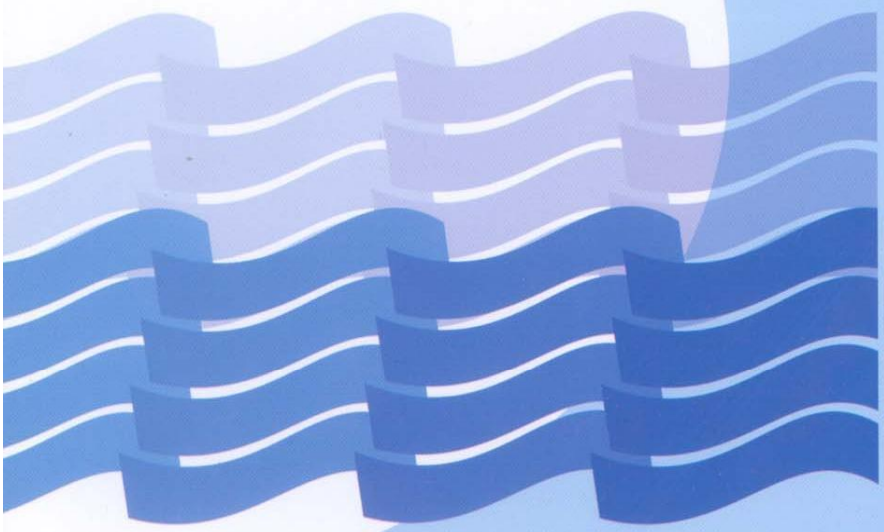
وزارت نیرو
معاونت امور آب و آبفا
دفتر مهندسی و معیارهای فنی
آب و آبفا

پیش‌نویس

دستورالعمل چهار آزمایش آزمایشگاهی مکانیک خاک



نشریه شماره ۳۳۵- الف

پیش‌نویس

دستورالعمل چهار آزمایش آزمایشگاهی مکانیک خاک

نشریه شماره ۳۳۵- الف

بسمه تعالی

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر 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 از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و از این رو طرح تهیه ضوابط ومعیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو با همکاری معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور به منظور تامین اهداف زیر اقدام به تهیه استانداردهای صنعت آب 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 با در نظر داشتن موارد زیر صورت می‌گیرد :

- استفاده از تخصص ها و تجارب کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ 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 مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات 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 مرتبط می باشد، با توجهی که مبذول می‌فرمایند این پیش‌نویس را مورد بررسی دقیق قرار داده و با ارائه نظرات و راهنمایی های ارزنده خود به دفتر طرح، این دفتر را در تنظیم و تدوین متن نهایی یاری و راهنمایی فرمایند.

ترکیب اعضای تهیه‌کننده، کمیته و ناظران تخصصی

این پیش‌نویس استاندارد در **معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران**، با مسئولیت آقای دکتر قارونی نیک و با همکاری افراد زیر به ترتیب حروف الفبا تهیه شده است:

آقای علی محمد اسماعیلی	آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک	فوق‌لیسانس عمران
آقای مرتضی اعتصامی	شرکت خاک و سنگ	لیسانس زمین‌شناسی
آقای سعید رضوی	شرکت خاک و سنگ	لیسانس عمران
آقای مرتضی قارونی نیک	دانشگاه علم و صنعت ایران	دکترای ژئوتکنیک

گروه نظارت که مسئولیت نظارت تخصصی بر تدوین این پیش‌نویس را به عهده داشته‌اند، به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

آقای علی طاهری	شرکت زمین فن‌آوران	فوق‌لیسانس ژئوتکنیک
آقای بهروز گتمیری	شرکت مهندسین مشاور دریا خاک پی	دکترای ژئوتکنیک
آقای سیاوش لیتکوهی	شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک	دکترای ژئوتکنیک

اسامی اعضای کمیته تخصصی سد و تونل‌های انتقال طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور که بررسی و تایید متن حاضر را برعهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

خانم دالی بندار	دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا – وزارت نیرو	دکترای عمران – تکنولوژی بتن
آقای مسعود حدیدی‌مود	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی مکانیک
آقای رضا راستی اردکانی	دانشگاه صنعت آب و برق	دکترای مهندسی زلزله
آقای فرزان رفیعا	شرکت مهندسین مشاور کاوشگران	فوق‌لیسانس مهندسی معدن و مکانیک سنگ
خانم نوشین روان‌دوست	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور	لیسانس مهندسی سازه
آقای محمدطاهر طاهری بهبهانی	شرکت مهندسین مشاور توان آب	فوق‌لیسانس مهندسی منابع آب و هیدرولیک
آقای محمدرضا عسکری	شرکت مهندسین مشاور بند آب	دکترای سازه
آقای مجتبی غروی	دانشگاه علم و صنعت ایران	دکترای مهندسی عمران
آقای محمدرضا فرشباف رحیمی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	فوق‌لیسانس کاربرد روش‌های پیشرفته در طراحی سدهای خاکی
آقای سیاوش لیتکوهی	شرکت مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک	دکترای راه و ساختمان – ژئوتکنیک
آقای علی یوسفی	شرکت خدمات مهندسی برق ایران (مشانیر)	فوق‌لیسانس مهندسی معدن و زمین‌شناسی مهندسی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	**۱**
فصل اول- هدف، دامنه کاربرد و کلیات	**۳**
۱-۱- هدف	۵
۱-۲- دامنه کاربرد	۵
۱-۳- کلیات	۶
فصل دوم- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری	**۹**
۲-۱- وسایل و ابزار آزمایش	۱۱
۲-۲- آماده‌سازی نمونه	۱۱
۲-۳- روش انجام آزمایش	۱۲
۲-۴- روابط و محاسبات	۱۳
۲-۵- گزارش	۱۵
فصل سوم - آزمایش مقاومت فشاری سه محوری	**۱۹**
۳-۱- وسایل و ابزار آزمایش	۲۱
۳-۲- آماده‌سازی نمونه	۲۴
۳-۳- روش انجام آزمایش	۲۵
۳-۴- آزمایش سه محوری تحکیم نیافته و زهکشی نشده (UU)	۲۶
۳-۵- آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی نشده (CU)	۲۸
۳-۶- آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی شده (CD)	۳۴
۳-۷- گزارش آزمایش‌ها	۳۶
فصل چهارم - آزمایش تحکیم	**٤٧**
۴-۱- شرایط و تئوری آزمایش	۴۹
۴-۲- وسایل و تجهیزات	۵۰
۴-۳- آماده‌سازی نمونه	۵۲
۴-۴- انجام آزمایش	۵۳
۴-۵- محاسبات	۵۴
۴-۶- گزارش آزمایش‌ها	۶۱

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل پنجم - آزمایش برش مستقیم	**٦٥**
۵-۱- وسایل و ابزار آزمایش	۶۷
۵-۲- آماده‌سازی نمونه	۶۹
۵-۳- روش انجام آزمایش	۷۰
۵-۴- محاسبات	۷۳
۵-۵- گزارش	۷۴
فهرست منابع	**۷۹**

مقدمه

نظر به اهمیت و لزوم اجرای دقیق نکات مندرج در روش آزمایش‌ها، یکسان‌سازی روش‌ها و هماهنگی در اجرای آزمایش‌ها دستورالعمل زیر تهیه گردیده است. در انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک، تا حد ممکن سعی در انطباق شرایط آزمایش با شرایط طبیعی نمونه می‌باشد. این شرایط تا حدود زیادی در آزمایش‌های زیر برآورده می‌شود.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری آزمایشی است که به اندازه‌گیری خاک‌های چسبنده دست نخورده یا بازسازی شده با استفاده از روش تغییر شکل کنترل شده می پردازد. به کمک این آزمایش میزان مقاومت تک محوری خاک دارای چسبندگی کافی و مناسب به‌طور تقریبی و سریع تعیین می‌شود.

آزمایش مقاومت فشاری سه محوری نیز آزمایشی است که طی آن مقاومت خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده، دست نخورده و یا بازسازی شده، در فشار محصور کننده ثابت و با اعمال بار محوری به روش تنش یا کرنش کنترل شده‌اندازه‌گیری می‌شود.

وزن هر سازه روی زمین، عمدتا تنش‌های فشاری در لایه های خاک به وجود می‌آورد که از طریق پی به خاک منتقل شده و موجب فشرده شدن خاک می‌شود. فشردگی خاک و تغییر شکلی که بر اثر وارد آمدن این تنش در خاک ایجاد می‌شود، ناشی از تغییر شکل فشاری و جابجایی ذرات خاک و خارج شدن هوا یا آب از منافذ خاک می‌باشد که باعث کاهش حجم خاک و در پی آن نشست سازه می‌شود. تا قرن بیستم، مهندسین عامل این نشست را به‌طور مبهم مربوط به پراکنده شدن خاک‌های نرم زیر سازه می‌دانستند و این موضوع نمی‌توانست نشست مداوم سازه‌های بزرگ که در مدت طولانی اتفاق می‌افتد را توجیه کند. برای حل این مشکل و شناخت رفتار خاک تحت بارهای مختلف، آزمایش تحکیم در لیست آزمایش‌های آزمایشگاهی قرارگرفت.

همچنین یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های مکانیکی خاک، مقاومت برشی آن می‌باشد. از این پارامتر در حل مسایل مانند پایداری ترانشه‌ها و خاکریزها، ظرفیت باربری پی‌ها و پایداری دیوارهای حایل استفاده می‌گردد. برای به‌دست آوردن مقاومت برشی، یکی از متداول‌ترین آزمایش‌ها، آزمایش برش مستقیم می‌باشد.

فصل ۱

هدف، دامنه کاربرد و کلیات

۱-۱- هدف

هدف از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری اندازه‌گیری مقاومت خاک‌های چسبنده دست نخورده یا بازسازی شده با استفاده از روش تغییر شکل کنترل شده می‌باشد. به کمک این آزمایش میزان مقاومت تک محوری خاکی را که دارای چسبندگی کافی و مناسب جهت این آزمایش می‌باشد، به‌طور تقریبی و سریع تعیین می‌کنند.

در انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری، هدف اندازه‌گیری مقاومت خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده، دست نخورده و یا بازسازی شده، در فشار محصور کننده ثابت و با اعمال بار محوری به روش تنش یا کرنش کنترل شده می‌باشد. در این آزمایش تئوری موهر- کولمب برای گسیختگی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش سه محوری برای هر نوع خاکی مناسب است و این برتری را دارد که طی آن شرایط زهکشی قابل کنترل بوده و می‌توان در صورت لزوم اجازه تحکیم به خاک‌های اشباع شده را داد و فشار آب حفره‌ای را به دست آورد.

پدیده تحکیم عبارتست از متراکم شدن یا در هم رفتن دانه‌های خاک که بر اثر خروج ذرات آب از بین حفرات خاک‌های ریز دانه اشباع حاصل می‌شود. وقوع پدیده تحکیم تدریجی است و با پیشرفت زمان رخ می‌دهد. مقدار و نشست ناشی از تحکیم، به شدت بار وارده، سرعت تحکیم و سرعت خروج ذرات آب از لایه خاک بستگی دارد. علاوه بر نشست ناشی از پدیده تحکیم، نشست خاک ناشی از تغییر شکل ارتجاعی خاک نیز می‌باشد که به آن نشست آنی می‌گویند و بر پایه روابط تئوری ارتجاعی محاسبه می‌شود. بنابراین هدف از انجام آزمایش تحکیم، اندازه‌گیری مقدار و زمان نشست خاک‌های ریزدانه چسبنده و دست نخورده می‌باشد درحالی‌که خاک به‌طور جانبی محصور و در جهت عمودی زهکشی می‌گردد و تحت اثر بارگذاری افزایشی قرار می‌گیرد.

آزمایش برش مستقیم به‌صورت تغییر شکل یک نمونه در حالت کرنش کنترل شده، در نزدیک یا روی صفحه برش ساده، به‌وسیله تنظیم وضعیت وسایل آزمایش انجام می‌گیرد. هدف از این آزمایش تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌باشد. این آزمایش به لحاظ سادگی تجهیزات، سهولت روش انجام و هزینه کم‌تر، کاربرد بیش‌تری نسبت به آزمایش‌های سه محوری دارد.

۱-۲- دامنه کاربرد

دامنه کاربرد آزمایش مقاومت فشاری تک محوری تعیین مقاومت خاک‌های چسبنده در حالت دست نخورده، بازسازی شده یا متراکم شده در پی‌های ساختمان‌های مرتفع، انواع پل‌ها، ستون و پایه‌های مخازن آب، محاسبه مدول الاستیسیته با استفاده از منحنی تنش-کرنش محوری (البته از آنجا که مدول به‌دست آمده عموما به مقدار زیادی غیرقابل اطمینان است، لذا عنوان مدول تغییر شکل بر آن صحیح‌تر می‌باشد.)، تعیین حساسیت خاک‌های رسی با مقایسه دو نتیجه حاصل از انجام دو بار آزمایش تک محوری روی نمونه مورد آزمایش به دو طریق دست نخورده و ریمولدد (بازسازی شده) می‌باشد.

این آزمایش ممکن است با کنترل تغییر شکل و یا کنترل تنش انجام گیرد که هر یک موارد استفاده خاصی دارند. البته آزمایش تغییر شکل کنترل شده، تقریبا عمومیت بیش‌تری دارد و با افزوده شدن بار تحت کنترل صورت می‌گیرد. آزمایش تک محوری برای مقادیر تعییر شکل نسبتا حساس بوده و به نظر می‌رسد، مقدار تغییر شکلی بین ۰/۵ تا ۲ درصد در دقیقه دارای نتایج قابل قبولی باشد.

کاربردهای آزمایش مقاومت فشاری سه محوری در تعیین ظرفیت باربری خاک، محاسبات پایداری خاک‌برداری و خاک‌ریزی، شیروانی‌های خاکی و زمین لغزش‌ها، آنالیز روابط تنش – تغییر شکل، تخمین نشست خاک تحت بارگذاری، تحلیل پایداری دیوارهای حایل می‌باشد.

دامنه کار برد آزمایش تحکیم، تعیین پارامترهای نشست پذیری خاک (تعیین میزان و سرعت تحکیم خاک‌ها) نظیر شاخص فشردگی، ضریب تراکم‌پذیری، ضریب تراکم‌پذیری حجمی و ضریب تحکیم (هنگامی که به‌طور جانبی محدود شده و تنها در جهت قائم زهکشی می‌شود)، تخمین مقدار سرعت و زمان نشست سازه یا خاکریز، بررسی رفتار سدها و همچنین جاده‌ها و پل‌ها که بر روی خاک رس بنا خواهند شد، (زیرا داشتن اطلاعات دقیق از مقدار نشست و همچنین سرعت آن بسیار مهم است) نیز از این آزمایش استفاده می‌شود. لذا این آزمایش اهمیت زیادی در طراحی پی و سازه‌های مهندسی دارد.

کاربرد آزمایش برش مستقیم تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌باشد. آزمایش برش مستقیم برای تعیین نسبتا سریع پارامترهای مقاومت برشی در حالت تحکیم یافته– زهکشی شده مناسب است. زیرا طول مسیرهای زهکشی از میان نمونه کوتاه بوده و لذا اجازه می‌دهند فشار آب حفره‌ای اضافی خیلی سریع‌تر از سایر آزمایش‌های زهکشی شده محو گردد.

۱-۳- کلیات

این دستورالعمل، در ابتدا روش اندازه‌گیری مقاومت برشی زهکشی نشده خاک‌های ریزدانه چسبنده را مورد توجه قرار می‌دهد. آزمایش با اعمال فشار محوری قائم بر نمونه (بدون فشار جانبی) انجام شده و به نام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نامیده می‌شود و نتایج نسبتا مناسبی برای خاک‌های ریزدانه چسبنده به‌صورت دست نخورده، به دست می‌دهد. این آزمایش فقط برای خاک‌های دانه‌ای، ترد، لایه‌لایه، خشک و سیلتی مناسب نبوده و دارای محدودیت‌های زیر می‌باشد: وقتی که نمونه خاک از داخل زمین برداشته می‌شود، اثر محدودیت‌های جانبی خاک احاطه کننده آن از بین می‌رود. برخی بر این عقیده‌اند که رطوبت موجود در خاک اثر محدود کننده (تنش سطحی) به‌وجود می‌آورد. بنابراین نمونه تاحدودی محصور شده، خواهد بود. این حکم زمانی بیش‌تر نمود پیدا می‌کند که نمونه کاملا یا تقریبا اشباع باشد. این اثر به رطوبت نسبی محیط آزمایش نیز بستگی دارد و محاسبه آن نسبتا مشکل می‌باشد. همچنین شرایط داخلی خاک (درجه اشباع و فشار آب منفذی نمونه‌ای که تحت اثر تنش، تغییر شکل می‌یابد) غیرقابل کنترل می‌باشد. به‌علاوه اصطکاک موجود در دو انتهای نمونه در محل صفحات اعمال بار، ایجاد محدودیت جانبی می‌نماید که تنش‌های داخلی را به مقدار نامعلومی تغییر می‌دهد. با استفاده از آزمایش‌های فشاری برای نمونه‌های محدود شده (سه محوری) می‌توان خطاهای حاصل از دو مورد ابتدایی را تقلیل داد و یا به‌طور کلی حذف نمود. همچنین می‌توان اهمیت عامل آخر را با مطالعات و بررسی‌های مختلف از جمله ساختن صفحاتی به‌عنوان سطوح بارگذاری با اصطکاک بسیار پایین، برای حصول نتایج مطلوب کم نمود.

در آزمایش مقاومت فشاری سه محوری به یک نمونه استوانه‌ای شکل خاک که به وسیله یک غشاء غیر قابل نفوذ احاطه شده و تحت فشار محدودکننده ثابتی قرار گرفته است، بار محوری اعمال می‌گردد. این عمل تا مرحله گسیختگی نمونه ادامه پیدا می‌کند. برای این کار سه نمونه از یک خاک تحت شرایط یکسان تهیه و به وسیله سه فشار جانبی متفاوت که با شرایط طبیعی محل نمونه‌برداری هماهنگ می‌باشد، تحت بار محوری گسیخته می‌شود. با رسم سه دایره موهر و یا نمودار تنش برشی حداکثر (τ_m) در

برابر تنش عمودی میانگین (σ_m) برای سه مرحله گسیختگی و رسم پوش این دوایر، مقادیر پارامتر های مقاومت برشی موهر- کولمب (C و φ) محاسبه می‌شود.

این آزمایش دارای مزیتهای ذیل است و تا حدود زیادی با شرایط طبیعی خاک سازگار می‌باشد. در این آزمایش امکان اشباع نمونه وجود دارد. انجام اشباع کاملا تحت کنترل آزمایشگر بوده وهر لحظه امکان اعلام درجه اشباع نمونه مقدور می‌باشد. این آزمایش می‌تواند با رطوبت موجود در نمونه نیز بدون اشباع کردن انجام گیرد. در این حالت درجه اشباع نمونه ذکر می‌گردد. همچنین با توجه به ابعاد ذرات نمونه خاک و درشت ترین ذره آن، امکان انجام این آزمایش با قطرهای ۳۳ میلی‌متر تا ۱۵۰ میلی‌متر وجود دارد. به‌علاوه این آزمایش به نوع نمونه‌ها بستگی نداشته واز ریزترین نمونه‌ها مانند رس‌های حساس تا نمونه‌های شنی، امکان انجام این آزمایش وجود دارد. در عین حال مقاومت برشی خاک در این آزمایش به تنش‌های اعمالی، زمان تحکیم، سرعت کرنش و تاریخچه تنش‌های وارده به خاک بستگی دارد. در این آزمایش امکان تحکیم نمونه وجود داشته و با توجه به اینکه خروجی آب از نمونه به تغییر حجم سنج منتقل می‌گردد، منحنی مقدار آب خروجی بر حسب زمان رسم و خصوصیات تحکیم نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نوع سلول آزمایش و شرایط نمونه، امکان زهکشی آن هنگام گسیختگی وجود داشته و این عمل تحت کنترل آزمایشگر می‌باشد. در انتها اینکه در این آزمایش فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در نمونه تحت شرایط مختلف از ابتدا تا انتهای آزمایش کنترل شده و رسم منحنی فشار آب حفره‌ای در کل آزمایش مقدور می‌باشد.

معمولا آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های دست نخورده خاک‌های ریزدانه که به‌طور طبیعی در آب رسوب کرده‌اند، صورت می‌گیرد و در مواردی نیز این آزمایش بر روی نمونه‌های دست خورده انجام می‌پذیرد. وقتی که به یک خاک اشباع تنش فشاری وارد می‌شود، تغییر شکل در آن اتفاق می‌افتد. ابتدا فشار وارده تماما به آب درون خاک منتقل شده و موجب افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. بسته به نفوذپذیری خاک، آب از داخل خاک رانده شده و زهکشی می‌شود. در ابتدا به علت زیاد بودن فشار آب حفره‌ای اضافی، سرعت زهکشی بیش‌تر بوده وبه مرور کم می‌شود. پس از اینکه آب به حد کافی از خاک خارج شد و بار تماما به ذرات جامد خاک وارد شد، توده خاک تغییر شکل داده و هم‌زمان حجم آن کاهش می‌یابد. این روند خروج آب از توده خاک و کاهش حجم را تحکیم می‌نامند. به عبارت دیگر فرایند تدریجی زهکشی تحت تاثیر اضافه بار و انتقال فشار اضافی آب حفره‌ای به تنش موثر که باعث نشست تابع زمان می‌شود، تحکیم نام دارد. در مواردی که تغییر شکل جانبی خاک اشباع برابر صفر نباشد، علاوه بر نشست در اثر تحکیم، به دلیل تغییر شکل خاک در شرایط زهکشی نشده، نشست آنی نیز پدید خواهد آمد. میزان نشست آنی بر مبنای نظریه ارتجاعی خاک محاسبه می‌شود. همچنین در آزمایش تحکیم نمودار نشست (تغییر شکل) در مقابل زمان شامل سه قسمت می‌باشد: فشردگی (تراکم) مقدماتی، تحکیم اولیه که طی آن به علت زهکشی آب حفره‌ای فشار اضافی آب حفره‌ای به تدریج به تنش موثر خاک تبدیل می‌شود و تحکیم ثانویه که پس از محو کامل فشار اضافی آب حفره‌ای رخ می‌دهد و علت آن به وجود آمدن تغییر شکل‌های ویسکو پلاستیک در اسکلت خاک است. به‌علاوه سرعت خروج آب حفره‌ای یا سرعت تحکیم بستگی به نوع خاک و دانه‌بندی آن دارد. در خاک‌های با ضخامت یکسان، هر قدر نفوذپذیری خاک بیش‌تر باشد آب سریع‌تر از آن خارج شده و زمان تحکیم کوتاه‌تر می‌شود. درصورتی‌که اگر نفوذپذیری خاک خیلی کم باشد، مانند رس‌ها، آب به‌تدریج و در زمان خیلی طولانی از خاک خارج می‌شود. بنابراین زمان تحکیم خیلی طولانی خواهد بود.

آزمایش برش مستقیم به‌صورت تغییر شکل یک نمونه در حالت کرنش کنترل شده، در نزدیک یا روی صفحه برش ساده، به‌وسیله تنظیم وضعیت وسایل آزمایش انجام می‌گیرد. معمولا سه نمونه یکسان خاک تحت بارهای عمودی متفاوت آزمایش می‌شود

تا رابطه تنش عمودی – مقاومت برشی و تنش برشی – تغییر مکان نسبی افقی و تنش برشی – تغییر مکان نسبی عمودی و همچنین پارامترهای مقاومت برشی خاک از طریق رسم پوش موهر تعیین گردد. شرایط انجام آزمایش باید طوری تعیین گردد، که تنش عمودی انتخاب شده و همچنین در صد رطوبت و دانسیته نمونه همانند شرایط محل مورد بررسی باشد. ارتفاع مناسبی برای محاسبه کرنش‌های برشی نمی‌توان تعریف کرد، زیرا تغییر مکان‌ها و تنش‌های برشی در داخل نمونه توزیع غیریکنواختی دارد. بنابراین آزمایش جهت تعیین روابط بین تنش – کرنش و یا هر کمیتی که در رابطه با تنش – کرنش باشد، (مانند مدول‌ها) مورد استفاده ندارد.

در زمان برش نمونه، سطح مقطع نمونه هر لحظه در حال تغییر می‌باشد. اما از آنجا که در بیش‌تر موارد شکست نمونه در تغییرات کم اتفاق می‌افتد، این مسئله لحاظ نمی‌گردد. لیکن باید توجه داشت که در ضمن آزمایش، سطح برش و در نتیجه تنش عمودی ثابت باقی نمی‌ماند. به‌علاوه سطح شکست واقعی مسطح نبوده و همچنین تنش برشی آن‌طور که فرض می‌شود به‌طور یکنواخت در سطح برش توزیع نمی‌گردد. در ضمن به لحاظ شرایط دستگاه، امکان اندازه‌گیری فشار منفذی وجود ندارد. در این آزمایش اجازه داده نمی‌شود که خاک در امتداد ضعیف‌ترین صفحه گسیخته شود و گسیختگی اجبارا در صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی جعبه برش رخ می‌دهد.

در حین آزمایش برش مستقیم، تنش‌های اصلی دوران خواهند داشت، که ممکن است شرایط محل را مدل نماید و یا مدل ننماید. همچنین امکان وقوع گسیختگی روی صفحات ضعیف وجود نداشته و گسیختگی تمایل دارد نزدیک یا روی صفحه افقی از پیش تعیین شده در وسط نمونه اتفاق بیفتد.

فصل ۲

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

۲-۱- وسایل و ابزار آزمایش

۲-۱-۱- دستگاه بارگذاری: وسیله‌ای است که بتواند برای خاک‌های با مقاومت فشاری کم‌تر از ۱۰۰کیلوپاسکال (یک کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) فشار وارده را با دقت مناسب حدود یک کیلوپاسکال (یک صدم کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) و برای خاک‌های با مقاومت فشاری محدود نشده ۱۰۰ کیلوپاسکال یا بیش‌تر، تنش فشاری را با تقریب حدود ۵ کیلوپاسکال (۰/۰۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) اندازه‌گیری کند و سرعت بارگذاری و تغییر شکل را به‌طور یکنواخت اعمال کند و همچنین قابلیت حرکت تا ۲۰٪ طول نمونه را دارا باشد. (شکل شماره ۲-۱)

۲-۱-۲- استوانه نمونه‌گیر: لوله فولادی صلبی است که ضخامت آن در انطباق با تعریف لوله‌های جدار نازک بوده و لبه ابتدای آن حالت تیز و برنده داشته باشد. نمونه را در همان جهتی که داخل نمونه‌گیر شده، باید خارج کرد و این عمل را باید با کم‌ترین سرعت و به‌صورت یکنواخت انجام داد تا دست خوردگی به حداقل برسد.

۲-۱-۳- کولیس یا هر دستگاه اندازه‌گیری دیگر: که برای اندازه‌گیری ابعاد فیزیکی نمونه در حدود ۰/۱ درصد بعد اندازه‌گیری شده به‌کار می‌رود. برای نمونه‌های نرم و سست نباید از کولیس استفاده شود، چون در هنگام اندازه‌گیری ممکن است تغییر شکل در نمونه به وجود آید.

۲-۱-۴- گیج عقربه‌ای اندازه‌گیر تغییر شکل: که تا ۰/۰۳ میلی‌متر (۰/۰۰۱ in) یا ریزتر درجه‌بندی شده و دارای محدوده حرکت (Travel Range) حداقل ۲۰٪ طول نمونه مورد آزمایش باشد.

۲-۱-۵- ترازو: که برای توزین نمونه به‌کار می‌رود و باید امکان اندازه‌گیری با دقت ۰/۱ درصد وزن کل نمونه را داشته باشد.

۲-۱-۶- زمان‌سنج (کرونومتر): با دقت یک ثانیه که برای تعیین سرعت کرنش نمونه استفاده می‌شود.

