



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی عمران

دستور کار آزمایش‌های مکانیک خاک

دوره کارشناسی

دکتر محمد مهدی احمدی
مهندس صادق قوامی جمال

تابستان ۱۳۹۳

مقدمه

شناخت و بررسی رفتار خاک موضوع مکانیک خاک است و اولین قدم های آن در سال ۱۷۷۳ به وسیله کولمب با ارائه تحقیقات مربوط به رانش خاک ها برداشته شد. در طی قرن نوزدهم میلادی بررسی ها و مطالعات نظری متعددی از جمله کارهای رانکین و بوسینسک دفتر مکانیک خاک را غنی تر کرد، لیکن جهش اساسی را در سال ۱۹۲۵ کارل ترزاقی به این علم نوپا داد. دید صحیح و مهندسی ترزاقی در مورد پدیده های فیزیکی شاید مهم ترین عامل پیشرفت و نمایاندن راه های پژوهش جدید در مکانیک خاک بوده است.

در طی این سال ها که شاهد پیشرفت های سریع در مکانیک خاک بوده ایم، به دلیل رفتار ناشناخته خاک، تجربه محقق و استفاده مداوم از کارهای آزمایشگاهی بسیار رهگشا بوده است. فعالیت های آزمایشگاهی مستلزم دستیابی به وسایل و روش های استاندارد بوده و تلاش دانشمندان این رشته منجر به ایجاد چندین استاندارد معتبر از جمله 'ASTM'، 'AASHTO' و ... شده است. هر کسی پرشیده نیست که مهندسین عمران چه در مقطع کارشناسی و چه بالاتر، به دلیل شناخت، واقع بینانه تر از خاک می بایست. حداقل با آزمایش های پایه ای آن آشنا شوند.

در این متن پس از توضیح مختصری در مورد کلیات، مربوط به انجام آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی در مکانیک خاک و همچنین روش تهیه گزارش های مربوط، دستور کار آزمایش های اصلی مکانیک خاک که در درس "آزمایشگاه مکانیک خاک" به آن پرداخته خواهد شد توضیح داده می شوند. مرجع اصلی انجام این آزمایش ها چنانچه در منابع کتب و رایج است، استاندارد آزمایش های مصالح آمریکایی (ASTM) می باشد. در بعضی از آزمایش ها در این استاندارد از سیستم آبعاد انگلیسی استفاده شده است، که با توجه به معمول بودن این استاندارد در موارد مشابه، دستور کار حاضر نیز با ذکر معادل های سیستم متریک فرمت استاندارد را حفظ کرده است.

دکتر محمد مهدی احمدی - مهندس صادق قرایی جمال

تابستان ۱۳۹۳

¹ American Standards for Testing Materials

² American Association of State Highway and Transportation Officials

هدف از آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی

یکی از اقداماتی که قبل از احداث بنا یا هرگونه تأسیساتی در هر محل باید انجام شود شناسایی جنس خاک، تعیین ضخامت لایه های مختلف آن و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن است تا طراحی شالوده مناسب که پاسخگوی نیازها و منطبق با شرایط موجود باشد امکان پذیر گردد.

شناسایی خاک را به دو مقوله کلی آزمایش های صحرایی^۳ و آزمون های آزمایشگاهی^۴ تقسیم بندی می کنند. آزمایش های صحرایی مانند آزمایش بارگذاری صفحه ای^۵ یا آزمایش نفوذ استاندارد^۶، در صحرا و در همان محل مورد مطالعه صورت می گیرند ولی برای انجام آزمون های آزمایشگاهی لازم است که تعدادی چاه شناسایی (گمانه) در محل های مورد نظر حفر شده و نمونه هایی که از این گمانه ها تهیه می شوند به آزمایشگاه انتقال یابند.

مجموعه بررسی های صحرایی و آزمایشگاهی موجب می گردد که یک مهندس با درک صحیحی از وضعیت خاک، توان باربری و تراکم پذیری آن در اثر بار و نیز رفتار خاک در کوتاه مدت و دراز مدت، بتواند به طرح بهینه ای در مورد پی دست یابد. پارامترهای خاک که جهت طراحی مورد نیاز هستند مانند چسبندگی c ، زاویه اصطکاک داخلی ϕ ، وزن واحد حجم در حالات مختلف خاک (معمولی، خشک، اشباع...) درصد رطوبت (w)، نفوذپذیری k ، خصوصیات خمیری خاک (PL ، LL ، ...) و سایر ویژگی های خاک همگی مواردی هستند که از طریق آزمایش بر روی نمونه های مختلف خاک تعیین می شوند.

اگرچه عده ای بر این عقیده اند که نتایج آزمایش های صحرایی یا درجا به واقعیت نزدیک ترند زیرا خصوصیات خاک در وضعیت طبیعی آن مورد مطالعه قرار می گیرد، با این حال عدم امکان تعیین برخی از پارامترها در محل و خطاهایی که کار با دستگاه های مختلف در صحرا به دنبال دارد از یک طرف، و پیشرفت روش های نمونه گیری صحیح و ابزار آزمایشگاهی از طرف دیگر موجب شده است که نتایج به دست آمده در آزمایشگاه نیز از دقت لازم برخوردار باشد. لذا شناسایی خاک مستلزم ایجاد مجموعه ای منطقی و همساز از نتایج آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی است.

^۳ field or in situ tests

^۴ experimental tests

^۵ plate loading test

^۶ standard penetration test

رعایت نکات لازم هنگام آزمایش

نمونه گیری از محل، انتقال آن به آزمایشگاه و آماده کردن نمونه^۱ برای آزمایش مورد نظر باید با دقت کافی همراه باشد تا شرایط نمونه تحت آزمایش حتی الامکان با شرایط واقعی آن مطابقت داشته باشد. عدم رعایت این مسئله موجب می گردد که رفتار خاک در عمل با نتایج به دست آمده از آزمایش تفاوت داشته باشد و استفاده از این نتایج در طراحی به اشتباهات فاحشی منجر گردد.

به طور کلی در مطالعات ژئوتکنیک دو نوع نمونه از خاک تهیه می شود که عبارتند از نمونه های دست خورده^۲ و دست نخورده^۳ است. برای تعیین بعضی خصوصیات خاک مانند مقاومت برشی، تحکیم و نفوذپذیری به اخذ نمونه دست نخورده نیاز است. نمونه های دست خورده برای انجام آزمایش های دانه بندی و هیدرومتری، حدود اتربرگ، تراکم، تعیین میزان مواد آلی و چگالی دانه ها به کار می روند.

نمونه گیری از خاک یا به وسیله روش های مکانیکی با جفر گمانه و خارج کردن نمونه خاک از داخل لوله صورت می گیرد و یا چاه دستی حفر شده و در عمق مورد نظر از خاک نمونه برداری می شود. قطر نمونه های به دست آمده از روش های مکانیکی حداکثر حدود ۱۰ سانتی متر می باشند ولی از چاه های دستی می توان نمونه های خیلی بزرگتری (مثل مکعب به ابعاد $50 \times 50 \times 50$ cm) تهیه کرد.

تهیه نمونه دست نخورده از خاک های درشت دانه مشکل است و در اغلب اوقات عملی نیست ولی از خاک های چسبنده می توان نمونه دست نخورده تهیه کرد.

در مواردی که امکان تهیه نمونه دست نخورده نباشد می توان در عمق مورد نظر در داخل چاه، آزمایش دانسیته در محل انجام داده و با اندازه گیری رطوبت نسبی خاک، نمونه مشابه در آزمایشگاه ساخته شود یعنی خاک با درصد رطوبت طبیعی را با انرژی های مختلف (ضربات چکش مختلف) کوبیده تا همان شرایط محلی از نظر دانسیته ایجاد شود. به چنین نمونه ای نمونه بازسازی شده گفته می شود. در استفاده از نتایج آزمایش هایی که بر روی نمونه بازسازی شده انجام می شود باید به این مسئله توجه نمود که چون بافت و ساختار^۴ چنین نمونه ای مطابق با شرایط طبیعی نیست خواص مکانیکی آن با خاک طبیعی یکسان نخواهد بود.

برای تهیه نمونه دست نخورده از خاک چسبنده به روش مکانیکی، از سیستم دورانی^۵، استفاده کرده و نمونه های ۴ به قطر اینچ موسوم به "U4" یا کوچکتر با استفاده از نمونه گیر های جدار نازک Shelby از داخل خاک در عمق مورد نظر استخراج می کنند. این نمونه را پس از خارج کردن از لوله با موم مذاب پوشانده و بدون این که فشاری به آن وارد شود به آزمایشگاه حمل می کنند. در آزمایشگاه اطراف نمونه خاک به آرامی

^۱ sample

^۲ disturbed

^۳ undisturbed

^۴ fabric

^۵ rotary

با اره سیمی یا کاردک تراشیده شده و به وسیله قالب استاندارد آزمایش مورد نظر (سه محوری، برش مستقیم، تحکیم...) نمونه مناسب برای آزمایش تهیه می گردد.

باید توجه داشت که سطح نمونه تهیه شده بایستی به کمک کاردک به آرامی صاف شده و فشار اضافی به هیچ یک از سطوح آن وارد نگردد. قرار دادن نمونه ها در قالب مخصوص هر آزمایش نیز باید با دقت کافی همراه باشد.

نحوه کار در آزمایشگاه

برنامه درسی آزمایشگاه مکانیک خاک برای ۸ جلسه آزمایش، برنامه ریزی شده است. در این ۸ جلسه مجموعاً ۱۲ آزمایش انجام خواهد شد. آزمایش های مورد نظر به صورت زیر دسته بندی می شوند:

۱. دانه بندی و هیدرومتري

۲. حدود آتربرگ

۳. دانسیته در محل و هم ارز ماسه

۴. پروكتور

۵. CBR و تک محوری

۶. چگالی ویژه و تحکیم

۷. برش مستقیم

۸. سه محوری

برای انجام آزمایش ها، گروه هایی متشکل از ۲ یا ۳ نفر تشکیل می شود. هر گروه در هر جلسه یکی از آزمایش های دسته بندی شده را انجام خواهد داد.

برای نتیجه گیری بهتر از کار در آزمایشگاه توجه به به نکات زیر ضروری است:

۱. مطالعه دستور کار آزمایش، آشنایی با هدف آزمایش و روش انجام آن قبل از شروع کار در آزمایشگاه

۲. انجام مراحل آزمایش با دقت کافی و رعایت ترتیب ذکر شده در استاندارد هر آزمایش

۳. دقت در حفظ وسایل آزمایش در حین کار

۴. قرائت صحیح و ثبت دقیق نتایج جهت نتیجه گیری صحیح از آزمایش و تهیه گزارش کار

۵. تمیز کردن وسایل آزمایش پس از انجام کار و قراردادن هر وسیله در جای قبلی خود

۶. حفظ نظم و پاکیزگی آزمایشگاه

نحوه نوشتن گزارش کار

هر یک از دانشجویان پس از انجام آزمایش یک گزارش مستقل تهیه خواهد نمود. در یک گزارش کار کامل باید موارد زیر رعایت شده باشد:

۱. ذکر نام نگارنده و گروه آزمایش کننده
۲. زمان انجام آزمایش (روز و ساعت)
۳. مقدمه و تئوری شامل:
 - ✓ هدف انجام آزمایش
 - ✓ تعریف مفاهیم و پارامترهای بکار برده شده
 - ✓ مختصری از تئوری آزمایش در مکانیک خاک به همراه توضیح محاسبات لازم برای آزمایش
 - ✓ بیان روش هایی غیر از آزمایش مورد نظر برای تعیین پارامتر مورد نیاز
۴. توضیح آزمایش شامل:
 - ✓ وسایل انجام آزمایش و شرایط لازم در آزمایشگاه
 - ✓ نحوه انجام آزمایش (به همان صورتی که در آزمایشگاه انجام داده شده است)
 - ✓ منابع خطای احتمالی و عدم قطعیت ها به دلیل روند آزمایش یا تئوری استفاده شده
- ❖ در برخی از آزمایش ها به علت ساده سازی های انجام شده در شبیه سازی شرایط واقعی خاک، نحوه انجام آزمایش و یا ویژگی های وسایل انجام آزمایش دارای خطاهایی می باشند. در برخی موارد این خطاها قابل کاهش بوده و در برخی موارد امکان کاهش آنها وجود ندارد. در گزارش آزمایش این منابع خطا و نحوه تاثیر آنها بر نتایج آزمایش و همچنین روش های به حداقل رساندن آنها باید بررسی شود.
۵. ارائه آزمایش شامل:
 - ✓ ارائه داده های (اندازه گیری ها) آزمایش همراه با تمام جزئیات و مشخصات مورد نیاز در تحلیل (محاسبات) آزمایش و پارامترهای موثر در آزمایش
 - ✓ ارائه محاسبات به صورت کامل حتی الامکان به صورت جدول همراه با ارائه منحنی های مورد نیاز
 - ✓ نتیجه آزمایش: ارائه پارامتر مورد نظر آزمایش
- ❖ کلیه پارامترهای به دست آمده از آزمایش، نحوه تحلیل و روابط مورد استفاده در تحلیل به همراه محاسبات لازم جهت حصول نتایج باید به صورت سیستماتیک در جداول رسم شده توسط نرم افزارهای صفحه گسترده^۱ مانند EXCEL گزارش شوند. انجام این مراحل باید با ذکر توضیحات کامل انجام شود. به طور مثال هر ستون از جداول محاسباتی در متن گزارش مورد تفسیر قرار گرفته و نحوه تعیین اعداد موجود در آن ها ارائه

^۱ spread sheet

شود. پس از انجام محاسبات باید نمودار های لازم توسط نرم افزار های متداول ترسیم گردند. در این قسمت باید تمامی نمودار ها و نتایج مربوط به هر آزمایش تعیین و ترسیم گردد. برای انجام این کار مراجعه به کتاب های مکانیک خاک توصیه می شود.

۶. تفسیر نتایج شامل:

✓ محدوده پارامتر مورد نظر برای انواع خاک ها و برای خاک آزمایش شده
✓ تفسیر و تعبیر نتایج به دست آمده با استفاده از تئوری آزمایش و مقایسه با محدوده مورد انتظار

✓ استفاده از روابط تجربی و ... برای تخمین پارامتر مورد نظر در صورت امکان
✓ منابع احتمالی خطا و قضاوت نهایی راجع به پارامتر به دست آمده

۷. پاسخ به سؤالات ارائه شده در پایان هر آزمایش

۸. منابع و مراجع

فهرست

۱.....	آزمایش دانه بندی به روش الک و هیدرومتری
۱۳.....	آزمایش تعیین حدود اتربرگ
۳۰.....	آزمایش تعیین وزن مخصوص دانه های خاک
۳۶.....	آزمایش هم ارز ماسه
۴۱.....	آزمایش تعیین وزن واحد حجم خاک در محل به روش مخروط ماسه
۵۱.....	آزمایش تراکم
۶۰.....	آزمایش تعیین عدد CBR
۷۰.....	آزمایش تعیین مقاومت فشاری محدود نشده (تک محوری)
۷۷.....	آزمایش برش مستقیم
۸۷.....	آزمایش تعیین مقاومت تحکیم نیافته زهکشی نشده خاک های چسبنده
۹۵.....	آزمایش تحکیم یک بعدی

آزمایش دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری
ASTM D 422-63(89)

مقدمه

رده‌بندی انواع خاک‌ها و شناسایی خواص خاک‌ها براساس گروه آن‌ها اهمیت زیادی در بیشتر کارهای اجرایی دارد. در رده‌بندی خاک‌ها باید خواص مشخص و مناسبی مبنای رده‌بندی قرار گیرد تا آن رده‌بندی بیانگر تغییر خواص از گروهی به گروهی دیگر باشد و نیز بتواند به صورت استاندارد و یک معیار پذیرفته شده و منطقی قابل ارزیابی برای تمام مهندسين قرار گیرد. خاک‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های متفاوتی رده‌بندی کرد:

۱- تقسیم‌بندی خاک براساس نحوه تشکیل

۱-۱- خاک‌های برجا^۲: خاک‌هایی هستند که از فرسایش درجای سنگ تشکیل شده و بیشتر تیز گوشه و ناهمگن هستند و فرسایش‌پذیری زیادی دارند.

۱-۲- خاک‌های حمل شده^۳: در بسیاری موارد پس از تخریب سنگ، ذرات به وسیله عوامل مختلف از محل خود تغییر مکان می‌یابند مانند خاک‌های آبرفتی^۴، بادرفتی^۵ ...

۲- تقسیم‌بندی خاک براساس عملکرد مهندسی

۱-۲- خاک‌های دانه‌ای^۶: خاک همانند مجموعه‌ای از دانه‌های اجزا در کنار هم قرار گرفته‌اند. رفتار مهندسی این خاک‌ها تابع اندازه و شکل دانه‌ها بوده و نوع کانی در رفتار آن‌ها اهمیت ندارد.

۲-۲- خاک‌های چسبنده^۷: هیچ دانه‌ای به طور اجزا قابل تشخیص نیست در رفتار خاک به صورت یک خمیر چسبنده و به هم پیوسته خواهد بود.

۳- تقسیم‌بندی خاک براساس اندازه دانه‌ها

۱-۳- خاک‌های درشت دانه^۸: طبقه‌بندی این خاک‌ها بر مبنای اندازه و شکل دانه‌هاست و حدفاصل بین انواع خاک‌های درشت دانه اختیاری است و مهندسان چندین سیستم مختلف را به کار می‌برند که در جدول ۱ سیستم ASTM^۹ آمده است.

^۲ residual Soils

^۳ transported soils

^۴ alluvial soils

^۵ aeolian soils

^۶ granular soils

^۷ cohesive soils

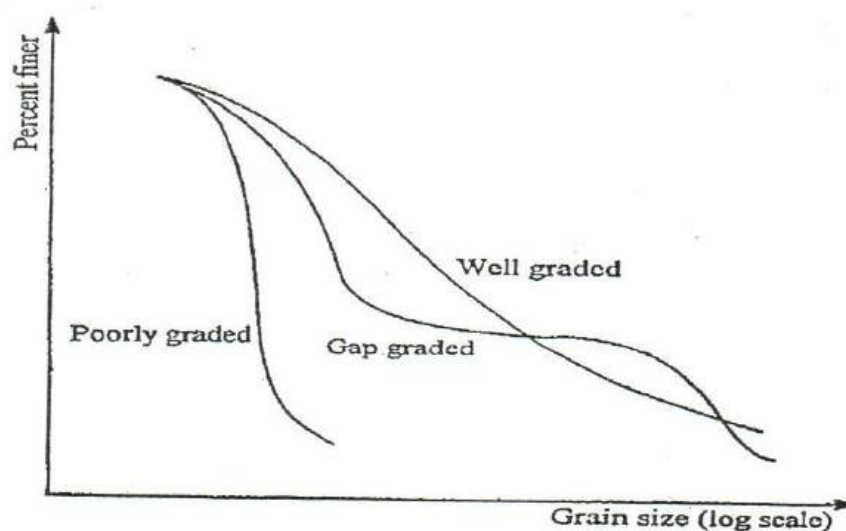
^۸ coarse-grained Soils

^۹ American Society for Testing and Materials (ASTM)

جدول ۱: حدفاصل بین خاک های درشت دانه و ریزدانه

طبقه بندی بر مبنای ASTM	قطر دانه ها (میلی متر)
شن	بزرگ تر از ۴/۷۵
ماسه درشت	۴/۷۵ تا ۲
ماسه متوسط	۲ تا ۰/۴۲۵
ماسه ریز	۰/۴۲۵ تا ۰/۰۷۵
ریزدانه (لای و رس)	زیر ۰/۰۷۵

دانه بندی یک خاک ممکن است به صورت خوب دانه بندی شده^{۱۰} یا بد دانه بندی شده^{۱۱} باشد. خاک خوب دانه بندی شده شامل گستره مناسبی از تمام دانه ها از درشت تا ریز می باشد. خاک بد دانه بندی شده شامل خاک با دانه بندی یکنواخت^{۱۲} و یا دانه بندی منفصل^{۱۳} است. در دانه بندی یکنواخت همه دانه ها دارای اندازه مساوی هستند و خاک های دارای دانه بندی منفصل شامل مخلوط هایی از خاک درشت یکنواخت و خاک ریز یکنواخت با یک شکاف در منحنی دانه بندی بین این دو اندازه می باشند. در شکل ۱ انواع مختلف منحنی های دانه بندی مشاهده می شود.



شکل ۱: انواع مختلف منحنی های دانه بندی

^{۱۰} well graded

^{۱۱} poorly graded

^{۱۲} uniformly graded

^{۱۳} gap graded

۳-۲- خاک‌های ریزدانه^{۱۴}: خاک‌های رس و لای در این گروه قرار می‌گیرند. لای عمدتاً فاقد خمیریت خمیری است یا خاصیت خمیری کمی دارد اما خاک رس به طور کلی یک مجموعه از کانی‌های بلورین پوسته‌ای شکل و با خواص خمیری، چسبندگی و قدرت جذب یون می‌باشد. در تفکیک لای و خاک رس، ابعاد دانه‌ها نقشی ندارد و با خصوصیات خمیری تعیین می‌شوند.

اولین گام در شناخت خواص مهندسی خاک‌ها، آشنایی با اندازه دانه‌ها در توده خاک است. دانه‌بندی خاک، تعیین دامنه اندازه ذرات موجود در خاک و توزیع وزنی آن هاست که برحسب درصدی از وزن کل خشک بیان می‌شود. معمولاً دو روش برای تعیین منحنی دانه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد: ۱- آزمایش الک^{۱۵} برای ذراتی با قطر بزرگ‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر و ۲- آزمایش هیدرومتری^{۱۶} برای ذراتی با قطر کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر.

آزمایش الک به دو صورت قابل انجام است: ۱- روش خشک: در روش خشک مقداری از خاک را گرفته، دانه‌های درشت و کلوخی شکل را خرد می‌کنند و در مجموعه‌ای از الک‌ها قرار می‌دهند. ۲- روش تر: در این روش خاک ریزدانه را روی الک ۲۰۰ ریخته، با فشار آب، الک و خاک را تا جایی که آب خارج شده شفاف و رقیق شود، می‌شویند و بعد آن را خشک می‌کنند. سپس دانه‌های مانده روی آن را برای آزمایش الک به روش خشک و بقیه را برای هیدرومتری به کار می‌برند.

روش هیدرومتری: آزمایش هیدرومتری براساس تفاوت سرعت ته‌نشینی دانه‌های خاک در آب بنا شده است. "قانون استوکس" بیانگر این است که ذرات با قطر و چگالی بزرگ‌تر با سرعت بیش‌تری ته‌نشین می‌شود که به صورت زیر ارائه شده است.

$$V = \frac{\gamma_s \gamma_w}{18\eta} D^2$$

به طوری که: V سرعت سقوط ذرات کروی، γ_s و γ_w به ترتیب وزن مخصوص ذرات خاک و آب، η لزجت مطلق آب و D قطر ذرات خاک می‌باشد.

در آزمایش هیدرومتری، از ابزاری به نام "هیدرومتر" استفاده می‌شود. چگالی هیدرومتر مقدار مشخص و ثابتی است. از آزمایش هیدرومتری نمی‌توان برای ذرات بسیار ریز یا بسیار درشت استفاده کرد زیرا ذرات درشت‌دانه باعث اغتشاش زیاد در پشت آن هنگام سقوط می‌شود که شرایط قانون استوکس برقرار نیست و قانون حرکت «براونی» حاکم است که مانع از سقوط ذرات می‌گردد.

جهت شناسایی رفتار خاک‌ها و ارائه زبانی مشترک در توصیف و شناخت آنها سیستم‌های مختلفی برای طبقه‌بندی و نام‌گذاری خاک‌ها ابداع شده است. این طبقه‌بندی‌ها معمولاً بر پایه دو ویژگی اصلی یعنی «اندازه» و «خصوصیات رفتار خمیری خاک‌ها» بنا شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش طبقه‌بندی متحد^{۱۷} و روش طبقه‌بندی اشتو^{۱۸} اشاره کرد.

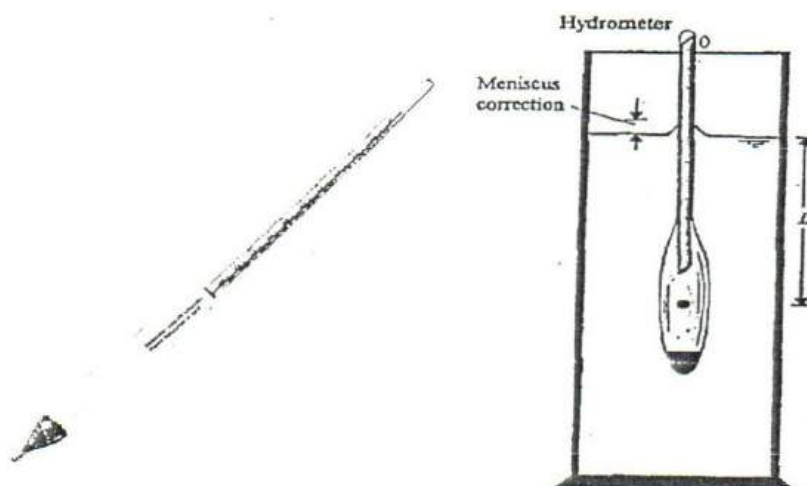
^{۱۴} fine- grained Soils

^{۱۵} sieve analysis

^{۱۶} hydrometer analysis

^{۱۷} Unified Soil Classification System (USCS)

^{۱۸} AASHTO classification system



شکل ۲: هیدرومتر

وسایل مورد نیاز

- ۱- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم برای وزن کردن مصالح عبوری از الک شماره ۱۰ (۲ میلیمتر)
- ۲- ترازو با دقت ۰/۱ گرم برای وزن کردن مصالح روی الک ۱۰
- ۳- مخلوط کن استاندارد^{۱۹}
- ۴- هیدرومتر که در آزمایشگاهها معمولاً از نوع استاندارد 151 H یا 152 H استفاده می شود.
- ۵- استوانه رسوب: استوانه مدرج با قطر ۲/۵ اینچ و ارتفاع ۱۸ اینچ مدرج شده برای حجم ۱۰۰۰ mL
- ۶- دماسنج با دقت ۰/۵ درجه سانتیگراد
- ۷- سری الک های استاندارد

3-in. (75-mm)	No. 10 (2.00-mm)
2-in. (50-mm)	No. 20 (850- μ m)
1 $\frac{1}{2}$ -in. (37.5-mm)	No. 40 (425- μ m)
1-in. (25.0-mm)	No. 60 (250- μ m)
$\frac{3}{4}$ -in. (19.0-mm)	No. 140 (106- μ m)
$\frac{3}{8}$ -in. (9.5-mm)	No. 200 (75- μ m)
No. 4 (4.75-mm)	

در صورتی که از سری الک های زیر استفاده شود منحنی دانه بندی با استفاده از نقاطی با فاصله یکنواخت رسم خواهد شد.

3-in. (75-mm)	No. 16 (1.18-mm)
1 $\frac{1}{2}$ -in. (37.5-mm)	No. 30 (600- μ m)
$\frac{3}{4}$ -in. (19.0-mm)	No. 50 (300- μ m)
$\frac{3}{8}$ -in. (9.5-mm)	No. 100 (150- μ m)
No. 4 (4.75-mm)	No. 200 (75- μ m)
No. 8 (2.36-mm)	

¹⁹ stirring apparatus

۸- حمام آب برای ثابت نگه داشتن دما در آزمایش هیدرومتری

۹- چکش لاستیکی

۱۰- کرنومتر

۱۱- محلول ماده پراکننده: محلول ۴۰ گرم بر لیتر هگزامتافسفات سدیم

۱۲- آب مقطر

آماده کردن نمونه ها

آماده کردن نمونه ها برای انجام آزمایش دانه بندی باید مطابق استاندارد ASTM D421 انجام شود. در این روش نمونه به دو قسمت تقسیم می شود به طوری که یک قسمت فقط شامل دانه های مانده روی الک شماره ۱۰ (۲ میلیمتر) و قسمت دیگر شامل دانه های عبور کرده از الک شماره ۱۰ باشد. وزن خشک نمونه ای که برای آزمایش دانه بندی انتخاب می شود باید به اندازه کافی باشد. مقدار نمونه باید به گونه ای انتخاب شود که بعد از تقسیم بندی آن به دانه های کوچکتر از ۲ میلیمتر و بزرگتر از ۲ میلیمتر، قسمت بزرگتر از ۲ میلیمتر حداقل وزن مشخص شده در جدول ۲ را داشته باشد.

جدول ۲: حداقل وزن قسمت مانده روی الک ۱۰ نمونه های انتخاب شده برای آزمایش دانه بندی

حداقل جرم تقریبی نمونه (گرم)	قطر اسمی بزرگترین دانه (میلی متر)
500	3/8 (9.5)
1000	3/4 (19.0)
2000	1 (25.4)
3000	1 1/2 (38.1)
4000	2 (50.8)
5000	3 (76.2)

وزن قسمت ریزتر از ۲ میلیمتر باید برای خاکهای ماسه ای حدود ۱۱۵ گرم و برای خاکهای رسی یا سیلتی حدود ۶۵ گرم باشد.

دانه بندی قسمت مانده روی الک شماره ۱۰ (۲ میلیمتر) - روش الک کردن

۱- با استفاده از الک های ۳ اینچ، ۲ اینچ، ۱ ۱/۴ اینچ، ۱ اینچ، ۳/۴ اینچ، ۳/۸ اینچ و شماره ۴ و ۱۰ نمونه را الک کنید.

• برای الک کردن، الک ها باید به صورت افقی و یا عمودی به صورت پیوسته حرکت داده شوند. الک کردن باید تا وقتی که مقدار عبور کرده از هر الک بعد از یک دقیقه الک کردن کمتر از یک درصد مقدار باقیمانده روی الک باشد ادامه یابد.

۲- وزن باقیمانده روی هر الک را اندازه گیری کنید. مجموع مقادیر اندازه گیری شده نباید تفاوت قابل ملاحظه ای با وزن اولیه نمونه داشته باشد.

دانه بندی قسمت عبوری از الک شماره ۱۰ (هیدرومتری و الک کردن)

در صورتی که ضریب تصحیح هیدرومتر مورد استفاده مشخص نیست آن را مطابق پیوست بدست آورید.

۱- پراکنده کردن دانه ها

۱-۱- در صورتی که بیشتر دانه های موجود در نمونه مورد نظر سیلتی یا رسی هستند حدود ۵۰ گرم

و در صورتی که بیشتر دانه ها ماسه ای هستند حدود ۱۰۰ گرم از نمونه را انتخاب کنید.

۱-۲- نمونه را با ۱۲۵ میلی لیتر محلول ۴۰ گرم بر لیتر هگزا متافسفات سدیم مخلوط کنید.

۱-۳- اجازه دهید مخلوط برای ۱۶ ساعت باقی بماند تا دانه های به هم چسبیده کاملاً خیس بخورند.

۱-۴- نمونه را به دستگاه مخلوط کن منتقل کرده و آن را مخلوط کنید.

۲- آزمایش هیدرومتری

۲-۱- تمام محتویات ظرف مخلوط کن را به استوانه منتقل کنید و به آن آب مقطر اضافه کنید تا

حجم آن به ۱۰۰۰ میلی لیتر برسد.

۲-۲- با استفاده از درپوش لاستیکی یا کف دست استوانه را واژگون کنید و دوباره به حال اول

برگردانید و این عمل را به مدت یک دقیقه انجام دهید تا اختلاط به طور کامل انجام شود. پس

از پایان یک دقیقه استوانه را در محل مناسبی قرار داده و هیدرومتر را در بازه های زمانی زیر

قرائت کنید: ۲، ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۲۵۰، ۱۴۴۰ (دقیقه)

• هنگامی که می خواهید قرائت هیدرومتر را انجام دهید، ۲۰ تا ۲۵ ثانیه قبل از قرائت، هیدرومتر را درون استوانه

رسوب گذاری قرار دهید و پس از قرائت بلافاصله آن را از مخلوط خارج ساخته و درون استوانه حاوی آب مقطر

قرار دهید. قرائت ها را براساس عدد بالای قوس تشکیل شده در سطح مایع انجام دهید (با توجه به اینکه قرائت

نقطه انتهایی قوس تقریباً امکان پذیر نیست)

۲-۳- پس از هر قرائت دمای مخلوط را با وارد کردن دماسنج در مخلوط اندازه گیری کنید.

۳- آزمایش الک

۳-۱- بعد از اتمام آزمایش هیدرومتری مخلوط را روی یک الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) بریزید و

آن را با آب معمولی شستشو دهید. شستشو را تا وقتی آب خروجی از الک صاف شود ادامه دهید.

۳-۲- دانه های باقیمانده روی الک ۲۰۰ را به ظرف مناسبی منتقل کرده و در گرمخانه با دمای 5 ± 110

درجه سانتیگراد خشک کنید.

۳-۳- توزیع دانه ها را با استفاده از تعداد کافی الک بدست آورید.

محاسبات

۱- آنالیز دانه های روی الک شماره ۱۰.

۱-۱- درصد عبوری از الک شماره ۱۰ را با تقسیم وزن عبوری از الک ۱۰ بر وزن کل نمونه ریخته

شده روی الک ۱۰ و ضرب آن در ۱۰۰ بدست آورید.

۱-۲- برای بدست آوردن درصد عبوری از الک شماره ۴، وزن عبور کرده از الک شماره ۱۰ را با

وزن عبور کرده از الک شماره ۴ و مانده روی الک ۱۰ جمع کرده و بر وزن کل نمونه تقسیم

نمایید. حاصل را در عدد ۱۰۰ ضرب کنید.

۱-۳- برای بدست آوردن درصد عبوری از الکهای ۲ و ۳ اینچ نیز مانند قسمت ۱-۲ عمل کنید.

۲- ضریب تصحیح هیگروسکوپیک

ضریب تصحیح هیگروسکوپیک نسبت بین وزن نمونه وقتی در گرمخانه خشک شود به وزن نمونه وقتی در هوای آزمایشگاه خشک می شود تعریف شده است. این نسبت را با استفاده از اندازه گیری وزن نمونه خشک شده در گرمخانه بدست آورید.

۳- محاسبه درصد ذرات معلق

۱-۳ وزن خشک خاک استفاده شده در آزمایش هیدرومتری را از ضرب وزن خاک خشک شده در هوا در ضریب تصحیح هیگروسکوپیک بدست آورید.

۲-۳ وزن کل نمونه ای را که نمونه هیدرومتری نماینده آن است را به صورت زیر محاسبه کنید.

$$W = \frac{\text{وزن خشک نمونه استفاده شده در آزمایش هیدرومتری}}{\text{درصد عبوری از الک شماره ۱۰}}$$

۳-۳ درصد ذرات معلق در مخلوط در ارتفاع اندازه گیری هیدرومتر به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P = \left[\frac{100000}{W} \frac{G}{G - G_1} \right] (R - G_1) \quad \text{برای هیدرومتر 151 H}$$

$$P = \left[\frac{R\alpha}{W} \right] \times 100 \quad \text{برای هیدرومتر 152 H}$$

α : ضریب تصحیح برای قرائت هیدرومتر 152 H (مقادیر کالیبراسیون برای وزن مخصوص دانه ها برابر

۲/۶۵ محاسبه شده است. ضریب تصحیح در جدول ۳ نشان داده شده است)

P: درصد خاک باقیمانده در مخلوط در ارتفاعی که هیدرومتر دانسیته مخلوط را اندازه می گیرد.

R: قرائت هیدرومتر تصحیح شده

W: وزن خشک شده در گرمخانه کل نمونه انتخاب شده برای آزمایش دانه بندی

G: وزن مخصوص دانه های خاک

G_1 : وزن مخصوص مایعی که ذرات خاک در آن غوطه ور هستند.

جدول ۳: ضریب تصحیح α برای وزن مخصوص دانه های مختلف

Specific Gravity	Correction Factor
2.95	0.94
2.90	0.95
2.85	0.96
2.80	0.97
2.75	0.98
2.70	0.99
2.65	1.00
2.60	1.01
2.55	1.02
2.50	1.03
2.45	1.05

۳-۴- محاسبه قطر دانه های معلق

قطر دانه های معلق در مخلوط در هر اندازه گیری هیدرومتر مطابق قانون استوکس محاسبه می شود. فرض می شود که دانه های با قطر مورد نظر در ابتدای اندازه گیری ها در سطح مخلوط قرار دارند و با گذشت زمان به عمقی که در آن هیدرومتر دانسیته مخلوط را اندازه می گیرد نشست می کنند. مطابق قانون استوکس اندازه قطر ذرات معادل با استفاده از یکی از دو رابطه زیر به دست می آید:

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{980(G - G_1)}} \times \frac{L}{T}$$

$$D = K \sqrt{\frac{L}{T}}$$

D: قطر ذرات (میلی متر)

η : ضریب ویسکوزیته مایعی که دانه ها در آن غوطه ور هستند (ضریب η بستگی به دمای آزمایش دارد).

