شده است.

۳-۱-۲- اهمیت و موارد استفاده

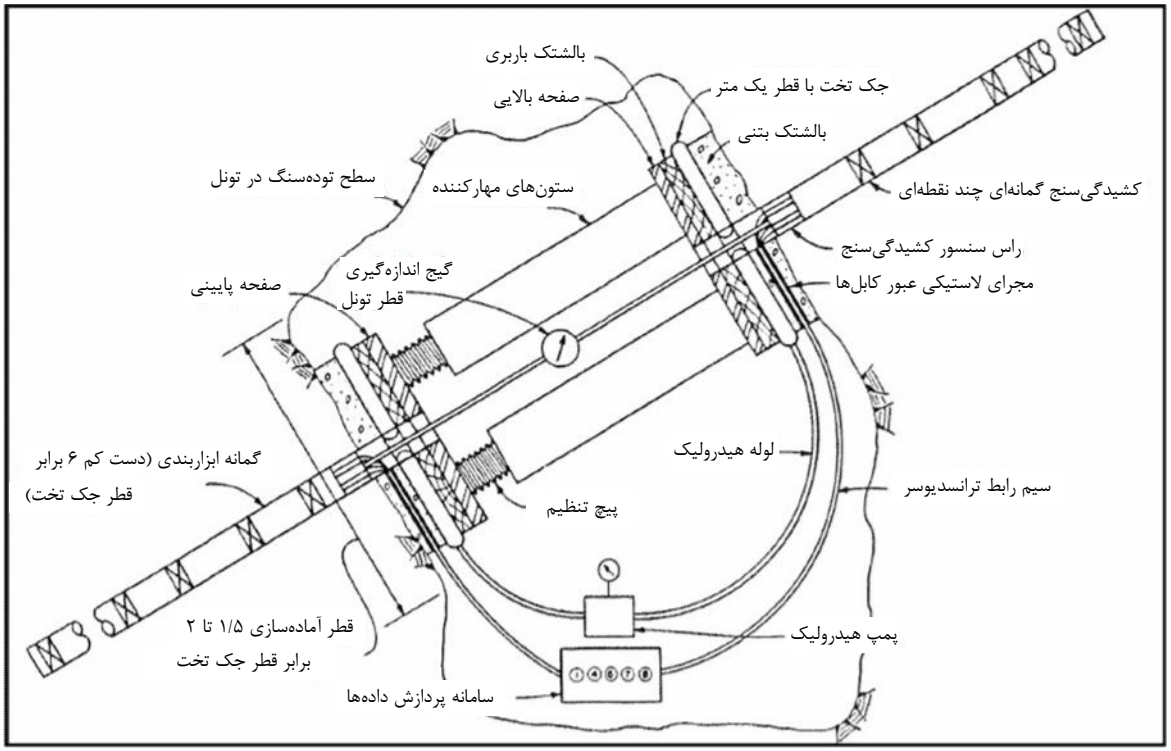
در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای[1] از بارگذاری سطحی استفاده می‌شود و اغلب تحت عناوین مختلف مانند Plate Bearing Test و Plate Jacking Test و Uniaxial Jacking Test نیز شناخته می‌شود. در این آزمایش دو ناحیه، هرکدام با قطری بین ۰/۴ تا یک متر به‌طور هم‌زمان با استفاده از جک‌های مستقر در یک نقطه از تونل بارگذاری می‌شوند. تغییر شکل توده سنگ در طول گمانه‌هایی که در پشت ناحیه بارگذاری و وسط صفحات مربوط حفر شده، اندازه‌گیری می‌شود. اطلاعات حاصل از بارگذاری افزایشی و چرخه‌ای برای محاسبه مدول‌های تغییرشکل‌پذیری و الاستیک در بارگذاری و باربرداری استفاده می‌شود. پارامترهای خزشی توده سنگ از نمودارهای جابه‌جایی در برابر زمان به‌دست می‌آید. اثرات ناهمسان‌گردی را می‌توان با استفاده از تغییر راستای بارگذاری در هر جهت دلخواه تعیین کرد. با وجود این توصیه می‌شود که بار جک‌ها در صفحه‌ای عمود بر محور تونل آزمایشی اعمال شود.

۳-۱-۳- تجهیزات

ویژگی‌های تجهیزات مورد نیاز این آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

- تجهیزات لازم برای انجام آزمایش شامل امکاناتی است که برای آماده‌سازی محل آزمایش حفاری گمانه ابزاربندی شده و پیمایش آن، اندازه‌گیری تغییرشکل سنگ، ثبت داده‌های آزمایش و انتقال اجزای مختلف به محل آزمایش ضروری است. نمونه‌ای از تجهیزات آزمایش در شکل (۳-۱) نشان داده شده است،
- تجهیزات آماده‌سازی محل آزمایش شامل مجموعه‌ای از ابزار حفاری مانند دریل‌ها و چکش‌های حفاری است. برای آماده‌سازی سطح نهایی محل بارگذاری نباید از آتش‌کاری استفاده نمود،
- دستگاه حفاری گمانه ابزاربندی باید تا حد امکان قابلیت نمونه‌گیری مغزه از اعماق دست کم ۱۰ متر را داشته باشد. چند نوع از ابزار مشاهده گمانه برای بررسی وضعیت سنگ در گمانه ابزاربندی به‌منظور مقایسه و تطبیق خصوصیات زمین‌شناسی با مغزه گمانه‌ها، مورد نیاز می‌باشند،

1- Plate Loading Test



شکل ۳-۱- نحوه قرارگیری تجهیزات در داخل فضای زیرزمینی در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای [۲]

- ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل شامل یک کشیدگی‌سنج گمانه‌ای چندنقطه‌ای[1] (MPBX) برای هر گمانه ابزاربندی و نیز یک وسیله برای اندازه‌گیری قطر تونل باشند. کلیه ابزارها باید دارای دقت و حساسیت کافی و متناسب با تغییر شکل‌های پیش‌بینی شده باشند. در توده سنگ‌هایی که مدول تغییر شکل آن‌ها بیش‌تر از خطای آزمایش، فراتر از ۰/۰۱ میلی‌متر، ممکن است سبب بی‌اعتبار شدن نتایج آزمایش شود،
- دستگاه بارگذاری باید قابلیت اعمال فشارهای یکنواخت هم‌زمان به دو سطح مقابل هم در تونل را که هرکدام تقریبا یک متر قطر دارند، داشته باشد. تجهیزاتی که برای اعمال بار مورد نظر به سنگ آماده‌سازی و ابزاربندی شده شامل جک‌های تخت واسنجی شده و ستون‌های نگهدارنده‌ای است که باید توان تحمل و حفظ بیشینه بار یکنواخت مطلوب را با ضریب اطمینان کافی داشته باشد. سامانه پمپ هیدرولیکی به کار رفته در آزمایش با متعلقات آن مانند شیرآلات[2]، گیج‌ها و لوله‌ها باید تحمل فشار اعمال شده در خلال انجام آزمایش را داشته و بتواند بارهای مورد نظر را با دقت ۳ ٪ در طول آزمایش اعمال و حفظ نماید.

1- Multiple Position Borehole Extensometer
2- Valve

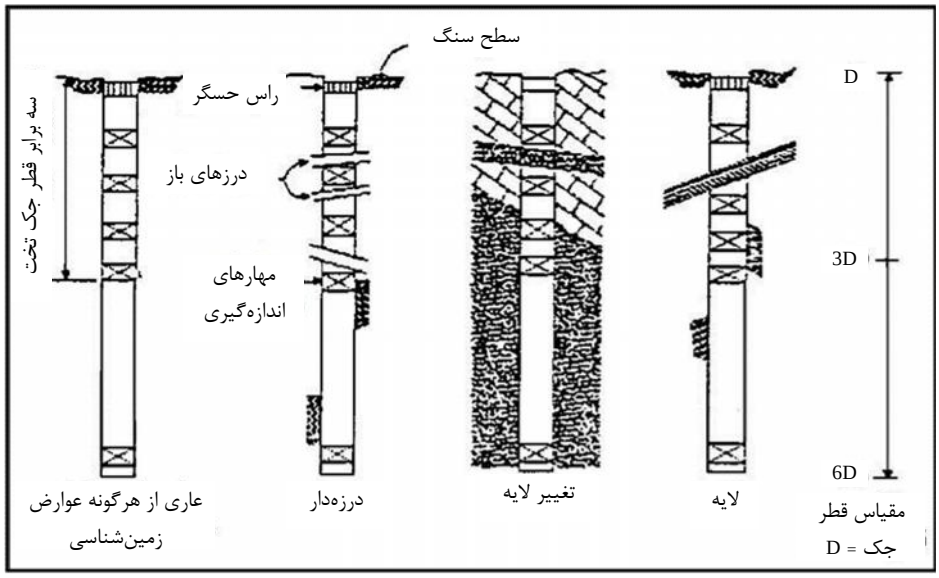
۳-۱-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر در مورد این روش آزمایش اجرا می‌شود:

۳-۱-۴-۱- آماده‌سازی محل

آماده‌سازی محل انتخابی برای آزمایش باید با دقت صورت گیرد و تمامی مواد سنگی سست با استفاده از تیشه و دریل لق‌گیری و پاکسازی شوند. برای کاهش اثرات محدودکننده سنگ‌های اطراف ناحیه بارگذاری، باید منطقه‌ای به قطر ۱/۵ تا ۲ برابر سطح آزمایش آماده‌سازی شود. دو سطح آزمایش باید موازی هم بوده و مرکز آن‌ها در یک راستا و در صفحاتی عمود بر ستون‌های نگهدارنده قرار گیرند. درصورتی‌که برای آماده‌سازی سطح اولیه آزمایش نیاز به آتش‌کاری باشد، باید سعی شود تا این سطوح از خسارت و صدمات آتش‌کاری در امان باشند.

- یک گمانه ابزاربندی در هر سطح آماده شده باید تا عمق مورد نظر حفاری و مغزه‌گیری شود. این دو گمانه باید با یکدیگر و نیز با مجموعه ستون‌های نگهدارنده هم محور باشند،
- بررسی مغزه و مشاهده درون گمانه ابزاربندی به تعیین محل گیرداری ابزار اندازه‌گیری روی کشیدگی‌سنج (MPBX) کمک خواهد نمود. موقعیت نقاط گیرداری ابزار اندازه‌گیری باید به‌گونه‌ای باشد که بر روی درزه‌ها و در نقاط تغییر مناطق ساختاری یا تغییرات زمین‌شناسی قرار نگیرد. به‌منظور تامین یک نقطه ثابت که حرکات سایر نقاط توده سنگ با آن سنجیده شود، عمیق‌ترین نقطه گیردار باید کم و بیش در ۶ برابر قطر صفحه بارگذاری در زیر سطح سنگ قرار گیرد. در حالت کلی دیگر نقاط درگیر روی MPBX باید در منطقه تنش بیشینه یعنی بین سطح سنگ و نقطه‌ای به فاصله تقریبی ۳ برابر قطر جک در پشت سطح انتخاب شوند. شکل ۳-۲ نمونه‌ای از نحوه انتخاب و ارتباط نقاط درگیر با شرایط ساختاری توده سنگ را نشان می‌دهد. نقاط درگیر و حسگرهای نصب شده روی MPBX در این نقاط باید به‌خوبی به دیواره گمانه اتصال یابند. به این ترتیب شرایط لازم برای سنجش جابه‌جایی و رفتارنگاری کلیه اجزای مجموعه آزمایش فراهم خواهد شد.



شکل ۳-۲- نمونه‌ای از نحوه تعیین موقعیت نقاط درگیر نسبت به شرایط زمین‌شناسی توده سنگ در گمانه ابزاربندی

۳-۱-۴-۲- تجهیزات

تجهیزات کامل نصب شده برای اعمال بار همراه با ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. با کمک یک صفحه چوبی (که در شکل نشان داده نشده است) می‌توان هم‌راستا بودن کلیه اجزای آزمایش را تامین کرد. فضای بین مجموعه جک تخت و سنگ باید توسط ملات سیمان نرم پر شود. باید فرصت کافی به ملات داده شود تا پیش از آغاز آزمایش مقاومت کافی را کسب نماید. فضای بین جک تخت و دو صفحه بارگذاری نیز باید با مواد پرکننده (مثل تراشه‌های چوپ و رزین) و یا مصالحی که برای تامین شرایط مناسب برای جک مسطح از یک‌سو و صفحات بارگذاری از سوی دیگر ساخته می‌شود، پر شود.

۳-۱-۴-۳- روش انجام آزمایش

آزمایش به روش زیرین انجام می‌گیرد:

الف- بعد از نصب کلیه اجزای ابزاربندی در گمانه‌های حفر شده، این ابزار باید از لحاظ عملکرد الکترونیکی و مکانیکی کنترل شوند. همچنین پس از نصب اجزای بارگذاری، عملکرد آن‌ها نیز باید کنترل گردد. در نهایت کلیه وسایل مکانیکی، هیدرولیکی و الکترونیکی پس از بتن‌ریزی و نصب کامل و پیش از اعمال اولین افزایش بار کنترل شوند.

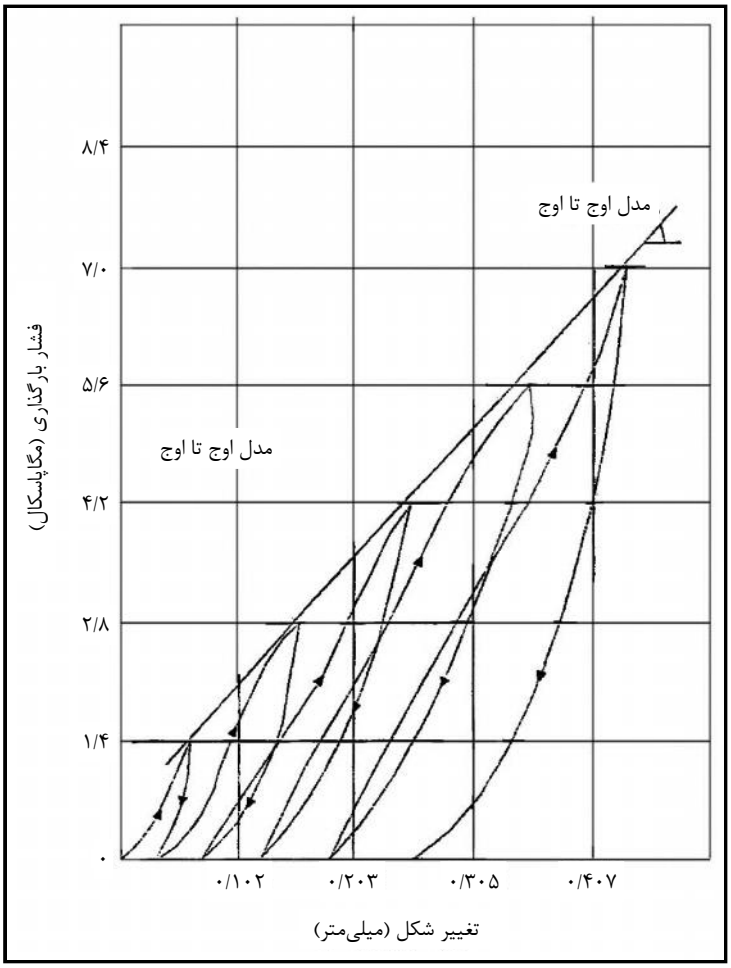
ب- آزمایش‌ها باید به‌طور پیوسته و شبانه‌روزی و براساس مقادیر بار در نظر گرفته شده و افزایش منظم با ملاحظات خاص طراحی در محل انجام شود.

ج- برای به‌دست آوردن داده‌های مطلوب، لازم است در هنگام انجام آزمایش، تغییر شکل سنگ توسط ابزار خودکار به‌طور پیوسته و یا با فواصل زمانی مناسب ثبت شود. درصورتی‌که از سامانه ثبت ناپیوسته استفاده می‌شود، دست کم ۴ قرائت در هنگام اولین ساعت بارگذاری یا باربرداری باید انجام شود،

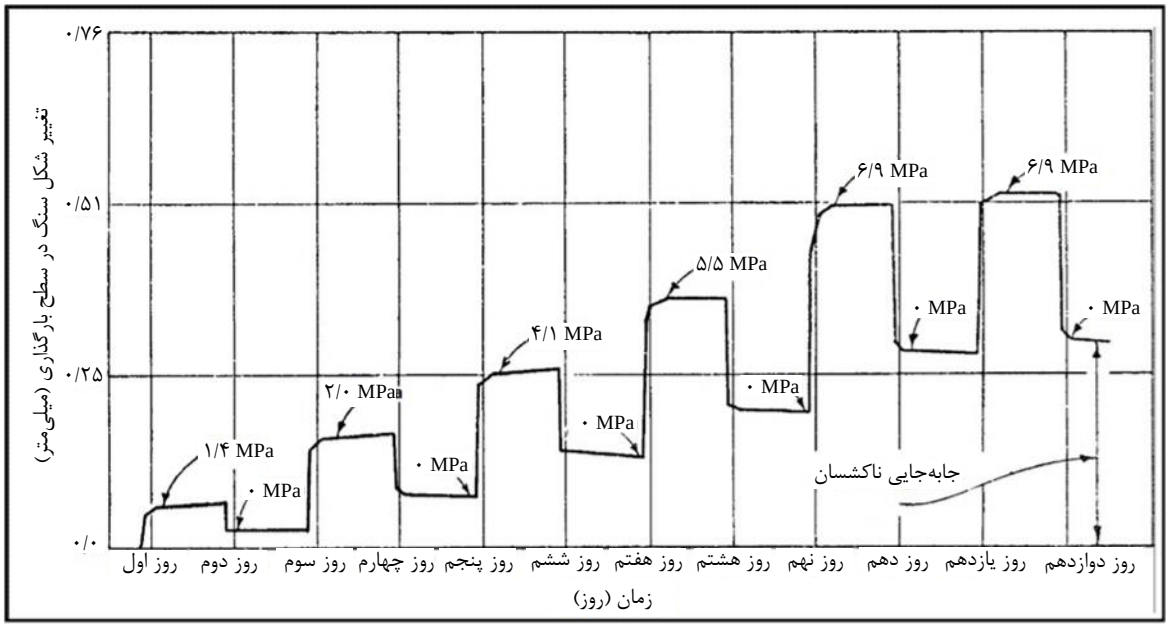
د- بیشینه فشار آزمایش، تعداد سیکل‌ها تا رسیدن به بیش‌ترین فشار و تعداد دفعات آزمایش فشار در هر سیکل بر حسب شرایط آزمایش و اطلاعات مورد نظر تعیین خواهد شد. معمولا بیشینه فشار ۱/۲ تا ۱/۵ برابر مقدار بار وارده پیش‌بینی شده از سوی سازه کافی به‌نظر می‌رسد. برای انجام آزمایش، پنج سیکل بارگذاری و باربرداری انجام می‌شود که در هر باربرداری فشار تا اندازه فشار نصب کاهش یافته و دوباره افزایش می‌یابد. فشار بیشینه در هر سیکل، طی پنج پله، حاصل خواهد شد. در شکل (۳-۳) نمونه یک سیکل بارگذاری نشان داده شده است،

هـ- مدت زمان هر افزایش فشار با توجه به خصوصیات خزش توده سنگ مشخص می‌شود. برای درک درست از رفتار توده سنگ دست کم ۴۸ ساعت باید آن را تحت هر مرحله فشار قرار داد و سپس به مدت ۲۴ ساعت بدون بار، آزاد گذاشته شود. بررسی مشاهدات در طول اولین افزایش فشار می‌تواند برای تصحیح زمان مورد نیاز در افزایش‌های متوالی استفاده شود. تغییر فشار جک‌ها در طول هر مرحله از بارگذاری باید در حد ۳ درصد مقدار مورد نظر باشد.

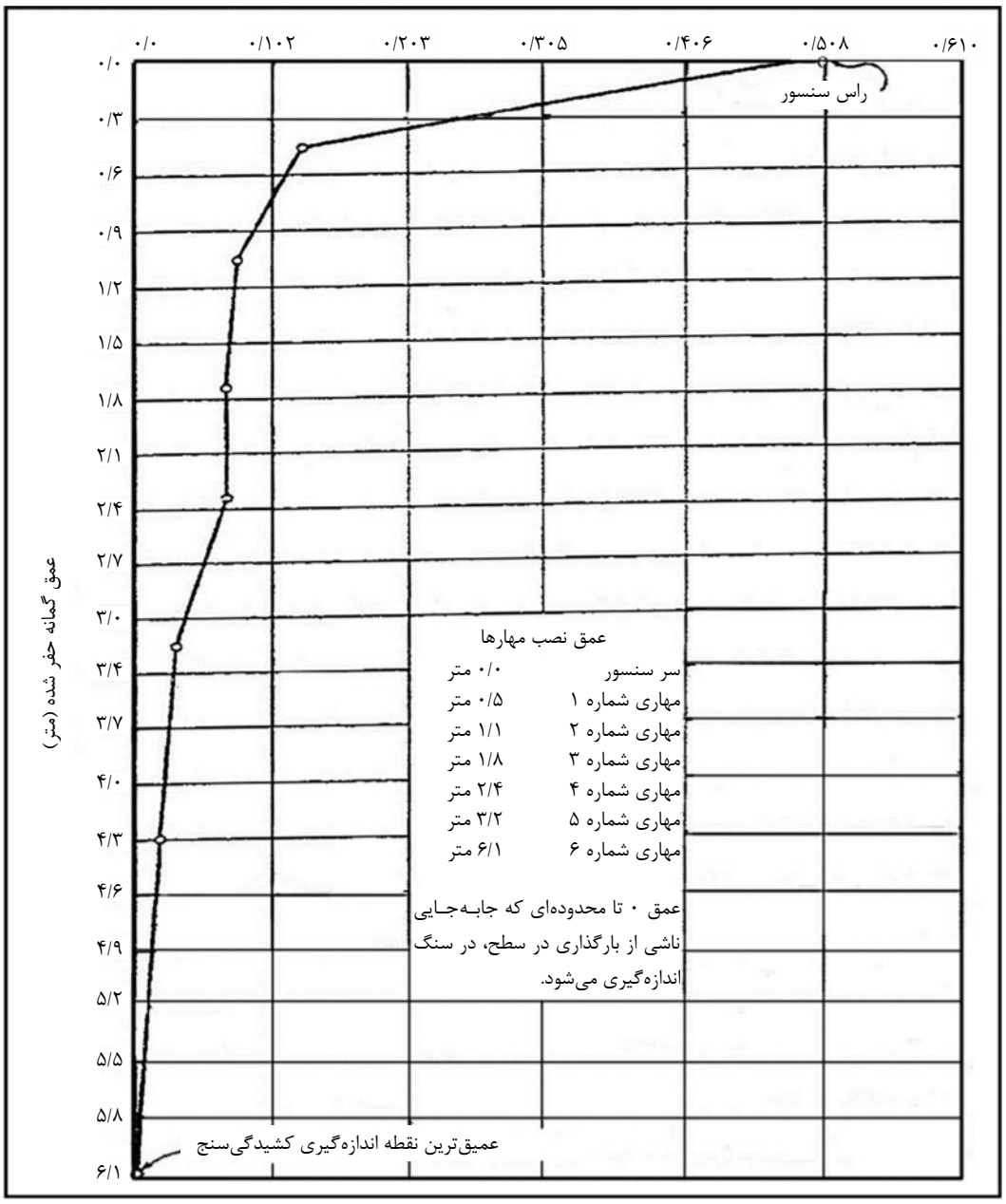
در شکل (۳-۴) نمونه‌ای از زمان‌بندی یک آزمایش معمولی نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- تغییر شکل سطح سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری



شکل ۳-۴- تغییر شکل سطحی سنگ برحسب زمان در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای



شکل ۳-۵- جابه‌جایی محوری برحسب عمق، نسبت به عمیق‌ترین نقطه درگیر، تحت فشار ۶/۹ مگاپاسکال

۳-۱-۵- محاسبات

با ا نجام این این آزمایش مدول تغییر شکل‌پذیری (E_d) توده‌سنگ در اعماق مختلف با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه می‌گردد:

- داده‌های به‌دست آمده در ضمن آزمایش برای رسم نمودارهای تغییر شکل بر حسب سه عامل زمان، فشار یا عمق استفاده می‌شود. این نمودارها در تحلیل خزش، برگشت‌پذیری و ویژگی‌های تثبیت شده دایمی توده سنگ به‌کار می‌روند. چند نمونه از این نمودارها در شکل‌های (۳-۳)، (۳-۴) و (۳-۵) نشان داده شده است،
- تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده در سیکل‌های مختلف بارگذاری برای محاسبه مدول تغییر شکل با استفاده از فرمول مناسب به‌کار می‌رود. برای ساده‌سازی می‌توان از رابطه مبتنی بر نظریه الاستیسیته برای تخمین رفتار توده سنگ در شرایط واقعی ساختگاه استفاده کرد،
- در شرایط فشار با توزیع یکنواخت در یک سطح دایره‌ای، جابه‌جایی نقاط زیر مرکز سطح بارگذاری از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W_z = \frac{2q(1-\nu^2)}{E}\left[(a^2+z^2)^{\frac{1}{2}} - z\right] - \frac{qz(1+\nu)}{E}\left[z(a^2+z^2)^{-\frac{1}{2}} - 1\right] \qquad (۳-۱)$$

که در آن:

W_z = جابه‌جایی در جهت اعمال فشار (میلی‌متر)،

Z = فاصله از سطح بارگذاری تا نقطه‌ای که در آن‌جا جابه‌جایی محاسبه می‌شود (میلی‌متر)،

q = فشار (مگاپاسکال)،

a = شعاع ناحیه بارگذاری،

E = مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)،

ν = نسبت پواسون.

در روی سطح سنگ، $z = 0$ بوده و معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$W_{z=0} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} qa \qquad (۳-۲)$$

- هنگامی‌که بار توسط جک تخت دایره‌ای که دارای یک سوراخ در مرکز آن است اعمال می‌شود تاثیر ناحیه بارگذاری نشده در مرکز باید کسر شود. با استفاده از پارامترهای:

a_2 = شعاع خارجی جک تخت (میلی‌متر)،

a_1 = شعاع داخلی جک تخت یا شعاع سوراخ (میلی‌متر)،

$$W_z = \frac{2q(1-\nu^2)}{E}\left[(a_2^2+z^2)^{\frac{1}{2}} - (a_2^2+z^2)^{\frac{1}{2}}\right] + \frac{z^2 q(1+\nu)}{E}\left[(a_1^2+z^2)^{-\frac{1}{2}} - (a_2^2+z^2)^{-\frac{1}{2}}\right] \qquad (۳-۳)$$

پس از جای‌گذاری مقادیر مناسب برای a_1، a_2، ν (نسبت پواسن) و z معادله ۳-۳ به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$W_z = \frac{q}{E}(K_z) \qquad (۳-۴)$$

اگر جابه‌جایی‌های W_{z1} و W_{z2} در نقاط z_1 و z_2 اندازه‌گیری شوند، مدول تغییر شکل ماده بین z_1 و z_2 را می‌توان با استفاده از رابطه (۳- ۵) محاسبه نمود:

$$E_d = q\left[\frac{K_{z1} - K_{z2}}{W_{z1} - W_{z2}}\right] \qquad (۵ -۳)$$

۳-۱-۶- گزارش نتایج

گزارش نتایج باید شامل موارد زیر باشد:

- توضیح کامل زمین‌شناسی محل آزمایش شامل پیمایش مغزه، جنس سنگ، شرایط ناپیوستگی‌ها در سطح و عمق، عکس‌های مغزه، عکس محل‌های آماده‌سازی شده برای آزمایش و توصیف عوارض ناشی از آتش‌کاری
- توضیح تجهیزات آزمایش شامل: عکس ابزار نصب شده، نمودار شماتیکی از تجهیزات، میزان دقت و حساسیت کلیه ابزار اعمال فشار و ابزار تغییر شکل و داده‌های واسنجی برای همه تجهیزات،
- ارایه جداول اطلاعات خام،
- رسم منحنی تغییر شکل برحسب فشار، همانند شکل (۳-۳). اطلاعات به‌دست آمده از این نمودار برای تعیین شکل منحنی تنش – کرنش، محاسبه مدول‌های مختلف و تعیین ویژگی‌های برگشت‌پذیری و الاستیسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد،
- رسم تغییر شکل برحسب زمان، همانند شکل (۳-۴). این منحنی برای مطالعه خصوصیات خزش سنگ به‌کار می‌رود. این منحنی در طول زمان انجام آزمایش باید برای تعیین زمان لازم برای سیکل‌های بارگذاری بعدی آماده شود،
- رسم منحنی‌های تغییرشکل برحسب عمق مبنا که در شکل (۳-۵) برای عمیق‌ترین نقطه گیرداری نشان داده شده است. این منحنی تغییر شکل برای تعیین نواحی آنومالی با مدول کم‌تر یا بیش‌تر از مقدار متوسط استفاده می‌شود. پس از تعیین این ناحیه، می‌توان آن‌ها را با مغزه حاصل از چال‌های ابزاربندی تطبیق داد. درصورتی‌که گیرداری در نقاط مناسب انجام شده باشد، مدول این مناطق با استفاده از معادله ۳-۱ محاسبه می‌شود،
- مدول محاسبه شده برای حل مسایل طراحی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. برای روشن کردن ارتباط بین فواصل اندازه‌گیری در عمق توده سنگ و دامنه تنش اعمالی برای هریک از مدول‌های به‌دست آمده باید دقت کافی به‌عمل آید.