۲-۱-۷- دستگاه خشک کننده (آون): که برای اندازه‌گیری درصد رطوبت نمونه به‌کار می‌رود.

۲-۱-۸- قوطی فلزی درب دار: که برای حفظ نمونه و تعیین درصد رطوبت آن استفاده می‌شود.

۲-۱-۹- کاردک فلزی: که برای صاف کردن سر و ته و سطح جانبی نمونه استفاده می‌شود.

۲-۱-۱۰- صفحات فلزی صلب زیرسری و بالاسری نمونه: که لازم است هم قطر نمونه بوده و حداقل وزن ممکن را داشته باشند.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه

۲-۲-۱- اندازه قطر نمونه آزمایش تک محوری باید حداقل ۳۰ میلی‌متر بوده و در این حالت اندازه بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه باید کوچک‌تر از یک دهم قطر نمونه باشد. برای نمونه‌هایی که دارای قطر ۷۲ میلی‌متر یا بیش‌تر باشند، اندازه بزرگ‌ترین دانهٔ موجود باید کوچک‌تر از یک ششم قطر نمونه باشد.

۲-۲-۱-۱- بعد از اتمام آزمایش اگر دانه‌ای در نمونه بزرگ‌تر از حد مجاز مشاهده شد باید حتما مورد را همراه گزارش آزمایش ارائه کرد.

۲-۲-۲- نسبت ارتفاع نمونه به قطر آن باید بین ۲ تا ۲/۵ باشد تا از تداخل سطوح گسیختگی تحت زاویه ۴۵ درجه جلوگیری شود. همچنین نباید این نسبت بیش از اندازه بزرگ باشد که ستون گسیختگی در آن ایجاد شود. میانگین ارتفاع و میانگین قطر نمونه را می‌توان با استفاده از ابزار مشخص شده در بند ۲-۱-۳ تعیین کرد. برای اندازه‌گیری ارتفاع باید حداقل سه نقطه (با زاویه۱۲۰ درجه) و حداقل سه اندازه‌گیری قطر در نقاط ۱/۴ ارتفاع انجام می‌شود.

۲-۲-۳- نمونه‌های دست نخورده، قطری متناسب با نمونه‌های مورد نظر در آزمایش تک محوری داشته و یا از نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر تهیه می‌شوند که در این حالت باید سعی کرد کم‌ترین دست خوردگی در نمونه‌ایجاد شود و درصد رطوبت آن تا حد ممکن تغییری نکند.

۲-۲-۴- نمونه باید دارای سطح مقطع دایره‌ای بوده و دو سطح بالا و پایین آن کاملا موازی هم‌زمان عمود بر محور طولی باشند. در هنگام بریدن یا تراشیدن نمونه در صورت برخورد با هر نوع برآمدگی و فرو افتادگی باید سطح کاملا صاف شده و در حالتی که حفره‌ای در سطوح نمونه به‌وجود آمده باشد، باید با دقت تمام از خاک حاصل از تراشیدن نمونه حفره پر شده و چگالی نمونه تا حد ممکن تغییر نکند. در زمانی که سنگ‌ریزه و یا چیزهای خرد و ریز به مقدار فراوان و به‌صورت نامنظم در دو سطح بالا و پایین نمونه مشاهده گردد، باید در حداقل ضخامت ممکن با گچ پاریس (هیدرواستون) یا مواد مشابه دیگر محل را اندود کرد. برای تعیین درصد رطوبت اگر نمونه اندود شده است، جرم و ابعاد آن باید قبل از اندود شدن به‌دست آید. اگر نتوان کل نمونه را برای تعیین درصد رطوبت به‌کار برد، برای تعیین درصد رطوبت نمونه، بعد از آزمایش، قسمتی از اصل نمونه تراشیده شده و بلافاصله در یک ظرف دردار قرار داده می‌شود و برای تعیین درصد رطوبت به‌کار می‌رود.

۲-۲-۵- در مواردی که لازم است نمونه بازسازی شود، این نمونه‌ها یا از نمونه‌های دست نخورده که شکسته شده است بازسازی می‌شود، که در این حالت نمونه دست نخورده را باید در یک غشاء لاستیکی نازک قرارداد و به‌وسیله فشار متناسب انگشتان آن را بازسازی کرد به‌طوری که هوا در نمونه محبوس نشود و چگالی یکنواختی حاصل شود و همچنین، تخلخل و درصد رطوبت همانند نمونه دست نخورده باشد. در حالتی که نمونه به‌طور کامل بازسازی می‌شود باید نمونه را در قالبی با سطح مقطع دایره با ابعاد استاندارد و با دانسیته و درصد رطوبت محاسبه شده، تحت شرایطی که دو سطح بالا و پایین بر محور طولی عمود باشد، بازسازی کرد. بعد از شکل‌گیری نمونه باید دو انتهای آن را عمود بر محور طولی بریده و آن را از داخل قالب بیرون آورده و جرم و ابعاد نمونه آزمایشی را تعیین کرد.

۲-۳- روش انجام آزمایش

۲-۳-۱- نمونه مورد آزمایش به همراه قطعه زیرسری آن در مرکز صفحه تحتانی دستگاه بارگذاری قرار گرفته و قطعه بالاسری نمونه با احتیاط بر روی آن قرار داده می‌شود. سپس نیروسنج با دقت به بالای نمونه مماس می‌شود. شاخص تغییر شکل صفر شده و در این لحظه بار بسیارکوچکی بر روی نمونه اعمال می‌شود (به اندازه یک واحد از تقسیمات اندازه‌گیر یا حدود ۰/۰۱ کیلوگرم) و بعد دستگاه فشاری تک محوری روشن می‌شود. بار محوری باید طوری اعمال شود که کرنش محوری دارای نرخ ۰/۵ تا ۲ درصد در دقیقه باشد و برای تعیین شکل منحنی تنش – کرنش مقادیر،

تغییر شکل و متناظر هر یک از این نقاط، مقدار نیرو یادداشت می‌شود. معمولا حدود ۱۰ تا ۱۵ نقطه کافی است. بارگذاری و این برداشت نقاط ادامه دارد تا یکی از حالت‌های زیر به‌وجود آید:

۲-۳-۱-۱- با افزایش کرنش بار وارده کاهش یابد.

۲-۳-۱-۲- بار وارده در چهار بار قرائت تغییر شکل ثابت بماند.

۲-۳-۱-۳- کرنش محوری به ۱۵٪ برسد.

۲-۳-۱-۳-۱- سرعت کرنش محوری طوری تنظیم می‌شود تا زمان رسیدن به لحظه گسیختگی از حدود ۱۵ دقیقه بیش‌تر نشود. اگر از این زمان بگذرد، امکان تغییر درصد رطوبت نمونه زیاد می‌شود. درصد رطوبت نمونه با استفاده از کل نمونه تعیین می‌شود. همچنین در شروع آزمایش در هنگام آماده کردن دستگاه تک محوری نیز باید نمونه در ظروف مخصوص نگهداری شود تا رطوبت آن تغییر نکند. نمونه‌هایی‌که نرم بوده و یا رطوبت زیادی دارند و تغییر شکل بزرگی تا گسیختگی از خود نشان می‌دهند، باید در نرخ کرنش بالاتری آزمایش شوند و بالکس نمونه‌های شکننده و سخت، به‌علت تغییر شکل بسیار کم تا گسیختگی، باید در نرخ کرنش کم‌تری آزمایش شوند.

۲-۳-۲- در دستگاه تک محوری که از رینگ (حلقه‌های فلزی) برای تشخیص مقدار نیرو استفاده می‌شود این رینگ‌ها با توجه به مقاومت نمونه انتخاب می‌شوند. هرچه نمونه مقاوم‌تر باشد از رینگ با صلبیت بیش‌تر و هرچه نمونه نرم‌تر باشد از رینگ با صلبیت کم‌تر استفاده می‌شود.

۲-۳-۳- بعد از اتمام آزمایش، برای نشان دادن زاویه شیب سطح گسیختگی، در صورت امکان از نمونه عکس گرفته شده و درصورتی‌که زاویه قابل اندازه‌گیری باشد آن را اندازه می‌گیرند. در حالت کلی، شکل نمونه بعد از آزمایش رسم می‌شود. همچنین نمونه را توزین کرده و برای تعیین درصد رطوبت، کل نمونه را در خشک‌کن قرار می‌دهند. در حالتی که نمونه‌ها دست نخورده باشند می‌توان از تراشه‌های حاصله از نمونه سازی برای تعیین درصد رطوبت نمونه استفاده کرد.

۲-٤- روابط و محاسبات

۲-۴-۱- کرنش محوری (ε) با تقریب ۰/۱ درصد برای بار وارده محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (۱-۲)$$

در رابطه (۲-۱):

ΔL = تغییر شکل نمونه که با دستگاه اندازه‌گیر تغییر شکل تعیین شده و برحسب میلی‌متراست.

L_0 = میانگین ارتفاع اولیه نمونه آزمایش بوده و برحسب میلی‌متر است.

۲-۴-۲- سطح مقطع نمونه در طی آزمایش تغییر کرده و با توجه به کاهش طول نمونه، افزایش می‌یابد، البته با فرض اینکه حجم کل نمونه طی آزمایش تغییر نکرده، یعنی در حین بارگذاری آب از نمونه خارج نشده است، محاسبات زیر انجام می‌شود:

$$V = A_0 L_0 \qquad (۲-۲)$$

در رابطه (۲-۲):

V = حجم کل اولیه نمونه خاک برحسب سانتی‌متر مکعب؛

A_0 = میانگین سطح مقطع اولیه برحسب سانتی‌متر مربع و

L_0 = میانگین ارتفاع اولیه نمونه و برحسب میلی‌متر است

بعد از بارگذاری و تغییر در ارتفاع نمونه به اندازه ΔL:

$$V = A'(L_0 - \Delta L) \qquad (۳-۲)$$

که

A' = میانگین سطح مقطع تصحیح شده برای بار وارده است.

از ساده کردن روابط فوق می‌توان نتیجه گرفت:

$$A' = \frac{A_0}{1-\varepsilon} \qquad (۴-۲)$$

۲-۴-۳- تنش فشاری (σ_C): تنش فشاری بر روی نمونه در هر لحظه از رابطه (۲-۵) تا سه رقم معنی دار و یا نزدیکترین ۱ کیلو پاسکال به دست می‌آید.

$$\sigma_c = \frac{P}{A'} \qquad (۵-۲)$$

در رابطه (۲-۵):

P = بار وارده بر نمونه در هر لحظه بر حسب کیلوپاسکال (و یا کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع) و

A' = سطح مقطع میانگین نمونه برای بار متناظر P بر حسب سانتی‌متر مربع است.

برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری q_u، هر کدام از موارد ذیل که زودتر به وجود بیاید، به‌عنوان مقاومت فشاری تک محوری انتخاب و گزارش می‌شود.

الف – حداکثر مقدار تنش فشاری

ب – میزان تنش فشاری نظیر در کرنش محوری برابر ۱۵٪

۲-۴-۴- نمودار تنش – کرنش: برای نشان دادن رابطه تنش فشاری و کرنش محوری نمودار تنش – کرنش رسم می‌شود که مقاومت فشاری تک محوری و کرنش محوری در لحظه گسیختگی از آن به‌دست می‌آید.

۲-۴-۵- حساسیت خاک: با استفاده از مقدار مقاومت فشاری تک محوری یک نمونه در حالت دست نخورده و بازسازی شده می‌توان حساسیت خاک را به‌دست آورد.

$$S_t = \frac{q_u \text{ نمونه دست نخورده}}{q_u \text{ نمونه بازسازی شده}} \qquad (۶-۲)$$

برای این کار، درصد رطوبت و چگالی نمونه دست نخورده اندازه‌گیری شده و نمونه دیگری با همان درصد رطوبت و دانسیته، بازسازی می‌شود. سپس آزمایش تک محوری روی آن انجام می‌شود. البته این مورد فقط برای خاک‌هایی مناسب است که نمونه در حالت بازسازی شده، پایدار باشد.

۲-۴-۶- مدول الاستیسیته (E): از نسبت تغییر تنش فشاری به تغییر شکل نسبی نمونه در هنگام اعمال بار محوری، مدول دگرشکلی به‌دست می‌آید.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \qquad (۷-۲)$$

اگر این نسبت در ابتدای منحنی محاسبه شود، به مدول مماسی (تانژانت) معروف است. در حالتی که در متوسط مقدار مقاومت فشاری تک محوری، این مقدار در نظر گرفته شود، به آن مدول ۵۰٪ گفته می‌شود و در حالتی که در اوج تنش فشاری محاسبه شود به مدول نهایی معروف است. البته در حالت کلی مقدار مدول الاستیسیته نمونه در یک آزمایش تک محوری از ابتدا تا انتهای آزمایش درحال نقصان است.

۲-۵- گزارش

باتوجه به برگه و منحنی های نمونه پیوست، لازم است موارد زیر در گزارش ذکر شود:

۲-۵-۱- مقاومت فشاری (محدود نشده) تک محوری

۲-۵-۲- مقاومت چسبندگی زهکشی نشده (C_u): که با فرض $\phi_u = 0$ مقدار آن نصف مقاومت فشاری تک محوری است یعنی:

$$C_u = \frac{q_u}{2} \qquad (۸-۲)$$

۲-۵-۳- مقدار کرنش در حالت گسیختگی زمانی‌که گسیختگی اتفاق افتاده باشد یا اعلام کرنش ۱۵٪.

۲-۵-۴- میزان سرعت کرنش

۲-۵-۵- میانگین ارتفاع و قطر نمونه و نسبت آن دو

۲-۵-۶- میزان چگالی خشک و درصد رطوبت نمونه با ذکر اینکه قبل و یا بعد از آزمایش به‌دست آمده‌است و اینکه درصد رطوبت نمونه از کل نمونه یا از تراشه‌ها به‌دست آمده است.

۲-۵-۷- شناسایی و تشریح نظری نمونه

۲-۵-۸- طبقه‌بندی نمونه خاک همراه با حد روانی و حد خمیری در صورتی‌که موجود باشد.

۲-۵-۹- اعلام اینکه نمونه دست نخورده و یا بازسازی شده بوده است.

۲-۵-۱۰- شکل نمونه بعد از گسیختگی و یا انتهای آزمایش

۲-۵-۱۱- شماره گمانه، شماره نمونه، محل و عمق نمونه‌برداری، همچنین نام پروژه و تاریخ اخذ نمونه

۲-۵-۱۲- درجه اشباع نمونه و چگالی ذرات جامد خاک (G_s)، در صورت تعیین آن

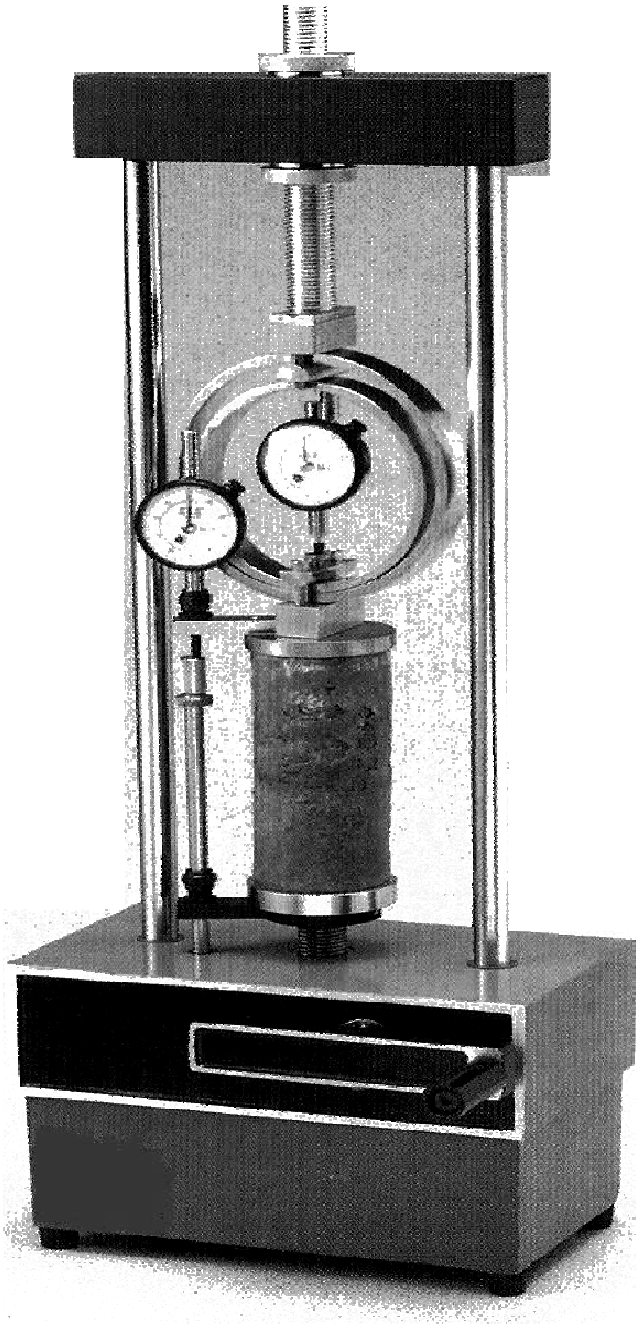
۲-۵-۱۳- ارائه نمودار تنش – کرنش

۲-۵-۱۴- مقدار مدول الاستیسیته و نوع مدول در صورت محاسبه آن

۲-۵-۱۵- حساسیت خاک در صورت تعیین

۲-۵-۱۶- اعلام موارد استثنائی و اتفاقات خاصی که در مراحل آزمایش به‌وجود آمده است و به‌نظر می‌رسد برای تفسیر صحیح نتایج به‌دست آمده لازم باشد. به‌طور مثال سطوح لغزش، لایه بندی، سنگریزه ها،ریشه های گیاهان، شکنندگی، شکل گسیختگی نمونه (بشکه‌ای یا خمره‌ای شدن، برش قطری یا غیره)

تمام موارد فوق در برگه قرائت و شناسنامه خاک و نیز دو منحنی که به‌عنوان نمونه آورده شده ملاحظه می‌شود. این دو منحنی رفتار نمونه را پس از گسیختگی و نیز در حالتی که نمونه به گسیختگی نرسیده و آزمایش تا ۱۵٪ کرنش ادامه داده شده، نشان می‌دهد.



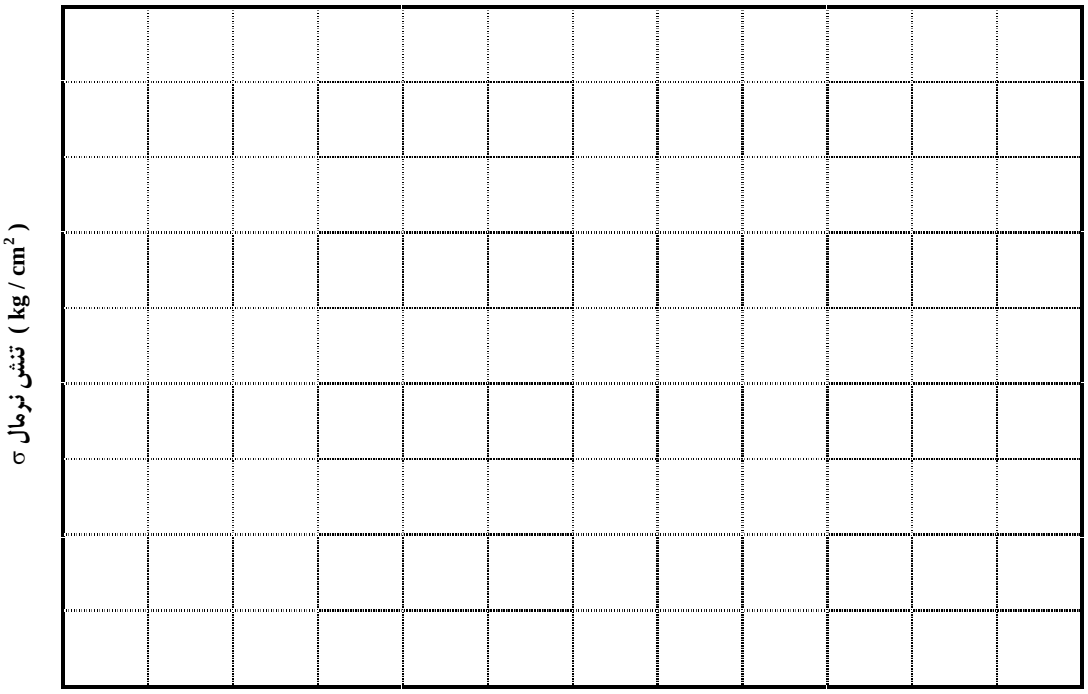
شکل ۲-۱- دستگاه انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به همراه نمونه آزمایش

برگه ثبت داده‌های آزمایش فشاری تک محوری (محصور نشده)

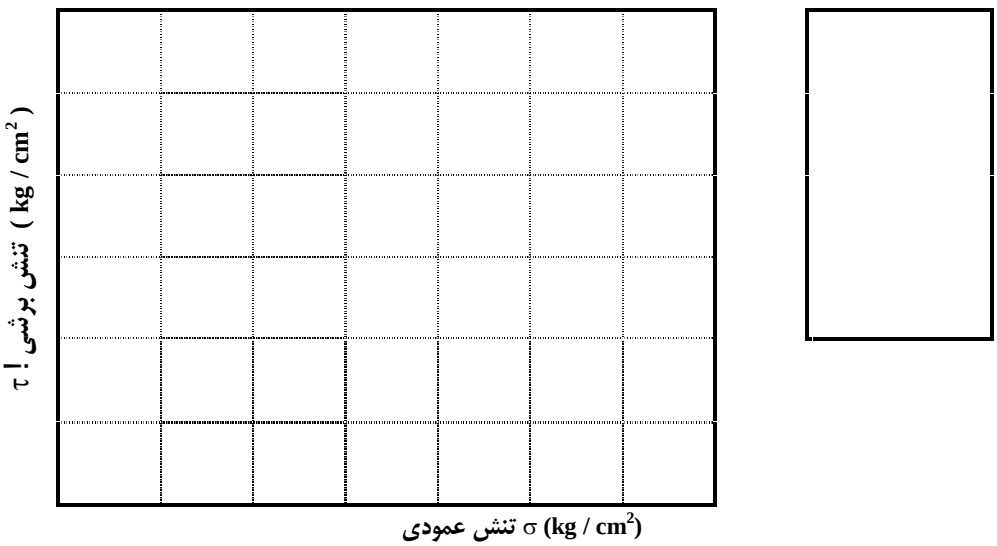
نام و شماره پروژه:	عمق نمونه‌برداری:	آزمایش کننده:
شماره نمونه:	توصیف نمونه خاک:	تاریخ آزمایش:
نوع نمونه:دست نخورده یا بازسازی شده:	سرعت کرنش:	
وزن خشک $W_d =$ (gr) درصد رطوبت $\omega =$ % وزن مخصوص خشک $\gamma dry =$ (gr/cm^3) ضریب رینگ $LRC =$	حجم $V_0 =$ (cm^3) وزن تر $W_0 =$ (gr) وزن مخصوص‌تر $\gamma wet =$ (gr/cm^3)	میانگین قطر اولیه $D_0 =$ (mm) سطح مقطع اولیه $A_0 =$ (cm^2) میانگین ارتفاع اولیه $L_0 =$ (mm)

۸	۷	٦	٤ ۵	٤	۳	۲	۱
تنش فشاری (kg/cm^2)	بارکل روی نمونه $(a \times LRC)(kg)$	سطح مقطع تصحیح شده $A' = \frac{A_0}{1-\varepsilon}(cm^2)$	$1-\varepsilon$	تغییر شکل نسبی $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	تغییر شکل نمونه ΔL (mm)	قرائت بارگذاری (α)	قرائت گیج تغییرشکل

منحنی‌های نمونه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری



نمایش نحوه گسیختگی نمونه



Unconfined Compressive Strength, q_u =

چسبندگی زهکشی نشده Cohesion = $\frac{q_u}{2}$ =

فصل ۳

آزمایش مقاومت فشاری سه محوری

۳-۱- وسایل و ابزار آزمایش

۳-۱-۱- دستگاه بارگذاری محوری: این دستگاه با توجه به ابعاد نمونه، توان حرکت عمودی از ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر را دارد و هنگامی برای نرخ کرنش معینی تنظیم شود، نرخ واقعی کرنش نباید به میزانی بیش‌تر از ۵ درصد نرخ کرنش معین تغییر کند. این دستگاه دارای ساختمان مستحکمی بوده و در هنگام اعمال نیرو، حداقل ارتعاش را دارد. برای تعیین ارتعاش حداقل می‌توان ظرفی محتوی آب را روی دستگاه قرار داد و چنانچه در هنگام اعمال نیرو، بر روی سطح آب هیچ موجی محسوس نباشد، ارتعاش دستگاه درحد استاندارد است.

۳-۱-۲- وسیله اندازه‌گیری بار محوری: این وسیله در دستگاه‌های جدید سه محوری به‌صورت دیجیتالی بوده و مقدار نیروی وارده را با دقت نشان داده و یا ثبت می‌کند. اما در بعضی از دستگاه‌های موجود، این نیرو توسط رینگ (حلقه بارگذاری) اندازه‌گیری می‌شود. این رینگ‌ها، فلزات قابل ارتجاعی بوده وحداکثر نیرویی که می‌توانند تحمل کند بر روی آن نوشته شده است. در نمونه‌های ضعیف و سست و نمونه‌هایی‌که قطر آن کم است، باید از رینگ‌های ضعیف‌تر، که دقت عمل بیش‌تری دارند استفاده شود. البته در تمام موارد وسیله اندازه‌گیری بار محوری (رینگ‌ها و تجهیزات دیجیتالی)، باید قادر به اندازه‌گیری بار محوری با دقت حدود یک درصد بار محوری تخمینی در زمان گسیختگی باشد.

۳-۱-۳- سلول آزمایش: این وسیله مخزنی شفاف است که نمونه در آن جاسازی می‌شود. با توجه به ابعاد نمونه، این سلول نیز دارای ابعاد مختلف است. جنس جداره سلول از ماده‌ای شفاف و مقاوم است تا امکان مشاهده نمونه تا آخرین مرحله گسیختگی وجود داشته باشد. سلول آزمایش باید قادر به تحمل فشار محفظه برابر مجموع تنش تحکیمی موثر و پس فشار باشد و فشار داخل سلول با توجه به این مقاومت تعیین می‌شود. در کلیه این سلول‌ها چهار شیر وجود دارد، که برای موارد ذیر به‌کار می‌رود:

- ایجاد فشار جانبی و همچنین پر و خالی کردن آن
- تزریق آب به نمونه برای اشباع و همچنین تخلیه و مکش آن
- اعمال پس فشار (Back Pressure) و قرائت فشار آب حفره‌ای
- انجام تحکیم نمونه و اتصال آن به تغییر حجم سنج و زهکشی نمونه

۳-۱-۴- فحات زیرسری و بالاسری: سلول آزمایش دارای قطعات مختلفی است. مانند صفحات زیرسری و بالاسری نمونه که با توجه به قطر نمونه انتخاب می‌شوند. این قطعه‌ها صلب بوده و از بالا و پایین نمونه را محدود می‌کنند و همچنین باید از یک ماده غیرقابل خوردگی و نفوذ ناپذیر ساخته شده باشند. سطح مقطع آنها همانند نمونه، دایره شکل بوده و وزن قطعه بالاسری کم‌تر از یک صدم کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، تنش محوری بر نمونه وارد می‌کند. این دو قطعه هم قطر نمونه بوده و هم مرکز آن قرار می‌گیرند. قطعه بالاسری در هنگام گسیختگی نمونه نباید بیش از ۵ درجه انحراف از محور داشته باشد. صفحه بالاسری باید دارای یک شیر خروجی باشد تا هوا بتواند به هنگام پر شدن محفظه، با فشار از آن خارج شود. صفحه زیرسری باید دارای یک ورودی باشد که از طریق آن محفظه با فشار مایع

تغذیه شود. این ورودی به انتهای نمونه منتهی می‌شود و راه ارتباطی با کلاهک که امکان اشباع و زهکشی نمونه را فراهم می‌کند.