K: ضریب ثابت که بستگی به دمای مخلوط و وزن مخصوص دانه های خاک دارد. [جدول ۴]

L: عمق موثر (سانتی متر) [جدول ۵]

T: زمان قرائت (دقیقه)

G: وزن مخصوص دانه های خاک

G_1 : وزن مخصوص مایعی که ذرات خاک در آن غوطه ور هستند (معمولاً برابر با ۱)

جدول ۴: مقادیر K برای مقادیر مختلف دما و وزن مخصوص دانه ها

Temperature, °C	G_s							
	2.45	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374
17	0.01511	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191
29	0.01312	0.0129	0.01269	0.01249	0.0123	0.01212	0.01195	0.01178
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01169

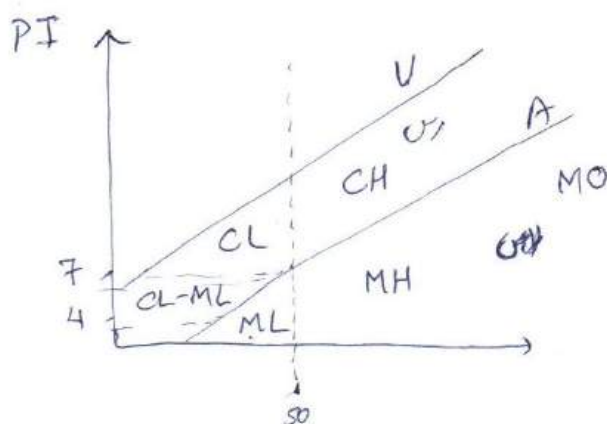
جدول ۵ : مقادیر عمق موثر بر اساس قرائت هیدرومتر

Hydrometer 151 H		Hydrometer 152 H			
قرائت واقعی هیدرومتر	عمق موثر (سانتی متر)	قرائت واقعی هیدرومتر	عمق موثر (سانتی متر)	قرائت واقعی هیدرومتر	عمق موثر (سانتی متر)
1	16.3	0	16.3	31	11.2
1.001	16.0	1	16.1	32	11.1
1.002	15.8	2	16	33	10.9
1.003	15.5	3	15.8	34	10.7
1.004	15.2	4	15.6	35	10.6
1.005	15.0	5	15.5	36	10.4
1.006	14.7	6	15.3	37	10.2
1.007	14.4	7	15.2	38	10.1
1.008	14.2	8	15	39	9.9
1.009	13.9	9	14.8	40	9.7
1.01	13.7	10	14.7	41	9.6
1.011	13.4	11	14.5	42	9.4
1.012	13.1	12	14.3	43	9.2
1.013	12.9	13	14.2	44	9.1
1.014	12.6	14	14	45	8.9
1.015	12.3	15	13.8	46	8.8
1.016	12.1	16	13.7	47	8.6
1.017	11.8	17	13.5	48	8.4
1.018	11.5	18	13.3	49	8.3
1.019	11.3	19	13.2	50	8.1
1.02	11.0	20	13	51	7.9
1.021	10.7	21	12.9	52	7.8
1.022	10.5	22	12.7	53	7.6
1.023	10.2	23	12.5	54	7.4
1.024	10.0	24	12.4	55	7.3
1.025	9.7	25	12.2	56	7.1
1.026	9.4	26	12	57	7
1.027	9.2	27	11.9	58	6.8
1.028	8.9	28	11.7	59	6.6
1.029	8.6	29	11.5	60	6.5
1.03	8.4	30	11.4		
1.031	8.1				
1.032	7.8				
1.033	7.6				
1.034	7.3				
1.035	7.0				
1.036	6.8				
1.037	6.5				
1.038	6.2				

به دست آوردن ضریب تصحیح قرائت هیدرومتر

قرائت انجام شده از هیدرومتر به سه دلیل باید تصحیح شود:

- ۱- در رابطه محاسبه درصد ذرات معلق که با استفاده از قانون استوکس به دست آمده فرض شده است که مایع مورد استفاده آب مقطر می باشد. ولی در این آزمایش ماده پراکننده نیز به همراه آب مقطر استفاده می شود. دانسیته محلول حاصل به میزان قابل توجهی از آب مقطر زیادتر است.
 - ۲- هر دو نوع هیدرومتر، 151 H و 152 H در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد کالیبره شده اند.
 - ۳- قرائت درست هیدرومترها، قرائت از کف قوس تشکیل شده در سطح مخلوط است ولی با توجه به اینکه قرائت دقیق از کف قوس و در آزمایش هیدرومتری ممکن نیست قرائت هیدرومترها از قسمت بالای قوس انجام می شود.
- برای راحتی، یک نمودار یا جدول از ضریب تصحیح قرائت هیدرومتر برای درجه حرارت آزمایش های مختلف در محدوده دمای مورد نظر انجام شده و برای بقیه دماها به صورت خطی درونیابی انجام می شود. برای محاسبه ضریب تصحیح قرائت هیدرومتر به صورت زیر عمل کنید.
- ۱- ۱۰۰۰ میلی لیتر از محلول آب مقطر و ماده پراکننده با غلظتی که در آزمایش ها استفاده می شود تهیه کنید.
 - ۲- محلول را در استوانه رسوبگذاری ریخته و در حمام آب آن را به دمای مورد نظر برسانید.
 - ۳- هیدرومتر را داخل محلول قرار دهید و صبر کنید تا دمای آن با محلول به تعادل برسد. هیدرومتر را از بالای قوس تشکیل شده در سطح محلول قرائت کنید.
 - ۴- ضریب تصحیح برای هیدرومتر 151 H اختلاف مقدار قرائت شده و عدد یک است. برای هیدرومتر 152 H ضریب تصحیح اختلاف قرائت و عدد صفر است.
 - ۵- همین کار را برای انتخابی دیگر نیز انجام داده و نمودار تغییرات ضریب تصحیح قرائت با دما را به صورت خطی رسم کنید.



گزارش

گزارش آزمایش دانه بندی باید شامل موارد زیر باشد:

- ۱- حداکثر اندازه دانه ها در نمونه
- ۲- جدول و نمودار درصد عبوری از هر الک
- ۳- توصیف شکل دانه های شنی و ماسه ای
- ۴- تعیین ضریب یکنواختی^{۲۰} و ضریب دانه بندی^{۲۱} خاک
- ۵- ماده پراکننده استفاده شده

سوالات

۱. چرا از محور لگاریتمی برای رسم منحنی دانه بندی استفاده می شود؟

^{۲۰} uniform coefficient

^{۲۱} coefficient of gradation

۲. چهار روش تشخیص رس و لای را توضیح دهید.
۳. انواع لای را نام ببرید و خصوصیات آن‌ها را مختصراً توضیح دهید.
۴. برای دانه‌بندی خاک‌های چسبنده (مانند ماسه رس‌دار) که در معرض رطوبت زیاد محیط قرار گرفته‌اند و به صورت کلوخ درآمده‌اند چه راهی را پیشنهاد می‌کنید.
۵. دانشجویی برای انجام پروژه تحقیقاتی ژئوتکنیکی از آزمایش دانه‌بندی به روش الک کردن برای طبقه‌بندی خاک پروژه خود استفاده کرده است. نتایج این آزمایش در جدول زیر آمده است. منحنی دانه‌بندی را رسم نموده، اسم خاک و نوع دانه‌بندی را مشخص نمایید و توضیح دهید که آیا نیاز به انجام هیدرومتری هست یا خیر. (وزن خشک نمونه خاک برابر با ۱۰۸۶ گرم می‌باشد)

جدول ۱- نتایج آزمایش دانه‌بندی به روش الک کردن

وزن مانده روی الک (gr)	اندازه سوراخ‌های الک (mm)	شماره الک
3.2	4.75	4
6.9	1.18	16
4.1	0.6	30
39.7	0.42	40
337.2	0.3	50
414.2	0.21	70
91.5	0.18	80
53.5	0.15	100
165.7	0.075	200
3.7	----	pan

۶. روش یا روش‌های تشخیص وجود مواد آلی در خاک چیست؟
۷. وجود مواد آلی در خاک چه تاثیری بر رفتار خاک (مقاومت و قابلیت فشردگی) دارد؟
۸. اگر در آزمایش هیدرومتری از ماده هگزا متا فسفات سدیم استفاده نشود چه مشکلی پیش می‌آید؟
۹. چهار سیستم طبقه‌بندی خاک بر اساس اندازه دانه‌ها را نام ببرید. کدام سیستم مناسب‌تر است؟ چرا؟
۱۰. نمودار شماتیک دانه‌بندی خوب، یکنواخت و منقطع خاک را رسم کنید.
۱۱. به چه دلیل برای درصد ریزدانه کمتر از ۵٪ خاک، نیازی به انجام آزمایش هیدرومتری نیست؟
۱۲. در سیستم طبقه‌بندی متحد، ملاک تشخیص رس و لای از هم چیست؟
۱۳. در سیستم طبقه‌بندی متحد خاک‌ها، برای نام‌گذاری خاک‌های آلی، داشتن چه اطلاعاتی لازم و کافی است؟
۱۴. ضریب یکنواختی خاک در چه محدوده‌ای قرار دارد؟
۱۵. در یک منحنی دانه‌بندی از برابر بودن ضریب انحنا و ضریب یکنواختی با یکدیگر، چه نتیجه‌ای می‌توان گرفت؟
۱۶. اثر هر یک از موارد زیر را بر نتیجه آزمایش هیدرومتری بررسی کنید.
الف) اگر به اشتباه از ماده پراکننده (هگزا متا فسفات سدیم) استفاده نشود.

ب) اگر درجه حرارت آزمایش از مقدار استاندارد بیشتر شود.
 ۱۷. ۱/۲ کیلوگرم از خاکی با رطوبت ۲۰٪ مورد آزمایش دانه بندی قرار می گیرد. اگر نتیجه آزمایش هیدرومتری روی بخش ریزدانه توسط دانشجویان به صورت زیر باشد. اندازه مؤثر دانه ها در این خاک چند میلی متر است؟ (وزن خشک ریزدانه = ۴۸۰ گرم)

D(mm)	۰/۰۷۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲
درصد عبوری	۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵	۱۰

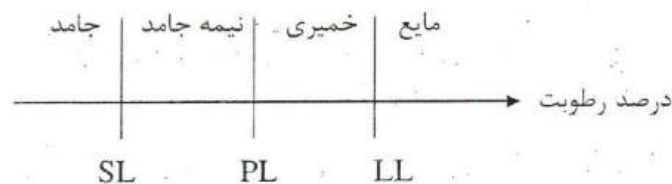
۱۸. درستی یا نادرستی گزاره های زیر را بررسی کنید.
 الف) در آزمایش دانه بندی، مهم شناخت کمیت و کیفیت دانه هاست.
 ب) جهت دانه بندی خاک های سیلتی از آزمایش هیدرومتری استفاده می شود.
 ج) ضریب یکنواختی خاک بر مقاومت و پایداری خاک مؤثر نیست.
 د) با انجام آزمایش الک بر روی نمونه خاکی، درصد عبوری از الک نمرة ۲۰۰، ۳۰ درصد و درصد عبوری از الک نمرة ۴، ۶۰ درصد به دست آمد، بنابراین این خاک می تواند شن لای دار باشد.

آزمایش تعیین حدود اتربرگ

ASTM - D1318

مقدمه

وقتی در خاک‌های ریزدانه، کانی‌های رسی ظاهر شود، با مرطوب کردن، خاک حالت خمیری به خود می‌گیرد. این خاصیت چسبندگی به علت آب جذب شده‌ای است که ذرات رس را احاطه کرده است. برای بررسی خواص خمیری خاک‌های چسبنده، تلاشهای زیادی صورت گرفته و پارامترهای متعددی تعریف شده است. متداول‌ترین پارامترهای ارائه شده "حدود اتربرگ"^{۲۲} است که درصدهای رطوبت قراردادی هستند که جداکننده‌ای حالات خمیری، مایع و جامد در خاک محسوب می‌شوند. آزمایش‌های حدود اتربرگ بر روی بخش عبوری از الک نمرة ۴۰ انجام می‌شوند و آن را می‌توان بر روی نمونه‌های دست خورده نیز انجام داد.



حد مایع^{۲۳} (حد روانی): LL

حد مایع، درصد رطوبتی است که در آن مقاومت برشی خاک به قدری کم است که وقتی در دستگاه استاندارد کاساگرانده^{۲۴} تحت آزمایش قرار می‌گیرد بعد از ۲۵ ضربه شیار ایجاد شده در وسط آن بسته می‌شود. حد روانی جداکننده حالات فیزیکی مایع و خمیری در خاک ریزدانه است و بیشترین درصد رطوبتی است که خاک در آن رطوبت، هنوز حالت خمیری دارد.

بر اساس مشاهدات کاساگرانده هر ضربه در آزمایش جام کاساگرانده متناظر با مقاومت برشی خاک در حدود 0.11 kN/m^2 است. از این رو در حد مایع، نمونه خاک دارای مقاومت برشی تقریباً معادل 2.15 kN/m^2 = 0.11×25 است که مقدار کمی است. بنابراین خاک‌ها در حالت حد مایع، مقاومت برشی یکسان و ناچیزی دارند.

^{۲۲} Atterberg limits

^{۲۳} liquid limit

^{۲۴} Casagrande

از حد مایع، می‌توان در تضمین میزان شاخص فشردگی^{۲۵} (C_c) خاک‌های رسی با استفاده از روابط اسکمپتون^{۲۶} استفاده کرد.

با افزایش درصد رس در خاک، قابلیت جذب آب بیشتر شده و خاک دیرتر به حالت مایع می‌رسد، بنابراین حد مایع خاک افزایش می‌یابد.

حد خمیری^{۲۷}: PL

میزان رطوبتی است که به ازای آن اگر فتيله‌ای از خاک به قطر $3/2$ میلی‌متر با روش غلتاندن ساخته شود، خرد می‌شود. حد خمیری، حداقل درصد رطوبتی است که خاک حالت خمیری دارد و جداکننده حالات فیزیکی خمیری و نیمه جامد در خاک ریزدانه است.

با افزایش درصد رس در خاک قابلیت خمیری شدن در خاک به علت "آب جذب سطحی" بیشتر است، از این رو با رطوبت کمتری به حالت خمیری در می‌آید و حد خمیری آن کاهش می‌یابد.

حد انقباض^{۲۸}: SL

با از دست دادن رطوبت، خاک منقبض می‌شود و با کاهش پیوسته رطوبت، به مرحله ای می‌رسد که از آن به بعد، کاهش رطوبت دیگر سبب کاهش حجم نمی‌شود. میزان رطوبتی که در آن کاهش حجم متوقف می‌شود، حد انقباض نامیده می‌شود. حد انقباض برای ارزیابی پتانسیل تغییر حجم خاک‌ها به کار می‌رود. هرچه حد انقباض خاکی کمتر باشد، پتانسیل تغییر حجم آن بیشتر است چون به آب کمتری برای شروع تغییر حجم نیاز دارد.

نشانه خمیری^{۲۹}: PI

کمیتی مناسب برای ارزیابی میزان خاصیت خمیری خاک‌ها به شمار می‌رود و به صورت $PI = LL - PL$ تعریف می‌شود.

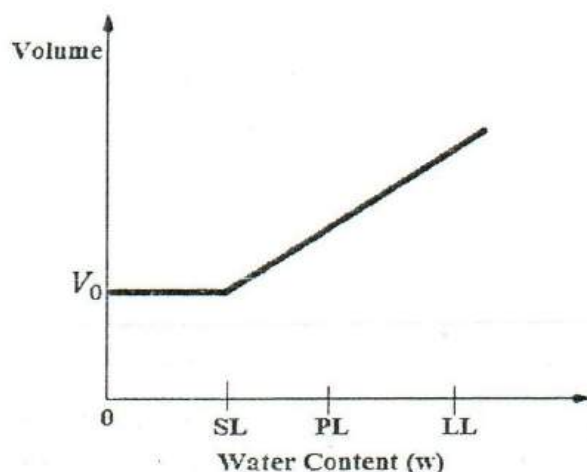
^{۲۵} compression index

^{۲۶} Skempton

^{۲۷} plastic limit

^{۲۸} shrinkage limit

^{۲۹} plasticity index



شکل ۱: تعریف حد انقباض

PI محدوددهی درصد رطوبتی را نشان می‌دهد که خاک حالت خمیری دارد. PI تابع درصد رطوبت محل نیست و تابع مقدار رسی و نوع کانی‌های رسی موجود در خاک است و هر اندازه PI خاک بزرگ‌تر باشد، نشان دهنده‌ی این است که خاک خصوصیات خمیری بیشتری دارد.

نشانه‌ی روانی^{۳۰}: LI

سفتی نسبی یک خاک چسبنده در وضعیت طبیعی را می‌توان به وسیله نسبتی که نشانه‌ی روانی (LI) نامیده می‌شود، بیان نمود:

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$$

که در آن w درصد رطوبت در جای خاک است.

میزان رطوبت در جای یک نهشته‌ی خاکی تحکیم نیافته^{۳۱} می‌تواند بزرگ‌تر از حد مایع باشد یعنی $LI > 1$ در نهشته‌های خاکی پیش تحکیم یافته^{۳۲} میزان رطوبت طبیعی می‌تواند کمتر از حد مایع گردد و نشانه‌ی روانی چنین خاکهایی می‌تواند نزدیک به صفر یا منفی گردد.

³⁰ liquidity index

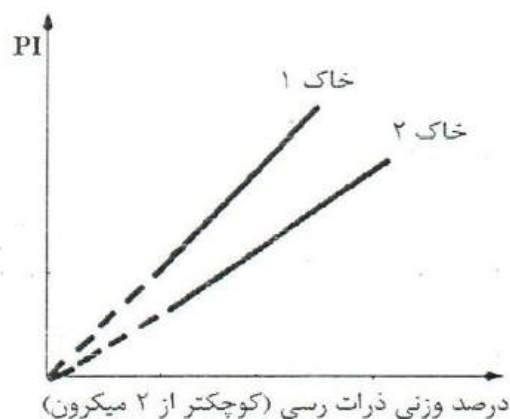
³¹ unconsolidated

³² overconsolidated

در دو حالت خاک غیر خمیری^{۳۳} نامیده می‌شود: ۱- اگر از آزمایش فتيله کردن نتوان درصد رطوبت حالت خمیری خاک را به دست آورد و خاک را فتيله کرد. ۲- اگر پس از آزمایش اتربرگ $PL=LL$ یا $PL>LL$ شود.

فعالیت^{۳۴} رس: A

از آنجا که خواص خمیری خاک به علت آب جذب سطحی است که ذرات رس را احاطه می‌کند می‌توان انتظار داشت که نوع کانی‌های رسی و درصد آن در یک خاک، بر حد مایع و خمیری تأثیر بگذارد. اسکمپتون مشاهده کرد که نشانه‌ی خمیری یک خاک با درصد ذرات رسی^{۳۵} (درصد وزنی ذرات کوچکتر از ۲ میکرون) افزایش پیدا می‌کند که در شکل زیر این رابطه ترسیم شده است.



شکل ۲: رابطه بین نشانه خمیری و درصد وزنی ذرات رسی

رابطه‌ی بین PI و درصد ذرات رس برای هر خاک رسی به دلیل نوع کانی رسی به طور جداگانه رسم شد. بر پایه‌ی این نتایج، اسکمپتون کمیتی به نام "فعالیت" تعریف نمود که شیب خط PI بر درصد وزنی ذرات ریزتر از ۲ میکرون است.

$$A = \frac{PI}{\text{درصد وزنی ذرات رسی ریزتر از 2 میکرون}}$$

فعالیت به عنوان نشانه‌ای برای شناسایی پتانسیل تورم^{۳۶} خاک‌های رسی است.

³³ non plastic

³⁴ activity

³⁵ clay size

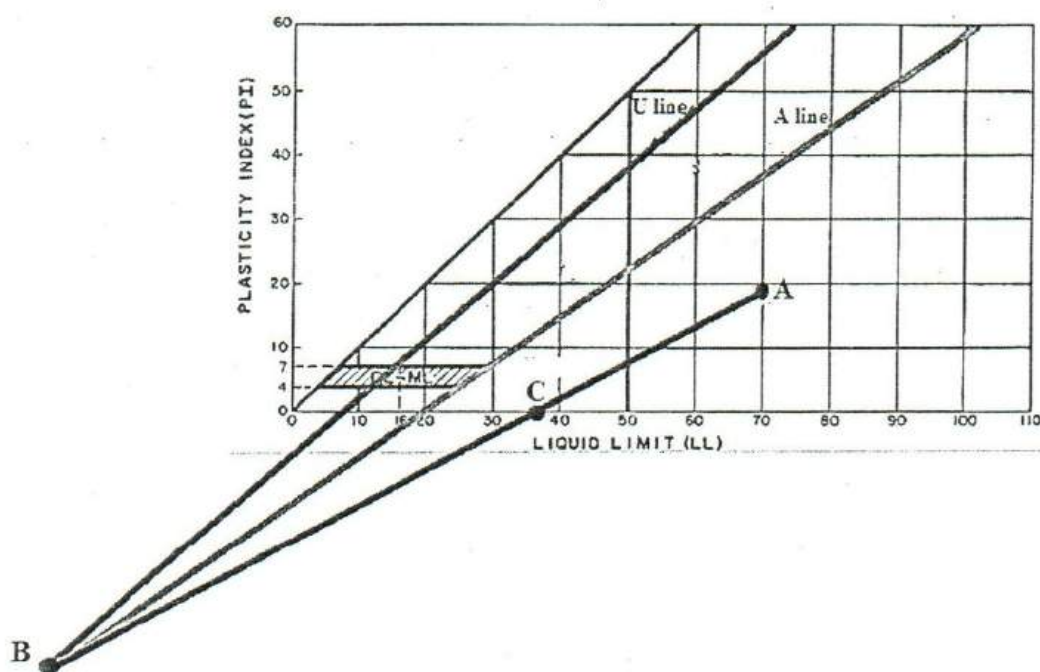
³⁶ swelling

سید، وودوارد و لاندگرن^{۳۷}، بعدها با بررسی خواص خمیری چند مخلوط خاک ماسه‌ای و رسی به این نتیجه رسیدند که اگرچه رابطه‌ی بین PI و درصد وزنی ذرات رس خطی است اما این خط همیشه از مبدأ نمی‌گذرد.

نمودار خمیری^{۳۸}

اولین بار توسط کاساگرانده نمودار خمیری برای ارائه‌ی رابطه‌ی بین PI و حد مایع (LL) ارائه شد. حد انقباض خاک‌های ریزدانه را می‌توان با استفاده از این نمودار به صورت زیر به دست آورد:

- ۱- خط A و u را امتداد داده تا یکدیگر را در یک نقطه‌ی فرضی مانند B قطع کنند.
- ۲- با داشتن LL و PI خاک ریزدانه، مختصات آن را روی نمودار خمیری مشخص می‌کنیم. (نقطه A)
- ۳- نقاط A و B را با خط مستقیم به هم وصل می‌کنیم. این خط محور مربوط به حد مایع را در نقطه C قطع می‌کند. طول نقطه‌ی C، به طور تقریبی حد انقباض خواهد بود.



شکل ۳: تخمین حد انقباض از نمودار خمیری

³⁷ Seed, Woodward & Lundgren

³⁸ plasticity chart

حدود اتربرگ می‌تواند پایه‌ی خوبی برای طبقه‌بندی و نام‌گذاری خاک‌های ریزدانه باشند. همچنین تعیین حدود اتربرگ مصالح خاگری می‌تواند روشی سریع برای کنترل مصالح در عملیات اجرایی باشد.

مقایسه‌ی حد روانی خاک قبل و بعد از خشک کردن در گرمخانه می‌تواند شاخصی برای میزان مواد آلی موجود در خاک باشد.

وسایل مورد نیاز

الف) آزمایش تعیین حد روانی

۱- دستگاه کاساگرانده و شیار کش استاندارد

۲- صفحه شیشه‌ای و کاردکهای مخصوص

۳- هاون و دسته هاون چینی (برای جدا کردن ذرات خاک)

۴- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم

۵- الک شماره ۴۰

ب) آزمایش تعیین حد خمیری

۱- صفحه‌ی شیشه‌ای و کاردکهای مخصوص (برای ورز دادن خاک مرطوب)

۲- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم

۳- گرمخانه با درجه حرارت ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد

ج) آزمایش تعیین حد انقباض

۱- ظرف انقباض

۲- صفحه شیشه‌ای با سه پایه زیر آن

۳- جیوه

۴- دستگاه حجم‌سنج

۵- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم

روش انجام آزمایش

الف- آزمایش تعیین حد روانی

- آماده کردن دستگاه کاساگرانده

دستگاه کاساگرانده، وسیله‌ای مکانیکی است با یک پیاله برنجی به قطر داخلی ۵۴ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر و وزن ۲۰۰ گرم. این پیاله از پشت به وسیله ستجاقی روی دو پایه‌ای که خود بر روی سکویی از جنس پلاستیک سخت قرار دارد لولا می‌شود. به وسیله گرداندن یک دسته پیاله روی لولا چرخیده، بالا رفته

و سپس پایین می افتد و در حقیقت ضربه ای به کف آن زده می شود. ارتفاع سقوط پیاله در حد استاندارد قابل تنظیم است. همراه با این وسیله میله ای نیز برای ایجاد یک شکاف استاندارد در داخل نمونه خاک محتوی پیاله تعبیه شده است.

هنگام تنظیم دستگاه باید توجه داشت که سنجاق اتصال دهنده پیاله به پایه، ساییده نشده باشد تا باعث جابجایی یا حرکت پیاله نشود. همین طور پیچ هایی که کاسه را به دستگیره متصل می کنند باید سفت باشند و کف پیاله نیز نباید در اثر استفاده زیاد گود شده باشد.

میله شیار دهنده می تواند شکافی با مقطع دوزنقه ای که قاعده کوچک آن در پایین به عرض ۲ میلی متر، قاعده بزرگ آن در بالا به عرض ۱۱ میلی متر و ارتفاع آن ۸ میلی متر می باشد ایجاد کند.

انتهای میله شیار دهنده گرد و ضخامت آن ۱۰ میلی متر است که جهت تنظیم ارتفاع سقوط پیاله می باشد. به این ترتیب که قسمت انتهای میله شیار دهنده را زیر پیاله قرار داده با پیچ هایی اتصال پیاله به پایه آن را تنظیم می کنند. در حالی که میله شیار دهنده هنوز در جای خود می باشد با چندین بار چرخاندن سریع، دستگاه بررسی خواهد شد. اگر دستگاه درست تنظیم شده باشد، صدای زنگ ضعیفی شنیده خواهد شد.

نمونه ها

آزمایش حدود آتربرگ بر روی قسمت عبوری از الک $425 \mu m$ (الک شماره ۴۰) انجام می شود. نمونه انتخابی از مصالح مورد نظر باید به اندازه های باشد که قسمت عبوری از الک شماره ۴۰ آن حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم وزن داشته باشد.

انجام آزمایش

۱- وزن ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت را تعیین کنید. (W_1)

۲- نمونه انتخابی از خاکی را که در هوا خشک شده و از الک شماره ۴۰ عبور کرده را در ظرف تبخیر قرار دهید و به آن مقداری آب اضافه کنید. خاک را مخلوط کنید تا به صورت یک خمیر یکنواخت درآید. روی خمیر را با یک پارچه نم دار بپوشانید و به مدت ۱۶ ساعت اجازه دهید تا آب به خوبی جذب خاک شود.

۳- قسمتی از نمونه خاک آماده شده را در پیاله دستگاه کاساگرانده قرار داده و در حالی که پیاله روی پایه ثابت است با استفاده از کاردک سطح خاک داخلی پیاله را صاف کنید به طوری که عمق خاک درگودترین نقطه ۱۰ میلی متر باشد. باید دقت کرد که حباب هوا در خاک وجود نداشته باشد. باقی مانده خاک را در ظرف جداگانه قرار دهید و روی آن را با یک دستمال خیس بپوشانید تا رطوبت آن حفظ شود.

۴- با استفاده از شیار کش روی خاک داخل پیاله شیاری در امتداد محور تقارن پیاله به وجود آورید.

۵- دسته دستگاه را با سرعتی در حدود ۲ ضربه در هر ثانیه بچرخانید. با چرخاندن دسته، پیاله بالا می رود و فرو می افتد و به این ترتیب ضربه ای به ته آن وارد می شود. این کار را تا وقتی شیار در طولی به اندازه ۱۳ میلی متر (۵/۰ اینچ) بسته شود، تکرار کنید. باید دقت کرد روی پایه و پیاله خاکی نجسییده باشد.

۶- بررسی کنید که وجود حباب های هوا باعث بسته شدن زود هنگام شیار نشده باشد. در صورت مشاهده حباب هوا آزمایش را تکرار کنید.

۷- تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار را یادداشت کرده، مقداری از خاک داخل پیاله را که شامل قسمت بسته شده شیار است برای تعیین درصد رطوبت، داخل ظرف مخصوص قرار دهید. وزن ظرف و خاک مرطوب را تعیین کنید. (W_2)

۸- پیاله را خالی کرده و پیاله و شیار کش را تمیز کنید.

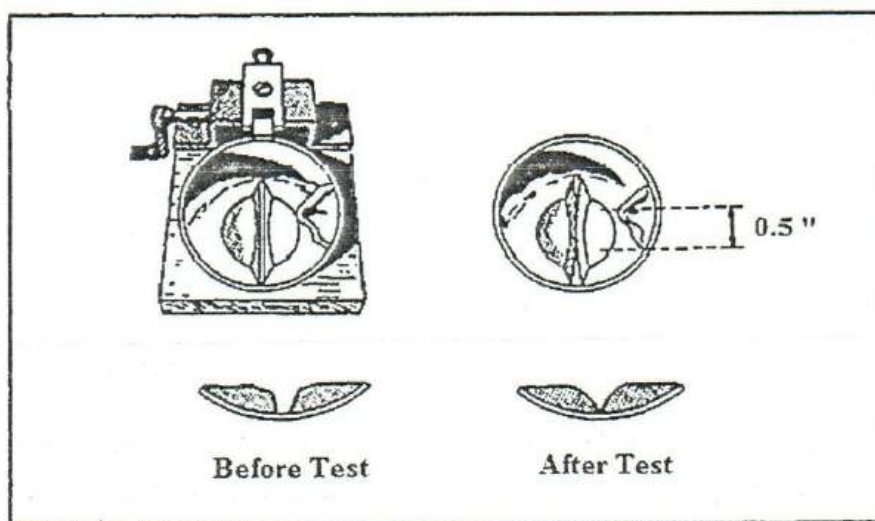
۹- به نمونه خاک مقداری آب اضافه کنید تا درصد رطوبت آن بالا رود و تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار کم شود. مراحل ۳ تا ۸ را دوباره انجام دهید. این عمل باید برای تعداد ضربات بین ۱۵ تا ۲۵ ضربه، ۲۰ تا ۳۰ ضربه و ۲۵ تا ۳۵ ضربه انجام شود.

۱۰- نمونه هایی را که در ظروف تعیین رطوبت قرار داده اید در گرمخانه خشک کرده و وزن آن ها را پس از خشک شدن بدست آورید. (W_3)

توجه

۱- مطابق استاندارد ASTM آزمایش از روش خشک به تر انجام می شود به این ترتیب که از درصد پایین آب شروع کرده و با افزودن آب به نمونه کم کم درصد رطوبت را بالا می بریم تا به حد روانی برسیم.

۲- آزمایش هایی که بیش از ۳۵ ضربه یا کمتر از ۱۵ ضربه داشته باشند یادداشت نخواهند شد. درصد رطوبت در تکرارها باید به گونه ای انتخاب شود که یک آزمایش با ۲۵ تا ۳۵ ضربه، یک آزمایش با ۲۰ تا ۳۰ ضربه و یک آزمایش با ۱۵ تا ۲۵ ضربه داشته باشیم.



شکل ۴: نمایی از آزمایش تعیین حد مایع

۲ محاسبات

درصد رطوبت را برای هر نمونه از رابطه زیر محاسبه کنید:

$$w(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100$$

منحنی درصد رطوبت-لگاریتم تعداد ضربات را رسم کنید. این منحنی تقریباً یک خط مستقیم است و منحنی جریان نامیده می شود. از این خط میزان رطوبت مربوط به ۲۵ ضربه را به دست آورید. این درصد رطوبت حد روانی خاک می باشد.

توضیح

۱- اگر بپذیریم که با دقت قابل قبولی می توان گفت که نمودار درصد رطوبت-لگاریتم تعداد ضربات در آزمایش حد روانی با دستگاه کاساگرانده یک خط با شیب ثابت برای همه خاک ها است آنگاه می توان در صورت مشخص بودن شیب آن خط و با انجام یک آزمایش در دستگاه کاساگرانده حد روانی خاک مورد نظر را بدست آورد. براساس تعداد زیادی آزمایش بر روی خاک های مختلف روابط زیر برای تعیین حد روانی از این روش پیشنهاد شده است.

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

$$LL = k w_N$$

LL: حد روانی خاک

w_N : درصد آب نمونه آزمایش شده

N: تعداد ضربه ای که با آن شیار بسته شده است.

k: ضریبی که در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱: مقادیر k برای محاسبه حد روانی

ضرب حد روانی (k)	تعداد ضربه ها (N)
0.973	20
0.979	21
0.985	22
0.990	23
0.995	24
1.000	25
1.005	26
1.009	27
1.014	28
1.018	29
1.022	30

ب - روش آزمایش تعیین حد خمیری

۱- از ۲۰ گرم خاکی که در آزمایش تعیین حد روانی تهیه شده، ۱/۵ تا ۲ گرم را برداشته با فشردن بین انگشتان به صورت یک توده بیضی شکل در می آوریم. این توده خاکی را بین انگشتان یا کف دست و یک صفحه شیشه ای که بر روی یک سطح صاف و افقی قرار دارد، با فشار کافی بغلتانید تا قطر فتیله ایجاد شده در تمام طول آن ثابت باشد. مقدار فشار اعمال شده با توجه به نوع خاک، کاملاً متفاوت خواهد بود. مثلاً خاک های شکننده با خاصیت خمیری کم بهتر است با سطح خارجی دست یا نوک انگشتان بر روی صفحه غلتانده شوند. وقتی فتیله به قطر ۳/۲ میلی متر رسید آن را به چند قطعه تقسیم کنید. قطعات را با هم بین انگشتان دو دست فشرده، به شکل تود های یکنواخت و بیضی شکل در آورید و دوباره روی سطح شیشه بغلتانید. این

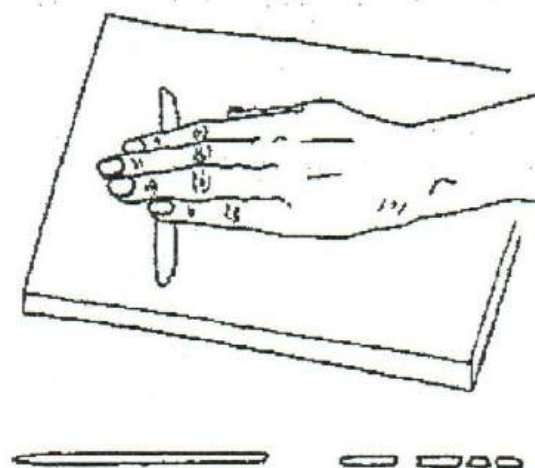
عمل را آنقدر تکرار کنید تا خاک زیر فشار لازم برای غلتاندن آن خرد شود و دیگر نتواند به شکل فتیله درآید. خرد شدن خاک ممکن است زمانی بیش آید که قطر فتیله بیش از $\frac{3}{2}$ میلی متر باشد. در صورتی که خاک قبلاً به صورت فتیله ای به قطر $\frac{3}{2}$ میلی متر درآمده باشد، در این حالت عملیات را متوقف کنید.

۲- تکه های خرد شده نمونه را جمع کرده و در ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت قرار دهید و بلافاصله در قوطی را ببندید.

۳- حدود $\frac{1}{5}$ تا ۲ گرم دیگر از نمونه آماده شده در آزمایش حد روانی را انتخاب کرده و مرحله ۱ را تکرار کنید. تکه های خرد شده نمونه را جمع کرده و در همان ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت قرار دهید و بلافاصله در قوطی را ببندید. این کار را آن قدر تکرار کنید تا وزن نمونه در ظرف تعیین درصد رطوبت حدود ۶ گرم شود.

۴- بند ۱ تا ۳ را تکرار کنید تا در پایان آزمایش دو ظرف تعیین درصد رطوبت حاوی حدود ۶ گرم نمونه داشته باشید.

۵- درصد رطوبت نمونه های دو ظرف را تعیین کنید.



شکل ۵: نمایی از آزمایش تعیین حد خمیری

محاسبات

حد خمیری متوسط درصد رطوبت به دست آمده از نمونه ها می باشد. در صورتی که اختلاف بین دو درصد رطوبت بیشتر از حد مجاز باشد آزمایش باید تکرار شود. در صورتی که آزمایش توسط یک نفر انجام می شود حد مجاز $\frac{1}{4}$ درصد است.

ج - روش انجام آزمایش تعیین حد انقباض

حدود ۳۰ گرم از خاک عبوری از الک شماره ۴۰ برای این آزمایش استفاده می شود.

۱- خاک را در ظرف تبخیر بریزید و با آب مقطر مخلوط کنید. مقدار آب اضافه شده باید به اندازه ای باشد که درصد رطوبت خاک از حد روانی آن بیشتر باشد البته نه آن قدر زیاد که خاک حالت مایع به خود بگیرد. درصد رطوبت باید طوری باشد که اگر خاک را در ظرف به هم بزنیم هیچ حباب هوایی در آن ایجاد نشود. روش مطلوب استفاده از کمترین حجم آب ممکن است. این امر برای خاک هایی که خاصیت خمیری بالایی دارند اهمیت زیادی دارد و مانع ترک خوردن آن ها در حین خشک شدن می شود.

