دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه تربیت معلم تهران

آزمایشگاه مکانیک خاک

Soil Mechanics Laboratory

دکتر امیر حمیدی

عضو هیات علمی دانشگاه تربیت معلم تهران

بسم الله الرحمن الرحيم

آزمایشگاه مکانیک خاک

Soil Mechanics Laboratory

دکتر امیر حمیدی

عضو هیات علمی دانشگاه تربیت معلم تهران

با همکاری:

روح اله سعادتی

جواد بختیاری

تابستان ۱۳۹۰

پیشگفتار

آزمایشگاه مکانیک خاک یکی از دروس مهم و اساسی برای دانشجویان دوره کارشناسی مهندسی عمران است. در این درس اصول و مبانی آزمایشگاهی برای تعیین ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی خاک تدریس می شود. روشها و تکنیکهای آزمایشگاهی در مکانیک خاک در مسائل حرفه ای مهندسی عمران نیز بسیار پرکاربرد بوده و جایگاه ویژه ای را دارا می باشد. در این مجموعه، تعدادی از مهمترین آزمونهای مکانیک خاک به تفضیل مورد بررسی قرار گرفته است. در هر آزمایش با تکیه بر اصول و مبانی استانداردهای به روز جهانی، نحوه و شرایط انجام آزمایش به همراه پارامترهای کلیدی و نحوه محاسبات و تهیه گزارش آزمایشگاهی بحث و ارائه شده که امید است مطالعه آن برای دانشجویان دوره کارشناسی مهندسی عمران مفید واقع گردد.

حمیدی، تابستان ۱۳۹۰

فهرست مطالب

آزمایش دانه بندی خاک	٦
آزمایش هیدرومتری	١١
آزمایش حد روانی و حد خمیری	١٦
آزمایش هم ارز ماسه	٢٧
آزمایش تعیین چگالی ویژه	٣١
آزمایش تعیین وزن واحد حجم خاک به روش مخروط ماسه	٣٦
آزمایش CBR یا تعیین نسبت باربری کالیفرنیا	٤٠
آزمایش تک محوری محصور نشده	٤٧
آزمایش تراکم	٥١
آزمایش تحکیم	٥٦
آزمایش برش مستقیم	٦٤
آزمایش سه محوری	٧١

۱- آزمایش دانه بندی خاک (ASTM D: 422-87، AASHTO T: 88-81)

۱-۱- مقدمه

اصطلاحات اصلی که مهندسان راه و ساختمان برای توصیف خاک به کار می برند، عبارتند از شن و ماسه (درشت دانه)، لای و رس (ریزدانه). اغلب خاک های طبیعی شامل مخلوطی از دو یا بیشتر از این اجزا هستند و بسیاری از آنها مقداری مواد آلی نیز دارند.

خاکها را میتوان از دیدگاه های متفاوتی مانند اندازه دانه ها یا جنس کانی ها یا از مقاومت و منشأ ایجاد آنها طبقه بندی نمود.

به طور کلی میتوان گفت بسیاری از خواص مکانیکی و فیزیکی خاک ها تابعی از جنس، شکل، اندازه و چگونگی توزیع اندازه دانه ها است. بر این پایه، اساس رده بندی مهندسی خاکها، اندازه و خاصیت خمیری آنها قرار داده شده است. تقریبا تمام سیستم های طبقه بندی، خاکها را به سه دسته خاک های درشت دانه(فاقدچسبندگی)، ریزدانه(چسبنده) و خاکهای آلی تقسیم می کنند. دراین رده بندی ها، دانه به معنای یک ذره کانی منفرد یا قطعه ای از چند کانی به هم پیوسته است که در آب از یکدیگر جدا نمی شود.

خاک های درشت دانه به شن و ماسه و خاکهای ریز دانه به سیلت (لای) و رس تقسیم می شوند. جدول (۱-۱) نشان می دهد که تقسیم بندی خاکهای غیر آلی به دو گروه درشت دانه و ریز دانه در عین حال بسیاری از خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ها را نیز مشخص می کند. در جدول (۱-۱) طبقه بندی خاکها به روش ASTM مشخص شده است.