۳-۱-۵- پیستون فلزی اعمال بار: نیروی محوری خارج از سلول به وسیله یک پیستون فلزی به سر نمونه وارد می‌شود. چون این پیستون باید حداقل اصطکاک را با بدنه داشته باشد و تغییر میزان بار محوری ناشی از اصطکاک نباید از ۱ درصد بار محوری گسیختگی تجاوز کند، به وسیله گریس های مخصوص این عمل انجام می‌شود.

۳-۱-۶- مخزن فشار: در آزمایش‌های سه محوری دومخزن فشار مجزا، یکی برای فشار جانبی و دیگری برای پس فشار، اشباع و یا تحکیم به کار می‌رود. این مخازن فشار به وسیله رگلاتور و یا هر وسیله تنظیم فشار، مقدار معینی تنش اعمال می‌کنند. وسیله کنترل فشار جانبی باید توان اعمال و کنترل فشار در محدوده ۰/۰۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای فشار تحکیمی موثر کم‌تر از ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و محدوده ۱ ± درصد فشار برای فشارهای تحکیمی موثر بیش از ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را دارا بوده و به صورت اتوماتیک تا هر زمانی که نیاز باشد این تنش را اعمال کند.

۳-۱-۷- اندازه‌گیر تغییر شکل: این اندازه‌گیر که تغییر شکل محوری نمونه را نشان می‌دهد، به صورت عقربه‌ای یا دیجیتال قرائت می‌شود. با توجه به طول نمونه معمولا از اندازه‌گیر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. درهر صورت این اندازه‌گیر باید طوری باشد که امکان اندازه‌گیری ۰/۰۳ درصد طول نمونه را داشته و بتواند تغییرشکل تا ۲۰ درصد طول نمونه را نشان دهد.

۳-۱-۸- نشان دهنده صفر (نول اندیکاتور[1]): این وسیله بر روی یکی از شیرهای سلول که به بالا یا پایین نمونه ارتباط دارد متصل می‌شود. انواع معمولی و دیجیتال این وسیله وجود دارد. هنگامی که در نمونه تغییر فشار آب حفره‌ای ایجاد شود، جیوه موجود در نوع معمولی آن از مسیر v شکل به سمت چپ و یا راست منحرف می‌شود. با تغییر فشار از طریق پمپ دستی موجود در طرف دیگر نول اندیکاتور، جیوه در خط نشان قبلی تنظیم شده و مقدار کاهش و یا افزایش فشار از اندازه‌گیر مربوط خوانده و یادداشت می‌شود.

۳-۱-۹- وسایل اندازه‌گیر فشار: وسایل اندازه‌گیری فشار جانبی و پس فشار باید قادر به اندازه‌گیری فشارها با رواداری‌های ارائه شده در بند ۳-۱-۶ باشند. این وسایل ممکن است شامل اندازه‌گیرهای عقربه‌ای، مانومترهای فشار، ترانسدیوسرهای الکترونیکی فشار و یا دیگر وسایل اندازه‌گیری فشار با رواداری‌های بیان شده باشد. اگر برای اندازه‌گیری فشار جانبی و پس فشار از وسایل جداگانه‌ای استفاده می‌شود، این وسایل باید به‌طور هم‌زمان و در مقابل منبع فشار یکسانی واسنجی[2] شوند.

1- Null – Indicator Device

۲- کالیبره

۳-۱-۱۰- وسیله اندازه‌گیری تغییر حجم: حجم آب ورودی یا خروجی از نمونه باید با دقت ۰/۰۵ ± درصد حجم کل نمونه اندازه‌گیری شود. وسیله اندازه‌گیری حجم معمولا یک بورت است اما ممکن است هر وسیله اندازه‌گیری دیگری که دقت مورد نیاز را فراهم سازد، به کار رود. این وسیله باید توانایی تحمل فشار جانبی حداکثر را داشته باشد.

۳-۱-۱۱- غشاء لاستیکی: برای آب‌بندی نمونه (جدا کردن نمونه از سیال داخل سلول) از غشاءهای لاستیکی مخصوص قابل ارتجاع استفاده می‌شود. ضخامت این غشاء از ۱ درصد قطر نمونه بیش‌تر نبوده و قطر آن در حالت عادی (کشیده نشده) بین ۹۰ تا ۹۵ در صد قطر نمونه است. غشاء لاستیکی کل ارتفاع نمونه را در بر گرفته و از بالا و پایین توسط اورینگ به قطعات بالاسری و زیرسری نمونه، متصل می‌شود. این عمل که باید توسط تکنیسین با تجربه و به وسیله ادوات به‌خصوصی انجام گیرد، به غشاء کشی معروف است. در تمام مراحل آزمایش باید سوراخ و معیوب نبودن غشاء لاستیکی کنترل شود. غشاء لاستیکی دارای سختی خاصی بوده و تاثیراتی بر روی تنش وارد بر نمونه دارد که باید در محاسبات مد نظر قرار گیرد.

۳-۱-۱۲- صفحات متخلخل: نمونه باید توسط صفحات متخلخل صلبی که قطری برابر با قطر نمونه دارند، از کلاهک و صفحه زیرسری جدا شود. ضریب نفوذپذیری این صفحات باید تقریبا مساوی ضریب نفوذپذیری ماسه ریز باشد. صفحات متخلخل باید به‌طور منظم برای امکان مسدود بودن حفرات، کنترل شوند.

۳-۱-۱۳- کولیس یا هر دستگاه اندازه‌گیری دیگر: برای اندازه‌گیری ابعاد فیزیکی نمونه، وسایل مورد استفاده باید قادر به اندازه‌گیری ابعاد تا ۰/۱ درصد بعد اندازه‌گیری شده باشد. باید توجه کرد که برای نمونه‌های نرم و سست نباید ازکولیس استفاده شود، چون در هنگام اندازه‌گیری این نوع نمونه‌ها ممکن است قرارگیری شاخک‌های کولیس بر روی نمونه موجب تغییر شکل آن شود. در این حالت ابتدا نمونه را بین دو سطح صاف قرار داده و پس از برداشتن نمونه، فاصله دو سطح اندازه‌گیری می‌شود. معمولا میانگین قطر بالا و پایین و وسط نمونه به عنوان قطر نمونه و میانگین سه اندازه‌گیری ارتفاع به فاصله ۱۲۰ درجه از هم به عنوان ارتفاع نمونه مشخص می‌شود.

۳-۱-۱۴- استوانه نمونه‌گیر: لوله فولادی صلب است که ضخامت آن طبق تعریف لوله‌های جدار نازک بوده و لبه ابتدای آن حالت تیز و برنده دارد. نمونه دست نخورده را در همان جهتی که داخل نمونه‌گیر شده، باید با جک مخصوص خارج کرد و این عمل را باید با کم‌ترین سرعت و به‌صورت عمودی و یکنواخت انجام داد تا دست خوردگی به حداقل برسد.

۳-۱-۱۵- وسیله هوا گیری آب: مقدار هوای غیر محلول در آبی که برای اشباع کردن نمونه استفاده می‌شود، ممکن است با جوشاندن و حرارت دادن و یا هر روش دیگری (با توجه به حداکثر میزان پس فشار و زمان انجام آزمایش) کاهش یابد.

۳-۱-۱۶- ترازو: برای توزین نمونه به‌کار می‌رود و باید امکان اندازه‌گیری با دقت ۰/۰۵ درصد وزن کل نمونه را داشته باشد. معمولا برای نمونه‌های ۳۸ میلی‌متری ترازو با دقت ۰/۱ گرم و برای نمونه‌های ۶ اینچ ترازو با دقت ۱ گرم نیاز است.

۳-۱-۱۷- زمان‌سنج (کرونومتر): با دقت یک ثانیه که برای تعیین سرعت کرنش نمونه هنگام شکست و همچنین انجام تحکیم نمونه استفاده می‌شود.

۳-۱-۱۸- نوار فیلتر کاغذی: برای کاهش زمان لازم برای آزمایش و همچنین تحکیم نمونه، از نوارهای فیلتر کاغذی که در ۵۰ درصد سطح بیرونی نمونه قرار داده می‌شود، استفاده می‌شود. ضریب نفوذپذیری فیلتر کاغذی برای فشار نرمال ۵/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نباید از ۱×۱۰^{-۵} سانتی‌متر بر ثانیه کم‌تر باشد.

۳-۱-۱۹- ابزار تراش و برش نمونه شامل اره مویی، کاردک فلزی، وسایل آماده‌سازی نمونه‌های متراکم شده، منبسط کننده غشاء لاستیکی و اورینگ، قوطی‌های تعیین درصد رطوبت و اوراق ثبت داده‌ها در صورت لزوم باید تدارک دیده شوند.

۳-۲- آماده‌سازی نمونه

نمونه‌های آزمایش سه محوری عمدتا از نوع دست نخورده می‌باشد که این نمونه‌ها از شلبی، یوفر، کرکاتر و یا مونولیت تهیه می‌شوند. در موقع خارج ساختن نمونه از وسایل مذکور باید دقت کافی صورت گیرد تا کم‌ترین دست خوردگی در نمونه‌ایجاد شده و درصد رطوبت آن تا حد ممکن تغییری نکند. در برخی موارد، نمونه آزمایش از نوع دست خورده و به‌وسیله بازسازی (ریمولدد) تهیه می‌شود. در این مورد نیز باید سعی شود نمونه کاملا همگن و یکنواخت بازسازی شود و شرایط محل نمونه سازی استاندارد باشد تا درصد رطوبت دچار تغییر نشود.

۳-۲-۱- نمونه‌ها باید استوانه‌ای شکل بوده و اندازه قطر نمونه آزمایش سه محوری باید حداقل ۳۳ میلی‌متر باشد. برای این نمونه، اندازه بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه باید کوچک‌تر از یک ششم قطر نمونه باشد. در ضمن تفاوت ارتفاع و قطر اندازه‌گیری شده نمونه نباید از میانگین ارتفاع و قطر، بیش از ۵ درصد باشد. بعد از اتمام آزمایش اگر دانه‌ای در نمونه بزرگ‌تر از حد مجاز مشاهده شد، باید حتما مورد را در گزارش آزمایش قید کرد.

۳-۲-۲- نمونه‌های آزمایش سه محوری شامل حداقل سه نمونه استوانه‌ای کاملا شبیه به هم، یکنواخت و همگن بوده و نسبت ارتفاع نمونه به قطر آن باید بین ۲ تا ۲/۵ باشد. میانگین ارتفاع و میانگین قطر نمونه را می‌توان با استفاده از ابزار مشخص شده در بند ۴-۱۳ تعیین کرد.

۳-۲-۳- نمونه باید دارای سطح مقطع دایره‌ای ثابت بوده و دو سطح بالا و پایین آن کاملا موازی و در عین حال عمود بر محور طولی باشند. در هنگام بریدن یا تراشیدن نمونه در صورت برخورد با هر نوع برآمدگی و فرو افتادگی باید سطح کاملا صاف شده و در حالتی که حفره‌ای در سطوح نمونه به‌وجود آمده باشد، باید با دقت تمام از خاک حاصل از تراشیدن نمونه حفره پر شود به‌طوری‌که چگالی نمونه تا حد ممکن تغییر نکند.

۳-۲-۴- بعد از تهیه نمونه، توزین و اندازه‌گیری ابعاد آن باید سلول سه محوری را با باز کردن کلیه شیرهای ورودی و هواگیری آنها آماده کرد. نمونه و متعلقات آن که به‌ترتیب از پایین به بالا، صفحه زیرسری، سنگ متخلخل زیرین، نمونه، سنگ متخلخل بالایی و صفحه بالاسری است به‌همراه فیلتر کاغذی دور نمونه و غشاء لاستیکی دربرگیرنده نمونه و تمام متعلقات مذکور، در محل خود قرار داده می‌شود. سپس محفظه شفاف سلول در جای خود قرار داده شده و پیستون اعمال بار روی نمونه قرار می‌گیرد و توسط بست مخصوص بالای سلول ثابت می‌شود. پس از آن با باز کردن شیر فشار جانبی، سلول از آب پر شده و عمل هواگیری توسط پیچ مخصوصی که در بالای سلول قرار دارد، انجام می‌شود.

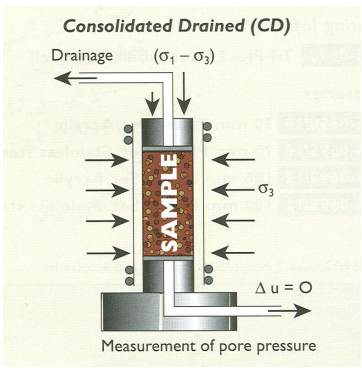
بعد از هواگیری و بستن پیچ بالای سلول، نمونه آماده آزمایش است. مراحل چیدن قطعات فوق در دو سر نمونه و قرار دادن آن در سلول، بستن سلول و هواگیری آن باید به وسیله افراد آموزش دیده و متخصص انجام پذیرد.

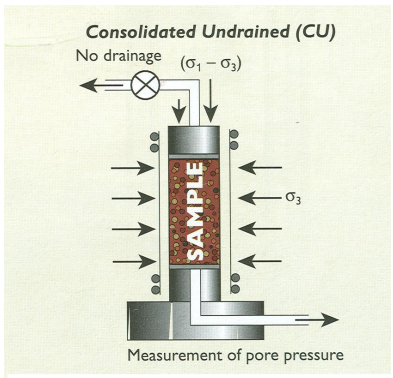
۳-۳- روش انجام آزمایش

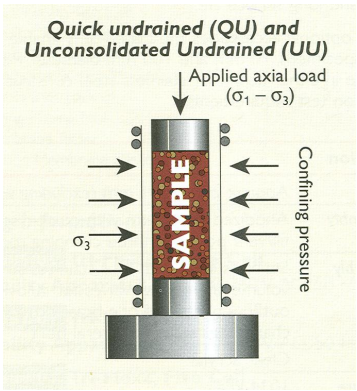
۳-۳-۱- آزمایش سه محوری بر روی نمونه اشباع شده معمولا با توجه به شرایط طبیعی نمونه در محل و به سه روش انجام می‌گیرد:

- آزمایش سه محوری تحکیم نیافته و زهکشی نشده (Unconsolidated Undrained, UU)
- آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی نشده (CU ,Undrained Cosolidated)
- آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی شده (CD ,Drained Consolidated)

البته در مواردی آزمایش با رطوبت موجود نمونه انجام می‌گیرد.







۳-۳-۲- بعد از آماده‌سازی سلول حاوی نمونه، باید از اشباع بودن یا نبودن نمونه اطمینان حاصل شود. برای این‌کار کلیه مسیرهای منتهی به نمونه با آب پر شده و هوا گیری می‌شود. داخل سلول فشاری وجود ندارد. به وسیله پمپ و از طریق شیر فشار جانبی فشار اندکی بر نمونه اعمال می‌شود. در این حالت شیر متصل به زیر نمونه باز بوده و به فشارسنج ارتباط دارد و بقیه شیرها بسته هستند. چنانچه نمونه اشباع باشد، این فشار، صرفنظر از افت فشار در لوله‌ها، باید عینا به فشارسنج منتقل شود. در غیر این‌صورت نمونه اشباع نبوده و در صورت لزوم عمل اشباع کردن باید انجام گیرد.

۳-۳-۳- اشباع نمونه به این طریق انجام می‌شود که توسط وارد نمودن پس فشار از یک طرف نمونه آب تزریق شده و از جهت دیگر با مکش، این عمل تسریع می‌شود. البته این‌کار با دقت و حوصله باید صورت گیرد و هم‌زمان با اعمال پس فشار، فشار جانبی نیز باید تغییر یافته و تناسبی با شدت مکش داشته باشد. تحت هر شرایطی اگر این سه فشار متناسب نباشند، امکان متلاشی شدن و یا تورم نمونه وجود دارد. معمولا هر چه نمونه ریزدانه‌تر و متراکم‌تر باشد، زمان اشباع طولانی‌تر خواهد بود.

۳-۳-۴- بعد از اتمام اشباع کردن، نمونه کنترل می‌شود. اگر پارامتر فشار آب حفره‌ای (B) به ۹۵٪ و یا بیش‌تر برسد، عمل اشباع کردن متوقف شده و نمونه آماده آزمایش است.

۳-٤- آزمایش سه محوری تحکیم نیافته و زهکشی نشده (UU)

۳-۴-۱- این آزمایش به آزمایش سریع نیز مشهور است. در این آزمایش هیچ‌گونه زهکشی در ضمن آزمایش به نمونه اجازه داده نمی‌شود. لذا این روش برای اندازه‌گیری تنش‌های کل اعمال شده به نمونه و تعیین خواص مقاومتی زهکشی نشده خاک به کار می‌رود. این حالت در خاک‌های با نفوذپذیری کم بلافاصله پس از وارد کردن تنش کلی اضافی و قبل از اینکه تحکیم قابل توجهی صورت گیرد، وجود دارد. کاربرد آن در تحلیل پایداری کوتاه مدت شیب‌های خاکی، ظرفیت باربری کوتاه مدت خاک‌های ریزدانه اشباع و تحلیل پایداری بدنه سدها در حین احداث و یا بلافاصله پس از پایان ساخت است. برای شروع آزمایش، پیستون بار محوری با سطح کلاهک بالای نمونه مماس می‌شود. در طی این عمل بار محوری اعمال شده به نمونه نباید بیش از ۰/۵ درصد بار محوری تخمین زده شده در زمان گسیختگی باشد.

۳-۴-۲- شیر فشار جانبی باز شده و فشار مورد نظر به نمونه اعمال می‌شود. اندازه‌گیر تغییرشکل در محل خود قرار داده شده و عقربه دستگاه‌های قرائت نیرو و تغییرشکل در وضعیت صفر تنظیم می‌شود.

۳-۴-۳- بار محوری اعمال می‌شود. چنانچه نمونه از مصالح نرم و خمیری تشکیل شده باشد، نرخ کرنش محوری یک درصد در دقیقه و در مورد مصالح ترد و شکننده که حداکثر تنش تفاضلی آنها تقریبا در ۳ درصد تا ۶ درصد کرنش اتفاق می‌افتد، نرخ کرنش ۰/۳ درصد در دقیقه انتخاب می‌شود. در این نرخ‌های کرنش، زمان لازم برای رسیدن به حداکثر تنش تفاضلی تقریبا ۱۵ تا ۲۰ دقیقه خواهد بود.

۳-۴-۴- با توجه به این نرخ کرنش، آزمایش شروع شده و تا رسیدن به ۱۵ درصد کرنش نمونه و یا ۵ درصد بیش‌تر از کرنش متناظر با تنش تفاضلی نقطه اوج، آزمایش ادامه می‌یابد.

۳-۴-۵- در طول آزمایش و در کرنش‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، درصد و سپس در افزایش‌های ۰/۵ درصد کرنش تا رسیدن به کرنش ۳ درصد و بعد از آن هر ۱ درصد کرنش، مقادیر نیرو و تغییر شکل یادداشت می‌شود. این عمل به منظور رسم منحنی تنش-کرنش انجام می‌شود. بنابراین قرائت‌های بیش‌تری در مراحل اولیه آزمایش و قبل از گسیختگی مورد نیاز است.

۳-۴-۶- بعد از اتمام آزمایش، فشار داخل سلول صفر شده و آب داخل آن تخلیه می‌شود. نمونه بلافاصله از غشاء لاستیکی خارج و فیلترهای کاغذی آن نیز جدا و سریعا توزین شده و در صد رطوبت آن تعیین می‌شود. سپس شکل گسیختگی نمونه ترسیم شده و زاویه سطح گسیختگی تعیین می‌شود.

۳-۴-۷- روابط و محاسبات آزمایش *UU*

۳-۴-۷-۱- کرنش محوری ε برای کلیه بارهای محوری اعمال شده محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (۱-۳)$$

در رابطه (۳-۱):

ΔL = تغییرشکل نمونه که با دستگاه اندازه‌گیر تغییرشکل تعیین شده (میلی‌متر)

L_0 = میانگین ارتفاع اولیه نمونه آزمایش (میلی‌متر)

۳-۴-۷-۲- تصحیح سطح مقطع نمونه از رابطه (۳-۲) محاسبه می‌شود. باید توجه داشت که سطح مقطع نمونه خاک (A) در طول آزمایش ثابت نمی‌ماند.

$$A' = \frac{A_0}{1-\varepsilon} \qquad (۳-۲)$$

در رابطه (۳-۲):

A' = میانگین سطح مقطع تصحیح شده برای بار وارده (سانتی‌متر مربع)

A_0 = میانگین سطح مقطع اولیه (سانتی‌متر مربع)

ε = کرنش محوری برای بار محوری اعمال شده

۳-۴-۷-۳- محاسبه نیروی محوری: چنانچه مقادیر نیرو که توسط دستگاه قرائت انجام شده در ضریب رینگ مورد استفاده ضرب شود، نیروی محوری به‌دست می‌آید.

۳-۴-۷-۴- تنش تفاضلی: از تقسیم نیروی محوری بر سطح مقطع تصحیح شده، تنش تفاضلی (اختلاف تنش اصلی) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A'} \qquad (۳-۳)$$

که در آن:

P = بار محوری اعمال شده در هر یک از اندازه‌گیری‌ها (کیلونیوتن)

A' = سطح مقطع تصحیح شده (سانتی‌متر مربع)

۳-۴-۷-۵- منحنی تنش – کرنش: با انتقال مقادیر کرنش محوری محاسبه شده بر روی محور x ها و مقادیر تنش تفاضلی بر روی محور y ها، می‌توان منحنی تنش-کرنش را رسم کرد. در نمونه‌های ترد و شکننده باید از ابتدا قرائت‌ها به فاصله کم ثبت شود تا بتوان منحنی تنش-کرنش را ترسیم کرد.

۳-۴-۷-۶- تصحیح سختی غشاء لاستیکی: در صورتیکه خطا در تنش تفاضلی ناشی از سختی غشاء، از ۵ درصد اختلاف تنش اصلی تجاوز کند، با استفاده از رابطه (۳-۴) مقدار آن تصحیح می‌شود:

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{4E_m t\varepsilon}{D} \qquad (۳-۴)$$

که در آن

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ = مقدار تصحیح که باید از تنش تفاضلی کسر شود (کیلوپاسکال)

E_m = مدول یانگ برای مصالح غشاء لاستیکی(کیلوپاسکال)

t = ضخامت غشاء لاستیکی (میلی‌متر)

ε = کرنش محوری

D = قطرنمونه (میلی‌متر)

۳-۴-۷-۷- برای تعیین مدول یانگ مصالح غشاء لاستیکی، نواری از این غشاء به عرض ۱۰ میلی‌متر را در فاصله بین دو میله نازک قرار داده و نیروی لازم برای کرنش واحد با کشیدن غشاء، اندازه‌گیری می‌شود. مقدار مدول با استفاده از رابطه (۳-۵) محاسبه می‌شود:

$$E_m = \frac{(F.L)}{(A_m.\Delta L)} \qquad (۵-۳)$$

که درآن

E_m = مدول یانگ مصالح غشاء (کیلوپاسکال)

F = نیروی وارده برای کشیدن غشاء (کیلونیوتن)

L = طول غشاء قبل از کشیدن (میلی‌متر)

A_m = دو برابر ضخامت اولیه غشاء که در عرض نوار ضرب شده است

ΔL = تغییر طول غشاء ناشی از نیروی F (میلی‌متر)

۳-۴-۷-۸- مقدار مدول یانگ برای غشاء از جنس لاتکس برابر با ۱۴۰۰ کیلو پاسکال است.

۳-۴-۷-۹- رسم دوایر موهر: دوایر موهر (حداقل ۳ دایره) در زمان گسیختگی بر اساس تنش‌های کلی رسم می‌شود. خطی که بر این دوایر مماس گردد، مقادیر C_u (چسبندگی) و φ_u (زاویه اصطکاک داخلی) را نشان می‌دهد. محل برخورد این خط با محور yها مقدار C_u و زاویه‌این خط با محور x ها مقدار φ_u است.

۳-۴-۷-۱۰- در آزمایش سه محوریUU بر روی نمونه رسی کاملا اشباع، به‌طور معمول مقدار φ_u برابر صفر است. هرچه درجه اشباع از ۱۰۰٪ کم‌تر شود، مقداری که برای φ_u به دست می‌آید از صفر بیش‌تر خواهد شد. پوش گسیختگی خاک‌های غیر اشباع ممکن است منحنی (و نه یک خط مستقیم) باشد. هر گاه مقدار فشار جانبی به اندازه کافی زیاد باشد، پوش گسیختگی برای فشارهای جانبی زیاد به صورت افقی ($\varphi_u = 0$) در خواهد آمد یعنی تمام هوای آب حفره‌ای در آب حفره‌ای به حالت محلول در می‌آید و نمونه اشباع کامل می‌شود.

۳-۵- آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی نشده (CU)

۳-۵-۱- این آزمایش برای تعیین مقاومت سه محوری نمونه استوانه‌ای خاک اشباع که به صورت همه جانبه تحکیم یافته و تحت فشار در شرایط زهکشی نشده با سرعت تغییر شکل محوری ثابت (کرنش کنترل شده) گسیخته می‌شود، به‌کار می‌رود. کاربرد آن در تحلیل پایداری خاکریزها، بدنه سدها در حالت تخلیه سریع دریاچه، محاسبات فشار خاک و طراحی پی است.

۳-۵-۲- در این حالت به لحاظ قرائت فشار آب حفره‌ای و انجام تحکیم نمونه، کنترل اشباع دقیق‌تر صورت گرفته و پس فشار نیز ممکن است اعمال شود.

۳-۵-۳- برای نمونه‌های حساس که قابلیت تورم دارند، در زمان آماده‌سازی نمونه و قراردادن آن در سلول، نباید از آب استفاده شود و سنگ متخلخل و صافی‌ها و همچنین فیلترهای کاغذی به‌کار رفته باید خشک بوده و تا زمان اعمال پس فشار

همچنان خشک بمانند تا مشکل تورم و در نتیجه تغییر ابعاد و خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده به‌وجود نیاید و محاسبات صحیح تر انجام شود.

۳-۵-۴- در کلیه مراحل اشباع نمونه نباید اختلاف بین پس فشار و فشار داخل سلول از ۰/۳۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بیش‌تر باشد زیرا در این حالت نمونه تحکیم شده و یا بالعکس در آن تورم ایجاد خواهد شد.

۳-۵-۵- اشباع نمونه و اندازه‌گیری ضریب فشار آب حفره‌ای (B):

۳-۵-۵-۱- برای کنترل اشباع یا عدم اشباع بودن نمونه از ضریب فشار آب حفره‌ای B که با استفاده از رابطه (۳-۶) به دست می‌آید استفاده می‌شود:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \qquad (۳-۶)$$

که در آن

Δu = تغییر در فشار آب حفره‌ای است که از افزایش فشار سلول در زمان بسته بودن شیر زهکشی، ناشی می‌شود.

$\Delta \sigma_3$ = تغییر در فشار داخلی سلول

۳-۵-۵-۲- برای تعیین ضریب B ابتدا کلیه شیرهای سلول بسته و شیر فشار داخلی سلول باز گذاشته می‌شود و فشار آن تا ۰/۷ کیلو گرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد. پس از گذشت حدود دو دقیقه، حداکثر فشار آب حفره‌ای ایجاد شده‌اندازه‌گیری و در رابطه (۳-۶) قرار داده می‌شود. اگر مقدار B مساوی یا بزرگ‌تر از ۹۵٪ باشد، نمونه اشباع فرض شده و مرحله بعدی آزمایش انجام می‌شود.

۳-۵-۵-۳- چنانچه بنا به دلایلی غشاء لاستیکی سوراخ شده باشد، مقادیر Δu بزرگ‌تر از $\Delta \sigma_3$ خواهد بود که نشان دهنده نشت سیال سلول به داخل نمونه است. لذا امکان اندازه‌گیری B وجود ندارد.