۲- سطح داخلی ظرف انقباض را با یک لایه نازک از گریس یا روغن سیلیکون یا اسپری پودر تفلون چرب کنید. این کار به منظور جلوگیری از چسبیدن خاک به جداره ظرف انجام می شود. پس از روغن کاری وزن ظرف خالی را اندازه گرفته و یادداشت کنید. (M_T)

۳- ظرف انقباض را داخل یک ظرف بزرگتر قرار دهید. ظرف انقباض را از جیوه پر کنید به طوری که لبریز شود. سپس صفحه شیشه ای را با فشار روی ظرف انقباض قرار دهید تا جیوه اضافی خارج شود. مراقب باشید که بین صفحه و سطح جیوه حباب هوای محبوس وجود نداشته باشد. حجم جیوه ای که ظرف انقباض را پر کرده است تعیین کنید. این کار را می توان با استفاده از استوانه مدرج یا اندازه گیری جرم جیوه و تقسیم آن بر جرم حجمی جیوه (13.53 g/cm^3) انجام داد. این حجم را به عنوان حجم ظرف و یا حجم اولیه خاک مرطوب یادداشت کنید. (V_0)

لازم به ذکر است که جیوه ماده خطرناکی است و استنشاق یا تماس آن با پوست خطرناک است.

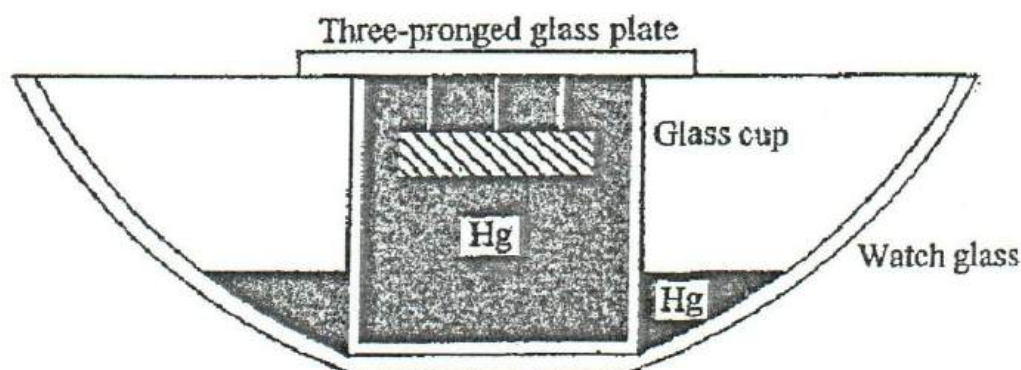
۴- یک سوم از حجم ظرف انقباض را با خاک مرطوب پر کنید. به این ترتیب که خاک را در وسط ظرف قرار داده با ظرف روی یک سطح محکم که بوسیله چند لایه کاغذ خشک کن یا چیزی مشابه پوشیده شده، چندین ضربه بزنید تا خاک داخل ظرف از وسط به کناره ظرف جریان یابد. دوباره به همان اندازه دفعه اول از خاک مرطوب به داخل ظرف اضافه کرده، آهسته آهسته ضربه بزنید تا خاک خوب پهن و متراکم گردد و حباب های هوایی داخل خاک در سطح آن ظاهر شده و از آن خارج شوند. باز هم از نمونه خاک به داخل ظرف بریزید و این عمل را آن قدر ادامه دهید تا ظرف کاملاً پر و لبریز شود. سپس با خط کش لبه تیز، خاک اضافی را بردارید و اگر در اطراف ظرف نیز مقداری خاک چسبیده، کاملاً آن را تمیز کنید. بعد از این مرحله سریعاً ظرف محتوی خاک را وزن کرده جرم ظرف و خاک مرطوب داخل آن را یادداشت کنید. (M_W)

۵- سپس ظرف محتوی نمونه را برای یک روز در فضای آزمایشگاه نگه دارید تا خشک شود. خشک شدن تا زمانی است که رنگ سطح خاک از تیره به روشن تغییر کند. پس از آن ظرف حاوی خاک را در گرمخانه با دمای 5 ± 110 درجه سانتیگراد قرار دهید تا خشک شود. اگر نمونه خاک شما ترک بخورد یا به تکه های کوچک تر تبدیل شود به مرحله اول برگشته، نمونه دیگری با درصد رطوبت کمتر تهیه کنید وزن ظرف و خاک خشک را تعیین کرده یادداشت کنید. (M_D)

۶- حجم نمونه خاک را با بیرون آوردن از ظرف انقباض و غوطه ور کردن آن در ظرف پر از جیوه تعیین کنید. (V)

۶-۱- ظرف پر از جیوه را درون یک ظرف دیگر قرار دهید برای اینکه جیوه سرریز شده داخل آن بریزد. ظرف را از جیوه پر کنید صفحه شیشه ای شاخکدار را با فشار روی سطح جیوه قرار دهید تا جیوه اضافی خارج شود. باید دقت شود که بین صفحه و سطح جیوه حباب هوا وجود نداشته باشد در غیر این صورت باید ظرف را خالی کرده و مجدد این مراحل را تکرار کنید. با دقت جیوه هایی را که به بیرون ظرف چسبیده است پاک کنید.

۶-۲- ظرف تبخیر را در ظرفی قرار دهید که جیوه اضافی داخل آن بریزد. ظرف پر از جیوه را درون ظرف تبخیر قرار دهید و نمونه خاک روی سطح جیوه قرار دهید (نمونه روی سطح جیوه شناور خواهد ماند). با صفحه شیشه ای شاخکدار، روی نمونه فشار دهید تا نمونه در جیوه غوطه ور شود و صفحه را روی لبه ظرف جیوه فشار دهید تا جیوه اضافی بیرون بریزد. باز هم باید دقت شود که هوایی بین صفحه و جیوه باقی نماند حجم جیوه جابجا شده داخل ظرف تبخیر را اندازه بگیرید. این کار را می توانید مستقیماً با اندازه گیری حجم به وسیله استوانه مدرج انجام دهید و یا با اندازه گیری وزن جیوه این حجم را که حجم نمونه خاک پس از خشک شدن است یادداشت کنید. (V)



شکل ۶: نمایی از آزمایش تعیین حد انقباض

محاسبات

۱- جرم اولیه خاک مرطوب را به دست آورید.

$$M = M_w = M_T$$

۲- وزن خشک خاک را به دست آورید.

$$M_0 = M_D - M_T$$

۳- درصد رطوبت اولیه خاک را نسبت به خاک خشک به دست آورید.

$$w(\%) = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100$$

۴- حد انقباض را از رابطه زیر محاسبه کنید.

$$SL = w - \left[\frac{(V - V_0)\rho_w}{M_0} \times 100 \right]$$

ρ_w : جرم حجمی آب که تقریباً برابر با ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب است.

۵- نسبت انقباض را از رابطه زیر محاسبه کنید.

$$R = \frac{M_0}{V_0 \rho_w}$$

مقادیر مورد انتظار

دامنه ی تغییرات حدود آتربریگ از اعداد خیلی بزرگ برای رس های پلاستیک تا اعداد کوچک برای خاک های درشت دانه تر متغیر است. درجدول ۲ حدود آتربریگ چند نوع خاک آورده شده است.

جدول ۲: مقایسه حدود آتربرگ چند نوع خاک

Soil	LL (%)	PI (%)	SL (%)
Mexico City Clay (Volcanic Origin, Composed Mostly of Montmorillonite)	388.0	162.0	43.0
Boston blue clay (Marine deposit of glacial clay composed partially of illite)	41.0	16.0	18.7
Morganza Louisiana clay (fluvial deposit, composed mostly of illite)	104.0	29.0	13.7
Beverly clayey silt (glacial deposit, composed of illite, limonite and quartz)	19.5	3.2	13.3

سؤالات

۱. درصد رطوبت خاکی در محل، برابر با ۱۹/۲٪ می باشد. اگر حد خمیری و نشانه خمیری آن به ترتیب برابر با ۲۲/۸٪ و ۲۶/۹٪ باشد نشانه مایع آن چقدر است؟ حالت تحکیم یافتگی خاک را مشخص کنید.
۲. در آزمایش تعیین حدود آتربرگ برای یک نوع خاک، حد مایع و حد خمیری آن به ترتیب برابر با ۳۳/۵٪ و ۳۵٪ بدست آمد. خاک مورد نظر چه نوع خاکی است؟
۳. پتانسیل تورم یک نمونه از خاک با کاهش حد خمیری آن چه تغییری می کند؟
۴. یک خاک رسی دارای حد مایع W_1 و حد خمیری W_2 می باشد. مقدار مقاومت برشی خاک در رطوبت W_1 بیشتر است یا رطوبت W_2 ؟ مختصراً توضیح دهید.
۵. بر روی یک نمونه خاک آزمایش تعیین حدود آتربرگ انجام شده است که نتایج آن در جدول زیر آمده است. نشانه جریان و نشانه خمیری خاک را تعیین کنید. (حد خمیری خاک برابر با ۲۰/۳٪ است.)

درصد رطوبت (%)	تعداد ضربات
۴۴/۲	۱۶
۳۹/۱	۲۱
۳۷/۵	۳۲

۶. خاک غیر آلی با مشخصات جدول زیر را بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد نام گذاری کنید.

جرم خاک مانده روی الک ۴	۲۵۱/۲ گرم
جرم خاک عبوری از الک ۴	۴۰۸/۶ گرم
جرم خاک عبوری از الک ۲۰۰	۹۴/۴ گرم
حد مایع	٪ ۴۴/۲
حد خمیری	٪ ۲۳/۷

۷. خاک غیر آلی با مشخصات جدول زیر را بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد نام گذاری کنید.

جرم خاک مانده روی الک ۴	۶۰ گرم
جرم خاک عبوری از الک ۴	۳۲۴/۹ گرم
جرم خاک عبوری از الک ۲۰۰	۱۲۱/۵ گرم
حد مایع	٪ ۶۹/۰
حد خمیری	٪ ۳۶/۷

۸. کدام تعریف زیر در مورد حد انقباض صحیح نیست؟

- (۱) حد انقباض، حداقل رطوبتی است که با از دست رفتن بیشتر رطوبت، خاک کاهش حجم نمی دهد.
- (۲) حد انقباض، حداقل رطوبتی است که خاک تحت آن توده ای نیمه جامد است.
- (۳) حد انقباض، رطوبتی است که خاک تحت آن از حالت نیمه جامد به توده ای جامد تبدیل می شود.
۹. داده های زیر نتایج حاصل از آزمایش حدود اتبررگ است.

۱۰.

تعداد ضربات	درصد رطوبت	PL=۱۸/۷
۱۵	۴۲	
۲۰	۴۰/۸	
۲۸	۳۹/۱	

الف) منحنی جریان مربوط به آزمایش حد مایع را رسم نمایید و حد روانی را به دست آورید.

ب) نشانه خمیری خاک چه قدر است؟

ج) اگر درصد رطوبت در محل این خاک ۴۵٪ باشد، کدام یک بازگو کننده شرایط این خاک است؟

بسیار بیش / بیش / عادی / تحکیم یافته / رس حساس / در محدوده خمیری

د) اگر به این خاک مقداری ماسه اضافه کنیم، توضیح دهید حد روانی و دامنه خمیری خاک چگونه تغییر می کند؟

ه) اگر ۵۰ گرم از این خاک با درصد رطوبت ۴۵٪ و G_s برابر با ۲٫۵ موجود باشد و حجم این خاک در رطوبت حد انقباض برابر با ۱۸ سانتی متر مکعب باشد، حد انقباض خاک را بیابید. (چگالی آب ۱ گرم بر سانتی متر مکعب است)

و) با توجه به اطلاعات سوال قبل، حجم خاک موجود چه قدر است؟
ی) اگر بخواهیم از این خاک برای پایداری یک شیروانی اشباع در حالت کوتاه مدت که به مقاومت برشی بیش از ۲٫۵ کیلو پاسکال نیاز است استفاده کنیم. درصد رطوبت خاک باید در چه محدوده ای باشد تا پایداری این شیروانی به خطر نیفتد؟

۱۱. درستی یا نادرستی گزاره های زیر را در رابطه با حد روانی تعیین کنید.
الف) حد روانی حاصل از روش تک نقطه ای با مقدار حاصل از نمودار جریان یکی است.
ب) از حد روانی می توان برای تخمین اولیه مشخصات نشست تحکیمی یک خاک رسی استفاده کرد.
ج) در حد روانی تمام خاک ها مقاومت برشی یکسان با مقدار زیاد دارند.
۱۲. در تعیین حد روانی یک خاک با دستگاه کاساگرانده اگر به دلیل عدم تنظیم دقیق دستگاه، ارتفاع سقوط جام بیشتر از مقدار استاندارد باشد، در این صورت حد روانی چگونه تغییر خواهد کرد؟
۱۳. حد خمیری خاک A بیشتر از حد خمیری خاک B است. کدام خاک درصد رس بیشتری دارد؟
۱۴. حد مایع خاک رسی حدود ۸۶٪ می باشد. این خاک عمدتاً از چه نوع کانی تشکیل شده است؟ (مونت مریلونیت، ایلیت یا کانولینیت)

آزمایش تعیین وزن مخصوص دانه‌های خاک (G_s)

ASTM D854

مقدمه

وزن مخصوص^{۳۹} دانه‌های خاک، نسبت وزن حجم معینی از دانه‌های خاک به وزن همان حجم از آب مقطر در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد است. وزن مخصوص خاک اغلب برای ارتباط وزن به حجم خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و یکی از کمیت‌های اصلی روابط وزنی - حجمی خاک است. با دانستن نسبت تخلخل^{۴۰} (e)، درجه اشباع^{۴۱} (S_r) و وزن مخصوص (G_s) می‌توانیم وزن واحد حجم خاک مرطوب یا خشک را محاسبه کنیم. وزن مخصوص خاک کمیتی است که تقریباً در تمامی محاسبات مربوط به توزیع تنش، نشست و پایداری سازه‌های خاکی مورد نیاز است. وزن مخصوص دانه‌های خاک بستگی به کانی‌های تشکیل دهنده ذرات آن دارد و از این رو بازه‌ی تغییرات آن محدود است. دامنه‌ی وزن مخصوص دانه‌ها در خاک‌ها به طور متعارف بین ۲/۴ تا ۲/۹ تغییر می‌کند. وزن مخصوص قسمت جامد ماسه‌های کوارتزی در حدود ۲/۶۵ و خاک‌های ریزدانه لای‌دار و رس‌دار در حدود ۲/۴ تا ۲/۹ است. در ضمن G_s خاک‌هایی که شامل مواد آلی هستند یا از دانه‌های متخلخل تشکیل شده‌اند ممکن است کمتر از ۲ باشد. از طرف دیگر خاک‌هایی که شامل ترکیبات فلزات سنگین مانند آهن باشند وزن مخصوص دانه‌ها ممکن است بیشتر از ۳ نیز به دست آید.

$$G_s = \frac{\text{چگالی مواد جامد در خاک}}{\text{چگالی آب مقطر در دمای } 4^{\circ}\text{C}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

در جدول ۱ مقادیر G_s برای کانی‌های مختلف نشان داده شده است.

این آزمایش برای محاسبه وزن مخصوص خاک‌هایی که از الک ۴/۷۵ میلی‌متر (الک شماره ۴) عبور می‌کند مناسب است. برای آن قسمت از خاک که روی الک شماره ۴ قرار می‌گیرد از آزمایش C127 استفاده می‌شود.

از دو روش می‌توان وزن مخصوص دانه‌های خاک را تعیین کرد:

روش الف: برای نمونه‌هایی که در گرمخانه خشک شده‌اند.

^{۳۹} specific gravity

^{۴۰} void ratio

^{۴۱} degree of saturation

روش ب: برای نمونه‌های مرطوب

برای خاکهای آلی و خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته بالا روش ب مناسب‌تر است. در صورتی که وزن مخصوصی که از این آزمایش به دست می‌آید برای آزمایش هیدرومتری استفاده می‌شود این آزمایش باید بر روی خاک عبوری از الک ۲ میلی‌متر (شماره ۱۰) انجام شود. نمونه‌ای که برای این آزمایش استفاده می‌شود اعم از خشک شده در گرمخانه یا مرطوب باید به اندازه‌ی کافی باشد به طوری که وزن خشک آن حداقل مقدار تعیین شده در جدول زیر را داشته باشد.

جدول ۱: مقادیر G_s برای کانی‌های مختلف

کانی	چگالی (G_r)
کوارتز	۲/۶۵
کانولینیت	۲/۶
ایلیت	۲/۸
مرنت مموریلونیت	۲/۶۵-۲/۸
هالوزیت	۲-۲/۵۵
فلدسپات پتاسیم	۲/۵۷
کلریت	۲/۶-۲/۹
بیوتیت	۲/۸-۳/۲
هورن بلاند	۳-۳/۴۷
لیمونیت	۳/۶-۴
الوین	۳/۲۷-۳/۷

جدول ۲: حداقل وزن خشک نمونه مورد استفاده در آزمایش تعیین وزن مخصوص دانه‌ها

کمیت وزن نمونه (گرم)	شماره الک	حداکثر اندازه دانه‌ها (میلی‌متر)
۲۰	۱۰	۲
۱۰۰	۴	۴/۷۵

وسایل مورد نیاز

۱. پیکنومتر^{۴۲}: پیکنومتر باید قبلاً کالیبره شده باشد یا قبل از انجام آزمایش کالیبره شود.
۲. آب مقطر
۳. ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم
۴. گرمخانه برای ایجاد حرارت یکنواخت 110 ± 5 درجه سانتیگراد
۵. دماسنج با دقت ۰/۵ درجه سانتی گراد
۶. خشک کن
۷. پمپ خلا

روش کالیبره کردن پیکنومتر

۱. وزن پیکنومتر را بعد از تمیز کردن و خشک کرد، اندازه گیری کنید. (M_f)
۲. پیکنومتر را تا خط نشانه با آب مقطر پر کنید. دقت کنید که حباب هوای قابل مشاهده در آب نباشد. وزن پیکنومتر را در این حالت اندازه گیری کنید. (M_a)
۳. با استفاده از دماسنج، دمای آب داخل پیکنومتر را با دقت ۰/۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری کنید. (T_a)
۴. وزن پیکنومتر و آب در هر دمای دیگری که آزمایش وزن مخصوص در آن انجام می شود با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$M_a(at T_x) = \frac{\text{density of Water at } T_x}{\text{density of Water at } T_a} [M_a(at T_a) - M_f] + M_f$$

M_a : وزن آب و پیکنومتر

M_f : وزن پیکنومتر خالی

T_a : دمای آب اندازه گیری شده هنگام کالیبراسیون

T_x : دمایی که آزمایش تعیین وزن مخصوص در آن انجام می شود.

جدولی تهیه کنید و برای دماهای مختلف که ممکن است آزمایش تعیین وزن مخصوص در آن انجام شود مقادیر M_a را محاسبه نمایید.

روش انجام آزمایش

روش الف برای نمونه های خشک شده در گرمخانه

۱. نمونه را در گرمخانه با دمای 110 ± 5 درجه سانتیگراد خشک کرده و در محفظه خشک کن سرد کنید.

⁴² pycnometer

۲. وزن یک پیکنومتر تمیز و خشک را اندازه گیری کنید (M_f). حجم پیکنومتر باید حداقل ۱/۵ برابر نمونه مورد استفاده برای آزمایش باشد. نمونه را در پیکنومتر ریخته و وزن نمونه و پیکنومتر را اندازه گیری کنید. وزن نمونه را از تفاضل این مقدار و وزن پیکنومتر محاسبه کرده و یادداشت کنید. (M_0)

۳. مقداری آب مقطر کمی بالاتر از سطح نمونه در پیکنومتر ریخته و به مدت ۱۲ ساعت نمونه را رها کنید تا آب جذب خاک شود.

۴. با استفاده از روش جوشاندن یا پمپ خلا هوای محبوس داخل نمونه و آب را خارج کنید. در روش جوشاندن نمونه در حالی که به آرامی تکان داده می شود به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده می شود تا حباب های هوا خارج شود. در روش پمپ خلا فشار منفی حداکثر ۱۰۰ میلی متر جیوه و حداقل به مدت ۳۰ دقیقه به نمونه اعمال می شود.

۵. پیکنومتر را تا زیر خط نشانه از آب مقطر پر کنید. این کار باید به آرامی و دقت انجام شود تا از ایجاد هوای محبوس جلوگیری شود. به مدت زمان کافی نمونه را رها کنید تا به تعادل دمایی برسد.

۶. پیکنومتر را تا خط نشانه پر کنید. آن را کاملاً تمیز و خشک کرده و وزن آن را یادداشت کنید. (M_b)

۷. دمای آب داخل پیکنومتر را اندازه گیری کنید. (T_b)

روش ب برای نمونه های مرطوب

۱. نمونه را داخل یک پیکنومتر کالیبره شده بریزید.

۲. گامهای ۴ تا ۷ در روش الف را تکرار کنید.

۳. نمونه را از پیکنومتر خارج کرده و آن را در گرمخانه با دمای 5 ± 110 درجه سانتیگراد خشک کنید. نمونه را در خشک کن سرد کنید.

۴. وزن نمونه خشک شده را اندازه گیری کنید. (M_0)

محاسبات

وزن مخصوص خاک را با دقت ۲ رقم اعشار با استفاده از رابطه زیر محاسبه کنید.

$$G_{Tb} = \frac{M_0}{M_0 + (M_a - M_b)}$$

M_a : وزن پیکنومتر پر از آب در دمای T_b . این مقدار با استفاده از جدول کالیبراسیون تهیه شده به دست می آید.

G_{T_b} : وزن مخصوص خاک در دمای T_b

عددی که به عنوان وزن مخصوص خاک گزارش می شود، وزن مخصوص خاک در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد می باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$G = K \times G_{T_b}$$

ضریب K در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: دانسیته آب و ضریب K در دماهای مختلف

Temperature (°C)	Density (g/mL) ^a	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^a	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^a	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^a	Temperature Coefficient (K)
15.0	0.99910	1.00090	16.0	0.99895	1.00074	17.0	0.99878	1.00057	18.0	0.99860	1.00039
1	0.99909	1.00089	1	0.99893	1.00072	1	0.99876	1.00055	1	0.99858	1.00037
2	0.99907	1.00087	2	0.99891	1.00071	2	0.99874	1.00054	2	0.99856	1.00035
3	0.99906	1.00085	3	0.99890	1.00069	3	0.99872	1.00052	3	0.99854	1.00034
4	0.99904	1.00084	4	0.99888	1.00067	4	0.99871	1.00050	4	0.99852	1.00032
5	0.99902	1.00082	5	0.99886	1.00065	5	0.99869	1.00048	5	0.99850	1.00030
6	0.99901	1.00080	6	0.99885	1.00064	6	0.99867	1.00047	6	0.99848	1.00028
7	0.99899	1.00079	7	0.99883	1.00062	7	0.99865	1.00045	7	0.99847	1.00026
8	0.99898	1.00077	8	0.99881	1.00061	8	0.99863	1.00043	8	0.99845	1.00024
9	0.99896	1.00075	9	0.99879	1.00059	9	0.99862	1.00041	9	0.99843	1.00022
19.0	0.99841	1.00020	20.0	0.99821	1.00000	21.0	0.99799	0.99979	22.0	0.99777	0.99957
1	0.99839	1.00015	1	0.99819	0.99956	1	0.99797	0.99937	1	0.99775	0.99915
2	0.99837	1.00016	2	0.99816	0.99956	2	0.99795	0.99937	2	0.99773	0.99912
3	0.99835	1.00014	3	0.99814	0.99954	3	0.99793	0.99937	3	0.99770	0.99909
4	0.99833	1.00012	4	0.99812	0.99952	4	0.99791	0.99937	4	0.99768	0.99907
5	0.99831	1.00010	5	0.99810	0.99950	5	0.99789	0.99935	5	0.99766	0.99905
6	0.99829	1.00008	6	0.99808	0.99947	6	0.99786	0.99935	6	0.99764	0.99903
7	0.99827	1.00006	7	0.99806	0.99945	7	0.99784	0.99933	7	0.99761	0.99901
8	0.99825	1.00004	8	0.99804	0.99943	8	0.99782	0.99931	8	0.99759	0.99899
9	0.99823	1.00002	9	0.99802	0.99941	9	0.99780	0.99929	9	0.99756	0.99896
23.0	0.99754	0.99973	24.0	0.99730	0.99909	25.0	0.99705	0.99884	26.0	0.99679	0.99859
1	0.99752	0.99971	1	0.99727	0.99907	1	0.99702	0.99881	1	0.99676	0.99855
2	0.99749	0.99969	2	0.99725	0.99904	2	0.99700	0.99879	2	0.99673	0.99853
3	0.99747	0.99967	3	0.99723	0.99902	3	0.99697	0.99876	3	0.99671	0.99850
4	0.99745	0.99965	4	0.99720	0.99900	4	0.99694	0.99874	4	0.99668	0.99847
5	0.99742	0.99963	5	0.99717	0.99897	5	0.99692	0.99871	5	0.99665	0.99844
6	0.99740	0.99961	6	0.99715	0.99894	6	0.99689	0.99869	6	0.99663	0.99842
7	0.99737	0.99959	7	0.99712	0.99892	7	0.99687	0.99866	7	0.99660	0.99839
8	0.99735	0.99957	8	0.99710	0.99890	8	0.99684	0.99863	8	0.99657	0.99836
9	0.99732	0.99955	9	0.99707	0.99887	9	0.99681	0.99860	9	0.99654	0.99833
27.0	0.99652	0.99831	28.0	0.99624	0.99803	29.0	0.99595	0.99774	30.0	0.99565	0.99744
1	0.99649	0.99829	1	0.99621	0.99800	1	0.99592	0.99771	1	0.99562	0.99741
2	0.99646	0.99825	2	0.99618	0.99797	2	0.99589	0.99768	2	0.99559	0.99738
3	0.99643	0.99822	3	0.99615	0.99794	3	0.99586	0.99765	3	0.99556	0.99735
4	0.99641	0.99820	4	0.99612	0.99791	4	0.99583	0.99762	4	0.99553	0.99732
5	0.99638	0.99817	5	0.99609	0.99788	5	0.99580	0.99759	5	0.99550	0.99729
6	0.99635	0.99815	6	0.99607	0.99785	6	0.99577	0.99756	6	0.99547	0.99726
7	0.99632	0.99811	7	0.99604	0.99783	7	0.99574	0.99753	7	0.99544	0.99723
8	0.99629	0.99808	8	0.99601	0.99780	8	0.99571	0.99750	8	0.99541	0.99720
9	0.99627	0.99806	9	0.99598	0.99777	9	0.99568	0.99747	9	0.99538	0.99716

بررسی روند آزمایش

۱. با اینکه روند این آزمایش بسیار ساده است اما برای به دست آوردن نتیجه ای با دقت قابل قبول لازم است اندازه گیری دما و وزن های مورد نیاز با حداکثر دقت ممکن انجام شود. به این دلیل که در رابطه محاسبه وزن مخصوص دانه ها از اندازه گیری های انجام شده، اختلاف این کمیت ها است که وارد می شود که مقدار آن به نسبت مقدار وزن های اندازه گیری شده کوچک است به همین دلیل خطایی کوچک در هر کدام از

اندازه گیری ها، خطای بزرگی را در نتیجه محاسبات ایجاد خواهد کرد. قسمتی از خطای اندازه گیری ها که مربوط به خطای دستگاهی است را می توان با استفاده از یک ترازو برای همه اندازه گیری ها حذف کرد.

۲. با توجه به اینکه ذرات رسی شامل لایه آب جذبی می باشند، وزن مخصوص به دست آمده در آزمایش بستگی به روش خشک کردن نمونه خاک دارد. برای مثال و به عنوان شاخصی برای میزان تغییرات در نتایج، وزن مخصوص دانه های ۵ نمونه که در دماهای مختلف خشک شده اند در جدول زیر ارائه شده اند.

جدول ۴: وزن مخصوص دانه های ۵ نوع خاک که در دماهای مختلف خشک شده اند

Soil / Drying method	Discator	90°C	105°C	140°C	190°C
Ottawa sand	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67
Piatomaceons earth	1.91	1.99	2.00	2.08	2.50
Boston Blue clay	2.76	2.78	2.78	2.78	2.79
Mexico city clay	2.22	2.33	2.35	2.37	2.62
Leda clay	2.74	2.75	2.77	2.8	2.82

سؤالات

۱. کدام یک از موارد زیر بعدتوده ویژه خاک (G_s) را نشان می دهد؟
الف (ML^{-1} ب) (ML^{-2} ج) (ML^{-3} د) بدون بعد
۲. مقداری خاک خشک به وزن ۴۰۰ گرم درون پیکنومتر به وزن ۴۵۰ گرم قرار می گیرد و پس از پر شدن پیکنومتر به وسیله آب و وزن مجموعه به ۱۰۲۰ گرم می رسد. حال اگر پیکنومتر را خالی کرده و بار دیگر فقط با آب پر کنیم، وزن پیکنومتر و آب برابر ۷۸۰ گرم می شود. چگالی دانه های جامد خاک چه قدر است؟
۳. در به دست آوردن G_s مواد آلی، رعایت چه نکاتی ضروری است؟
۴. چرا در آزمایش تعیین چگالی ویژه به بالون حرارت می دهیم؟
۵. چگالی ویژه چیست؟
۶. با افزایش دمای محیط آزمایشگاه، مقدار چگالی ویژه چه تغییری می کند؟

آزمایش هم ارز ماسه

ASTM D2419-95

مقدمه

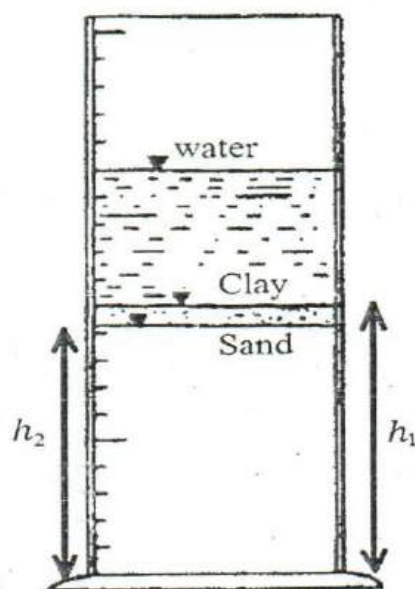
نسبت ماسه به ریزدانه‌ها (رس و سیلت) در خاک یک عامل مهم در عملیات خاکی و ساختمانی محسوب می‌شود؛ زیرا وجود ماسه‌ی زیاد در مقایسه با ریزدانه‌ها در خاک، در زیرسازی راه‌ها و نیز در احداث سدهای خاکی، باعث پایین آمدن درصد آب بهینه و رسیدن سریع‌تر خاک به حداکثر تراکم خود می‌شود. در آسفالت نیز درصد نیز درصد بالای ریزدانه موجب مصرف زیادتر نیرو و در نتیجه باعث سست شدن و وارفتن آسفالت زیر بارهای وارده می‌شود. همچنین نسبت ماسه به ریزدانه‌ها در ساخت بتن نیز بر مصرف آب، تراکم بتن و نفوذپذیری و مقاومت در برابر هوازدگی اثر دارد.

آزمایش هم ارز ماسه^{۴۳} (SE) برای مشخص کردن رفتار ریزدانه (چسبنده یا غیر چسبنده) نسبی موجود در خاک‌های ماسه‌ای (ریزتر از الک شماره‌ی ۴) استفاده می‌شود. اصول این آزمایش به این ترتیب است که مقداری از نمونه مورد نظر را در استوانه مدرجی ریخته و به آن آب و مقداری کمی مواد منعقد کننده^{۴۴} اضافه می‌شود. پس از مدت معینی ارتفاع درشت دانه‌ها که ته‌نشین شده‌اند و ارتفاع تمام خاک در استوانه درج اندازه‌گیری می‌شود. نسبت این دو ارتفاع هم ارز ماسه خواهد بود. ماده منعقد کننده باعث می‌شود که ذرات در اندازه‌ی رس در محلول، منعقد شده و معلق بمانند.

با توجه به این که در راهسازی نوع دانه‌بندی، نفوذپذیری، جذب آب، تورم و نشست مسائلی است که باید مورد بررسی قرار گیرد، لذا این آزمایش در راهسازی کاربرد فراوان دارد. با توجه به سرعت بالای انجام این آزمایش، تعیین هم ارز ماسه مصالح مصرفی در کارگاه، می‌تواند به عنوان معیاری برای کنترل مصالح در حین اجرا استفاده شود. حدود قابل قبول SE به دست آمده برای استفاده‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

^{۴۳} sand equivalent

^{۴۴} coagulant



شکل ۱: شکل شماتیک آزمایش هم ارز ماسه

جدول ۱: حدود قابل قبول SE

کاربرد	مصالح بتن	مصالح بتن آسفالتی	لایه اساس	لایه زیراساس	قشر زهکشی
درصد SE	$70 <$	$50 <$	$30 <$	$25 <$	$40 <$

وسایل مورد نیاز

۱. لوله استوانه ای مدرج استاندارد
 ۲. سنبه فولادی استاندارد به وزن ۱ کیلوگرم
 ۳. لوله شستشوی برنجی یا مسی
 ۴. منبع مخصوص محلول شوینده
 ۵. ترازو با دقت ۱ گرم
 ۶. الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی متر)
 ۷. محلول شوینده با نسبت اختلاط زیر:
- کلرور کلسیم (۴۷۵ گرم)، گلیسرین (۲۰۵۰ گرم یا ۱۶۴۰ سانتیمتر مکعب)، فرمالدئید (۴۷ گرم یا ۴۵ سانتی متر مکعب محلول ۴۰ درصد) و آب مقطر به اندازه کافی برای رساندن حجم مخلوط به معادل یک گالن (۳/۷۸۵ لیتر)

روش آزمایش

۱. کلرور کلسیم را در ۲ لیتر آب مقطر حل کنید. محلول را با کاغذ صافی، صاف کرده فرمالین و گلیسرین را به آن اضافه کنید. به محلول حاصل آب مقطر اضافه کنید تا حجم آن به یک گالن (۳/۷۸۵ لیتر) برسد. محلول را در شیشه در بسته نگهداری کنید.
 ۲. مقدار ۴۶ سانتیمتر مکعب از محلول تهیه شده در مرحله ۱ را در ۲ لیتر آب مقطر ریخته و خوب مخلوط کنید. محلول حاصل را در شیشه در بسته جداگانه نگهداری کنید.
 ۳. برحسب قطر درشت ترین دانه خاک که در جدول ۲ داده شده است مقدار حداقل نمونه را انتخاب کرده و از الک شماره ۴ رد کنید. مقدار ۱۱۰ گرم از خاک رد شده از الک شماره ۴ برای آزمایش هم ارز ماسه مورد نیاز است.
 ۴. در استوانه آزمایش تا ارتفاع ۱۰ سانتی متر (۴ اینچ) محلول شستشو ریخته و نمونه خاک تهیه شده را با قیف در داخل استوانه بریزید.
 ۵. استوانه را بمدت ۱۰ دقیقه به حال خود به صورت ایستاده قرار دهید و سپس درپوش آن را در جای خود قرار داده و آن را به حالت افقی بگیرید و به چپ و راست حرکت دهید بطوری که جابجایی استوانه تقریباً ۲۰ سانتی متر باشد. در مدت ۲۰ ثانیه نود بار استوانه را به چپ و راست حرکت دهید.
- جدول ۲: حداقل نمونه برای عبور از الک ۴

شماره الک	میلی متر	مقدار نمونه (گرم)
# 4	4.75	250
$\frac{5}{16}$ "	3.97	500
$\frac{1}{2}$ "	2.5	1000
$\frac{3}{4}$ "	19.1	2000
1"	25.4	3000
$1\frac{1}{2}$ "	38.1	5000
$1\frac{3}{4}$ "	44.4	10000
$2\frac{1}{2}$ "	63.5	20000

۶. استوانه را به صورت ایستاده قرار دهید و با لوله شستشو که به مخزن محتوی محلول شستشو وصل شده جدار استوانه را بشوید و آنقدر محلول شستشو به استوانه بریزید تا سطح محلول در داخل استوانه به ارتفاع ۳۸ سانتی متر برسد.
۷. درجه حرارت محلول داخل استوانه را اندازه بگیرید.
۸. استوانه آزمایش را به مدت ۲۰ دقیقه به صورت ایستاده بدون هیچ گونه لرزش در جایی قرار دهید.
۹. پس از مدت ۲۰ دقیقه ارتفاع h_1 (ارتفاع کل خاک) و h'_2 (ارتفاع درشت دانه ها) را از روی استوانه مدرج اندازه بگیرید.
۱۰. سنبه فولادی را داخل استوانه فروبرده و کف سنبه را روی دانه ها قرار دهید. ارتفاع h_2 (ارتفاع درشت دانه ها) را اندازه بگیرید.
۱۱. مقدار ۱۱۰ گرم از نمونه رد شده از الک شماره ۴ را وزن کرده و مراحل ۴ تا ۱۱ را دوباره تکرار کنید.

محاسبات

مقدار هم ارز ماسه را به صورت زیر حساب کنید.

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

$$(SE)' = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

در ماسه درشت دو عدد بدست آمده تقریباً برابر هستند ولی در ماسه ریز به علت نشست سنبه و کاهش h_2 مقدار SE از $(SE)'$ کوچک تر می شود.