جدول (۱-۱): طبقه بندی خاکها به روش ASTM

طبقه بندی	Size (mm)
شن	بزرگتر از ٤/٧٥
ماسه درشت	٤/٧٥ تا ٢/٠٠
ماسه متوسط	٢/٠٠ تا ٠/٤٢٥
ماسه ریز	٠/٤٢٥ تا ٠/٠٧٥
ریزدانه ها (لای و رس)	زیر ٠/٠٧٥

طبقه بندی خاک های درشت دانه بر مبنای اندازه دانه ها و چگونگی توزیع ابعادی آنها انجام می شود. برای تعیین توزیع دانه ها در یک نمونه خاک معمولا از روش سرند استفاده می شود. حد پایینی کاربرد سرند در آزمایش های مکانیک خاک تا ٧٤ میکرون است. هر چند تا اندازه سرند ۳۸ میکرون نیز می تواند قابل استفاده باشد.

برای تعیین توزیع دانه های ریزتر از حد کاربرد سرند ها از روش رسوبدهی (هیدرومتری) استفاده می شود.

۱-۲- دانه بندی

امروزه اهمیت پی بردن به توزیع، اندازه دانه های خاک به قدری است که این آزمایش (دانه بندی) در اکثر آزمایشگاه ها به عنوان یک آزمایش ضروری انجام می شود.

دانه بندی به سه روش عمده انجام می شود:

الف–الک

ب–هیدرومتری

پ–ترکیبی از هر دو

در روش دانه بندی با الک، با استفاده ازمجموعه ای از الک ها و لرزاندن آنها، درصد وزنی دانه های مختلف خاک به دست می آید. این آزمایش بیش تر برای خاک هایی مورد استفاده است که بیشتر از ۹۰٪ دانه هایشان بزرگ تر از الک شماره ۲۰۰ باشد.

برای خاک هایی که بیشتر از ۹۰٪ ریزتر از الک ۲۰۰ باشند آزمایش هیدرومتری انجام می گیرد. این آزمایش بر پایه قانون استوکس و فرض کروی بودن دانه هاست.

در مورد خاک های مخلوط درشت دانه و ریز دانه، برای بخش درشت تر از الک ۲۰۰، آزمایش دانه بندی و برای ریزتر از آن، آزمایش هیدرومتری انجام می شود.

۱–۳– انواع آزمایش الک:

آزمایش الک را به دو صورت می توان انجام داد.

۱–۳–۱– روش خشک

در این روش مقداری از خاک را برداشته، دانه های چسبنده و کلوخی شکل را خرد می کنند و در مجموعه ای از الک ها قرار می دهند .

با لرزش این مجموعه به مدت حدود ۱۲ دقیقه، درصد وزنی مقادیر باقی مانده روی هر الک را مشخص و منحنی دانه بندی برای درصد عبوری از هر الک در مقیاس نیمه لگاریتمی رسم می گردد.

این روش برای خاک های درشت دانه موثرتر است، چرا که شکل دانه ها به کره نزدیکتر است و دانه ها مجزا از یکدیگر می باشند.

۱–۳–۲– روش تر

در این روش خاک ریزدانه را روی الک ۲۰۰ می ریزند، با فشار آب، الک و خاک را تا جایی که آب خارج شده شفاف و رقیق شود، می شویند و بعد آنرا خشک می کنند. سپس دانه های مانده روی آن را برای آزمایش الک و بقیه را برای هیدرومتری به کار می برند.

۱–٤– وسایل آزمایش

مهمترین وسایل مورد نیاز عبارتند از:

– ترازو با دقت ۰/۱

– فرچه یا مسواک برای تمیز کردن الک

– گرمخانه (اون)

– آب فشان

– الک

سری الک های استاندارد در آزمایش دانه بندی به قرار جدول (۱–۲) می باشند.

شکل(۱-۱): چگونگی قرارگیری الک ها در شیکر

جدول (۱-۲): سری الک های استاندارد

Size (mm)	شماره
-	No. 4 (4.75mm)
3in (75mm)	No. 10 (2.0mm)
2in (50mm)	No. 20 (850µm)
1.5in (37.5mm)	No. 40 (425µm)
1.0in (25mm)	No. 60 (250µm)
3/4in (19mm)	No. 140 (106µm)
3/8in (9.5mm)	No. 200 (75µm)

در صورتی که از سری الک های جدول(۱-۳) استفاده شود منحنی دانه بندی با استفاده از نقاطی با فاصله یکنواخت رسم خواهد شد.