۳-۱-۷- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌های که در این آزمون مطرح هستند، به شرح زیر می‌باشد:

- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای یکی از آزمایش‌های بر جای مکانیک سنگ است که برای تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری و الاستیک توده سنگ به‌کار می‌رود. در این آزمایش مدول تغییرشکل‌پذیری و الاستیک

توده سنگ با استفاده از میزان جابه‌جایی توده سنگ ناشی از اعمال بار عمود بر سطح و فرمول‌های مشخص محاسبه می‌شود. در این فرمول توده سنگ، ماده‌ای هموژن، از یک طرف نامتناهی، الاستیک و همسان‌گرد فرض شده است.

- محل انجام آزمایش معمولا در یک تونل اکتشافی است که از دیواره‌های تونل یا سقف و کف آن به‌عنوان صفحه تکیه‌گاه یا عکس‌العمل برای اعمال بار جک استفاده می‌شود. این بار در عمل می‌تواند به عنوان مثال بار وارده بر تکیه‌گاه‌ها ناشی از آبگیری سدبتنی قوسی باشد،
- منطقه مورد آزمایش باید از لحاظ زمین‌شناسی معرف توده سنگ باشد. دقت شود که تاثیر وجود عواملی مانند گسل، مناطق خرد شده، حفره‌ها و حفاری‌ها در نزدیکی محل آزمایش روی نتایج مورد بررسی قرار گیرد،
- کشیدگی‌سنج نصب شده در گمانه ابزاربندی باید به‌صورت نقطه‌ای با جداره گمانه درگیر شود و نباید آن را در تمام طول تزریق کرد،
- ابعاد صفحات بارگذاری به شرایط زمین‌شناسی محل، مقاطع گالری و فشار اعمالی بستگی دارد. کم‌ترین قطر معمول صفحات بارگذاری ۰/۵ متر و ابعاد گالری باید دست کم ۶ برابر قطر صفحه‌ی بارگذاری باشد،
- با توجه به اهمیت تاثیر ناهمسان‌گردی توده سنگ در پارامترهای ژئومکانیکی، در صورت ناهمسان‌گرد بودن توده سنگ، آزمایش باید در جهات مختلف مثلا عمود و یا موازی سطح لایه‌بندی انجام شود،

۳-۲- دستورالعمل اندازه‌گیری برجای تغییرشکل سنگ توسط آزمایش بارگذاری صفحه‌ای با صفحات صلب

۳-۲-۱- هدف

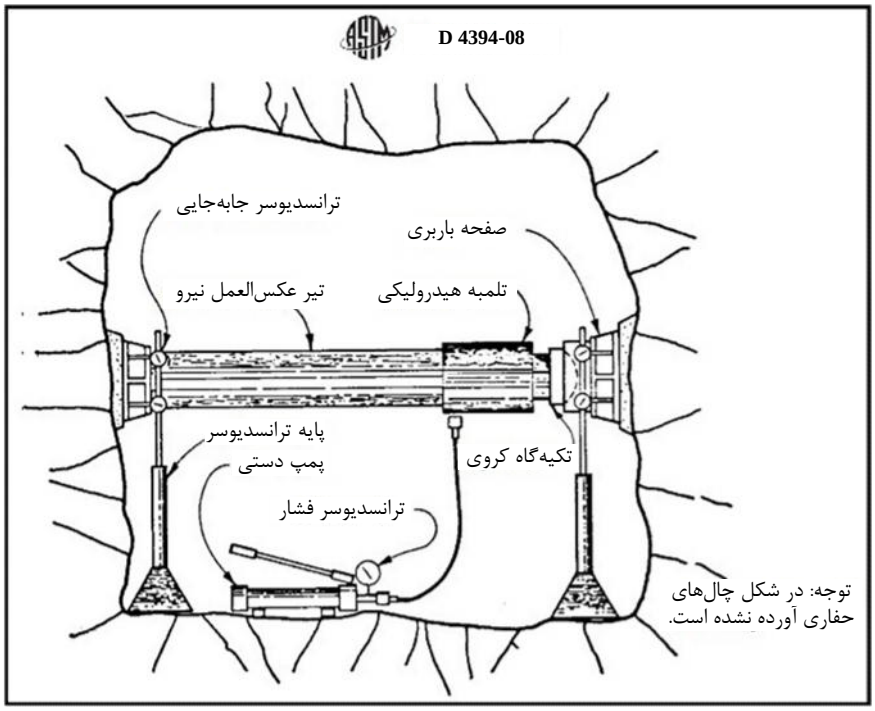
این روش برای تعیین مدول تغییرشکل پذیری برجای توده‌سنگ در تونل‌ها یا دیگر فضاهای زیرزمینی کوچک به کار می‌رود. مبانی انجام آزمایش و تئوری محاسبات بر مبنای استاندارد ASTM D4394-08 می‌باشد.

۳-۲-۲- اهمیت و موارد استفاده

مبانی اولیه این آزمون شبیه به آزمون بارگذاری صفحه‌ای انعطاف‌پذیر است. با این تفاوت که در این روش بار توسط جک‌های هیدرولیکی تولید شده و به واسطه صفحات و ستون‌های صلبی که بین آن‌ها قرار گرفته به دیواره‌های سنگی تونل یا گالری وارد می‌شود. با وجود وزن زیاد و سختی مراحل آماده‌سازی محل انجام آزمایش، آزمون بارگذاری صفحه‌ای صلب بارها در مهندسی سنگ استفاده شده است. گستره استفاده از این آزمایش به سال ۱۹۵۵ برمی‌گردد و به طور خلاصه عبارت است از به کار بردن سیکل‌های بارگذاری و باربرداری بوسیله جک‌های هیدرولیکی و سپس بررسی پاسخ

سنگ در اثر این بارگذاری و باربرداری‌ها. با انجام این عملیات بارگذاری و باربرداری، اطلاعات لازم برای محاسبه مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ بدست می‌آید.

در شکل ۳-۶ شمای کلی آزمایش و نحوه قرارگیری تجهیزات نمایان است.



شکل ۳-۶- نحوه قرارگیری تجهیزات در آزمون بارگذاری صفحه‌ای صلب

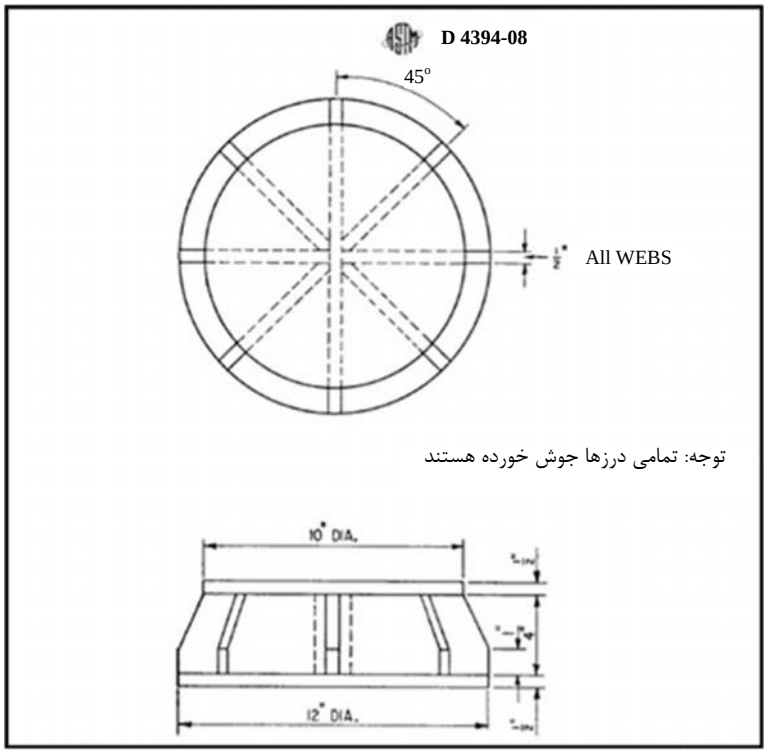
۳-۲-۳- تجهیزات

ویژگی‌های تجهیزات مورد نیاز این آزمایش، به شرح زیر می‌باشند:

- دستگاه بارگذاری: این دستگاه باید قادر باشد فشار یکنواختی را به طور همزمان به دو وجه متقابل تونل یا گالری اعمال نماید. در بارگذاری با صفحات صلب می‌توان از جک‌های هیدرولیک که ستون صلبی بین آن قرار گرفته، استفاده نمود و با توجه به مقاومت سنگ، جک‌ها باید قادر باشند فشار مورد نیاز را تولید کرده و در طول آزمایش با دقت ۳ درصد ثابت نگه دارند. سایر تجهیزات لازم عبارتند از ستون‌های فولادی برای انتقال فشار، پمپ هیدرولیکی، شیرهای مربوط، بست، گیج و شیلنگ با ظرفیت کافی،
- بارسنج‌ها و ترنسدیوسرهای فشار: برای اندازه‌گیری فشار در جک‌ها از گیج فشار هیدرولیکی، ترانسدیوسر فشار یا بارسنج استفاده می‌گردد. دقت گیج یا ترانسدیوسر فشار، با در نظر گرفتن خطای دستگاه‌های قرائت کننده، دست کم ۰/۱۴ مگاپاسکال و حساسیت آن ۰/۰۶۹ و مگاپاسکال می‌باشد. کم‌ترین دقت بارسنج با درنظر گرفتن خطای دستگاه‌های قرائت کننده معادل ۴/۲ کیلو نیوتون و کم‌ترین حساسیت آن ۲/۲۲ کیلو نیوتون توصیه می‌گردد،

- تجهیزات مربوط به آماده‌سازی سطوح بارگذاری: به منظور آماده‌سازی سطح مورد آزمایش، مجموعه‌ای از وسایل حفاری مانند دستگاه حفاری، پتک و چکش‌های مخصوص خرد کردن زواید سنگی مورد نیاز می‌باشد. انجام عملیات آتشکاری در سطح آزمایش مجاز نمی‌باشد. حفر چال‌های نصب وسایل اندازه‌گیری باید با مغزه گیری از عمق دست کم ۱۰ متر همراه باشد،
- تجهیزات بازبینی چال: در صورتی که امکان تعیین جهت صحیح مغزه‌ها وجود نداشته باشد و یا مغزه بدست آمده سست یا نامناسب باشد، می‌توان از هر گونه وسیله بازبینی برای بررسی چال و توجیه عوارض زمین شناسی موجود در مغزه‌ها استفاده نمود،
- وسایل اندازه‌گیری تغییر مکان: این وسایل شامل یک کشیدگی سنج گمانه‌ای چند نقطه‌ای[1] و یک قطر سنج تونل[2] برای هر چال ابزاربندی می‌باشد. معمولا برای اندازه‌گیری سطحی از گیج‌های عقربه‌ای یا LVDT استفاده می‌شود. دقت و حساسیت این وسایل باید به ترتیب ۰/۰۰۲۵ میلی‌متر و ۰/۰۰۱۳ میلی‌متر باشد. در حالتی که مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ بالای ۳۵ گیگاپاسکال است، خطای بالای ۰/۰۱ میلی‌متر می‌تواند نتایج آزمایش را از درجه اعتبار ساقط نماید،
- صفحات باربری (بارگذاری با صفحات صلب): این صفحات باید تا حد امکان صلب باشند. نمونه‌ای از صفحات باربری مناسب برای این روش در شکل (۳-۷) نشان داده شده‌است. صلبیت این صفحات، جدا از شکل و جنس آن‌ها، باید به اندازه‌ای باشد که در بیش‌ترین بار اعمال شده تغییرشکل محسوسی از خود نشان ندهد. ابعاد صفحه باربری بستگی به شرایط زمین شناسی محل، فشار بیشینه و ابعاد تونل یا گالری دارد. معمولا قطری معادل ۰/۵ تا ۱ متر برای این صفحات پیشنهاد می‌گردد. هنگام آزمایش کردن توده‌های سخت در صورتی که صفحات باربری سختی لازم را نداشته باشند، توزیع تنش پیچیده‌ای در صفحه بوجود می‌آید. پس راه‌حل مناسب در این شرایط استفاده از صفحات فولادی با ضخامت بیش‌تر می‌باشد.

1- MPBX
2- Tunnel Diameter Gauge



شکل ۳-۷- صفحات بارگذاری صلب با قطر ۱۲ اینچ

۳-۲-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این روش آزمایش اجرا می‌شود:

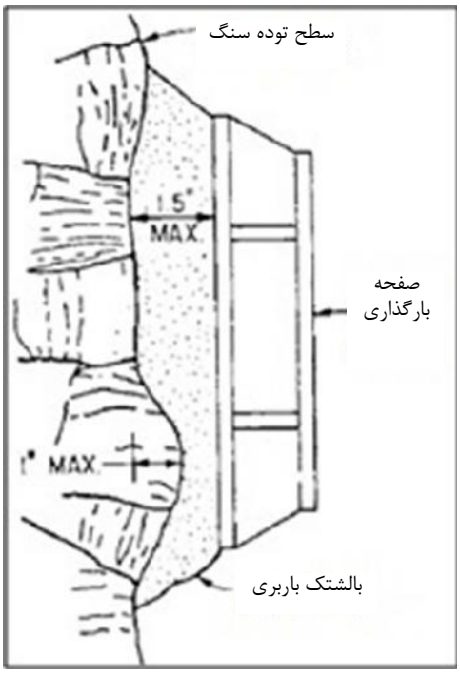
۳-۲-۴-۱- آماده‌سازی محل انجام آزمایش

سطح منطقه انتخاب شده برای انجام آزمایش باید با دقت و با کم‌ترین آسیب‌دیدگی آماده‌سازی گردد. برای این منظور می‌توان از وسایل حفاری و یا پتک استفاده نمود. ابعاد سطح آماده‌سازی شده باید طوری باشد که دست کم به اندازه نصف قطر صفحه یا جک از لبه‌های آن گسترش داشته باشد. لازم است قطر منطقه آماده‌سازی شده ۱/۵ تا ۲ برابر قطر بالشتک باربری باشد. قسمت‌های سست و شکسته شده سطح سنگ توسط چکش برداشته می‌شود. شکستگی‌های عمیق را می‌توان با توجه به صدای بم و خفه ناشی از ضربه چکش به سطح سنگ تشخیص داد. پرداخت نهایی سطح سنگ باید به گونه‌ای انجام شود که اختلاف بین پستی و بلندی‌های آن از ۲۵ میلی‌متر بیش‌تر نباشد. پس از تکمیل عملیات آماده‌سازی، سطح سنگ به وسیله پمپ باد تمیز می‌شود تا ذرات سست و گرد و غبار آن کاملا برطرف گردد.

۳-۲-۴-۲- ساخت بالشتک‌های باربری

در حالتی که صفحات بارگذاری در محل خود قرار گرفته است، بالشتک‌ها با ریختن سیمان، بتن و یا هر ماده مناسب دیگری بین سطح سنگ و صفحه ایجاد می‌شوند. این روش در مورد آزمایش‌هایی که در جهات نزدیک به قائم انجام

می‌گیرند قابل اجرا نمی‌باشد. لبه‌های بالشتک توسط قالب‌های مناسب قالب‌بندی می‌گردد تا بالشتک شکل مورد نظر را به خود بگیرد. در چنین شرایطی صفحه پایینی، پیش از عمل آمدن سیمان مستقیما روی محل بالشتک قرار می‌گیرد. در کلیه حالات باید مراقب بود که هیچ گونه حفره یا حباب هوایی در بالشتک باقی نماند. ضخامت بالشتک نباید در هیچ قسمتی از ۰/۱۲ قطر جک تخت بیش‌تر شود. مشخصات ابعادی بالشتک در شکل (۳-۸) دیده می‌شود. بالشتک‌های باربری در روش بارگذاری با صفحات صلب باید مدول الاستیسیته دست کم ۳۰ گیگا پاسکال داشته و قادر باشند با سطح سنگ و صفحات باربری تطابق نمایند. استفاده از سیمان زودگیر با مقاومت بالا یا گوگرد مذاب برای ساخت بالشتک‌ها توصیه می‌گردد.



شکل ۳-۸- ابعاد مجاز سطح سنگ و بالشتک بتنی

۳-۲-۴-۳- آماده‌سازی نقاط اندازه‌گیری سطحی

شش نقطه اندازه‌گیری سطحی با فواصل مساوی بروی سطح سنگ و در حواشی بالشتک‌ها قرار می‌گیرند. ترانسدیوسرها طوری استقرار می‌یابند که تنها تغییر مکان سنگ را اندازه‌گیری کنند. معمولا پایه ثابت ترانسدیوسرها در خارج از محدوده تاثیر بارگذاری قرار داده می‌شوند. به هیچ عنوان نباید ترانسدیوسرها را روی تجهیزات بارگذاری نصب نمود. وسیله اندازه‌گیری قطر گالری نیز بین سطوح بارگذاری نصب می‌شود.

۳-۲-۴-۴- آماده‌سازی نقاط اندازه‌گیری عمقی

نقاط اندازه‌گیری عمقی باید در امتداد خطی، با حداکثر ۵ درجه انحراف نسبت به محور بارگذاری انتخاب شوند. فاصله این نقاط تا خط یاد شده نباید از ۱۰ درصد عرض بالشتک باربری تجاوز کند. چال‌های مربوط به نصب تجهیزات

اندازه‌گیری باید تا حد امکان کوچک باشد. این چال‌ها توسط دستگاه حفاری دورانی الماسه در هر دو سطح بارگذاری متقابل حفاری می‌گردند. حفاری باید همراه با مغزه‌گیری بوده و برای هر چال لاگ آن نیز تهیه شود. با بررسی مغزه‌های بدست آمده از حفاری و یا با استفاده از تجهیزات بازبینی چال مثل چال‌نگار[1]، می‌توان نقاط مناسب برای اندازه‌گیری تغییر مکان را انتخاب نمود. این نقاط باید در یک طرف عوارضی مثل درزه‌ها، لایه‌های نازک، رگه‌ها یا عوارض مشابه قرار گیرند. لازم است در عمقی برابر با قطر جک، دست کم دو نقطه اندازه‌گیری قرار گرفته باشد. عمیق ترین نقطه اندازه‌گیری باید دست کم شش برابر قطر صفحه بارگذاری از سطح بارگذاری فاصله داشته باشد تا خارج از منطقه تاثیر آزمایش قرار گیرد و بتوان از آن به عنوان نقطه مرجع برای دیگر اندازه‌گیری‌ها استفاده نمود.

دیگر نقاط اندازه‌گیری باید با توجه به شرایط زمین شناسی، در فاصله بین سطح سنگ و عمقی معادل سه برابر قطر صفحه قرار گیرند. یادآوری می‌گردد که بهترین وسیله برای اندازه‌گیری‌های عمقی، استفاده از کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای چند نقطه‌ای است که روش نصب و استفاده از آن‌ها در استاندارد ASTM D 4403 به طور کامل توضیح داده شده‌است.

۳-۲-۴-۵- کنترل‌های پیش از آزمایش

پس از نصب وسایل اندازه‌گیری در چال‌ها، تمامی قسمت‌های آن به طرق الکتریکی یا مکانیکی کنترل شده و از کارایی آن‌ها اطمینان حاصل می‌گردد. این کنترل پس از نصب وسایل بارگذاری و ستون‌های مهار کننده[2] دوباره تکرار می‌گردد. همچنین بعد از ساخت بالشتک‌ها و پیش از افزایش بار، لازم است که کلیه اجزای مکانیکی، هیدرولیکی و الکتریکی سامانه کنترل گردد.

۳-۲-۴-۶- روش انجام آزمایش

آزمایش به شرح زیر انجام می‌شود:

الف- بعد از نصب کلیه اجزای ابزاربندی در گمانه‌های حفر شده، این ابزار باید از لحاظ عملکرد الکترونیکی و مکانیکی کنترل شوند. همچنین پس از نصب اجزای بارگذاری، عملکرد آن‌ها نیز باید کنترل گردد. در نهایت همه وسایل مکانیکی، هیدرولیکی و الکترونیکی پس از بتن‌ریزی، نصب کامل و پیش از اعمال اولین افزایش بار کنترل شوند،

ب- آزمایش‌ها باید به‌طور پیوسته و شبانه‌روزی و براساس مقادیر بار در نظر گرفته شده و افزایش منظم با ملاحظات خاص طراحی در محل انجام شود،

1- Borescope
2- Restraint Columns

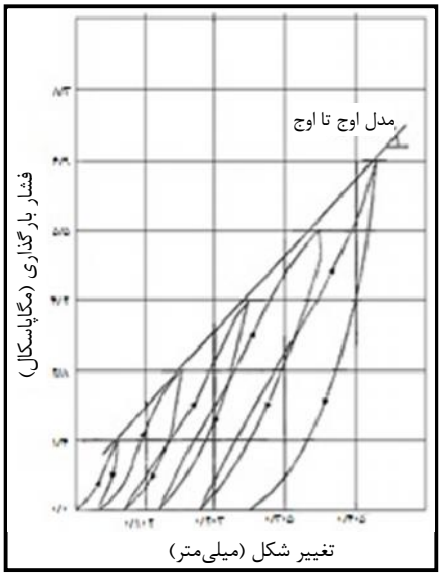
ج- برای به‌دست آوردن داده‌های مطلوب، لازم است در هنگام انجام آزمایش، تغییر شکل سنگ توسط ابزار خودکار به‌طور پیوسته و یا با فواصل زمانی مناسب ثبت شود. درصورتی‌که از سامانه ثبت ناپیوسته استفاده می‌شود، دست کم ۴ قرائت در هنگام اولین ساعت بارگذاری یا باربرداری باید انجام شود،

د- بیشینه فشار آزمایش، تعداد سیکل‌ها تا رسیدن به بیش‌ترین فشار و تعداد دفعات آزمایش فشار در هر سیکل بر حسب شرایط آزمایش و اطلاعات مورد نظر تعیین خواهد شد. معمولا بیشینه فشار ۱/۲ تا ۱/۵ برابر مقدار بار وارده پیش‌بینی شده از سوی سازه کافی به‌نظر می‌رسد. برای انجام آزمایش، پنج سیکل بارگذاری و باربرداری انجام می‌شود که در هر باربرداری فشار تا اندازه فشار نصب کاهش یافته و دوباره افزایش می‌یابد. فشار بیشینه در هر سیکل طی پنج پله حاصل خواهد شد.

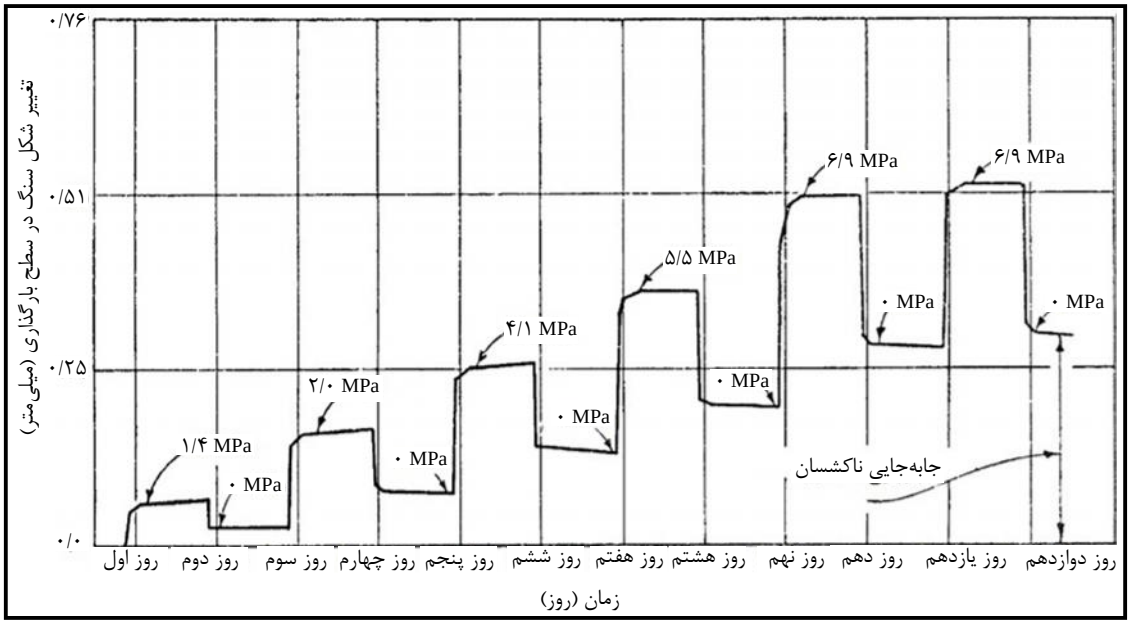
در شکل (۳-۹) نمونه یک سیکل بارگذاری نشان داده شده است،

هـ- مدت زمان هر افزایش با توجه به خصوصیات خزش توده سنگ مشخص می‌شود. برای درک درست از رفتار توده سنگ دست کم ۴۸ ساعت باید آن را تحت هر مرحله فشار قرار داد و سپس به مدت ۲۴ ساعت بدون بار، آزاد گذاشته شود. بررسی مشاهدات در طول اولین افزایش فشار می‌تواند برای تصحیح زمان مورد نیاز در افزایش‌های متوالی استفاده شود. تغییر فشار جک‌ها در طول هر مرحله از بارگذاری باید در حد ۳ درصد مقدار مورد نظر باشد.

در شکل (۳-۱۰) نمونه‌ای از زمان‌بندی یک آزمایش معمولی نشان داده شده است.



شکل ۳-۹- تغییر شکل سطح سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری



شکل ۳-۱۰- تغییر شکل سطحی سنگ برحسب زمان در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای صلب

۳-۲-۵- محاسبات

چنان چه بیان شد روابط موجود برای آزمون‌های بارگذاری صفحه‌ای از تئوری الاستیسیته بدست آمده‌اند. اما نکته مهم، تعیین شرایط مرزی مناسب پیش از بکارگیری روابط است. باید توجه کرد که صفحات انعطاف‌پذیر (جک تخت) یک مرز تنش یکسان را در فصل مشترک صفحه و سنگ بوجود می‌آورند در حالی که صفحات صلب یک مرز جابه‌جایی یکسان را ایجاد می‌کنند. در نتیجه روابط بدست آمده برای محاسبه مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ برای این دو روش کاملاً متفاوت هستند. استفاده از صفحات انعطاف‌پذیر در اجرای این آزمون بسیار متداول است. اما در صورتی که استحکام و قطر صفحات به درستی انتخاب شوند می‌توان از صفحات صلب به خوبی استفاده کرد. در حقیقت زمانی که توده‌سنگ ضعیف است استفاده از صفحات صلب بیش‌تر توصیه می‌شود.

پایه و اساس روابط استفاده شده در محاسبات این آزمایش، بر حل الاستیک بارگذاری گسترده یکنواخت روی سطح دایروی یک محیط الاستیک، همسانگرد و نیمه بیکران استوار است که در استاندارد ASTM D4394-08 ارایه شده است. مدول تغییرشکل پذیری با توجه به تغییرشکل اندازه‌گیری شده در مرکز سطح بارگذاری دایروی، از رابطه (۳-۶) محاسبه می‌گردد:

$$E = \frac{(1-\mu^2).P}{2W_a.R} \qquad (۳-۶)$$

که در آن:

μ: عدد پواسون سنگ

P: بار کل روی صفحه صلب (کیلو نیوتون)

W_a: تغییرشکل متوسط صفحه صلب (میلی‌متر)

R: شعاع صفحه صلب (میلی‌متر) می‌باشند.