این محاسبات را برای هر دو تکرار آزمایش انجام دهید. مقدار هم ارز ماسه میانگین به دست آمده از دو تکرار است.

سؤالات

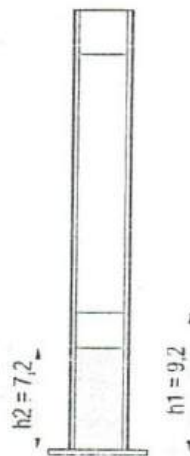
۱. پس از انجام آزمایش هم ارز ماسه در یک خاک ، SE آن صفر گزارش شده است. نوع خاک کدام یک از موارد زیر می تواند باشد؟
(۱) ماسه خالص و تمیز (۲) رس خالص (۳) مخلوط رس و ماسه به نسبت وزنی برابر
۲. تنها مورد استفاده آزمایش Sand Equivalent در مکانیک خاک چیست؟
۳. افزایش ریزدانه در خاک چه تاثیری بر بتن دارد؟

۴. افزایش ریزدانه در خاک چه تاثیری بر تراکم خاک دارد؟

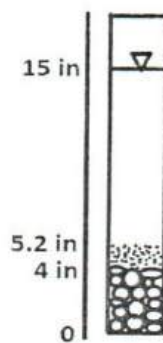
۵. الف) اگر به دو قسمت مساوی کانولینیت، مقدارهای نامساوی ماسه اضافه نماییم با ذکر دلیل توضیح دهید کدام یک مقدار SE بیشتری دارد؟

ب) اگر به دو قسمت از یک نوع خاک، به یکی مقداری کانولینیت و به دیگری مقداری مونت موریلونیت اضافه نماییم با ذکر دلیل توضیح دهید کدام یک مقدار SE بیشتری دارد؟

۶. مقدار SE را برای خاک شکل ۲ تعیین کنید؟ آیا این خاک برای استفاده در آسفالت مناسب است؟



۷. در یک آزمایش هم ارز ماسه نتیجه به صورت شماتیک ترسیم شده است. هم ارز ماسه برای این مصالح چند درصد است؟ آیا این مصالح برای کاربرد در بتن مناسب است؟



آزمایش تعیین وزن واحد حجم خاک در محل به روش مخروط ماسه

ASTM D-1556

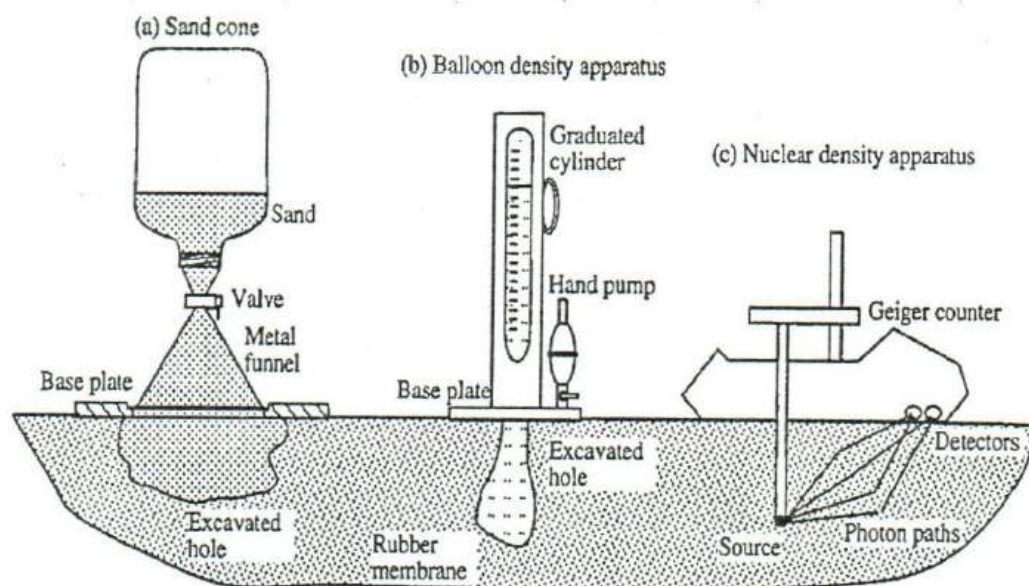
مقدمه

با پیشرفت عملیات تراکم در کارگاه، لازم است کنترل شود که آیا به وزن واحد حجم خشک خاک مندرج در مشخصات فنی رسیده‌ایم یا نه. گاهی در کارگاه‌ها در اثر رعایت نکردن دقیق درصد رطوبت لازم برای تراکم یا کافی نبودن انرژی لازم برای این عمل، وزن واحد حجم خشک حاصل کمتر (یا گاهی بیشتر) از وزن واحد حجم خشک حداکثر حاصل از آزمایش می‌گردد. روش‌های استاندارد برای تعیین وزن مخصوص خاک متراکم شده در کارگاه عبارتند از:

الف: روش مخروط ماسه^{۴۵}

ب: روش بالون لاستیکی^{۴۶}

ج: استفاده از چگالی سنج هسته‌ای^{۴۷}



شکل ۱: روش‌های تعیین وزن واحد حجم خاک در محل

⁴⁵ sand cone method

⁴⁶ rubber balloon method

⁴⁷ nuclear density method

روش مخروط ماسه

در این روش، در محل مورد نظر گودالی به صورت دستی حفاری شده و پس از خارج کردن تمام مصالح حفاری شده گودال به وسیله ماسه‌ی کالیبره شده پر می‌شود و به این ترتیب حجم گودال اندازه‌گیری می‌شود. وزن مخصوص مرطوب خاک با تقسیم وزن مصالح خارج شده از گودال به حجم گودال محاسبه می‌شود. درصد رطوبت در محل مصالح بعد از خشک کردن مصالح خارج شده از گودال محاسبه شده و با استفاده از آن وزن مخصوص خشک مصالح در محل محاسبه می‌شود.

این آزمایش را می‌توان برای تعیین وزن مخصوص خاک‌هایی که بزرگ‌ترین اندازه‌ی دانه‌های آن‌ها از $\frac{1}{4}$ اینچ (۳۸ میلی‌متر) بزرگ‌تر نباشد استفاده کرد. همچنین اندازه حفرات طبیعی خاک نباید به اندازه‌ای بزرگ‌تر باشد که دانه‌های ماسه به داخل آن‌ها نفوذ کند. خاک مورد نظر باید چسبندگی کافی را داشته باشد تا بتوان در آن بدون ایجاد تغییرشکل و دست‌خوردگی گودالی به صورت دستی حفاری کرد. بنابراین این روش برای خاک‌های آلی، خاک‌های اشباع یا با پلاستیسیته بالا که در حین حفاری، فشرده شده یا تغییرشکل می‌دهند مناسب نیست. همچنین این آزمایش را برای خاک‌های دانه‌ای سیمانته نشده که امکان حفر گودالی با دیواره‌های پایدار در آن وجود ندارد نمی‌توان استفاده کرد.

روش بالون لاستیکی (ASTM D-2167)

در این روش، مشابه روش مخروط ماسه، حفراهی در خاک متراکم شده حفر گردیده و وزن مرطوب و میزان رطوبت خاک حفاری شده از آن اندازه‌گیری می‌شود. اما در این روش، حجم گودال توسط آب ریخته شده از یک ظرف مدرج به درون یک بالون (بادکنک) لاستیکی که درون حفره قرار داده شده، اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به آب خارج شده از ظرف مندرج، حجم حفره به دست می‌آید. با داشتن وزن و حجم حفره می‌توان وزن مخصوص مرطوب و پس از آن با داشتن درصد رطوبت، وزن مخصوص خشک را به دست آورد.

مهم‌ترین مزیت روش بالون، سرعت عمل بیشتر آن نسبت به مخروط ماسه می‌باشد. اما باید توجه داشت که در این روش گودال حفاری شده شکل نامنظمی نداشته باشد و نقاط نوک تیز در آن طوری نباشد که منجر به پارگی بالون شود. روش بالون در خاک‌های ریزدانه شل و خاک‌های با خاصیت خمیری بالا چندان کاربرد ندارند، چون فشار ایجاد شده توسط سیال داخل بالون، تراکم خاک را تحت تأثیر قرا می‌دهد. همچنین در خاک‌های درشت دانه نوک تیز نیز به علت امکان پارگی بالون، کاربرد چندانی ندارد.

استفاده از چگالی‌سنج هسته‌ای

امروز استفاده از چگالی‌سنج هسته‌ای برای تعیین وزن مخصوص خشک خاک تراکم یافته رواج زیادی یافته است. چگالی سنج هم از درون یک حفره و هم از روی سطح قابل کاربرد است. این وسیله وزن مرطوب خاک در واحد حجم و همچنین آب موجود در حجم واحد خاک را تعیین می‌کند. وزن مخصوص خشک را می‌توان با کسر کردن وزن آب از وزن مرطوب واحد حجم به دست آورد.

به طور عمده چهار دسته از کاربردهای تعیین وزن واحد حجم خشک خاک به شرح زیر است:

الف) در راهسازی برای تعیین درصد تراکم لایه‌های خاکریز

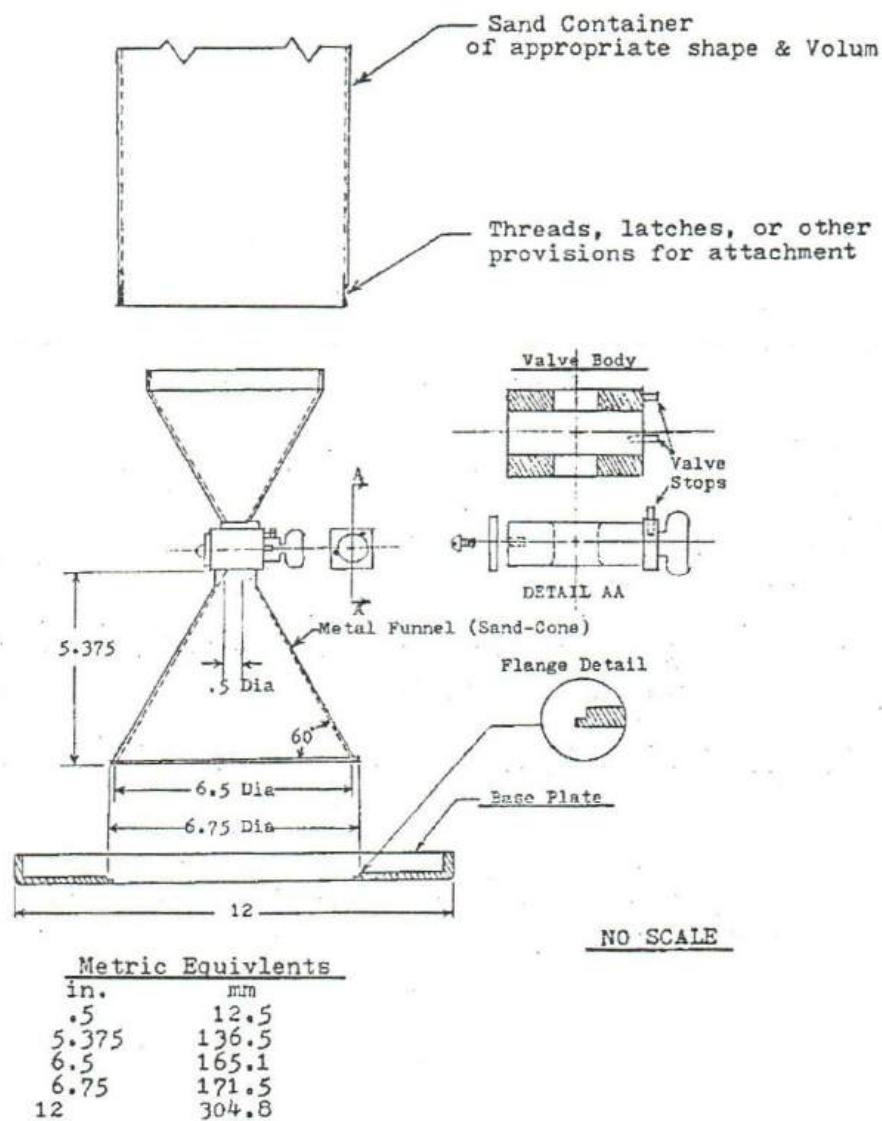
ب) در کارهای ساختمانی برای اطلاع از تراکم و تعیین ظرفیت باربرای خاک

ج) در سدسازی

د) در ساخت کانال‌های انتقال آب

وسایل مورد نیاز

۱. وسیله‌ی مخروط ماسه که شامل قطعات زیر است:
 - ۱.۱. یک بطری با حجمی بیشتر از حجم گودال حفاری شده که امکان اتصال به قیف مخصوص را داشته باشد.
 - ۲.۱. یک قیف دو طرفه که از طرف قیف کوچک تر به بطری ماسه متصل می شود. قیف کوچک تر از طریق روزنه‌ای به قطر تقریباً ۱۳ میلی متر که به وسیله‌ی یک شیر کنترل می شود به قیف بزرگ تر (مخروط ماسه) متصل می شود. برای به دست آوردن ماسه با توزیع یکنواخت دانسیته، زاویه‌ی دیواره‌ی مخروط ماسه با کف آن حدود ۶۰ درجه در نظر گرفته می شود.
 - ۳.۱. صفحه نشیمن مخروط ماسه و صفحه‌ای فلزی با قطری حدود ۷۵ میلی متر بزرگ تر از قطر مخروط ماسه که در وسط آن سوراخی به اندازه‌ی مخروط ماسه قرار دارد.
۲. ماسه: ماسه مورد استفاده باید خشک، تمیز، یکنواخت (از نظر نوع دانه‌ها و دانه بندی) و سیمانته نشده باشد. دانه بندی ماسه باید ضریب یکنواختی (C_u) کوچکتر از ۲ داشته باشد. بزرگترین اندازه دانه‌ها باید از ۲ میلی متر کمتر باشد، همچنین کمتر از ۳ درصد وزنی ماسه از الک ۲۵۰ میکرومتر (الک شماره ۶۰) عبور کند.
- استفاده از ماسه با دانه بندی یکنواخت موجب جلوگیری جدایی دانه‌ها در هنگام ریختن ماسه و در نتیجه رسیدن به دانسیته‌ی یکنواخت می شود.
۳. ترازو با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم و دقت ۵ گرم.
۴. گرمخانه.
۵. وسایل کندن زمین.



شکل ۲: جزئیات وسایل آزمایش

روش انجام آزمایش

۱. محلی را که آزمایش باید در آن انجام شود انتخاب کنید.
۲. وسیله مخروط ماسه را از نظر سلامت و درست کار کردن شیر آن بازرسی کنید. بطری را با ماسه کالیبره شده پر کرده و وزن کل وسیله را محاسبه کنید.
۳. سطح محلی را که آزمایش باید در آن انجام شود صاف کنید. برای این کار می توانید از صفحه نشیمن مخروط استفاده کنید.

۴. صفحه نشیمن را روی زمین قرار دهید. صفحه در محل لبه های سوراخ وسط باید کاملاً با زمین در تماس باشد. کناره های صفحه را علامت گذاری کنید تا جابه جایی صفحه حین آزمایش قابل کنترل باشد.

۵. در صورتی که سطح کاملاً صاف نباشد یا حفره هایی در سطح وجود داشته باشد ابتدا حجمی که بین صفحه، زمین و قیف به وجود آمده است را اندازه گیری نمود. برای این کار یک آزمایش اولیه لازم است به این ترتیب که با باز کردن شیر مخروط حجم مورد نظر را با ماسه پر کنید و وزن ماسه ای را که حجم مورد نظر را پر کرده محاسبه نمایید. دوباره بطری را پر کرده و وزن اولیه جدید را اندازه گیری کنید. بعد از انجام اندازه گیری ذکر شده در بالا ماسه های روی محل مورد نظر برای آزمایش را کاملاً جارو کنید.

۶. حجم گودالی که باید حفاری شود بستگی به حداکثر اندازه دانه ها در خاک دارد. با توجه به اندازه دانه های خاک حجم گودال مطابق جدول پیشنهاد می شود. عمق گودال باید به گونه ای باشد که نمونه ای که از خاک برداشته می شود. نماینده شرایط خاک مورد نظر باشد. در مواردی که این آزمایش برای کنترل عملیات خاکریزی انجام می شود عمق گودال باید در حدود ضخامت یک لایه اجرایی یا بیشتر باشد.

جدول ۱: حداقل حجم گودال براساس حداکثر اندازه دانه های خاک

حداقل حجم گودال	حداکثر اندازه دانه (mm)
1415	12.7
2125	25.4
2830	38

۷. گودال را از وسط سوراخ صفحه نشیمن حفر کنید. دقت کنید که دست خوردگی یا تغییر شکل در دیواره گودال ایجاد نشود. دیواره ها باید شیب کمی به سمت داخل گود داشته باشند و کف گودال باید تقریباً صاف یا مقعر باشد. دیواره ها نباید گوشه دار یا حاوی مصالح سست شده باشند. در خاک هایی که ساختار دانه ای دارند گودال باید به صورت یک مخروط حفر شود. تمام خاک های حفاری شده را با دقت از گودال خارج کرده و در ظرفی که رطوبت را حفظ کند قرار دهید.

۸. لبه های صفحه نشیمن را تمیز کنید. مخروط ماسه را به صورت وارونه در محل سوراخ صفحه نشیمن قرار دهید. شیر مخروط را باز کنید تا ماسه به داخل گودال ریخته و گودال و قیف را پر کند. دقت کنید که در هنگام ریختن ماسه هیچ گونه ضربه یا ارتعاشی به ظرف وارد نشود. وقتی ریختن ماسه به داخل قیف پایین پایان یافت، شیر را ببندید.

۹. وزن وسیله مخروط ماسه را با ماسه باقیمانده در آن را اندازه گیری کنید. وزن ماسه استفاده شده را محاسبه کنید.

۱۰. وزن خاکی را که از گودال حفاری شده است اندازه گیری کنید.
۱۱. خاکی را که از گودال حفاری شده کاملاً مخلوط کنید و نمونه ای از آن را برای تعیین درصد رطوبت انتخاب کنید یا از همه آن برای تعیین درصد رطوبت استفاده کنید.
۱۲. درصد رطوبت نمونه را بدست آورید.

محاسبات

۱. حجم گودال حفاری شده را محاسبه می کنیم.

$$V = \frac{M_1 - M_2}{\rho_1} \quad (۱)$$

V : حجم گودال آزمایش (cm^3)

M_1 : جرم ماسه ای که برای پر کردن گودال، قیف و صفحه نشیمن استفاده شده (g)

M_2 : جرم ماسه ای که برای پر کردن قیف و صفحه نشیمن استفاده شده (g) (پیوست ۱)

ρ_1 : جرم حجمی ماسه (g/cm^3)

۲. حجم خشک مصالحی که از گودال خارج شده را محاسبه می کنیم.

$$M_4 = \frac{100M_3}{\omega + 100} \quad (۲)$$

ω : درصد رطوبت خاکی که از گودال خارج شده

M_3 : جرم مرطوب خاکی که از گودال خارج شده (g)

M_4 : جرم خشک خاکی که از گودال خارج شده (g)

۳. جرم حجمی مرطوب و خشک خاک موردنظر را محاسبه می کنیم.

$$\rho_m = \frac{M_3}{V} \quad (۳)$$

$$\rho_d = \frac{M_4}{V}$$

V : حجم گودال حفاری شده (cm^3) (رابطه ۱)

M_3 : جرم مرطوب مصالح خارج شده از گودال (g)

M_4 : جرم خشک مصالح خارج شده از گودال (g) (رابطه ۲)

ρ_m : جرم حجمی مرطوب خاک موردنظر (g/cm^3)

ρ_d : جرم حجمی خشک خاک موردنظر (g/cm^3)

گزارش

گزارش آزمایش باید حداقل شامل موارد زیر باشد:

۱. محل مورد آزمایش:
ضخامت لایه مورد آزمایش و مشخصات لازم دیگر مربوط به محل مورد آزمایش
۲. حجم گودال
۳. جرم حجمی مرطوب و خشک خاک
۴. درصد رطوبت خاک محل
۵. ابعاد مخروط ماسه و اطلاعات کالیبراسیون آن
۶. جرم حجمی ماسه
۷. تشریح نظری خاک مورد آزمایش
۸. درصد مصالح بزرگ تر از مقدار حداکثر آزمایش

پیوست ۱

کالیبراسیون دستگاه مخروط ماسه

در این پیوست روش به دست آوردن جرم ماسه ای که قیف و صفحه نشیمن را پر می کند توضیح داده می شود. جرم ماسه ای که قیف و صفحه نشیمن را پر می کند، بستگی به جرم حجمی ماسه مورد استفاده دارد. بنابراین در صورتی که از ماسه های متفاوت برای انجام آزمایش استفاده می شود، برای هر نوع ماسه باید روند حاضر انجام گردد.

کالیبراسیون دستگاه با استفاده از دو روش قابل انجام است:

- ۱- روش A: محاسبه جرم ماسه کالیبره شده که قیف و صفحه نشیمن را پر می کند.
- ۲- روش B: محاسبه حجم ماسه ای که قیف و صفحه نشیمن را پر می کند. با مشخص بودن حجم و با تغییر ماسه مورد استفاده با مشخص بودن جرم حجمی ماسه می توان جرم مورد نظر را حساب کرد.

در محاسبات این پیوست همه جرم های محاسبه شده به یکان ۵ گرد می شوند.

در این جا روش A توضیح داده می شود.

روش A

۱. دستگاه را از ماسه موردنظر که برای آزمایش استفاده خواهد شد پر کنید.
۲. وزن دستگاه پر شده را اندازه گیری کنید.
۳. صفحه نشیمن را روی یک صفحه ی صاف و تمیز قرار دهید. دستگاه را به صورت وارونه روی صفحه نشیمن قرار دهید. قیف و صفحه ی نشیمن را علامت گذاری کنید به صورتی که در حین آزمایش دانسیته در محل بتوان موقعیت آنها را نسبت به هم به صورت حاضر تنظیم کرد.
۴. شیر قیف را باز کنید تا ماسه به داخل قیف بریزد و آن را کاملاً پر کند. دقت کنید که هیچ ضربه یا ارتعاشی به قیف وارد نشود.
۵. شیر را به سرعت ببندید. دستگاه را همراه با ماسه باقیمانده در آن وزن کنید. جرم ماسه ای که قیف و صفحه ی نشیمن را پر کرده محاسبه کنید که تفاضل جرم اولیه و جرم اندازه گیری شده در این مرحله است.
۶. این روند را حداقل ۳ بار تکرار کنید. اختلاف هر آزمایش با متوسط آزمایش ها نباید از ۱ درصد بیشتر شود. متوسط سه بار تکرار آزمایش در محاسبات مربوط به آزمایش دانسیته در محل استفاده می شود.

پیوست ۲

کالیبراسیون جرم حجمی ماسه

دستورالعمل زیر برای محاسبه جرم حجمی ماسه در آزمایش مخروط ماسه استفاده می شود.

وسایل مورد نیاز

۱. یک ظرف با حجم معین که بتوان ماسه را از ارتفاعی نزدیک به ارتفاعی که در آزمایش مخروط ماسه ریخته می شود در آن ریخت. توصیه می شود از قالب های آزمایش تراکم (حجم ۹۴۴ سانتی متر مکعب یا حجم ۲۱۲۴ سانتیمتر مکعب) استفاده شود. با استفاده از آب حجم قالب انتخاب شده را با دقت ۱ درصد تعیین کنید.
۲. وسیله مخروط ماسه. برای تعیین جرم حجمی ماسه باید از وسیله مخروط ماسه به اندازه وسیله ای که برای تعیین وزن مخصوص در محل استفاده خواهد شد استفاده کرد چون اندازه وسیله و شکل شیر مورد استفاده، در دانسیته نهایی تأثیر دارد.

۳. ترازو با ظرفیت حداقل ۲۰ کیلوگرم و دقت ۵ گرم
۴. تیغه فولادی با حدود ۵۰ سانتی متر عرض، ۳ میلی متر ضخامت و طولی حدود ۱/۵ برابر قطر ظرف انتخاب شده

روش آزمایش

۱. وسیله مخروط ماسه از ماسه پر کنید.
۲. جرم خالی ظرف انتخاب شده را اندازه گیری کنید.

روش A

- ۱،۳. اگر قطر ظرف انتخاب شده با قطر سوراخ وسط صفحه نشیمن وسیله مخروط ماسه برابر است، مخروط ماسه را به صورت وارونه روی سر ظرف قرار دهید.
- ۲،۳. شیر مخروط ماسه را باز کنید تا ظرف و قیف پر شود. وقتی جریان ماسه قطع شد شیر را ببندید.
- ۳،۳. وزن وسیله مخروط ماسه و ماسه باقیمانده در آن را اندازه گیری کنید. وزن ماسه ریخته شده در ظرف را با استفاده از نتایج بدست آمده از پیوست ۱ محاسبه کنید.

روش B

- ۱،۴. مخروط ماسه را برگردانده و به وسیله نگهدارنده ای آن را روی ظرف انتخاب شده نگه دارید. فاصله مخروط را با ظرف طوری انتخاب کنید که ارتفاع سقوط ماسه حدود ارتفاع سقوط در آزمایش دانسیته در محل باشد. سپس شیر مخروط ماسه را باز کنید.
- ۲،۴. صبر کنید تا ظرف کاملاً پر شود سپس شیر را بسته و با حداقل ضربه یا تکان سطح ماسه را با سطح ظرف به وسیله تیغه فولادی یکسان کنید.
- ۳،۴. جرم ظرف پر از ماسه را اندازه گیری کنید.
- ۴،۴. حداقل سه بار این کار را تکرار کنید و متوسط اندازه گیری سه آزمایش را به عنوان جرم ظرف و ماسه در نظر بگیرید. هر کدام از اندازه گیری ها نباید بیش از ۱ درصد با متوسط اندازه گیری ها اختلاف داشته باشد.

محاسبات

جرم حجمی ماسه را به صورت زیر محاسبه کنید.

$$\rho_1 = \frac{M_5}{V_1}$$

ρ_1 : جرم حجمی ماسه (g/cm^3)

برای به دست آوردن جرم حجمی با واحد kN/m^3 این مقدار را در $9/807$ ضرب کنید.

M_3 : جرم ماسه در ظرف انتخاب شده (g)

V_1 : حجم ظرف انتخاب شده (cm^3)

سؤالات

۱. الف) به منظور تعیین وزن مخصوص خاکی در محل با استفاده از آزمایش مخروط ماسه، وزن خاک مرطوب خارج شده از گودال برابر با $4/567$ کیلوگرم و حجم آن $2/38$ لیتر بوده است. برای تعیین در صد رطوبت نمونه مقدار 57 گرم از آن را داخل گرمخانه گذاشته که پس از خشک شدن کامل، وزن آن 49 گرم شده است. دانسیته خشک این خاک چه قدر است؟ ب) دو روش دیگر برای تعیین دانسیته در محل را معرفی کنید و توضیح دهید.
 ۲. در یک کارگاه راهسازی، پس از متراکم کردن خاک، گودالی حفر می شود و مقداری خاک برای کنترل تراکم خارج می شود. وزن خاک خارج شده از گودال 1500 گرم است که پس از خشک شدن در کوره به 1350 گرم کاهش می یابد. گودال مذکور با 1200 گرم ماسه با وزن مخصوص $1/6 \text{ g/cm}^3$ پر می شود، چهار دانشجو ارزیابی های زیر را داشته اند:
 - خاک مورد نظر 4% کمبود آب دارد و به اندازه تراکم مجاز کوبیده شده است.
 - خاک مورد نظر 4% اضافه آب دارد و به اندازه تراکم مجاز کوبیده شده است.
 - خاک مورد نظر 4% کمبود آب دارد و کمتر از تراکم مجاز کوبیده شده است.
 - خاک مورد نظر 4% اضافه آب دارد و کمتر از تراکم مجاز کوبیده شده است.
- ارزیابی کدام یک صحیح می باشد؟ ($1/8 \text{ g/cm}^3 = \gamma_{d\max}$ و $15\% = \omega_{opt}$ و تراکم مجاز 100% است)

آزمایش تراکم

ASTM 0698

مقدمه

در جریان عملیات اجرایی بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی مانند سدها، سازه‌های نگهبان، بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها عملیات خاکریزی^{۴۸} انجام می‌شود. در احداث خاکریزها، خاک شل^{۴۹} باید متراکم شود و وزن مخصوص آن افزایش یابد. کوبیدن خاک ریخته شده به سه دلیل اجرا می‌شود: (۱) کاهش نشست در اثر بارگذاری و وزن سازه (۲) افزایش مقاومت خاک (۳) کاهش نفوذپذیری خاک.

فرایند تراکم^{۵۰} نتیجه‌ی منفی نیز به دنبال دارد و آن افزایش پتانسیل تورم^{۵۱} خاک‌ها در اثر جذب آب و یا یخبندان است.

در رطوبت‌های کم، وقتی آب به خاک اضافه می‌شود، ذرات خاک، آب اضافه شده را به صورت لایه‌ای اطراف خود جذب می‌کند و این لایه نقش روغن کاری و نرم کردن محیط را ایفا می‌کند. اما در رطوبت‌های زیاد، آب فضای خالی بین دانه‌ها را پر می‌کند و مانع نزدیک شدن ذرات به یکدیگر می‌شوند. به تعبیری دیگر وجود بیش از حد آب باعث می‌گردد انرژی اعمالی به توده، توسط ذرات آب جذب شده و به دانه‌های خاک منتقل نشود.

رطوبت خاک جهت تراکم باید نه کم و نه زیاد باشد، بلکه باید در مقدار بهینه‌ای قرار داشته باشد که به آن "رطوبت بهینه"^{۵۲} w_{opt} گفته می‌شود. رطوبت بهینه، باعث بیشترین تراکم خاک و دستیابی به "وزن مخصوص خشک حداکثر" $\gamma_{d_{max}}$ می‌شود. هدف آزمایش تراکم به دست آوردن w_{opt} و $\gamma_{d_{max}}$ است، برای رسیدن به این هدف لازم است تراکم آزمایشگاهی به گونه‌ای انتخاب شود که تراکمی که در آزمایش به خاک داده می‌شود قابل مقایسه با تراکمی که به وسیله ماشین‌آلات در کارگاه به خاک داده می‌شود باشد.

عوامل موثر در تراکم:

۱- نوع خاک (منحنی دانه‌بندی، شکل ذرات، چگالی دانه‌ها، مقدار و نوع کافی‌های رسی موجود در خاک)

⁴⁸ embankment

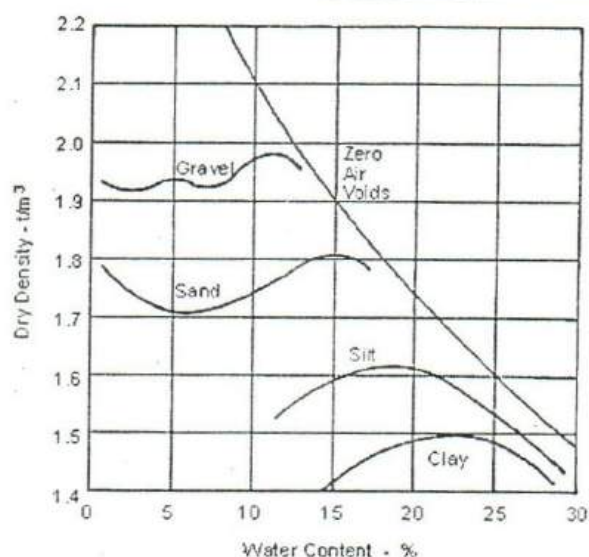
⁴⁹ loose

⁵⁰ compaction

⁵¹ swelling

⁵² optimum moisture content

تراکم خاک‌های درشت دانه بهتر از خاک‌های ریزدانه انجام می‌گیرد زیرا سطح جانبی خاک‌های ریزدانه بیشتر است لذا برای آغشته کردن آنها به رطوبت بیشتری نیاز می‌باشد و این رطوبت بیشتر فضای زیادتری از فضای خالی خاک را اشغال می‌کند و مانع از تراکم بیشتر خاک می‌گردد.



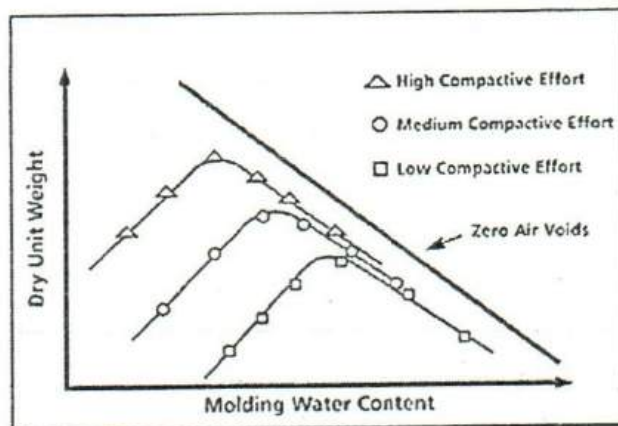
شکل ۱: منحنی تراکم چند نوع خاک مختلف

۲- انرژی تراکم: انرژی تراکم برای واحد حجم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E = \frac{\text{ارتفاع سقوط چکش} \times \text{وزن چکش} \times \text{تعداد لایه ها} \times \text{تعداد ضربات برای هر لایه}}{\text{حجم قالب}}$$

با افزایش انرژی تراکم، حداکثر وزن مخصوص خشک افزایش و میزان رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.

با پیشرفت ماشین آلات اجرایی و ساخت غلتک‌های سنگین‌تر، تراکم‌های بالاتری در عملیات اجرایی قابل دسترس بود بنابراین روش آزمایشگاهی با انرژی بالاتری نیز برای به دست آوردن آن تراکم‌ها در آزمایشگاه استفاده شد.



شکل ۲: تأثیر انرژی تراکم بر منحنی تراکم

در آزمایش تراکم استاندارد رابطه بین درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک (منحنی تراکم) خاک مورد نظر که با انرژی $124.00 \text{ ft} - \text{lb}/\text{ft}^3$ (یا $600 \text{ kN} - \text{m}/\text{m}^3$) متراکم می شود به دست می آید. تراکم در قالبی با قطر ۴ یا ۶ اینچ (۱۰۱/۶ یا ۱۵۲/۵ میلی متر) و با چکشی به وزن ۵/۵ پوند (۲۴/۴ نیوتن) که که از ارتفاع ۱۲ اینچی (۳۰.۵ میلی متر) رها می شود انجام می گیرد.

این آزمایش فقط برای خاکهایی که درصد وزنی مانده از الک $\frac{2}{4}$ اینچ (۱۹ میلی متر) آن ها از ۳۰ درصد کمتر باشد قابل استفاده است. بسته به نمونه مورد نظر آزمایش تراکم استاندارد در سه روش انجام می شود.

روش الف: در صورتی که درصد مانده روی الک ۴ (۴/۷۵ میلی متر) نمونه کمتر یا مساوی ۲۰ درصد باشد، از این روش استفاده می شود.

روش ب: در صورتی که درصد مانده روی الک ۴ از ۲۰ درصد بیشتر باشد و درصد مانده روی الک $\frac{2}{8}$ اینچ (۹/۵ میلی متر) از ۲۰ درصد کمتر باشد از این روش استفاده می شود.

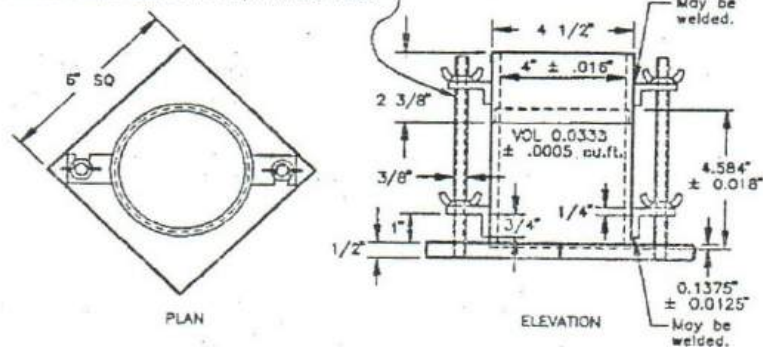
روش ج: در صورتی که درصد مانده روی الک $\frac{2}{8}$ اینچ از ۲۰ درصد بیشتر باشد و درصد مانده روی الک $\frac{2}{4}$ اینچ از ۳۰ درصد کمتر باشد از این روش استفاده می شود.

مشخصات این سه روش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات سه روش انجام آزمایش تراکم

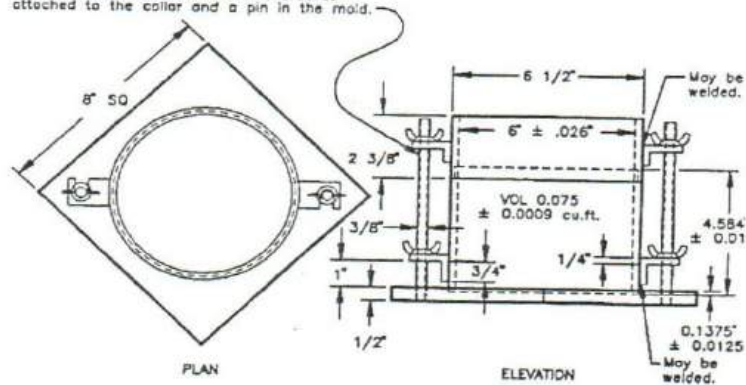
الف	ب	ج	
۴	۴	۶	قطر قالب (اینچ)
شماره ۴	اینچ $\frac{3}{8}$	اینچ $\frac{3}{4}$	نمونه (عبوری از الک)
۳	۳	۳	تعداد لایه
۲۵	۲۵	۵۶	تعداد ضربه در هر لایه

As an option to the full length stud, a $2 \frac{1}{2}'' \times 3/8''$ stud may be used. Then as an alternative construction, the collar may be held down with a slotted bracket attached to the collar and a pin in the mold.