جدول(۱-۳): سری الک های منحنی یکنواخت

Size (mm)	شماره
3.0in (75mm)	-
1.5in (37.5mm)	No. 16 (1.18mm)
3/4in (19mm)	No. 30 (600µm)
3/8in (9.5mm)	No. 50 (300µm)
No. 4 (4.75mm)	No. 100 (150µm)
No. 8 (2.36mm)	NO.۲۰۰ (۷۵µm)

۱-۵- روش انجام آزمایش

۱-۵-۱- انتخاب نمونه

قدم اصلی تعیین مقدار خاک لازم برای آزمایش است که این مقدار بستگی به قطر درشت ترین دانه خاک دارد. اگر این قطر با D نمایش داده شود و W وزن خاک لازم برای آزمایش باشد، در آن صورت رابطه 200D<W<600D، که در آن w به گرم و D به میلی متر است وزن لازم برای آزمایش را تعیین می کند. D در حقیقت قطر سوراخ ریزترین الکی است که بزرگ ترین ذره از آن عبور می کند. عموماً برای انتخاب مقدار خاک لازم برای آزمایش از جدول (۱-٤) استفاده می شود:

جدول(۱-٤): تعیین مقدار خاک لازم

D بزرگترین قطر اسمی	۳/۸ in	۳/٤ in	۱ in	۱۱/۲ in	۲ in	۳ in
دانه ها (mm)	۹/۵>	۱۹>	۲۵/٤>	۳۸/۱>	۵۰/۸>	۷٦/۲>
حداقل وزن نمونه لازم (gr)	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	٤۰۰۰	۵۰۰۰

در خاک های ماسه ای ریز عموماً ۱۱۵ gr وبرای خاک های سیلتی و رسی تقریبا ٦۵ gr به عنوان وزن اولیه بـرای آزمـایش در نظر گرفته می شود.

۱-٦- محاسبات

پس از اتمام آزمایش و محاسبه مقادیر باقی مانده روی هر الک، درصد آنها نسبت به وزن کل نمونه (W) سنجیده می شود. سپس برای هر الک، درصد تجمعی مانده روی آن به دست می آید. با کم کردن این مقادیر از عدد۱۰۰، درصد عبوری از هر الک محاسبه می شود.

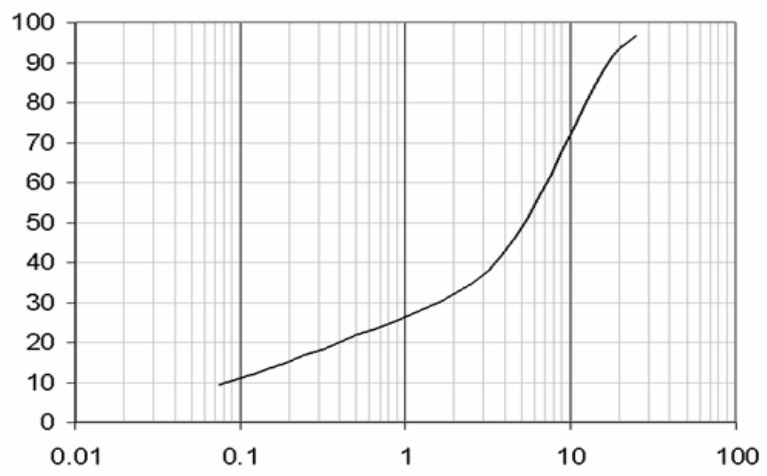
۱-۷- منحنی دانه بندی:

همان طور که گفته شد، توزیع اندازه دانه های یک خاک به صورت منحنی بر محورهای مختصات نیمه لگاریتمی نشان داده می شود. عرض نقاط واقع بر این منحنی درصد وزنی دانه های کوچک تر از اندازه ای است که روی محور طول ها داده شده است. هر قدر شیب منحنی دانه بندی کمتر باشد،حدود تغییر در اندازه دانه های خاک بیشتر است و هر قدر شیب منحنی بیشتر باشد، دانه های خاک یکنواخت تر هستند. در یک خاک دانه ای اگر توزیع اندازه دانه ها از درشت تا ریز گسترده شده باشد خوب دانه بندی شده نامیده می شود.

بعلاوه در شرایط زیر نیز خاک بد دانه بندی شده نامیده می شود:

الف) درصد قابل توجهی از دانه های خاک به یک اندازه باشد یا به عبارت دیگر دانه بندی یکنواخت باشد.