۳-۵-۵-۴- در حالت‌های خاص برای اشباع، تکنسین با تجربه می‌تواند پس فشار را حتی تا ۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش دهد.

۳-۵-۶- تحکیم نمونه

۳-۵-۶-۱- عمل تحکیم، خروج آب از نمونه تحت فشار تحکیمی موثر است. این عمل تا زمانی که نمونه به تعادل برسد، ادامه می‌یابد.

۳-۵-۶-۲- برای انجام تحکیم نمونه، ابتدا شیر زهکشی نمونه بسته می‌شود و پس فشار ثابت می‌شود. پس از آن فشار سلول افزایش داده می‌شود و این عمل ادامه پیدا می‌کند تا اختلاف بین فشار سلول و پس فشار برابر فشار تحکیمی موثر شود. در این موقع بورت تحکیم (تغییر حجم سنج) صفر شده و آماده انجام تحکیم می‌شود.

۳-۵-۶-۳- قرائت بورت تحکیم پس از باز کردن شیر زهکشی در زمان‌های ۶، ۱۵ و۳۰ ثانیه، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، و۳۰ دقیقه، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت انجام می‌شود.

۳-۵-۶-۴- در حالت‌هایی که امکان شسته شدن مقادیر قابل توجهی از ریزدانه‌ها به دلیل شیب‌های هیدرولیکی زیاد در نمونه وجود داشته باشد، فشار سلول را به‌طور تدریجی و حداکثر تا ۱۰ دقیقه افزایش داده و ثبت قرائت بورت تحکیم، پس از رسیدن به فشار تحکیمی موثر انجام می‌شود.

۳-۵-۶-۵- پس از اتمام تحکیم نمونه، منحنی قرائت بورت با زمان در برگه نیمه لگاریتمی یا ریشه دوم زمان رسم شده و از آنجا زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم اولیه نمونه (مقدار t_{50}) به دست می‌آید.

۳-۵-۷- روش انجام آزمایش

۳-۵-۷-۱- برای اعمال بار محوری بر نمونه، ابتدا شیر زهکشی که برای تحکیم نمونه باز شده بود، بسته می‌شود و سپس نول اندیکاتور و یا هر وسیله دیگر که برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای به‌کار می‌رود درمسیر شیر خروجی پایین نمونه قرار می‌گیرد و چنان تنظیم می‌شود که بتوان فشار آب حفره‌ای را در هر لحظه قرائت و ثبت کرد.

۳-۵-۷-۲- فشار سلول همچنان ثابت مانده و کلیه مسیرها کنترل می‌شود تا هیچ‌گونه زهکشی از نمونه صورت نگیرد.

۳-۵-۷-۳- پیستون بار محوری بر روی کلاهک بالاسری نمونه مماس شده و تغییر شکل از روی دستگاه مربوطه قرائت می‌شود. در حین انجام این عمل باید مواظب بود که نیروی وارده بر نمونه بیش از ۰/۵ درصد بار گسیختگی تخمینی نباشد. بعد از قرائت و ثبت آن، پیستون کمی بالا برده شده و در جای خود قفل می‌شود.

۳-۵-۷-۴- دستگاه قرائت نیرو و همچنین دستگاه قرائت تغییر شکل که به سلول متصل شده، در وضعیت صفر قرار داده می‌شود.

۳-۵-۷-۵- برای تعیین نرخ کرنش محوری با توجه به جنس نمونه و چگالی آن، حدودی درخصوص مقدار کرنش در لحظه گسیختگی، (مثلا ۴ درصد کرنش) مشخص می‌شود. با تعیین t_{50} در مرحله تحکیم نمونه و ده برابر کردن آن، زمان ۴ درصد کرنش و در نتیجه نرخ کرنش به دست آمده و دستگاه بارگذاری برای آن سرعت تنظیم می‌شود.

۳-۵-۷-۶- آزمایش شروع شده و مقادیر نیرو و فشار آب حفره‌ای در کرنش‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد و سپس در افزایش‌های ۰/۵ در صد کرنش تا رسیدن به کرنش ۳ درصد و بعد از آن هر ۱ در صد کرنش یادداشت می‌شود.

۳-۵-۷-۷- چنانچه در حین اعمال بار محوری، فشار آب حفره‌ای در حالت زهکشی نشده آزمایش سه محوری *CU* اندازه‌گیری شود و مقادیر $\Delta\sigma_1$ و Δu_1 به‌طور هم‌زمان قرائت شوند، فشار آب حفره‌ای A از رابطه (۳-۷) به‌دست می‌آید:

$$A = \frac{\Delta u_1}{B \cdot \Delta\sigma_1} \qquad (۳-۷)$$

که در آن

$\Delta\sigma_1$ = تغییر تنش اصلی بزرگ‌تر برابر با مقدار تنش تفاضلی وارده و

Δu_1 = میزان فشار آب حفره‌ای مربوط به اعمال $\Delta\sigma_1$ است.

پارامتر فشار آب حفره‌ای A به ویژه در مرحله گسیختگی اهمیت دارد:

$$A_f = \frac{(\Delta u)_f}{(\Delta \sigma)_f} \qquad (۸-۳)$$

برای خاک‌های با قابلیت فشردگی زیاد مانند رس‌های عادی تحکیم یافته، مقدار A_f بین ۰/۵ تا ۱ است. در مورد رس‌های حساس مقدار A_f ممکن است از ۱ تجاوز کند. برای رس‌های با مقدار بیش تحکیمی اندک، مقدار A_f بین صفر تا ۰/۵ و برای رس‌های با بیش تحکیم یافتگی زیاد، مقدار A_f منفی و بین صفر و ۰/۵- می‌باشد. یعنی در رس‌های بسیار بیش تحکیم یافته، با افزایش تنش اصلی بزرگ‌تر در هنگام گسیختگی، فشار آب حفره‌ای کاهش یافته و نسبت به فشار آتمسفر، منفی می‌شود که این پدیده به خاطر تمایل نمونه به اتساع است.

۳-۵-۷-۸- این کار برای رسم دقیق‌تر منحنی تنش-کرنش ضروری است. در مراحل اولیه آزمایش و زمانی که گسیختگی نزدیک می‌شود، مانند اتفاق افتادن افت ناگهانی تنش تفاضلی و یا فشار آب حفره‌ای، باید قرائت‌های بیش‌تری در آن حالت‌ها ثبت شود.

۳-۵-۷-۹- انجام آزمایش معمولا تا ۱۵ در صد کرنش ادامه می‌یابد. البته در حالت‌هایی که تنش تفاضلی تا حدود ۲۰ درصد افت کند و یا اینکه بعد از یک بیشینه (ماکزیمم) تنش تفاضلی، کرنش محوری ۵ در صد افزوده شود، آزمایش متوقف می‌شود.

۳-۵-۷-۱۰- بعد از اتمام آزمایش، بلافاصله بار محوری از روی نمونه برداشته شده و پس فشار و فشار داخلی سلول کاهش می‌یابد تا به صفر برسد.

۳-۵-۷-۱۱- پس از تخلیه آب داخل سلول و برداشتن غشاء لاستیکی از روی نمونه و خشک کردن آب اضافی غشاء و فیلترهای کاغذی دور نمونه و برداشتن قطعات بالا و پایین نمونه، قبل از اینکه نمونه از صفحات متخلخل جذب آب کند، آن را خارج کرده و در صد رطوبت نمونه تعیین می‌شود. ضمنا از نحوه گسیختگی نمونه عکس تهیه شده و یا شکل آن ترسیم می‌شود.

۳-۵-۸- روابط و محاسبات آزمایش *CU*

۳-۵-۸-۱- طول نمونه بعد از انجام تحکیم از رابطه (۳-۹) محاسبه می‌شود:

$$H_c = H_0 - \Delta H_0 \qquad (۹-۳)$$

که در آن

H_c = ارتفاع نمونه بعد از تحکیم (میلی‌متر)

H_0 = ارتفاع اولیه نمونه (میلی‌متر)

ΔH_0 = مقدار تغییر ارتفاع نمونه درپایان تحکیم (میلی‌متر)

۳-۵-۸-۲- تغییر حجم نمونه درمرحله اشباع شدن از رابطه (۳-۱۰) محاسبه می‌شود:

$$\Delta V_{sat} = \frac{3V_0 \times \Delta H_{sat}}{H_0} \qquad (۱۰-۳)$$

که در آن

ΔV_{sat} = تغییر حجم نمونه در پایان مرحله اشباع (سانتی‌متر مکعب)

V_0 = حجم اولیه نمونه (سانتی‌متر مکعب)

ΔH_{sat} = تغییر ارتفاع نمونه در پایان مرحله اشباع (میلی‌متر)

۳-۵-۸-۳- مساحت مقطع عرضی نمونه بعد از تحکیم از رابطه (۳-۱۱) محاسبه می‌شود:

$$A_C = \frac{(V_0 - \Delta V_{sat} - \Delta V_c)}{H_c} \qquad (۱۱-۳)$$

که درآن

A_C = مساحت مقطع عرضی نمونه بعد از تحکیم (سانتی‌متر مربع)

V_0 = حجم اولیه نمونه (سانتی‌متر مکعب)

ΔV_c = تغییر درحجم نمونه بعد از تحکیم (سانتی‌متر مکعب)

ΔV_{sat} = تغییر درحجم نمونه در پایان مرحله اشباع شدن (سانتی‌متر مکعب)

۳-۵-۸-۴- کرنش محوری ε_1 از رابطه (۳-۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_c} \qquad (۱۲-۳)$$

که درآن

ΔH = تغییر ارتفاع نمونه در طی بارگذاری (میلی‌متر)

۳-۵-۸-۵- سطح مقطع تصحیح شده نمونه از رابطه (۳-۱۳) به دست می‌آید:

$$A = \frac{A_c}{(1 - \varepsilon_1)} \qquad (۱۳-۳)$$

که در آن

A_c = میانگین سطح مقطع نمونه پس از تحکیم (سانتی‌متر مربع)

ε_1 = کرنش محوری نمونه

۳-۵-۸-۶- تنش اصلی تفاضلی نیز از رابطه (۳-۱۴) به دست می‌آید:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} \qquad (۱۴-۳)$$

که درآن

P = بار محوری اعمال شده (کیلونیوتن)

A = سطح مقطع تصحیح شده نمونه (سانتی‌متر مربع)

۳-۵-۸-۷- تنش اصلی موثر کوچک‌تر با استفاده از رابطه (۳-۱۵) محاسبه می‌شود:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u \qquad (۱۵-۳)$$

که درآن

σ_3 = تنش تحکیمی موثر (کیلوپاسکال)

Δu = فشارآب حفره‌ای (فشار آب حفره‌ای کل منهای پس فشار- کیلوپاسکال)

۳-۵-۸-۸- محاسبه q و p' طبق روابط (۳-۱۶) و (۳-۱۷) انجام می‌پذیرد:

$$q = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \qquad (۳-۱۶)$$

$$p' = \frac{\left((\sigma_1 - \sigma_3) + 2\sigma'_3\right)}{2} \qquad (۳-۱۷)$$

که در آن

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ = تنش اصلی تفاضلی (کیلوپاسکال)

σ'_3 = تنش اصلی موثر کوچک‌تر(کیلوپاسکال)

با رسم منحنی تغییرات q بر حسب p' هر حالت تنش را می‌توان به جای نشان دادن با یک دایره موهر با یک نقطه تنش مشخص کرد و پوش گسیختگی تغییر یافته ای را به دست آورد که با رابطه (۳-۱۸) مشخص می‌شود:

$$1.2(\sigma'_1 - \sigma'_3) = a' + 1.2(\sigma'_1 + \sigma'_3).\tan\alpha \qquad (۳-۱۸)$$

که درآن a' و α مشخصات تغییر یافته پارامترهای مقاومت برشی می‌باشند و برابرند با:

$$\varphi' = \sin^{-1}\left(\tan\alpha\right) \qquad (۳-۱۹)$$

$$c' = \frac{a'}{\cos\varphi'} \qquad (۳-۲۰)$$

۳-۵-۸-۹- تصحیح برای نوارهای فیلتر کاغذی که دور نمونه کشیده شده است در دو حالت صورت می‌گیرد:

۳-۵-۸-۹-۱- حالت اول، وقتی که کرنش محوری بیش‌تر از ۲ درصد باشد:

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{K_{fp}P_{fp}}{A_c} \qquad (۳-۲۱)$$

که درآن

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ = مقدار اصلاحی تنش تفاضلی فیلتر که باید از تنش اصلی تفاضلی کسر شود

K_{fp} = مقدار باری که توسط فیلتر کاغذی در واحد طول محیطی که با فیلتر کاغذی پوشیده شده تحمل می‌شود (کیلوگرم بر سانتی‌متر)

P_{fp} = محیطی که با فیلتر کاغذی پوشیده شده است(سانتی‌متر)

A_c = سطح مقطع نمونه پس از تحکیم(سانتی‌متر مربع)

۳-۵-۸-۹-۲- حالت دوم، وقتی که کرنش محوری مساوی یا کم‌تر از ۲ درصد باشد:

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{50\varepsilon_1 K_{fp}P_{fp}}{A_c} \qquad (۳-۲۲)$$

ε_1 = کرنش محوری نمونه

مقدار K_{fp} برای فیلترهای کاغذی که به‌طور معمول در آزمایشگاه‌ها برای آزمایش سه محوری استفاده می‌شود حدود ۰/۱۹ کیلو گرم بر سانتی‌متر است.

۳-۵-۸-۱۰- تصحیح برای غشاء لاستیکی که در بخش۳-۴-۷-۶ توضیح داده شده است.

۳-۵-۸-۱۱- تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر در زمان گسیختگی بر اساس تنش‌های کل σ_{1f}و σ_{3f} و تنش‌های موثر σ'_{1f} و σ'_{3f} به ترتیب زیر تعیین می‌شود:

σ_{3f} = تنش تحکیمی کل

σ_{1f} = حاصل جمع فشار محوری در لحظه شکست و σ_{3f} $\left((\sigma_1-\sigma_3)_f+\sigma_{3f}\right)$

σ'_{3f} = تفاضل σ_{3f}و Δu_f $\left(\sigma_{3f}-\Delta u_f\right)$

σ'_{1f} = حاصل جمع فشار محوری درلحظه شکست و σ'_{3f} $\left((\sigma_1-\sigma_3)_f+\sigma'_{3f}\right)$

۳-۵-۸-۱۲- رسم دوایر موهر: دوایر موهر (حداقل ۳ دایره) در لحظه گسیختگی برای تنش‌های کل و موثر به‌طور جداگانه و بر روی یک دستگاه محورهای مختصات رسم می‌شود. بدین صورت که تنش برشی روی محور عمودی و تنش عمودی روی محور افقی با مقیاس‌های یکسان رسم می‌شود. مماس مشترک‌ها نیز به‌طور جداگانه بر سه دایره موهر تنش‌های کل و سه دایره موهر تنش‌های موثر رسم شده و مقادیر c و φ و نیز c' و φ' برای هر گروه از دوایر موهر تعیین می‌شود.

۳-٦- آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی شده (CD)

۳-۶-۱- این آزمایش برای تعیین مقاومت سه محوری نمونه استوانه‌ای خاک اشباع که به‌صورت همه جانبه تحکیم یافته و تحت فشار در شرایط زهکشی شده با سرعت تغییر شکل محوری ثابت گسیخته می‌شود، به‌کار می‌رود. سرعت مذکور باید به حدی باشد که هیچگونه فشار آب حفره‌ای در نمونه‌ایجاد نشود. کاربرد آن در تحلیل پایداری دراز مدت دیوارهای حایل، بدنه سدها در طول بهره برداری دراز مدت و نیز محاسبات مربوط به زمین لغزش‌ها است. این حالت به خاک‌های با نفوذپذیری زیاد یا خاک‌هایی با نفوذپذیری کم پس از اینکه عمل تحکیم تحت اثر تنش کل اضافی کامل شد، مربوط می‌شود.

۳-۶-۲- شرایط و روش انجام آزمایش سه محوری به روش *CD* همانند روش *CU* بوده و مراحل ۳-۵-۲ الی ۳-۵-۶ باید انجام گیرد.

۳-۶-۳- روش انجام آزمایش

۳-۶-۳-۱- در این آزمایش به لحاظ اینکه نباید هیچگونه فشار آب حفره‌ای اضافی در زمان برش نمونه اتفاق بیافتد، سرعت آزمایش بسیار کند بوده و تحت کنترل دقیق صورت می‌گیرد.

۳-۶-۳-۲- حدودی برای مقدار کرنش در لحظه گسیختگی در نظر گرفته می‌شود. با تعیین t_{50} در مرحله انجام تحکیم نمونه و ضرب کردن آن در عدد ۳۶/۴، زمان لازم تا لحظه گسیختگی و در نتیجه نرخ کرنش به دست آمده و دستگاه بارگذاری برای آن سرعت تنظیم می‌شود.

۳-۶-۳-۳- نول اندیکاتور و یا هر وسیله دیگر که برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای به‌کار می‌رود، در مسیر شیر خروجی بالای نمونه قرار گرفته و چنان تنظیم می‌شود که امکان قرائت و ثبت فشار آب حفره‌ای در هر لحظه فراهم باشد. از آنجا که در این آزمایش فشار آب حفره‌ای نباید وجود داشته باشد، هر زمان که مقداری برای آن مشاهده شد، بلافاصله باید نرخ کرنش کاهش یابد تا نمونه امکان زهکشی داشته و فشار آب حفره‌ای مجددا صفر شود.

۳-۶-۳-۴- فشار داخلی سلول همچنان ثابت مانده و پیستون بار محوری بر روی کلاهک قطعه بالاسری نمونه مماس می‌شود. در این حالت نیروی وارد بر نمونه نباید بیش از ۰/۵ درصد بار گسیختگی تخمینی باشد.

۳-۶-۳-۵- دستگاه قرائت نیرو و همچنین دستگاه قرائت تغییر شکل که به سلول متصل شده، در وضعیت صفر قرار می‌گیرد.

۳-۶-۳-۶- برای شروع آزمایش، شیر زهکشی زیر نمونه باز شده و مقادیر نیرو در کرنش‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد و سپس در افزایش‌های ۰/۵ درصد کرنش تا رسیدن به کرنش ۳ درصد و بعد از آن هر ۱ درصد کرنش یادداشت می‌شود.

۳-۶-۳-۷- انجام این کار برای رسم دقیق‌تر منحنی تنش-کرنش ضروری است. در مراحل اولیه آزمایش و زمانی که گسیختگی نمونه نزدیک می‌شود، مانند اتفاق افتادن افت ناگهانی تنش تفاضلی، باید قرائت‌های بیش‌تری در آن حالت‌ها ثبت شود.

۳-۶-۳-۸- انجام آزمایش معمولا تا ۱۵ در صد کرنش ادامه می‌یابد. البته در حالت‌هایی که تنش تفاضلی تا حدود ۲۰ درصد افت کند و یا اینکه بعد از یک حداکثر تنش تفاضلی، کرنش محوری ۵ درصد افزوده شود، آزمایش متوقف می‌شود.

۳-۶-۳-۹- بعد از اتمام آزمایش، بلافاصله بار محوری از روی نمونه برداشته شده و فشار داخلی سلول به صفر کاهش می‌یابد.

۳-۶-۳-۱۰- پس از تخلیه آب داخل سلول و برداشتن غشاء لاستیکی از روی نمونه و خشک کردن آب اضافی غشاء و فیلترهای کاغذی دور نمونه و برداشتن قطعات بالا و پایین نمونه، قبل از اینکه نمونه از صفحات متخلخل آب جذب کند، آن را خارج کرده و درصد رطوبت نمونه تعیین می‌شود. ضمنا از نحوه گسیختگی نمونه عکس تهیه شده و یا شکل آن ترسیم می‌شود.

۳-۶-۴- روابط و محاسبات آزمایش CD

۳-۶-۴-۱- انجام محاسبات آزمایش CD بر طبق آنچه در بخش‌های ۳-۵-۸-۱ الی ۳-۵-۸-۴ آمده، انجام شده و تنش اصلی تفاضلی موثر از رابطه (۳-۲۳) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} \qquad (۳-۲۳)$$

که درآن:

P = بار محوری اعمال شده (کیلونیوتن)

A = سطح مقطع تصحیح شده نمونه (سانتی‌متر مربع)

۳-۶-۴-۲- سطح مقطع تصحیح شده نمونه از رابطه (۳-۲۴) به دست می‌آید:

$$A = \frac{A_c\left(1-\frac{\Delta V}{V_c}\right)}{1-\varepsilon_1} \qquad (۲۴-۳)$$

در این رابطه ΔV میزان تغییر حجم نمونه پس از اعمال بار محوری و V_c حجم نمونه پس از تحکیم آن است. در مورد خاک‌های اشباع یا اشباع شده، میزان تغییر حجم ΔV با اندازه‌گیری حجم آب حفره‌ای که در اثر اعمال بار محوری از نمونه زهکشی و خارج می‌شود، به دست می‌آید.

۳-۶-۴-۳- محاسبه q و p' طبق روابط (۳- ۲۵) و (۳- ۲۶) انجام می‌شود:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \qquad (۲۵-۳)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \qquad (۲۶-۳)$$

که درآن

σ'_3 = تنش اصلی موثر کوچک‌تر (کیلوپاسکال)

σ'_1 = تنش اصلی موثر بزرگ‌تر (کیلوپاسکال)

۳-۶-۴-۴- تصحیح برای نوارهای فیلتر کاغذی و همچنین غشاء لاستیکی طبق آنچه در بخش‌های ۳-۵-۸-۹ و ۳-۵-۸-۱۰ آمده، انجام می‌شود.

۳-۶-۴-۵- رسم دوایر موهر: دوایر موهر (حداقل ۳ دایره) در لحظه گسیختگی برای تنش‌های کل رسم شده و مماس مشترک سه دایره موهر، مقادیر c' و φ' را به دست می‌دهد.

۳-۷- گزارش آزمایش‌ها

جهت ارائه گزارش آزمایش‌های سه محوری *UU*، *CU* و *CD*، هریک از موارد ذیر که در آزمایش به دست آمده باشد، می‌باید در گزارش نتایج قید شود:

۳-۷-۱- اطلاعات شناسایی و تشریح ظاهری نمونه، طبقه‌بندی و تعیین حد روانی و خمیری آن

۳-۷-۲- نوع نمونه از لحاظ دست خورده یا دست نخورده بودن

۳-۷-۳- درصورت دست خورده بودن، مقدار چگالی خشک و درصد رطوبت

۳-۷-۴- وزن مخصوص ذرات جامد خاک

۳-۷-۵- درصد رطوبت، نسبت تخلخل، درجه اشباع و چگالی خشک اولیه

۳-۷-۶- قطر و ارتفاع اولیه نمونه

۳-۷-۷- زمان اشباع نمونه

۳-۷-۸- مقدار پس فشار

۳-۷-۹- ریب فشار آب حفره‌ای (B) در انتهای مرحله اشباع

۳-۷-۱۰- تنش تحکیمی موثر

۳-۷-۱۱- زمان t_{50} در مرحله تحکیم، مساحت مقطع عرضی نمونه، چگالی خشک، نسبت تخلخل، درصد رطوبت و درجه اشباع نمونه پس از تحکیم

۳-۷-۱۲- مقدار فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی

۳-۷-۱۳- مقدار تنش اصلی تفاضلی و همچنین مقادیر تنش‌های اصلی موثر در لحظه گسیختگی

۳-۷-۱۴- نرخ کرنش بر حسب در صد در دقیقه

۳-۷-۱۵- مقدار کرنش محوری در لحظه گسیختگی بر حسب درصد

۳-۷-۱۶- منحنی تنش تفاضلی-کرنش محوری

۳-۷-۱۷- منحنی فشار آب حفره‌ای-کرنش محوری

۳-۷-۱۸- شکل نمونه و یا عکس آن در مرحله گسیختگی

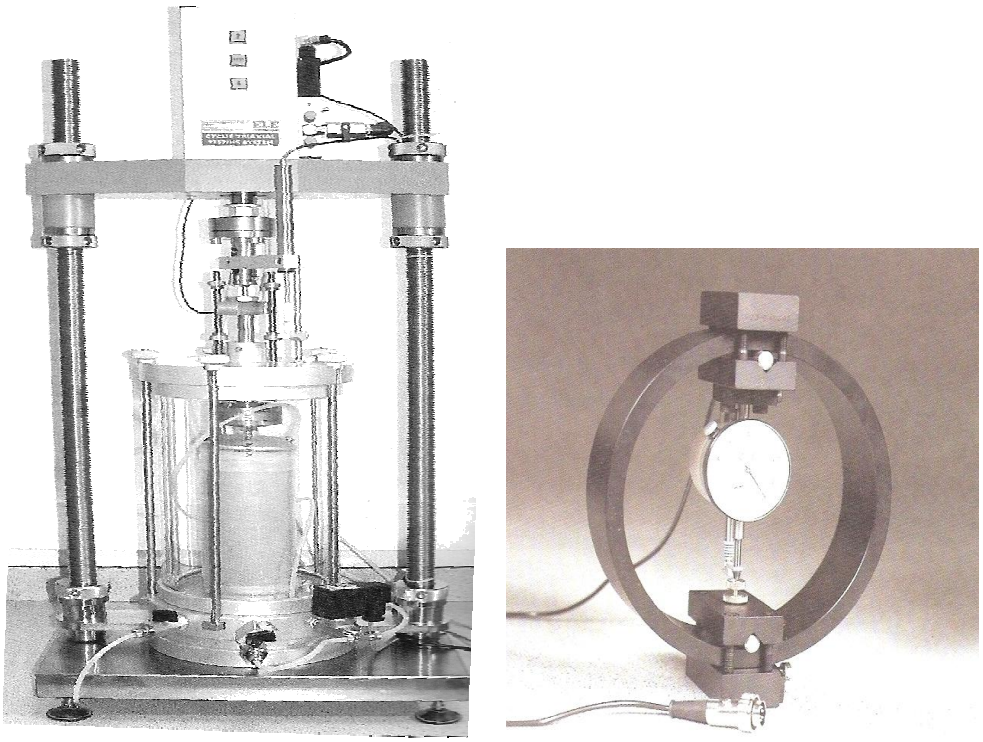
۳-۷-۱۹- دوایر موهر و پوش گسیختگی آن

۳-۷-۲۰- مسیر تنش ($p' - q$) و پوش گسیختگی تغییر یافته

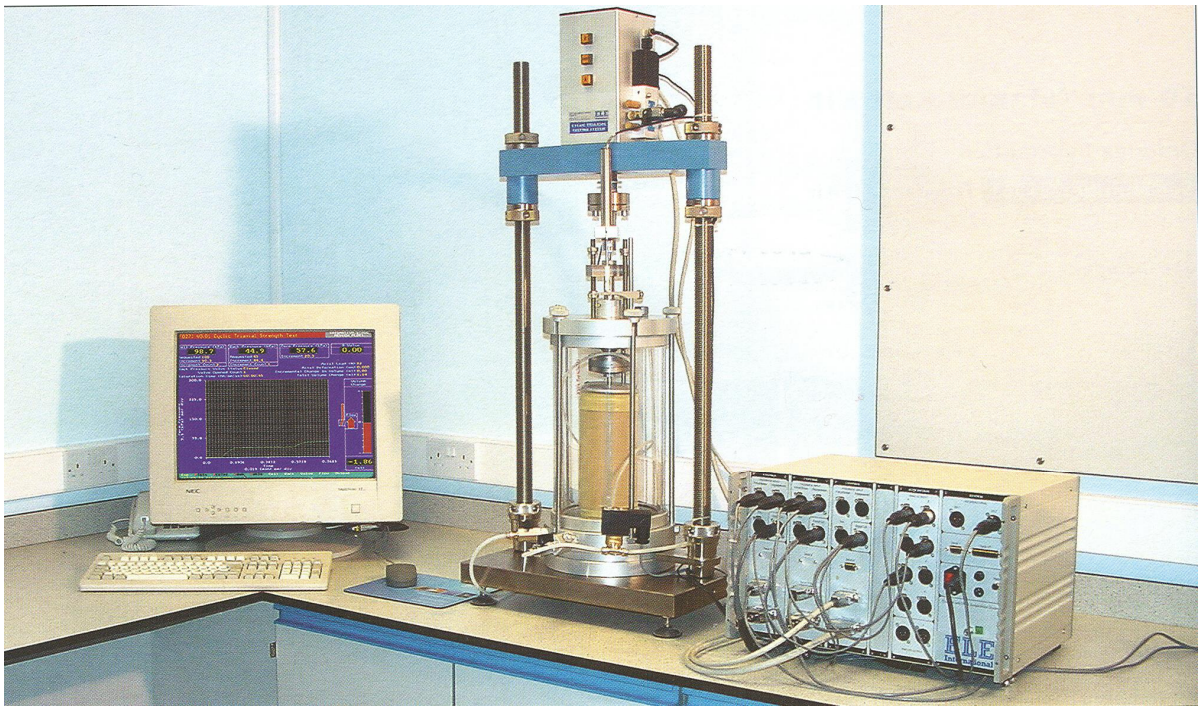
۳-۷-۲۱- مقدار c و φ و c' و φ'