شکل ۳: مشخصات هندسی قالب ۴

As an option to the full length stud, a $2 \frac{1}{2}'' \times 3/8''$ stud may be used. Then as an alternative construction, the collar may be held down with a slotted bracket attached to the collar and a pin in the mold.



شکل ۴: مشخصات هندسی قالب ۶

در صورتی که نمونه اولیه بیشتر از ۵ درصد دانه های بزرگتر از مقدار حداکثر داشته باشد نتیجه آزمایش تراکم یعنی حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه باید با استفاده از ASTM D4253 تصحیح شود.

با انجام تراکم به طور عملی نمی توان خاک را به حالت فیزیکی اشباع ۱۰۰٪ رساند، بنابراین یک منحنی تفوریک به نام منحنی هوای صفر^{۵۳} تعریف می شود که نشان دهنده ی حالت اشباع در خاک مورد نظر است که در شکل های ۱ و ۲ این منحنی نشان داده شده است.

کاربرد این منحنی برای کنترل نتایج آزمایش تراکم انجام شده بر روی نمونه های مختلف خاک است (تمام نقاط به دست آمده از آزمایش باید در سمت چپ منحنی (ZAV) واقع شوند)

$$\gamma_d = \frac{G_s(1-A)}{1 + \omega G_s} \gamma_\omega \xrightarrow{A=0} \gamma_{dZAV} = \frac{G_s \gamma_\omega}{1 + \omega G_s}$$

همان طور که مشاهده می شود تنها با داشتن G_s می توان منحنی هوای صفر را رسم کرد پس در یک خاک مشخص منحنی هوای صفر شکل ثابتی دارد.

وسایل مورد نیاز

۱. قالب و چکش استاندارد
۲. الک های $\frac{3}{8}$ و $\frac{2}{4}$ اینچ و شماره ۴ (۹/۵ و ۱۹ و ۴/۷۵ میلی متر)
۳. دو ترازو با دقت های ۰/۰۱ و ۱ گرم
۴. آفشان، بیلچه، قوطی های اندازه گیری رطوبت
۵. جک برای خارج کردن نمونه ها از قالب
۶. گرمخانه^{۵۴}

انتخاب روش آزمایش

درصد مانده روی الک های شماره ۴ و $\frac{3}{8}$ اینچ و $\frac{2}{4}$ اینچ را محاسبه کنید و روش مناسب برای انجام آزمایش را انتخاب نمایید.

مقدار نمونه لازم برای انجام آزمایش به روش الف یا ب حدوداً ۱۶ کیلوگرم و برای روش ج حدود ۲۹ کیلوگرم می باشد.

⁵³ zero air void ratio

⁵⁴ oven

روش انجام آزمایش

۱. آماده کردن نمونه

نمونه های آزمایش به دو روش مرطوب (ترجیحاً) یا خشک آماده می شوند. استفاده از نمونه هایی که یک بار برای آزمایش تراکم استفاده شده اند مجاز نیست.

۲. آماده کردن نمونه به روش مرطوب

براساس روش انتخاب شده برای آزمایش (الف-ب یا ج) و بدون خشک کردن نمونه ها آن ها را از الک های شماره ۴ یا $\frac{3}{8}$ اینچ یا $\frac{3}{4}$ اینچ عبور دهید. درصد رطوبت نمونه به دست آمده را به دست آورید.

۱.۲. حداقل دو نمونه با درصد رطوبت کمتر از رطوبت بهینه و دو نمونه با درصد رطوبت بیشتر از رطوبت بهینه و یک نمونه با درصد رطوبت حدود رطوبت بهینه تهیه کنید. درصد رطوبت بهینه معمولاً کمی کمتر از حد خمیری خاک است. اختلاف درصد رطوبت نمونه های تهیه شده را حدود درصد انتخاب کنید. این اختلاف نباید بیش از ۴ درصد باشد.

۲.۲. وزن هر کدام از نمونه های تهیه شده باید حدود $\frac{2}{3}$ کیلوگرم برای روش الف و ب و حدود $\frac{5}{9}$ کیلوگرم برای روش ج باشد. برای اضافه کردن آب به نمونه ها آب را به صورت یکنواخت با آب پاش روی نمونه پاشیده و مخلوط کنید در صورت نیاز به کم کردن رطوبت، نمونه را با مخلوط کردن در مجاورت هوا در دمای معمولی یا با گرم کردن به شرطی که دمای آن از ۶۰ درجه بالاتر نرود، آماده کنید.

۳. آماده کردن نمونه ها به روش خشک

اگر درصد رطوبت نمونه ها به قدری زیاد باشد که کلوخه ها شکسته نشوند ابتدا باید درصد رطوبت کاهش یابد. در صورتی که نمونه ها گرم می شوند، دمای آنها نباید از ۶۰ درجه بالاتر رود. با استفاده از چکش لاستیکی کلوخه ها را خرد کنید و دقت کنید که دانه های خاک خرد نشوند. نمونه ها را از الک های مناسب شماره ۴ یا $\frac{3}{8}$ اینچ یا $\frac{3}{4}$ اینچ عبور دهید.

۱.۳. مطابق بندهای ۱،۲ و ۲،۲ نمونه هایی با درصد رطوبت های مختلف آماده کنید.

۴. عملیات تراکم

۱.۴. وزن قالب را اندازه گیری کنید.

۲.۴. قالب و طوقه سر آن را بر روی صفحه زیرین قالب نصب کنید.

۳،۴. نمونه ها را در سه لایه متراکم کنید. برای هر لایه مقدار خاک را طوری انتخاب کنید که ضخامت لایه ها بعد از تراکم تقریباً برابر باشد. برای هر لایه و قبل از تراکم به وسیله چکش سطح لایه را به صورت یکنواخت درآورده و کمی فشار دهید تا از حالت کاملاً نرم خارج شود. بعد از تراکم لایه های اول و دوم، خاکهای متراکم نشده در کنار دیواره های قالب و بالاتر از سطح کوبیده شده باید تمیز شوند. لایه سوم بعد از کوبیده شدن باید حدود $\frac{1}{4}$ اینچ (۶ میلی متر) بالاتر از قالب و در داخل طوقه قرار بگیرد.

۴،۴. برای قالب ۴ اینچی هر لایه با ۲۵ ضربه و برای قالب ۶ اینچی هر لایه با ۵۶ ضربه متراکم می شود. ۵،۴. بعد از اتمام تراکم طوقه و صفحه زیرین را از قالب باز کنید.

۶،۴. سطح نمونه را طوری برش دهید تا با لبه قالب یکی شود. در صورتی که در سطح نمونه حفره ای ایجاد شود آن را با خاک هایی که از برش نمونه به دست آمده پر کنید.

۷،۴. وزن نمونه و قالب را با دقت یک گرم تعیین کنید.

۸،۴. نمونه را از قالب خارج کنید. مقداری از خاک آن را برای تعیین درصد رطوبت انتخاب کنید.

۹،۴. بعد از انجام آزمایش تراکم برای هر نمونه دانسیته مرطوب نمونه را با نمونه قبلی مقایسه کنید تا مطمئن شوید روند مناسبی برای مشخص کردن منحنی تراکم دنبال می شود. در صورتی که روند نتایج برای تعیین منحنی تراکم مناسب نیست می توانید تعداد نمونه ها را افزایش دهید.

محاسبات

۱. دانسیته خشک و درصد رطوبت نمونه ها را با دقت 0.2 kN/m^3 یا 0.1 lbf/ft^3 و 0.1 درصد تعیین کنید و آنها را در دستگاه مختصات (دانسیته خشک - درصد رطوبت) مشخص کنید. یک منحنی از نقاط به دست آمده عبور دهید. به این ترتیب منحنی تراکم خاک را رسم کنید. از روی این منحنی درصد رطوبت بهینه و دانسیته ی خشک بیشینه را به دست آورید.
۲. منحنی اشباع ۱۰۰ درصد را در کنار منحنی تراکم رسم کنید.
۳. دانسیته مرطوب، دانسیته خشک و وزن مخصوص خشک را با استفاده از رابطه های زیر محاسبه کنید.

$$\rho_m = \frac{M_t - M_{md}}{1000V}$$

ρ_m : دانسیته مرطوب نمونه متراکم شده (Mg/m^3)

M_t : وزن خاک مرطوب و قالب (kg)

M_{md} : وزن قالب (kg)

V : حجم قالب (m^3)

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \omega/100}$$

ρ_d : دانسیته خشک نمونه ی متراکم شده (Mg/m^3)

ω : درصد رطوبت

$$\gamma_d = 9.807 \rho_d \text{ in } kN/m^3$$

$$\gamma_d = 62.43 \rho_d \text{ in } lbf/ft^3$$

γ_d : وزن مخصوص خشک خاک متراکم شده

برای به دست آوردن منحنی اشباع از رابطه ی زیر استفاده می کنیم:

$$\omega_{sat} = \frac{\gamma_w \cdot G_s - \gamma_d}{\gamma_d \cdot G_s} \times 100$$

ω_{sat} : درصد رطوبت در درصد رطوبت اشباع

γ_w : وزن حجمی آب

γ_d : وزن مخصوص خاک

G_s : وزن مخصوص دانه های خاک

روش ارائه گزارش

نتیجه آزمایش تراکم معمولاً به صورت منحنی (وزن مخصوص خشک خاک-درصد رطوبت تراکم) ارائه می شود. به همراه این نمودار معمولاً منحنی (وزن مخصوص خشک خاک-درصد رطوبت) برای چند درصد اشباع نیز رسم می شود. ریز نتایج نیز به صورت جدول ارائه می گردد. به همراه این منحنی ها اطلاعات زیر باید گزارش شوند:

۱. روش به کار رفته برای آزمایش (الف-ب یا ج)
۲. روش آماده کردن نمونه ها (مرطوب یا خشک)
۳. رطوبت بهینه با دقت ۰/۵ درصد و دانسیته حداکثر با دقت $0.2kN/m^3$
۴. وزن مخصوص دانه های خاک

۵. اطلاعات مربوط به محل اخذ نمونه ها
۶. نتایج اصلاح نتیجه آزمایش تراکم در صورت وجود دانه های بزرگ تر از حد آزمایش

سوالات

۱. در یک آزمایش تراکم، وزن مخصوص خشک بهینه یک خاک معین تابعی است از:
 - (۱) فقط درصد رطوبت (۲) فقط انرژی تراکم (۳) درصد رطوبت و انرژی تراکم
۲. اگر به دلیل عدم دقت در ساخت، قالب آزمایش تراکم بزرگتر از حد استاندارد ساخته شده باشد، نمودار حاصل از آزمایش تراکم نسبت به نمودار کنونی چگونه تغییر می کند؟ به صورت شماتیک رسم نمایید.
۳. در رابطه با خط اشباع که بر روی منحنی تراکم رسم می گردد، توضیح دهید کدام یک از گزاره های زیر درست و کدام یک نادرست است؟
 - (الف) خط اشباع، به طور نظری حد بالای حداکثر تراکم ممکن را نشان می دهد.
 - (ب) خط اشباع، رطوبت لازم برای اقتصادی ترین روش تراکم را نشان می دهد.
 - (ج) خط اشباع، مماس بر شاخه ی تر منحنی تراکم است.
 - (د) خط اشباع، با تغییر انرژی تراکم به سمت گوشه بالایی سمت چپ منحنی تراکم جابه جا می شود.
۴. منحنی تراکم را به صورت شماتیک برای هر یک از خاک ها با خصوصیات گفته شده، با ذکر علت، رسم نمایید.
 - (الف) خاک چسبنده با حد روانی بالا مانند CH
 - (ب) خاک های سیلتی یا خاک ماسه ای ریز با کمی ریزدانه
۵. اگر خاکی را با انرژی های ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ کیلوژول در رطوبت بهینه متراکم کنیم. مقدار هوای باقی مانده در خاک
 - (الف) برای انرژی ۷۰۰ کمترین است.
 - (ب) برای انرژی ۶۰۰ کمترین است.
 - (ج) برای انرژی ۵۰۰ کمترین است.
 - (د) برای سه حالت تقریباً یکسان است.
۶. وزن مخصوص خشک بیشینه ی خاکی در آزمایش تراکم $1/8$ تن بر مترمکعب در رطوبت بهینه ۱۲ درصد به دست آمده است. برای احداث خاکریز با ۹۵ درصد تراکم مجاز و رطوبت ۱۰ درصد از خاک قرضه ای با رطوبت طبیعی ۵ درصد و وزن مخصوص $1/68$ تن بر مترمکعب استفاده می شود. مطلوب است تغییر حجم آب مورد نیاز برای اضافه کردن به ۱ متر مکعب خاک قرضه برای استفاده در خاکریز.

آزمایش تعیین عدد CBR

ASTM D-1883

مقدمه

این آزمایش در سال ۱۹۳۰ توسط اداره راهسازی ایالت کالیفرنیا ابداع شد و به وسیله اداره بزرگراه های کالیفرنیا برای ارزیابی استحکام جاده ها توسعه یافت. عدد CBR یک کمیت مقایسه ای است که به صورت نسبی نشان دهنده مقاومت برشی نمونه آزمایشی مورد آزمایش نسبت به یک نمونه آزمایشی استاندارد (نوعی سنگ شکسته از جنس سنگ آهک مخصوص) است.

عدد CBR به صورت درصد بیان می شود و به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$CBR = \frac{\text{بار یا فشار لازم برای نفوذ } 0.1 \text{ اینچ پیستون در خاک آزمایش}}{\text{بار یا فشار لازم برای نفوذ } 0.1 \text{ اینچ پیستون در خاک استاندارد}} * 100$$

در راهسازی از عدد CBR به عنوان شاخصی برای مقاومت مصالح روسازی، اساس و زیراساس جاده ها و فرودگاه ها استفاده می شود. در صورتی که مصالح مورد نظر به گونه ای باشند که اثر رطوبت تراکم در نتیجه آزمایش CBR کم باشد - مانند مصالح غبرجسبیده و درشت دانه - عدد CBR برای درصد رطوبت بهینه و یک مقدار مشخص از انرژی تراکم و یا دانسیته خشک مصالح به دست می آید. در مواردی که اثر رطوبت تراکم بر نتیجه آزمایش CBR نامشخص است یا لازم است که چگونگی این اثر مشخص شود آزمایش CBR برای بازه ای از تغییرات رطوبت تراکم که معمولاً برابر با بازه تغییرات مجاز رطوبت تراکم در اجرای لایه مورد نظر در کارگاه انتخاب می شود انجام می شود.

پس از متراکم نمودن نمونه ها تحت رطوبت بهینه، آزمایش CBR به دو صورت انجام می شود:

الف) قالب شامل خاک متراکم شده بلافاصله تحت آزمایش قرار می گیرد.

ب) ابتدا نمونه متراکم شده اشباع می شود، در این حالت نمونه در آب مستغرق شده و در حین اشباع شدن سرباری تقریباً معادل با وزن روسازی در محل روی آن قرار می گیرد. در همین مدت مقدار تورم با فاصله ی زمانی مشخص قرائت می شود و در پایان دوره ی استغراق، آزمایش CBR روی نمونه در شرایط اشباع انجام می شود.

انجام آزمایش بر روی نمونه اشباع شده خاک از این جهت انجام می شود که:

$$SE = \frac{h_2}{n_1} \quad SE = \frac{h_2}{n_1}$$

- (۱) معلوم شود که در اثر اشباع شدن چه مقدار از مقاومت خاک کاسته می شود.
- (۲) معلوم شود که آیا نمونه ی خاک دارای قابلیت تورم است یا خیر و اگر دارای این قابلیت است مقدار آن چقدر می باشد.
- از عدد CBR می توان به صورت مقدماتی برای انتخاب خاک لایه های مختلف روسازی^{۵۵} استفاده نمود، جدول زیر نمایانگر این مطلب است.

جدول ۱: تقسیم بندی رتبه خاک براساس CBR

عدد CBR	تقسیم بندی	موارد استفاده	سیستم طبقه بندی	
			اشتب	متعد
۰-۳	ضعیف	خاک پستر	A5 , A6 , A7	OH , CH , MH , OL
۳-۷	ضعیف تا نسبتاً خوب	خاک پستر	A4 , A5 , A6 , A7	OL , MH , OL , CH
۷-۲۰	نسبتاً خوب	زیراساس	A2 , A4 , A6 , A7	OL , CL , ML , SC , SM , SP
۲۰-۵۰	خوب	اساس و زیر اساس	A1-b , A2-5 , A3 , A2-6	GM , Ge , SW , SM , SP , GP
> ۵۰	بسیار خوب	اساس	A1-a , A2-4 , A3	GW , GM

بررسی عوامل موثر بر CBR

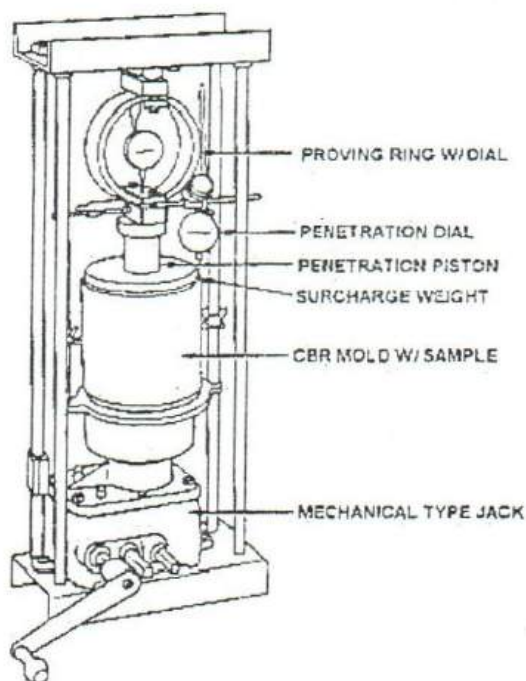
- جنس خاک: CBR خاکهای درشت دانه از خاکهای ریزدانه بیشتر است زیرا هر اندازه خاک بیشتر متراکم شود، CBR آن بیشتر خواهد بود.
- رطوبت: رطوبت تأثیر منفی بر CBR خاکها و به خصوص خاکهای ریزدانه دارد و با افزایش میزان رطوبت خاک از CBR آن کاسته می شود. در صورتی که نمونه مربوط به نقطه ای باشد که بالای سطح آب زیرزمینی مواقع است جهت آزمایش نیازی به اشباع شدن ندارد، بر عکس اگر نقطه مربوط زیر سطح آب زیرزمینی باشد در آن صورت می بایست نمونه خاک متراکم شده در قالب CBR قبلاً اشباع گردد.
- وزن مخصوص: با افزایش وزن مخصوص خاک CBR افزایش می یابد.
- نمره ی انجام آزمایش: در مورد خاکهای درشت دانه که دارای قابلیت تورم نیستند، وجود سربار در مرحله ای که نمونه خاک برای اشباع شدن در داخل آب قرار می گیرد تأخیر چندانی ندارد، در حالی که همین سربار در مرحله ی بارگذاری برای تعیین CBR فوق العاده اهمیت دارد و عدم وجود سربار

^{۵۵} pavement and base

باعث می‌شود که CBR به دست آمده کمتر از مقدار واقعی باشد. از طرف دیگر در مورد خاکهای ریزدانه و به خصوص خاکهای رسی که در اثر جذب آب متورم می‌شوند و میزان تورم بستگی به وزن سربار دارد، وجود سربار در مرحله‌ی اشباع شدن نمونه اهمیت زیادی دارد، در حالی که وجود همین سربار در مرحله‌ی بارگذاری جهت تعیین CBR اهمیت ندارد.

نحوه‌ی تعیین CBR - n درصدی

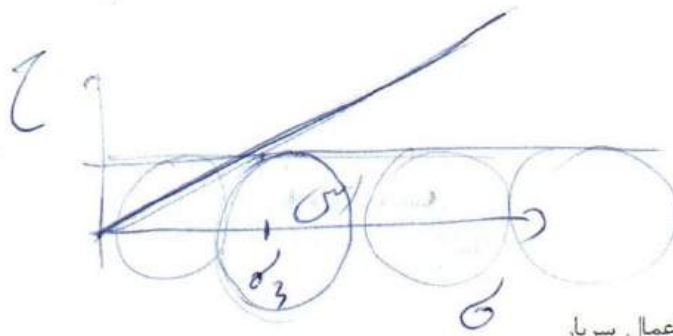
ابتدا CBR به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده را از کوچک به بزرگ مرتب نموده و سپس با توجه به کل نمونه‌ها مشخص می‌نماییم که چند درصد CBR های به دست آمده از آزمایش‌ها از آن CBR بزرگ‌تر یا مساوی هستند، CBR - n درصدی CBR ای است که n درصد CBR ها از آن بزرگ‌تر یا مساوی می‌باشند. مقدار عددی n-CBR درصدی برای n های مختلف قابل تشخیص است.



شکل ۱: شمایی از دستگاه آزمایش CBR

وسایل مورد نیاز

۱. قالب تراکم با قطر ۶ اینچ و حلقه‌ی بالایی و دیسک پایینی ۲
۲. چکش آزمایش تراکم استاندارد یا اصلاح شده
۳. دستگاه جابجایی سنج (LVDT) با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ mm



۴. وزنه های اعمال سربار
۵. پیستون فولادی به قطر ۱/۹۵۴ اینچ (۴۹/۶۳ میلیمتر)
۶. وسیله اعمال فشار با سرعت $\frac{1}{4}$ اینچ در دقیقه
۷. مخزن آب برای اشباع کردن نمونه آزمایشی. ارتفاع مخزن باید طوری باشد که وقتی نمونه آزمایشی داخل آن گذاشته می شود تا ۲/۵ سانتی متر بالای سطح نمونه آزمایشی را آب بگیرد.
۸. گرمخانه
۹. لوازم متفرقه شامل سینی، قاشق، کاردک، کاغذ صافی، ترازو و خط کش لبه تیز

آماده کردن نمونه آزمایشی

۱. آزمایش CBR برای مصالح با حداکثر اندازه دانه های $\frac{3}{4}$ اینچ (۱۹ میلی متر) انجام می شود. در صورتی که مصالح مورد نظر دارای دانه های بزرگتر از ۱۹ میلی متر باشند برای انجام این آزمایش باید دانه بندی مصالح اصلاح شود. اصلاح دانه بندی به صورت حذف دانه های بزرگ تر از ۱۹ میلی متر و جایگزین کردن آنها با دانه های شنی کوچک تر از ۱۹ میلی متر انجام می شود به طوری که درصد ذرات شنی (بین الک شماره ۴ و سه اینچ) در نمونه آزمایشی ثابت بماند.
۲. در صورتی که آزمایش در یک رطوبت تراکم انجام می شود (رطوبت بهینه) سه نمونه آزمایشی با درصد رطوبت مورد نظر باید تهیه شود. این نمونه های آزمایشی با سه انرژی تراکم متفاوت متراکم می شوند تا نمونه هایی با تراکم کمتر، بیشتر و نزدیکی تراکم مورد نظر به دست آید (به عنوان مثال ۱۰، ۲۵ و ۵۶ ضربه در هر لایه). بعد از اشباع کردن نمونه ها (در صورت نیاز) بر روی هر کدام آزمایش نفوذ (CBR) انجام می شود. عدد CBR در تراکم مورد نظر از منحنی "دانشسته خشک نمونه - عدد CBR" به دست می آید.
۳. در صورتی که آزمایش برای بازه ای از رطوبت تراکم انجام می شود برای هر رطوبت تراکم سه نمونه آزمایشی با انرژی تراکم متفاوت مانند حالت قبلی ساخته می شود بعد از اشباع کردن نمونه ها (در صورت نیاز) بر روی هر کدام آزمایش نفوذ انجام می شود. از منحنی های "دانشسته خشک - عدد CBR" برای هر رطوبت تراکم برای تعیین حداقل CBR در بازه رطوبت مورد نظر استفاده می شود.

توضیح

برای شرایطی که عدد CBR در ۱۰۰ درصد حداکثر دانسیته خشک و رطوبت تراکم بهینه، مورد نظر باشد یک نمونه آزمایشی با درصد رطوبت بهینه آزمایش تراکم مربوطه (استاندارد یا اصلاح شده) با رواداری ± 0.5 درصد تهیه می شود و عملیات تراکم (استاندارد یا اصلاح شده) بر روی آن انجام می شود.

روش اشباع کردن نمونه آزمایشی

- قالب را روی صفحه پایه نصب کنید. دیسک پایینی را کنار قالب قرار داده و روی آن یک صفحه کاغذ فیلتر قرار دهید. مطابق آزمایش تراکم مشخص شده نمونه های مورد نظر را متراکم کنید.
- حلقه بالایی قالب را برداشته و سطح نمونه آزمایشی را با استفاده از یک خط کش لبه تیز صاف کنید تا با لبه قالب برابر شود. صفحه پایه و دیسک پایینی را از کف قالب برداشته و قالب و نمونه آزمایشی را وزن کنید. یک صفحه کاغذ فیلتر درشت را روی یک صفحه پایه مشبک قرار دهید. قالب را سروته کرده و آن را روی صفحه پایه قرار دهید. در این حالت سطح نمونه آزمایشی با کاغذ فیلتر در تماس است.
- به اندازه کافی وزنه های سربار روی نمونه آزمایشی قرار دهید. بار وارده برابر بار روسازی انتخاب می شود که به وسیله وزنه های ۵ پوندی (۲۲۷ کیلوگرم) به نمونه آزمایشی وارد می شود و در هیچ حالتی بار وارده نباید از ۱۰ پوند (۴۵۴ کیلوگرم) کمتر باشد.
- نمونه آزمایشی را در آب غوطه ور کنید. به نمونه آزمایشی اجازه دهید در مدت ۲۶ ساعت آب جذب کند. قرائت های تورم را مطابق برنامه مورد نیاز انجام دهید این قرائت ها را می توان در فواصل زمانی صفر، ۱، ۲، ۸، ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت انجام داد.
- بعد از ۹۶ ساعت (۴ روز) نمونه آزمایشی را از آب خارج کرده و سر بارها و صفحه مشبک را بردارید و تا ۱۵ دقیقه صبر کنید تا آب اضافی از نمونه آزمایشی زهکشی شود.
- نمونه آزمایشی را به همراه قالب وزن کنید.

روش انجام آزمایش نفوذ CBR

۱. سرباری به اندازه وزن روسازی (حداقل ۴ کیلوگرم) بر روی نمونه آزمایشی قرار دهید. صورتی که نمونه آزمایشی قبلاً اشباع شده وزن سربار باید به اندازه سرباری باشد که در مرحله اشباع سازی روی نمونه آزمایشی قرار داده شده است.
۲. پیستون نفوذ را با حداقل بار ممکن (حداکثر ۴۴ نیوتن) روی نمونه آزمایشی قرار دهید. عقربه های نیروسنج و اندازه گیری نفوذ را صفر کنید.

A. 1-4

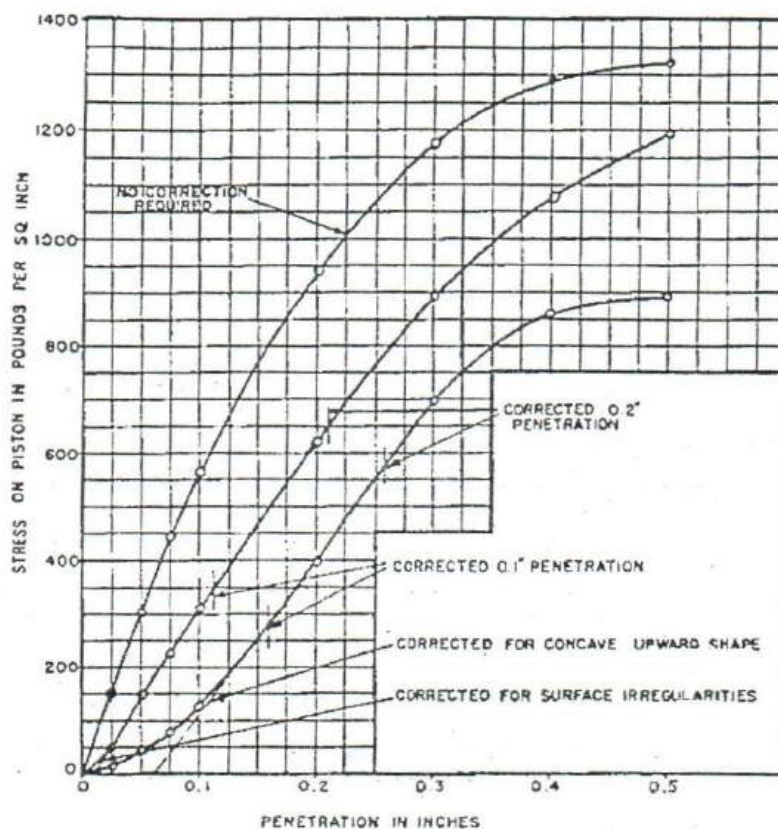
۳. به پیستون نفوذ به گونه ای بار وارد کنید که سرعت نفوذ آن حدود $0/05$ اینچ ($1/27 \text{ mm}$) در دقیقه باشد. مقدار بار را در نفوذهای $0/025$ ، $0/05$ ، $0/075$ ، $0/1$ ، $0/125$ ، $0/15$ ، $0/175$ ، $0/2$ ، $0/3$ ، $0/4$ و $0/5$ اینچ یادداشت کنید ($0/64$ ، $1/27$ ، $1/91$ ، $2/54$ ، $3/18$ ، $3/81$ ، $4/45$ ، $5/08$ ، $7/62$ ، $10/16$ میلی متر).

اگر مقدار بیشینه بار در نفوذی کمتر از $0/5$ اینچ ($1/27 \text{ mm}$) اتفاق افتاد، آن را یادداشت کنید.

۴. نمونه آزمایشی را از قالب خارج کرده و رطوبت لایه بالایی آن را اندازه گیری کنید ($25/4$ میلی متر بالای نمونه آزمایشی). نمونه های انتخاب شده برای اندازه گیری درصد رطوبت نباید کمتر از 100 گرم برای خاک های ریزدانه و 500 گرم برای خاک های دانه ای باشد.

محاسبات

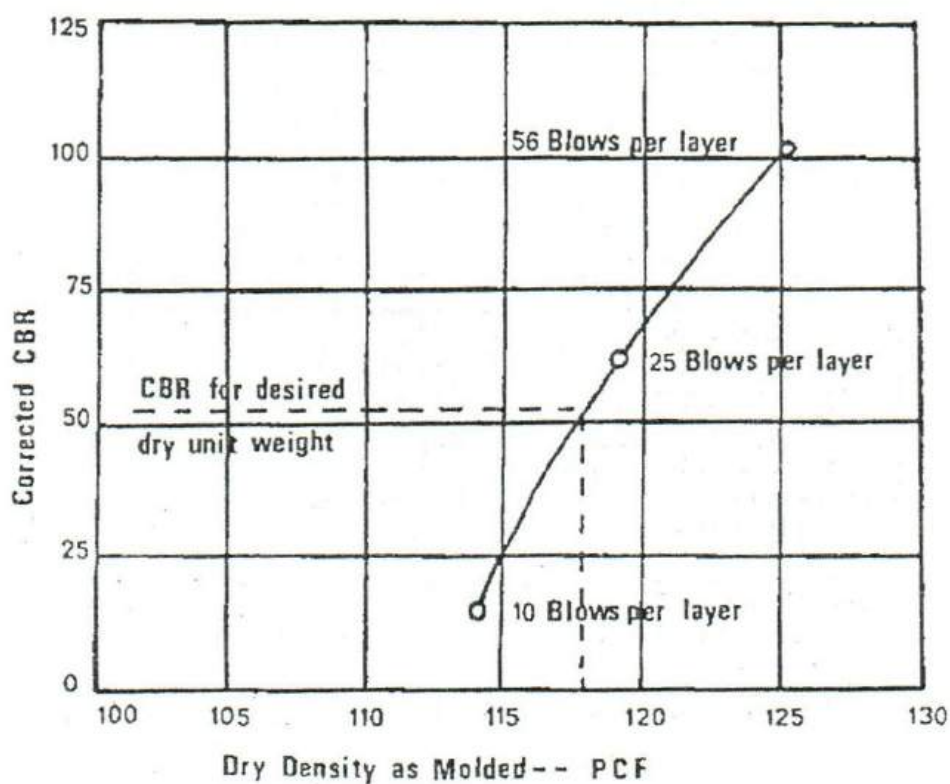
۱. تنش نفوذ پیستون را در واحد پوند بر اینچ مربع محاسبه کرده و منحنی تنش-نفوذ را رسم کنید. در بعضی مواقع تقعر قسمت ابتدایی منحنی تنش-نفوذ به قسمت بالا به دست می آید که می تواند به علت ناهمواری سطح نمونه آزمایشی یا موارد دیگری باشد. در این گونه شرایط منحنی تنش-نفوذ باید اصلاح شود.
- برای تصحیح منحنی مطابق شکل ۲ باید قسمت خطی منحنی را ادامه داد تا محور افقی را در نقطه ای قطع کند. این نقطه محل جدید مبدأ مختصات است و محاسبات باید در محورهای مختصات جدید انجام شود.
- در صورتی که منحنی دارای یک نقطه عطف مشخص است بر روی منحنی از نقطه ای که دارای بیشترین شیب است خطی مماس بر منحنی رسم می شود تا محور افقی را در نقطه ای قطع کند که این نقطه محل جدید مبدأ مختصات است.



شکل ۳. روش تصحیح نمودار آزمایش CBR

۲. از روی منحنی اصلاح شده تنش- نفوذ مقادیر تنش را برای نفوذ ۰/۱ اینچ (۲/۵۴ میلی متر) و ۰/۲ اینچ (۵/۰۸ میلی متر) به دست آورید. نسبت باربری را با تقسیم تنش های به دست آمده بر تنش استاندارد ۱۰۰۰ psi (۶/۹ Mpa) و ۱۵۰۰ psi (۱۰/۳ Mpa) محاسبه کنید. در صورتی که حداکثر تنش در نفوذی کمتر از ۰/۲ اینچ اتفاق افتاده نسبت باربری را برای این نقطه نیز محاسبه کنید. مقدار CBR هر نمونه آزمایشی برابر مقدار محاسبه شده نفوذ ۰/۱ اینچ می باشد. اگر شیب باربری به دست آمده در نفوذ ۰/۲ اینچ بزرگ تر از این نسبت برای ۰/۱ اینچ باشد آزمایش باید دوباره تکرار شود. اگر در آزمایش تکرار نیز نتیجه مشابهی به دست آمد نسبت به دست آمده در ۰/۲ اینچ به عنوان نتیجه آزمایش گزارش می شود.

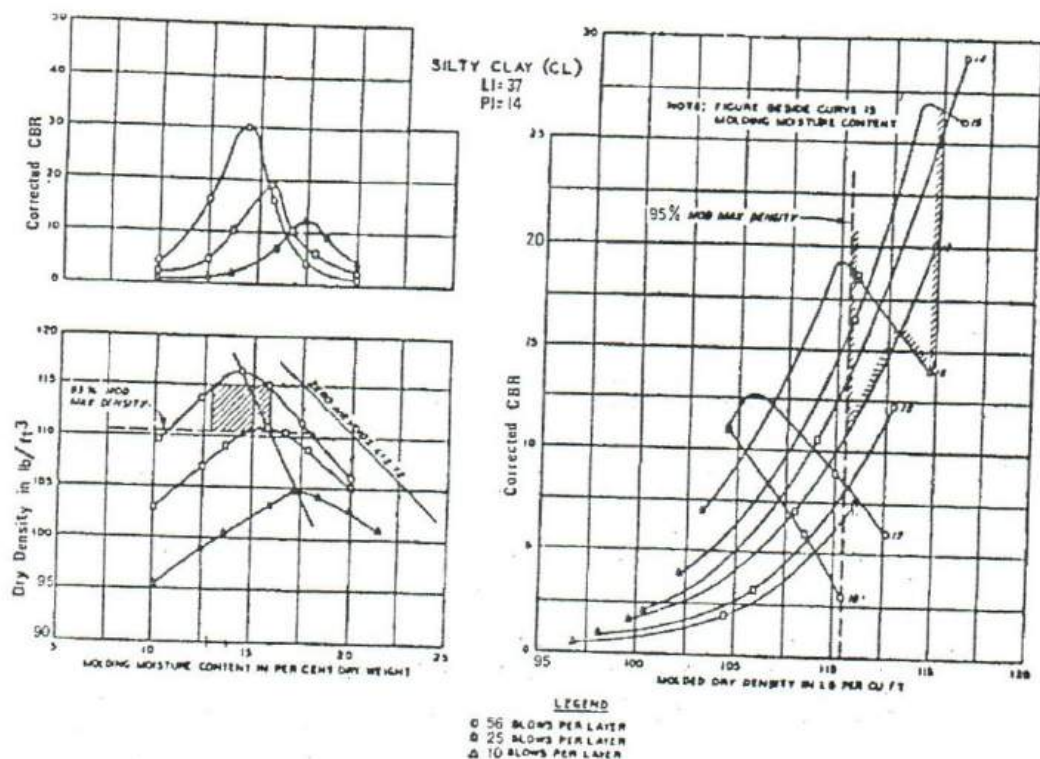
۳. اگر آزمایش برای نمونه هایی با درصد رطوبت ثابت انجام شده است، منحنی وزن مخصوص خشک- عدد CBR را مانند شکل ۳ رسم کنید. CBR طراحی را از روی این منحنی براساس حداکثر دانسیته خشک درخواست شده به دست آورید.