اگر جابه‌جایی‌ها در درون توده‌سنگ برداشت شوند، محاسبه مدول E برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها که در مرکز صفحه دایروی و درون توده‌سنگ جایگذاری شده‌اند، طبق رابطه زیر انجام می‌شود:

$$E = \frac{(1-\mu).P}{2\pi W_z.R}\left[(2-2\pi)\arcsin(\frac{R}{(R^2+Z^2)^{0.5}}) + \frac{RZ}{R^2+Z^2}\right] \quad (۷-۳)$$

که در آن:

Z: عمق جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در پشت صفحه بارگذاری (میلی‌متر)

W_z: تغییرشکل در عمق Z (میلی‌متر) می‌باشند.

بایسته است که برای هر سنگ میانگین، دامنه، انحراف معیار و سطح اطمینان ۹۵ درصد میانگین کلیه نقاط اندازه‌گیری محاسبه گردد.

۳-۲-۶- گزارش نتایج

گزارش نتایج باید شامل موارد زیر باشد:

- توضیح کامل زمین‌شناسی محل آزمایش شامل پیمایش مغزه، جنس سنگ، شرایط ناپیوستگی‌ها در سطح و عمق، عکس‌های مغزه، عکس محل‌های آماده‌سازی شده برای آزمایش و توصیف عوارض ناشی از آتش‌کاری،
- توضیح تجهیزات آزمایش شامل عکس ابزار نصب شده، نمودار شماتیکی از تجهیزات، میزان دقت و حساسیت کلیه ابزار اعمال فشار و ابزار تغییر شکل و داده‌های واسنجی برای همه تجهیزات،
- ارایه جداول اطلاعات خام،
- رسم منحنی تغییر شکل برحسب فشار (همانند شکل ۳-۳) و اطلاعات به‌دست آمده از این نمودار برای تعیین شکل منحنی تنش– کرنش، محاسبه مدول‌های مختلف و تعیین ویژگی‌های کشسان سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد،
- رسم منحنی تغییر شکل برحسب زمان، (همانند شکل ۳-۴) برای مطالعه خصوصیات خزش سنگ به‌کار می‌رود. این منحنی در طول زمان انجام آزمایش باید برای تعیین زمان لازم برای سیکل‌های بارگذاری بعدی آماده شود،
- رسم منحنی‌های تغییرشکل برحسب عمق مبنا که در شکل ۳- ۵ برای عمیق‌ترین نقطه گیرداری نشان داده شده است. این منحنی برای تعیین نواحی آنومالی با مدول کم‌تر یا بیش‌تر از مقدار متوسط استفاده می‌شود. پس از تعیین این ناحیه، می‌توان آن‌ها را با مغزه حاصل از چال‌های ابزاربندی تطبیق داد. درصورتی‌که گیرداری در نقاط مناسب انجام شده باشد، مدول این مناطق با استفاده از معادله ۳-۱ محاسبه می‌شود،

- مدول محاسبه شده برای حل مسایل طراحی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. برای روشن کردن ارتباط بین فواصل اندازه‌گیری در عمق توده سنگ و دامنه تنش اعمالی برای هریک از مدول‌های به‌دست آمده باید دقت کافی به‌عمل آید.

۳-۲-۷- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌های که در این آزمون مطرح هستند، به شرح زیر می‌باشد:

- منطقه مورد نظر باید از نظر زمین شناسی معرف توده‌سنگ باشد. اما پیشنهاد می‌شود برای تعیین عوارضی چون گسل‌ها، مناطق خرد شده، کاواک‌ها، اینکلوزیون‌ها و ...، آزمایش‌های جداگانه‌ای روی بخش‌هایی از سنگ که دارای چنین عوارضی هستند انجام پذیرد. برنامه آزمایش باید طوری طراحی شود که تاثیر عوارض زمین شناسی به روشنی قابل تشخیص باشد،
- اثر ناهمسانگردی را می‌توان با انجام آزمایش در جهات مختلف بررسی نمود. به عنوان مثال در سنگ‌های رسوبی می‌توان آزمایش را در جهات عمود و موازی سطوح لایه بندی انجام داد،
- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای باید در محلی انجام گیرد که تحت تاثیر تغییرات ناشی از حفاری قرار نگرفته باشد. عمق منطقه‌ای از سنگ که در اثر بارگذاری تغییرشکل می‌یابد، به قطر صفحه بارگذاری و مقدار بار اعمال شده بستگی دارد. صفحات و بارهای بزرگ، امکان اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها را در فواصل دورتر از سطح توده‌سنگ فراهم می‌سازد. بنابراین اگر هدف اولیه آزمایش اندازه‌گیری تغییرشکل در منطقه دست خورده سنگ است، استفاده از صفحات با قطر کم کفایت می‌کند. اما چنان چه تغییرشکل در بخش دست نخورده سنگ مد نظر می‌باشد، باید از صفحات با قطر زیاد و بارهای بیش‌تر استفاده نمود. اگرچه در عمل معمولا ابعاد گالری اجازه استفاده از چنین صفحات بزرگی را نمی‌دهد. ابعاد صفحه بارگذاری بستگی به شرایط زمین شناسی محل، فشار اعمالی و ابعاد گالری اکتشافی دارد،
- ممکن است محدودیت زمانی باعث شود که زمان‌های ده دقیقه‌ای مورد نیاز برای قرائت تغییر مکان‌ها تغییر کند. اما برای قرائت تغییر مکان در فشار بیشینه آزمایش دست کم به ده دقیقه زمان نیاز می‌باشد،
- با این روش می‌توان تغییر مکان‌های آنی و تابع زمان (خزشی) را نیز اندازه‌گیری نمود.

۳-۳- دستورالعمل تعیین مدول‌های تغییرشکل‌پذیری سنگ با استفاده از دیلاتومتر (اتساع‌سنج) انعطاف‌پذیر و اندازه‌گیری جابه‌جایی شعاعی (روش LNEC)

۳-۳-۱- هدف

با انجام این آزمایش که یک لوله منبسط شونده (دیلاتومتر) برای اعمال فشار بر روی دیوارهای گمانه استفاده شده و انبساط (اتساع) به‌وجود آمده در گمانه توسط یک جابه‌جایی‌سنج در گمانه اندازه‌گیری می‌شود، می‌توان مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ در محل انجام آزمایش را از روابط بین فشار و اتساع محاسبه نمود. همچنین با انجام این آزمایش می‌توان مدول تغییرشکل‌پذیری در صفحه‌ای عمود بر گمانه را نیز به‌دست آورد. این دستورالعمل براساس روش پیشنهادی ISRM [2] تهیه شده است.

۳-۳-۲- اهمیت و موارد استفاده

این روش بر مبنای روش دیلاتومتر LNEC[1] که در کشور پرتغال ابداع شده، استوار است. دیلاتومترهای مختلف از انواع مشابه نیز ممکن است نیازمندی‌ها و هدف از این آزمایش را برآورد کند. نتایج آزمایش‌های دیلاتومتری در بررسی‌های ژئوتکنیکی پی‌ها، سدها، تونل‌ها، مغارها و ... استفاده می‌شود. این آزمایش در سنگ‌های ضعیف رسی یا بسیار درزه‌دار که امکان مغزه‌گیری برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی در آن‌ها وجود ندارد با تدابیر خاص قابل اجرا می‌باشد.

محدوده گسترش تنش یک دیلاتومتر معمولا در مقایسه با محدوده تنش ایجاد شده توسط دیگر روش‌ها مانند بارگذاری صفحه‌ای یا آزمایش جک شعاعی کوچک‌تر است. ولی نتایج آن در مقایسه با نتایج یک نمونه آزمایشگاهی بدون درزه به واقعیت نزدیک‌تر است. مقادیر تغییر شکل اندازه‌گیری شده در آزمون دیلاتومتری ممکن است با توجه به مقیاس و درزه‌داری تصحیح شود.

اندازه‌گیری تغییر شکل قطر گمانه در آزمون دیلاتومتری به دو روش مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌گیرد. در روش غیرمستقیم اساس بر اندازه‌گیری تغییر حجم بوده و در سنگ‌های ضعیف و خاک‌ها استفاده می‌شود.

در روش مستقیم که کاربرد وسیع‌تری نسبت به روش غیرمستقیم دارد اندازه‌گیری جابه‌جایی با استفاده از ابزار سنجش موسوم به LVDT[2] انجام می‌شود. این روش همچنین امکان ارزیابی ناهمسان‌گردی در توده سنگ را نیز دارا می‌باشد.

1- National Civil Engineering Laboratory (Laboratorio Nacional Engenharia Civil)
2- Linear Variable Tranfurmer Diferential

۳-۳-۳- تجهیزات

تجهیزات مورد نیاز این آزمایش به شرح زیر می‌باشند:

۳-۳-۳-۱- تجهیزات حفاری و آماده‌سازی گمانه‌ی آزمایش [۱]

موارد زیر را شامل می‌شود:

- دستگاه حفاری برای حفر گمانه آزمایش با قطر و عمق مورد نظرکه معمولا از دستگاه حفاری دورانی با سرمته الماسه برای ایجاد دیواره صاف در گمانه استفاده می‌شود،
- تجهیزات جدارگذاری گمانه (کیسینگ) در صورت ضرورت برای نگهداری دیواره آن در خارج محدوده آزمایش،
- تجهیزات و مصالح مورد نیاز برای تزریق، پر کردن و حفاری مجدد گمانه در محدوده آزمایش جهت حفاظت دیواره،
- قطرسنج برای کنترل تمیزی و یکنواختی قطر گمانه به‌منظور قرار دادن دیلاتومتر (به‌عنوان مثال استوانه‌ای با قطر معادل با قطر دیلاتومتر).

۳-۳-۳-۲- تجهیزات واسنجی

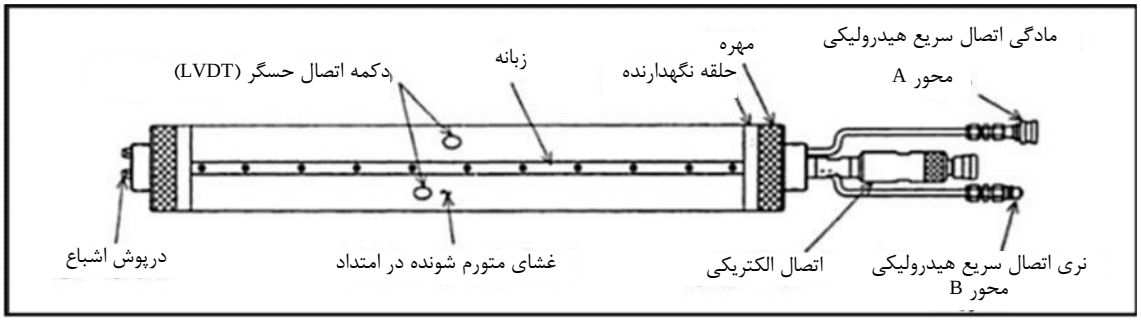
موارد زیر را در بر می‌گیرند:

- یک یا چند استوانه واسنجی با ویژگی‌های الاستیک مشخص و قطر داخلی برابر با قطر گمانه‌ی آزمایش و طولی مشابه طول مفید دیلاتومتر،
- میکرومتر برای اندازه‌گیری قطر خارجی دیلاتومتر، با دقت ۰/۰۲ ± میلی‌متر یا بیش‌تر.

۳-۳-۳-۳- پروب دیلاتومتر

پروب دیلاتومتر از دو بخش تشکیل شده است:

- پروب دیلاتومتر با غشای انعطاف‌پذیر مقاوم که دارای پوسته مستحکمی بوده و روی یک هسته نصب می‌شود، به‌گونه‌ای که پوسته می‌تواند متورم شده و بر روی دیواره گمانه فشار وارد بیاورد. این پوسته به حد کافی مقاوم است و زمانی که به داخل گمانه منتقل شده و یا از آن خارج می‌شود آسیب نمی‌بیند (شکل ۳-۱۱). از طرف دیگر این غشا باید انعطاف‌پذیر باشد تا بتواند دست کم ۹۰ درصد فشار هیدرولیکی به‌کار رفته را منتقل نماید. نوعی از پروب دیلاتومتر دارای قطر ۷۶ تا ۱۱۶ میلی‌متر و طول موثر ۵ تا ۱۵ برابر قطر می‌باشد.



شکل ۳-۱۱- دیلاتومتر نوع LNEC

- وسیله نصب: وسیله‌ای برای نصب، بالا و پایین بردن پروب در گمانه و اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌داری آن با دقت ۵ ± سانتی‌متر و ۵ ± درجه. برای این منظور می‌توان از لوله های حفاری، لوله‌های مخصوص و یا کابل استفاده کرد.

۳-۳-۳-۴- سامانه هیدرولیکی برای اعمال فشار به پروب

سامانه هیدرولیکی برای اعمال فشار به پروب، باید دارای خصوصیات زیر باشد:

- پمپ و لوله‌های ارتباطی به‌طوری‌که قادر به پر کردن، منبسط کردن و خالی کردن پروب دیلاتومتر باشد و بتواند فشار را در محدوده مورد نظر اعمال کرده و ثابت نگهدارد.
- پمپ معمولا از نوع الکتریکی بوده و با یک کنترل کننده فشار همراه می‌باشد که این کنترل کننده فشار، بار اعمالی را حفظ کرده یا نرخ بارگذاری را ثابت نگه می‌دارد.
- جایگزین پمپ یاد شده می‌تواند استفاده از کپسول‌های هوای فشرده با فشاری حدود ۲ برابر فشار نهایی باشد.
- انجام آزمایش در یک گمانه بزرگ با استفاده از یک پروب با قطر بزرگ ممکن است نیازمند استفاده از دو پمپ یا دست کم یک پمپ دو سرعته، یکی برای جریان پمپاژ سامانه اعمال فشار اولیه و دیگری برای تنظیم فشار باشد.

۳-۳-۳-۵- سامانه‌های اندازه‌گیری

سامانه‌های اندازه‌گیری باید ویژگی‌های زیر را داشته باشند:

- یک یا چند سیستم اندازه‌گیری جابه‌جایی که مرکب از یک واحد قرائت به همراه چند حسگر با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر باشد. برای تعیین قطر چال حفاری با دقت دست کم ۰/۰۲ ± میلی‌متر. برای مثال، سه جابه‌جایی‌سنج الکتریکی از نوع LVDT که ممکن است در امتداد قطر با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به‌هم نصب شود تا اندازه‌گیری را انجام دهند. جابه‌جایی‌سنج‌ها توسط کابل‌های الکتریکی به واحد قرائت موجود بر روی سطح زمین متصل می‌شوند.

- یک سیستم اندازه‌گیری فشار مانند فشارسنج Bourdon یا یک منتقل کننده الکتریکی فشار با محدوده مورد نیاز و حساسیت سنجش بیش‌تر از ۲ $\pm$ درصد دامنه یا بازه فشاری که در هر آزمایش به‌کار می‌رود.

۳-۳-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

۳-۳-۴-۱- انتخاب نقاط آزمایش

نقاط آزمایش با توجه به موارد زیر تعیین می‌شوند:

- موقعیت گمانه‌های حفاری و اعماق آن‌ها با در نظر گرفتن تغییرات پیش‌بینی شده کیفیت سنگ، عمق هوازدگی و نوع محاسباتی که روی نتایج انجام خواهد شد، تعیین می‌شود.
- در هر گمانه، آزمایش‌ها ممکن است در فواصل یکسان یا در نقاط مشخصی از تشکیلات زمین‌شناسی یا لایه‌های انتخاب شده قبلی انجام شود. برای طراحی مناسب معمولا نمودار پیوسته‌ای از تغییر جنس باید در طول چال آزمایش تهیه شود. برای مثال، فاصله آزمایش ۱، ۲ و ۵ متر ممکن است بسته به طول گمانه آزمایشی و وضوح مورد نیاز مشخص شود.

۳-۳-۴-۲- حفاری و آماده‌سازی

در حفاری و آماده‌سازی گمانه‌های آزمایش موارد زیر باید رعایت گردند:

- گمانه‌های آزمایش باید با مراقبت و حداکثر دقت حفر شوند تا افزون بر حفظ پایداری دیواره با قطر ثابت، دارای کم‌ترین انحراف باشد. در ضمن، باید به‌خاطر داشت که خرده‌های سنگی بین دیلاتومتر و دیواره چال ممکن است سبب گیر کردن دایمی و یا آسیب دیدن آن شود،
- قطر گمانه ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر بزرگ‌تر از قطر پروب در حالت منقبض شده است. این رقم بر حسب عمق گمانه تغییر می‌کند ولی نباید از ۵ میلی‌متر بیش‌تر باشد،
- بررسی گمانه با یک دوربین تلویزیونی برای اجتناب از صدمه دیدن پوسته انعطاف‌پذیر (پروب) توسط شکاف یا حفره‌های ایجاد شده توصیه می‌شود. زمانی‌که چال نیاز به نگهداری دارد، این کار توسط نصب لوله محافظ جدار از سر گمانه تا بالاترین بخش آزمایش انجام شود. این کار را می‌توان با پر کردن و حفاری مجدد محدوده خرد شده انجام داد،
- مغزه‌های حفاری به‌طور کامل پیمایش شده و میزان بازیابی مغزه، میزان ترک خوردگی، مشخصات سنگ، هوازدگی و خصوصیات ساختمانی مانند شیستوزیته، تورق، لایه‌بندی و درزه‌ها ثبت می‌شود. در صورت عدم حضور ناظرین آزمایش در محل کار، مغزه‌های سنگ باید برای بررسی‌های بعدی در دسترس باشد.

۳-۳-۴-۳- واسنجی تجهیزات

واسنجی تجهیزات به صورت زیر باید انجام شود:

- تجهیزات کامل آزمایش دیلاتومتر پیش از هر سری آزمایش، همچنین دست کم به‌صورت هفتگی در ضمن برنامه آزمایش و بعد از تعمیرات اساسی مانند تعویض پوسته، واسنجی شود،
- درحالی‌که دیلاتومتر داخل استوانه واسنجی قرار دارد، بیش‌ترین فشار آزمایش به سامانه اعمال، نشت و ثابت بودن فشار کنترل می‌شود،
- در مرحله بعد، فشار کاملا برداشته شده و به صورت پله‌ای در محدوده آزمایش واقعی افزایش می‌یابد و دست کم ۵ قرائت فشار و اتساع متناظر با آن ثبت می‌شود. درصورتی‌که سلول دیلاتومتر دارای بیش از یک جابه‌جایی‌سنج باشد، قرائت‌ها مقایسه شده و سپس متوسط‌گیری می‌شود. منحنی فشار بر حسب میانگین اتساع ترسیم می‌شود و شیب آن M_m (بر حسب مگاپاسکال بر میلی‌متر) با انبساط نظری یک سیلندر، حاصل از تئوری الاستیک مقایسه می‌شود،
- پروب به‌طور جداگانه و در حالت غیرمحصور (بدون محدودیت جانبی) باد می‌شود. بدین‌ترتیب شیب منحنی فشار – اتساع بیانگر ضریب تصحیح صلبیت غشا خواهد شد،
- سامانه اندازه‌گیری جابه‌جایی نیز باید به‌طور مستقل با استفاده از یک میکرومتر واسنجی شود، ترجیحا این واسنجی به‌طور مستقیم در فاصله‌ی بین بالشتک‌های اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. در محدوده اندازه‌گیری، حساسیت کلی تجهیزات باید ثابت باشد. حساسیت عبارت است از میزان اتساع بر حسب میلی‌متر به ازای هر تقسیم‌بندی ولت‌متر.

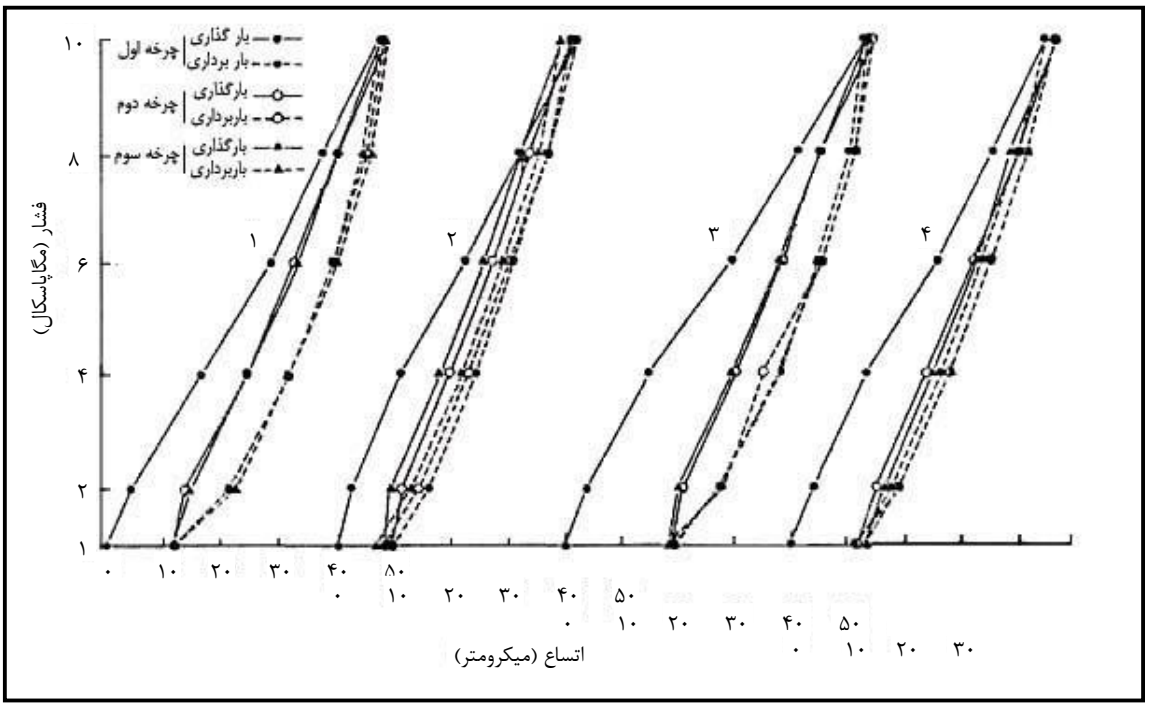
۳-۳-۴-۴- روش انجام آزمایش

آزمایش به روش زیر انجام می‌گردد:

- ابتدا توسط قطرسنج، قطر گمانه کنترل شده و سپس پروب به داخل گمانه رانده شده و به نقطه مورد نظر فرستاده می‌شود. این موقعیت دیلاتومتر با دقت $\pm$ ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری و ثبت می‌شود،
- پروب تحت فشار کافی منبسط می‌شود تا از تماس دایم و بدون لغزش آن اطمینان حاصل شود. این فشار نشان دهنده کم‌ترین فشار در هنگام آزمایش است،
- فشار در ۵ مرحله کم و بیش یکسان افزایش می‌یابد تا به مقدار فشار بیشینه تعیین شده برسد. مقدار بیش‌ترین فشار براساس هدف آزمایش تعیین می‌شود. فشار وارده نباید بیش‌تر از ظرفیت اسمی دستگاه باشد،
- در هر مرحله فشار ثابت مانده و میزان اتساع مربوط به آن یادداشت می‌شود. درصورتی‌که پروب شامل بیش از یک جابه‌جایی‌سنج باشد، قرائت‌های هر جابه‌جایی‌سنج به‌منظور محاسبه مقادیر مدول به‌صورت تابعی از جهت ثبت می‌شود. اتساع گمانه در فشار ثابت (در صورت وجود) بر حسب زمان ثبت می‌شود تا شاخصی از وابستگی

احتمالی رفتار سنگ به زمان را ارائه نماید. در گزینه‌ای دیگر این کار را می‌توان با ثابت نگهداشتن قطر و ثبت افت فشار در طول زمان انجام داد.

- در زمان اعمال بیشینه فشار آزمایش، فشار کمینه ۱۰ دقیقه و یا در صورت نیاز بیش از آن ثابت نگه داشته می‌شود. مقادیر قرائت شده اتساع – زمان در فشار ثابت برای تعیین نرخ خزش دوباره جدول‌بندی می‌شود،
- مقادیر جابه‌جایی و فشار در مرحله باربرداری نیز قرائت می‌شود. در بیش‌تر موارد سه سیکل بارگذاری و باربرداری مورد نیاز است.
- در ضمن آزمایش، منحنی فشار – اتساع همانند شکل (۳-۱۲) ترسیم می‌شود.
- در پایان فشار سامانه به صفر رسانده می‌شود. درصورتی‌که پروب تنها در یک جهت جابه‌جایی را اندازه‌گیری کند، می‌توان آن را در همان عمق در چال چرخانده و آزمایش را برای اندازه‌گیری تغییر شکل در دیگر جهات تکرار کرد. پس از آن پروب دیلاتومتر برای انجام آزمایش بعدی جابه‌جا می‌شود.



شکل ۳-۱۲- منحنی‌های فشار در مقابل اتساع مربوط به چهار سنجش‌گر نصب شده در یک دیلاتومتر LNEC

۳-۳-۵- محاسبات

ضرایب و پارامترهای مورد نظر، با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

۳-۳-۵-۱- محاسبه ضرایب واسنجی

- مدول برشی G_c ماده استوانه هم‌سنجی با داشتن مدول یانگ E_c و نسبت پواسون ν_c از رابطه (۳-۸) محاسبه می‌شود:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\nu_c)} \qquad (۸-۳)$$

G_c برحسب مگاپاسکال می‌باشد.

۳-۳-۵-۲- محاسبه پارامترهای تغییرشکل‌پذیری سنگ

- در مورد سنگ‌های با درزه‌داری کم و برای هر بخش از منحنی فشار – جابه‌جایی، مدول دیلاتومتری وتری، E_d از رابطه (۳-۹) محاسبه می‌گردد:

$$E_d = (1+\nu_R)D\frac{\Delta P_i}{\Delta D} \qquad (۹-۳)$$

که در آن:

Ed = مدول دیلاتومتری وتری (مگاپاسکال)،

ΔP_i = افزایش فشار در قطعه مورد نظر (مگاپاسکال)،

D = قطر چال (متر)،

ΔD = میانگین تغییر در قطر چال (متر)،

ν_R = نسبت پواسون توده سنگ.

- درصورتی‌که آزمایش در سنگ درزه وترک‌دار انجام شود و نیز مقدار P_i از دو برابر فشار متوسط زمین در اطراف گمانه بیش‌تر شود، کلیه ترک‌های شعاعی موجود باز خواهد شد و معادله (۳-۹)، به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$E_d = D\frac{P_i}{\Delta D}(1+\nu_R)\left[(1-\nu_R)Ln(\frac{P_i}{2P_0})+1\right] \qquad (۱۰-۳)$$

که در آن:

P_i = فشار وارده (مگاپاسکال)،

ΔD = متوسط افزایش قطر چال (متر) در اثر افزایش فشار از صفر تا P_i.

لازم به یادآوری است که معادلات (۳-۹) و (۳-۱۰) تنها برای توده‌سنگ با رفتار الاستیک خطی، همگن و همسان‌گرد معتبر است،

- هنگامی‌که دیلاتومتر تنها دارای یک جابه‌جایی‌سنج قطری باشد، لازم است که آن‌را در همان موقعیت چرخاند و آزمایش را در حالی‌که جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی تغییر کرده دوباره انجام داد. اتساع اندازه‌گیری شده برای چندین جهت اندازه‌گیری همانند شکل (۳-۱۲) ترسیم می‌شود، سپس مقادیر تغییر شکل جداگانه برای هر جهت محاسبه می‌شود،

- از نمودار فشار – اتساع، می‌توان پارامترهای فشاری کوتاه مدت و ضرایب وابسته به زمان توده سنگ را به‌دست آورد.

۳-۳-۶- گزارش نتایج

گزارش آزمایش باید شامل اطلاعات زیر باشد:

۳-۳-۶-۱- ارائه گزارش از محل آزمایش

موارد زیر را شامل می‌شود:

- جزییات برنامه حفاری، شامل: عامل اجرا، روش و تجهیزات مورد استفاده
- نقشه‌ای از نقاط حفاری و تهیه جدولی از طول چال‌ها، قطرها، شیب و جهت آن‌ها،
- پیمایش ژئوتکنیکی مغزه حفاری که نشان دهنده نقاط لوله‌گذاری و سیمانی شده (در صورت وجود)، تراز آب زیرزمینی، انواع و مشخصات سنگ، موقعیت مقاطع آزمایش است،
- مشخصات کلیه ناپیوستگی‌ها در هر محل آزمایش و محدوده ۰/۵ متر بالا و پایین آن. برای این کار لازم است از «روش پیشنهادی ISRM برای توصیف کمی ناپیوستگی‌ها در توده‌های سنگی» استفاده شود،
- جزییات روش و تجهیزات برای واسنجی و آزمایش که همراه با مراجع خواهد بود،
- نتایج کامل واسنجی.