۳-۷-۲۲- اعلام هرگونه شرایط استثنایی در حین انجام آزمایش و اطلاعات ضروری دیگر مورد نیاز در تفسیر نتایج آزمایش

شکل ۳-۱- وسایل مختلف برای انجام غشاء کشی



شکل ۳-۲- الف) رینگ و درجه اندازه‌گیری بار و ب) نمونه آماده شده برای انجام آزمایش



شکل ۳-۳- دستگاه کامل انجام آزمایش سه محوری

برگه ثبت داده‌های آزمایش فشاری سه محوری

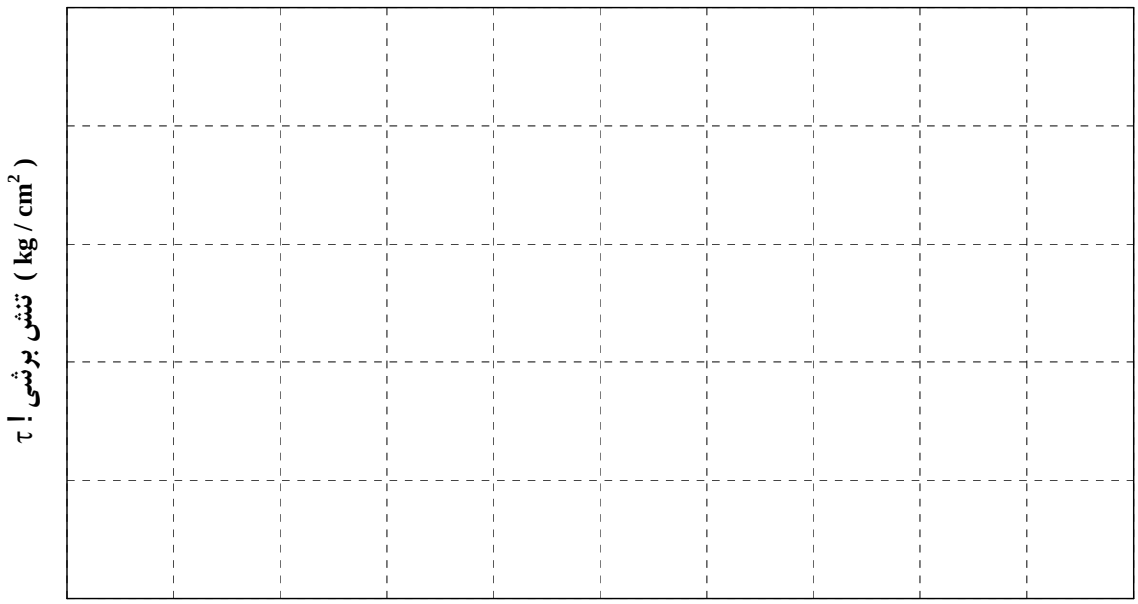
نام و شماره پروژه:	عمق نمونه‌برداری:	آزمایش کننده:
شماره نمونه:	توصیف نمونه خاک:	تاریخ آزمایش:
نوع نمونه:دست نخورده یا بازسازی شده:	سرعت کرنش:	
وزن خشک $W_d =$ (gr)	حجم $V_0 =$ (cm^3)	میانگین قطر اولیه $D_0 =$ (mm)
درصد رطوبت $\omega =$ %	وزن تر $W_0 =$ (gr)	سطح مقطع اولیه $A_0 =$ (cm^2)
وزن مخصوص خشک $\gamma dry =$ (gr/cm^3)	وزن مخصوص‌تر $\gamma wet =$ (gr/cm^3)	میانگین ارتفاع اولیه $L_0 =$ (mm)
ضریب رینگ بار LRC =	ضریب رینگ تغییر مکان LRC =	فشار محفظه = (kg/cm^2)

۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
قرائت گیج تغییرشکل (α)	قرائت گیج بارگذاری (β)	تغییر شکل نمونه $\Delta L\ (mm)$ $(a \times DRC)$	تغییر شکل نسبی $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$1-\varepsilon$	سطح مقطع تصحیح شده $A' = \frac{A_0}{1-\varepsilon}(cm^2)$	بارکل روی نمونه $(\beta \times LRC)(kg)$	تنش فشاری (kg/cm^2)

رسم نمودارهای آزمایش فشاری سه محوری(UU)

نام و شماره پروژه:	**عمق نمونه‌برداری:**	**آزمایش کننده:**
شماره نمونه:	**توصیف نمونه خاک:**	**تاریخ آزمایش:**
نوع نمونه:دست نخورده یا بازسازی شده:	**سرعت کرنش:**	
وزن خشک W_d = (gr)	**حجم** V_0 = (cm^3)	**میانگین قطر اولیه** D_0 = (mm)
درصد رطوبت ω = %	**وزن تر** W_0 = (gr)	**سطح مقطع اولیه** A_0 = (cm^2)
وزن مخصوص خشک γdry = (gr/cm^3)	**وزن مخصوص‌تر** γwet = (gr/cm^3)	**میانگین ارتفاع اولیه** L_0 = (mm)
ضریب رینگ بار LRC =	**ضریب رینگ تغییر مکان** LRC =	**فشار محفظه** = (kg/cm^2)
زمان اشباع نمونه: ---- **(روز)**	**بدون اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای**	

C_u =	(kg/cm^2)
φ_u =	(deg)

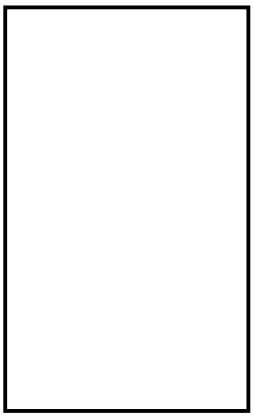


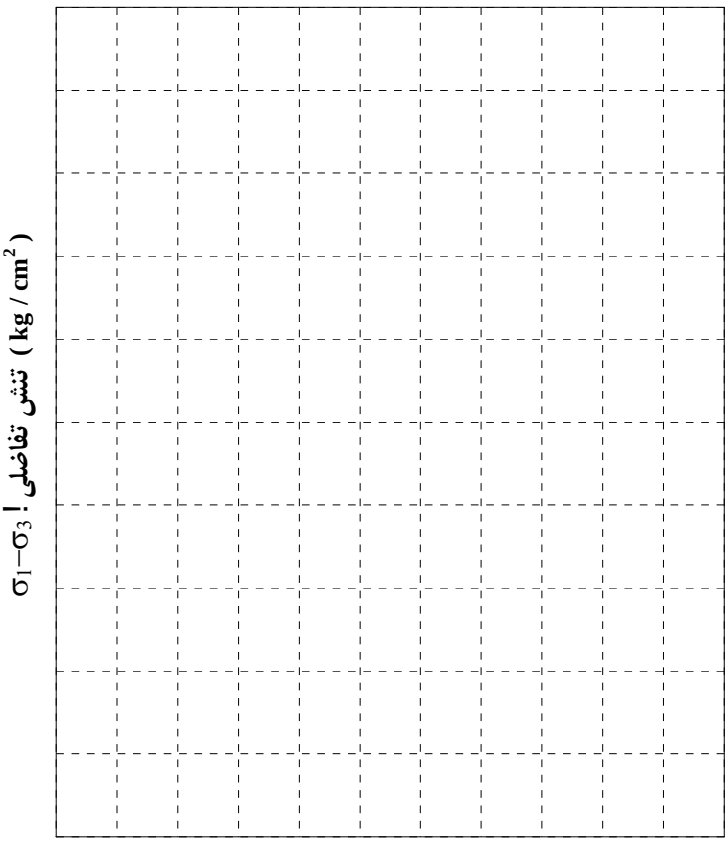
تنش عمودی σ (kg / cm²)

علامت	قطر (cm)	ارتفاع (cm)	آب محتوی (%)	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	فشار محفظه ای (kg/cm^2)	تنش تفاضلی حداکثر (kg/cm^2)	فشار آب حفره‌ای (kg/cm^2)	پس فشار (kg/cm^2)

برگه رسم نمودارهای آزمایش فشاری سه محوری (UU)

نمایش شکل نمونه پس از انجام آزمایش

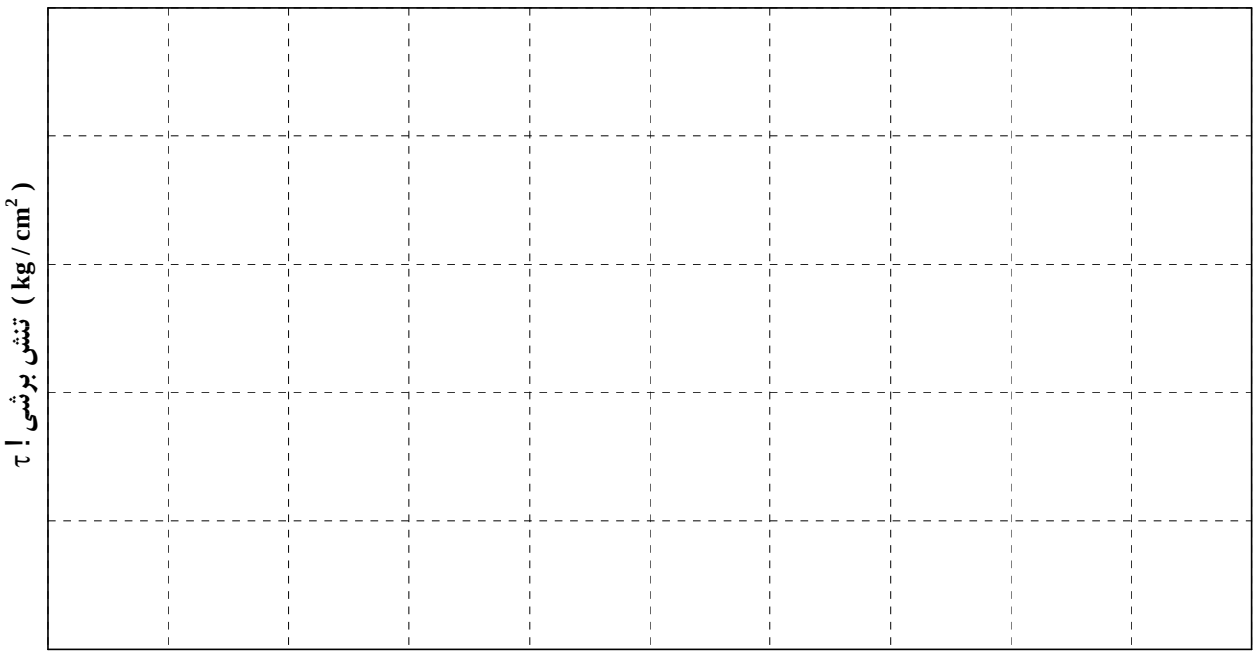




رسم نمودارهای آزمایش فشاری سه محوری (CU)

نام و شماره پروژه:	عمق نمونه‌برداری:	آزمایش کننده:
شماره نمونه:	توصیف نمونه خاک:	تاریخ آزمایش:
نوع نمونه:دست نخورده یا بازسازی شده:	سرعت کرنش:	
وزن خشک W_d = (gr)	حجم V_0 = (cm^3)	میانگین قطر اولیه D_0 = (mm)
درصد رطوبت ω = %	وزن تر W_0 = (gr)	سطح مقطع اولیه A_0 = (cm^2)
وزن مخصوص خشک γdry = (gr/cm^3)	وزن مخصوص‌تر γwet = (gr/cm^3)	میانگین ارتفاع اولیه L_0 = (mm)
ضریب رینگ بار LRC =	ضریب رینگ تغییر مکان DRC =	فشار محفظه = (kg/cm^2)
زمان اشباع نمونه: ---- (روز)	با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای	

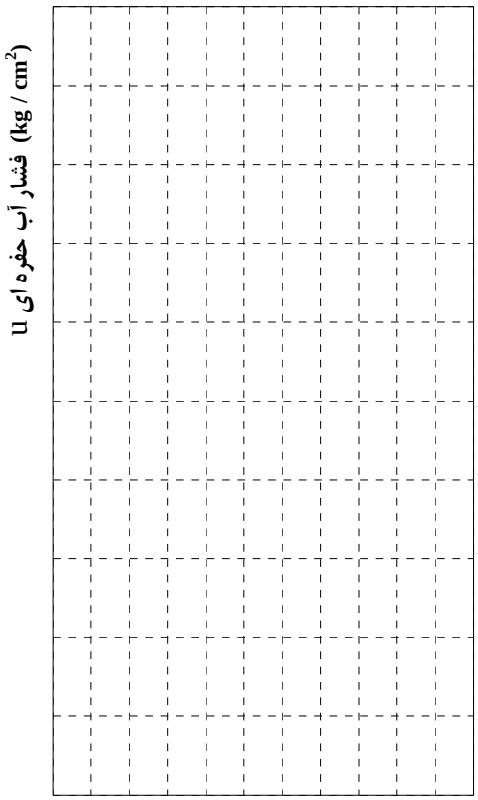
C' = (kg/cm^2)	C = (kg/cm^2)
φ' = (deg)	φ = (deg)



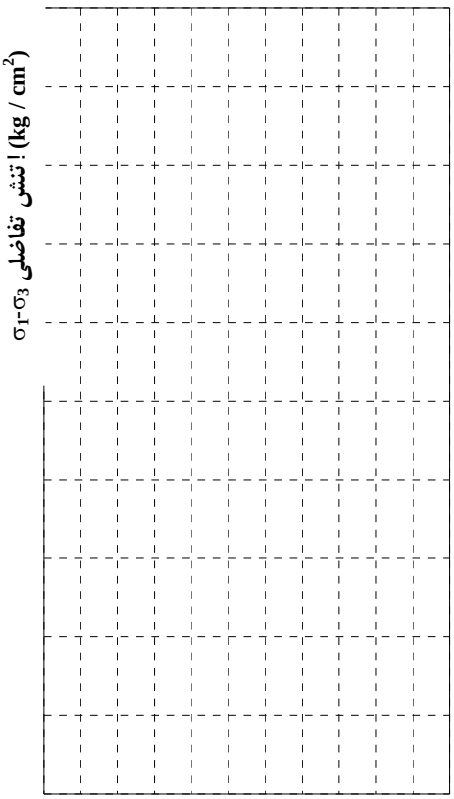
σ تنش عمودی (kg / cm²)

علامت	قطر (cm)	ارتفاع (cm)	آب محتوی (%)	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	فشار محفظه ای (kg/cm^2)	تنش تفاضلی حداکثر (kg/cm^2)	فشار آب حفره‌ای (kg/cm^2)	پس فشار (kg/cm^2)

برگه رسم نمودارهای آزمایش فشاری سه محوری (CU)

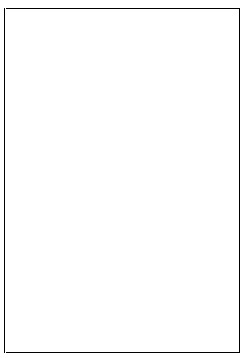


ε تغییر شکل نسبی (٪)



ε تغییر شکل نسبی (٪)

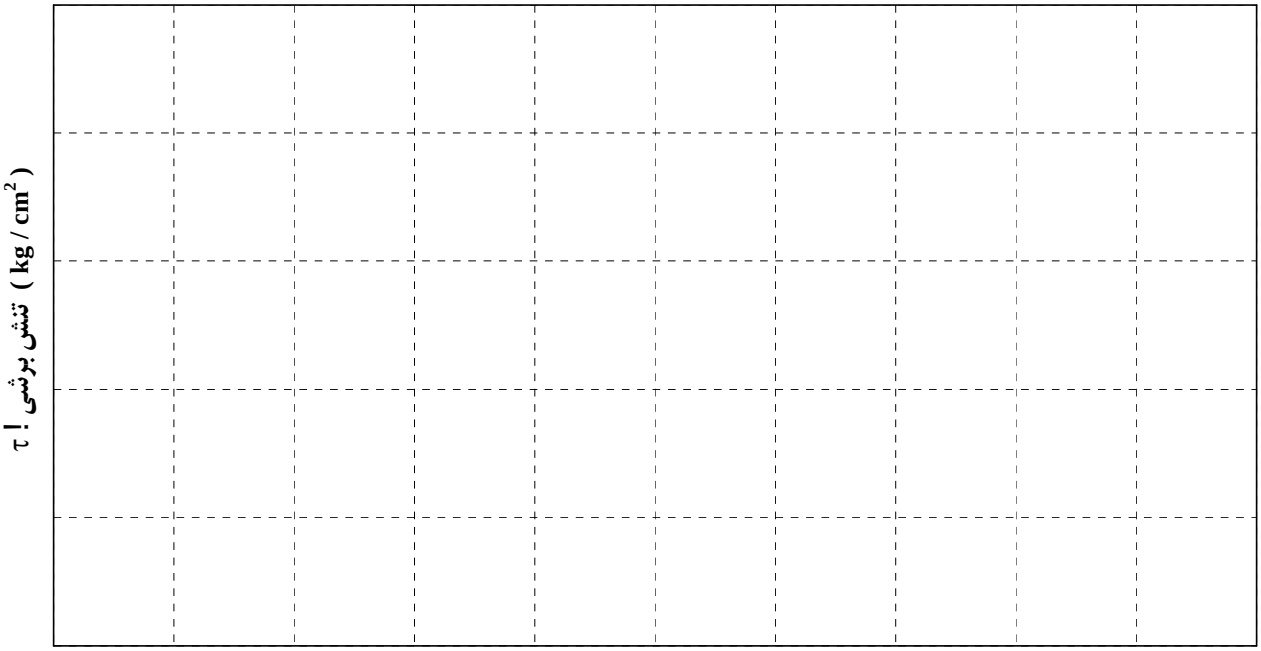
نمایش شکل نمونه پس از انجام آزمایش



رسم نمودارهای آزمایش فشاری سه محوری(CD)

نام و شماره پروژه:	عمق نمونه‌برداری:	آزمایش کننده:
شماره نمونه:	توصیف نمونه خاک:	تاریخ آزمایش:
نوع نمونه:دست نخورده یا بازسازی شده:	سرعت کرنش:	
وزن خشک W_d = (gr)	حجم V_0 = (cm^3)	میانگین قطر اولیه D_0 = (mm)
درصد رطوبت ω = %	وزن تر W_0 = (gr)	سطح مقطع اولیه A_0 = (cm^2)
وزن مخصوص خشک γdry = (gr/cm^3)	وزن مخصوص‌تر γwet = (gr/cm^3)	میانگین ارتفاع اولیه L_0 = (mm)
ضریب رینگ بار LRC =	ضریب رینگ تغییر مکان DRC =	فشار محفظه = (kg/cm^2)
زمان اشباع نمونه: ---- (روز)	با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای	

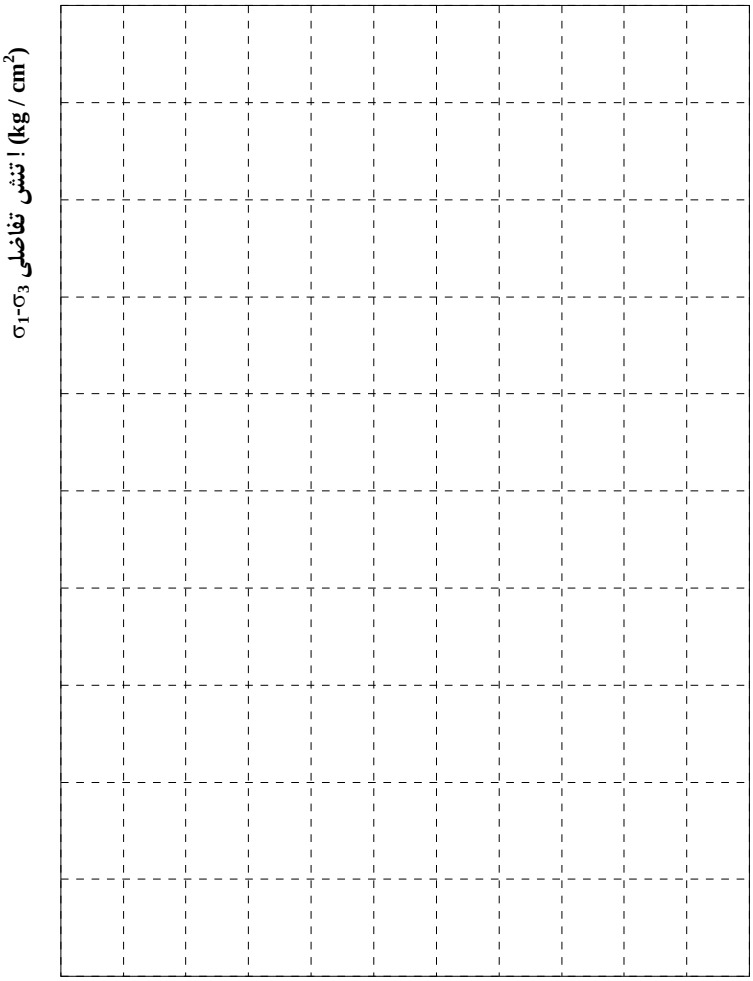
$C' =$	(kg/cm^2)
$\varphi' =$	(deg)



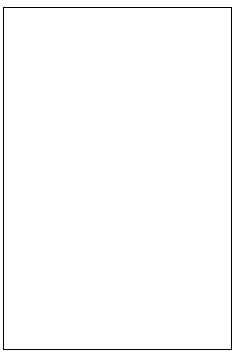
تنش عمودی σ (kg / cm^2)

علامت	قطر (cm)	ارتفاع (cm)	آب محتوی (%)	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	فشار محفظه ای (kg/cm^2)	تنش تفاضلی حداکثر (kg/cm^2)	فشار آب حفره‌ای (kg/cm^2)	پس فشار (kg/cm^2)

برگه رسم نمودارهای آزمایش فشاری سه محوری(CD)



نمایش شکل نمونه پس از انجام آزمایش



فصل ۴

آزمایش تحکیم

٤-١- شرایط و تئوری آزمایش

۴-۱-۱- معمولا دست خوردگی خاک تا حد زیادی بر روی نتایج آزمایش تاثیر گذاشته و از دقت آن می‌کاهد. بنابراین انتخاب و تهیه نمونه باید با دقت زیادی انجام شود.

۴-۱-۲- نحوه بارگذاری و مقدار آن تاثیر زیادی در این آزمایش داشته و معمولا بار در هر افزایش دو برابر می‌گردد. در نمونه‌های دست نخورده برای تعیین فشار بیش تحکیمی از این اطلاعات استفاده می‌گردد.

۴-۱-۳- در شرایطی که نمونه خاک حساسیت زیادی دارد، می‌توان نسبت افزایش بار را کاهش داد و همچنین در مواقعی که رفتار خاک را همانند رفتار طبیعی خاک محل سازه‌ها در نظر می گیریم، بارگذاری تا مقداری با رطوبت طبیعی نمونه و پس از آن تحت شرایط غرقاب صورت می‌گیرد. در هر حال با توجه به شرایط طبیعی نمونه، امکان بازسازی این شرایط در آزمایشگاه وجود داشته و بار تا حد ممکن همانند آن اعمال می‌شود.

۴-۱-۴- دراین آزمایش محاسبه C_v (ضریب تحکیم) بر اساس معادله تحکیم تک بعدی ترزاقی بوده و در محاسبات و ارائه نتایج آن، فرضیات و شرایط زیر باید مد نظر قرار گیرد:

۴-۱-۴-۱- فشردگی خاک و جریان آب حفره‌ای به صورت یک بعدی (عمودی) است.

۴-۱-۴-۲- خاک همگن بوده و اشباع کامل است.

۴-۱-۴-۳- در کلیه مراحل، آب حفره‌ای و ذرات جامد خاک غیرقابل تراکم بوده و یا در مقایسه با تراکم‌پذیری اسکلت خاک، تراکم‌پذیری ناچیزی دارند.

۴-۱-۴-۴- در کلیه مراحل افزایش بار، ضریب نفوذپذیری و ضریب تراکم‌پذیری ثابت هستند.

۴-۱-۴-۵- جریان حرکت آب در توده خاک بر اساس قانون دارسی است.

۴-۱-۴-۶- تحکیم با محو کامل فشار اضافی آب حفره‌ای پایان می‌یابد. به تعبیر دیگر، تئوری ترزاقی برای تحکیم ثانویه صادق نمی‌باشد.

۴-۱-۵- دستگاه تحکیم فاقد وسیله‌ای برای تشخیص اشباع بودن نمونه است. درجه اشباع نمونه در نتایج آزمایش تحکیم اثر زیادی داشته و سرعت تحکیم به درجه اشباع خیلی حساس بوده و وابسته می‌باشد. درحالت‌هایی که درجه اشباع جزیی است، باید در تخمین مدت زمان تحکیم احتیاط نمود زیرا تئوری قراردادی آزمایش تغییر کرده و محاسبات دچار خطا می‌شود.

۴-۱-۶- در این آزمایش زمان اعمال هر بار اثر زیادی بر نتایج آزمایش دارد. اعمال هر بار بر نمونه تا زمانی ادامه می‌یابد که فشار آب حفره‌ای اضافی محو شود. از آنجا که کنترل این عمل یعنی تعیین فشار آب حفره‌ای اضافی نمونه و ادامه آزمایش تا محو کامل آن با این دستگاه مقدور نخواهد بود، به‌کارگیری روش‌های تفسیری که به‌طور مستقیم تحکیم کامل (محو فشار اضافی آب حفره‌ای) را تعیین کند ضروری است. این روش‌ها در بند ۴-۴-۸ ارائه شده‌اند.

٤-۲- وسایل و تجهیزات

۴-۲-۱- دستگاه تحکیم که نمای کلی آن در شکل (۴-۱) دیده می‌شود، دارای یک قاب اصلی است که قالب نمونه بر روی آن قرارمی‌گیرد. برای اعمال بار از قابی فلزی به نام یوغ (کلاهک بارگذاری) استفاده می‌شود که قادر به نگهداری بارهای معین برای مدت زمان طولانی و با دقت ۵ ± درصد بار وارده است و باعث می‌شود اعمال بار بدون ضربه زدن و همچنین با سرعت انجام گیرد. بازوی انتقال بار معمولا دارای سه محل برای قرارگیری بار است، که بار وارده را ۹، ۱۰ و یا ۱۱ برابر افزایش می‌دهد. دستگاه تحکیم در محل خود کاملا ثابت شده و تراز می‌شود که این عمل به وسیله پیچی که در زیر بازو قرار دارد، انجام می‌گیرد. این دستگاه قادر به اعمال بار در زمان‌های طولانی است. در زمان بارگذاری یا بازکردن این پیچ بار بر نمونه اعمال می‌شود. در پشت بازو یک وزنه تعادل برای تراز کردن محور بازو قرار دارد. میله ای بر روی بدنه دستگاه قرار دارد که روی آن دستگاه قرائت تغییر شکل نصب می‌شود. در بالای یوغ (کلاهک بارگذاری) دو پیچ تنظیم قرار دارد که یکی برای ثابت کردن یوغ بر روی نمونه و دیگری برای صفر کردن دستگاه قرائت تغییر شکل به‌کار می‌رود.