شکل ۳: منحنی وزن مخصوص خشک CBR

۴. اگر آزمایش برای نمونه هایی که در یک بازه درصد رطوبت متراکم می شوند انجام شده است. نتیجه آزمایش های انجام شده در سه انرژی تراکم برای نمونه ها را مطابق شکل ۴ رسم کنید. منحنی های شکل ۴ نشانگر رفتار خاک در بازه انتخاب شده رطوبت تراکم هستند.

CBR طراحی، کمترین اعداد CBR به دست آمده برای نمونه ها در محدوده درصد رطوبت تراکم مشخص شده است که دانسیته آن بین حد پایین مشخص شده برای آزمایش ها و دانسیته به دست آمده به وسیله تراکم نمونه ها در محدوده درصد رطوبت است.



Note: 1—Surcharge = 50 lb soaking and penetration. All samples soaked top and bottom four days. All samples compacted in 5 layers, 10-lb hammer, 18-in. drop in CBR mold.

شکل ۴: محاسبه CBR برای یک بازه رطوبت مشخص شده

گزارش آزمایش

گزارش آزمایش باید شامل موارد زیر باشد:

۱. روش تراکمی که برای نمونه ها استفاده شده (استاندارد یا اصلاح شده)
۲. شرایط نمونه ها (اشباع شده یا بدون اشباع کردن)
۳. وزن مخصوص نمونه ها قبل از اشباع کردن
۴. وزن مخصوص نمونه ها بعد از اشباع کردن
۵. درصد رطوبت نمونه ها قبل از تراکم و بعد از تراکم
۶. درصد رطوبت لایه بالایی (۱ اینچ [۲۵ میلی متر] بالایی) نمونه آزمایشی بعد از اشباع
۷. درصد رطوبت متوسط نمونه آزمایشی بعد از اشباع
۸. میزان تورم نمونه آزمایشی
۹. میزان سربار استفاده شده
۱۰. درصد دانه های روی الک $\frac{3}{4}$ اینچ مصالح اصلی

سؤالات

دانشجویی در راستای انجام آزمایش‌های گوناگون، بر چهار نمونه از خاک بستری رسی آزمایش CBR را انجام داده است. نمونه‌های اشباع یک بار در حضور و بار دیگر بدون حضور سربار اشباع شدند. برای آزمایش غیر اشباع اعمال فشار از طریق پیستون با و بدون وجود سربار انجام گرفت.

۱. به نظر شما این دانشجو مقدار CBR مناسب جهت استفاده در طرح روسازی برای این بستر را چه مقدار در نظر بگیرد؟ با توجه به مقدار CBR در نظر گرفته شده، کیفیت خاک (ضعیف - متوسط - خوب) را چگونه ارزیابی می‌کنید؟ و در چه مواردی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد؟

نفوذ سوزن (mm)	2.5	5
فشار: مصالح استاندارد (kg/cm^2)	70	105
فشار: نمونه غیر اشباع و تست بدون سربار (kg/cm^2)	10.5	21
فشار: نمونه غیر اشباع و تست با سربار (kg/cm^2)	14	31.5
فشار: نمونه اشباع و تست بدون سربار (kg/cm^2)	2.8	8.4
فشار: نمونه اشباع و تست با سربار (kg/cm^2)	3.5	10.5

۲. نمودار شماتیک تغییرات عدد CBR با درصد رطوبت خاک را رسم کنید.

۳. دانشجویی بر روی دو نمونه یکسان از خاکی آزمایش CBR انجام داده است که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. عدد CBR این خاک چند است؟ وضعیت استفاده از این خاک در لایه اساس و زیر اساس چگونه است؟

جدول ۲- نتایج آزمایش CBR بر روی دو نمونه از یک خاک

مقدار نفوذ پیستون (اینچ)	مقدار فشار لازم (مگا پاسکال)	
	آزمایش اول	آزمایش دوم
0.1	2.28	2.13
0.2	4.32	4.17

آزمایش تعیین مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری)

ASTM D-2166

مقدمه

آزمایش تک‌محوری یک روش سریع برای تعیین مقاومت تقریبی خاک‌های چسبنده است. در این آزمایش، مقاومت برشی زهکشی نشده خاک تحت تنش جانبی صفر مورد سنجش قرار می‌گیرد. شرایط تنش جانبی کم (یا صفر) در رسوبات جوان و در عمق‌های کم رخ می‌دهد، بنابراین در طراحی پی‌های سطحی بر روی رسوبات رس اشباع جوان معمولاً از پارامتر مقاومت برشی زهکشی نشده در حالت فشاری محصور نشده^{۵۶} (S_u) استفاده می‌شود.

در آزمایش تک‌محوری، نمونه خاک بدون هیچ‌گونه تنش جانبی در دستگاه تک‌محوری تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. آزمایش با افزایش بار قائم تا رسیدن نمونه به گسیختگی به صورت کنترل کرنش ادامه می‌یابد. در این حالت بار رسم نمودار تنش-کرنش می‌توان مقاومت تک‌محوره خاک (q_u) را به دست آورد. با توجه به امان تنش در لحظه گسیختگی می‌توان دایره مور تنش‌ها در لحظه شکست را رسم کرد. برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک دو حالت وجود دارد:

۱. نمونه اشباع کامل باشد: در این صورت پوش گسیختگی^{۵۷} افقی است و شرایط $\varphi = 0$ می‌باشد و چسبندگی زهکشی نشده از رابطه زیر به دست می‌آید:

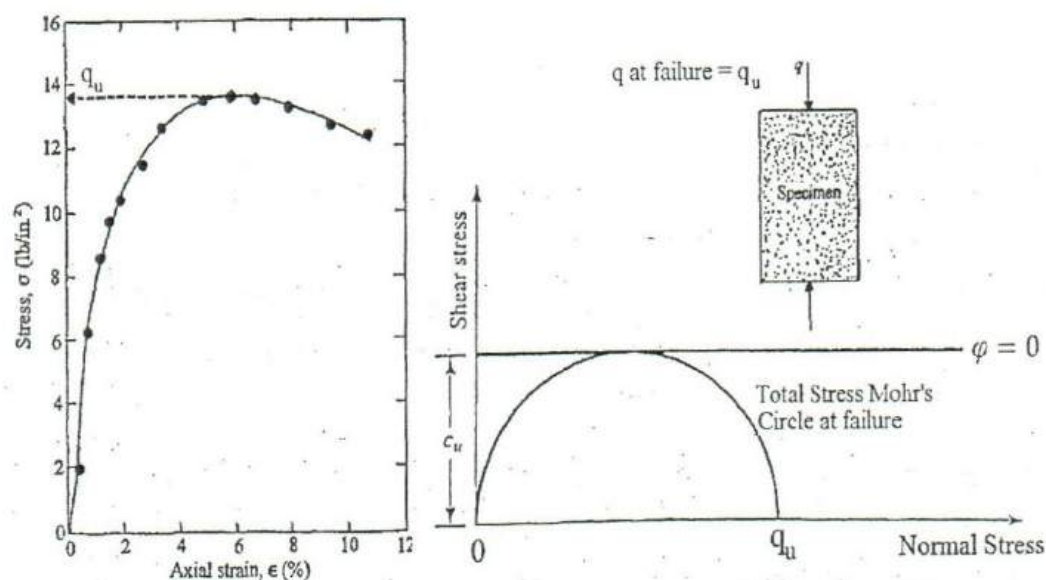
$$S_u = \frac{q_u}{2}$$

۲. نمونه اشباع نباشد: در این صورت پوش گسیختگی افقی نیست و کمی مایل است. در این صورت $\varphi \neq 0$ و $S_u < \frac{q_u}{2}$ می‌باشد. در این حالت برای رسم پوش گسیختگی و انجام محاسبات برای تعیین C_u به زاویه صفحه گسیختگی با افق (θ_r) نیاز است که به صورت چسبی در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود.

^{۵۶} unconfined compression

^{۵۷} failure envelope

در نمونه‌های رس اشباع، مقاومت نهایی با افزایش درصد رطوبت خاک کاهش می‌یابد. در خاکهای غیراشباع نیز در صورتی که وزن مخصوص خشک خاک ثابت بماند، این مقاومت با افزایش درجه اشباع اندکی کاهش می‌یابد.



شکل ۱: نتایج آزمایش تک محوری

جدول ۱: وضعیت خاک رس براساس مقاومت تک محوری

وضعیت خاک رس	q_u (kPa)
بسیار نرم	0-25
نرم	25-50
متوسط	50-100
سفت	100-200
بسیار سفت	200-400
سخت	> 400

در آزمایش تک‌محوری به دلیل عدم اعمال فشار جانبی بر نمونه، نتایج زیر به دست می‌آید:

۱. این آزمایش سریع‌ترین و ساده‌ترین روش برای تعیین مقاومت برشی خاکهای چسبنده است.
 ۲. این آزمایش فقط در خاکهای چسبنده کاربرد دارد زیرا خاکهای دانه‌ای را نمی‌توان به فرم یک استوانه بدون محصورشدگی درآورد.
 ۳. این آزمایش معمولاً برای تعیین مقاومت در جای خاک استفاده می‌گردد.
- آزمایش فشاری تک‌محوری این مزیت را نسبت به آزمایش برشی مستقیم دارد که تنش و کرنش‌ها به شکل یکنواخت در آن ایجاد می‌شوند. همچنین سطح شکست، در ضعیف‌ترین قسمت رسی اتفاق می‌افتد.
- در صورتی که این آزمایش برای نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده از یک نمونه خاک انجام شده می‌توان حساسیت خاک را با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها بدست آورد.
- حساسیت^۱ یک رس برابر است مقاومت تک‌محوری در حالت دست‌نخورده به مقاومت تک‌محوری نمونه بازسازی شده با همان درصد رطوبت.

$$S_t = \frac{q_u \text{ آزمایشی نمونه دست نخورده}}{q_u \text{ آزمایشی نمونه بازسازی شده}}$$

حساسیت اغلب رس‌ها بین ۱ تا ۸ متغیر است. اما رس‌های دریایی که درجه فلوکولاسیون^۲ (درجه تجمع) آن‌ها بالاست دارای حساسیت بین ۱۰ تا ۸۰ هستند.

وسایل مورد نیاز

۱. دستگاه آزمایش فشاری ساده
۲. دستگاه خارج کردن نمونه از نمونه گیر^۳
۳. جابجایی‌سنج (LVDT) با قابلیت اندازه‌گیری تغییر شکل تا ۲۰ درصد طول نمونه آزمایشی
۴. وسایل عمومی مانند ترازو، گرمخانه، خشک کن، نقاله

ابعاد نمونه‌ها

قطر نمونه‌ها در این آزمایش نباید از ۳۰ میلیمتر^۱ (اینچ) کمتر باشد. در این شرایط اندازه بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه آزمایشی باید از یک دهم قطر نمونه آزمایشی کوچک‌تر باشد. در صورتی که نمونه‌ها قطری

^۱ sensitivity

^۲ flocculation

^۳ sample extruder

بزرگ تر از ۷۲ میلیمتر (۱/۴ اینچ) داشته باشند نسبت اندازه بزرگترین دانه ها به قطر نمونه آزمایشی را می توان به ۱/۴ کاهش داد. در مورد نمونه های دست نخورده اگر بعد از انجام آزمایش معلوم شود که دانه هایی با قطر بزرگ تر از مقدار مجاز در نمونه آزمایشی وجود داشته است باید این مطلب در قسمت توضیحات گزارش ذکر شود. نسبت طول به قطر نمونه ها باید بین ۲ تا ۲/۵ باشد.

تهیه نمونه ها

الف- نمونه های دست نخورده. نمونه را به وسیله "وسیله خارج کردن نمونه از نمونه گیر" از نمونه گیر خارج کنید. نمونه هایی که از نمونه گیرهای جدار نازک خارج می شوند را می توان بدون اصلاح دیگری به جز صاف کردن ابتدا و انتهای نمونه برای آزمایش به کار برد. بعد از خارج کردن نمونه از نمونه گیر برای حمل آن باید دقت کرد که هیچ گونه دست خوردگی، تغییر شکل یا تغییر رطوبت در نمونه ایجاد نشود. در صورتی که برای تهیه نمونه ها نیاز به تراشیدن نمونه باشد باید دقت زیادی برای این کار به کار رود تا هیچ گونه دست خوردگی در نمونه ایجاد نشود. برای حفظ رطوبت نمونه اصلاح نمونه باید در اتاق با رطوبت کنترل شده انجام شود.

نمونه های تهیه شده باید با مقطع دایره ای و دو انتهای کاملاً صاف و عمود بر محور نمونه آزمایشی تهیه شوند. در صورتی که حین تراشیدن نمونه آزمایشی دانه هایی از سطح تراشیده شده کنده شده و در سطح آن فرورفتگی هایی ایجاد شود، این فرورفتگی ها را باید با استفاده از خاک های حاصل از تراش بعد از ورز دادن کافی پر کرد. مقداری از باقیمانده های خاک را برای تعیین درصد رطوبت در جعبه مخصوص نگهداری کنید. ب- نمونه های بازسازی شده. نمونه های بازسازی شده را می توان از نمونه های دست نخورده خراب شده یا نمونه هایی که به صورت دست خورده تهیه شده اند آماده کرد. برای حفظ رطوبت نمونه آن را داخل یک کیسه نازک پلاستیکی قرار داده و به وسیله انگشت ورز دهید تا کاملاً یکنواخت شود. هنگام ورز دادن باید دقت شود که هوایی داخل نمونه محبوس نشود. سپس نمونه را در قالبی به اندازه نمونه آزمایشی مورد نظر برای آزمایش با دانسیته نمونه اصلی (که بازسازی می شود) قرار دهید.

ج- نمونه های ساخته شده. این نمونه ها با تراکم و درصد رطوبت مورد نظر طراح آزمایش ها در قالب ساخته می شوند. تجربه نشان داده است که تراکم و آماده کردن نمونه ها و به دست آوردن نتایج قابل قبول وقتی درصد اشباع بیش از ۹۰ درصد مورد نیاز باشد، مشکل است.

روش آزمایش

۱. نمونه آزمایشی را در دستگاه آزمایش قرار دهید بطوری که محور آن منطبق بر مرکز صفحه نشیمن باشد.
۲. صفحه بارگذاری را به آرامی پایین بیاورید تا با سطح نمونه آزمایشی تماس پیدا کند. در این حالت عقربه های اندازه گیری بار و تغییر مکان را روی صفر تنظیم کنید.
۳. بارگذاری را با نرخ کرنش ثابت بین ۰/۵ تا ۲ درصد اعمال کنید. قرائت های بارگذاری را در کرنش های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۵ درصد انجام دهید.
۴. بارگذاری را تا زمان رسیدن به کرنش ۱۵ درصد یا در شرایطی که با افزایش کرنش، تنش کم شود ادامه دهید. این شرایط به عنوان شرایط گسیختگی نمونه آزمایشی تعریف می شود.
۵. نمونه آزمایشی را از دستگاه خارج کرده و در صورتی که سطح گسیختگی قابل مشاهده ای در آن به وجود آمده زاویه آن را با محور نمونه آزمایشی اندازه بگیرید.
۶. نمونه آزمایشی را برای بدست آوردن درصد رطوبت در ظرف مخصوص قرار دهید.
۷. شکل نمونه آزمایشی بعد از آزمایش را برای ثبت در گزارش آزمایش رسم کنید یا از آن عکس تهیه کنید.

محاسبات

۱. کرنش محوری را با دقت ۰/۱ درصد با استفاده از رابطه ۱ محاسبه کنید.

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

ΔL : تغییر طول نمونه آزمایشی خوانده شده از کرنش سنج (میلی متر)

L_0 : طول اولیه نمونه آزمایشی (میلی متر)

۲. سطح مقطع متوسط نمونه آزمایشی را با استفاده از رابطه ۲ محاسبه کنید.

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_l} \quad (2)$$

A_0 : سطح مقطع متوسط اولیه نمونه آزمایشی (mm^2)

ε_l : کرنش محوری در بار مورد نظر

۳. تنش محوری فشاری را با دقت ۱ کیلوپاسکال با استفاده از رابطه ۳ محاسبه کنید.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

P : نیروی وارد شده به نمونه آزمایشی (N)

A : سطح مقطع نمونه آزمایشی در زمان وارد شدن بار P (بدست آمده از رابطه ۲)

منحنی تنش-کرنش نمونه ها رسم کنید و مقاومت هر نمونه آزمایشی را به دست آورید. (q_u) مقاومت نمونه آزمایشی برابر تنش در لحظه گسیختگی (تنش حداکثر یا تنش در کرنش ۱۵ درصد) است.

مدول الاستیسیته سکانتی مربوط به ۵۰ درصد تنش گسیختگی را برای هر کدام از نمونه ها به دست آورید.

- این قسمت جزو محاسبات لازم برای این آزمایش در ASTM D 2166 نیست. همچنین لازم به ذکر است که محاسبه ضریب الاستیسیته با استفاده از این روش به نتایج خوبی منتهی نمی شود و بهتر است از آزمایش های دیگر استفاده شود.

روش ارائه گزارش

گزارش آزمایش باید شامل موارد زیر باشد:

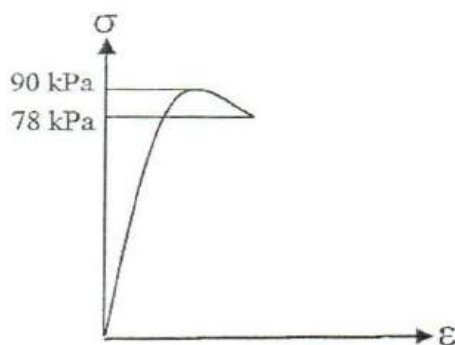
۱. مشخصات نمونه ها از قبیل توصیف مشاهده ای نمونه ها، نوع خاک، نوع نمونه ها از نظر دست خوردگی (دست نخورده-بازسازی شده، ساخته شده)
۲. وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت و درصد اشباع نمونه ها
۳. ابعاد نمونه ها
۴. شکل نمونه آزمایشی بعد از گسیختگی و زاویه صفحه گسیختگی نسبت به محور نمونه آزمایشی در صورت وجود صفحه گسیختگی خاص
۵. سرعت اعمال کرنش محوری در آزمایش
۶. منحنی تنش-کرنش نمونه ها
۷. حدود آتیرگ نمونه ها
۸. حداکثر اندازه دانه در دانه بندی نمونه ها

توضیحات

۱. این آزمایش را نمی توان به عنوان جانشینی برای آزمایش تحکیم نیافته و زهکشی نشده (ASTM D2850) استفاده کرد.
۲. نمونه هایی که ساختار ترک خورده داشته باشند، لس ها، رس های بسیار ضعیف یا نمونه هایی که حاوی مقادیر قابل توجهی سیلت یا ماسه باشند در آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده مقاومت بیشتری نسبت به این آزمایش خواهند داشت. همچنین مقاومت به دست آمده برای نمونه های غیراشباع در این آزمایش و آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده یکسان نیست.

سؤالات

۱. نمونه ای از یک نوع خاک با قطر و ارتفاع ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر تحت آزمایش تک محوری قرار گرفته است. تنش محوری در لحظه شکست معادل $3/5 \text{ kg/cm}^2$ است و خط شکست با امتداد قائم زاویه ۳۰ درجه می سازد.
 - الف) مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک چه قدر است؟
 - ب) آیا نمونه آزمایش شده اشباع بوده است؟ چرا؟
 - ج) به نظر شما نمونه آزمایش شده چه نوع رسی (نرم - سفت) است؟
 - د) چرا همین آزمایش را نمی توان روی نمونه ماسه انجام داد؟
 - ه) یک مزیت این آزمایش را نسبت به آزمایش برش مستقیم بیان کنید.
۲. تاثیر نسبت طول به قطر نمونه در آزمایش تک محوری را توضیح دهید. کدام نسبت برای آزمایش مناسب است؟
۳. مزایا و معایب آزمایش تک محوری چیست؟
۴. آزمایش تک محوری برای چه خاکی قابل انجام است؟
۵. پارامتر چسبندگی (c) بدست آمده از آزمایش تک محوری و سه محوری (UU) را از نظر کمی مقایسه کنید.
۶. مقدار مقاومت فشاری محدود نشده بدست آمده از آزمایش تک محوری برای یک نمونه خاک رس 43.2 kN/m^2 بدست آمده است. سفتی این خاک چگونه است؟
۷. پدیده تیکسوتروپی در خاک رس چیست؟ نمودار شماتیک آن را رسم کنید.
۸. علت حساسیت خاک رس چیست؟
۹. نتیجه آزمایش تک محوری روی رس اشباع به صورت منحنی تنش - کرنش زیر است. چسبندگی زهکشی نشده را برای این خاک محاسبه نمایید.



آزمایش برش مستقیم

ASTM D-3080

مقدمه

مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی مواد سطح آن خاک است که می‌تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی، بروز کند. یکی از روش‌های عمومی تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک رسم مستقیم پوش گسیختگی در فضای $(\tau - \sigma)$ با معلوم بودن تنش‌های برشی و عمودی در صفحه گسیختگی است. استفاده از این روش در آزمایش برش مستقیم میسر است.

آزمایش برش مستقیم^۱ یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین آزمایش‌های مقاومت برشی است. در این آزمایش، نمونه خاک درون یک جعبه برشی قرار می‌گیرد که از دو بخش ثابت و متحرک تشکیل شده است. پس از قرار دادن نمونه خاک درون جعبه، نیروی قائم توسط بارگذاری قائم به نمونه اعمال می‌شود. همچنین امکان اعمال نیروی برشی توسط اهرم افقی به نمونه وجود دارد.

برحسب دستگاه و تجهیزات به کار رفته، آزمایش برش را می‌توان به دو صورت «کنترل تنش^۲» و «کنترل کرنش^۳» انجام داد.

در آزمایش کنترل کرنش، تغییر مکان برشی با سرعت ثابت به نیمه بالایی جعبه برشی اعمال می‌شود و نیروی برشی مقاوم نظیر هر تغییر مکان برشی، اندازه‌گیری می‌شود. مزیت آزمایش کنترل کرنش آن است که در ماسه‌های متراکم امکان اندازه‌گیری مقاومت برشی حداکثر^۴ و هم مقاومت برشی نهایی^۵ یا باقی‌مانده^۶ وجود دارد.

در آزمایش برش مستقیم در حالت کنترل تنش، نیروی برشی اعمالی با سرعت معین از صفر آغاز شده و به تدریج افزایش داده می‌شود و تغییر مکان حاصل از آن ثبت می‌گردد. در آزمایش کنترل تنش، تنها مقاومت

^۱ direct shear test

^۲ stress controlled

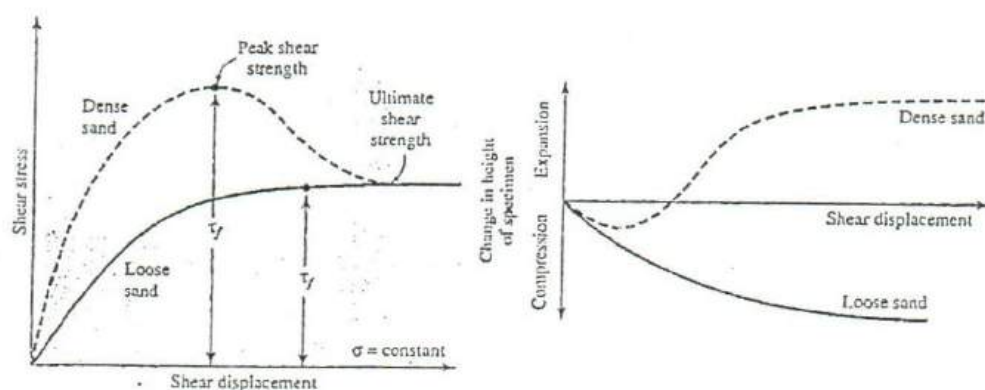
^۳ strain controlled

^۴ peak shear strength

^۵ ultimate shear strength

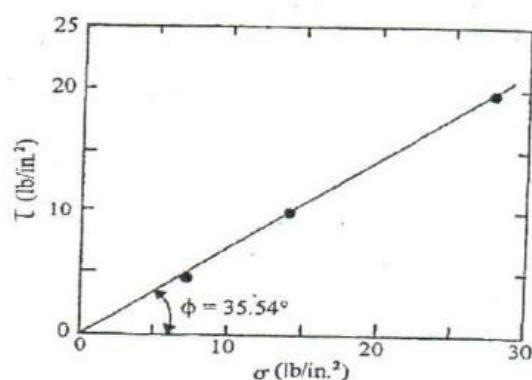
^۶ residual

برشی حداکثر قابل اندازه‌گیری است. این آزمایش مدل واقع‌بینانه‌تری از وضعیت در محل نسبت به آزمایش کنترل کرنش به دست می‌دهد.



شکل ۱: نمودار تنش برشی و تغییرات ارتفاع نمونه در مقابل تغییر مکان برشی برای ماسه شل و متراکم در آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های مختلف از یک نوع خاک با تنش‌های قائم متفاوت تکرار می‌شود. با مشخص بودن بار قائم و اندازه‌گیری نیروی برشی در هنگام برش می‌توان تنش‌های قائم و برشی در حین شکست را محاسبه کرد. پس از انجام محاسبات، نتایج در نمودار τ - σ مطابق شکل زیر منعکس می‌شود. با برآزش خطی به نقاط موجود در نمودار، پوش گسیختگی خاک و به تبع آن پارامترهای مقاومت برشی ϕ و c به دست می‌آید.



شکل ۲: تعیین پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم

همان‌طور که در شکل نشان داده شد، بسته به نوع خاک در خاک‌های متراکم و سست رفتارهای متفاوت خواهیم داشت. در خاک‌های متراکم نقطه گسیختگی خاک را می‌توان نقطه اوج منحنی دانست که در آن خاک به حداکثر مقاومت خود رسیده است. در خاک‌های سست، برای معرفی گسیختگی هیچ نقطه‌ای اوجی

در نمودار وجود ندارد. بنابراین مقاومت گسیختگی خاک را بر مبنای تغییر شکل تعیین کرده و آزمایش را در جایی متوقف می‌کنند که تغییر شکل افقی خاک حدوداً به ۱۵ تا ۲۰ درصد طول نمونه رسیده باشد.

می‌توان تغییر شکل قائم خاک در طول آزمایش را نیز اندازه‌گیری کرد و با استفاده از نمودار تقریبی حجم نمونه در طی آزمایش را ترسیم نمود. در خاک‌های سست، به دلیل تراکم پایین همواره با کاهش حجم مواجه هستند. خاک‌های متراکم، در ابتدا کمی کاهش حجم دارند، اما در ادامه به دلیل تراکم بالا، نیاز به کمی افزایش حجم در حین گسیختگی خواهد داشت زیرا در حین گسیختگی باید فقل و بست سطوح متراکم این خاک‌ها از یکدیگر باز شود.

موارد کاربرد آزمایش برش مستقیم

یکی از کاربردهای آزمایش مستقیم در مسائل مربوط به طراحی و ساخت سدها است. از این آزمایش برای تعیین مقاومت برشی آبرفت، مقاومت برشی منابع قرضه که نهایتاً در بخش‌های مختلف بدنه سد و بررسی لغزش شیروانی‌های مشرف به مخزن استفاده می‌شود. برای احداث مترو، تونل، معادن زیرزمینی و خاکبرداری پی سازه‌ها، داشتن اطلاعات حاصل از نتایج آزمایش برش مستقیم ضروری است. از کاربردهای دیگر این آزمایش، تلفیق نتایج آن با نتایج به دست آمده از آزمایش سه‌محوری^۷ است. به علت زیاد بودن هزینه آزمایش سه‌محوری و مشکلات آن، معمولاً تعداد کمتری از آن انجام می‌شود و با انجام تعداد بیشتری آزمایش مستقیم که ارزان تر است و تلفیق نتایج آن، پارامترهای مورد نیاز به دست می‌آید.

اشکالات آزمایش برش مستقیم

۱. با توجه به اینکه شرایط زهکشی نمونه آزمایشی در این آزمایش قابل کنترل نیست اصولاً این آزمایش برای مدل کردن شرایط زهکشی شده به کار می‌رود. به این صورت که سرعت بارگذاری به گونه ای انتخاب می‌شود که آب حفره ای امکان زهکشی کامل را داشته باشد ولی در هر صورت کنترل این مسئله امکان پذیر نیست.
۲. در این آزمایش توزیع تنش و تغییر شکل های برشی نمونه‌ها یکنواخت نیست همچنین سطح نمونه آزمایشی دائماً در حال تغییر است بنابراین امکان محاسبه تنش های دقیق همچنین کرنش ها و پارامترهای مرتبط نظیر مدول تغییر شکل وجود ندارد.
۳. در حین آزمایش برش مستقیم محوره‌های اصلی تنش دائماً در حال چرخش است.
۴. سطح گسیختگی نمونه آزمایشی در این آزمایش از پیش تعیین شده است که لزوماً ضعیف ترین سطح در نمونه آزمایشی نیست.

^۷ triaxial

- در آزمایش سه محوری هیچ سطح برش اجباری به نمونه تحمیل نشده و برش در هر سطح دلخواهی می تواند رخ دهد. در نتیجه می توان گفت آزمایش سه محوری مقاومت کمتری را گزارش خواهد کرد.

$$\sigma \approx 1.1 \varphi \text{ سه محوری} \quad \sigma \approx \varphi \text{ برش مستقیم} \quad (3^\circ \sim 4^\circ) + \text{سه محوری}$$

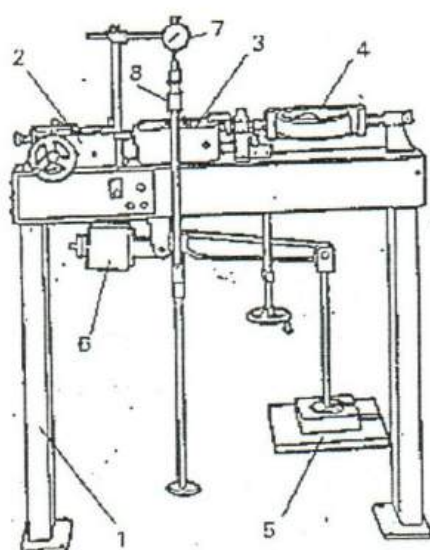
وسایل آزمایش

۱. جعبه برش: جعبه های برش به شکل مربع یا دایره ای برای این آزمایش استفاده می شوند. جعبه برش از فولاد ضدزنگ، آلومینیوم یا برنز ساخته می شود. جعبه برش بر روی یک صفحه افقی به دو قسمت با ضخامت مساوی تقسیم شده است. برای منطبق کردن دو قسمت جعبه از پیچ های تنظیم استفاده می شود. برای تنظیم فاصله بین دو نیمه جعبه نیز از پیچ های تنظیم دیگری استفاده می شود. در سقف و کف جعبه نیز سوراخ هایی برای زهکشی تعبیه شده است.
۲. سنگ های متخلخل: این سنگ ها برای زهکشی نمونه آزمایشی در بالا و پایین نمونه آزمایشی استفاده می شوند.
۳. دستگاه بارگذاری جهت اعمال نیروهای قائم
۴. دستگاه بارگذاری جهت اعمال نیروی برشی
۵. حلقه نیروسنج
۶. اتاق رطوبت
۷. جابجایی سنج^۸ (LVDT)
۸. گرمخانه-کرنومتر و وسایل تراکم برای تهیه نمونه دست خورده

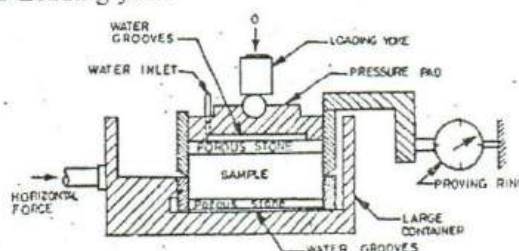
اندازه نمونه آزمایشی

۱. مقدار نمونه خاک مورد نیاز باید به اندازه ای باشد که بتوان از آنها حداقل سه نمونه آزمایشی یکسان با ابعاد مشخص شده تهیه کرد.
۲. حداقل قطر نمونه های دایره ای یا حداقل عرض نمونه های مربعی باید ۲ اینچ (۵۰ میلی متر) باشد. همچنین حداقل عرض یا قطر نمونه آزمایشی نباید کمتر از ۱۰ برابر حداکثر اندازه دانه های خاک مورد نظر باشد.
۳. حداقل ضخامت اولیه باید ۰/۵ اینچ (۱۲ میلی متر) باشد. همچنین این مقدار نباید از ۶ برابر حداکثر اندازه دانه های خاک کمتر باشد.
۴. ضخامت نمونه باید از ۲/۵ برابر قطر آن کوچک تر باشد.

⁸ Linear Variable Differential Transformer



- 1-Frame EL 28-007
- 2-Thyristor controlled drive unit
- 3-Gear box
- 4-Load ring
- 5-Weight hanger
- 6-Lever arm (beam) with counter balance
- 7-Displacement transducer
- 8-Loading yoke



شکل ۳: دستگاه آزمایش برش مستقیم

آماده کردن نمونه‌ها

در این آزمایش بسته به مشخصات مورد نظر می توان از نمونه‌های دست نخورده یا ساخته شده استفاده کرد. نمونه‌های دست نخورده از نمونه‌های دست نخورده بزرگ تری که از محل مورد نظر تهیه شده اند در اندازه مورد نظر بریده می شوند.

در صورتی که آزمایش بر روی نمونه‌های ساخته شده مورد نظر است نمونه آزمایشی مورد نظر در جعبه آزمایش برش مستقیم ساخته می شود. به این ترتیب که با مشخص بودن دانسیته مورد نظر برای نمونه آزمایشی و ابعاد و درصد رطوبت آن وزن مرطوب نمونه آزمایشی محاسبه می شود. سپس درصد رطوبت نمونه ای از خاک مورد نظر را به درصد رطوبت مورد نظر رسانده و به اندازه وزن نمونه آزمایشی از آن جدا می کنیم. بسته به اندازه نمونه آزمایشی می توان خاک را در یک یا چند لایه در داخل جعبه ریخته و با کوبیدن، آن را به حجم مورد نظر (اندازه جعبه) رساند.

روش آزمایش

۱. در صورتی که از نمونه آزمایشی دست نخورده استفاده می شود، نمونه آزمایشی مورد نظر را بر روی سنگ متخلخل در داخل جعبه قرار دهید و جعبه برش را بر روی قاب دستگاه برش مستقیم نصب کنید. در صورتی که نمونه آزمایشی در داخل جعبه برش ساخته می شود جعبه برش را پس از ساختن نمونه آزمایشی بر روی قاب دستگاه برش مستقیم نصب کنید.
۲. دستگاه بارگذاری برشی را نصب کنید. در این حالت نباید هیچ نیرویی به جعبه برش وارد شود.

۳. دستگاه اندازه گیری جابجایی افقی را نصب کنید. عقربه دستگاه را بر روی صفر تنظیم کنید یا قرائت اولیه آن را یادداشت نمایید.
۴. یک سنگ متخلخل را به همراه صفحه انتقال بار قائم بر روی نمونه آزمایشی در جعبه برش قرار دهید.
۵. دستگاه اعمال بار قائم را نصب کنید.
۶. یک بار کوچک قائم به نمونه آزمایشی اعمال کنید (معمولاً باری در حدود 7 kPa اعمال می شود).
- کنترل کنید که همه اجزای دستگاه به درستی نصب شده باشند.
۷. دستگاه اندازه گیری جابه جایی قائم را نصب و تنظیم کنید.
۸. در صورتی که آزمایش بر روی نمونه های اشباع انجام می شود، جعبه برشی را از آب پر کنید.
۹. بار قائم مورد نظر را به نمونه آزمایشی اعمال کنید. تغییر ارتفاع نمونه آزمایشی در اثر بار قائم را با گذشت زمان مانند آزمایش تحکیم اندازه بگیرید.
۱۰. بعد از اتمام تحکیم اولیه نمونه آزمایشی پیج های تنظیم جعبه برشی را باز کرده و به وسیله پیج های تنظیم فاصله دو قسمت جعبه، این فاصله را در حدود $0.25/0.6$ اینچ (میلی متر) تنظیم کنید.
۱۱. اعمال بارش
 - ۱.۱۱. سرعت اعمال تغییر شکل برشی مناسب را محاسبه کنید.
 - ۲.۱۱. قرائت اولیه تغییر شکل برشی، قائم و نیروی برشی را یادداشت کنید.
 - ۳.۱۱. تغییر شکل برشی را با سرعت محاسبه شده به نمونه آزمایشی اعمال کنید و حین اعمال بارش قرائت های مربوطه به جابجایی افقی-قائم و نیروی برشی را انجام دهید. فاصله قرائت ها باید به گونه ای باشد که تغییر شکل نمونه آزمایشی در فاصله دو قرائت کمتر از ۲ درصد عرض نمونه آزمایشی باشد.
 - ۴.۱۱. بعد از رسیدن به گسیختگی آزمایش را متوقف کنید. تنش گسیختگی تنش حداکثر ایجاد شده در نمونه آزمایشی حین برش [در صورت وجود اکسترم در منحنی تنش-کرنش] یا تنش در نمونه آزمایشی در تغییر شکل نسبی ۱۵ تا ۲۰ درصد تعریف می شود.
 - ۵.۱۱. بار قائم را از روی نمونه آزمایشی بردارید.
 - ۶.۱۱. در صورتی که نمونه آزمایشی از خاک چسبنده است با لغزاندن، دو قسمت جعبه برش را از هم جدا کنید و وضعیت صفحه برش را در گزارش تشریح نمایید.
 - ۷.۱۱. نمونه آزمایشی از جعبه برش خارج کرده و درصد رطوبت آن را اندازه گیری کنید.
 ۱۲. روند بالا را برای نمونه های دیگر با فشار قائم مشخص شده تکرار کنید.