ب) خاک به اندازه کافی دانه های بزرگ و کوچک داشته باشد، ولی دانه های حد متوسط در آن کم باشد. این حالت را دانه بندی منقطع (میان تهی) می نامند. نشان دادن اندازه دانه های خاک روی محور لگاریتمی این ویژگی را دارد که صرف نظر از محل قرارگیری منحنی توزیع اندازه دانه ها، دو نوع خاک با درجه یکنواختی یکسان، با منحنی های مشابه نشان داده می شوند.



شکل(۱-۲): منحنی دانه بندی

اندازه دانه های مربوط به هر درصد کوچک تر را میتوان مستقیما از منحنی دانه بندی به دست آورد، مثلاً D10، D30، D60 مترادف با قطر دانه هایی هستند که به ترتیب۶۰، ۳۰، ۱۰ درصد دانه های خاک از آن که کوچکتر می باشند. شکل منحنی دانه بندی را میتوان با استفاده از ضریب یکنواختی (C_u) و ضریب خمیدگی(C_C) که از روابط زیر به دست می آید، توصیف نمود:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad (۱-۱)$$

$$Cu = \frac{{D_{30}}^2}{D_{10} \times D_{60}} \qquad (۱-۲)$$

ضریب خمیدگی خاک های خوب دانه بندی شده بین ۱ تا ۳ متغیر است.همچنین می توان نوشت:

برای خاک شنی خوب دانه بندی شده: $C_U \geq ٤$ و $١ \leq C_C \leq ٣$

برای خاک ماسه ای خوب دانه بندی شده: $C_U \geq ٦$ و $١ \leq C_C \leq ٣$

۲- آزمایش هیدرومتری (AASHTO T: 86-87, T: 88-90, ASTM D: 421-58, 422-63)

۲-۱- مقدمه

توزیع دانه بندی دانه های درشت خاک (بزرگ تر از ۰/۰۷۵ برابر با اندازه الک ۲۰۰) با استفاده از روش دانه بندی با الک تعیین می شود، ولی برای تعیین درصد اندازه درات ریز خاک باید از روش هیدرومتری استفاده شود.

۲-۲- تصحیح هیدرومتر و آماده کردن نمونه

قرائت انجام شده از هیدرو متر به سه دلیل باید تصحیح شود:

۱- در رابطه محاسبه درصد ذرات معلق که با استفاده از قانون استوکس بدست آمده فرض شده است که مایع مورد استفاده آب مقطر می باشد. ولی در این آزمایش ماده پراکنده نیز به همراه آب مقطر استفاده می شود. دانسیته محلول حاصل به میزان قابل توجهی از آب مقطر زیادتر است.

۲- هر نوع هیدرومتر ،H ۱۵۱ و H ۱۵۲ در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد.

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 هیدرومتر ها 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 درون یابی انجام می شود.

برای محاسبه ضریب تصحیح قرائت هیرومتر به صورت زیر عمل کنید:

۱- ۱۰۰۰ میلی متر از محلول آب مقطر و ماده پر کننده 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.

٤- ضریب تصحیح برای هیدرومتر ۱۵۱H اختلاف مقدار قرائت شده و عدد یک است. برای هیدرومتر ۱۵۵H ضریب تصحیح اختلاف قرائت و عدد صفر است.

۵- همین کار را برای دمای انتخابی دیگر نیز انجام داده و نمودار تغییرات ضریب تصحیح قرائت با دما را به صورت خطی رسم کنید.

۲-۳- آزمایش هیدرومتری

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- با استفاده از درپوش لاستیکی یا کف دست استوانه را واژگون کنید و دوباره به حال اول بر گردانید و این عمل را به مدت یک دقیقه استوانه را در محل مناسبی قرار داده و هیدرومتر را در بازه های زمانی زیر قرائت کنید: ۲، ۵، ۳۰، ٦۰، ۲۵۰، ۱٤٤۰ (دقیقه)

هنگامی که می خواهید قرائت هیدرومتر را انجام دهید، ۲۰ تا ۲۵ ثانیه قبل از قرائت، هیدرومتر را درون استوانه رسوبگذاری قرار دهید و پس از قرائت بلافاصله آن را از مخلوط خارج ساخته و درون استوانه حاوی آب مقطر قرار دهید. قرائت ها را بر اساس عدد بالای قوس تشکیل شده در سطح مایع انجام دهید.