دستگاه تحکیم از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

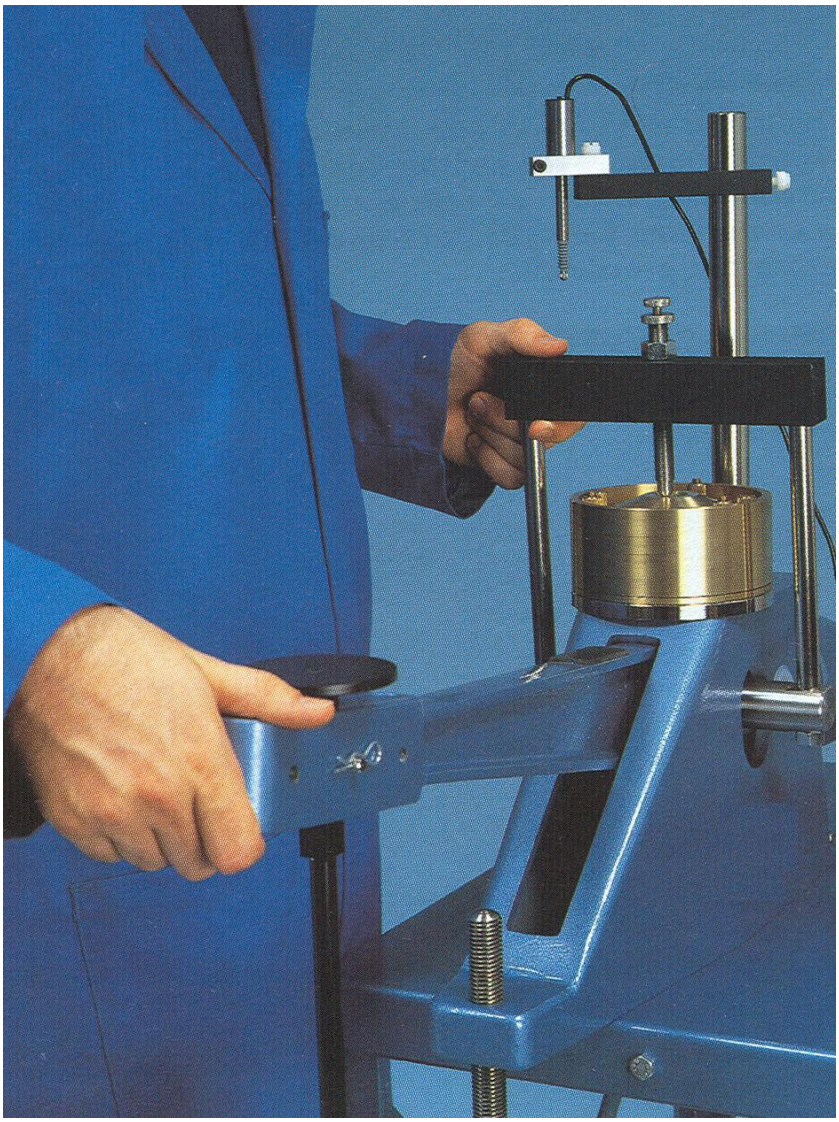
۴-۲-۱-۱- قالب نمونه، که خود دارای قطعات زیر است:

۴-۲-۱-۱-۱- بدنه اصلی قالب که سه پیچ بلند درآن تعبیه شده است. جنس آن ضد زنگ بوده و صفحه زیرین آن نیز با پیچاندن از بدنه جدا می‌شود.

۴-۲-۱-۱-۲- صفحات متخلخل، یکی بزرگ‌تر از قطر نمونه در زیر و دیگری به اندازه ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر کوچک‌تر از قطر نمونه در بالای آن قرار می‌گیرد. صفحه بالایی در قسمت بیرونی دارای زائده‌ای است که قطعه انتقال نیرو در آن درگیر می‌شود. این‌کار برای انتقال بار عمودی به صورت متحدالمرکز با صفحات متخلخل است. این صفحات متخلخل باید از جنس مواد غیرقابل خوردگی بوده و منافذ آن به اندازه کافی ریز باشد تا ذرات نمونه خاک به آن داخل نشود. به منظور جلوگیری از دخول ذرات خاک به صفحات متخلخل، گاهی اوقات از کاغذ صافی واتمن نمره ۵۴ نیز در زیر و بالای نمونه خاک استفاده می‌شود. ضخامت و سختی صفحات متخلخل باید به اندازه‌ای باشد تا در اثر فشارهای حداکثر خم نشده و نشکند. این صفحات همچنین نباید لب پریدگی و ترک داشته باشند و قبل از هرآزمایش با برس نرمی که سایش ایجاد نکند، تمیز شده و به مدت۱۰ دقیقه جوشانیده شود و در صورت امکان در فاصله مابین دو آزمایش در ظرفی که حاوی آب بدون هوا است نگهداری شود. نفوذپذیری صفحات متخلخل و کاغذ صافی (اگر به‌کار برده شود) باید بیش‌تر از نفوذپذیری نمونه خاک باشد.

۴-۲-۱-۱-۳- حلقه نمونه‌گیر که معمولا دارای قطرهای بین ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر و ارتفاع حدود ۲۰ میلی‌متر بوده و دارای یک لبه تیز و برنده است و با فشار جک هیدرولیکی در نمونه فرو برده می‌شود. سطح داخلی حلقه باید صاف و صیقلی باشد تا اصطکاک جدار کم‌ترین مقدار را داشته باشد. پس از قرار گرفتن نمونه در این حلقه، سر و ته آن صاف و تراز شده و درون قالب و بر روی صافی زیرین قرارمی‌گیرد. سختی این قطعه

باید طوری باشد که افزایش قطر آن که تحت شرایط تنش موجود در نمونه در اثر بیش‌ترین بار وارده ایجاد می‌شود، از ۰/۰۳ درصد قطر تجاوز نکند. قطر داخلی حلقه نمونه‌گیر با دقت ۰/۰۷۵ میلی‌متر تعیین می‌شود. جنس آن باید از مواد غیر قابل خوردگی بوده و کاملا صیقلی باشد. به منظور کم کردن اصطکاک بین نمونه و حلقه نمونه‌گیر از روغن سیلیکون و یا پلی تترا فلورو اتیلن استفاده می‌شود.



شکل ٤-١- دستگاه انجام آزمایش تحکیم با قرائت الکترونیکی

۴-۲-۱-۱-۴- قطعه‌ای که برای ثابت نگه داشتن حلقه نمونه‌گیر به کار می‌رود و توسط سه عدد پیچ داخل قالب بسته می‌شود. بر روی آن دو عدد پیچ برای جابه‌جایی تعبیه شده است. در هنگام محکم کردن حلقه نمونه‌گیر در قالب، پیچ‌های مذکور باید به‌طور هم‌زمان و یکنواخت بسته شده و نمونه‌گیر در روی صفحه متخلخل زیرین به صورت کاملا تراز قرار گیرد.

۴-۲-۱-۱-۵- قطعه‌ای که در روی صفحه متخلخل بالای نمونه قرار می‌گیرد. این قطعه مخصوص انتقال بار از یوغ دستگاه بر نمونه بوده و دارای نشیمنگاهی در وسط است که سمبه یوغ در آن ثابت می‌شود.

۴-۲-۱-۲- وسیله نشان‌دهنده تغییر شکل: این وسیله بر روی محور اصلی دستگاه تحکیم و روی یوغ نصب می‌شود. دقت اندازه‌گیری در آن ۰/۰۰۲ میلی‌متر بوده و موقع نصب کاملا عمودی بر روی سطح پیچ تنظیم کننده قرار گیرد. قبل از شروع آزمایش، عقربه آن به وسیله پیچ تنظیم بر روی صفر قرار داده می‌شود. این وسیله باید قادر باشد مقدار تغییرات ارتفاع نمونه را تا ۱۲ میلی‌متر نشان بدهد.

۴-۲-۱-۳- وسایل و تجهیزات دیگری برای تعیین درصد رطوبت مانند ظروف، آون (گرمخانه) و همچنین ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم، آب مقطر، کرونومتر با دقت ثانیه، کاردک، اره مویی، جک مخصوص خارج کردن نمونه، کاغذ صافی واتمن نمره ۵۴ و پیکنومتر برای انجام این آزمایش مورد نیازند.

٤-۳- آماده‌سازی نمونه

۴-۳-۱- در این آزمایش معمولا از نمونه دست نخورده استفاده می‌شود. این نمونه به وسیله فرو بردن حلقه نمونه‌گیر درون توده دست نخورده خاک که به وسیله شلبی، یوفر، مونولیت یا کرکاتر از ساختگاه به آزمایشگاه منتقل شده تهیه می‌شود. البته هیچ روش نمونه‌گیری وجود ندارد که بتوان نمونه کاملا دست نخورده تهیه کرد. بنابراین آزمایش دقیق به نمونه‌ای نیاز دارد که حداقل دست خوردگی در آن به‌وجود آمده است.

۴-۳-۲- حداقل قطر نمونه باید ۵۰ میلی‌متر باشد. حداقل ارتفاع اولیه نمونه ۱۲ میلی‌متر است که این نباید از ده برابر قطر بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه خاک کم‌تر و همچنین نسبت قطر به ارتفاع نمونه حداقل ۲/۵ باشد. استفاده از نسبت‌های قطر به ارتفاع بزرگ‌تر توصیه می‌شود. برای به حداقل رساندن تاثیر اصطکاک جدار حلقه با نمونه، بهتر است از نسبت قطر به ارتفاع بزرگ‌تر از ۴ استفاده شود. بالا و پایین حلقه نمونه‌گیر صاف و تراز شده و ارتفاع نمونه در چهار جای مختلف با تقریب ۰/۰۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود و معدل این اعداد به عنوان ارتفاع نمونه یادداشت می‌شود.

۴-۳-۳- تهیه نمونه باید در محیطی با درصد رطوبت تنظیم شده صورت گیرد تا درصد رطوبت نمونه تغییر نیابد.

۴-۳-۴- تا حد ممکن باید از ارتعاش نمونه و افزایش چگالی آن جلوگیری شود.

۴-۳-۵- حلقه نمونه‌گیر قبل از فرو برده شدن در نمونه با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده و بعد از نمونه‌گیری نیز توزین می‌شود. اختلاف این دو عدد، وزن نمونه مرطوب قبل از آزمایش را نشان می‌دهد (W_t).

۴-۳-۶- درصورتی که مقادیری از نمونه باقی مانده و یکنواخت باشد، از آن برای تعیین درصد رطوبت، وزن مخصوص ذرات جامد خاک (G_s)، حدود اتربرگ و دانه‌بندی استفاده می‌شود.

٤-٤- انجام آزمایش

۴-۴-۱- حلقه نمونه‌گیر حاوی نمونه به همراه کاغذهای صافی در بالا و پایین آن روی صفحه متخلخل زیرین داخل قالب قرار داده شده و صفحه متخلخل بالایی با احتیاط بر روی آن قرار می‌گیرد. سپس صفحه انتقال نیروی عمودی روی آنها گذاشته و یوغ دستگاه روی آنها تنظیم می‌شود. در این حالت حدود ۰/۰۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نیرو بر نمونه وارد می‌شود. در صورت نیاز برای جلوگیری از تورم نمونه بار افزایش می‌یابد. اگر با اعمال بار ۰/۰۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع احتمال تحکیم قابل توجهی در نمونه وجود داشته باشد، بار به ۰/۰۳ و یا ۰/۰۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش داده می‌شود. سپس دستگاه قرائت تغییر مکان با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر که بر روی پایه دستگاه تحکیم قرار دارد بر روی یوغ قرار گرفته و عقربه آن روی صفر تنظیم می‌شود.

۴-۴-۲- در مورد نمونه‌های دست نخورده که از زیر سطح آب زیرزمینی اخذ شده‌اند و یا به‌صورت طبیعی اشباع می‌باشند، بلافاصله بعد از گذاردن نمونه درقالب، تنظیم یوغ و صفر کردن دستگاه قرائت، نمونه با آب غرقاب می‌شود. در صورت تورم نمونه، بار مورد نیاز برای جلوگیری از تورم افزایش می‌یابد. در این موارد، فشار اعمال شده در زمان غرقاب نمودن نمونه و تغییرات حاصل در ارتفاع نمونه یادداشت می‌شود.

۴-۴-۳- درصورتی‌که برای نمونه شرایط طبیعی ایجاد شود و یا تحت شرایط خاص ریختن آب بر روی نمونه با تاخیر انجام شود، این عمل تا فشاری به تاخیر انداخته می‌شود که نمونه تحت آن فشار دیگر تورم نکند.

۴-۴-۴- برای تعیین فشار پیش تحکیمی، مقدار بار نهایی باید چهار برابر فشار پیش تحکیمی و یا بیش‌تر از آن تخمین زده شود. درمورد رس‌های پیش تحکیم یافته، می‌توان برای تعیین مشخصه‌های فشردگی، از سیکل بارگذاری و باربرداری مجدد استفاده کرد.

۴-۴-۵- برای تعیین شیب خط در منحنی تغییر شکل بر حسب لگاریتم زمان، لازم است قرائت انتهایی با قرائت ماقبل تغییری نداشته و یا کاهش آن بسیار اندک باشد. در این حالت باید قرائت‌ها ادامه یافته و زمان آزمایش افزایش یابد تا اعداد قرائت شده ثابت شود.

۴-۴-۶- برای واسنجیدن دستگاه تحکیم، آن را در شرایط بدون نمونه با یک صفحه مسی یا فولادی سخت تقریبا به اندازه ارتفاع نمونه و با قطر یک میلی‌متر کوچک‌تر از حلقه، بارگذاری نموده و از کاغذ صافی در بالا و پایین صفحه نیز استفاده می‌شود. اعداد به‌دست آمده از هر پله بارگذاری با آزمایش انجام شده مقایسه می‌شود. اگر این مقدار از ۵ درصد تغییر شکل اندازه‌گیری شده هر بارگذاری آزمایش تجاوز کند، آن را در تصحیح نشست دخالت می‌دهند.

۴-۴-۷- دمای محیط آزمایشگاه همیشه باید تنظیم بوده و در حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد باشد و تغییرات آن بیش از ± 4 درجه سانتی‌گراد نباشد. ضمنا دستگاه آزمایش نباید در معرض نور مستقیم خورشید قرار داشته باشد.

۴-۴-۸- آزمایش تحکیم به دو روش انجام می‌شود:

۴-۴-۸-۱- روش اول: در این روش هر بارگذاری حدود ۲۴ ساعت ادامه می‌یابد و حداقل دو بارگذاری انجام می‌شود که یکی از بارگذاری‌ها بعد از فشار پیش تحکیمی است. قرائت تغییرات ارتفاع نمونه در زمان‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، و ۳۰ دقیقه و ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت انجام می‌شود. در مواردی ممکن است بعضی ازخاک‌ها برای رسیدن به پایان تحکیم اولیه زمان بیش‌تر از۲۴ ساعت نیاز داشته باشند. در این موارد معمولا مضرب‌هایی از ۲۴ ساعت درنظر گرفته شده و قرائت‌ها تا ثابت شدن آنها ادامه می‌یابد.

۴-۴-۸-۲- روش دوم: دراین روش، بارهای وارده از فشار ۰/۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع شروع می‌شود و برای هر مرحله طوری انتخاب می‌شود که هر بار دو برابر بار قبلی باشد. بدین ترتیب بارها به ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد. البته در حالت‌هایی که نمونه خاک بسیار متراکم بوده و یا فشار پیش تحکیمی زیاد باشد، مقدار بار به ۳۲ و یا ۶۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و یا بیش‌تر افزایش می‌یابد. قرائت‌های نشست نیز در زمان‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه و ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت انجام می‌شود. البته قرائت آخر باید پس از پایان تحکیم اولیه انجام شود. در حالت‌هایی که تحکیم ثانویه مد نظر باشد، بارها برای زمان بیش‌تری روی نمونه می‌ماند.

٤-٥- محاسبات

۴-۵-۱- درصد رطوبت اولیه و نهایی بر طبق روابط (۴-۱) و (۴-۲) محاسبه می‌شود:

$$\omega_0 = \left[\frac{M_{T0} - M_d}{M_d}\right] \times 100 \qquad (۱-۴)$$

$$\omega_f = \left[\frac{M_{Tf} - M_d}{M_d}\right] \times 100 \qquad (۲-۴)$$

که در آن:

ω_0 و ω_f = درصد رطوبت اولیه و نهایی نمونه

M_{T0} و M_{Tf} = جرم اولیه و نهایی نمونه مرطوب

M_d = جرم خشک نمونه

۴-۵-۲- وزن واحد حجم خشک اولیه نمونه نیز از رابطه (۴-۳) به دست می‌آید:

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V_0} \qquad (۳-۴)$$

که درآن:

γ_d = وزن واحد حجم خشک

W_d = وزن نمونه خشک

V_0 = حجم اولیه نمونه

۴-۵-۳- ارتفاع معادل بخش جامد نمونه از رابطه (۴-۴) محاسبه می‌شود:

$$H_s = \frac{W_d}{G_s \cdot A \cdot \gamma_w} \qquad (۴-۴)$$

که در آن:

H_s = ارتفاع معادل بخش جامد نمونه خاک

W_d = وزن نمونه خشک

G_s = وزن مخصوص ذرات جامد خاک

A = سطح مقطع نمونه

γ_w = وزن واحد حجم آب

۴-۵-۴- نسبت تخلخل اولیه ونهایی از روابط (۴-۵) و (۴-۶) محاسبه می‌شود:

$$e_0 = \frac{H_0 - H_s}{H_s} \qquad (۵-۴)$$

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s} \qquad (۶-۴)$$

که در آن

e_0 = نسبت تخلخل اولیه نمونه

e_f = نسبت تخلخل نهایی نمونه

H_0 = ارتفاع اولیه نمونه

H_f = ارتفاع نهایی نمونه

۴-۵-۵- جهت به‌دست آوردن نسبت تخلخل هرنقطه درجدول از رابطه (۴-۷) استفاده می‌شود:

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_s} \qquad (۷-۴)$$

که در آن:

e = نسبت تخلخل درهر نقطه

e_0 = نسبت تخلخل اولیه نمونه

ΔH = تغییرات ارتفاع در هر بار

H_s = ارتفاع معادل بخش جامد نمونه خاک

درجه اشباع نمونه قبل وبعد از آزمایش از روابط (۴-۸) و (۴-۹) محاسبه می‌شود:

$$S_0 = \frac{\omega_0 \cdot G_s}{e_0} \qquad (۸-۴)$$

$$S_f = \frac{\omega_f \cdot G_s}{e_f} \qquad (۹-۴)$$

که در آن:

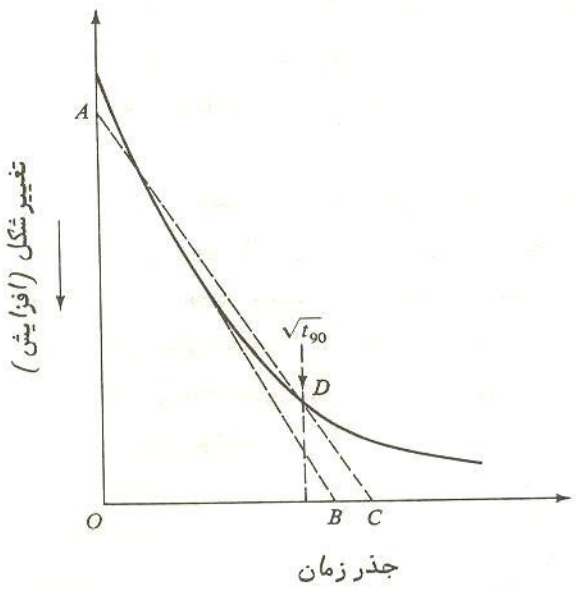
S_0 و S_f = درجه اشباع اولیه و نهایی

ω_0 و ω_f = درصد رطوبت‌های اولیه و نهایی

e_0 و e_f = نسبت تخلخل‌های اولیه و نهایی

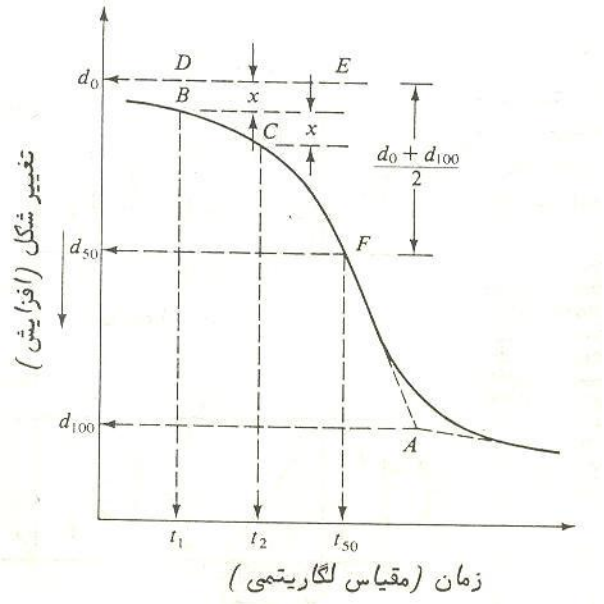
۴-۵-۶- با توجه به مقادیر تغییر شکل‌های به دست آمده در زمان‌های مختلف اعمال هر بار، می‌توان انتهای مرحله تحکیم اولیه و سرعت تحکیم (ضریب تحکیم C_v) را تعیین کرد که از دو روش به‌دست می‌آید. یکی روش جذر زمان و دیگری روش لگاریتم زمان.

۴-۵-۶-۱- روش جذر زمان: دراین روش مقدار قرائت‌های نشست تحت هر بار بر حسب جذر زمان (معمولا بر حسب دقیقه) رسم می‌شود. این زمان از ۰/۴۹ دقیقه شروع وبه ۱۴۴۰ دقیقه و سپس مضاربی از ۱۴۴۰ دقیقه ختم می‌شود. بعد از رسم منحنی، خطی از میان نقاط نشان دهنده قرائت‌های اولیه رسم می‌شود و تا برخورد به محور عمودی ادامه می‌یابد. این نقطه نشان دهنده مقدار نشست در زمان $t = ۰$ است. محل برخورد این خط با محور افقی نیز مشخص می‌شود. نقطه دیگری بر روی محور افقی طوری انتخاب می‌گردد که مقدار آن ۱۵٪ بیش‌تر از نقطه اول باشد. از این نقطه جدید خط مستقیمی رسم می‌شود تا مقدار نشست نقطه $t = 0$ را قطع کند. این خط جدید منحنی قرائت‌های نشست-جذر زمان را در نقطه‌ای قطع می‌کند که مختصات آن d_{90} و t_{90} می‌باشد. d_{90} مقدار نشست مربوط به ۹۰٪ تحکیم اولیه و t_{90} نیز زمان ۹۰٪ تحکیم اولیه نمونه می‌باشد. زمان پایان تحکیم اولیه (t_{100}) را میتوان از محل تقاطع منحنی تغییر شکل-جذر زمان نظیر تغییر شکل در ۱۰۰ درصد تحکیم به دست آورد. تغییر شکل در ۱۰۰ درصد تحکیم به اندازه ۱/۹ بیش‌تر از اختلاف تغییر شکل نقاط صفر و ۹۰ درصد تحکیم است. این کار برای هر مرحله بارگذاری جدید بر روی نمونه انجام شده و مقدار t_{90} برای آن مرحله به دست می‌آید (شکل ۴-۲).



شکل ٤-۲- روش جذر زمان

۴-۵-۶-۲- روش لگاریتم زمان: این روش نسبت به روش جذر زمان دقت زیادتری داشته و معمولا بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش نیز منحنی مقادیر نشست در اثر اعمال بارهای مختلف بر حسب لگاریتم زمان رسم می‌شود. دو خط مستقیم که یکی مماس بر قسمت انتهایی منحنی تحکیم و دیگری مماس بر این منحنی در تندترین شیب قسمت منحنی نمودار تغییر شکل- لگاریتم زمان است یکدیگر را در نقطه‌ای قطع می‌کنند که مختصات آن d_{100} (نشست ۱۰۰٪ تحکیم اولیه) و t_{100} (زمان ۱۰۰٪ تحکیم اولیه) است. نشست‌های نمونه پس از ۱۰۰ درصد تحکیم اولیه، تحکیم ثانویه نامیده می‌شود. برای به‌دست آوردن مقدار نشست اولیه نظیر صفر درصد تحکیم اولیه، دونقطه روی محور افقی انتخاب می‌شود که نسبت زمانی آنها یک به چهار بوده و تغییر شکل بین آن دو بیش از یک چهارم و کم‌تر از یک دوم تغییر شکل کل در آن بار باشد. به مقدار نشست متناظر این دو زمان، به نقطه اولی اضافه می‌شود. نقطه جدید روی محور عمودی همان d_0 یا تغییر شکل مربوط به صفر درصد تحکیم اولیه است. d_{50} (تغییر شکل مربوط به ۵۰ درصد تحکیم اولیه) میانگین مقادیر d_0 و d_{100} بوده و زمان متناظر آن روی منحنی تغییر شکل-لگاریتم زمان بر روی محور افقی، t_{50} یا زمان ۵۰٪ تحکیم اولیه است. این کار برای هر مرحله بارگذاری جدید بر روی نمونه انجام شده و مقدار t_{50} مربوط به آن مرحله به دست می‌آید (شکل ۴-۳).



شکل ٤-۳- روش لگاریتم زمان

۴-۵-۷- برای به دست آوردن ضریب تحکیم برای هر افزایش بار، از رابطه‌های (۴-۱۰) و (۴-۱۱) استفاده می‌شود:

$$C_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}} \qquad (۴-۱۰)$$

$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \qquad (۴-۱۱)$$

که درآن:

C_v = ضریب تحکیم

H = طول مسیر زهکشی در ۵۰٪ یا ۹۰٪ تحکیم. در حالتی که از دو صفحه متخلخل برای زهکشی دوطرفه استفاده شود، H برابر نصف ارتفاع نمونه در هر افزایش بار است. برای زهکشی یکطرفه H برابر ارتفاع نمونه است.

۴-۵-۸- ضریب تراکم‌پذیری (ضریب قابلیت فشردگی) بر طبق رابطه (۴-۱۲) محاسبه می‌شود:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta P} \qquad (۱۲-۴)$$

که درآن:

a_v = ضریب تراکم‌پذیری (ضریب قابلیت فشردگی)

Δe = تغییرات نسبت تخلخل در هر بار

ΔP = تغییرات بار

۴-۵-۹- تعیین ضریب تراکم‌پذیری حجمی (ضریب قابلیت فشردگی حجمی) با استفاده از رابطه (۴-۱۳) انجام می‌شود. توجه شود که مقدار m_v حتی در بخش مستقیم منحنی $e - \log P$ به ازای محدوده‌های تنش تغییر می‌کند:

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \qquad (۱۳-۴)$$

که در آن:

m_v = ضریب تراکم‌پذیری حجمی (ضریب قابلیت فشردگی حجمی)

e_0 = نسبت تخلخل اولیه

۴-۵-۱۰- ضریب نفوذپذیری از رابطه (۴-۱۴) حاصل می‌شود:

$$k = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \qquad (۱۴-۴)$$

که در آن:

k = ضریب نفوذپذیری

C_v = ضریب تحکیم

m_v = ضریب تراکم‌پذیری حجمی

γ_w = وزن واحد حجم آب

۴-۵-۱۱- نسبت‌های تراکم بر طبق روابط (۴-۱۵) تا (۴-۱۸) تعیین می‌شود:

$$r_0 = \frac{d_0 - d_s}{d_0 - d_f} \qquad (۱۵-۴)$$

$$r_p = \frac{d_s - d_{100}}{d_0 - d_f} \qquad (۱۶-۴)$$

$$r_p = \frac{10(d_s - d_{90})}{9(d_0 - d_f)} \qquad (۱۷-۴)$$

$$r_s = 1 - \left(r_0 + r_p\right) \qquad (۱۸-۴)$$

که در آن:

r_0 = نسبت تراکم مقدماتی

r_p = نسبت تراکم اولیه

r_s = نسبت تراکم ثانویه

d_0 = قرائت تغییر شکل نظیر صفر درصد تحکیم اولیه

d_s = قرائت اولیه تصحیح شده

d_f = قرائت نهایی

d_{100} = قرائت تغییر شکل نظیر ۱۰۰٪ تحکیم اولیه

d_{90} = قرائت تغییر شکل نظیر ۹۰ ٪ تحکیم اولیه

۴-۵-۱۲- رسم منحنی نسبت تخلخل – لگاریتم فشار ($e - \log p$)

رسم این منحنی از مراحل مهم آزمایش بوده و شرایط تحکیم را طی بارگذاری نمایش می‌دهد. میزان نسبت تخلخل در هر بارگذاری و باربرداری بر روی محور عمودی و لگاریتم مقادیر بار بر روی محور افقی نمایش داده می‌شود. شیب این منحنی در بارگذاری‌ها نزولی و در باربرداری‌ها صعودی است. (شکل ۴-۴).