محاسبه سرعت اعمال تغییر شکل نسبی

با توجه به اینکه هدف از این آزمایش به دست آوردن مقاومت تحکیم یافته زهکشی شده نمونه ها است سرعت بارگذاری برشی باید به گونه ای انتخاب شود که در موقع گسیختگی فشار آب حفره ای اضافی در نمونه

آزمایشی وجود نداشته باشد. از رابطه زیر می توان برای تعیین حداقل زمان لازم برای آزمایش (از ابتدای بارگذاری تا زمان گسیختگی) استفاده کرد:

$$t_f = 50 t_{50}$$

t_f : زمان کل آزمایش از ابتدای بارگذاری برشی تا زمان گسیختگی بر حسب دقیقه

t_{50} : زمان لازم برای رسیدن نمونه آزمایشی به ۵۰ درصد تحکیم اولیه تحت اثر بار قائم آزمایش بر حسب دقیقه

در صورتی که زمان ۹۰ درصد تحکیم نمونه آزمایشی در دسترس باشد می توان از رابطه زیر تخمین زد.

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4.25}$$

برای ماسه های تمیز و متراکم که به سرعت زهکشی می شوند می توان t_f را برابر ۱۰ دقیقه در نظر گرفت. برای ماسه های متراکم که بیشتر از ۵ درصد ریزدانه داشته باشند t_f را می توان ۶۰ دقیقه انتخاب کرد.

سرعت اعمال تغییرشکل نسبی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$d_r = \frac{d_f}{t_f}$$

d_r : سرعت اعمال تغییرشکل نسبی (اینچ بر دقیقه یا میلی متر بر دقیقه)

d_f : تغییرشکل نسبی نمونه آزمایشی در زمان گسیختگی

t_f : زمان کل آزمایش

d_r به عوامل متعددی از جمله تاریخچه بارگذاری بر روی نمونه آزمایشی و نوع مصالح بستگی دارد به عنوان حدس اولیه برای خاک های ریزدانه عادی تحکیم یافته یا با تحکیم یافتگی کم می توان d_r را ۰/۵ اینچ (۱۲ میلی متر) در نظر گرفت. برای شریط دیگر $d_f = 0.2$ in (۵ میلی متر) مناسب خواهد بود.

محاسبات:

۱. تنش برشی اسمی را برای هر گام بارگذاری به صورت زیر محاسبه کنید.

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

۳: تنش برشی اسمی

F: نیروی برشی اندازه گیری شده

A: سطح اولیه نمونه آزمایشی

۲: تنش قائم بر روی نمونه آزمایشی را محاسبه کنید.

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

۴: تنش قائم وارد بر نمونه آزمایشی

N: نیروی قائم اعمالی بر روی نمونه آزمایشی

۳: نرخ واقعی اعمال تغییر شکل به نمونه آزمایشی را محاسبه کنید.

$$d_r = \frac{d_n}{t_e}$$

d_r : نرخ اعمال تغییر شکل

d_n : تغییر شکل نسبی نمونه آزمایشی

t_e : زمان آزمایش

۴: مشخصات زیر را محاسبه کنید.

تخلخل اولیه نمونه آزمایشی - درصد رطوبت نمونه آزمایشی - دانسیته خشک نمونه آزمایشی

۵: نمودار تغییر مکان نسبی - تنش برشی اسمی را برای نمونه آزمایشی رسم کنید.

۶: مقادیر تنش برشی اسمی بیشینه یا تنش برشی اسمی گسیختگی را برای هر کدام از نمونه‌ها پیدا کنید.

۷: مقادیر تنش برش گسیختگی در مقابل تنش قائم را برای همه آزمایش‌ها روی نمودار مشخص کرده و بهترین خط را به این نقاط برازش دهید. پارامترهای مدل گسیختگی مورکولمب را با استفاده از خط برازش داده شده به دست آورید.

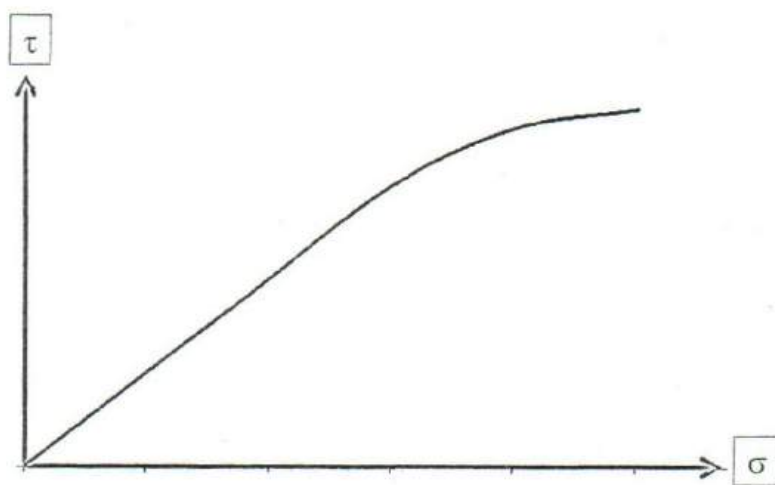
۸: نمودار تغییر شکل قائم نمونه آزمایشی در مقابل تغییر مکان نسبی افقی را برای نمونه‌ها رسم کنید. این منحنی تغییرات حجم نمونه آزمایشی را به ازای تغییر شکل‌های برشی نشان می‌دهد.

سوالات

۱. در آزمایش برش مستقیم بر روی دو نمونه از خاک، نیروهای قائم نظیر گسیختگی برابر N_1 و N_2 و نیروهای برشی برابر T_1 و T_2 حاصل شده‌اند. اگر ابعاد جعبه برش برابر $b \times b$ باشد، درستی یا نادرستی گزاره‌های زیر را با ذکر دلیل تعیین کنید.

 - با توجه به توضیحات داده شده، روش انجام آزمایش فقط می‌تواند روش کنترل تنش باشد.

- اگر نمونه ماسه متراکم باشد که با اعمال بار افقی به گسیختگی می رسد حین گسیختگی با افزایش حجم مواجه می شویم.
 - اگر روش انجام آزمایش، کنترل تغییر شکل باشد، هم مقاومت برشی حداکثر و هم مقاومت برشی نهایی قابل اندازه گیری است.
 - جهت محاسبه ی زاویه ی اصطکاک این خاک به ابعاد جعبه نیازی نیست .
 - در این آزمایش در صورت انجام به روش کنترل تغییر شکل، صفحه برش در راستایی اتفاقی رخ داده است.
۲. تفاوت انجام آزمایش برش مستقیم به دو روش کنترل تنش و کنترل کرنش را توضیح دهید و مزیت هر روش را ذکر کنید.
۳. دانشجویی با دو آزمایش برش مستقیم و سه محوری، پارامترهای مقاومتی (C و ϕ) را برای یک خاک بدست آورده است. انتظار دارید کدام نتیجه به واقعیت نزدیک تر باشد؟ مقادیر پارامترهای مقاومتی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم بزرگتر از آزمایش سه محوری خواهد بود یا کوچکتر؟ مختصراً توضیح دهید.
۴. اشکالات و مزایای آزمایش برش مستقیم چیست؟
۵. نمودار شماتیک تنش برشی-تغییر شکل برشی و تغییر حجم-تغییر شکل برشی را برای ماسه متراکم و ماسه شل تحت آزمایش برش مستقیم رسم کنید.
۶. چرا ماسه متراکم، حین انجام آزمایش برش مستقیم افزایش حجم می دهد؟
۷. مبنای گسیختگی خاک ماسه شل در حین آزمایش برش مستقیم چیست؟
۸. اگر در آزمایش برش مستقیم از سنگ متخلخل استفاده نشود چه اتفاقی می افتد؟
۹. درجه تخلخل بحرانی چیست؟
۱۰. اگر $N_1 = 54 \text{ kg}$, $N_2 = 108 \text{ kg}$, $T_1 = 36 \text{ kg}$, $T_2 = 68.5 \text{ kg}$, $b = 6 \text{ cm}$ باشد ϕ و c خاک چه قدر است؟
۱۱. اگر خاک مورد آزمایش ماسه خشک متراکم شده با $\phi = 39^\circ$ باشد و تنش قائم 110 kN/m^2 بر روی نمونه اندازه گرفته شده باشد، نیروی برشی بر این نمونه (T_1) که باعث گسیختگی می شود چه قدر است؟ ($b = 6 \text{ cm}$)
۱۲. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ماسه شل و متراکم حدوداً چقدر است؟ با افزایش تیزگوشه بودن دانه های ماسه این مقدار چه تغییری می کند؟
۱۳. دانشجویی بر روی خاک شن آزمایش برش مستقیم انجام داده است. پوش گسیختگی بدست آمده از آزمایش، مطابق شکل ۱ می باشد. چرا شیب پوش گسیختگی با افزایش تنش نرمال کاهش یافته است؟



شکل ۱- پوش گسیختگی حاصل از آزمایش برش مستقیم بر روی شن

آزمایش تعیین مقاومت تحکیم نیافته زهکشی نشده خاک‌های چسبنده

(سه محوری UU)

ASTM D-2850

مقدمه

آزمایش سه محوری، قابل اعتمادترین روش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی است که از آن برای انجام تحقیقات و آزمایش‌های لازم در کارهای معمول مهندسی ژئوتکنیک استفاده می‌شود. در این آزمایش، نمونه توسط یک غشای لاستیکی پوشانده شده و در داخل یک محفظه‌ی پلاستیکی که معمولاً پر از آب یا گلیسرین است، قرار داده می‌شود. به کمک مایع موجود در داخل محفظه، نمونه تحت فشار محفظه‌ای محدود کننده^۹ قرار می‌گیرد. گاهی برای ایجاد فشار محفظه‌ای محدودکننده از هوا استفاده می‌شود. برای ایجاد گسیختگی برشی در نمونه، تنش محوری به وسیله یک میله‌ی بارگذاری قائم اعمال می‌گردد. این تنش، تنش انحرافی^{۱۰} یا تفاوت تنش‌های اصلی نامیده می‌شود. این کار را می‌توان به یکی از دو روش زیر انجام داد:

۱- کنترل تنش: با اضافه کردن وزنه‌هایی با گام مساوی تا لحظه گسیختگی نمونه

۲- کنترل کرنش: اعمال تغییر شکل محوری با سرعت ثابت به وسیله یک پرس هیدرولیک.

دو مسیر برای ورود و خروج در بالا و پایین نمونه تعبیه شده است که به همراه یک شیر کنترلی امکان کنترل ورود و خروج آب به نمونه از بالا و پایین را فراهم می‌کنند. بر اساس باز یا بسته بودن شیرهای زهکشی نمونه در دو مرحله‌ی اعمال فشار همه جانبه و مرحله بارگذاری، معمولاً سه نوع آزمایش سه محوری استاندارد انجام می‌شود:

۱- آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده^{۱۱} (CD): در این نوع آزمایش در هر دو مرحله اعمال تنش همه جانبه و تنش تفاضلی، شیر زهکشی نمونه باز است؛ بنابراین نمونه هم تحکیم می‌یابد و هم برش زهکشی شده دارد.

۲- آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده^{۱۲} (CU): در این نوع آزمایش در مرحله اعمال تنش‌های همه جانبه شیر زهکشی نمونه باز است؛ بنابراین نمونه تحکیم می‌یابد. اما در مرحله اعمال تنش تفاضلی شیر زهکشی بسته است و نمونه به صورت زهکشی نشده تحت برش قرار می‌گیرد.

^۹ confining pressure

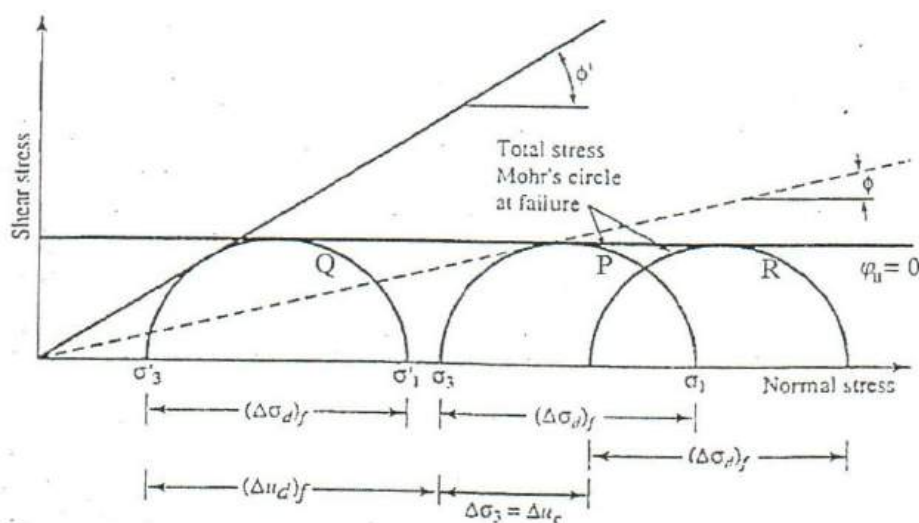
^{۱۰} deviatoric stress

^{۱۱} consolidated-drained

^{۱۲} consolidated-undrained

۳- آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده^{۱۳} (UU): در این نوع آزمایش، شیر زهکشی نمونه در هر دو مرحله اعمال تنش‌های همه جانبه و تنش تفاضلی بسته است. بنابراین نمونه تحکیم نمی‌یابد و به صورت زهکشی نشده تحت برش قرار می‌گیرد.

از آنجا که در آزمایش UU، شیرهای زهکشی در هر ۲ مرحله بسته است، بنابراین تنش‌های اعمالی به نمونه، به فشار آب حفره‌ای منتقل می‌گردد. در نتیجه اگر دایره موهر تنش موثر خاک مطابق دایره (a) فرض گردد، این دایره در آزمایشات مختلف تغییری نمی‌کند (تنش موثر ثابت است).



شکل ۱: نتیجه آزمایش UU

چون تنش موثر خاک ثابت است، مقاومت برشی خاک نیز تغییری نخواهد کرد و دایره موهرهای تنش کل در آزمایش‌های UU همگی با هم برابر خواهد بود. بنابراین پوش گسیختگی در آزمایش سه محوری UU بر روی نمونه‌های اشباع به صورت افقی است و به همین دلیل به این حالت $\phi = 0$ نیز گفته می‌شود و مقاومت برشی خاک در این حالت به صورت رابطه زیر است:

$$\tau_f = S_u$$

که S_u مقاومت برشی زهکشی نشده است.

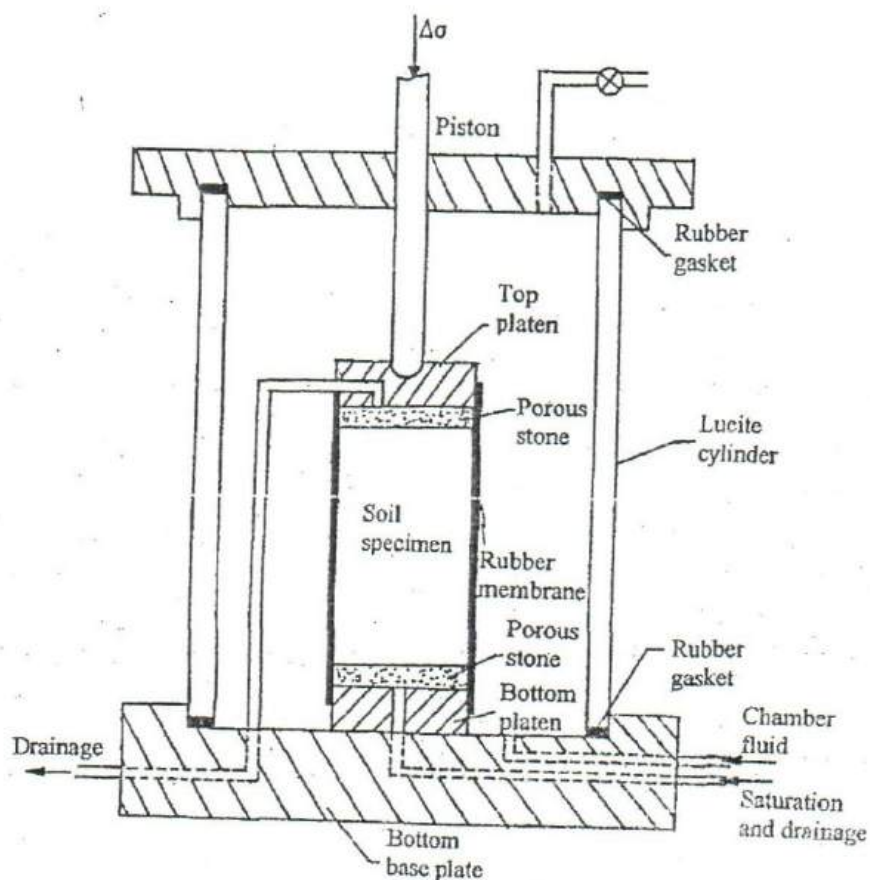
¹³ unconsolidated-undrained

پوش گسیختگی "رس‌های ترک‌دار" در آزمایش سه محوری UU، به ازای مقادیر فشار جانبی کم، حالت انحناء دارد. این مسأله به این علت است که به هنگام نمونه‌گیری، ترک‌های نمونه از هم باز می‌شوند و در نتیجه مقاومت کمتری به دست می‌آید. اما پس از آن که فشار جانبی به اندازه کافی افزایش یافت، ترک‌ها دوباره بسته می‌شوند و مقاومت برشی به مقدار ثابتی می‌رسد.

یکی از کاربردهای آزمایش UU، کنترل پایداری کوتاه مدت خاکریز اجرا شده بر روی لایه رس اشباع است. در این حالت تحت بارگذاری خاکریز، لایه‌ی رس مستعد وقوع تحکیم است، اما چون بارگذاری سریع است، امکان زهکشی به خاک داده نمی‌شود، بنابراین لایه رس در شرایط تحکیم نیافته است. همچنین زمان کافی برای زهکشی وجود ندارد، پس برش نیز زهکشی نشده رخ می‌دهد. از جمله‌ی موارد دیگر می‌توان به اجرای سریع سد خاکی با هسته‌ی عریض بر روی لایه‌ی رس و اجرای سریع شالوده سطحی بر روی لایه رس اشباع نرم اشاره کرد.

وسایل آزمایش در حالت کنترل کرنش

۱. محفظه فشار (سلول سه محوری)
۲. وسیله اعمال کرنش محوری با نرخ کنترل شده
۳. نیروسنج برای اندازه‌گیری بار محوری
۴. دستگاه کنترل و اندازه‌گیری فشار هیدرواستاتیک سلول سه محوری
۵. پایه و سرپوش فلزی نفوذناپذیر هم قطر نمونه آزمایشی برای اتصال سروته نمونه آزمایشی به دستگاه. وزن سرپوش باید به اندازه‌ای باشد که فشار وارد بر نمونه آزمایشی بر اثر وزن سرپوش کمتر از 1 kPa باشد.
۶. جابجایی‌سنج (LVDT) برای اندازه‌گیری تغییر ارتفاع نمونه آزمایشی. جابجایی‌سنج مورد استفاده باید دقتی معادل 0.03% درصد ارتفاع نمونه آزمایشی داشته باشد همچنین امکان اندازه‌گیری تغییر شکل تا 20% درصد ارتفاع نمونه آزمایشی را داشته باشد.
۷. غشاء لاستیکی برای آب بند کردن نمونه آزمایشی. ضخامت غشاء نباید از 1% درصد قطر نمونه آزمایشی بیشتر باشد. غشاء لاستیکی به وسیله دو عدد O-Ring لاستیکی که به بالا و پایین نمونه آزمایشی متصل می‌شود.
۸. قالب استوانه‌ای برای قراردادن غشاء لاستیکی بر روی نمونه آزمایشی
۹. کرنومتر برای کنترل نرخ بارگذاری
۱۰. سنگ متخلخل هم قطر نمونه آزمایشی



شکل ۲: دستگاه آزمایش سه محوری

اندازه نمونه آزمایشی

نمونه آزمایشی باید استوانه ای با نسبت ارتفاع به قطر ۲ تا ۲/۵ و با حداقل قطر ۳/۳ سانتی متر (۱/۳ اینچ) باشد. حداکثر اندازه دانه موجود در نمونه آزمایشی باید حداکثر $\frac{1}{6}$ قطر نمونه آزمایشی باشد. در صورتی که بعد از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های دست نخورده مشخص شود که دانه‌های با اندازه بزرگ در نمونه آزمایشی وجود داشته این مسئله حتماً باید به همراه گزارش نتایج اعلام شود.

تهیه نمونه آزمایشی

نمونه آزمایشی دست نخورده یا بازسازی شده همانند نمونه آزمایشی آزمایش تک محوری تهیه می شود.

روش انجام آزمایش

۱. برای کشیدن غشا بر روی نمونه آزمایشی، غشاء را داخل قالب استوانه ای قرار دهید و طرفین آن را روی بالا و پایین قالب بکشید. به وسیله مکش در پشت غشاء لاستیکی این غشاء به سطح داخلی استوانه می چسبد. قطر استوانه غشاءگیری چند میلی متر بیشتر از قطر نمونه‌ها می باشد. نمونه آزمایشی را داخل قالب استوانه ای قرار دهید. سنگ های متخلخل و سرپوش نمونه آزمایشی را قرار داده و غشاء را به وسیله حلقه های لاستیکی به آنها متصل کنید.
۲. نمونه آزمایشی را در داخل سلول سه محوری قرار دهید. پیستون بارگذاری محوری را روی سرپوش نمونه آزمایشی قرار دهید. با چندین بار آزمایش مطمئن شوید که پیستون بارگذاری کاملاً و بدون خروج از مرکز بر روی سرپوش نمونه آزمایشی قرار می گیرد. بعد از اطمینان از تماس پیستون با سرپوش نمونه آزمایشی عقربه تغییرشکل را قرائت کنید. در این حالت تنش اعمال شده بر روی نمونه آزمایشی نباید بیشتر از 0.5 درصد مقاومت نهایی نمونه آزمایشی باشد. در صورتی که وزن پیستون باعث به وجود آمدن تنشی بیش از مقدار یاد شده می شود، پیستون را بعد از تماس با سرپوش قفل کنید.
۳. محفظه سلول سه محوری را در جای خود قرار دهید. دقت کنید که وسیله اعمال بار قائم، وسیله اندازه گیری بار قائم و محفظه سه محوری در طول آزمایش نیروی جانبی به پیستون وارد نکند. سپس سلول سه محوری را با مایع (نظیر آب یا روغن) پر کرده، دستگاه اندازه گیری فشار را تنظیم کنید. فشار مورد نظر همه جانبه را به مایع سلول سه محوری اعمال کنید. برای رسیدن به شرایط ماندگار در نمونه آزمایشی قبل از ادامه آزمایش حدود 10 دقیقه صبر کنید.
۴. در صورتی که وسیله اندازه گیری فشار سلول خارج از آن باشد، فشار موجود در سلول نیرویی به سمت بالا به پیستون اعمال می کند که این نیرو در خلاف جهت اعمال بار عمل می کند. در این شرایط آزمایش را در شرایطی که پیستون کمی بالاتر از سرپوش نمونه آزمایشی قرار دارد شروع کنید و قبل از این که پیستون با سرپوش تماس پیدا کند می توان به یکی از دو صورت زیر عمل کرد:
 ۱. تأثیر اولیه اصطکاک بین پیستون و جداره و نیروی وارده ناشی از فشار سلول را اندازه گیری کرده و قرائت های بعدی نیروی محوری را به وسیله آن تصحیح کنید.
 ۲. در این حالت وسیله اندازه گیری بار محوری را تنظیم می کنیم که اثر نیروی اصطکاک و نیروی فشار سلول را جبران کنند (در این حالت قرائت ها تصحیح شده هستند).در صورتی که وسیله اندازه گیری بار داخل سلول قرار داشته باشد نیازی به تصحیح نیست. در هر دو حالت وقتی پیستون با سرپوش نمونه آزمایشی اتصال پیدا کرد قرائت اولیه وسیله اندازه گیری تغییرشکل قائم را انجام دهید.

۵. بارگذاری را به صورت کرنش محوری با نرخ ثابت به نمونه آزمایشی اعمال کنید. نرخ کرنش محوری برای مصالح شکل پذیر حدود ۱ درصد بر دقیقه و برای نمونه‌های ترد ۰/۳ درصد بر دقیقه خواهد بود. نمونه‌هایی که در کرنش محوری در حدود ۳ تا ۶ درصد گسیخته می‌شوند ترد در نظر گرفته می‌شوند. با این سرعت بارگذاری زمان آزمایش حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه خواهد بود. بارگذاری را تا کرنش محوری ۱۵ درصد یا زمانی که تنش تفاضلی تا ۲۰ درصد مقدار بیشینه کاهش یابد یا کرنش محوری به میزان ۵ درصد از میزان کرنش در تنش تفاضلی بیشینه بیشتر شود ادامه دهید.
۶. میزان بار و تغییر شکل را در کرنش‌های حدود ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ درصد و تا رسیدن به کرنش ۳ درصد با گام‌های ۰/۵ درصد و پس از آن با گام‌های ۱ درصد قرائت کنید.
۷. بعد از اتمام آزمایش نمونه آزمایشی را از دستگاه خارج کرده و درصد رطوبت آن را اندازه‌گیری کنید.
۸. شکل نمونه آزمایشی را در پایان آزمایش رسم کنید یا از آن عکس تهیه کنید. زاویه سطح گسیختگی با محور نمونه آزمایشی را اندازه‌گیری کنید.
۹. آزمایش را به تعداد درخواست شده برای تنش‌های همه جانبه مورد نظر بر روی نمونه‌های جدید تکرار کنید.

محاسبات

۱. برای هر قرائت کرنش محوری ϵ را محاسبه کنید.

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (1)$$

ΔH : تغییر ارتفاع نمونه آزمایشی

H_0 : ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی قبل از اعمال بار

مساحت متوسط نمونه آزمایشی در زمان هر قرائت را محاسبه کنید.

$$A = \frac{A_0}{1 - \epsilon} \quad (2)$$

A_0 : مساحت متوسط اولیه نمونه آزمایشی

ϵ : کرنش محوری در قرائت مورد نظر

۳. تنش انحرافی برای هر قرائت را محاسبه کنید.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} \quad (3)$$

P : بار وارده بر نمونه آزمایشی (تصحیح شده)

A : مساحت متوسط نمونه آزمایشی

۴. منحنی تنش انحرافی - کرنش را برای نمونه‌های آزمایش شده رسم کنید. مقاومت نمونه‌ها و کرنش در زمان گسیختگی را مطابق تعریف ارائه شده برای این کمیت‌ها به دست آورید.
۵. دایره مور مربوط به شرایط گسیختگی نمونه‌ها را رسم کرده و پوش گسیختگی را به دست آورید.
۶. با استفاده از ابعاد و وزن و درصد رطوبت نمونه‌ها درجه اشباع نمونه‌ها را محاسبه کنید.

گزارش

گزارش آزمایش باید شامل موارد زیر باشد:

۱. تشریح نظری نمونه‌ها و مصالح مورد استفاده
۲. مشخصات نمونه‌ها (اندازه، دست خوردگی و ...)
۳. نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ، اندازه گیری وزن مخصوص دانه‌ها، دانه بندی در صورت موجود بودن
۴. وزن مخصوص، تخلخل، درصد رطوبت، درصد اشباع نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش
۵. سرعت بارگذاری
۶. منحنی تنش - کرنش نمونه‌ها، دایره مور نمونه‌ها در شرایط گسیختگی، پوش گسیختگی نمونه‌ها، مقاومت نمونه‌ها
۷. شکل گسیختگی نمونه‌ها
۸. گزارش هرگونه شرایط غیرعادی یا قابل توجه در ارتباط با نمونه‌ها، دستگاه یا موارد دیگر

سؤالات

۱. تاثیر درجه اشباع نمونه رسی در آزمایش سه محوری (UU) چگونه است؟ نمودار شماتیک آن را رسم کنید.
۲. پس فشار (back pressure) چیست و کاربردهای استفاده از آن چیست؟ توضیح دهید.
۳. استفاده از پس فشار در کدام آزمایشات سه محوری مرسوم است؟
۴. اگر در آزمایش سه محوری بر روی رس بسیار پیش تحکیم یافته از پس فشار استفاده نشود چه مشکلی ممکن است پیش آید؟
۵. چرا برای تعیین مقاومت خاک رس، آزمایش CU از آزمایش CD کاربردی‌تر است؟
۶. در آزمایش سه محوری اگر غشاء لاستیکی سوراخ باشد چه اتفاقی می‌افتد؟ معمولاً قبل از انجام آزمایش نمی‌توان از وجود سوراخ (گاهی به اندازه میکرومتر) در غشاء مطلع شد؛ چگونه بعد از پایان آزمایش از سوراخ بودن یا نبودن غشاء (و صحت داده‌ها) اطمینان حاصل کنیم؟

۷. نمودارهای شماتیک تنش برشی-تنش نرمال رس عادی تحکیم یافته و رس پیش تحکیم یافته را رسم کنید.
۸. برای بررسی پایداری بلندمدت یک شیروانی خاکی از رس اشباع، استفاده از نتایج کدام آزمایش یا آزمایشات سه محوری را توصیه می‌کنید؟
۹. برای بررسی پایداری یک سد خاکی در پایان ساخت، استفاده از پارامترهای مقاومت برشی بدست آمده از کدام آزمایش یا آزمایشات سه محوری را پیشنهاد می‌کنید؟
۱۰. سد کرخه -بزرگترین سد خاکی خاورمیانه- در سال ۱۳۸۰ به بهره‌برداری رسیده است. برای پیش‌بینی مقاومت هسته رسی این سد در برابر زلزله‌ای که احتمال وقوع آن در سال آینده خواهد بود کدام آزمایش سه محوری را پیشنهاد می‌کنید؟ توضیح دهید.
۱۱. اگر در یک آزمایش سه محوری UU بر روی نمونه خاک رس C_u برابر ۹ کیلوپاسکال و ϕ برابر ۱۰ درجه به دست آمده باشد، کدام مورد را می‌توان نتیجه گرفت؟ توضیح دهید.
- الف) آزمایش UU برای این خاک مناسب نیست.
- ب) نوع خاک اصطکاکی - چسبنده بوده است.
- ج) نمونه رسی ترک دار بوده است.
۱۲. آزمایش تک محوری برای تعیین مقاومت برشی نمونه رسی اشباع انجام شده است و مقاومت تک محوری ۵۰ کیلو پاسکال به دست آمده است. اگر بر روی همین نمونه رسی آزمایش سه محوری تحکیم نیافته - زهکشی نشده تحت فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال انجام شود. مقاومت چسبندگی خاک چند کیلوپاسکال خواهد بود؟
- الف) ۲۵ ب) ۵۰ ج) کمتر از ۲۵ د) بیشتر از ۲۵
۱۳. در آزمایش سه محوری UU بر روی یک نمونه رس اشباع به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی متر نمونه تحت فشار همه جانبه ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب و بار محوری اضافی ۵۰/۵ کیلوگرم، ۱ سانتی متر تغییر شکل قائم داده و گسیخته می‌شود. مقاومت برشی زهکشی نشده خاک چه قدر است؟
۱۴. درستی یا نادرستی گزاره‌های زیر را با ذکر دلیل تعیین کنید.
- الف) صفر بودن زاویه اصطکاک در آزمایش UU به این معنی است که خاک کاملاً چسبنده است و هیچ گونه زاویه اصطکاکی ندارد.
- ب) سرعت انجام آزمایش UU از CD و CU بیشتر است.
- ج) با توجه به صفر بودن چسبندگی در خاک‌های ماسه‌ای، نمونه ماسه‌ای در آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده مقاومتی از خود بروز نمی‌دهد.
۱۵. در آزمایش سه محوری UU بر روی نمونه نیمه اشباع، افزایش فشار سلول چه تأثیری بر درجه اشباع نمونه و ϕ دارد؟

آزمایش تحکیم یک بعدی

ASTM D-2850

مقدمه

وقتی خاک اشباع با نفوذپذیری کم تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، در آغاز تمام بارگذاری توسط آب منفذی تحمل می‌شود و به آن افزایش فشار آب منفذی^{۱۴} می‌گویند. در صورتی که زهکشی انجام شود، به مرور زمان حجم خاک کاهش می‌یابد که به آن تحکیم^{۱۵} گفته می‌شود و باعث نشست می‌گردد. از طرفی ممکن است خاک در اثر جذب آب منفذی یا فشار آب منفذی، منفی افزایش حجم دهد که به آن تورم^{۱۶} می‌گویند.

برای بررسی مکانیزم تحکیم بر اثر بارگذاری در یک نمونه خاک رس اشباع مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از معروف‌ترین آن‌ها مدل ترزاقی (مدل فئر) است. مدل ترزاقی از یک فئر تشکیل شده است که درون یک سیلندر استوانه‌ای پر از آب قرار گرفته است. بار وارد توسط یک پیستون متحرک به مجموعه وارد می‌شود. آب توسط یک شیر می‌تواند از داخل سیلندر خارج شود و فشار آب منفذی نیز توسط یک گیج فشارسنج، اندازه‌گیری می‌شود. در این مدل، فئر نماینده اسکلت خاک است و آب درون سیلندر نشان‌دهنده آب موجود در حفرات خاک است.

قبل از عمل بارگذاری، سیستم در تعادل است و فشار آب منفذی هیدرو استاتیک u_0 درون سیلندر قرائت شده است. در این حالت فئر در حالت باز است و آبی از نمونه خارج نمی‌شود.

پس از اعمال بار قائم F به نمونه توسط پیستون در زمان $t = 0$ (بلافاصله پس از اعمال بار) شیر زهکشی بسته است. چون زمان برای خروج آب وجود ندارد، در نتیجه تمام فشار وارد به سیستم به آب منتقل می‌شود که موجب افزایش فشار آب منفذی درون سیلندر می‌شود.

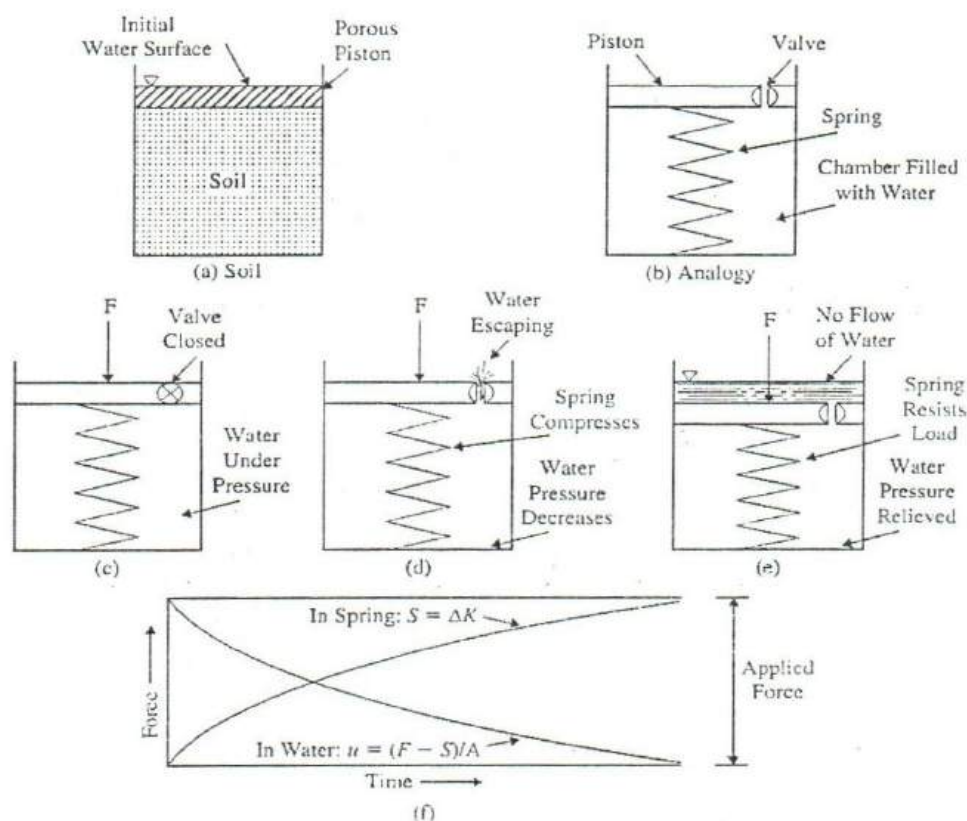
پس از گذشت زمان t از اعمال بارگذاری به دلیل خروج آب از نمونه بر اثر زهکشی، فشار آب منفذی اضافی درون نمونه کاهش می‌یابد. بر اثر خروج آب، پیستون به فئر فشار می‌آورد و باعث فشردگی فئر می‌شود که به مفهوم انتقال بار به دانه‌های خاک است که منجر به افزایش تنش مؤثر در خاک و ایجاد نشست تحکیمی در خاک می‌شود.