۳-۳-۶-۲- ارائه گزارش نتایج آزمایش

گزارش نتایج آزمایش دیلاتومتری باید موارد زیر را در بر گیرد:

- قرائت‌های آزمایش، شامل مقادیر خام و تصحیح شده با اعماق و جهات اندازه‌گیری و نمودارهایی به‌صورت شکل (۳-۱۲)،
- مقادیر به‌دست آمده از پارامترهای تغییرشکل همراه با جزییات روش و فرضیات به‌کار رفته آن ارقام. پارامترهای تغییر شکل باید تنظیم شده و به‌صورت گرافیکی به‌صورت تابعی از فشار وارده باشد،
- نمودارهای تغییر شکل به‌عنوان تابعی از عمق (یا فاصله از ستون چال در حالت یک چاه غیرقائم)،
- نمودارهایی در صفحه عمود بر گمانه که نشان دهنده ناهمسان‌گردی اتساع اندازه‌گیری شده و مقادیر تغییر شکل است.

۳-۳-۷- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح‌اند، به شرح زیر می‌باشند:

- درصورتی‌که بیشینه فشار اعمالی وارده کم‌تر از مقدار مورد نیاز برای تسلیم شدن یا شکستن سنگ اطراف گمانه باشد تنها پارامترهای الاستیک را می‌توان محاسبه کرد. با وجود این، وقتی که دیلاتومتر با ظرفیت بالا در سنگی ضعیف یا پلاستیک مانند شیل یا پتاس استفاده شود، خواص مقاومتی کوتاه مدت و خزش سنگ نیز ممکن است از شکل منحنی‌های نیرو – جابه‌جایی – زمان قابل استخراج باشد. به‌طور مشابه، زمانی که یک دیلاتومتر با ظرفیت بالا برای ایجاد شکستگی شعاعی در سنگ سختی مانند گرانیت استفاده شود، نتایجی از مقاومت کششی و میزان تنش در سنگ را می‌توان به‌دست آورد،
- اگرچه ممکن است یک استوانه واسنجی کافی باشد، اغلب دو یا تعداد بیش‌تری استوانه واسنجی با سختی‌های مختلف برای افزایش دقت به‌کار می‌روند. در مورد ماده یا قطر خارجی سیلندرهای واسنجی نیازمندی خاصی وجود ندارد، اگرچه باید سختی مشابه با توده سنگ داشته باشند و امکان واسنجی در محدوده کامل فشارهای به‌کار رفته در گمانه را فراهم کنند،
- برای انجام اندازه‌گیری در سنگ‌های سخت، محدوده فشار معادل دست کم ۲۰ مگاپاسکال توصیه می‌شود. سیالات تحت فشار به‌کار رفته شامل گلیسیرین، اتیلن گلیکول، آب یا روغن هیدرولیک است،
- برای انجام آزمایش در سنگ بسیار سخت، معمولا یک سامانه فشار با صلبیت بالا ضروری است. باید از کاربرد شیلنگ لاستیکی معمولی اجتناب و از شیلنگ فشار قوی و یا لوله فولادی استفاده کرد،
- وجود یک گمانه نامنظم یا بزرگ‌تر از اندازه محدوده اندازه‌گیری تغییرمکان را کاهش داده و باعث می‌شود با فشار بسیار کم‌تر از بیشینه فشار کار اسمی دیلاتومتر آزمایش پایان یابد. بنابراین حفاری با کیفیت بالا برای اجتناب از آسیب‌دیدگی پوسته و اعمال بیش‌ترین فشار آزمایش ضروری است،
- ارتفاع معادل فشار دوغاب جهت پر کردن گمانه و حفاری مجدد آن هیچ‌گاه نباید بیش از ۳ متر باشد تا خصوصیات توده سنگ مورد آزمایش را عوض کند. گمانه سیمانی شده تا محدوده مشخصی دوباره حفاری می‌شود. پوشش سیمانی باید نازک‌تر از ۱ میلی‌متر باشد. درصورت استفاده از سیمان باید اثرات آن به‌طور کامل ثبت شده و در گزارش ارزیابی شود. همچنین در صورت سیمان کردن جداره چال باید توجه داشت که این کار باعث افزایش کیفیت توده سنگ اطراف گمانه نشود،
- در آزمایش فشارسنجی (پرسیومتری) منارد که عموما در خاک‌ها انجام می‌شود، فشار معمولا به‌صورت پلکانی افزایش می‌یابد و در هر سطح برای زمان انتخابی ثابت شده و در ضمن آن افزایش حجم چال ثبت می‌شود،
- بیشینه فشار آزمایش باید در حد امکان بالا باشد، به گونه‌ای که فشار به بیش‌ترین حجم ممکن توده سنگ اعمال شود. در یک آزمایش چند سیکلی، بیش‌ترین فشار هر مرحله متوالی باید به‌طور فزاینده افزایش یابد، به‌طوری‌که اطلاعات مفیدی از آن در هر مرحله حتی در صورت صدمه دیدن غشا حاصل شود،

- بعضی از پرورب‌ها به‌جای این‌که اتساع را به‌طور مستقیم از روی سنگ اندازه‌گیری کند،آن‌را بر روی دیوار خالی پوسته اندازه‌گیری می‌کنند. بنابراین نیازمند به واسنجی تغییرات ضخامت پوسته نبوده و واسنجی تابعی از فشار داخلی خواهد بود،
- در صورت انجام این آزمایش روی بخش‌های درزه‌دار، ترک‌دار یا خرد شده که درون گمانه انجام می‌شود، باید دقت شود تا دیلاتومتر در گمانه گیر نکند و یا سنگ‌ها سبب سوراخ و یا پاره شدن غشا لاستیکی نشود،
- توصیه می‌شود برای اعمال فشار به پروب، به‌جای استفاده از پمپ‌های هیدرولیکی از هوای فشرده استفاده شود. در صورت استفاده از پمپ‌های هیدرولیکی، به هر دلیل که آزمایش متوقف شود، ادامه آزمایش مقدور نیست، درصورتی‌که با استفاده از هوای فشرده، امکان ادامه کار فراهم می‌شود،
- استفاده از پروب‌هایی با یک سنجش‌گر (سنسور) توصیه نمی‌شود.

۳-۴- دستورالعمل تعیین تنش برجا و مدول تغییرشکل‌پذیری با استفاده از روش جک مسطح

۳-۴-۱- هدف

آزمایش جک مسطح برای اندازه‌گیری تنش بر جای توده سنگ در سطوح رخنمون یافته ناشی از حفاری‌های زیرزمینی به‌کار می‌رود. افزون بر آن، از این آزمایش می‌توان مدول‌های شکل‌پذیری را نیز محاسبه کرد. این دستورالعمل با استفاده از [۳]ASTM D ۴۷۲۹ و [۴] ISRM تهیه شده است.

۳-۴-۲- اهمیت و موارد استفاده

با انجام این آزمایش می‌توان در راستای عمود بر محور شکاف ایجاد شده تنش برجا را به‌دست آورد و درنتیجه با انجام آن در چند جهت از پیش تعیین شده تانسور تنش را به‌دست آورد [۱]. به‌طور کلی جک مسطح، تنش‌های موازی محور تونل در جهات قائم را با دقت بیش‌تری اندازه‌گیری می‌کند، زیرا این تنش‌ها خیلی کم‌تر زیر تاثیر وجود تونل قرار می‌گیرند. افزون بر آن، درصورتی‌که گالری در میدان تنشی قرار داشته باشد که یکی از تنش مولفه‌های به‌طور قابل توجهی از بقیه بیش‌تر باشد (۳ یا ۴ برابر) در نقاط مشخصی از گالری، ممکن است فشار خیلی کم یا حتی به صورت تنش کششی وجود داشته باشد. در این صورت آزمایش جک مسطح ممکن است نتایج غیرقابل قبولی به‌دست دهد. به‌دلیل احتمال تاثیر این عوامل، طول گالری آزمایشی باید دست کم دو یا ترجیحا تا ۵ برابر قطر گالری آزمایش باشد. آزمایش در سه مقطع مستقیم که با یکدیگر زاویه ۹۰ درجه می‌سازند انجام می‌شود تا نتایج قابل اعتمادی به‌دست آید و چنان‌چه نتایج در یک جهت غیرعادی باشد، می‌توان با استفاده از آزمایش در دو مقطع دیگر اطلاعات مناسب و قابل استفاده را به‌دست آورد.

۳-۴-۳- تعاریف

تعاریف به قرار زیر می‌باشد:

- فشار برگشت‌پذیری[1] (فشار جبرانی): فشاری که لازم است اعمال شود تا سنگ به وضعیت اولیه بازگردد،
- تنش جداری[2]: تنش مماسی در سطح فضای حفر شده می‌باشد،
- تنش دست نخورده[3]: به میدان تنش توده سنگ قبل از ایجاد فضای زیرزمینی گفته می‌شود.

۳-۴-۴- ملاحظات و فرضیات

در انجام این آزمایش، به موارد زیر باید توجه ویژه شود:

- کارکنان انجام آزمایش: کلیه کارکنان مسوول انجام آزمایش، شامل تکنسین‌ها و ناظرین باید مورد ارزیابی اولیه قرار گیرند،
- کارکنان حفاری: کیفیت حفاری برای اجرای موفقیت‌آمیز آزمایش جک مسطح مهم است. کارکنان حفار باید توانایی لازم را برای حفاری دقیق و ایجاد شکاف و چال‌های ابزاربندی داشته باشند،
- مشخصات تجهیزات اجرایی: تطبیق تمامی تجهیزات وسایل اجرایی با مشخصات مورد نیاز باید صورت گیرد. اگر مشخصات هیچ‌کدام از تجهیزات بیان نشده باشد، مشخصات کارخانه سازنده تجهیزات باید در سطح مورد نیاز باشد. تایید عملکرد تجهیزات معمولا با واسنجی آن‌ها و سامانه‌های اندازه‌گیری صورت می‌گیرد. انجام واسنجی و ارائه اسناد و مدارک باید با روش‌های استاندارد صورت بگیرد،
- ویژگی‌های زمین‌شناسی محل: خصوصیات محل، ویژگی گسل‌ها، نواحی برشی و عوامل دیگر می‌تواند محدوده میدان تنش را تحت تاثیر قرار دهد. وجود نواحی تزریق شده در توده سنگ اصلی می‌تواند خواص تنش و شکل‌پذیری را تحت تاثیر قرار دهد. نقاط آزمایش باید به‌دقت انتخاب شوند، به‌طوری‌که تاثیر عوامل ذکر شده به حداقل برسد یا اگر این خصوصیات مورد قبول باشند، باید کاملا قید شود،
- اثر حفاری‌ها و فضاهای زیرزمینی: حفاری‌های دیگری که گالری آزمایش را قطع می‌کنند به‌دلیل تاثیرات حفاری‌ها روی یکدیگر باعث پیچیدگی توزیع تنش در آن منطقه می‌شوند. نقاط آزمایش باید دست کم به اندازه ۳ برابر قطر این‌گونه حفاری‌ها با آن‌ها فاصله داشته باشد. اگر گالری آزمایش با روش‌های سنتی حفر می‌شود، سطوح آزمایش باید با تکنیک‌های غیرانفجاری آماده‌سازی و مواد سست ناشی از رهایی تنش یا انفجار از آن زدوده شود. اختلاف بین پایین‌ترین و بالاترین نقاط سطح پرداخت شده در سنگ نباید بیش از ۵۰ میلی‌متر باشد،

1- Cancellation Pressure
2- Skin Stress
3- Undisturbed Stress

- محدودیت آزمایش: آزمایش جک مسطح اندازه تنش را تنها در سطح محل آزمایش تعیین می‌کند. مقدار تنش واقعی (دست‌نخورده) با کمک روابط نظری با توجه به اطلاعات به‌دست آمده محاسبه خواهد شد،
- رهاسازی تنش فرآیندی الاستیک و برگشت‌پذیر فرض می‌شود. این فرض ممکن است در سنگ‌های ناهمگون و یا شدیدا خرد شده کاملا درست نباشد،
- در معادلات، توده سنگ همسان‌گرد و همگون فرض می‌شود. اثرات ناهمسان‌گردی به کمک آزمایش در جهات مختلف قابل تخمین است،
- بازده عملکرد جک مسطح ۱۰۰ درصد فرض می‌شود. نیازمندی‌های طراحی و اندازه تجهیزات اشاره شده در بخش ۳-۳- ۵ تنها با چند درصد خطا باید تامین شود،
- جهت قرارگیری جک در سطح فضای حفر شده در راستای تنش‌های اصلی فرض می‌شود. از تنش برشی ایجاد شده توسط فشار جک صرف‌نظر نمی‌شود. انجام آزمایش در سه جهت مختلف دست کم از امکان ایجاد خطای مفرط در یکی از آزمایش‌ها جلوگیری می‌کند،
- این دستورالعمل تمامی مسایل ایمنی را دربرنمی‌گیرد. در صورت بروز هرگونه مشکل ایمنی که در این دستورالعمل قید نشده باشد، وظیفه کارکنان مسوول بوده که نکات ایمنی مناسب را با انجام تدارکات لازم و با توجه به محدودیت‌های عملی، قبل از استفاده از این دستورالعمل در نظر داشته باشد.

۳-۴-۵- تجهیزات

ویژگی‌های تجهیزات مورد نیاز این آزمایش، به شرح زیر باید باشد:

۳-۴-۵-۱- ابزار برش

- تجهیزات مورد استفاده برای ایجاد برش سنگ مانند ماشین برش با تیغه دیسکی الماسه باید به نوعی باشد که بتواند شکاف‌هایی با ابعاد مناسب ایجاد کند. چنان‌چه ایجاد شکاف آزمایش از طریق چال‌های همپوشان صورت می‌گیرد، دستگاه چالزنی و قاب مناسب برای این کار ضروری است،
- لوازم و تجهیزات ضروری برای ریختن ملات درون شکاف در صورت نیاز (مثلا اگر شکاف از طریق چال‌های همپوشان ایجاد شده باشد).

۳-۴-۵-۲- جک‌های مسطح

جک‌های مسطح زمانی که به‌درستی نصب شده‌اند باید بتوانند در فشار چندین هزار پاسکال به‌خوبی کار کنند. جک‌ها باید طوری نصب شوند که دو صفحه اصلی در صورت لزوم در جهت موازی و محدوده بیش‌تر از جک قابلیت جابه‌جایی داشته باشد. دامنه جابه‌جایی باید دست کم ۶ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ) باشد. شکل سطح جک‌ها باید مربع بوده و ضخامت صفحات موازی، طبق ISRM، باید کم‌تر از ۱ میلی‌متر باشد.

۳-۴-۵-۳- وسایل اندازه‌گیری فشار

از ترانسدیوسرهای الکترونیکی یا گیج‌های هیدرولیکی برای اندازه‌گیری فشار جک استفاده می‌شود. دقت اندازه‌گیری فشار توسط ترانسدیوسر باید دست کم برابر ۰/۱۴ ± مگاپاسکال باشد که شامل خطاهای به‌وجود آمده توسط سامانه قرائت خروجی و با حساسیت دست کم ۰/۰۶۹ مگاپاسکال است.

۳-۴-۵-۴- وسایل اندازه‌گیری تغییر شکل

ترانسدیوسرهای تغییرشکل شامل گیج‌های شماره انداز، گیج‌های کرنش‌سنج ویته‌مور[1] و ترانسدیوسرهای الکترونیکی مانند LVDT یا پتانسیل‌سنج‌های خطی با دقت دست کم ۰/۰۰۲۵ ± میلی‌متر با حساسیت ۰/۰۰۱۳ میلی‌متر لازم می‌باشند. گیج‌های کرنش‌سنج موجود در جک مسطح باید پیش از نصب بر روی جک، واسنجی شوند. تاثیر روغن هیدرولیکی و افزایش فشار محصور کننده بر روی گیج‌ها باید پیش از آزمایش تعیین شود.

۳-۴-۵-۵- ملات

ملات سیمان مورد استفاده باید به‌گونه‌ای باشد که جک مسطح در داخل شکاف را به سرعت به مقاومت اولیه بالا رسانده و از مواد غیرقابل انقباض ساخته شود. ملات ممکن است شامل بیش از ۵۰ درصد وزنی ماسه تمیز با ابعاد دانه‌بندی بین ۲۰ و ۶۰ مش باشد. برای ساخت ملات از آب تمیز و قابل آشامیدن استفاده شود. مقاومت ملات عمل‌آوری شده باید بیش از تنش اعمالی بر جک مسطح باشد. مدول ملات باید تعیین شده و از مدول سنگ متمایز شود.

۳-۴-۶- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

۳-۴-۶-۱- آرایش و گروه‌بندی جک‌ها در هر ایستگاه آزمایش

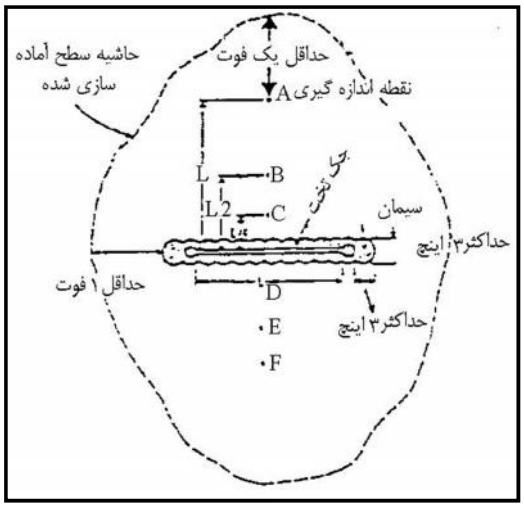
در هر مقطع گالری (یا دستک) دست کم باید یک سری از جک‌ها نصب شوند. هر سری باید شامل ۳ جک مسطح باشد که به صورت افقی، با شیب ۴۵ درجه و قائم نصب شوند. جک‌های هر گروه باید در یک بخش گالری (یا دستک) با فواصل طولی حداقل ۶ متر از یکدیگر قرار داده باشند.

۳-۴-۶-۲- آماده‌سازی سطح سنگ و ایجاد حفره

در آماده‌سازی یطح سنگ و ایجاد حفره، موارد زیر باید رعایت گردند:

1- Whitte More

- کیفیت سنگ: برای انجام آزمایش به سطحی مقاوم و صاف با کمی تقعر نیاز می‌باشد. جک تخت را نباید در مناطق شکسته شده یا آماس کرده کار گذاشت. این‌گونه مناطق در اثر ضربه چکش صدای پوکی می‌دهند، درحالی‌که مناطق سالم صدای زنگ‌دار تولید می‌کنند. چنان‌چه سطح مناسبی در تونل موجود نباشد، لازم است با وسایل حفاری دستی و بادی شکل هندسی تونل را تا حد امکان اصلاح کرد،
- ابعاد: سطح آماده شده باید دست کم ۰/۳۰ متر از هر انتهای شکاف جک مسطح و نیز ۰/۳ متر دورتر از نقاط اندازه‌گیری گسترش داشته باشد. محل قرارگیری ترانسدیوسرها یا جک مسطح در هر نقطه باید به اندازه ۰/۳ متر داخل سطح آماده شده قرار داشته باشند (شکل ۳-۱۳)،



شکل ۳-۱۳- آرایش تجهیزات اندازه‌گیری جک مسطح در اطراف شکاف

- روش آماده‌سازی سطح: حفاری تا یک عمق یکنواخت نیازمند آماده‌سازی سطح سنگ است. در آماده‌سازی به روش حفر چال‌های همپوشان، سنگ باقی‌مانده بین چال‌های حفاری ممکن است با حرکت رو به جلو و عقب سرمته خارج شود و این حرکت تا زمانی ادامه می‌یابد که سطح سنگ صاف شود. به‌جای این‌کار در سنگ پی‌ساخت و سالم، می‌توان از آتش‌کاری کنترل شده با استفاده از خرج آتش‌کاری کم استفاده و سپس سنگ باقی‌مانده را از شکاف خارج کرد. در سنگ‌های نرم‌تر ممکن است ابزار برش و یا وسایل خرد کننده استفاده شود،
- صافی سطوح: سطوح آماده شده برای آزمایش در حالت ایده‌آل به‌صورت صفحه‌ای در نظر گرفته می شود. اختلاف بین بالاترین و پایین‌ترین نقاط در سطح آماده شده نباید بیش از ۵۰ میلی‌متر باشد.

۳-۴-۶-۳- نصب ترانسدیوسر

ترانسدیوسرها در مرکز و عمود بر جک مسطح در سطح یا در عمق نصب می‌شوند. ترانسدیوسرهایی که برای اندازه‌گیری تنش به‌کار می‌روند باید در محدوده L/۲ شکاف جک مسطح نصب شوند، که L پهنای جک مسطح می‌باشد.

۳-۴-۶-۴- ایجاد شکاف

شکاف با استفاده از اره یا حفاری نزدیک به‌هم چال‌ها در سنگ‌های سست یا شدیدا ترک خورده ایجاد می‌شود. در هنگام ایجاد شکاف، لرزش باید کم‌ترین باشد. پهنای شکاف نباید بیش از ۷۴ میلی‌متر و امتداد آن نیز نباید بیش از ۷۵ میلی‌متر از لبه‌های جک مسطح گسترش داشته باشد. شکاف باید به‌اندازه کافی عمیق بوده تا جک مسطح قابلیت داخل شدن در شکاف با فاصله ۷۵ میلی‌متر را داشته باشد و در کنار پایین‌ترین نقطه اندازه‌گیری در مجاورت سنگ سالم شکاف برسد.

در صورت انجام حفاری، باید دقت شود که چال‌ها مستقیم و موازی بوده و تا انتهای شکاف باز باشند تا جک به آن نقطه برسد. شکاف باید توسط آب تمیز شسته شود تا خرده‌های ناشی از حفاری از آن خارج شود.

۳-۴-۶-۵- قرائت تغییرشکل‌ها در مرحله رهایی[1]

باید بلافاصله پس از ایجاد شکاف تغییر شکل‌اندازه‌گیری شود. همچنین پیش از شروع آزمایش نیز دوباره اندازه‌گیری شود. اگر سنگ در یک دوره زمانی تحت بار ثابتی تغییر شکلی را متناسبا تحمل می‌کند، باید تعداد زیادی قرائت میانی برای ارزیابی این اثر نیز صورت پذیرد.

۳-۴-۶-۶- نصب جک مسطح

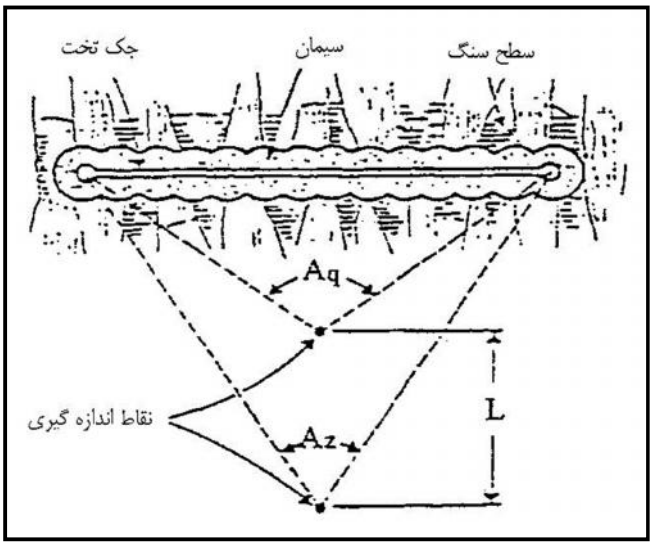
جک مسطح باید در مرکز شکاف و در عمق ۷۵ میلی‌متری از سطح صاف حفاری قرار بگیرد تا احتمال گسیختگی در هنگام اعمال فشار از بین برود. در صورت استفاده از ملات باید اطراف جک پر شده و عاری از هرگونه حباب هوا یا حفره باشد. زمان کافی برای گیرش به ملات داده شود تا مقاومت فشاری بیش از تنش پیش‌بینی شده جک را داشته باشد.

۳-۴-۶-۷- آزمایش جک مسطح

فشار جک مسطح با گام افزایشی ۰/۷ مگاپاسکال و تا زمان دستیابی به حذف تنش در کلیه نقاط اندازه‌گیری ادامه می‌یابد. پس از هر مرحله افزایش فشار، تغییر شکل باید قرائت شود. به‌منظور آزمایش تغییر شکل وابسته به زمان، فشار ماکزیمم باید تا ۱۵ دقیقه ثابت نگه داشته شود. قرائت تغییر شکل باید هر ۵ دقیقه انجام شود. سپس فشار باید با گام ۰/۶ مگاپاسکال تا رسیدن به فشار صفر کاهش یابد و پس از هر کاهش، تغییر شکل قرائت شود. پس از رسیدن به هدف آزمایش یعنی کسب تغییر شکل وابسته زمان، فشار صفر باید ۱۵ دقیقه حفظ شود و دوباره قرائت تغییر شکل باید هر ۵ دقیقه یک‌بار انجام شود.

سیکل بارگذاری باید دست کم ۲ بار با استفاده از افزایش و کاهش مساوی فشار تکرار شود. تنش بیشینه جک در این سیکل‌ها باید تا حد ممکن زیاد باشد و این بیشینه تنش باید توسط کارشناس متصدی آزمایش در محل و بسته به جک و مقاومت سنگ و فشار برگشت‌پذیری تعیین شود. شکل (۳-۱۴) اصطلاحات هندسی در آزمایش جک مسطح را نشان می‌دهد.

1- Relaxation



شکل ۳-۱۴- اصطلاحات هندسی در روش جک مسطح

۳-۴-۶-۸- ثبت اطلاعات مورد نیاز

اطلاعات نشان داده شده در جدول (۳-۱) و (۳-۲) به عنوان کم‌ترین داده‌های موجود در آزمایش باید ثبت شوند.

۳-۴-۷- محاسبات

محاسبه تنش و مدول تغییر شکل به‌دست آمده از اطلاعات جک مسطح وابسته به هندسه پیچیده بارگذاری آزمایش می‌باشد. فشار جک تنها در یک جهت گسترش دارد، بنابراین مولفه‌های جانبی و برشی ذخیره نمی‌شود. این امر، به‌خصوص زمانی قابل توجه است که جک در مسیری به جز از مسیر اصلی تنش قرار گرفته باشد. مدل‌های الاستیک و فرضیه‌های بسیاری برای جبران این عوامل استفاده شده است که به تغییر و نیز کاهش اطلاعات منتهی می‌شود.

جدول ۳-۱- مشخصات تجهیزات و وسایل آزمایش جک مسطح

آزمایش جک تخت برگه مشخصات و تجهیزات آزمایش ASTN D ۴۷۲۹			
پروژه:		شماره آزمایش:	
نوع فضای زیرزمینی:		محل آزمایش:	
نوع سنگ:		جهت‌داری:	
شرح تجهیزات	شماره سریال	تاریخ واسنجی	تاریخ واسنجی بعدی

جدول ۳-۲- ثبت قرائت‌ها در آزمایش جک مسطح

برگه‌ی پیش‌نویس آزمایش جک تخت ASTN D ۴۷۲۹					
پروژه:			**شماره آزمایش:**		
نوع فضای زیرزمینی:			**محل آزمایش:**		
نوع سنگ:			**جهت‌داری:**		
تاریخ	**ساعت**	**فشار**	**تغییر شکل**		**ملاحظات**
			شماره ۱	**شماره ۲**	**شماره ۳**
مشاور آزمایش: تاریخ و امضا:					
ناظر کیفی: تاریخ و امضا:					
کارشناس پروژه: تاریخ و امضا:					

معادلات ارائه شده در این بخش که تا حد وسیعی پذیرفته شده‌اند، برای رسیدن به نتایج قابل اعتماد و قابل مقایسه با دیگر روش‌های برجا استفاده می‌شوند. با وجود این، تحلیل اطلاعات به عوامل خاص محلی مانند زمین‌شناسی و میدان تنش موجود وابستگی دارد. تحلیل جداگانه‌ای از هر آزمایش با استفاده از روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود، ممکن است موثرترین روش برای دسترسی به تنش و مدول تغییر شکل باشد.

۳-۴-۷-۱- فشار لازم برای برگشت جابه‌جایی‌های ایجاد شده

همان‌گونه که یادآوری گردید، این فشار الزاما معادل تنش وارده بر سطح سنگ نمی‌باشد. محاسبات مربوط به تنش جداری به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود. یک گروه شامل تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده در هر طرف شکاف جک مسطح و گروه دیگر شامل تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده در میان شکاف می‌باشد:

- زمانی که تغییر شکل بین نقاط در یک سمت شکاف جک تخت اندازه‌گیری می‌شود تنش سطحی با استفاده از تئوری کرنش الاستیک محاسبه می‌شود. کرنش به‌دست آمده توسط ایجاد شکاف همانند با کرنش ایجاد شده توسط یک حفره طویل بیضوی شکل در یک صفحه الاستیک است [۵] و کرنش ایجاد شده توسط جک مسطح همانند بارگذاری یکنواخت در لبه یک صفحه تقریبا نامتناهی می‌باشد. در جدول (۳-۳) نسبت تنش اولیه به فشار برگرداننده برای اندازه‌گیری جابه‌جایی در فواصل متفاوت از شافت همراه با نسبت پواسون‌های مختلف آورده شده است.