۴-۵-۱۳- تعیین مقدار فشار بیش تحکیمی (P_c)

بر روی منحنی $e - \log p$، مماس بر نقطه‌ای که بیش‌ترین انحنا را روی منحنی دارد، با خط افقی که از این نقطه عبور می‌کند، تشکیل زاویه‌ای می‌دهند. محل برخورد نیمساز این زاویه با ادامه خط راستی که مماس بر قسمت خطی منحنی تحکیم را نشان می‌دهد، تعیین کننده مقدار فشار بیش تحکیمی بر روی محور افقی است. (شکل ۴-۵).

۴-۵-۱۴- تعیین مقدار ضریب فشردگی (C_c)

برای تعیین مقدار ضریب فشردگی در قسمت خطی منحنی تحکیم، از رابطه (۴-۱۹) استفاده می‌شود. توجه شود که مقدار C_c برای تمام محدوده‌های تنش در روی بخش مستقیم منحنی $e - \log p$ یکسان است.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{P_2}{P_1}} \qquad (۱۹-۴)$$

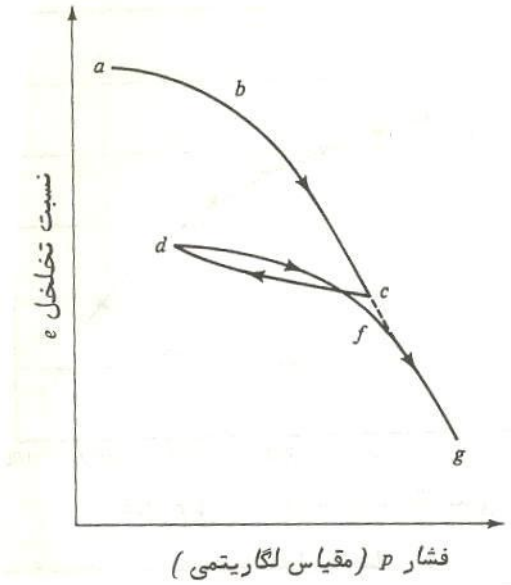
که در آن:

e_1 = مقدار نسبت تخلخل در نقطه اول

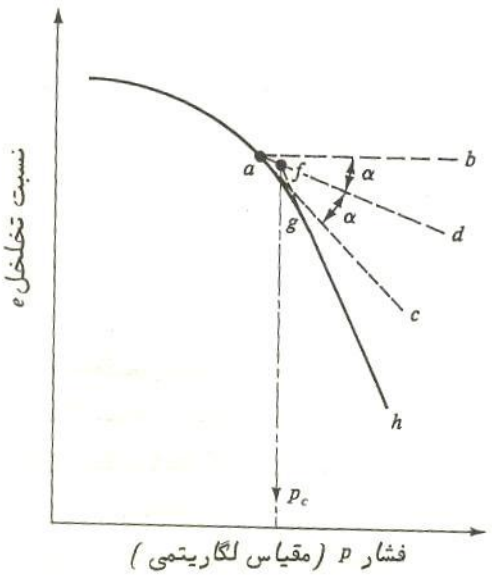
e_2 = مقدار نسبت تخلخل در نقطه دوم

P_1 = مقدار بار متناظر با نسبت تخلخل e_1

P_2 = مقدار بار متناظر با نسبت تخلخل e_2



شکل ٤-٤- منحنی کامل نسبت تخلخل – لگاریتم فشار ($e - \log p$)



شکل ٤-٥- روش تعیین فشار بیش تحکیمی

۴-۵-۱۵- تعیین مقدار شاخص انبساط (C_s)

برای محاسبه شاخص انبساط در منحنی $e - \log p$، از منحنی برگشت که در حالت باربرداری اتفاق می‌افتد، استفاده می‌شود:

$$C_s = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{P_2}{P_1}} \qquad (۲۰-۴)$$

٤-٦- گزارش آزمایش‌ها

گزارش آزمایش تحکیم باید شامل موارد زیر باشد:

۴-۶-۱- مشخصات عمومی نمونه، شامل نام و محل پروژه، شماره نمونه، شماره گمانه و عمق نمونه‌گیری

۴-۶-۲- تشریح و طبقه‌بندی خاک

۴-۶-۳- قطر نمونه و ارتفاع آن

۴-۶-۴- وزن مخصوص و همچنین ارتفاع معادل بخش جامد خاک

۴-۶-۵- درصد اشباع، وزن مخصوص خشک، نسبت تخلخل، ارتفاع و درصد رطوبت نمونه، قبل و بعد از آزمایش

۴-۶-۶- شرایط آزمایش، رطوبت طبیعی یا غرقاب شده، فشار در هنگام غرقاب نمودن، تعداد بارگذاری‌ها و باربرداری‌ها، میزان افزایش و کاهش بار و مدت زمان اعمال بار برای زمان غیر از ۲۴ ساعت

۴-۶-۷- مقدار نشست، نسبت تخلخل و ارتفاع نمونه بعد از هریک از بارگذاری‌ها و باربرداری‌ها

۴-۶-۸- ضریب تحکیم در هر بارگذاری

۴-۶-۹- تعیین t_{50} یا t_{90} برای هریک از بارگذاری‌ها

۴-۶-۱۰- تعیین ضرایب تراکم‌پذیری، تراکم‌پذیری حجمی و نفوذپذیری و همچنین نسبت‌های تراکم برای هر بار

۴-۶-۱۱- تعیین مقدار فشار بیش تحکیمی و ضریب فشردگی

۴-۶-۱۲- ارائه منحنی نسبت تخلخل - لگاریتم فشار $(e - \log p)$

۴-۶-۱۳- ارائه منحنی تغییر شکل - جذر زمان یا تغییر شکل - لگاریتم زمان برای هریک از بارگذاری‌ها

۴-۶-۱۴- ارائه منحنی ضریب تراکم‌پذیری حجمی و فشار وارده

برگه ثبت داده‌های آزمایش تحکیم

تاریخ:	وزن رینگ خالی:	وزن نمونه خشک:
نام پروژه:	قطر رینگ:	درصد رطوبت:
شماره نمونه:	وزن رینگ با نمونه تر(قبل از آزمایش):	میزان تورم نمونه:
عمق نمونه‌گیری:	وزن رینگ با نمونه تر(بعد از آزمایش):	بار خنثی کننده:

الف) بارگذاری (فشار بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

فشار / زمان														
۰														
۶″														
۱۵″														
۳۰″														
۱′														
۲′														
۴′														
۸′														
۱۵′														
۳۰′														
۱h														
۲h														
۴h														
۸h														
۲۴h														

ب) باربرداری (فشار بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

زمان / فشار	۰	٦″	۱۵″	۳۰″	۱′	۲′	٤′	۸′	۱۵′	۳۰′	۱h	۲h	٤h	۸h	۲٤h		

ارائه نتایج آزمایش تحکیم

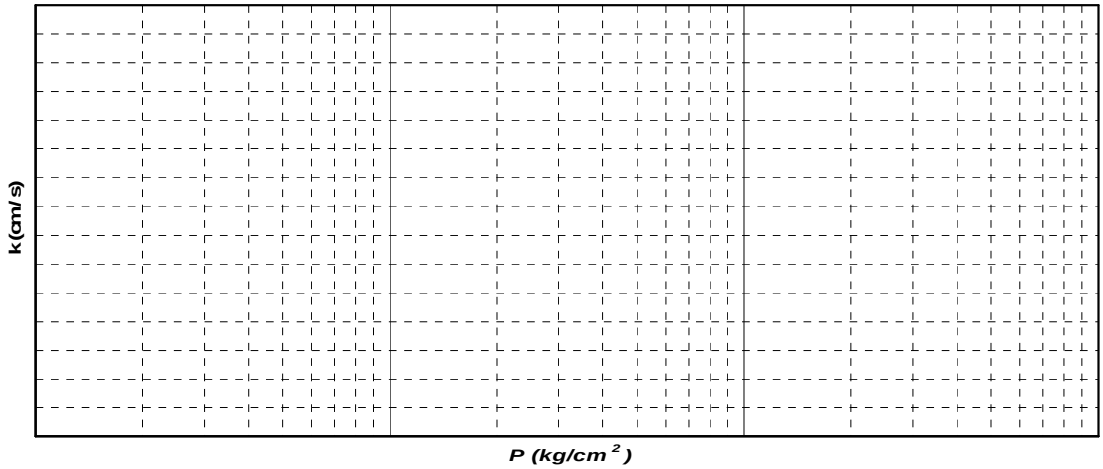
مشخصات کلی نمونه:

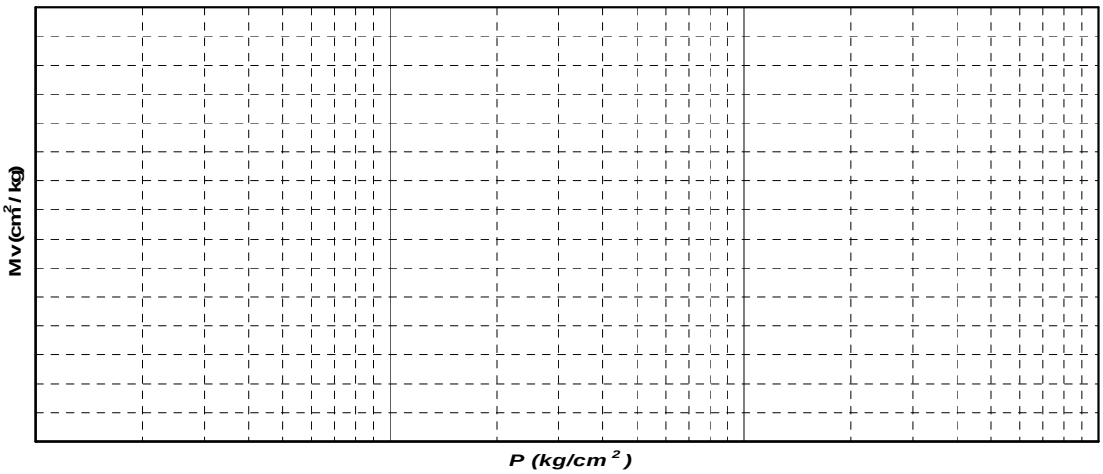
تاریخ:	**عمق نمونه‌گیری:**	**طبقه بندی خاک:**
نام پروژه:	**قطر نمونه:**	**تعداد بارگذاریها و باربرداریها:**
شماره نمونه:	**ارتفاع نمونه:**	**وزن مخصوص ذرات جامد خاک(G_s):**

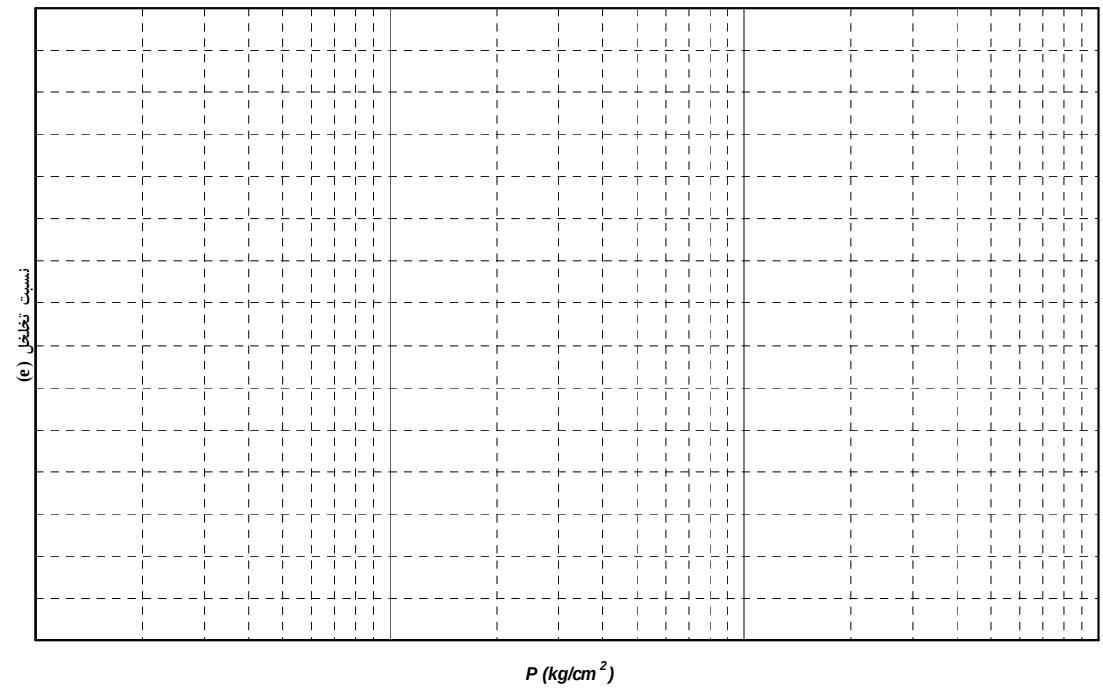
مشخصات نمونه قبل و بعد از آزمایش:

٪ = درصد اشباع قبل از آزمایش	= نسبت تخلخل قبل از آزمایش	٪ = درصد رطوبت قبل از آزمایش
٪ = درصد اشباع بعد از آزمایش	= نسبت تخلخل بعد از آزمایش	٪ = درصد رطوبت بعد از آزمایش
g/cm^3 = دانسیته خشک قبل از آزمایش	cm = ارتفاع نمونه قبل از آزمایش	توضیحات:
g/cm^3 = دانسیته خشک بعد از آزمایش	cm = ارتفاع نمونه بعد از آزمایش	

No	P kg/cm^2	$\Sigma\Delta H$ (cm)	ε $\Sigma\Delta H/H_0$	e	H (cm)	t_{50} t_{90} (sec)	C_v cm^2/s	a_v	M_v cm^2/kg	k cm/s	r_0	r_p	r_s
۰													
۱													
۲													
۳													
۴													
۵													
۶													
۷													
۸													
۹													


k(cm/s)
P (kg/cm²)


Mv(cm²/kg)
P (kg/cm²)


نسبت تخلخل (e)
P (kg/cm²)

فصل ۵

آزمایش برش مستقیم

۵-۱- وسایل و ابزار آزمایش

۵-۱-۱- دستگاه برش: این دستگاه وسیله‌ای برای نگهداری مطمئن نمونه بین دو سنگ متخلخل است، به‌طوری‌که گشتاور پیچشی به نمونه اعمال نشود. دستگاه برش باید قابلیت اعمال تنش عمودی بر سطح نمونه را داشته باشد. همچنین امکان اندازه‌گیری تغییرات ضخامت نمونه و اجازه اشباع و زهکشی آب از مرزهای سطوح بالا و پایین نمونه از میان سنگ‌های متخلخل را فراهم کند. این دستگاه باید قادر به اعمال نیروی برشی به نمونه در داخل آب بوده و امکان اعمال این نیرو در امتداد صفحه برش از پیش تعیین شده، موازی با سطوح نمونه فراهم باشد. قاب‌های نگهدارنده باید به اندازه کافی سخت باشند تا از چرخش نمونه در هنگام برش جلوگیری کنند. قسمت‌های مختلف دستگاه برش که در تماس با نمونه و آب قرار دارند، باید از موادی مانند فولاد زنگ نزن یا برنز و آلومینیوم مخصوص ساخته شوند تا در آنها خوردگی به‌وجود نیاید.

۵-۱-۲- جعبه برش: این جعبه دارای مقطعی دایره‌ای یا مربع می‌باشد و معمولا از جنس فولاد زنگ نزن با قابلیت زهکشی از بالا و پایین نمونه ساخته می‌شود. این جعبه مرکب از دو نیمه قالب به ضخامت مساوی است که با پیچ‌هایی به یکدیگر بسته شده‌اند. البته دو پیچ تنظیم نیز فاصله بین دو صفحه برش بالا و پایین را میزان می‌کند.

۵-۱-۳- وسیله اعمال نیروی برشی: وسیله‌ای است که از یک موتور الکتریکی به همراه یک گیربکس (جعبه دنده) تشکیل می‌شود که تغییر مکان افقی با سرعت ثابت بر یک نیمه قالب (اغلب نیمه فوقانی) اعمال می‌کند. سرعت جابه‌جایی در این وسیله باید حداقل ۰/۰۰۲۵ میلی‌متر در دقیقه تا حداکثر ۲ میلی‌متر در دقیقه باشد. البته تنظیم سرعت حرکت بستگی به خصوصیات تحکیمی نمونه و نوع آزمایش در حال اجرا دارد. اعمال نیروی برشی توسط دستگاه باید به‌صورت یکنواخت بوده و انحراف آن کم‌تر از ۵ ± درصد کوچک‌ترین تقسیمات باشد.

۵-۱-۳-۱- وسیله اندازه‌گیری نیروی برشی: این وسیله معمولا یک رینگ نیرو و یا سلول تعیین بار (Load Cell) است و باید دقت اندازه‌گیری نیروی ۰/۲۵ کیلوگرم نیرو و یا یک درصد نیروی برشی نظیر نقطه گسیختگی، هر کدام که بزرگ‌تر است، را دارا باشد.

۵-۱-۳-۲- وسیله اعمال و اندازه‌گیری نیروی عمودی: نیروی عمودی توسط یک اهرم بارگذاری اعمال می‌شود. نیروی وارد بر اهرم توسط بارهای مرده (وزنه‌ها) یا توسط وسیله بارگذاری بادی تامین می‌شود. این وسیله قابلیت اعمال سریع نیروی عمودی معین بدون افزایش آن و نگهداری این نیرو با دقتی حدود ۱ ± در صد را دارا است.

۵-۱-۳-۳- وزن کلاهک جعبه برش باید کم‌تر از یک درصد نیروی عمودی اعمال شده باشد.

۵-۱-۴- قالب جعبه برش: قالبی فلزی است که جعبه برش در آن جای می‌گیرد و ساختمان داخل آن به نحوی است که قادر است یک نیمه جعبه برش را ثابت نگه دارد ولی نیمه دیگر جعبه برش در اثر اعمال نیروی برشی بتواند در یک صفحه افقی، حرکت داشته باشد.

۵-۱-۵- سنگ‌های متخلخل: سنگ‌های متخلخل امکان زهکشی نمونه خاک را از مرزهای بالا و پایین فراهم می‌کند. این سنگ‌ها همچنین موجب انتقال تنش برشی افقی به مرزهای بالا و پایین نمونه می‌شوند. سنگ‌های متخلخل از

کاربید سیلیکون، اکسید آلومینیوم یا فلزی که در اثر رطوبت و مواد موجود در خاک خورده نمی‌شوند، تشکیل یافته است. سنگ متخلخل مناسب بستگی به نوع خاک مورد آزمایش دارد. نفوذپذیری سنگ متخلخل حتما باید به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از نفوذپذیری خاک باشد. اما منافذ آن باید به اندازه کافی ریز باشند تا از نفوذ بیش از اندازه خاک به داخل منافذ آن، جلوگیری شود. طول و عرض (و یا قطر) سنگ متخلخل بالای نمونه معمولا باید حدود ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر کم‌تر از طول و عرض (و یا قطر) قالب نمونه باشد تا با جداره قالب تماس نداشته و بتواند به‌راحتی تنش عمودی را به خاک انتقال دهد. ضمنا بافت سطحی سنگ متخلخل باید به اندازه کافی درشت و زمخت باشد تا اصطکاک مناسبی را با نمونه تشکیل دهد. این بافت سطحی برای انتقال تنش افقی به نمونه خاک لازم است. نفوذپذیری سنگ متخلخل نباید توسط جمع شدن ذرات خاک در منافذ سنگ متخلخل کاهش یابد، بنابراین کنترل و تمیز کردن مکرر آنها (توسط فشار آب و جوشاندن یا از طریق پاک کننده اولتراسونیک) برای اطمینان از نفوذپذیری مورد نیاز سنگ‌های متخلخل لازم است.

۵-۱-۶- رینگ نمونه‌گیر: برای تهیه نمونه دست نخورده با توجه به ابعاد خواسته شده و مقطع آن از رینگ نمونه‌گیر استفاده می‌شود. این وسیله معمولا فولادی بوده و نوک آن به‌شکل مخروطی (کونیک) و تیز و برنده است. این رینگ توسط جک هیدرولیک در نمونه اصلی فرو رفته و نمونه مورد آزمایش را تهیه می‌کند.

۵-۱-۷- وسیله اندازه‌گیری تغییر شکل: در هنگام آزمایش برای تعیین تغییر مکان افقی و یا تغییر شکل عمودی (تورم و نشست) نمونه از وسایل اندازه‌گیری تغییر شکل استفاده می‌شود. دقت این وسایل برای تغییر مکان افقی ۰/۰۱ میلی‌متر و برای تغییر ضخامت نمونه ۰/۰۰۲ میلی‌متر است.

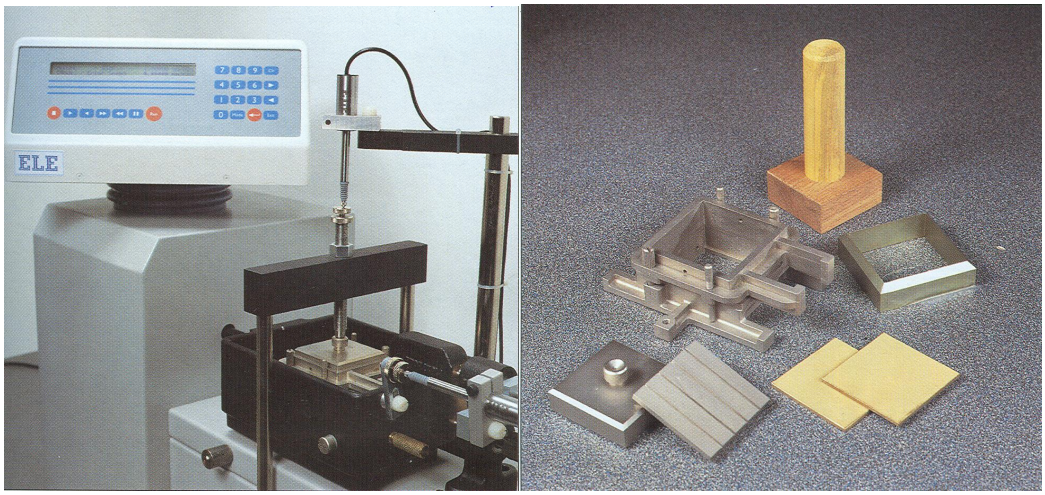
۵-۱-۸- ترازو: جهت توزین نمونه از ترازویی با دقت یک دهم درصد جرم کل نمونه استفاده می‌گردد.

۵-۱-۹- قالب مخصوص برای بازسازی (ریمولدینگ) نمونه: درخصوص نمونه‌های دست خورده، برای بازسازی (ریمولدینگ) نمونه از قالب‌های مخصوصی استفاده می‌شود. این قالب‌ها حدود ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر از قالب جعبه برش کوچک‌تر می‌باشد. ابتدا نمونه با توجه به شرایط درخواستی و یا نتایج به‌دست آمده از آزمایش تراکم، در این قالب‌ها جاسازی شده و سپس به قالب جعبه برش منتقل می‌شود.

۵-۱-۱۰- کرنومتر (زمان‌سنج) با دقت ثانیه

۵-۱-۱۱- کاردک، اره مویی و همچنین تراز برای بریدن و صاف کردن سطوح نمونه

۵-۱-۱۲- شکل (۵-۱) دستگاه برش مستقیم و بعضی از متعلقات آن‌را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱- دستگاه برش مستقیم و بعضی از متعلقات آن

۵-۲- آماده‌سازی نمونه

۵-۲-۱- این آزمایش می‌تواند روی همه خاک‌ها، نمونه‌های دست نخورده، ریمولدد (بازسازی شده) و یا متراکم انجام شود.

۵-۲-۲- در آماده‌سازی نمونه باید دقت شود تا چگالی و در صد رطوبت نمونه مورد آزمایش تا حد ممکن تغییر نکند. بنابراین ساخت نمونه آزمایشی از نمونه اصلی در اتاق مخصوص (اتاقی که رطوبت آن تحت کنترل است) انجام می‌گیرد. معمولا در هر آزمایش برش، سه نمونه همانند از نمونه اصلی تهیه می‌شود. در تهیه هر یک از نمونه‌ها موارد زیر باید لحاظ شود:

۵-۲-۲-۱- حداقل ارتفاع هر نمونه ۱۲ میلی‌متر باشد با این شرط که این مقدار از ۶ برابر قطر بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه کم‌تر نباشد.

۵-۲-۲-۲- حداقل نسبت طول و عرض (و یا قطر) به ارتفاع نمونه باید ۲ به ۱ باشد.

۵-۲-۲-۳- در نمونه‌های دایره‌ای حداقل قطر و در نمونه‌های مربعی حداقل طول نمونه باید ۵۰ میلی‌متر و یا ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه، هر کدام که بزرگ‌تر است، باشد.

۵-۲-۳- نمونه‌های بازسازی شده (ریمولدد) با توجه به چگالی طبیعی محل و یا پس از آزمایش تراکم برروی مصالح مورد آزمایش و تعیین درصدی از چگالی خشک ماکزیمم، بازسازی (ریمولدد) می‌شوند. برای این‌کار ابتدا قالب آزمایش که مخصوص بازسازی می‌باشد آماده شده و نمونه در چند لایه توسط کوبه‌ای در آن‌جا سازی می‌شود. درخصوص نمونه‌های متراکم شده دقت زیادی باید صورت گیرد تا اولا چگالی مورد نظر لحاظ شود و ثانیا نمونه یکنواخت و همگن باشد و ثالثا درصد رطوبت نمونه همانی باشد که مد نظر بوده است. در زمانی که نمونه خاک اولیه مرطوب می‌شود، باید بلافاصله نمونه داخل کیسه پلاستیکی قرار گیرد. زمان نگهداری نمونه داخل کیسه پلاستیکی بستگی به نوع خاک دارد. اگر طبقه خاک از نوع SP ویا SW باشد، نمونه می‌تواند بلافاصله بعد از بهم زدن بازسازی شود. اگر طبقه خاک از نوع SM باشد، باید حدود سه ساعت نمونه داخل کیسه پلاستیک قرار گیرد. اگر طبقه خاک از نوع SC و ML و CL باشد، نمونه خاک باید حدود ۱۸ ساعت داخل کیسه پلاستیک باقی بماند. اگر طبقه خاک از نوع CH و

MH باشد، لازم است نمونه حدود ۳۶ ساعت در داخل کیسه پلاستیک باقی بماند و در فواصل زمانی معینی به هم زده شود. برای کنترل کلیه مراحل ذکر شده، یک نمونه اضافی از مصالح مورد نظر ساخته می‌شود.