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

۲-٤- وسایل آزمایش

- استوانه رسوب گذاری مدرج با ظرفیت ۱۰۰۰cc و قطر داخلی ۸۵mm (حداقل ٦۳/۵mm)
- هیدرومتر(مدل ۱۵۲H ترجیح داده می شود)
- محلول پراکنده ساز(هگزا متا فسفات سدیم ($NaPO_3$) یا سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3).
- حمام ظرف هیدرومتر.
- دماسنج مدرج شده تا ۰/۱ درجه که شامل درجات بین ۲+ تا ٤۰+ باشد.
- کرنومتر برای اندازه گیری زمان.
- ترازو با دقت ۰/۱ گرم که ظرفیت آن ۲۰۰ گرم باشد.
- همزن مکانیکی (mixer)

شکل(۲-۱): همزن مکانیکی

۲-۵- محاسبات

۲-۵-۱- آنالیز دانه های روی الک شماره ۱۰

الف- درصد عبوری از الک شماره ۱۰ را با تقسیم وزن عبوری از الک ۱۰ بر وزن کل نمونه ریخته شده روی الک و ضرب آن در ۱۰۰ بدست آورید

ب- برای بدست آوردن در صد عبوری از الک شماره ٤،وزن عبور کرده از الک شماره ۱۰ را با وزن عبور کرده از الک شماره ٤ و مانده روی الک ۱۰ جمع کرده و بر وزن کل نمونه تقسیم نمایید.حاصل را در عدد ۱۰۰ ضرب کنید.

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

۲-۵-۲- ضریب تصحیح هیدرومتر.

ضریب تصحیح هیدرومتر 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.

۲-۵-۳- محاسبه درصد ذرات معلق

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

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

$$W = \frac{\text{وزن خشک نمونه استفاده شده در آزمایش هیدرومتری}}{\text{درصد عبوری از الک شماره ۱۰}} \qquad (۱-۲)$$

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

برای هیدرومتر ۱۵۱H

$$P = \left[\frac{100000}{W}\frac{G}{G - G_1}\right](R - G_1) \qquad (۲-۲)$$

برای هیدرومتر۱۵۲H

$$P = \left(\frac{R\alpha}{W}\right) \times 100 \qquad (۳-۲)$$

α: ضریب تصحیح برای قرائت هیدرومتر۱۵۲H (مقادیر کالیبراسیون برای وزن مخصوص دانه ها برابر ۲/۶۵ محاسبه 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 آزماش دانه بندی

G: وزن مخصوص دانه های خاک

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

۲-۵-٤- 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 قطر دانه معادل با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$D = \sqrt{\left[\frac{30n}{980(G-G_1)}\right]} \times \frac{L}{T} \qquad (۴-۲)$$

D: قطر دانه به میلیمتر.

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

L: فاصله بین سطح مخلوط تا عمقی که هیدرومتر دانسیته مخلوط را اندازه می گیرد (به سانتیمتر).

T: فاصله زمانی قرائت مورد نظر از زمان آغاز قرائت های هیدرومتر.

G: وزن مخصوص دانه های خاک.

G_1: وزن مخصوص مایعی که ذرات خاک در آن غوطه ور هستند (معمولا این مقدار ۱/۰۰در نظر گرفته می شود).

$$D = K\sqrt{\frac{L}{T}} \qquad (۵-۲)$$

K: ضریب ثابت که بستگی به دمای مخلوط و وزن مخصوص دانه های خاک دارد. مقادیر K برای مقادیر مختلف دما و وزن مخصوص دانه ها در جدول(۲-۱) داده شده است.

۲-۵-۵- آنالیز دانه های زیر الک ۱۰

الف- محاسبه وزن قسمتی از نمونه که اگر از نمونه آزمایش هیدرومتری جدا نمی شد روی الک ۱۰ باقی می ماند.

m=[(درصد کل مانده روی الک شماره ۱۰) ✕ (وزن کل نمونه استفاده شده در آزمایش W)] /۱۰۰ (۶-۲)

ب- وزن کل عبوری از الک شماره ۲۰۰ و الک های بین ۲۰۰ و ۱۰ را محاسبه کنید.

پ- درصد عبوری از هر محاسبه کنید.