این نسبت‌ها توسط مرجع [۵] برای جک مسطحی با مساحت یک مترمربع داده شده است. با کمی خطا می‌توان از این مقادیر برای جک‌هایی نیز که ابعاد آن‌ها در این حدود می‌باشند استفاده کرد. تجربیات صحرایی نشان می‌دهد که از این جدول نمی‌توان به طورمستقیم برای تصحیح فشار لازم برای برطرف کردن جابه‌جایی‌ها استفاده نمود و تنها به عنوان شاخصی در نقاط اندازه‌گیری برای به حداقل رساندن خطا استفاده شوند. در عمل، تنش پوسته‌ای به حدی نزدیک به شکاف اتفاق می‌افتد که می‌توان آن‌را با خطای قابل قبولی معادل با فشار جبرانی در نظر گرفت.

جدول ۳-۳- نسبت تنش سطحی به فشار لازم برای برگشت جابه‌جایی‌ها برای جک مسطح با مساحت یک مترمربع [۱]

فاصله از شیار	ضریب پواسون سنگ (ν)			
	۰/۱	۰/۲	۰/۳۳	۰/۵
۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۲
۰/۱ L^*	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۸۹
۰/۲ L	۱/۰	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۸۸
۰/۳ L	۱/۰۴	۰/۰۱	۰/۹۸	۰/۹۳
۰/۴ L	۱/۱	۱/۰۸	۱/۰۲	۱/۰۱
۰/۵ L	۱/۲	۱/۱۷	۱/۱۱	۱/۰۸
۰/۶ L	۱/۳۱	۱/۲۷	۱/۲۴	۱/۱۸
۰/۷ L	۱/۴۴	۱/۳۹	۱/۳۷	۱/۳۰
۰/۸ L	۱/۵۸	۱/۵۲	۱/۴۸	۱/۳۸
۰/۹ L	۱/۷۱	۱/۶۹	۱/۶۱	۱/۴۶
۱/۰ L	۱/۸۷	۱/۸۳	۱/۷۳	۱/۵۳

- هنگامی‌که تغییر شکل بین نقاط در دو طرف شکاف جک مسطح اندازه‌گیری می‌شود، از تئوری تغییر شکل الاستیک برای محاسبه تنش سطحی استفاده می‌شود. تغییر شکل‌های مربوط به ایجاد شکاف، مشابه با تغییر شکل‌های ایجاد شده توسط یک سوراخ بیضوی شکل محدود در یک صفحه الاستیک با بارگذاری یکنواخت می‌باشد [۲]. تغییر شکل‌های ایجاد شده توسط جک مسطح مشابه تغییر شکل‌های ایجاد شده در یک بیضوی نامحدود نازک است و تغییر شکل ایجاد شده در اثر شکاف در یک طرف جک (W)، توسط معادلات زیر به‌دست می‌آید:

$$W_0 = \left[\frac{SC}{E}(1-\nu)(1+\frac{Y^2}{C^2})^{\frac{1}{2}}\right] - \left[\frac{Y}{C} + (1+\nu)/(1+\frac{y^2}{C^2})^{\frac{1}{2}}\right] \qquad (۱۱-۳)$$

$$W_1 = \left[\frac{SY_0}{E}(-2\nu)(1+\frac{Y^2}{C^2})^{\frac{1}{2}}\right] - \left[\frac{Y}{C} + (1+\nu)/(1+\frac{Y^2}{C^2})^{\frac{1}{2}}\right] \qquad (۱۲-۳)$$

$$W_2 = -W_1\frac{Q}{S} \qquad (۱۳-۳)$$

$$W = W_0 = W_1 + W_2 \qquad (۱۴-۳)$$

که در آن:

W_0: جابه‌جایی در یک طرف شکاف در هنگام برش یک شکاف نازک نامحدود (میلی‌متر)،

W_1 = جابه‌جایی در یک طرف شکاف ناشی از تنش دومحوری (میلی‌متر)،

W_2 = جابه‌جایی در یک طرف شکاف ناشی از تنش دومحوری (میلی‌متر)،

S = تنش سنگ در جهت عمود بر جک (مگاپاسکال)،

Q = تنش سنگ در جهت موازی با جک (مگاپاسکال)،

C = نصف طول شکاف (میلی‌متر)،

Y = فاصله نقاط اندازه‌گیری تا خط مرکزی جک (میلی‌متر)،

Y_0 = نصف عرض شکاف (میلی‌متر)،

E = مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ (گیگاپاسکال)،

ν = نسبت پواسون توده سنگ.

تغییرشکل ایجاد شده توسط اعمال فشار جک (W_j)، توسط رابطه (۳-۱۲) به‌دست می‌آید.

$$W_j = \left[\frac{PC_0}{E}(1-\nu)(1+\frac{y^2}{C_0^2})^{\frac{1}{2}}\right] - \left[\frac{Y}{C_0} + (1-\nu)/(1+\frac{Y^2}{C_0^2})^{\frac{1}{2}}\right] \qquad (۱۵-۳)$$

که در آن:

P = فشار جک (مگاپاسکال)،

C_0 = نصف طول جک (میلی‌متر)،

و فشار لازم برای برگشت دادن جابه‌جایی‌های ایجاد شده.

$$W = w_j \qquad (۱۶-۳)$$

- مدول شکل‌پذیری: دوباره محاسبات مدول تغییرشکل به دو گروه تقسیم می‌شود. وقتی که تغییر شکل در یک طرف شکاف اندازه‌گیری شود، مدول E از رابطه (۳-۱۷) به‌دست می‌آید:

$$E(GPa) = (PLR/2\pi\Delta Y) = (P/\Delta Y)(K = RL/2\pi) \qquad (۱۷-۳)$$

که در آن:

P = فشار جک مسطح (مگاپاسکال)،

L = فواصل بین نقاطه اندازه‌گیری (میلی‌متر)،

R = ضریب توزیع تنش،

ΔY = تغییر شکل بین نقاط اندازه‌گیری (میلی‌متر)،

ضریب توزیع تنش R، توسط رابطه (۳-۱۶) محاسبه می‌شود.

$$R = (A_q + \sin A_q) - \nu(A_q - \sin A_q) + (A_z + \sin A_z) - \nu(A_z - \sin A_z) \qquad (۱۸-۳)$$

که در آن:

ν = نسبت پواسون سنگ،

A_z و A_q زاویه بین نقاط اندازه‌گیری با لبه‌های جک مسطح بر حسب رادیان می‌باشد که در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است.

وقتی که اندازه‌گیری تغییر شکل در میان شکاف صورت می‌گیرد. معادله (۳-۱۷) برای تعیین مدول E به‌صورت زیر خواهد بود:

$$E(GPa) = K(P/\Delta Y) \qquad (۳-۱۹)$$

که در آن:

P = فشار در جک مسطح (مگاپاسکال)،

ΔY = تغییر شکل بین نقاط اندازه‌گیری (میلی‌متر)،

K = ضریب وابسته به شکل هندسی آزمایش.

۳-۴-۸- گزارش نتایج

گزارش آزمایش باید شامل اطلاعات زیر باشد:

گزارش کامل این آزمایش باید دست کم دارای موارد زیر باشد. جزییات بیش‌تری نیز ممکن است برای تکمیل آن افزوده شود و تنظیم بخش‌ها نیز در صورت لزوم تغییر کند:

۳-۴-۸-۱- مقدمه گزارش

بخش مقدمه برای ارائه اهداف و مقاصد برنامه آزمایش و مشخصات مواد آزمایش شده خواهد بود و شامل:

- موقعیت و جهت: موقعیت و جهت هر جک مسطح باید شرح داده شود. بدین‌منظور نمودار گرافیکی توصیه می‌شود،
- اصول انتخاب موقعیت: دلایل ویژه انتخاب محل آزمایش باید ارائه شود،
- محدودیت‌های آزمایش: نواحی مناسبی که در آزمایش پوشش داده نشده و محدودیت اطلاعات در نواحی آن‌ها باید به‌طور کلی بحث شود،
- شرح خلاصه‌ای از شرایط زمین‌شناسی محل آزمایش: زمین‌شناسی هر محل آزمایش باید شرح داده شود که شامل نوع سنگ، ترک‌ها، هوازدگی، انکلوزین و ... می‌باشد. نقشه تفصیلی زمین‌شناسی گالری آزمایش در محل جک مسطح که نشان دهنده جک و نقاط اندازه‌گیری باشد نیز مورد نیاز است،

۳-۴-۸-۲- روش انجام آزمایش

- وسایل و تجهیزات: فهرست کامل وسایل و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش باید در گزارش آورده شود که شامل نام، شماره مدل و مشخصات پایه هر قطعه اصلی است،

- روش اجرای آزمایش باید با مراحل جزیی آن ذکر شود،
- اگر تجهیزات اصلی مورد استفاده، متفاوت از تجهیزات یاد شده در این روش باشد، هرگونه تغییر و دلایل آن باید آورده شود.
- اثر تغییرات بر روی نتایج آزمایش نیز باید شرح داده شود.

۳-۴-۸-۳- پیشینه تئوری آزمایش

- تمام معادلات مورد استفاده برای تبدیل داده‌ها باید به‌وضوح و به طور کامل شرح داده شود. فرضیات اصلی در معادلات و هرگونه محدودیت در کاربرد آن‌ها باید ذکر شده و اثرات آن مشخص شود.
- تاثیرات ویژه محل:
  - فرضیات: درجه تطابق با شرایط واقعی محل آزمایش و معادلات تبدیل داده‌ها باید ذکر شود،
  - فاکتورهای تصحیح: هر فاکتور یا روش به‌کار رفته برای تصحیح شرایط غیرایده‌آل به‌طور کامل شرح داده شود.

۳-۴-۸-۴- نتایج آزمایش

موارد زیر را شامل می‌شود:

- تهیه جدول نتایج شامل نوع سنگ، جهات قرارگیری جک مسطح، میانگین فشار لازم برای برطرف کردن جابه‌جایی‌ها، تنش سطحی و میانگین مقادیر مدول‌های تغییر شکل، دامنه تغییرات و مقادیر غیرقطعی باید بیان شده باشد،
- ارائه جدولی شامل تعداد آزمایش، انواع سنگ، جهات، تغییر شکل، فشار لازم برای برطرف کردن جابه‌جایی‌ها، تنش سطحی و مقادیر مدول تغییر شکل باید بیان شود،
- منحنی‌های فشار در برابر تغییر شکل برای هر نوع سنگ باید شرح داده شود،
- انواع اطلاعات دیگر ناشی از تحلیل و ارائه داده‌ها در صورت مناسب بودن به شرح زیر افزوده می‌شود:
  - هیستوگرام نتایج،
  - مقایسه نتایج با سایر آزمایش‌های برجا،
  - تخمین سطوح به‌هم خورده تنش،
  - بررسی مقایسه نتایج با دیگر مطالعات.

۳-۴-۸-۵- تخمین خطا

تخمین خطا باید در برگیرنده موارد زیر باشد:

- نتایج باید با استفاده از روش‌های آماری استاندارد تحلیل شود. تمامی مقادیر باید با بازه اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شوند،

- خطای اندازه‌گیری مربوط به هر آزمایش به صورت جداگانه باید ارزیابی شود. این خطا شامل اثرات ترکیبی تمام اندازه‌گیری‌های فشار و تغییر شکل می‌باشد،
- برای هر رشته آزمایش مشابه، مدول تغییر شکل متوسط، دامنه تغییر و انحراف استاندارد باید با محدوده اطمینان ۹۵ درصد به عنوان کمینه محاسبه شود،
- درصورت تناسب، متوسط گروه‌ها باید برای تعیین این‌که آیا تفاوت‌ها و یا همبستگی مشاهده شده بین گروه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند، مقایسه شوند.

۳-۴-۸-۶- پیوست‌ها

پیوست ۱- منحنی فشار – تغییر شکل برای هر آزمایش باید ارائه شود.

پیوست ۲- یک سری فرم کامل شامل جداول داده‌ها، جدول‌های (۳-۱) و (۳-۲) برای هر آزمایش باید در پیوست قرار داده شود.

۳-۴-۸-۷- دقت نتایج

باتوجه به طبیعت سنگ، انجام و تکرار این آزمایش بر روی نمونه‌های کاملا یکسان با در نظر گرفتن هزینه و زمان امکان‌پذیر نیست. هرگونه خطا و عدم قطعیت نتایج، ممکن است مربوط به آزمایش کننده و یا نمونه‌های مورد آزمایش باشد. باتوجه به این‌که جهت تعیین دامنه نتایج به‌دست آمده هیچ‌گونه مرجعی در دسترس نیست، میزان دقت نتایج به‌دست آمده امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۳-۴-۹- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح‌اند، به شرح زیر می‌باشند:

- از این روش آزمایش می‌توان برای تعیین تنش‌های برجا نیز استفاده کرد،
- این آزمایش را می‌توان تا فشار ۲۰ مگاپاسکال افزایش داد،
- این آزمایش داخل بخش کم و بیش دست نخورده سنگ انجام می‌شود،
- درجه ناهمگونی توده سنگ نیز مشخص می‌شود،
- در توده سنگ‌های حاوی عوارض زمین‌شناسی نامساعد، در صورت بالا بودن تنش اولیه، حفر شیار آزمایش مشکل بوده و توصیه نمی‌شود،
- معمولا جک‌های تخت را نمی‌توان پس از آزمایش بازیابی کرد،
- معمولا دامنه اندازه‌گیری‌ها از ۱۰ میلی‌متر کم‌تر می‌باشد،
- درحالتی که چند شیار در کنار یکدیگر حفر شده و هم‌زمان مورد آزمایش قرار می‌گیرند، این نکته حایز اهمیت است که شیارها نباید با یکدیگر تداخل کنند،

- معمولا برای جلوگیری از کج شدن دستگاه برش، از سنگ‌دوزهای مهاری استفاده می‌شود. این مهاری‌ها نباید باعث دست‌خوردگی سطح مورد آزمایش شوند.

۳-۵- دستورالعمل تعیین تنش بر جا در سنگ با استفاده از روش شکست هیدرولیکی

۳-۵-۱- هدف

با انجام این آزمایش می‌توان میدان تنش برجا در سنگ را با روش شکست هیدرولیکی تعیین نمود. این دستورالعمل طبق دستورالعمل استاندارد ASTM D 4645 [۲] تدوین شده است. شکست هیدرولیکی تنها روشی است که برای اندازه‌گیری تنش بر جا در اعماق بیش از ۵۰ متر به طور گسترده استفاده می‌شود. این روش در گمانه‌های حفر شده با هر قطری قابل انجام است. مقادیر محاسبه شده براساس واحد SI به عنوان واحد استاندارد آزمایش در نظر گرفته می‌شود.

۳-۵-۲- اهمیت و موارد استفاده

۳-۵-۲-۱- موارد استفاده

روش شکست هیدرولیکی را می‌توان مانند دیگر روش‌های اندازه‌گیری تنش، مانند روش مغزه‌گیری محیطی در چال‌های کم عمق مورد استفاده قرار داد. مزیت این روش آن است که بر خلاف تکنیک‌های مغزه‌گیری محیطی که بر روی ناحیه‌ای به ابعاد کوچک اندازه‌گیری صورت می‌گیرد، میانگین تنش‌ها بر روی چند مترمربع (ابعاد شکست هیدرولیکی القا شده) به دست می‌آید.

۳-۵-۲-۲- محدودیت‌ها

محدودیت‌های این آزمایش به قرار زیر می‌باشند:

- عمق محل اندازه‌گیری به عمق گمانه آزمایش محدود می‌شود،
- در حال حاضر نتایج روش شکست هیدرولیکی تنها زمانی می‌تواند برای بیان مقادیر تنش بر جا بیان شود که گمانه کم و بیش به موازات یکی از سه مولفه تنش‌های اصلی برجا باشد. چنان‌چه دلیلی بر خلاف آن وجود نداشته باشد، گمانه قائم، موازی یکی از مولفه‌های تنش اصلی فرض می‌شود،
- زمانی که تنش اصلی موازی با محور گمانه، تنش اصلی کمینه نباشد، تنها دو تنش اصلی دیگر را می‌توان به‌طور مستقیم از آزمایش تعیین کرد. اگر تنش کمینه به موازات محور گمانه باشد، ترک‌های موازی و عمودی با محور گمانه که گاهی اوقات توسط آزمایش ایجاد می‌شود امکان تعیین هر سه تنش اصلی را فراهم می‌کند،
- بدترین حالت این است که شکست ایجاد شده در راستای خارج از گمانه تغییر جهت بدهد، در این‌صورت از دیواره گمانه نمی‌توان برای تعیین تنش استفاده کرد.

۳-۵-۳- اصطلاحات کلیدی

واژه شکست هیدرولیکی که در این دستورالعمل برای تعیین تنش بر جا استفاده می‌شود به مفهوم شکستن سنگ توسط فشار سیال به‌منظور تغییر خصوصیات سنگ مانند نفوذپذیری و تخلخل می‌باشد.

۳-۵-۳-۱- تشریح اصطلاحات

اصطلاحات مخصوص این دستورالعمل به قرار زیر می‌باشند:

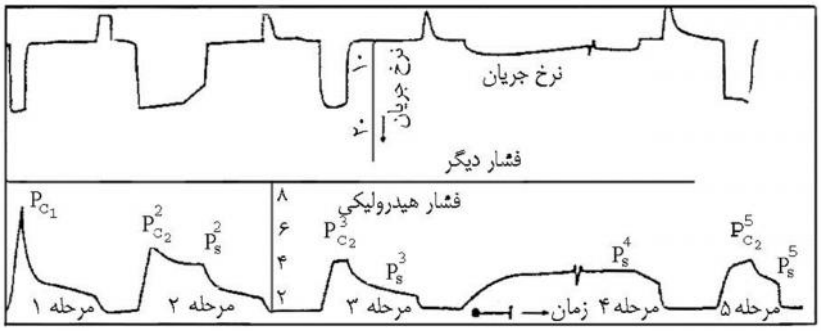
- فشار شکستگی[1] (بحرانی): فشاری که لازم است تا شکست هیدرولیکی در توده سنگ مورد آزمایش صورت بگیرد،
- تنش برجا: تنش بر جای زمین، اندازه‌گیری شده در محل می‌باشد،
- فشار شکستگی ثانویه[2] (بازگشایی ترک): فشار مورد نیاز برای باز کردن مجدد ترک‌های ایجاد شده پیشین، پس از این‌که فشار به شرایط اولیه‌اش باز می‌گردد،
- فشار محبوس[3]: فشاری که پس از بسته شدن درزهای هیدرولیکی ایجاد شده در پایان مرحله پمپاژ باقی می‌ماند،
- تنش‌های اصلی عمودی و افقی: سه تنش اصلی بر جا که یک تنش در جهت عمودی و دو تنش دیگر در صفحه افقی فرض می‌شوند،
- محدوده آزمایش: بخشی از گمانه که توسط پکر جدا شده و تحت فشار هیدرولیکی قرار می‌گیرد.

۳-۵-۴- روش آزمایش

بخش مورد آزمایش گمانه برای اعمال فشار توسط دو پکر بسته می‌شود. فشار سیال در فاصله بین دو پکر با استفاده از عمل پمپاژ تا زمان رویداد شکست در دیواره گمانه، افزایش می‌یابد. سپس پمپاژ متوقف شده و اجازه داده می‌شود تا فشار سیال در محدوده آزمایش پایدار شود. پس از آن، فشار تا سطح فشار آب منفذی سنگ کاهش می‌یابد و مرحله اعمال فشار با حفظ همان آبگذری، چند بار تکرار می‌شود. سیکل‌های فشار اضافی دیگری نیز با مقادیر متفاوت آبگذری تکرار می‌شود.

مقادیرتنش‌های اصلی با قرائت سیکل‌های مختلف محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از جهت درزهای ایجاد شده، جهت تنش‌های اصلی مشخص می‌شود. نمونه‌ای از نمودار فشار – زمان، میزان جریان – زمان برای یک محدوده آزمایش در شکل (۳-۱۵) ارائه شده است.

1- Breakdown Pressure
2- Fracture Reopening Pressure
3- Shut-in Pressure



شکل ۳-۱۵- نمونه‌ای از نتایج فشار – زمان، میزان جریان – زمان در ضمن شکست هیدرولیکی

۳-۵-۵- فرضیات

این آزمایش با توجه به فرضیات زیر انجام می‌گیرد:

- سنگ مورد آزمایش با رفتار الاستیک خطی، هموژن و ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. هرگونه تغییر در این فرضیات باعث تغییر در نتایج می‌شود،
- گمانه‌های عمودی اساسا موازی یکی از تنش‌های اصلی در نظر گرفته می‌شود. زیرا با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و اندازه‌گیری تنش در اکثر موارد، ثابت شده است که یکی از تنش‌های اصلی به صورت عمودی تا نزدیک به عمود است،
- تعیین تنش بر جا با استفاده از روش شکست هیدرولیکی ممکن است به علت وجود تخلخل در بافت سنگ، ترک‌های طبیعی سنگ، وجود فضاهای زیرزمینی نزدیک به تغییرات موضعی در میدان تنش پیچیده شود.

۳-۵-۶- تجهیزات

ویژگی‌های تجهیزات مورد نیاز این آزمایش به شرح زیر می‌باشند:

- سه‌پایه[1] یا دکل حفاری: وجود تجهیزات برای پایین و بالا بردن و ابزار آزمایش شکست هیدرولیکی در داخل چال آزمایش ضروری است. برای سهولت در پایین و بالا آوردن تجهیزات شکست هیدرولیکی، سه پایه یا دکل حفاری در بالای چال نصب می‌شود. زمانی که لوله‌های فشار قوی یا لوله‌های حفاری برای پایین بردن ابزار استفاده می‌شود، به‌کارگیری دکل حفاری با یک جرثقیل و بالابر مناسب که قادر به بالا بردن وزن مجموعه لوله و ابزار باشد، ضروری است،
- زمانی که از سامانه شیلنگ انعطاف[2]پذیر برای آزمایش شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود، یک سه‌پایه با طراحی مناسب برای تحمل وزن تجهیزات آزمایش، خطوط لوله و کابل‌ها به‌کار می‌رود،

1- Tripod or Drilling Rig
2-Wire Line-Flexible Hose

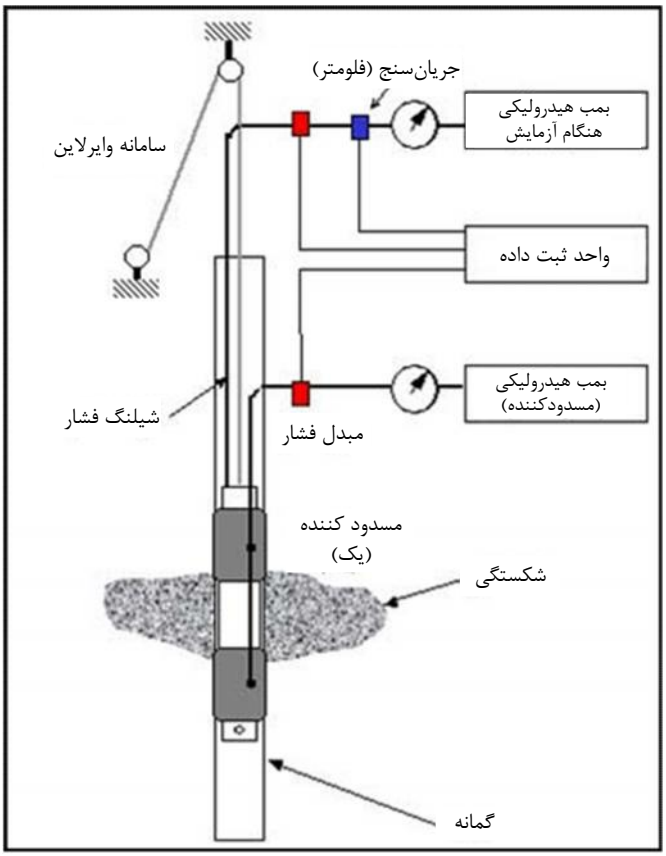
- پکر منبسط شونده[1]: آب‌بندی گمانه توسط دو پکر لاستیکی منبسط شونده صورت می‌پذیرد که در فواصل معادل با دست کم ۶ برابر قطر گمانه از همدیگر قرار دارند،
- لوله یا شیلنگ فشار قوی: عمل انبساط پکرها توسط لوله (یا میله حفاری) یا شیلنگ فشار قوی یا هر دو آن‌ها صورت می‌پذیرد. شیلنگ یا لوله‌گذاری انجام شده به انتهای پمپ یا مخزن فشار (با قابلیت ایجاد فشار تا ۰/۷۰ مگاپاسکال و جریان صفر تا ۲۵ لیتر بر دقیقه) متصل می‌شود و در سمت دیگر به پکرها و محدوده مورد آزمایش متصل می‌شود (شکل ۳-۱۶). تجارب موجود انجام آزمایش در انواع مختلف سنگ با نفوذپذیری‌های متفاوت را فراهم می‌آورد،
- وسایل اندازه‌گیری فشار و جریان‌سنج: برای قرائت فشار در محدوده اعمال آن در سطح یا عمق از وسایل اندازه‌گیری فشار (۱۰ تا ۷۰ مگاپاسکال) استفاده می‌شود. در برخی دستگاه‌ها فشار پکر نیز همانند فشار آزمایش ثبت می‌گردد. یک جریان‌سنج برای اندازه‌گیری میزان سیال وارد شده به محدوده آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تجهیزات ثبت فشار و جریان به یک سیستم آنالوگ چندکاناله (وابسته به زمان) متصل است تا ثبت پیوسته داده‌ها به‌صورت دایم صورت پذیرد و همچنین ثبت رایانه‌ای داده‌های حاصل از آزمایش برای انجام تحلیل بعدی انجام می‌شود،

- پکر شکل‌پذیر: رایج‌ترین روش برای ثبت درزهای هیدرولیکی، استفاده از پکر شکل‌پذیر است. سطح خارجی این پکر از نوع لاستیک بسیار نرم و شکل‌پذیر است که قابل انبساط می‌باشد. با باد کردن این پکر در محدوده آزمایش، شکل و جهت درزه‌های هیدرولیکی ایجاد شده روی آن نقش می‌بندد. برای تعیین امتداد و شیب اثر باقی‌مانده از شکاف‌های هیدرولیکی ایجاد شده می‌توان از تجهیزات مغناطیسی برداشت دیواره گمانه یا تجهیزات مشاهده‌ای داخل گمانه استفاده کرد.
- نمایشگر تلویزیونی داخل گمانه: روش جایگزین دیگری برای پکر شکل‌پذیر، نمایشگر تلویزیونی داخل گمانه‌ای می‌باشد که با استفاده از ابزار سنجش صوتی (اندازه‌گیری سرعت صوت به هنگام رفت و برگشت) شیب و جهت شکستگی را در دیواره گمانه مشخص می‌کند. این وسیله بسیار سریع‌تر از پکر منبسط شونده، شیب و جهت شکستگی را تعیین می‌کند زیرا قرائت شکستگی‌ها در طی یک مرحله رفت و برگشت به داخل گمانه صورت می‌پذیرد، اما پکرهای منبسط شونده پس از انجام هر آزمایش و پیش از آزمایش بعدی باید جایگزین شوند.

1- Straddle Packer

- از معایب این دستگاه آن است که هزینه خرید یا اجاره آن تا حد قابل ملاحظه‌ای گران است. این دستگاه نمی‌تواند ترک‌های هیدرولیکی بسته شده بعد از مرحله اعمال فشار را شناسایی نماید و اشکال دیگر این است که گمانه باید در طی برداشت پر از آب باشد،
- کارکنان آزمایش: انجام آزمایش شکست هیدرولیکی ممکن است از نقطه‌ای به نقطه دیگر و از یک نوع سنگ به نوعی دیگر تغییر کند. تصمیم‌گیری سریع که اغلب در شرایط محل مورد نیاز می‌باشد، می‌تواند باعث تغییر در نتایج دریافتی از آزمایش به‌طور کامل آگاه بوده و تجربه انجام آزمایش در انواع مختلف سنگ، اعماق و نقاط متفاوت را داشته باشد،
- کارکنان حفاری: حفاری با کیفیت خوب برای حفظ امتداد قائم چال و حفظ مقطع نزدیک به دایره آن از اهمیت بالایی برخوردار است،
- تایید تجهیزات مورد استفاده: تایید تجهیزات برای اجرای آزمایش، شامل واسنجی وسایل و سامانه‌های اندازه‌گیری است.