¹⁴ pore water pressure

¹⁵ consolidation

¹⁶ swelling

پس از گذشت زمان زیاد، سیستم تحت بار اعمالی به تعادل می رسد و دیگر آبی از نمونه خارج می شود که نشان دهنده افت کامل فشار آب منفذی درون خاک است. در این حالت تمام بار وارد، به فنر (اسکلت خاک) منتقل شده است و نشست تحکیمی نهایی رخ داده است.



شکل ۱: مدل فنر تراقی برای شبیه سازی تحکیم یک بعدی در خاک ها

آزمایش تحکیم روشی است برای محاسبه مقدار و سرعت تحکیم خاک در شرایط یک بعدی تحت اثر بارگذاری تنش - کرنش. در این آزمایش یک نمونه آزمایشی از خاک در شرایطی که به صورت جانبی محدود شده است تحت اثر بارگذاری محوری قرار می گیرد. بار به صورت پله ای به نمونه آزمایشی اعمال می شود. پارامترهای مهم خاک که از آزمایش تحکیم به دست می آید یکی اندیس های تراکم است که میزان تراکم پذیری نمونه خاک را مشخص می کند (شاخص فشردگی C_c ^{۱۷} و شاخص تورم C_s ^{۱۸}) و دیگری ضریب تحکیم C_v ^{۱۹} می باشد که شدت تراکم به علت بارگذاری را تعیین می کند.

^{۱۷} compression Index

^{۱۸} swell Index

^{۱۹} coefficient of consolidation

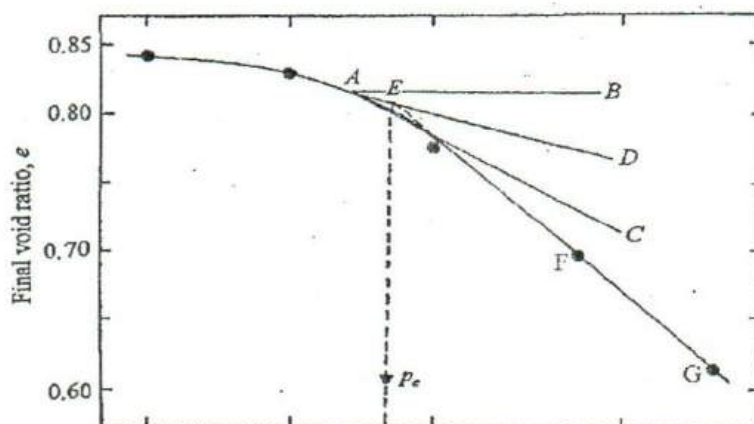
برای تعیین میزان نشست خاک ها به علت تحکیم از تئوری تحکیم ترزاقی^{۲۰} با فرضیات زیر استفاده می‌گردد:

- ۱- خاک همگن است.
- ۲- خاک اشباع است.
- ۳- زهکشی و تراکم یک بعدی است.
- ۴- خواص خاک ثابت است.
- ۵- منحنی $e - \log p$ یک خط راست را تشکیل می‌دهد.

۴-۱- تعیین فشار پیش تحکیمی^{۲۱} و c_c و c_s

فشار پیش تحکیمی (p'_c) حداکثر فشار مؤثری است که خاک در تاریخچه تشکیل خود تحمل نموده است. کاساگرانده یک روش ترسیمی ساده برای تعیین فشار پیش تحکیمی از روی نمودار آزمایشگاهی $e - \log p'$ ارائه داده است که مطابق زیر است:

- ۱- نقطه A با حداکثر انحنای را به کمک چشم تعیین کرده و خط افقی AB را رسم می‌کنیم.
- ۲- مماس AC را در نقطه A بر منحنی رسم می‌کنیم.
- ۳- خط AD یعنی نیمساز زاویه BAC را رسم می‌کنیم.
- ۴- قسمت خطی FG نمودار $e - \log p'$ را به سمت عقب ادامه می‌دهیم تا AD را در E قطع کند. طول نقطه E فشار پیش تحکیم است.



شکل ۲: روش ترسیمی برای تعیین فشار پیش تحکیمی

²⁰ Terzaghi

²¹ preconsolidation pressure

خاک‌های رسی از نظر تاریخچه تنش به سه گروه تقسیم می‌شوند:

- ۱- خاک‌های تحکیم نیافته: خاک در اثر وزن خود هنوز به درصد تحکیم نهایی نرسیده است.
 - ۲- خاک‌های عادی تحکیم یافته^{۲۲}: خاکی است که تحت اثر وزن خودش تحکیم یافته است و حداکثر تنشی که تحمل کرده وزن خودش است یا بیشترین تنشی که تجربه کرده است تنش موجود آن است.
 - ۳- خاک‌های بیش تحکیم یافته^{۲۳}: خاکی است که تحت اثر تنشی به مراتب بیشتر از وزن خود تحکیم یافته است.
- از نسبت پیش‌تحکیمی^{۲۴} «OCR» برای نشان دادن تاریخچه تحکیمی خاک‌های ریزدانه رسی استفاده می‌شود.

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_s}$$

که σ'_c تنش پیش‌تحکیمی و σ'_s تنش مؤثر موجود است. در خاک‌های عادی تحکیم یافته OCR برابر با یک و در خاک‌های بیش تحکیم یافته OCR بزرگ‌تر از یک است. اگر منحنی $e - \log p'$ به صورت نواحی خطی تخمین زده شود، شیب منحنی $e - \log p'$ در ناحیه عادی تحکیم یافته را شاخص فشردگی (C_c) می‌گویند و شیب این منحنی در ناحیه پیش‌تحکیم یافته تقریباً مساوی شیب منحنی برگشت در آزمایشگاه است. شیب منحنی برگشت، شاخص تورم (C_s) نامیده می‌شود.

جدول ۱: نشانه فشردگی و نشانه تورم برای بعضی از رس‌های طبیعی

نوع خاک	حد مایع	حد خمیری	نشانه فشردگی	نشانه تورم
رس بوستون	41	20	0.35	0.07
رس شیکاگو	60	20	0.4	0.07
رس جورجیا	51	26	0.12	-
رس نیواورلئان	80	25	0.3	0.05
رس مونتانا	60	28	0.21	0.05

²² normally consolidated

²³ over consolidated

²⁴ over consolidation ratio

در آزمایش تحکیم مرسوم، هر بارگذاری روی نمونه به مدت ۲۴ ساعت حفظ می‌شود. بعد از آن بار روی نمونه ۲ برابر می‌شود.

افزایش زمان توقف بار موجب می‌شود که تحکیم ثانویه نمونه (مقادیر تنش مؤثر و فشار آب ثابت است و خروج آب جذب سطحی^{۲۵} را شاهد هستیم) افزایش یابد که این موضوع باعث کاهش نسبت تخلخل e می‌شود. نسبت افزایش بار $\frac{\Delta P}{P}$ نیز روی منحنی $e - \log p'$ تأثیر می‌گذارد و با افزایش $\frac{\Delta P}{P}$ منحنی به تدریج به سمت چپ حرکت می‌کند.

۱-۱- تعیین C_v از روش لگاریتم زمان (روش کاساگرانده^{۲۶})

در این روش مطابق شکل، نمودار تغییر ضخامت نمونه خاک با لگاریتم زمان ترسیم گشته و طبق مراحل زیر C_v تعیین می‌گردد:

۱. خطی از انتهای نمودار که شیب تقریباً ثابتی دارد رسم شده و تقاطع آن را با خط مماس بر قسمت میانی نمودار که بیشترین شیب را دارد A می‌نامیم. عرض نقطه A با d_{100} یعنی مقدار تغییر شکل در انتهای ۱۰۰ درصد تحکیم اولیه^{۲۷}، نشان داده می‌شود.
۲. در قسمت ابتدای نمودار زمان‌های t_1 و t_2 را طور انتخاب می‌کنیم که $t_2 = 4t_1$ باشد. اختلاف تغییر شکل نمونه در اثنای $(t_2 - t_1)$ را مساوی x در نظر می‌گیریم. خط افقی DE را طوری رسم می‌کنیم که فاصله قائم BD مساوی x باشد. تغییر شکل نظیر خط DE با d_x یعنی تغییر شکل در تحکیم ۰ درصد در نظر می‌گیریم.
۳. تغییر شکل در تحکیم ۵۰ درصد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$d_{50} = \frac{d_x + d_{100}}{2}$$

زمان تحکیم ۵۰ درصد (t_{50}) را از روی نمودار و با استفاده از (d_{50}) به دست می‌آوریم.

۴. ضریب تحکیم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{t_{50}}$$

۰.۱۹۷

درج تحکیم

$U < 60\%$

$T = \frac{\pi}{4} U^2$

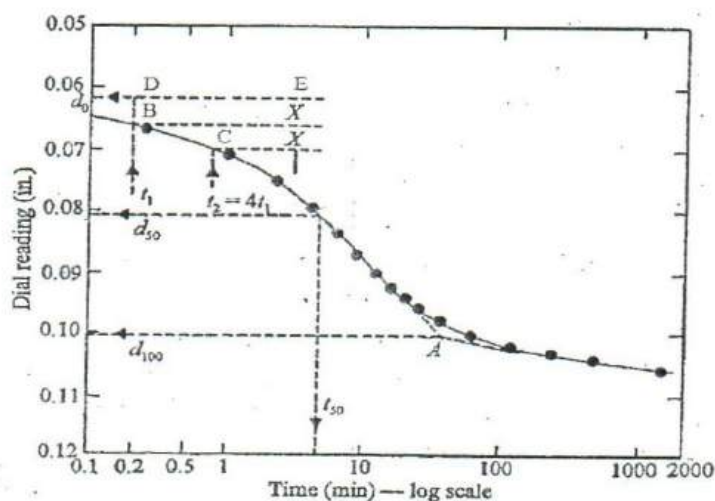
$U_{pore\ water} \downarrow \quad \sigma' \uparrow$

²⁵ adsorbed water

²⁶ Casagrande

²⁷ primary consolidation

که H_{dr} طولانی‌ترین مسیر زهکشی در حین تحکیم است. پارامتری بعد ضریب زمان T_v^{28} نقش مهمی در برآورد زمان تحکیم دارد. مقدار ضریب زمان برای حالات مختلف طبق روابط، نمودارها و جداولی داده شده است.



شکل ۳: روش لگاریتم زمان برای تعیین ضریب تحکیم

۲-۱- تعیین C_v از روش جذر زمان (روش تیلور^{۲۹})

پس از رسم نمودار تغییرشکل - جذر زمان مراحل زیر را طی می‌کنیم

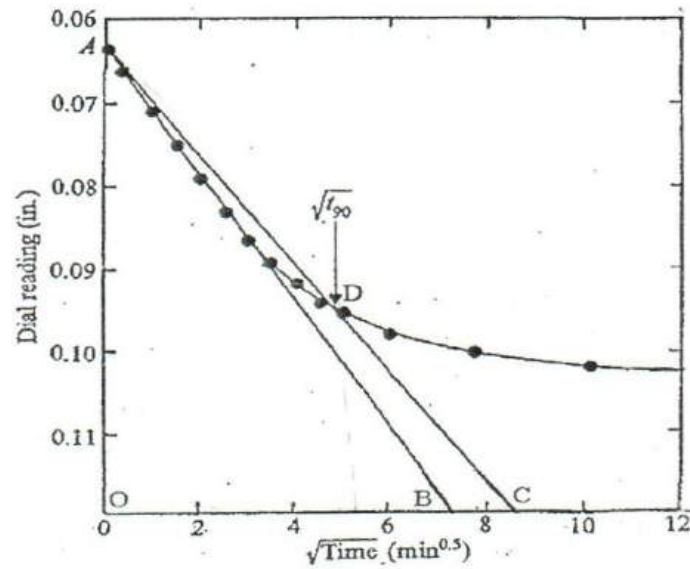
۱. خط AB را از میان قسمت ابتدایی که نسبتاً مستقیم است رسم می‌کنیم.
۲. خط AC را طوری رسم می‌کنیم که $\overline{OC} = 1.15 \overline{OB}$ باشد. طول نقطه D که محل تقاطع AC و منحنی تراکم است، جذر زمان برای ۹۰ درصد تحکیم است.
۳. ضریب تحکیم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_v = \frac{T_{90} H_{dr}^2}{t_{90}}$$

0.848
↑

²⁸ time factor

²⁹ Taylor



شکل ۴: روش جذر زمان برای تعیین ضریب تحکیم

۳-۱- تعیین C_v از روش سه‌می

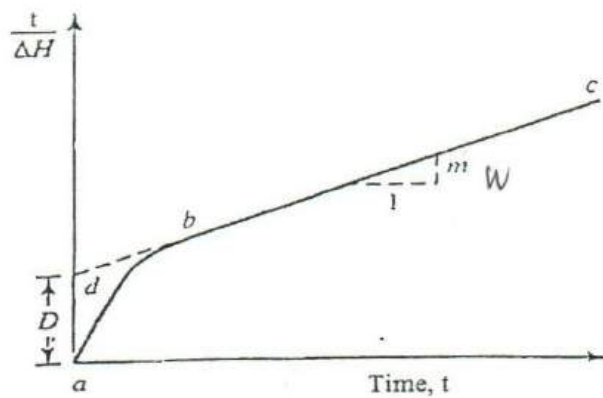
۱- برای نمونه آزمایشگاهی، نمودار $\frac{t}{\Delta H}$ را در مقابل t رسم می‌کنیم. (ΔH تغییر شکل نمونه است)

۲- شاخه مستقیم cb از نمودار را به عقب ادامه می‌دهیم تا محور قائم را در d قطع کند.

۳- شیب (w) شاخه bc را تعیین می‌کنیم.

۴- مقدار C_v از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

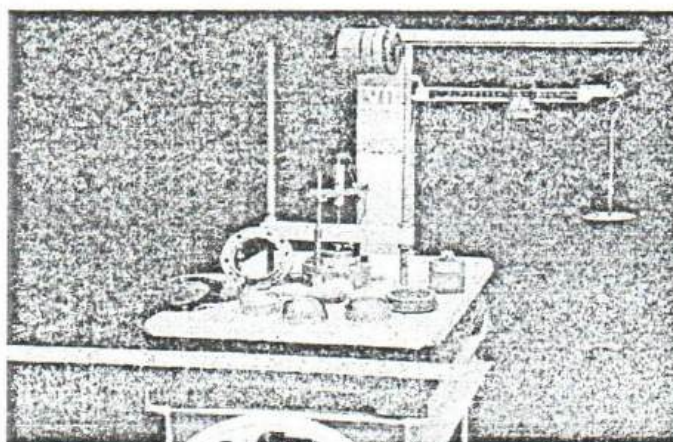
$$C_v = 0.3 \left(\frac{wH^2}{D} \right)$$



شکل ۵: روش سهمی زمان برای تعیین ضریب تحکیم

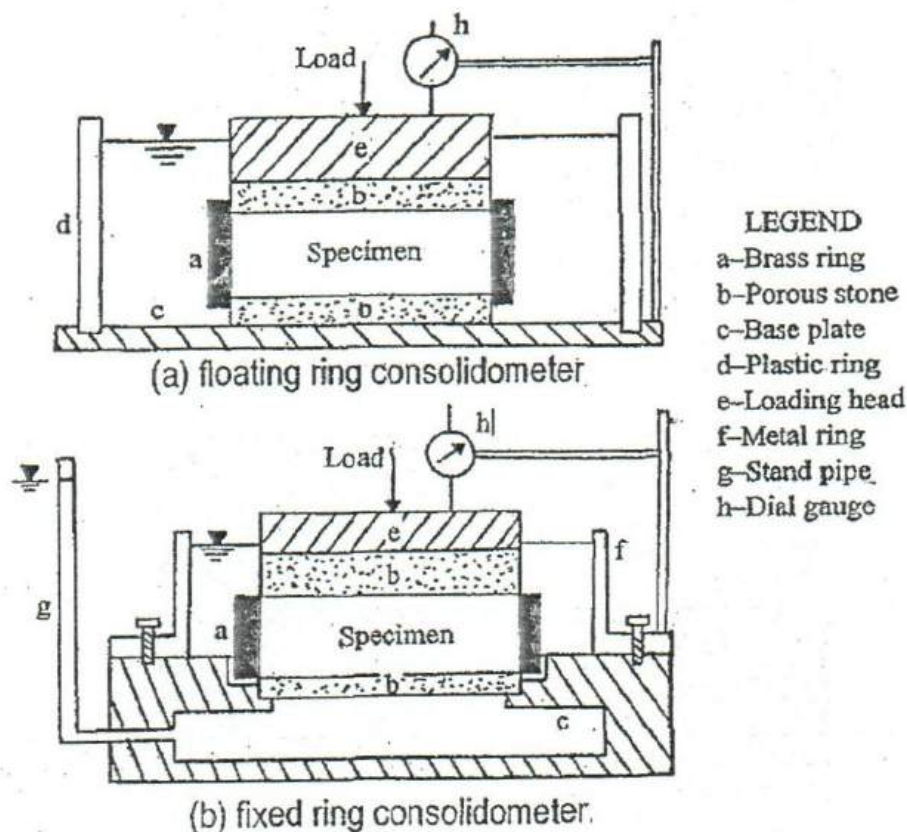
وسایل آزمایش

۱. دستگاه بارگذاری: دستگاه باید به طور مناسبی بار عمودی را به نمونه‌ها وارد کند. بار عمودی به وسیله وزنه‌هایی که بر روی دستگاه قرار می‌گیرند به نمونه‌ها اعمال می‌شوند. دستگاه باید قادر باشد بار مورد نظر را برای مدت طولانی با خطای کمتر از $\pm 0.5\%$ درصد ثابت نگه دارد. هر افزایش بار بدون وارد کردن ضربه و در زمان حدود ۲ ثانیه انجام می‌شود.
- افزایش بار باید در زمانی حدود $t_{100} \pm 0.1\%$ به نمونه آزمایشی اعمال شود.



شکل ۶: ادنومتر کاساگرانده

۲. دستگاه تحکیم: ظرف استوانه‌ای است که در آن حلقه فلزی جای داده می‌شود. نمونه آزمایشی داخل حلقه فلزی قرار داده شده و در دو طرف آن (بالا و پایین) سنگ‌های متخلخل قرار می‌گیرند. حد فاصل حلقه فلزی و جدار ظرف استوانه‌ای آب ریخته می‌شود تا در حین آزمایش نمونه آزمایشی در آب غوطه‌ور باشد.
- سختی حلقه فلزی باید به گونه‌ای باشد که در اثر اعمال بارهای آزمایش افزایش قطر آن از 0.3% درصد تجاوز نکند. حلقه باید از فلز ضدزنگ ساخته شده باشد. سطح داخلی آن باید کاملاً صیقلی بوده یا از ماده‌ای با حداقل اصطکاک پوشانده شده باشد. گریس سیلیکون یا مولیبدیم دی‌سولفید برای این کار مناسب است.



شکل ۷: وضعیت قرار گرفتن نمونه آزمایشی در دستگاه در آزمایش تحکیم

۳. سنگ های متخلخل

سنگ های متخلخل باید از سیلیکون کاربید، اکسید آلومینیم یا فلزی ساخته شوند که مواد موجود در خاک و رطوبت خاک روی آنها تأثیری نداشته باشد. خلل و فرج سنگ ها باید به حدی باشد که دانه های ریز خاک به داخل آن نفوذ نکنند. در صورت نیاز می توان از فیلتر کاغذی بین سنگ های متخلخل و نمونه آزمایشی استفاده کرد. نفوذپذیری سنگ های متخلخل و فیلتر کاغذی باید حداقل یک درجه بزرگی^{۳۰} بزرگتر از نفوذپذیری خاک مورد آزمایش باشد.

قطر سنگهای متخلخل باید ۰/۲ تا ۰/۵ میلی متر کوچکتر از قطر داخلی حلقه فلزی باشد. در صورتی که از حلقه شناور استفاده می شود (حلقه ای که به وسیله اصطکاک با استوانه در تماس است) قطر

^{۳۰} order of magnitude

سنگ های متخلخل و حلقه فلزی باید یکسان باشد. ضخامت سنگ های متخلخل باید به اندازه ای باشد که در اثر بارگذاری نشکنند.

۴. میکرومتر برای اندازه گیری تغییر ضخامت نمونه آزمایشی با دقت 0.025 میلی متر

۵. وسیله آماده سازی نمونه آزمایشی

استوانه ای است با لبه تیز که می توان به وسیله آن نمونه اولیه را که قطر آن بیشتر از قطر داخلی حلقه است به راحتی و با کمترین دست خوردگی بریده، به اندازه قطر داخلی حلقه درآورد. سطح داخلی این استوانه باید کاملاً صیقلی شده با ماده ای با حداقل ضریب اصطکاک پوشانده شود.

۶. سایر وسایل مانند ترازو با دقت 0.1 گرم، گرمخانه، اره سیمی، کارد و کاردک، قوطی های تعیین رطوبت و کرنومتر

اندازه نمونه ها

۱. حداقل قطر نمونه آزمایشی باید 50 میلی متر باشد.

۲. حداقل ضخامت اولیه نمونه آزمایشی باید 12 میلی متر باشد. این ضخامت نباید کمتر از 10 برابر حداکثر اندازه دانه های موجود در خاک باشد.

۳. حداقل نسبت قطر به ضخامت نمونه آزمایشی باید $2/5$ باشد.

آماده سازی نمونه ها

در آماده سازی نمونه ها باید دقت کرد که حداقل دست خوردگی یا تغییر در رطوبت یا دانسیته مصالح به وجود آید. نمونه های دست نخورده که از محل تهیه شده اند باید پس از خارج شدن از نمونه گیر به اندازه حلقه دستگاه تحکیم بریده شده و در داخل آن قرار گیرند. این نمونه ها باید قطر حداقل 5 میلی متر بزرگتر از قطر حلقه فلزی دستگاه داشته باشند. پس از بریدن نمونه به وسیله استوانه مخصوص که در بالا توضیح داده شد به آرامی آن را در داخل حلقه قرار دهید. برای بریدن سروته نمونه در خاک های نرم از اره سیمی و برای خاکهای سفت از یک تیغه لب تیز استفاده کنید. در خاک های آلی یا خاک های الیاف دار که در اثر بریدن دست خوردگی در آنها ایجاد می شود می توان نمونه ها را مستقیماً از لوله های نمونه گیر به داخل حلقه تحکیم وارد نمود در این صورت باید قطر نمونه گیر و حلقه تحکیم یکسان باشد.

تعیین مشخصات نمونه آزمایشی

۱. جرم اولیه مرطوب نمونه آزمایشی را محاسبه کنید (M_{T0}). برای این کار جرم نمونه آزمایشی و حلقه را از جرم حلقه فلزی کم کنید.

۲. ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی حداقل در 4 نقطه از نمونه آزمایشی اندازه گیری کنید (با دقت 0.025 میلی متر).

۳. حجم اولیه نمونه آزمایشی را با دقت ۰/۲۵ سانتی متر مربع با استفاده از قطر نمونه آزمایشی و ارتفاع اولیه آن محاسبه کنید.
۴. درصد رطوبت نمونه آزمایشی را با استفاده از قطعه هایی که در هنگام آماده سازی نمونه آزمایشی به دست آمده اند محاسبه کنید.
۵. برای انجام محاسبات و تفسیر نتایج، مشخص بودن حدود اتربرگ و وزن مخصوص دانه های خاک لازم است. در صورتی که این کمیت ها تعیین نشده اند با استفاده از خاک های باقیمانده آن ها را تعیین کنید.

روش انجام آزمایش

۱. نمونه آزمایشی را درون حلقه قرار دهید و صفحات متخلخل و صافی ها را در دو طرف آن قرار دهید. برای خاک های خشک منبسط شونده از سنگ های متخلخل خشک باید استفاده شود. برای خاک های نیمه اشباع از سنگ های متخلخل مرطوب و برای خاک های اشباع از سنگ های متخلخل اشباع استفاده شود. صفحه سربار را بر روی سنگ متخلخل بالایی قرار داده و مخزن اطراف نمونه آزمایشی را از آب پر کنید.
۲. استوانه تحکیم را در دستگاه اعمال بار قرار داده و باری به میزان ۵ kPa به آن وارد کنید. به محض وارد کردن این بار، تغییر مکان را خوانده و مقدار قرائت اولیه d_0 را ثبت نمایید. در صورت نیاز برای جلوگیری از تورم نمونه آزمایشی باید بار بیشتری به آن اعمال نمود. اگر پیش بینی گردد که بار ۵ kPa تحکیم قابل توجهی را ایجاد خواهد کرد می توان از بار کمتر مثلاً ۲ یا ۳ کیلو پاسکال استفاده کرد.
۳. اگر نمونه آزمایشی دست نخورده اشباع شده باشد یا عمق برداشت نمونه زیر تراز آب زیرزمینی باشد بعد از اعمال بار ۵ kPa به آرامی نمونه آزمایشی را غرقاب نمایید. برای جلوگیری از تورم بار وارد بر نمونه آزمایشی را افزایش دهید. بار لازم برای جلوگیری از تورم همچنین تغییر مکان ایجاد شده را در طول زمان ثبت کنید.
۴. افزایش فشار وارد بر نمونه آزمایشی باید مطابق قسمت ۱،۴ باشد. اگر شیب و شکل منحنی تراکم یا تعیین فشار پیش تحکیمی مورد نظر باشد فشار نهایی وارد بر نمونه آزمایشی باید تا ۴ برابر بیشتر از فشار پیش تحکیمی باشد. برای تعیین پارامترهای مربوط به تغییر شکل خاک در باربرداری و بارگذاری مجدد لازم است یک سیکل باربرداری و بارگذاری در طول آزمایش انجام شود.
- ۱،۴. نسبت افزایش بار برای آزمایش تحکیم باید ۱ باشد به این ترتیب در هر مرحله از بارگذاری مقدار بار ۲ برابر می شود. به عنوان مثال معمولاً مراحل بارگذاری به صورت (۱۲ و ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ و kPa) می باشد.

۲.۴. نسبت کاهش بار برای باربرداری نیز معمولاً به صورت نصف کردن بار در هر مرحله از باربرداری انجام می شود. می توان مراحل باربرداری را نصف کرد به صورتی که در هر مرحله از باربرداری بار وارد بر نمونه آزمایشی را $\frac{1}{p}$ کرد.

۵. قبل از اعمال هر بار اضافی، ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی (d_f) را ثبت کنید.
۶. فاصله گام های بارگذاری به اندازه ۲۴ ساعت خواهد بود. در طول این مدت تغییر شکل نمونه آزمایشی را با قرائت عقربه میکرومتر در زمان های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه و ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، ۰/۱۵ و ۰/۳۰ ساعت اندازه گیری کنید.

محاسبات

۱. مشخصات نمونه آزمایشی
۱.۱. جرم خشک نمونه آزمایشی (M_d) را به دست آورید. در صورتی که برای به دست آوردن درصد رطوبت نمونه آزمایشی از قسمتی از آن استفاده کرده اید جرم خشک نمونه آزمایشی را با استفاده از رابطه ۱ محاسبه کنید.

$$M_d = \frac{M_{Tf}}{1 + \omega_{fp}} \quad (۱)$$

M_{Tf} : جرم کل نمونه آزمایشی بعد از آزمایش

ω_{fp} : رطوبت نمونه آزمایشی

۲.۱. درصد رطوبت نمونه آزمایشی را قبل و بعد از آزمایش به دست آورید.

$$\omega_0 = \frac{M_{T_0} - M_d}{M_d} \times 100 \quad (۲)$$

درصد رطوبت اولیه آزمایشی نمونه

$$\omega_0 = \frac{M_{T_f} - M_d}{M_d} \times 100 \quad (۳)$$

درصد رطوبت نهایی آزمایشی نمونه

M_d : جرم خشک نمونه آزمایشی

M_{T_0} : جرم نمونه آزمایشی قبل از آزمایش

۳.۱. دانسیته اولیه خشک نمونه آزمایشی را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کنید.

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_0} \quad (۴)$$

ρ_d : دانسیته خشک نمونه آزمایشی

V_0 : حجم اولیه نمونه آزمایشی

۴.۱. وزن مخصوص خشک نمونه آزمایشی را محاسبه کنید.

$$\gamma_d = 9.8 \rho_d \quad (۵)$$

۵.۱. حجم قسمت جامد نمونه آزمایشی را محاسبه کنید.

$$V_s = \frac{M_d}{G \rho_w} \quad (۶)$$

G : وزن مخصوص دانه ها

ρ_w : دانسیته آب (1 g/cm^3)

۶.۱. با توجه به این که سطح مقطع نمونه آزمایشی در حین آزمایش ثابت است، برای راحتی محاسبات بعدی ارتفاع معادل قسمت جامد به صورت زیر تعریف می شود:

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad (۷)$$

A : سطح نمونه آزمایشی (cm^2)

۷.۱. تخلخل نمونه آزمایشی را قبل و بعد از آزمایش محاسبه کنید.

$$e_0 = \frac{H_0 - H_s}{H_s} \times 100 \quad (۸)$$

e_0 : تخلخل آزمایشی نمونه قبل از آزمایش

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s} \times 100 \quad (۹)$$

e_f : تخلخل آزمایشی نمونه بعد از آزمایش

H_0 : ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی (cm)

H_f : ارتفاع نهایی نمونه آزمایشی (cm)

۸.۱. درصد اشباع نمونه آزمایشی را قبل و بعد از آزمایش محاسبه کنید.

$$S_0 = \frac{M_{T_0} - M_d}{A\rho_w(H_0 - H_s)} \times 100 \quad (10)$$

درصد اشباع اولیه :

$$S_0 = \frac{M_{T_f} - M_d}{A\rho_w(H_f - H_s)} \times 100 \quad (11)$$

درصد اشباع نهایی :

۲. مشخصات زمان-تغییر شکل

۱.۲. مشابه شکل ۳ نمودار قرانت تغییر شکل-لگاریتم زمان (معمولاً به دقیقه) را برای هر گام بارگذاری رسم کنید.

۲.۲. مشابه شکل ۴ نمودار قرانت تغییر شکل-جذر زمان (معمولاً به دقیقه) را برای هر گام بارگذاری رسم کنید.

۳.۲. ضریب تحکیم را برای هر گام بارگذاری به صورت زیر محاسبه کنید:

$$C_v = \frac{TH_{D50}^2}{t} \quad (12)$$

T: ضریب زمان

در روش لگاریتم زمان که محاسبات برای زمان ۵۰ درصد تحکیم انجام می شود:

$$T = T_{50} = 0.197$$

در روش جذر زمان که محاسبات برای زمان ۹۰ درصد تحکیم انجام می شود:

$$T = T_{90} = 0.848$$

t: زمان

در روش لگاریتم زمان $t = t_{50}$

در روش جذر زمان $t = t_{90}$

H_{D50} : طول زهکشی در زمانی که ۵۰ درصد تحکیم انجام شده باشد. در صورتی که در آزمایش، زهکشی از دو طرف انجام شود H_{D50} نصف ارتفاع نمونه آزمایشی و در صورتی که در آزمایش، زهکشی یک طرفه باشد H_{D50} برابر ارتفاع نمونه آزمایشی است.

۳. مشخصات بار - تغییر شکل
محاسبات زیر را در یک جدول برای هر گام بارگذاری انجام دهید.

۱،۳. تغییر ارتفاع نمونه آزمایشی را نسبت به ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی به دست آورید.

$$\Delta H = d - d_0 \quad (13)$$

• در این قسمت تصحیح مربوط به تغییر شکل دستگاه را در صورت لزوم اعمال کنید.
۲،۳. تخلخل نمونه آزمایشی را محاسبه کنید.

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_s} \quad (14)$$

۲،۳. تنش قائم وارد بر نمونه آزمایشی را محاسبه کنید.

$$\sigma_v = \frac{P}{A} \quad (15)$$

P: بار وارد بر نمونه آزمایشی (N)

σ_v : تنش قائم (kPa)

۴،۳. مطابق شکل ۱ نمودار تغییرات $e - p$ را در مقیاس لگاریتمی رسم کنید.

۵،۳. مقدار فشار بیش تحکیمی نمونه آزمایشی را مطابق شکل ۲ به دست آورید.

گزارش

علاوه بر اطلاعات عمومی نمونه، موارد زیر باید در گزارش ذکر شوند:

۱. مشخصات توصیفی خاک از قبیل حدود اتربرگ، وزن مخصوص دانه ها، دانه بندی و...

۲. مشخصات فیزیکی خاک مانند:

• درصد رطوبت اولیه و نهایی نمونه آزمایشی

- وزن مخصوص خشک اولیه و نهایی نمونه آزمایشی
- تخلخل اولیه و نهایی نمونه آزمایشی
- درصد اشباع اولیه و نهایی نمونه آزمایشی

۳. روند انجام آزمایش

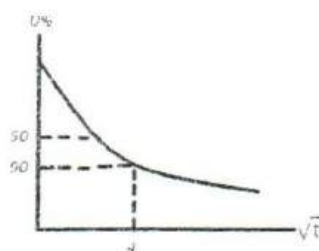
- چگونگی تهیه نمونه‌ها
- مشخصات دستگاه تحکیم
- مشخصات روند بارگذاری

۴. ارائه نتایج به صورت نمودار

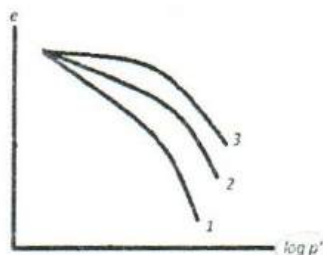
- نمودار تغییر مکان - لگاریتم زمان برای هر گام بارگذاری
- نمودار تغییر مکان - جذر زمان برای هر گام بارگذاری
- نمودار تخلخل - لگاریتم فشار فائز
- نمودار ضریب تحکیم - تخلخل و روش استفاده شده برای محاسبه ضریب تحکیم (جذر زمان - لگاریتم زمان)

سؤالات

۱. در یک آزمایش تحکیم در آزمایشگاه بر روی نمونه ای با ضخامت ۲۰ میلی متر، اگر تخلخل اولیه ۰/۶ در اثر افزایش تنش به صورت $\frac{\Delta P}{P} = 1$ به ۰/۴ برسد، مقدار شاخص فشردگی و نشست تحکیمی چه قدر است؟
۲. دانشجویی پس از انجام آزمایش تحکیم با استفاده از نتایج نمودار زیر را رسم کرد. اگر ارتفاع حلقه تحکیم ۲۰ میلیمتر باشد و زهکشی از دو طرف انجام شود، الف) ضریب تحکیم چقدر است؟ (۲ بر حسب ثانیه است) ب) توضیح دهید این دانشجو چگونه مقدار ۴ را محاسبه کرده است؟



۳. الف) شکل زیر منحنی های تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم انجام شده بر روی یک خاک رس اشباع را که توسط سه گروه ۱ و ۲ و ۳ با زمان های مختلف اعمال بار نشان می دهد. کدام گزینه درست است؟



$$t_1 = t_2 = t_3 \quad (۳) \quad t_1 > t_2 > t_3 \quad (۲) \quad t_3 > t_2 > t_1 \quad (۱)$$

ب) اگر فقط $\frac{\Delta P}{p}$ معیار باشد و سایر عوامل ثابت در نظر گرفته شود، کدام گزینه درست است؟

$$\frac{\Delta P}{p_1} = \frac{\Delta P}{p_2} = \frac{\Delta P}{p_3} \quad (۳) \quad \frac{\Delta P}{p_1} > \frac{\Delta P}{p_2} > \frac{\Delta P}{p_3} \quad (۲) \quad \frac{\Delta P}{p_3} > \frac{\Delta P}{p_2} > \frac{\Delta P}{p_1} \quad (۱)$$

۴. نشست تحکیم را تعریف کنید.

۵. شکل دستگاه تحکیم یک بعدی را رسم کنید و اجزای آن را مشخص کنید.

۶. نمودار تغییر شکل-زمان را برای آزمایش تحکیم رسم کنید.

۷. درستی و نادرستی گزاره های زیر را با ذکر دلیل تعیین کنید.

(۱) برای محاسبه نشست تحکیمی داشتن مقادیر شاخص فشردگی و تنش بیش تحکیمی ضروری است.

(۲) اگر پدیده تحکیم یک بعدی را با مدل فنر شبيه سازی کنیم، سختی فنر ضریب ادنومتري خاک (E') را بیان می کند.

(۳) در محاسبه مقدار نشست باید ضریب تحکیم با فرض مقدار ثابت استفاده شود.

(۴) فشردگی اولیه در نمودار عمومی تحکیم به دلیل دست خوردگی نمونه است.

۸. در حین آزمایش تحکیم یک بعدی یک نمونه رسی کاملاً اشباع به ضخامت اولیه 3cm تحت افزایش فشار قائم 2kg/cm^2 قرار می گیرد و پس از رسیدن به تعادل، ضخامت نمونه به 2.6cm تقلیل می یابد. سپس فشار قائم از روی نمونه برداشته شده و به نمونه اجازه تورم و جذب آب داده می شود. در نهایت ضخامت نمونه برابر 2.8cm و درصد رطوبت آن 25% اندازه گیری می شود. اگر چگالی دانه ها 2.6 باشد، نسبت تخلخل نمونه در ابتدای بارگذاری چه قدر بوده است؟