۵-۳- روش انجام آزمایش

۵-۳-۱- آزمایش برش مستقیم به دو روش معمول تند و کند انجام می‌گیرد. ابعاد نمونه با توجه به دست خورده و یا دست نخورده بودن آن و نیز قطر بزرگ‌ترین دانه نمونه خاک، از دایره با قطر ۵ سانتی‌متر تا مربع به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متری متغیر است.

۵-۳-۲- آزمایش برش مستقیم به روش تند: در این روش آزمایش، نمونه به صورت تحکیم نیافته و زهکشی نشده، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. با توجه به سرعت زیاد آزمایش، امکان تحکیم و یا زهکشی به نمونه داده نمی‌شود. اما به لحاظ اینکه کنترل این مراحل در دستگاه وجود ندارد، در شرایطی با در نظر گرفتن نوع نمونه‌های خاک در حد بسیار اندک امکان تحکیم و یا زهکشی وجود دارد.

۵-۳-۲-۱- پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، قالب آزمایش کنترل شده و کلیه پیچ‌های تنظیم بسته می‌شود. سپس در کف قالب با توجه به اشباع شدن یا نشدن نمونه، سنگ متخلخل مرطوب شده و یا غیرمرطوب قرار داده می‌شود. باید توجه کرد که بر روی سنگ‌های متخلخل شیارهایی وجود دارد، که جهت این شیارها باید عمود بر جهت حرکت جعبه برش باشد. بعد از قرار گرفتن سنگ متخلخل، کاغذ صافی بر روی آن گذاشته می‌شود و سپس نمونه روی آن قرار می‌گیرد. عمل گذاشتن کاغذ صافی و سنگ متخلخل بالای نمونه هم تکرار می‌شود. پس از قرارگیری کلاهک قالب برروی آنها، مجموعه قالب جعبه برش در محل مخصوص خود در داخل دستگاه برش قرار می‌گیرد. یوغ مخصوص بارگذاری عمودی بر روی گودی کلاهک قالب برش قرار داده شده و سپس اهرم وزنه‌گذاری تراز می‌شود.

۵-۳-۲-۲- درصورتی‌که آزمایش به‌صورت اشباع انجام شود، دور قالب آب ریخته می‌شود. این آب یا آب مقطر بوده و یا آبی است که در محل نمونه‌گیری وجود داشته است. با این عمل آثار مواد شیمیایی موجود در آب بر روی نتایج آزمایش منظور خواهد شد.

۵-۳-۲-۳- جهت شروع آزمایش، ابتدا پیچ اتصال دو نیمه قالب باز شده و توسط پیچ مخصوص، فاصله دونیمه قالب در حدود ۰/۶۴ میلی‌متر تنظیم می‌شود. این عمل برای کاهش حداکثر اصطکاک بین دو نیمه قالب است.

۵-۳-۲-۴- مرحله بعد تنظیم وسیله اندازه‌گیری تغییر مکان افقی بوده که معمولا از اندازه‌گیر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. قبل از شروع آزمایش توسط نیروی افقی، تنش عمودی حدود ۰/۰۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به نمونه اعمال می‌شود. اعمال این بار، باعث ثابت شدن قالب برش و همچنین جا افتادن کامل نمونه در قالب است. سرعت آزمایش یا همان سرعت تغییر مکان افقی در حدود ۰/۵ میلی‌متر تا ۲ میلی‌متر بر دقیقه است که بستگی به طبقه‌بندی خاک دارد. هر چه خاک درشت دانه‌تر با شد، سرعت نیز افزایش می‌یابد.

۵-۳-۲-۵- وسیله اندازه‌گیری تغییر مکان عمودی بر روی پیچ تنظیم بالای یوغ نصب می‌شود. برای این‌کار معمولا از اندازه‌گیر با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر استفاده می‌شود. پس از نصب این وسیله، بار عمودی مورد نیاز به نمونه اعمال می‌شود. از آنجا که در آزمایش برش مستقیم سه نمونه مورد آزمایش قرار می‌گیرند، بنابراین سه بار عمودی مختلف به سه نمونه مذکور اعمال می‌شود. این‌کار از طریق قرار دادن وزنه‌های مناسب به گیره بازوی اهرم، انجام می‌گیرد. نیروی عمودی اعمال شده متناسب با وضعیت نمونه و نحوه قرارگیری آن در محل اخذ انتخاب می‌شود. برای خاک‌های تقریبا سخت، اعمال نیروی عمودی به صورت تک مرحله‌ای انجام می‌شود. درصورتی‌که برای خاک‌های تقریبا نرم ممکن است لازم شود که اعمال نیروی عمودی از طریق اعمال آن در چند مرحله صورت گیرد تا ازصدمه زدن به نمونه جلوگیری شود.

۵-۳-۲-۶- وسیله اندازه‌گیری تغییر مکان‌های عمودی و افقی بر روی صفر تنظیم شده و پس از تنظیم سرعت مورد نظر و روشن شدن دستگاه، بلافاصله پس از حرکت عقربه وسیله اندازه‌گیری نیرو، زمان‌سنج به‌کار می‌افتد و قرائت‌های وسایل اندازه‌گیری تغییر مکان‌های عمودی و افقی، زمان و نیروی برش به‌طور هم زمان یادداشت می‌شود. این قرائت‌ها باید در فواصل تغیر مکانی برابر با ۲ درصد قطر (یا طول) نمونه خوانده شود تا منحنی تنش برشی– تغییر شکل نسبی افقی به دقت ترسیم گردد. درخصوص نمونه‌های پیش تحکیم یافته و یا ترد و شکننده قرائت‌های اضافی به رسم دقیق‌تر منحنی کمک خواهد کرد.

۵-۳-۲-۷- چنانچه در هنگام آزمایش، نیمه بالایی قالب با نیمه پایینی در تماس باشد، لازم است عمل تنظیم پیچ فاصله مجددا تکرار شود.

۵-۳-۲-۸- آزمایش معمولا تا گسیختگی نمونه انجام می‌گیرد. گسیختگی متناظر با حداکثر تنش برشی حاصله است. درصورتی‌که گسیختگی اتفاق نیفتد، تنش برشی متناظر با تغییر شکل نسبی افقی بین ۱۵ تا ۲۰ درصد طول (یا قطر) نمونه در محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

۵-۳-۲-۹- پس از پایان آزمایش بلافاصله آب قالب تخلیه شده وبار از روی اهرم باز و همچنین یوغ از روی نمونه برداشته می‌شود. در خصوص نمونه‌های چسبنده، دو نیمه قالب برش با حرکت لغزشی در امتداد صفحه برش از هم جدا می‌شوند. این کار با احتیاط کامل صورت می‌پذیرد تا هیچ‌گونه دست خوردگی در این سطح صورت نگیرد. سپس از دو نیمه برش خورده عکس‌برداری شده و یا طرح آن با خصوصیات ملاحظه شده، ترسیم می‌شود. لازم به ذکر است که این روش در خصوص نمونه‌های غیرچسبنده انجام نمی‌شود. در انتها نمونه توزین شده و برای تعیین درصد رطوبت در گرمخانه قرار داده می‌شود.

۵-۳-۳- آزمایش برش مستقیم به روش کند: در این روش، مقاومت برشی تحکیم یافته – زهکشی شده خاک به‌دست می‌آید. در این آزمایش با توجه به اعمال بسیار کند بارگذاری افقی، کوتاه بودن مسیرهای زهکشی نمونه و خروج سریع آب منفذی و در نتیجه از بین رفتن فشارهای منفذی اضافی، نتیجه مناسبی حاصل می‌شود. بنابراین برای تعیین مقاومت برشی خاک در محل‌هایی که تحت تنش‌های عمودی موجود، تحکیم کامل خاک به وجود می‌آید، قابل استفاده است. سرعت آهسته جابه‌جایی نسبی افقی موجب محو فشارهای منفذی اضافی می‌شود، اما موجب تغییر شکل خمیری

خاک های نرم چسبنده نیز می‌شود. بنابراین باید مراقبت های لازم صورت گیرد تا شرایط آزمایش نمایانگر شرایط مورد بررسی باشد.

۵-۳-۳-۱- پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و قرار دادن آنها در قالب، گذاردن کلاهک قالب بر روی نمونه، انتقال یوغ بر نشیمنگاه کلاهک و نصب جابه‌جایی سنج عمودی با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر برروی آن، در صورت اشباع نبودن نمونه، دور قالب نمونه‌ها آب مقطر ریخته شده و جابه‌جایی‌سنج عمودی کنترل می‌شود. در صورت تورم نمونه با افزایش تدریجی بار از تورم نمونه جلوگیری می‌شود. معمولا با توجه به جنس نمونه‌ها عمل اشباع کردن آنها حدود ۲۴ ساعت به طول می‌انجامد. درصورتی‌که نمونه‌ها ریز دانه باشند، این زمان ممکن است دو یا چند روز طول بکشد.

۵-۳-۳-۲- پس از اطمینان از اشباع بودن نمونه‌ها، عمل تحکیم صورت می‌گیرد. برای این‌کار پس از ثبت عدد جابه‌جایی سنج عمودی و تعیین بار مورد نظر، با استفاده از زمان‌سنج، مقدار نشست نمونه تحت بار عمودی معین در زمان‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه و همچنین ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت ثبت می‌شود و نمودار تغییر مکان عمودی در مقابل لگاریتم زمان و یا ریشه دوم زمان رسم می‌شود.

۵-۳-۳-۳- پس از این مرحله، پیچ‌های اتصال دو نیمه قالب برش باز شده و در جای مخصوص خودش قرار داده می‌شود. توسط پیچ‌های تنظیم، حدود ۰/۶۴ میلی‌متر بین دو نیمه قالب فاصله داده می‌شود. سپس با توجه به زمان تحکیم نمونه، سرعت تغییر مکان افقی مناسبی برای آزمایش انتخاب می‌شود. در ضمن نمونه باید با سرعت نسبتا کندی برش داده شود به‌طوری که هیچ فشار منفذی اضافی در هنگام گسیختگی به‌وجود نیاید. برای این‌کار با استفاده از رابطه (۵-۱) حدود زمان لازم از شروع اعمال نیروی افقی تا گسیختگی تخمین زده می‌شود:

$$t_f = 50 t_{50} \qquad (۵-۱)$$

که در آن:

t_f = زمان کل آزمایش (دقیقه) از لحظه اعمال نیروی افقی تا گسیختگی

t_{50} = زمان لازم (دقیقه) برای آنکه نمونه تحت تنش عمودی خاصی به ۵۰ در صد تحکیم برسد

اگر نمودار تغییرمکان عمودی با ریشه دوم زمان ترسیم شده باشد، t_{90} محاسبه می‌شود و خواهیم داشت:

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4.28} \qquad (۵-۲)$$

که در آن:

t_{90} = زمان لازم (دقیقه) برای آنکه نمونه تحت تنش عمودی مشخص شده به ۹۰ در صد تحکیم برسد.

برخی خاک‌ها نظیر ماسه‌های متراکم و رس‌های بیش تحکیم یافته ممکن است مطابق منحنی‌های زمان ـ نشست تعریف شده رفتار ننمایند و در نتیجه مقدار t_f تخمین مناسبی از زمان لازم برای گسیخته شدن نمونه تحت شرایط زهکشی شده، نباشد. برای ماسه‌های متراکم تمیز که سرعت زهکشی در آنها زیاد است، می‌توان t_f را حدود ۱۰ دقیقه و برای ماسه‌های متراکم با بیش از ۵٪ ریزدانه، t_f را حدود ۶۰ دقیقه در نظر گرفت.

۵-۳-۳-۴- با استفاده از رابطه (۵-۳) می‌توان سرعت برش را تعیین کرد :

$$d_r = \frac{d_f}{t_f} \qquad (۵-۳)$$

که در آن:

d_r = سرعت تغییر مکان افقی بر حسب میلی‌متر در دقیقه

d_f = تغییر مکان افقی تا گسیختگی بر حسب میلی‌متر

t_f = کل زمان لازم تا گسیختگی بر حسب دقیقه

لازم به توضیح است که مقدار تغییر مکان افقی تا گسیختگی به عوامل زیادی از جمله نوع و تاریخچه تنش خاک بستگی دارد. به‌عنوان راهنما اگر نمونه خاک، ریزدانه تحکیم یافته عادی یا کمی بیش تحکیم یافته باشد، مقدار d_f برابر ۱۲ میلی‌متر یا ۱۵ تا ۲۰ درصد پهنا (یا قطر) جعبه برش در نظر گرفته می‌شود. برای سایر خاک‌ها، مقدار d_f مساوی ۵ میلی‌متر محسوب می‌شود. پس از محاسبات ذکر شده، سرعت برش به‌دست می‌آید. دستگاه برش مستقیم برای این سرعت تنظیم شده و دستگاه روشن می‌شود.

۵-۳-۳-۵- قرائت‌های مربوط به زمان، تغییر مکان افقی و قائم و نیروی برشی در فواصل تغییر مکانی برابر با ۲ درصد قطر (یا طول) نمونه ثبت می‌شود تا منحنی تنش برشی- تغییر مکان به دقت تعریف شود.

۵-۳-۳-۶- بقیه آزمایش مانند مراحل ذکر شده در ۵-۳-۲-۷، ۵-۳-۲-۸ و ۵-۳-۲-۹ انجام و نتیجه یادداشت می‌شود.

۵-۳-۳-۷- یک حالت خاص از آزمایش برش مستقیم کند، به منظور تعیین مقاومت ماندگار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی خاک‌ها پس از آنکه مقاومت برشی به میزان حداکثر (اوج) خود بر حسب تنش موثر رسید، با افزایش تغییر شکل نسبی افقی، مقاومت کاهش می‌یابد و به ازای تغییر شکل‌های نسبی بزرگ، مقاومت به مقدار نهایی خود یعنی مقاومت ماندگار می‌رسد. این مقاومت را می‌توان با حرکت‌های متوالی به جلو و عقب به وسیله دستگاه برش مستقیم اندازه‌گیری کرد.

۵-٤- محاسبات

۵-۴-۱- تنش برشی از رابطه (۵-۴) محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad (۵-۴)$$

که در آن:

τ = تنش برشی اسمی بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع

F = نیروی برشی بر حسب کیلوگرم نیرو

A = سطح مقطع اولیه نمونه بر حسب سانتی‌متر مربع

۵-۴-۲- تنش عمودی با استفاده از رابطه (۵-۵) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \qquad (۵-۵)$$

که در آن:

σ_n = تنش عمودی بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع

N = نیروی قائم که به‌صورت عمودی به نمونه اعمال می‌شود بر حسب کیلوگرم نیرو

A = سطح مقطع اولیه نمونه بر حسب سانتی‌متر مربع

۵-۴-۳- منحنی تنش برشی – تغییر شکل نسبی افقی برای هر یک از نمونه‌های آزمایش رسم می‌شود. در این منحنی، مقادیر تغییر شکل نسبی افقی بر روی محور افقی و مقادیر تنش برشی بر روی محور قائم مشخص می‌شود. از این منحنی برای شناخت رفتار خاک استفاده می‌شود. در ماسه شل تنش برشی مقاوم با تغییر مکان نسبی افزایش می‌یابد تا تنش برشی گسیختگی حاصل شود. بعد از آن مقاومت برشی با افزایش تغییر مکان نسبی افقی تقریبا ثابت می‌ماند. در ماسه متراکم تنش برشی مقاوم با تغییر مکان نسبی افقی افزایش می‌یابد تا تنش برشی گسیختگی حاصل شود. این مقدار مقاومت برشی حداکثر (اوج) است. بعد از تنش گسیختگی، تنش برشی مقاوم به‌تدریج با افزایش تغییر مکان نسبی افقی کاهش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت (مقاومت برشی نهایی) برسد. رفتار رس‌های با تحکیم عادی و بیش تحکیم یافته به ترتیب مشابه ماسه‌های شل و متراکم است.

۵-۴-۴- رسم نقاط تنش برشی نظیر لحظه گسیختگی بر حسب تنش عمودی برای هر سه نمونه بر روی یک دستگاه مختصات که در آن محور قائم، تنش برشی و محور افقی، تنش عمودی است مشخص شده و بهترین خط مستقیمی که بر این سه نقطه می‌گذرد رسم می‌شود. محل تلاقی این خط با محور تنش برشی، مقدار چسبندگی (c) و زاویه آن با محور تنش عمودی زاویه اصطکاک داخلی (φ) را مشخص خواهد کرد.

۵-۴-۵- منحنی تغییر شکل نسبی حجمی (عمودی) – تغییر شکل نسبی افقی برای آزمایش برش کند رسم می‌شود. این منحنی رفتار خاک را معرفی می‌کند. اطلاعات لازم برای رسم این منحنی عبارتند از: زمان شروع تا گسیختگی نمونه و مقادیر ثبت شده از جابه‌جایی سنج عمودی نصب شده بر روی کلاهک قالب وهمچنین مقادیر ثبت شده از جابه‌جایی سنج افقی که بر روی وجه جانبی قالب نصب شده است. در ماسه‌های شل، افزایش تنش برشی (افزایش تغییر شکل افقی)، همراه با کاهش حجم نمونه انجام می‌گیرد. لیکن در ماسه متراکم افزایش تغییر شکل افقی، ابتدا همراه با کاهش حجم و سپس با افزایش تنش برشی و تغییر شکل افقی، افزایش حجم (اتساع) نمونه رخ می‌دهد. رفتار رس‌های عادی تحکیم یافته و بیش تحکیم یافته به ترتیب مشابه ماسه‌های شل و متراکم است.

۵-۵- گزارش

برای ارائه گزارش در آزمایش برش مستقیم اطلاعات ذیر اعلام می‌شود:

۵-۵-۱- نام پروژه، محل نمونه‌گیری، تاریخ نمونه‌برداری و شماره نمونه

۵-۵-۲- نوع نمونه از نظر دست نخورده یا دست خورده بودن (بازسازی شده و یا متراکم شده)

۵-۵-۳- توصیف ظاهری نمونه، حدود اتربرگ و دانه‌بندی نمونه (اگر به دست آمده است)

۵-۵-۴- طول و عرض و یا قطر نمونه‌های آزمایشی و ارتفاع آنها و شکل هندسی سطح مقطع نمونه

۵-۵-۵- طبقه‌بندی خاک و قطر بزرگ‌ترین دانه موجود در آن

۵-۵-۶- مشخص کردن نوع آزمایش از نظر اشباع بودن یا نبودن نمونه

۵-۵-۷- مدت زمان اشباع کردن نمونه‌ها

۵-۵-۸- درصد رطوبت و چگالی اولیه و نهایی نمونه خاک

۵-۵-۹- اعلام فشارهای عمودی اعمال شده

۵-۵-۱۰- نوع آزمایش از نظر تند یا کند بودن

۵-۵-۱۱- سرعت تغییر مکان نسبی افقی (سرعت برش)

۵-۵-۱۲- مدت زمان تحکیم نمونه‌ها (در روش کند)

۵-۵-۱۳- ترسیم منحنی های تغییر مکان عمودی در مقابل لگاریتم زمان یا ریشه دوم زمان و تعیین t_{50}

۵-۵-۱۴- تنش برشی اسمی در لحظه گسیختگی نمونه‌ها

۵-۵-۱۵- رسم پوش تنش برشی اسمی – تنش عمودی

۵-۵-۱۶- مقدار c و φ

۵-۵-۱۷- منحنی تنش برشی اسمی – تغییر شکل نسبی افقی هر یک از نمونه‌ها

۵-۵-۱۸- منحنی تغییر شکل نسبی حجمی(عمودی) – تغییر شکل نسبی افقی هر یک از نمونه‌ها (در روش کند)

۵-۵-۱۹- مقادیر c_r و φ_r در حالت مقاومت ماندگار (در صورت تعیین)

جدول ثبت اطلاعات آزمایش برش مستقیم

زمان (دقیقه)	آزمایش اول $\sigma_n =$ kg/cm^2			آزمایش دوم $\sigma_n =$ kg/cm^2			آزمایش سوم $\sigma_n =$ kg/cm^2			آزمایش چهارم $\sigma_n =$ kg/cm^2		
	درجه قرائت نیروی افقی	درجه قرائت تغییر مکان افقی	درجه قرائت تغییر مکان عمودی	درجه قرائت نیروی افقی	درجه قرائت تغییر مکان افقی	درجه قرائت تغییر مکان عمودی	درجه قرائت نیروی افقی	درجه قرائت تغییر مکان افقی	درجه قرائت تغییر مکان عمودی	درجه قرائت نیروی افقی	درجه قرائت تغییر مکان افقی	درجه قرائت تغییر مکان عمودی

جدول ثبت اطلاعات آزمایش برش مستقیم

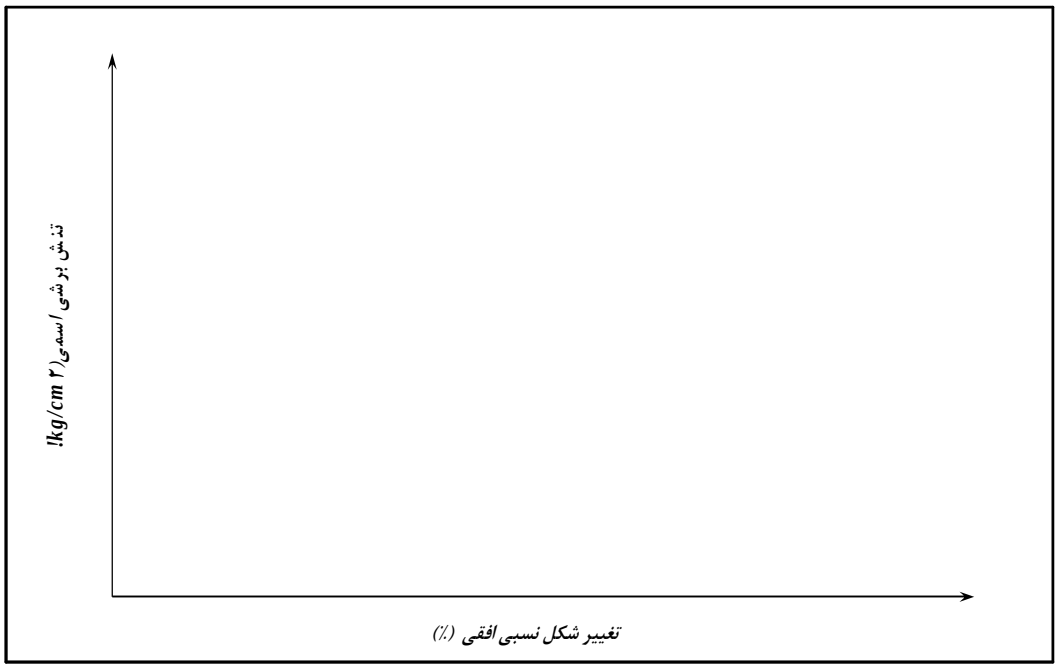
قبل از آزمایش					بعد از آزمایش				
تعداد نمونه/قالب	۱	۲	۳	٤	شماره ظرف	۱	۲	۳	٤
شماره قالب					وزن خاک تر+ظرف				
وزن خاک تر+قالب					وزن خاک خشک+ظرف				
وزن قالب					وزن ظرف				
وزن خاک تر					وزن خاک خشک				
چگالی خاک تر					مقدار رطوبت				
					درصد رطوبت طبیعی				
					چگالی خشک خاک				
					در صد رطوبت اشباع				

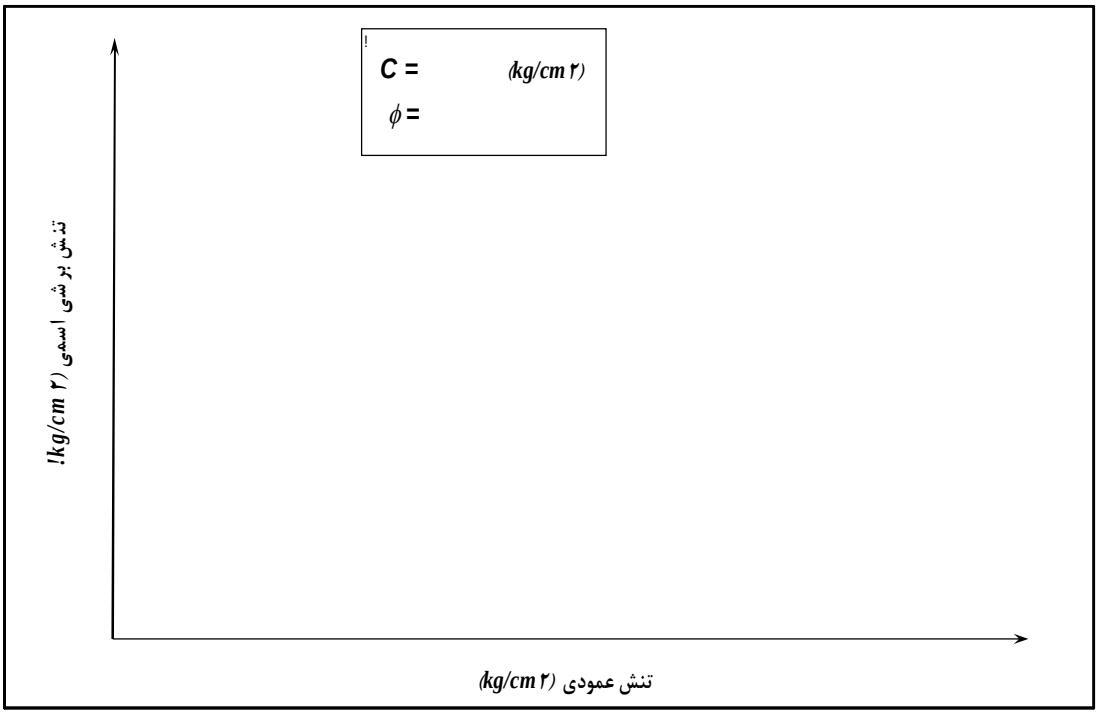
ارائه نتایج آزمایش برش مستقیم

نام پروژه:	ابعاد نمونه: cm	مساحت نمونه: cm^2	
شماره نمونه:	حجم نمونه: cm^3	نمونه بازسازی شده ☐	نمونه دست نخورده ☐
عمق نمونه‌گیری:	نمونه غیر اشباع ☐	نمونه اشباع ☐	زمان اشباع: (روز)
ابعاد قالب:	نمونه تحکیم نیافته ☐	نمونه تحکیم یافته ☐	زمان تحکیم: (روز)
طبقه خاک:	آزمایش کند ☐	آزمایش تند ☐	سرعت آزمایش (نرخ جابجایی افقی): *(mm/min)*

شماره نمونه	علامت	در صد رطوبت نمونه	چگالی خشک خاک (gr/cm^3)	تنش عمودی (kg/cm^2)	حداکثر تنش برشی (kg/cm^2)	تغییر شکل نسبی افقی در لحظه گسیختگی $(\%)$
۱						
۲						
۳						
۴						

ارائه نتایج آزمایش برش مستقیم





منابع و مراجع

1- American Society for Testing and Materials, Annual Book of Standards (1998, 1999),Vol 4.08 (D2166)
2- American Society for Testing and Materials, Annual Book of Standards (1998, 1999),Vol 4.08 (D4767-D2850)
3- American Society for Testing and Materials, Annual Book of Standards (1998, 1999),Vol 4.08 (D3080)
4- American Society for Testing and Materials, Annual Book of Standards (1998, 1999),Vol 4.08 (D2435)
5- Bowles, J. E, (1978) Engineering Properties of Soils and Their Measurement, second Ed., McGraw Hill, New York
6- American Association of State Highways and Transportation Officials, AASHTO (1989), (T208)
7- Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1978) Soil Mechanics, SI Version, John Wiley & Sons, NewYork.
8- Bishop A.W. & Henkel D.J. The Triaxial Test

۹- بهنیا، کامبیز و طباطبایی، امیر محمد، مکانیک خاک – جلد اول

A Guideline for Soil Mechanics Tests

No. 335-A