شکل ۳-۱۶- طرح شماتیک از مجموعه گمانه و تجهیزات سطحی برای شکست هیدرولیکی

۳-۵-۷- روش انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- حفاری گمانه در بیش‌تر موارد به‌صورت عمودی و تا عمق مورد نظر صورت می‌پذیرد. برای انجام حفاری، استفاده از سرمته مغزه‌گیر الماسه توصیه می‌شود. این انتخاب باعث می‌شود که دیواره چال صاف و به شکل دایره‌ای یکنواخت شود. قطر گمانه بستگی به ابعاد تجهیزات آزمایشی دارد،

ب- آزمایش باید در مناطق سالم و بدون شکستگی انجام شود. برای شناسایی این‌گونه مناطق می‌توان از مغزهای به‌دست آمده کمک گرفت. چنان‌چه مغزه‌گیری انجام نشده باشد، می‌توان از وسایل برداشت گمانه (نظیر مشاهده‌گر گمانه‌ای، قطرسنج، چگالی‌سنج و ...) و یا لاگ‌های ژئوفیزیکی استفاده کرد،

ج- به‌منظور آب‌بندی محدوده آزمایش، سامانه پکر به عمق مورد نظر فرستاده می‌شود. فشار هیدرولیکی طوری اعمال می‌شود که پکرها منبسط شده و به دیوارهای گمانه بچسبند. اعمال فشار با آب و توسط یک پمپ فشار قوی که در سطح قرار دارد و از طریق لوله‌های فشار قوی به پکر صورت می‌گیرد،

د- به‌منظور اطمینان از وجود هرگونه مانع در مسیر عبور تجهیزات آزمایش، توصیه می‌شود که گمانه پیش از انجام آزمایش کاملا پاک‌سازی شود،

هـ- برای این‌که پکرها به‌خوبی به دیوار مهار شوند، معمولا فشار آب داخل پکر را تا حد ۳ مگاپاسکال بالا برده و فشار هیدرولیکی با سرعت جریان ثابت به محدوده گمانه حد فاصل پکرها اعمال می‌شود. سرعت جریان ممکن است از یک محل به محل دیگر تغییر کند و اغلب به نفوذپذیری سنگ بستگی دارد (هرچه نفوذپذیری بالاتر باشد، نرخ جریان بالاتر خواهد بود).

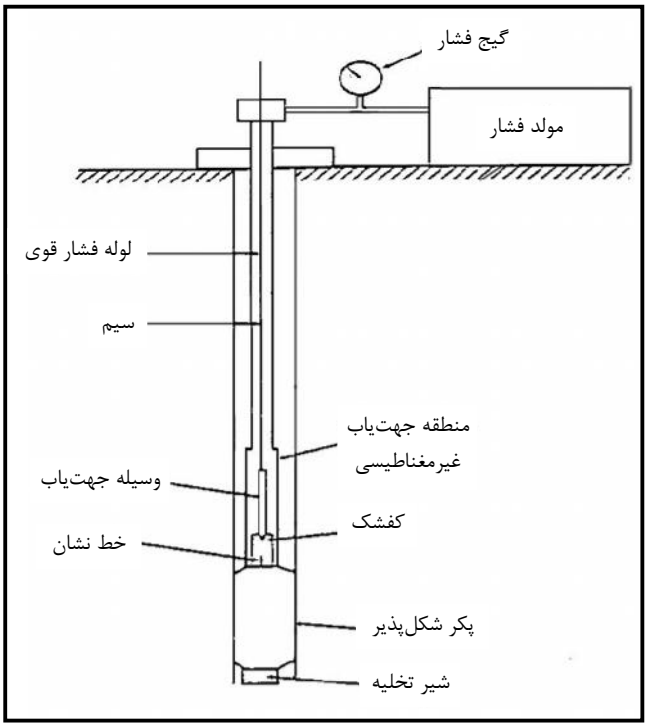
اصل کلی، بررسی اثر شکست هیدرولیکی در مدت یک دقیقه یا از شروع افزایش فشار می‌باشد. در زمان اعمال فشار، میزان فشار پکر در حدود ۲ مگاپاسکال بیش‌تر از فشار بین دو پکر (فشار آزمایش) تنظیم می‌شود تا از عدم وجود نشت اطمینان حاصل شود. فشاری که باعث ایجاد شکست هیدرولیکی در سنگ می‌شود به عنوان فشار شکستگی (فشار بحرانی) در نظر گرفته می‌شود. اگر در این لحظه پمپاژ بدون تخلیه خطوط فشار متوقف شود، فشار به صورت ناگهانی افت کرده و به مقدار پایین‌ترین فشار می‌رسد. فشار در این حالت فشار محبوس نامیده می‌شود. با تکرار مرحله یاد شده بالا با سرعت جریان مشابه، فشار شکستگی ثانویه (یعنی مقدار فشار لازم برای باز شدن مجدد یک شکست هیدرولیکی) و مقادیر مضاعف فشار محبوس به‌دست می‌آید،

و- در کلیه مراحل اعمال فشار، منحنی‌های فشار – زمان و سرعت جریان – زمان توسط آزمایش بعدی به گمانه دیگری منتقل شوند،

ز- متداول‌ترین ابزاری که برای سنجش جهت ترک هیدرولیکی استفاده می‌شود، پکر شکل‌پذیر (شکل ۳-۱۷) می‌باشد. پس از شکست هیدرولیکی، پکر روی میله حفاری یا سیم بکسل تا فاصله آزمایش پایین برده شده و با

فشاری بیش‌تر از فشار ثانویه یا فشار بحرانی متورم می‌شود. به این‌ترتیب پکر به آرامی شکست هیدرولیکی را باز نموده و پوشش لاستیکی نرم را قادر می‌سازد تا شکل شکاف را به‌خود بگیرد،

ح- یک کمپاس مغناطیسی یا ژیروسکوپ روی پکر نصب شده و آزیموت را در نقطه‌ای ثابت تعیین می‌کند. پس از گذشت ۳۰ تا ۶۰ دقیقه از اعمال فشار، پکر شکل‌پذیر تخلیه شده و از گمانه بیرون آورده می‌شود. سپس شکل مهر شده روی پکر، ترسیم شده و امتداد آن نسبت به نقطه ثابت روی پکر محاسبه می‌شود، به گونه‌ای می‌توان آن‌را با جهت شمال نیز تطبیق داد.



شکل ۳-۱۷- تجهیزات پیشنهادی داخل گمانه‌ای و سطحی برای اعمال فشار در شکست هیدرولیکی

۳-۵-۸- محاسبات

- کلیات: محاسبه تنش‌های اصلی بر جای ارائه شده، معمولا برای گمانه‌های قائم استفاده می‌شود. داده‌های مربوط به تغییرات فشار – زمان همانند شکل (۳-۱۵) برای کسب نتایج آزمایش مورد نیاز در محاسبه استفاده می‌شود. آگاهی از وضعیت شکست هیدرولیکی در دیواره گمانه برای استفاده مناسب از معادلات و تفسیر صحیح محاسبات ضروری است.
- شکست‌های قائم: اگر تنش عمودی، تنش اصلی کمینه نباشد، نتایج آزمایش به صورت ترک‌های عمودی است. در این صورت تنش عمودی تنها از تخمین وزن روباره با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i D_i \qquad (۲۰-۳)$$

که در آن:

σ_v = تنش عمودی (گیگاپاسکال)،

D_i = ضخامت هر لایه (متر)،

n = تعداد لایه‌ها،

γ_i = چگالی متوسط لایه‌های سنگی در بالای افق آزمایش (کیلونیوتن برمترمکعب).

- تنش‌های افقی: دو تنش اصلی افقی از روابط (۳-۲۱) و (۳-۲۲) به‌دست می‌آیند. لازم به یادآوری است، برای این‌که فشارهای قرائت شده در محل آزمایش از دقت کافی برخوردار باشند بهتر است برای اعمال فشار از آب استفاده شود تا افت فشار در اثر اصطکاک به کم‌ترین مقدار برسد و قابل صرف‌نظر کردن باشد.

$$\sigma_h = P_s \qquad (۳-۲۱)$$

$$\sigma_H = T + 3\sigma_h - P_{c1} - P_0 \qquad (۳-۲۲)$$

P_s = فشار محبوس در تراز انجام آزمایش (کیلوپاسکال)،

σ_H = تنش بر جای افقی بیشینه (کیلوپاسکال)،

σ_h = تنش بر جای افقی کمینه (کیلوپاسکال)،

T = مقاومت کششی سنگ مورد آزمایش (کیلوپاسکال)،

P_0 = فشار آب زیرزمینی در محل انجام آزمایش (کیلوپاسکال)،

P_{c1} = فشار شکستگی (کیلوپاسکال).

- فشار شکستگی (P_{c1}) متناظر با نقطه اوج منحنی فشار – زمان در اولین سیکل بارگذاری می‌باشد.

به دنبال شکست سنگ، ترک‌ها باز می‌شود و نفوذ ناگهانی سیال به این ترک‌ها باعث افت قابل ملاحظه فشار می‌شود. فشار محبوس برابر با مقدار فشار پس از توقف پمپاژ است که به‌دلیل بسته شدن این ترک‌ها ایجاد می‌شود. فشار محبوس مرحله اول به‌دلیل این‌که شکاف‌های هیدرولیکی ایجاد شده گسترش محدودی دارد، دارای مقدار بالاتری نسبت به سایر مراحل می‌باشد.

در سیکل‌های بارگذاری بعدی، اعمال فشار تا مدت زمان کوتاهی پس از بازشدن ترک‌ها (یک دقیقه) ادامه می‌یابد و ترک‌ها به‌خوبی گسترش می‌یابند و فشار محبوس در این حالت برابر با تنش افقی کمینه می‌باشد و تنها درصورتی‌که ترک‌های هیدرولیکی توسعه یافته و درزهای باز موجود را قطع کرده و جریان آب پکرها را دور بزند، فشار محبوس کم و بیش از یک سیکل تا سیکل بعدی ثابت می‌ماند،

- به‌طور کلی مقاومت کششی (T) یک پارامتر ثابت نمی‌باشد و با نرخ بارگذاری، اندازه نمونه و اندازه ذرات تشکیل دهنده سنگ و نوع آزمایش تغییر می‌کند.

هیچ روش مستقیمی برای محاسبه مقاومت کششی در گمانه وجود ندارد. با این فرض که پس از رسیدن فشار به حد فشار منفذی اولیه، شکاف هیدرولیکی ایجاد شده به‌طور کامل بسته می‌شود، در معادله (۳-۲۲) می‌توان به‌جای P_{c1} فشار لازم برای باز شدن مجدد شکستگی در مرحله P_{c2} را قرار داد. بنابراین:

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_{c2} - P_0 \qquad (۲۳-۳)$$

- تنها تفاوت معادلات (۳-۲۲) و (۳-۲۳) این است که در معادله (۳-۲۳) فرض شده است که $P_{c2} = P_{c1} - T$ می‌باشد، زیرا مقاومت کششی سنگ بعد از شکست (که در سیکل اول اتفاق افتاده است) برابر صفر است.

اگر ترک‌ها کاملا بسته شود، شیب منحنی فشار – زمان عینا برابر اولین سیکل بارگذاری است، تا زمانی که ترک‌ها باز شده و شیب تغییر کند. نقطه تغییر شیب P_{c2} در نظر گرفته می‌شود.

اگر ترک‌ها کاملا بسته نشوند، شیب منحنی فشار زمان، معادل اولین سیکل بارگذاری نخواهد بود و روش تعیین غیرمستقیم مقاومت کششی قابل استفاده نیست.

توصیه می‌شود که مقدار P_{c2} فقط از سیکل دوم بارگذاری که در آن ترک‌های هیدرولیکی تازه بوده و فرسایش نیافته‌اند، به‌دست آید،

- جهت تنش افق σ_H، از امتداد ترک قائم و جهت تنش افقی σ_h، از جهت عمود بر ترک قائم به‌دست می‌آید.

جهات یاد شده بر پایه فرضیات تایید شده اجرایی است که معمولا ترک‌های ایجاد شده در امتداد کم‌ترین مقاومت و جهت عمود بر کم‌ترین تنش می‌باشند.

– ترک‌های قائم و افقی: وقتی که σ_v تنش اصلی کمینه باشد، جهت شکست هیدرولیکی اطراف گمانه آزمایش افقی می‌باشد. با وجود این، در دیواره گمانه، توزیع تنش در توده سنگ در برگیرنده باعث گسترش ترک قائم در جهت σ_H خواهد شد. بنابراین ترک هیدرولیکی اولیه قائم خواهد بود و در اولین سیکل، رفتار منحنی فشار - زمان همانند شکست‌های قایم خواهد بود. در سیکل‌های بعدی ترک‌ها در جهت عمود بر تنش اصلی کوچک‌تر گسترش می‌یابند، بدین ترتیب به یک ترک افقی تبدیل می‌شوند. فشار محبوس در این حالت به‌مقدار تنش قائم نزدیک می‌شود.

استفاده از پکر شکل‌پذیر یا لاگ مشاهده‌گر صوتی داخل گمانه، وجود دو ترک افقی و قائم را تایید خواهد کرد. این وضعیت ترک‌ها، امکان محاسبه مستقیم هر سه تنش اصلی را فراهم می‌سازد.

$$\sigma_h = P_{s1} \qquad (۲۴-۳)$$

$$\sigma_H = T + 3\sigma_h - P_{c1} - P_0$$

یا

$$\sigma_v = P_{s2} \qquad (۲۵-۳)$$

$$\sigma_H = 3\sigma_H - P_{c2} - P_0$$

که در آن:

P_{s1} = فشار محبوس اول (کیلو پاسکال)،

P_{s2} = فشار محبوس دوم (کیلو پاسکال).

- اگر مقدار سیال پمپ شده به داخل شکاف طوری محاسبه شود که گسترش شکاف بیش از ۳ تا ۴ برابر قطر چال نشود، شکاف قائم و فشار شکستگی آن برای سیکل دوم تا سوم ثابت باقی می‌ماند. پس از آن مقدار فشار شکستگی به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد (گاهی اوقات برای ۲ تا ۳ سیکل) تا وقتی که به مقدار ثابت برسد که این حالت هم زمان با گسترش ترک‌های افقی می‌باشد.

– ترک‌های افقی: زمانی که σ_v تنش اصلی کوچک‌تر باشد و دیواره گمانه دارای عوارضی مانند سطوح لایه‌بندی، جدایش و دیگر ناپیوستگی‌های افقی باشد، تا حدی امکان گسترش ترک‌های افقی وجود دارد. در این صورت تنها می‌توان σ_v را از طریق آزمایش شکست هیدرولیکی محاسبه کرد.

$$\sigma_v = P_s \qquad (۲۶-۳)$$

تنها ارزیابی کمی از تنش‌های افقی از معادله (۳-۲۷) به‌دست خواهد آمد:

$$\sigma_H \geq \sigma_{0h} \geq \sigma_v (= P_s) \qquad (۲۷-۳)$$

– ترک‌های کششی مورب: گاهی‌اوقات شکاف هیدرولیکی ممکن است مورب باشند، این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که محور گمانه نسبت به جهت‌های اصلی انحراف داشته باشند. اگر صفحه شکست کم‌تر از ۱۵ درجه از وضعیت عمودی منحرف شود، می‌توان از معادلات شرح داده شده در بخش‌های پیشین برای تعیین تقریبی تنش‌های اصلی استفاده کرد.

یک روش دقیق به‌دست آوردن تنش‌های برجا توسط Cornet & Valette (۱۹۸۴) پیشنهاد شده است. این روش نیازمند دست کم ۷ آزمایش موفقیت‌آمیز در گمانه می‌باشد. محاسبه تمام درایه‌های تانسور تنش با استفاده از شیب و امتداد شکستگی‌های ایجاد شده در این آزمایش‌ها و همچنین فشارهای محبوس حاصل و با فرض افزایش خطی تنش نسبت به عمق انجام می‌گیرد.

۳-۵-۹- گزارش نتایج

کم‌ترین اطلاعاتی که باید در گزارش این آزمایش آورده شود به‌شرح زیر می‌باشد. بدیهی است که هرگونه اطلاعات تکمیلی را نیز می‌توان به موارد زیر افزود:

۳-۵-۹-۱- کلیات

شامل:

– اهداف آزمایش، به‌عنوان مثال برای طراحی تونل یا مغار، طراحی پوشش تونل تحت فشار، مشخص کردن ساختارهای تکتونیکی،

– جزییات محل آزمایش شامل نقشه توپوگرافی و عرض و طول جغرافیایی،

- ذکر دلایل انتخاب محل آزمایش،
- جزییات گمانه آزمایش مانند شیب چال، قطر، عمق، روش حفاری، میزان بازیافت مغزه، سطح آب در چال و تغییرات ناگهانی در فشار آب در صورت وجود،
- زمین‌شناسی محل آزمایش شامل خلاصه‌ای از زمین‌شناسی محلی، نوع سنگ یا سنگ‌های موجود در گمانه آزمایش، زمین‌شناسی تفصیلی در محدوده مورد آزمایش و قسمت‌های بالاتر و پایین‌تر از آن، توصیف خصوصیات کلی زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، دسته درزه‌ها، چین خوردگی‌ها و خصوصیات تکتونیکی محل آزمایش.

۳-۵-۹-۲- روش انجام آزمایش

- توصیف دقیق تجهیزات و چگونگی آن شامل شکل و نام قطعه، شماره مدل و مشخصات کلی قطعات اصلی و تاریخ آخرین واسنجی،
- توصیف دقیق روشی که برای انجام آزمایش به‌کار گرفته شده است و شامل مقادیر جریان، تعداد سیکل‌های اعمال فشار و سرعت جریان در هر سیکل. همچنین تعداد دفعات انجام آزمایش و دلایل انتخاب عمق توضیح داده شود،
- اگر دستگاه‌های انجام آزمایش یا روش اجرای آن، متفاوت از موارد ذکر شده در این استاندارد می‌باشد، باید هرگونه تغییر، دلیل و شرح اثرات آن بر انجام آزمایش بیان شود.

۳-۵-۹-۳- زمینه تئوری انجام آزمایش

شرح و توصیف تمامی معادلات به‌کار برده شده در آزمایش. هرگونه تغییری در معادلات باید به دقت بررسی شده و دلایل آن به‌دقت ذکر شود.

۳-۵-۹-۴- نتایج

آزمایش، موارد زیر را در برمی‌گیرد:

- منحنی‌های فشار – زمان و جریان سیال- زمان همراه با جدولی شامل شماره آزمایش، عمق، فشار منفذی، شماره سیکل، فشار شکست، فشار لازم برای باز شدن مجدد ترک‌ها و شکستگی و مقدار سیال جاری شده در چال باید در پیوست ارائه شود. روش محاسبه فشارهای مختلف مورد نیاز برای تعیین تنش‌های برجا باید به روشنی توضیح داده شود،
- نتایج ثبت شده انحراف ترک با یک جدول شامل شماره آزمایش، عمق، شیب و جهت شکاف هیدرولیکی همراه با پیوستی از اثرات شکست بر روی پکر شکل‌پذیر یا عکس‌هایی از لاگ نمایش‌گر صوتی (بسته به روش آزمایش) تهیه شود،

- تنش‌های اصلی قائم و افقی با استفاده از محاسبات و جدولی شامل شماره آزمایش، عمق آزمایش، فشار منفذی، فشار بحرانی انتخابی یا فشار لازم برای باز کردن مجدد ترک‌ها یا هر دوی آن‌ها، فشار محبوس و مقاومت کششی (در صورت وجود) همراه با تنش قائم، تنش افقی کمینه، تنش افقی بیشینه محاسبه شده همراه با جهت آن برای هر آزمایش نیز ارائه شود،
- ارائه نموداری که شامل مقدار و جهت تنش‌های اصلی (برای مثال، به‌عنوان تابعی از عمق و به‌صورت نمودارهای استریو گرافیک) باشد،
- اطلاعات دیگری که می‌توان به این بخش افزود، عبارتند از: سطح تنش در هریک از ساختارهای سنگی آزمایش شده، تغییرات تنش با عمق، رابطه تنش اندازه‌گیری شده با ویژگی‌های زمین‌شناسی محل انجام آزمایش شامل، انواع گسل، رابطه بین تنش اندازه‌گیری شده با گسل موجود در محل آزمایش با زمین‌لرزه‌های محل.

۳-۵-۹-۵- تخمین خطا

تخمین خطا، شامل موارد زیر است:

- ارزیابی خطای مربوط به صحت تجهیزات الکترونیکی و تصحیح مقادیر مختلف فشار مانند P_s، P_{c1} و P_{c2}،
- محاسبه اثر خطای مربوط به اندازه‌گیری در تنش‌های محاسبه شده و مقادیر خطا بر حسب فشار یا درصد یا هر دوی آن‌ها از روی مقادیر ارائه شده تنش.

۳-۵-۹-۶- دقت و میزان انحراف

به‌دلیل طبیعت مواد سنگی آزمایش شده توسط این روش، تهیه چندین نمونه که خواص فیزیکی یکنواختی داشته باشند امکان‌ناپذیر یا بسیار پرهزینه است. هرگونه تغییر مشاهده شده احتمالی در اطلاعات می‌تواند مربوط به تغییرات نمونه، اپراتور یا تغییرات آزمایشگاه باشد. مرجع قابل قبولی برای این روش آزمایش که دقت معتبری را پیشنهاد کند وجود ندارد. بنابراین میزان انحراف غیرقابل تعیین است.

۳-۵-۱۰- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح‌اند، به شرح زیر می‌باشند:

- افزودن دو پیوست به گزارش توصیه می‌شود که یکی از آن‌ها شامل کلیه اطلاعات محلی جمع‌آوری شده در ضمن آزمایش شکست هیدرولیکی یعنی، مقادیر اندازه‌گیری شده فشار - زمان، سرعت جریان سیال- زمان و گزارش دیگر. اطلاعات شامل داده‌های مربوط به شکاف‌های هیدرولیکی بر روی دیواره گمانه همراه با جهت شکست نسبت به شمال است،

- درصورتی‌که فشار در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود، با اضافه کردن فشار معادل ستون بین سطح و محل آزمایش به مقادیر اندازه‌گیری شده، فشار در عمق به‌دست می‌آید. هنگامی‌که آزمایش با فشار آب انجام می‌گیرد، فشار در اثر اصطکاک به کم‌ترین مقدار رسیده و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد،
- در برخی موارد، شکست ایجاد شده در سنگ دچار تغییر جهت ناگهانی می‌شود. در چنین حالتی نمی‌توان از شکستگی ایجاد شده برای تعیین تنش‌های برجا استفاده کرد،
- اگر محور گمانه نسبت به جهت تنش اصلی بیش از ۱۵ درجه انحراف داشته باشد، دقت نتایج به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت.

۳-۶- دستورالعمل اندازه‌گیری تنش برجا به روش آزمایش مغزه‌گیری محیطی با استفاده از کرنش‌سنج CSIR

۳-۶-۱- هدف

با انجام آزمایش مغزه‌گیری محیطی[1] با استفاده از محفظه[2] کرنش‌سنج[3] CSIR می‌توان مقدار تانسور تنش و تنش‌های اصلی و جهت آن‌ها را در یک عمق مشخص تعیین نمود. این دستورالعمل با استفاده از دستورالعمل ISRM [۲][4] تهیه شده است.

۳-۶-۲- اهمیت و موارد استفاده

یکی از پارامترهای مرتبط با طراحی سازه‌های زیرزمینی، مقدار تنش بر جای اولیه زمین در محدوده‌ی سازه می‌باشد. افزون بر آن، در برخی از طبقه‌بندی‌های توده سنگ نیاز به دانستن مقدار تنش زمین بوده و نیز این آزمایش ممکن است با اهداف تحقیقاتی نیز انجام شود. تنش بر جا به عوامل چندی از جمله میزان وزن طبقات فوقانی، گسل‌ها، چین‌خوردگی و ... بستگی دارد. مقدار تنش برجا به روش‌های مختلفی مانند روش جک تخت[5]، روش شکست هیدرولیکی[6]، زیرمغزه‌گیری[7] و مغزه‌گیری محیطی تعیین می‌شود. هرکدام از روش‌های یاد شده دارای مزایا و معایبی می‌باشد. کمیته ASTM و انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، هرکدام روش مخصوص به خود را برای انجام آزمایش مغزه‌گیری محیطی پیشنهاد نموده‌اند. روش پیشنهادی ISRM نسبت به روش ASTM ساده‌تر و تجهیزات کم‌تری را

1- Over Coring
2- Cell
3- Council for Scientific and Industrial Research
۴- اندازه‌گیری تنش بر جا در ایران به روش پیشنهادی ISRM در پروژه‌های نیروگاهی سد شهید عباسپور و تلمبه‌ی ذخیره‌ای سیاه بیشه انجام شده است.
5- Flat Jack
6- Hydraulic Fracturing
7- Under Ccoring

لازم دارد. در ایران برای انجام این آزمایش در سنگ، استفاده از روش‌های ISRM به‌دلیل وجود تجهیزات مورد نیاز و آشنایی با روش‌های اروپایی، معمول‌تر می‌باشد. با انجام این آزمایش در نقطه مورد نظر زیرزمین با اندازه‌گیری ۹ مقدار کرنش یا به‌عبارتی تانسور کرنش، تانسور تنش محاسبه خواهد شد. با داشتن تانسور تنش می‌توان تنش‌های اصلی در آن نقطه را محاسبه نمود. همچنین می‌توان جهت تنش‌های اصلی را مشخص نمود. با داشتن جهت تنش‌های اصلی، می‌توان نسبت تنش افقی به قائم (k) را تعیین کرد.

در این آزمایش عمق گمانه معمولا بین ۱۵ تا ۳۰ متر است. در اعماق بیش‌تر به دلیل مشکلاتی که معمولا در عملیات حفاری پیش می‌آید، انجام آن توصیه نمی‌شود. همچنین اجرای این آزمایش در سنگ‌های شکسته با فاصله کم‌تر از ۱۳ سانتی‌متر مشکل بوده و برای یافتن نتایج درست، اجرای چندین آزمایش لازم خواهد بود.

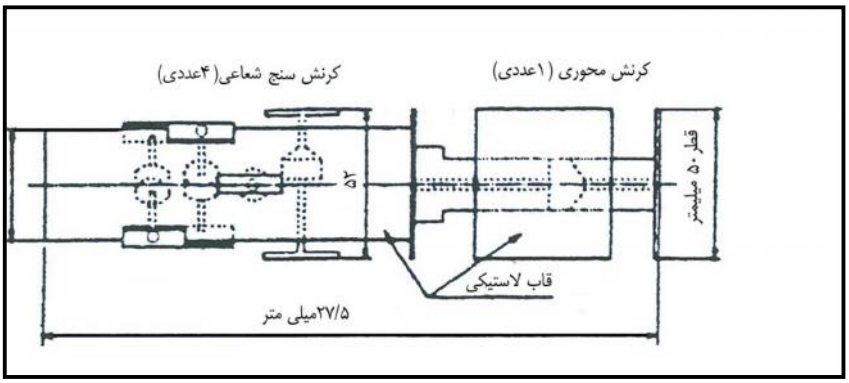
۳-۶-۳- تجهیزات

ویژگی‌های تجهیزات مورد نیاز این آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

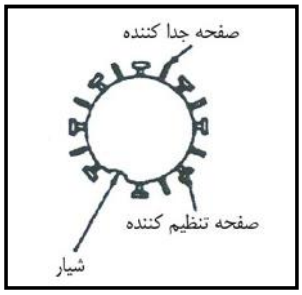
- تجهیزات حفاری: برای انجام عملیات حفر گمانه، نیاز به دستگاه حفاری و مته‌های مختلف زیر می‌باشد:
  - دستگاه حفاری مناسب برای حفر گمانه تا عمق مورد نظر همراه با مته‌های حفاری و پرداخت کننده و مغزه‌گیرهایی که قادر به حفاری و نمونه‌گیری با قطرهای ۸۶ میلی‌متر و یا بیش‌تر باشند،
  - مته‌های مغزه‌گیری با قطر ۳۸ میلی‌متر برای حفر چال پیش‌رو در انتهای گمانه،
  - چنان‌چه حفاری در فشاهای زیرزمینی انجام می‌شود تمهیدات لازم برای کنترل تخلیه هوا (اگزوز) و درصورتی‌که محیط گازدار باشد، ابزار کنترل جرقه باید فراهم شود.
- «سلول کرنش‌سنج» که توسط CSIR[1] در کشور آفریقای جنوبی طراحی و ساخته شده است، به‌صورت استوانه‌ای می‌باشد و دور آن سه دسته کرنش‌سنج با زاویه ۱۲۰° نسبت به هم قرار دارند. هر دسته کرنش‌سنج از سه تا چهار کرنش‌سنج تشکیل شده است که به‌صورت ضربدری روی هم قرار گرفته‌اند. این کرنش‌سنج‌ها دست‌کم ۹ کرنش را در جهات مختلف اندازه‌گیری می‌نمایند. به‌جهت محاسبات بعدی قرائت، دست کم ۶ کرنش‌سنج لازم می‌باشد. ۳ قرائت دیگر به‌منظور کنترل و یا درصورت از بین رفتن بعضی از قرائت‌ها استفاده می‌شوند. در شکل (۳-۱۸) نحوه قرارگیری کرنش‌سنج‌های CSIR نشان داده شده است [۱]،
- تجهیزات استقرار به منظور آماده‌سازی گمانه و نصب سلول کرنش در داخل چال پیش‌رو لازم می‌باشد. همچنین مواد پاک‌کننده برای پاکسازی و خشک کردن دیواره چال باید در دسترس باشد،
- یک توپی برای بستن و آب‌بندی کردن چال پیش‌رو، در هنگام مغزه‌گیری محیطی، لازم می‌باشد.
- دستگاه الکتریکی جهت قرائت کرنش‌سنج‌ها با دقت اندازه‌گیری برابر با ۵×۱۰^{-۱} میلی‌متر، لازم است.

1- Council for Scientific and Industrial Research

- مواد حلال برای آماده‌سازی محل چسبانیدن کرنش‌سنج‌ها و چسب‌های مخصوص برای اتصال کرنش‌سنج‌ها به دیواره سنگی چال، باید در دسترس باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۸- الف- نحوه قرارگیری سه دسته کرنش‌سنج در پیرامون محفظه ب- یک دسته کرنش‌سنج تا چهار عددی

۳-۶-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی و اطلاعات گمانه‌های اکتشافی و نحوه قرارگیری لایه‌ها، محل مناسب گمانه در داخل گالری یا دستک مشخص می‌شود. گمانه با قطر تقریبی ۸۶ میلی‌متر می‌تواند به‌صورت قائم، مایل و یا با زاویه کوچکی نسبت به افق حفر شود. گمانه تا عمق از پیش تعیین شده، حفره می‌شود. بهتر است از گمانه مغزه‌گیری هم بشود تا شرایط توده سنگ مورد آزمایش شناسایی شود. گمانه باید تا حد امکان مستقیم و با قطر ثابت حفاری شود. پس از رسیدن گمانه به نقطه مورد نظر، مته‌ها از گمانه خارج شده و ته گمانه توسط مته‌های پرداخت کننده کاملا صاف می‌شود،

ب- پس از آن یک چال پیش‌رو با قطر ۳۸ میلی‌متر و به طول ۵۵ سانتی‌متر در ته گمانه و به صورت هم محور با گمانه حفر می‌شود. حفاری با مغزه‌گیری انجام می‌شود تا از مغزه بتوان برای شناخت سنگ اطراف گمانه و انجام آزمایش‌های دیگر بهره جست. نکته مهم این‌که پیرامون چال پیش‌رو باید سالم و بدون شکستگی باشد، درغیراین‌صورت گمانه ۸۶ میلی‌متر باید حدود ۰/۵ متر یا بیش‌تر ادامه داده شود، تا سنگ سالم به‌دست آید،

ج- دیواره چال پیش‌رو با آب تحت فشار شسته و تمیز می‌شود. سپس محلی که قرار است سلول کرنش‌سنج در آن‌جا نصب شود، خشک شده و محلول‌های مخصوصی برای گیرش بهتر چسب به دیواره چال مالیده می‌شود،

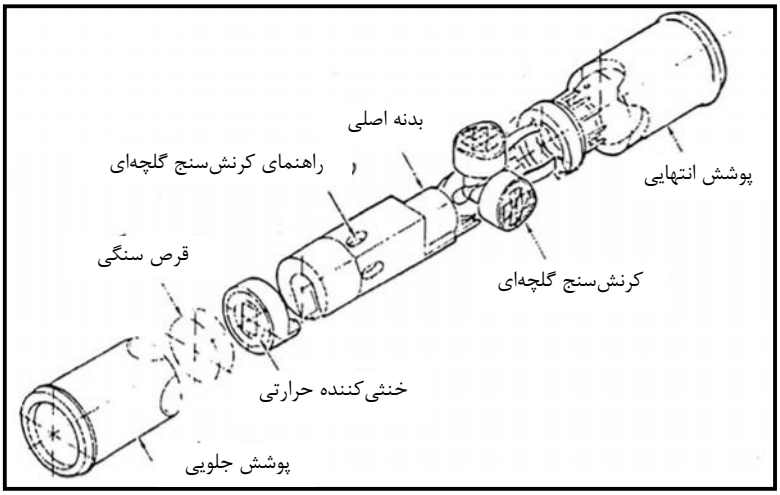
د- سلول کرنش‌سنج‌ها به دستگاه نصب کننده متصل و سیم‌های رابط به کرنش‌سنج‌ها وصل می‌شود. پس از تمیز نمودن کرنش‌سنج‌ها با حلال، با چرخاندن محفظه کرنش‌سنج‌ها از کارایی وسایل جهت‌یابی و حرکت رو به بیرون دسته کرنش‌سنج‌ها و عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل می‌شود،

هـ- بر روی هر دسته کرنش‌سنج، لایه‌ای به ضخامت ۲ تا ۳ میلی‌متر از چسب مالیده می‌شود. سپس دستگاه نصب کننده به همراه محفظه کرنش‌سنج توسط لوله به داخل گمانه ارسال می‌شود. سلول کرنش‌سنج توسط لوله‌های رابط چرخانده تا در محل مورد نظر قرار گیرد. با اعمال فشار از طریق لوله مخصوص، کرنش‌سنج‌ها به دیواره چال چسبانده می‌شوند. با ثابت نگاه داشتن فشار، زمان کافی برای گیرش داده می‌شود،

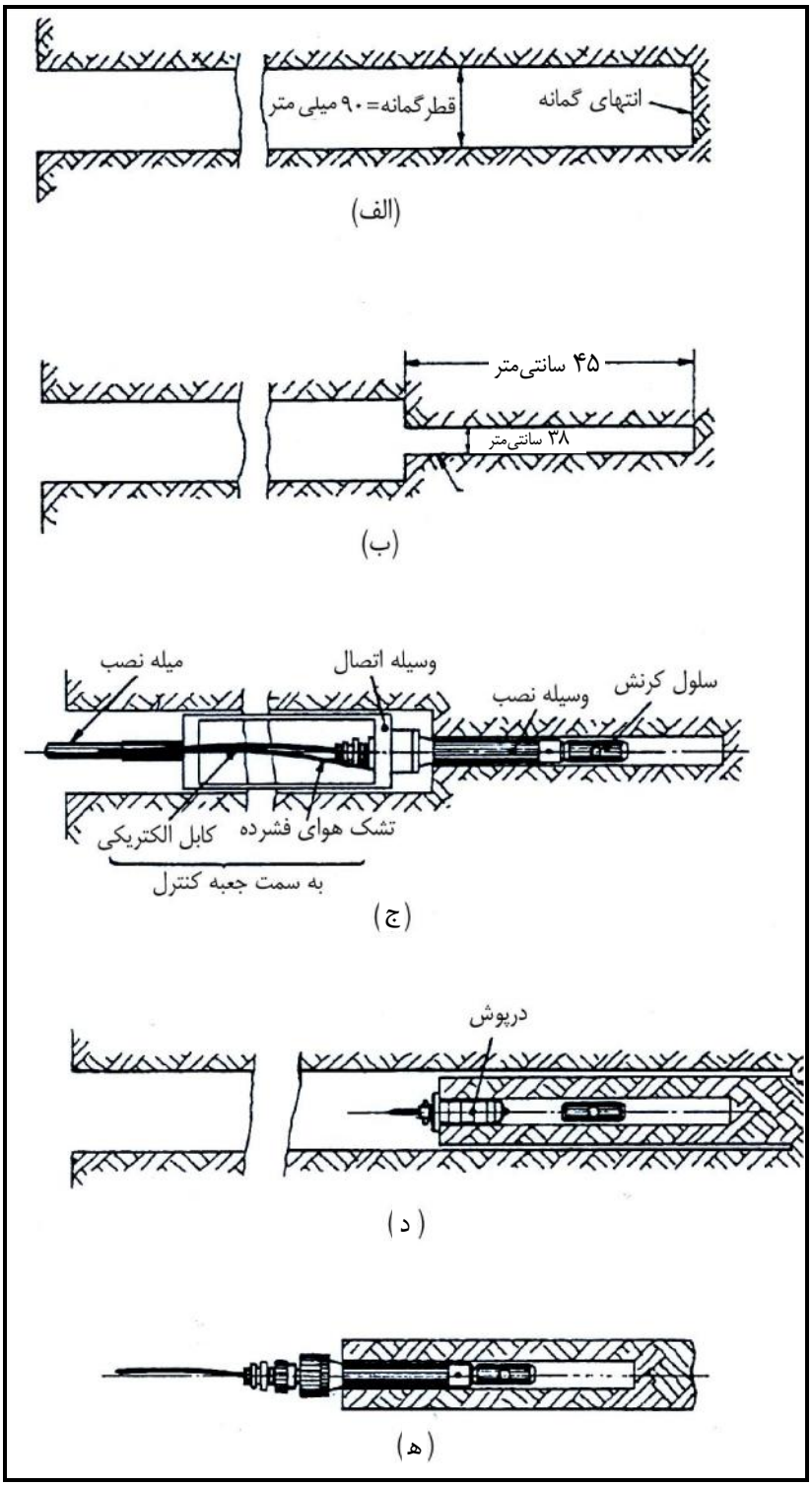
و- پس از اطمینان از اتصال کرنش‌سنج‌ها به دیواره چال، اولین قرائت از کرنش‌سنج‌ها آغاز شده و مقادیر ثبت می‌شود. سپس دستگاه نصب کننده از گمانه خارج می‌شود. چال پیش‌رو توسط درپوش مناسب مسدود می‌شود،

ز- دوباره کرنش سنج‌ها قرائت و میانگین آن‌ها محاسبه و یادداشت می‌شود،

ح- دوباره گمانه با قطر ۸۶ میلی‌متر به‌صورت مغزه‌گیری حفاری می‌شود. کم‌ترین طول مغزه‌گیری برابر ۵۵ سانتی‌متر می‌باشد. به این ترتیب سلول کرنش‌سنج مغزه‌گیری محیطی می‌شود. این عمل باعث آزاد شدن تنش‌ها در اطراف چال یا به عبارتی محفظه کرنش‌سنج خواهد شد. مغزه محیطی از گمانه خارج شده و دستگاه‌های ثبت کرنش به محفظه کرنش‌سنج وصل و شروع به قرائت خواهد شد. قرائت کرنش‌سنج‌ها تا زمانی که به مقدار ثابتی برسند، ادامه خواهد یافت. با انجام این مرحله، آزمایش به اتمام خواهد رسید. درصورت تکرار این آزمایش در عمق بیش‌تر، مراحل پیشین تکرار خواهد شد. ساختار سلول کرنش سه محوری و مراحل مختلف انجام آزمایش مغزه‌گیری محیطی در شکل‌های (۳-۱۹) و (۳-۲۰) ارائه شده است.



شکل ۳-۱۹- سلول کرنش سه محوره‌ی CSIR



شکل ۳-۲۰- مراحل مختلف انجام آزمایش مغزه‌گیری محیطی الف- حفاری گمانه تا عمق مورد نظر، ب- حفاری چال ۳۸ میلی‌متر، ج- نصب محفظه کرنش‌سنج، د- نصب درپوش و هـ- مغزه آزاد شده از گمانه

۳-۶-۵- محاسبات

به‌منظور تعیین تنش‌های اصلی و جهت آن‌ها، افزون بر اطلاعات به‌دست آمده از انجام آزمایش مغزه‌گیری محیطی، نیاز به دانستن ضریب الاستیسیته و نسبت پواسون توده سنگ محل اندازه‌گیری تانسورهای کرنش می‌باشد. بنابراین در صورت نداشتن مقادیر یاد شده باید بر روی مغزه‌های به‌دست آمده، آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و یا برروی نمونه‌های استوانه توخالی آزمایش دومحوره فشاری انجام داد، تا مقادیر یاد شده در بالا محاسبه شوند.

با استفاده از اطلاعات آزمایش، مقادیر کرنش در هر جهت از میانگین قرائت ثبت شده پیش و پس از مغزه‌گیری محیطی به‌دست خواهد آمد. موقعیت (جهت) هر کرنش‌سنج در دسته کرنش‌سنج نسبت به محورها براساس جهت گمانه مشخص می‌شود:

- مقادیر کرنش رهایی، از تقسیم میانگین قرائت‌های به‌دست آمده پیش و پس از بیش مغزه‌گیری محاسبه می‌شوند. در سامانه مختصات مرجع، محور z در امتداد محور چال و هم جهت با حفاری و محورهای x و y در راستای عمود بر آن (مطابق با روال دست راست) می‌باشند.

  موقعیت کرنش‌سنج‌های گلچه‌ای روی دیواره‌ی چال با آزیموت آن‌ها نسبت به محورها مشخص می‌شود. چنان‌چه از دهانه‌ی گمانه نظاره شود، این آزیموت در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت می‌باشد. وضعیت هر کرنش‌سنج در گلچه با زاویه‌ی بین محور z و امتداد آن در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت مشخص می‌شود. شکل (۳-۱۸) این مطلب را کاملا روشن‌تر می‌سازد.
- به‌منظور نسبت دادن کرنش‌های اندازه‌گیری شده به مولفه‌های تانسور تنش با فرض این‌که سنگ اطراف سلول کرنش‌سنج همسان‌گرد می‌باشد از روابط زیر استفاده خواهد شد:

$$\varepsilon = A_{xx}\sigma_{xx} + A_{yy}\sigma_{yy} + A_{zz}\sigma_{zz} + A_{xy}\tau_{xy} + A_{yz}\tau_{yz} + A_{zx}\tau_{zx} \qquad (۲۸-۳)$$

که در آن ضرایب A عبارتند از:

$$A_{xx} = \frac{1-\nu}{2E} - \frac{1+\nu}{2E}\left[\mathrm{Cos}2w - (1-\nu^2)(1-\cos 2w)\cos 2\theta\right] \qquad (۲۹-۳)$$

$$A_{zz} = \frac{1-\nu}{2E} - \frac{1+\nu}{2E}\left[\cos 2w - (1-\nu^2)(1-\cos 2w)\cos 2\theta\right] \qquad (۳۰-۳)$$

$$A_{zz} = \frac{1-\nu}{2E} + \left(\frac{1+\nu}{2E}\cos 2w\right) \qquad (۳۱-۳)$$

$$A_{xy} = -\frac{2(1-\nu^2)}{E}(1-\cos 2w)\sin 2\theta \qquad (۳۲-۳)$$

$$A_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E}\sin(2w\cos\theta) \qquad (۳۳-۳)$$

$$A_{zx} = -\frac{2(1+\nu)}{E}\sin(2w\sin\theta) \qquad (۳۴-۳)$$

برای هر اندازه‌گیری کرنش، معادله (۳-۲۸) باید نوشته شود. مولفه‌های A_{xx} و A_{yy} و ... ، برای هر کرنش از فرمول‌های (۳-۲۹) تا (۳-۳۴) محاسبه شوند. زوایای W و θ مربوط به هر کرنش‌سنج قابل تعیین می‌باشند. براساس تعداد کرنش‌سنج‌ها ۶ تا ۹ معادله حاصل خواهد شد که از آن‌ها تانسور تنش قابل محاسبه خواهد بود. پس از یافتن تانسور تنش براساس روابط تئوری الاستیسیته، می‌توان تنش اصلی و جهت‌های آن‌ها را محاسبه کرد.

۳-۶-۶- گزارش نتایج

گزارش انجام این آزمایش باید حاوی مطالب و اطلاعات زیر باشد:

- موقعیت، جهت‌داری و طول گمانه،
- برداشت (لاگ) زمین‌شناسی هریک از گمانه‌ها به‌همراه عمق و مشخصات زمین‌شناسی و ساختمانی محل آزمایش،
- توضیح مختصری پیرامون روش آزمایش و تجهیزات آن همراه با نمودار و عکس،
- جدولی شامل جهت‌داری هر کرنش‌سنج و قرائت‌های انجام شده آن و منحنی‌های مربوط به قرائت هر کرنش‌سنج،
- ضرایب الاستیک و نسبت‌های پواسون اندازه‌گیری شده برای هر نقطه اندازه‌گیری کرنش،
- توضیح درخصوص روش اندازه‌گیری زیربند آخر ۳-۵-۴ و ارائه منحنی‌های مربوط به آزمایش،
- مقادیر محاسبه شده تانسور تنش با دقت ۰/۱ مگاپاسکال،
- مقادیر محاسبه شده تانسور تنش‌های اصلی و جهت آن‌ها و ارائه انحراف معیار و خطاهای تخمینی در هر قسمت از محاسبات،
- تحلیل نتایج و در صورت امکان مقایسه آن‌ها با نتایج سایر روش‌ها.

۳-۶-۷- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح هستند، به قرار زیر می‌باشند:

- در فضاهای زیرزمینی معمولا گمانه را به صورت افقی و با شیبی به سمت بیرون حفر می‌کنند تا زهکشی به راحتی صورت گیرد،
- در این روش لازم است که میدان تنش و درزه‌ها و ترک‌های موجود در سنگ به‌گونه‌ای باشد که امکان گرفتن مغزه‌هایی با طول تقریبا ۲ تا ۳ برابر قطر گمانه وجود داشته باشد،
- در گمانه‌های حفاری شده در سنگ‌های اشباع، به دلیل چسبندگی نامناسب گیج به دیواره گمانه، اجرای این روش چندان عملی نبوده و ممکن است با مشکلاتی همراه باشد،

- این روش با فرض همگن بودن توده سنگ معتبر بوده و چنان‌چه توده سنگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای با این فرضیات اختلاف داشته باشد، قابلیت کاربرد نخواهد داشت،
- این روش در سنگ‌های دارای شکستگی زیاد توصیه نمی‌شود.

۳-۷- دستورالعمل تعیین مقاومت برشی مستقیم بر جای توده سنگ

۳-۷-۱- هدف

با انجام این آزمایش در محل، مقاومت برشی مستقیم نهایی و پسماند صفحه‌ی ضعف در سنگ به‌صورت مستقیم و براساس تابعی از تنش عمودی (نرمال) اعمال شده بر صفحه‌ی ضعف تعیین می‌شود. این دستورالعمل با استفاده از دستورالعمل‌های آزمایشی ISRM [3] و ASTM D 4554 [2] تهیه شده است.

۳-۷-۲- اهمیت و موارد استفاده

مقاومت برشی در سطح ضعف سنگ و یا توده سنگ (رویه گسل، سطح لایه‌بندی، درزه، شیستوزیته و ...) یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در مهندسی سنگ می‌باشد. این مقاومت از دو پارامتر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (φ) تشکیل شده است که هرکدام از این دو خود به عوامل بیشماری وابسته می‌باشند. آزمایش برش برجا را به روش‌های مختلف از جمله به‌صورت بارگذاری مورب، موازی و پیچشی می‌توان انجام داد. این دستورالعمل براساس روش بارگذاری مورب تهیه شده است که روش انجام آزمایش برش مستقیم برجا می‌باشد. از عوامل موثر در مقاومت برشی، سطح ضعف، هوازدگی و رطوبت می‌باشد که در تفسیر اطلاعات بسیار اثر داشته و باید دخالت داده شوند. از نتایج این آزمایش در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی، پی‌سدها و تونل‌ها استفاده می‌شود [۱].

۳-۷-۳- تجهیزات

ویژگی‌های تجهیزات مورد نیاز این آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

- تجهیزات مربوط به بریدن سنگ شامل سامانه حفاری، تیغه اره، قلم و چکش و همچنین تجهیزات مربوط به قالب‌گیری شامل قالب با ابعاد مناسب، پلی‌استر یا پرکننده ضعیف دیگر، ابزار و مصالح مورد نیاز برای قالب‌گیری نمونه با بتن مسلح،
- سامانه اعمال بار عمودی از جک‌های تخت، هیدرولیکی و یا سیستم وزنه‌ای (بار مرده) با ظرفیت کافی تشکیل شده است. در صورت استفاده از پمپ هیدرولیکی، تجهیزات به‌کار رفته باید توانایی ثابت نگاه داشتن بار تا حدود ۲ درصد بار نهایی انتخاب شده در کل آزمایش را داشته باشد. وسایل جانبی مربوط به بار عمودی شامل صفحه فولادی، شبکه فوقانی و تحتانی و غلتک می‌باشد که در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده ست،

- سامانه اعمال نیروی برشی که از یک یا چند جک هیدرولیکی یا جک تخت با ظرفیت مناسب تشکیل شده است، قابلیت جابه‌جایی این جک‌ها بر طبق دستورالعمل ISRM [3] باید دست‌کم معادل ۷۰ میلی‌متر باشد که بسته به شرایط آزمایش به‌کار گرفته می‌شود.

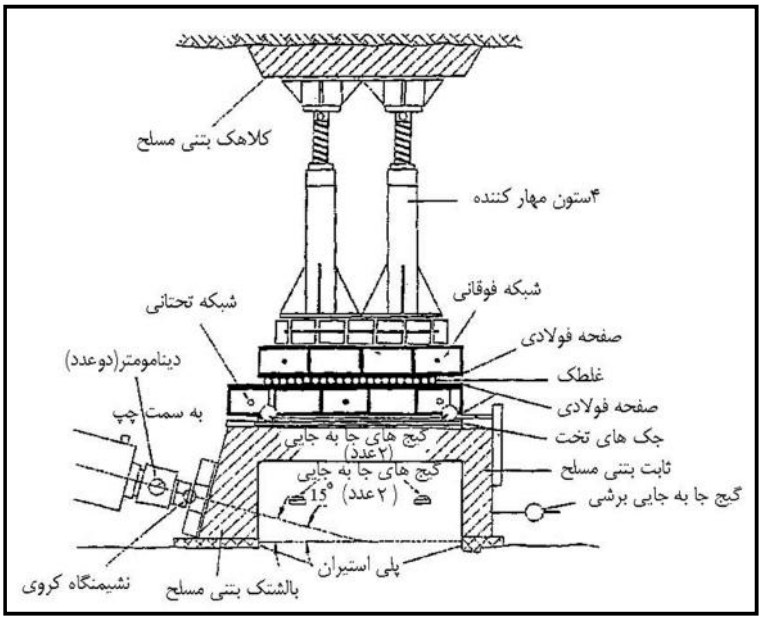
به‌منظور ایجاد فشار در جک‌ها از پمپ هیدرولیکی استفاده خواهد شد. همچنین از یک سامانه انتقال بار برای اعمال نیروی برشی به بلوک سنگی استفاده می‌شود که در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است. نیروی برشی با توجه به روش آزمایش به‌طور مورب با زاویه ۱۵ درجه نسبت به سطح برش طوری اعمال می‌شود که همانند شکل (۳-۲۳) از مرکز سطح عبور نماید.

ارتفاع از کف برای اعمال نیرو برابر است با:

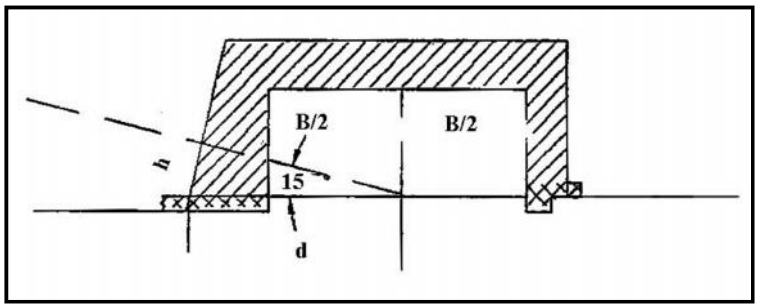
$$h = 0.2679d$$

که در آن d، فاصله افقی مرکز سطح برش تا سطح خارجی قاب بتنی است،

- وسایل اندازه‌گیری نیروهای برشی و عمودی با حداکثر ۲ درصد خطا نسبت به حداکثر نیروی اعمالی در آزمایش، به‌کار گرفته می‌شوند،
- برای اندازه‌گیری جابه‌جایی برشی از جابه‌جایی‌سنج‌های عقربه‌ای یا الکتریکی با قابلیت جابه‌جایی ۷۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری جابه‌جایی عمودی و جانبی افقی باید از جابه‌جایی‌سنج‌های عقربه‌ای یا الکتریکی با قابلیت جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر استفاده نمود. باید نقاط مرجع اندازه‌گیری‌ها (یعنی تیرها، مهاری‌ها یا گیره‌ها) پس از نصب به اندازه کافی صلب باشند. بهتر است از تنظیم دوباره گیج‌ها در طول آزمایش پرهیز شود.



شکل ۳-۲۱- نمایش تجهیزات مورد نیاز بر حسب محل قرارگیری در آزمایش برش برجا



شکل ۳-۲۲- نحوه عبور محور اعمال نیرو از مرکز سطح در آزمایش برش برجا

۳-۷-۴- مراحل انجام آزمایش

مراحل زیر، در مورد این آزمایش اجرا می‌شود:

الف- آماده‌سازی بلوک: بلوک سنگی طوری انتخاب می‌شود که صفحه برشی بر قاعده‌ی آن منطبق باشد. این آزمایش نسبت به جهت برش بسیار حساس است و در جهات مختلف نتایج متفاوتی را ارائه خواهد نمود، بنابراین جهت اعمال نیروی برشی باید تا حد امکان همان جهتی باشد که در شرایط واقعی استفاده خواهد شد،

ب- پیش از آزادسازی بلوک، درصورتی‌که سنگ قابلیت آماس کردن را داشته باشد، جهت جلوگیری از آماس کردن بلوک باید تمهیدات ویژه‌ای اعمال شود (ASTM D 4554[2]). بلوک مورد آزمایش معمولا ابعاد ۳۵۰×۷۰۰×۷۰۰ میلی‌متر (ارتفاع × عرض × طول) را دارد. به‌عنوان استاندارد این ابعاد را می‌توان با توجه به ماهیت صفحه برشی (به‌خصوص زبری آن) تغییر داد. بدین‌صورت که در مورد سطوح کم و بیش صاف از بلوک‌های کوچک‌تر و در مورد سطوح بسیار زبر یا ناهموار از بلوک‌های بزرگ‌تر استفاده نمود. بهتر است ابعاد و شکل بلوک طوری انتخاب شود که وجوه آن موازی با سامانه درزه و ترک‌ها و تا حد امکان منطبق بر آن‌ها باشد. در این صورت آماده‌سازی بلوک با کم‌ترین دست‌خوردگی صورت می‌گیرد. لازم است پستی و بلندی‌هایی که در مرحله‌ی قالب‌گیری مشکل‌ساز شده و یا ضخامت قالب را محدود می‌سازند برداشته شوند. شرایط رطوبت طبیعی سطح برش باید تا لحظه آزمایش حفظ شود.

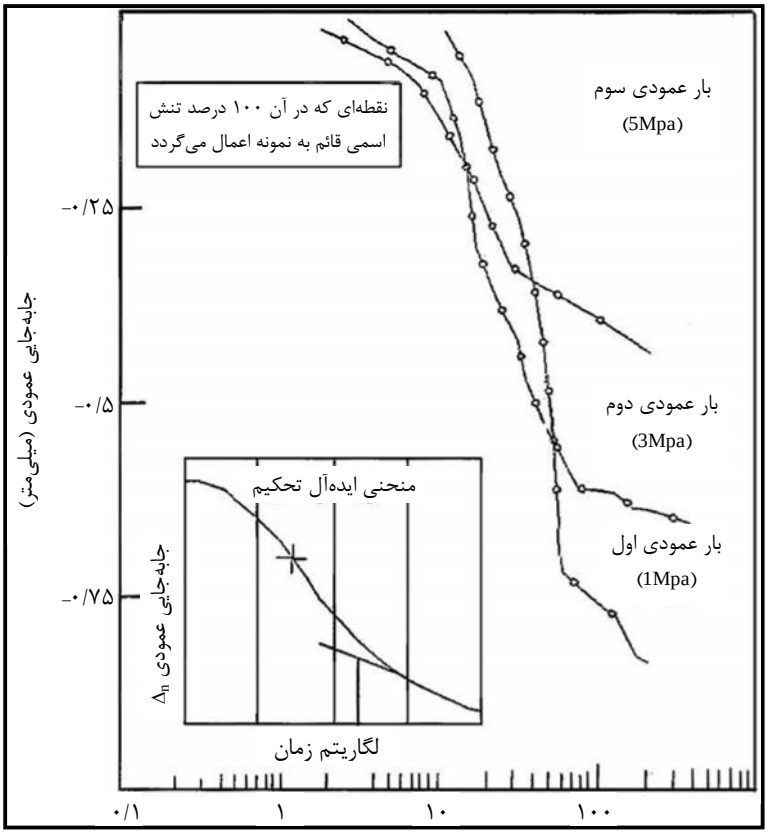
دور تا دور قاعده بلوک، شیاری به عمق تقریبی ۲۰۰ میلی‌متر و عرض ۸۰ میلی‌متر ایجاد شده تا امکان جابه‌جایی آزاد بلوک فراهم شود. سپس لایه‌ای به ضخامت دست کم ۲۰۰ میلی‌متر از جنسی ضعیف (مثل فوم پلی‌استیرن[1]) در اطراف قاعده بلوک ریخته می‌شود. برای جلوگیری از خرد شدن نمونه، سایر قسمت‌های آن نیز توسط بتن مسلح یا چارچوب فلزی مناسب یا مصالحی مشابه، با مقاومت و صلبیت کافی قالب‌گیری می‌شود. قالب‌گیری به‌گونه‌ای انجام می‌شود که سطوح باربری فوقانی قالب با دقت ۱ ± میلی‌متر صاف بوده و با دقت ۱ ± درجه با صفحه برش موازی باشد.

1- Foamed Polystyrene

در آخرین مرحله‌ی آماده‌سازی، بالشتک‌های انتقال، مهاری‌ها و دیگر تجهیزات در جای خود قرار می‌گیرند. این تجهیزات زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از سنگ‌های سالم اطراف به عنوان تکیه‌گاهی برای سامانه‌های بارگذاری برشی و عمودی استفاده می‌شود. همچنین باید زمان لازم برای گیرش بتن و رسیدن آن به مقاومت مناسب در نظر گرفته شود.

ج- تحکیم: در مرحله‌ی تحکیم، به نمونه و به‌خصوص مواد پرکننده‌ی سطح برش این فرصت داده می‌شود که پیش از آغاز مرحله برش، تحت تنش عمودی کل، زهکشی شده و فشار آب منفذی خود را تخلیه کند. ممکن است رفتار نمونه در مرحله‌ی تحکیم، دامنه‌ی نرخ جابه‌جایی برشی را محدود کند. تحکیم نمونه شامل مراحل زیر می‌باشد:

- کلیه وسایل اندازه‌گیری جابه‌جایی از نظر استحکام، قابلیت جابه‌جایی و آزادی حرکت کنترل شده و قرائت‌های اولیه بار و جابه‌جایی ثبت می‌شوند،
- بار عمودی افزایش می‌یابد تا به‌مقدار تعیین شده برای آزمایش برسد. در این حالت جابه‌جایی عمودی بلوک (ناشی از تحکیم) به صورت تابعی از زمان و بار اعمال شده ثبت می‌شود. در شکل (۳-۲۳) منحنی‌های تحکیم به‌دست آمده در سه تنش عمودی مختلف و در جدول (۳-۴)، برگه ثبت قرائت‌ها نشان داده شده است،
- نحوه اعمال بار عمودی به این ترتیب می‌باشد که بار قائم باید در پنج مرحله به بلوک اعمال شده و در هر مرحله، جابه‌جایی‌های عمودی پس از ۱، ۳، ۵ و ۱۰ دقیقه قرائت شوند. چنان‌چه میزان نشست تحکیمی مرحله‌های چهارم و پنجم کم‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر باشد، مرحله‌ی تحکیم پایان یافته است. در غیراین‌صورت زمان تحکیم آن‌قدر ادامه می‌یابد که میزان جابه‌جایی عمودی هر گیج در طول مدت دست‌کم ۱۰ دقیقه، کم‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر باشد.



شکل ۳- ۲۳- منحنی تحکیم بار عمودی

جدول ۳ -۴- برگه پیش‌نویس ورودی اطلاعات برای آزمایش برش برجا

متقاضی:		پروژه:	محل پروژه:	کد محل:	شماره بلوک:
توصیف بلوک مورد آزمایش:					
شرایط عمومی نمونه، ویژگی‌های شاخص و شرایط رطوبتی:					
توصیف کلی ویژگی‌های شاخص سطح برش:				نوع:	
پزشکی و هوازدگی:		ابعاد سطح:		زبری:	شیب:
فاصله‌داری:		ساخت اولیه:		جهت شیب:	

زمان (دقیقه)	قرائت	نیروی عمودی (P_n) نیرو (کیلونیوتن)	جابه‌جایی عمودی (Δ_n) قرائت‌ها	جابه‌جایی عمودی (Δ_n) میانگین (میلی‌متر)	نیروی برش (P_S) قرائت	نیروی برش (P_S) نیرو (کیلونیوتن)	جابه‌جایی برشی (Δ_s) قرائت‌ها	جابه‌جایی برشی (Δ_s) میانگین (میلی‌متر)	سطح تصحیح شده (متر)	Pmn (کیلو نیوتن)	σ_n (مگاپاسکال)	P_{ns} (مگاپاسکال)	τ (مگاپاسکال)

ملاحظات:

آزمایش کننده: تاریخ:

کنترل کننده: تاریخ:

تاریخ واسنجی:

د- برش: هدف از مرحله برش این است که مقادیر مقاومت برشی مستقیم بیشینه و باقی‌مانده سطح مورد نظر تعیین شود. هر آزمایش برش باید دست کم در پنج تنش عمودی مختلف انجام شود تا پنج سری مقاومت بیشینه و ماندگار متفاوت به‌دست آید. درصورتی‌که شرایط محل اجازه دهد، بهتر است که تعداد بلوک بیش‌تری روی هر صفحه برش آماده‌سازی و مورد آزمایش قرار گیرد. آزمایش برش طی مراحل زیر اجرا می‌شود:

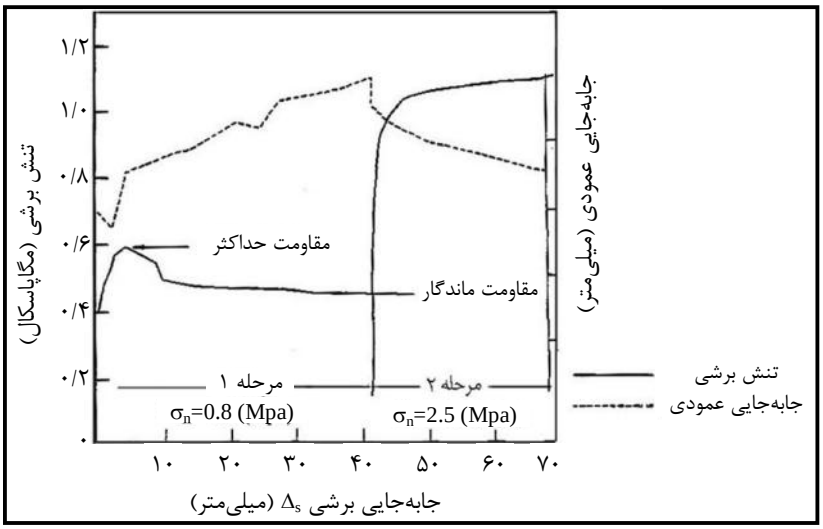
- نیروی برشی به‌صورت مرحله‌ای و یا به‌طور پیوسته و به‌گونه‌ای اعمال می‌شود که نرخ جابه‌جایی قابل کنترل باشد،
- لازم است که پیش از رسیدن به نقطه‌ی مقاومت نهایی، به‌طور تقریبی ده مجموعه قرائت انجام شده باشد،
- باید نرخ جابه‌جایی برشی پیش از انجام یک سری قرائت و در یک دوره‌ی زمانی ۱۰ دقیقه‌ای کم‌تر از ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه باشد. می‌توان این سرعت را در بین قرائت‌ها تا ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه نیز افزایش داد. نرخ جابه‌جایی باید طوری انتخاب شود که بتوان نقطه‌ی نهایی منحنی تنش – جابه‌جایی برشی را به دقت ثبت کرد. در شکل (۳-۲۴) منحنی تنش جابه‌جایی برشی برای یک آزمایش با دو تنش عمودی نشان داده شده است.

در مورد آزمایش‌های زهکشی شده[1] (به‌ویژه وقتی که ناپیوستگی حاوی موادپرکننده‌ی رسی باشد)، مدت زمان لازم برای رسیدن به مقاومت بیشینه باید از $6t_{100}$ بیش‌تر باشد. مقدار t_{100} همان‌طور که در شکل (۳-۲۲) نشان داده شده از روی منحنی تحکیم به‌دست می‌آید. درصورت لزوم می‌توان نرخ جابه‌جایی را کاهش داد و یا اعمال گام‌های بعدی نیروی برشی را به تاخیر انداخت تا این ضرورت تامین شود.

هـ- بعد از رسیدن مقاومت نهایی و به‌منظور ترسیم دقیق منحنی تنش - جابه‌جایی برشی پس از نقطه نهایی، قرائت‌هایی در فواصل جابه‌جایی ۰/۵ تا ۵ میلی‌متری انجام می‌شود. نرخ جابه‌جایی برشی در یک دوره زمانی ۱۰ دقیقه‌ای پیش از انجام قرائت‌ها باید بین ۰/۰۲ تا ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه باشد. این نرخ در فاصله‌ی انجام قرائت‌ها نباید از یک میلی‌متر بر دقیقه تجاوز کند.

- زمانی می‌توان مقدار مقاومت برشی ماندگار را تعیین نمود که جابه‌جایی برشی تحت تنش برشی ثابتی ادامه یابد. این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که طی یک سانتی‌متر جابه‌جایی برشی، تغییرات تنش برشی از ۵ درصد بیش‌تر نشود. در این فاصله باید دست کم چهارسری قرائت متوالی انجام شود.
- پس از این‌که مقاومت ماندگار مشخص شد، می‌توان تنش عمودی را افزایش یا کاهش داد و آزمایش را تا رسیدن به مقاومت ماندگار دیگر تکرار کرد. لازم است که نمونه تحت هر تنش عمودی جدید دوباره تحکیم شده و مرحله برش مطابق با معیارهای یاد شده در (تمام موارد زیربند سوم بند ۳-۷-۴) روش آزمایش انجام شود.

1- Drained



شکل ۳-۲۴- منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی و جابه‌جایی عمودی - جابه‌جایی برشی در آزمایش برش برجا

و- پس از آزمایش، بلوک سنگی وارونه شده و از سطح برش عکس رنگی تهیه شود. این سطح باید به‌طور کامل تشریح گردد. اندازه‌گیری مساحت، زبری، شیب و جهت شیب صفحه برش الزامی است. نمونه‌هایی از سنگ، ماده پر کننده و خرده‌های ناشی از برش باید برای انجام آزمایش‌های لازم در آزمایشگاه تهیه شود.

۳-۷-۵- محاسبات

با انجام این آزمون، مقادیر پارامترهای تنش‌های برشی و عمومی با توجه به نکته‌های زیر و با استفاده از روابط مربوط محاسبه می‌شوند:

- منحنی جابه‌جایی عمودی - لگاریتم زمان در مرحله تحکیم با توجه به داده‌های ثبت شده ترسیم می‌گردد (شکل ۳-۲۳). زمان t_{100} یعنی زمان لازم برای تکمیل تحکیم اولیه[1] مطابق شکل با رسم مماس‌هایی به شاخه‌های منحنی به‌دست می‌آید. زمان رسیدن به مقاومت نهایی از شروع مرحله برشی نباید کم‌تر از $6t_{100}$ باشد. دراین‌صورت آب نفوذی فرصت زهکشی پیدا می‌کند.
- میانگین جابه‌جایی عمودی و برشی اندازه‌گیری شده به‌عنوان جابه‌جایی عمودی متوسط (Δ_n) و جابه‌جایی برشی متوسط (Δ_S) در نظر گرفته می‌شود. جابه‌جایی‌های جانبی صرفا برای ارزیابی رفتار نمونه در طول آزمایش قرائت می‌شوند. ولی چنان‌چه مقدار آن‌ها قابل ملاحظه باشد، باید در محاسبات مربوط به تصحیح مساحت صفحه برشی مورد استفاده قرار گیرند.

1- Primary Consolidation

- تنش‌های برشی و عمودی از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tau = \frac{P_s}{A} = \frac{P_{sa}\,Cos\alpha}{A} \qquad (۳۵-۳)$$

$$\sigma_n = \frac{P_n}{A} = \frac{P_{na} + P_{sa}\,Sin\alpha}{A} \qquad (۳۶-۳)$$

که در آن:

τ = تنش برشی (مگاپاسکال)،

σ_n = تنش عمودی (مگاپاسکال)،

Ps = نیروی برشی کل (کیلونیوتن)،

Pn = نیروی عمودی کل (کیلونیوتن)،

Psa = نیروی برشی اعمال شده (کیلونیوتن)،

Pna = نیروی عمودی اعمال شده (کیلونیوتن)،

α' = زاویه نیروی برشی نسبت به صفحه برشی (درجه)،

A = مساحت صفحه برش که با توجه به جابه‌جایی برشی تصحیح می‌شود (مترمربع).

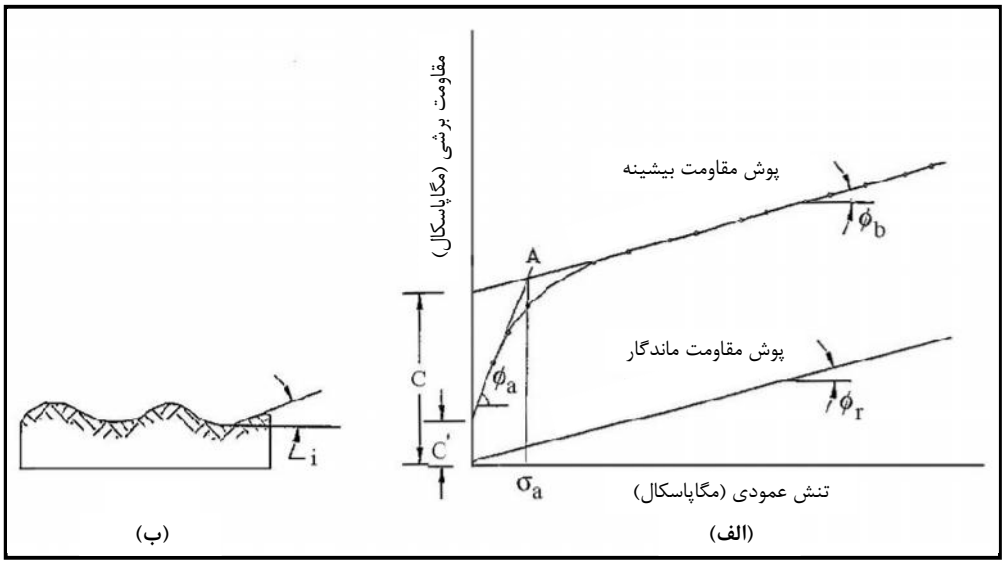
اگر α بزرگ‌تر از صفر باشد، باید نیروی عمودی اعمال شده را پس از هر افزایش نیروی برشی، به میزان $P_{sa}\sin\alpha$ کاهش داد تا تنش قائم تقریبا ثابت بماند. همچنین می‌توان این نیرو را را در طول آزمایش به‌منظور تصحیح اثرات کاهش سطح به‌میزان $\frac{\Delta S.P_n}{700}$ کاهش داد (Δs برحسب میلی‌متر).

- برای هر آزمایش برشی نمودارهای تنش یا نیروی برشی - جابه‌جایی برشی و جابه‌جایی عمودی - جابه‌جایی برشی ترسیم می‌شود (جدول ۳-۴). تنش‌های عمودی و هرگونه تغییر در آن روی منحنی‌ها یادداشت می‌شود تا تفسیر و تحلیل آن‌ها در مراحل بعدی امکان‌پذیر باشد. مقادیر مقاومت برشی بیشینه و ماندگار (باقی‌مانده)، تنش‌های عمودی و جابه‌جایی‌های برشی و عمودی مربوط به آن‌ها از روی این نمودار استخراج می‌شود.
- با استفاده از نتایج به‌دست آمده از کلیه آزمایش‌های برشی با تنش‌های عمودی مختلف می‌توان منحنی مقاومت برشی - تنش عمودی در حالت‌های نهایی و باقی‌مانده را ترسیم و با توجه به آن‌ها پارامترهای مقاومت برشی شامل C'، C، ϕ_a، ϕ_b، ϕ_r را استخراج نمود (شکل ۳-۲۵).

C' چسبندگی سطح درز که معادل مقاومت برشی درز بدون اعمال بار عمودی می‌باشد. این مقاومت به استحکام اتصال بین دانه‌ها در صفحه برش یا ذرات پرکننده بستگی دارد. C چسبندگی دندانه‌های سطح برشی است که معادل مقاومت برشی سنگ‌دانه‌هایی موجود روی سطح برش و یا به عبارت دیگر ماده‌سنگ در حالت بار عمودی صفر می‌باشد. ϕ_a زاویه اصطکاک ناشی از لغزش سطوح زبر سنگی روی صفحه ناپیوستگی می‌باشد. ϕ_b زاویه اصطکاک کمینه، که

ناشی از برش سنگ‌دانه‌های بکر می‌باشد. ϕ_r زاویه اصطکاک ماندگار، زاویه اصطکاکی است که پس از جابه‌جایی بسیار زیاد در امتداد سطح برش به‌دست می‌آید.

شایان یادآوری است که ϕ_b معمولا مساوی یا کمی بزرگ‌تر از ϕ_r می‌باشد. این مقدار ممکن است با تغییر سطح تنش تغییر کند. با توجه به مطالب عنوان شده بدیهی است که در سطوح تنش مختلف، زوایای اصطکاک متفاوتی به‌دست خواهد آمد، بنابراین سطح تنش آزمایش باید با توجه به شرایط واقعی و مشخصات پروژه‌ی در دست اجرا تعیین شود.



شکل ۳-۲۵- پوش گسیختگی نهایی و ماندگار در آزمایش برجا

۳-۷-۶- گزارش نتایج

گزارش این آزمایش شامل مطالب و موارد زیر می باشد:

- عکس یا نمودار شماتیک از دستگاه، همراه با توضیح کاملی در مورد آن، همچنین تشریح روش‌های آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش،
- توصیف کامل زمین‌شناسی نوع سنگ، صفحه برش، پرکننده‌ها و ذرات ناشی از خرد شدن زبری‌ها. این قسمت باید با اطلاعاتی مثل پروفیل زبری سطح، حدود اتربرگ، درصد رطوبت و توضیح ابعادی ذرات پرکننده سطح همراه باشد،
- عکس‌هایی از هر صفحه برش، همراه با نمودارهایی که نشان‌دهنده‌ی موقعیت، ابعاد، مساحت، شیب و جهت شیب آن‌ها باشد. این نمودارها باید جهت برش و هرگونه ویژگی خاص مربوط به هر بلوک را مشخص کنند،
- لازم است برای هر بلوک سنگی مجموعه‌ای از جداول داده‌ها، منحنی تحکیم و منحنی‌های تنش برشی و جابه‌جایی عمودی نسبت به جابه‌جایی برشی تهیه و گزارش شود. مقادیر مقاومت‌های برشی نهایی و ماندگار استخراج شده از منحنی‌ها باید همراه با مقادیر تنش عمودی، جابه‌جایی برشی و جابه‌جایی عمودی مربوط، به‌صورت جدول گزارش شوند،

- به‌طور کلی برای هر سری آزمایش با تنش‌های عمودی متفاوت، لازم است که جدولی حاوی تنش‌های نهایی و ماندگار و تنش‌های عمودی مربوط به آن‌ها ارائه و پوش‌های گسیختگی مربوط به هر حالت ترسیم شود. همچنین مقادیر پارامترهای مقاومت برشی به‌دست آمده از این منحنی‌ها باید گزارش شوند.

۳-۷-۷- نکته‌های کلی

اهم نکته‌ها و یادآوری‌هایی که در این آزمون مطرح‌اند، به شرح زیر می‌باشند:

- شایان یادآوری می‌باشد که بر طبق دستورالعمل ASTM D4554[2]، قابلیت جابه‌جایی جک‌های برشی معادل ۱۵ میلی‌متر پیشنهاد شده است که توصیه می‌شود از دستورالعمل ISRM با جابه‌جایی دست کم ۷۰ میلی‌متر مد نظر قرار گیرد،
- برای جلوگیری از خرد شدن بلوک برش، اطراف بلوک با چارچوب فلزی با ضخامت ۵ تا ۱۰ میلی‌متر قالب‌گیری شود،
- در استاندارد تصریح شده است «پس از این‌که مقاومت ماندگار مشخص شد، می‌توان تنش عمودی را افزایش یا کاهش داد و آزمایش را تا رسیدن به مقاومت ماندگار دیگر تکرار کرد.» ولی با توجه به تجربیات به‌دست آمده به‌نظر می‌رسد که کاهش تنش عمودی نتایج قابل قبولی را به‌دست نمی‌دهد، بنابراین توصیه نمی‌شود،
- نحوه اعمال بار عمودی در مرحله تحکیم به شرح زیر پیشنهاد می‌شود. بار قائم باید در پنج مرحله به بلوک اعمال شده و در هر مرحله، جابه‌جایی‌های عمودی در ۱، ۳، ۵ و ۱۰ دقیقه قرائت شوند. چنان‌چه میزان نشست تحکیمی مرحله‌های چهارم و پنجم کم‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر باشد، مرحله تحکیم پایان یافته تلقی می‌شود. درغیراین‌صورت زمان تحکیم آن‌قدر ادامه می‌یابد که میزان جابه‌جایی عمودی هر گیج در طول مدت دست کم ۱۰ دقیقه کم‌تر از ۰/۰۵۰ میلی‌متر باشد،

معمولاصافی سطح بلوک قالب‌گیری شده به حدی نیست که برای قرار گرفتن گیج‌های اندازه‌گیری تغییر شکل مناسب باشد. می‌توان به‌منظور ایجاد سطحی مناسب برای تمام گیج‌ها با بلوک، از صفحات شیشه‌ای که روی سطح قالب‌گیری شده چسبانده می‌شوند، استفاده کرد. ابعاد این صفحات باید با میزان جابه‌جایی نمونه متناسب باشد.

منابع و مراجع

۱- فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد ۱۳۸۰، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها جلد اول، آزمون‌های آزمایشگاهی، ناشر شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک و مرکز نشر پروفسور حسابی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (واحد تفرش).

۲- فهیمی‌فر، احمد. سروش، حامد. «آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها» جلد دوم آزمون‌های صحرایی، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پاییز ۱۳۸۲.

۳- فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد ۱۳۸۰، «آزمایش‌های مکانیک سنگ - مبانی نظری و استانداردها جلد دوم آزمون‌های صحرایی» ۱۳۸۲، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۴- فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد ۱۳۸۰، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها جلد دوم، آزمون‌های صحرایی، ۱۳۸۲، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۵- شرکت مشانیر – گزارش آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای سد گتوندعلیا – آزمایشگاه شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۱.

۶- فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد ۱۳۸۲، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، جلد دوم، آزمون‌های صحرایی، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۷- فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد ۱۳۸۲، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، جلد دوم، آزمون‌های صحرایی، ناشر مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۸- فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد ۱۳۸۲، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، جلد دوم، آزمون‌های صحرایی، ناشر مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

9- Alexander, L.G., "Field and Laboratory Test in Rock Mechanic", Third Australia-New Zealand conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., Sydny, Australia, 1960.

10- American Standard and Testing of Materials.

11- ASTM D 131, Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine.

12- ASTM-D2216, 1992, Standard test method for laboratory determination of water (moistures) content of soil and rock.

13- ASTM D 2845, “Standard test method for lavoratory for laboratory determination of pulse velocitires ultrasonic elastic contants of rock.”

14- ASTM D4394-08, Standard Test Method for determining Insitu Modulus of Deformation of Rock Mass Using Rigid Plate Loading Method.

15- ASTM D 4644, Standard test method for laboratory determination of water (moistures) content of soil and rock.

16- ASTM C 535, Standard test method for resistance to degradation of large- size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine.

17- ASTM E4. BS 1610. Grade A. DIN 51 220. Klasse 1 and Din 51300.

18- ASTM E11, Standard Specification for wire cloth and sieves for testing purposes.
19- ASTM, D4729 (Reapproved 1992) "Standard Test Method for In-situ Stress and Modulus of Deformation Using the Flat jack Method".
20- ASTM D4554, Standard test Method for in-situ determination of direct shear strength of rock discontinuities.
21- Atkinson, R.H., “Hardness Tests for Rock Characterization”, Chap.5, Comprehensive Rock Engineering, John A. Hudson (editor-in-chief) Vol.3, PP 105-117, Pergamon Press, Oxford (1993).
22- ASTM D4394 (1988), Stantard test method for determining the in-situ modulus of rock mass using uigid plate loading method.
23- ASTM D 4645(reapproved 1992), Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Determination of the In-situ Stress in Rock Using the Hydraulic Fracturing Method".
24- Brown, E.T.1981, “Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods” Pergamon Press, Oxford, UK, PP 79-89.
25- Brown, E.T.(1981), “Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods” Pergamon Press, Oxford, UK, PP 92-94.
26- Brown, E.T.(ed), “Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks”, Rock characterization Testing and Monitoring: I.S.R.M. Suggested Methods”, PP. 95-103, Pergamon Press, Oxford, (1981).
27- Brown, E.T.(1981), “Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods” Pergamon Press, Oxford, UK, PP 98-100.
28- Brown, E.T.(1981), “Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods” Pergamon Press, Oxford, UK, PP 107-110.
29- Brown, E.T. (ed), 1981 “Suggested Methods for Determining The Uniaxial Comprehensiue Strenght and Deformability of Rock Materials”, I.S.R.M. Suggested Methods. Progamon Press Ltd.
30- Brown, E.T. (ed), “Suggested Methods for Determining Indirect Tensile Strength of Rock Materials By The Brazil Test”, Rock Characterization, Testing and Monitoring I.S.R.M, Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, 1981, PP 120/121
31- Brown, E.T. (1981), "Rock characterization testing & monitoring, ISRM suggested methods." Pergamon press.
32- Brown, E.T.1981, "Rock characterization testing and monitoring, ISRM Suggested methods", Published by pergamon press PP.131-134.
33- Comprehensive Rock Engineering, Vo13, 1993, AA., Balkema, Rotterdam.
34- FrankLin, J.A. & Chandra R. (1972), “The slake durability test int.j. of Rock mech. mining Sci 9, PP. 325-341.
35- Gamble J., (1971), “Durability plasticity classification of shales and other argillaceous rock” Ph. D Thesis, university of Illinois.
36- ISRM “suggested Method for Determining Point Load Strength”, Int. J. of Rock Mech. & Geomech Abstr. Vol.22 NO.2, 1985, PP 51-60.\
37- ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, "Suggested Methods for Deformability Determination Using a Flexible Dilatometer". 1987.
38- ISRM (1987), "Suggested method for rock stress." Int.J. of Rock Mech. Min. Sci & Geomech. February.

39- “Standard Method of Test for Elastic Moduli of Rock Cote Speccmens in Uxiaxial compression”. American Society for Testing and Materials, ASTM Designation D3148-72.
40- “Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive strength and Deformability of Rock Materials”. Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM Suggested Methods, E.T. Brown (editor) Pergamon Press, Oxford, 1981, PP 113-116.
41- Suggested Method for Determining Swelling and Slake-Durability Index Properties":Revised version, Int. J. Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr, Vol 20, No.6, PP.283-290, May 1983 (I.S.R.M).
42- Suggested Method for Determining Strength of Rock Materials in Triaxial Compression": Revised Version, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr., Vol 20, No.6, Pp. 283-290, May 1983 (I.S.R.M).
43- Tincrlin, M.E., "Mesurey des pressions de Terrains dans Les Mines de for del'Est: Annales de L'Insitut Technique de Batiment et des Travaux publics", Serie: sols et Foundations. No.58, PP. 972-990, Translatated by S.H.Brit, U.S. Geological survey open file report No.28,27 Washington, DC, 1953.