ت- منحنی دانه بندی بدست آمده را رسم کنید. در نمودار مورد نظر در محور افقی قطر دانه ها در مقیاس لگاریتمی و در محور قائم درصد عبوری از هر الک نشان داده می شود.

جدول(۲-۱): مقادیر چگالی های مختلف خاک

دما (°C)	۲٫۵۰	۲٫۵۵	۲٫۶۰	۲٫۶۵	۲٫۷۰	۲٫۷۵	۲٫۸۰	۲٫۸۵
۱۶	۰٫۰۱۵۱	۰٫۰۱۴۸	۰٫۰۱۴۶	۰٫۰۱۴۴	۰٫۰۱۴۱	۰٫۰۱۳۹	۰٫۰۱۳۷	۰٫۰۱۳۶
۱۷	۰٫۰۱۴۹	۰٫۰۱۴۶	۰٫۰۱۴۴	۰٫۰۱۴۲	۰٫۰۱۴۰	۰٫۰۱۳۸	۰٫۰۱۳۶	۰٫۰۱۳۴
۱۸	۰٫۰۱۴۸	۰٫۰۱۴۴	۰٫۰۱۴۲	۰٫۰۱۴۰	۰٫۰۱۳۸	۰٫۰۱۳۶	۰٫۰۱۳۴	۰٫۰۱۳۲
۱۹	۰٫۰۱۴۵	۰٫۰۱۴۳	۰٫۰۱۴۰	۰٫۰۱۳۸	۰٫۰۱۳۶	۰٫۰۱۳۴	۰٫۰۱۳۲	۰٫۰۱۳۱
۲۰	۰٫۰۱۴۳	۰٫۰۱۴۱	۰٫۰۱۳۹	۰٫۰۱۳۷	۰٫۰۱۳۴	۰٫۰۱۳۳	۰٫۰۱۳۱	۰٫۰۱۲۹
۲۱	۰٫۰۱۴۱	۰٫۰۱۳۹	۰٫۰۱۳۷	۰٫۰۱۳۵	۰٫۰۱۳۳	۰٫۰۱۳۱	۰٫۰۱۲۹	۰٫۰۱۲۷
۲۲	۰٫۰۱۴۰	۰٫۰۱۳۷	۰٫۰۱۳۵	۰٫۰۱۳۳	۰٫۰۱۳۱	۰٫۰۱۲۹	۰٫۰۱۲۸	۰٫۰۱۲۶
۲۳	۰٫۰۱۳۸	۰٫۰۱۳۶	۰٫۰۱۳۴	۰٫۰۱۳۲	۰٫۰۱۳۰	۰٫۰۱۲۸	۰٫۰۱۲۶	۰٫۰۱۲۴
۲۴	۰٫۰۱۳۷	۰٫۰۱۳۴	۰٫۰۱۳۲	۰٫۰۱۳۰	۰٫۰۱۲۸	۰٫۰۱۲۶	۰٫۰۱۲۵	۰٫۰۱۲۳
۲۵	۰٫۰۱۳۵	۰٫۰۱۳۳	۰٫۰۱۳۱	۰٫۰۱۲۹	۰٫۰۱۲۷	۰٫۰۱۲۵	۰٫۰۱۲۳	۰٫۰۱۲۲
۲۶	۰٫۰۱۳۳	۰٫۰۱۳۱	۰٫۰۱۲۹	۰٫۰۱۲۷	۰٫۰۱۲۵	۰٫۰۱۲۴	۰٫۰۱۲۲	۰٫۰۱۲۰
۲۷	۰٫۰۱۳۲	۰٫۰۱۳۰	۰٫۰۱۲۸	۰٫۰۱۲۶	۰٫۰۱۲۴	۰٫۰۱۲۲	۰٫۰۱۲۰	۰٫۰۱۱۹
۲۸	۰٫۰۱۳۰	۰٫۰۱۲۸	۰٫۰۱۲۶	۰٫۰۱۲۴	۰٫۰۱۲۳	۰٫۰۱۲۱	۰٫۰۱۱۹	۰٫۰۱۱۷
۲۹	۰٫۰۱۲۹	۰٫۰۱۲۷	۰٫۰۱۲۵	۰٫۰۱۲۳	۰٫۰۱۲۱	۰٫۰۱۲۰	۰٫۰۱۱۸	۰٫۰۱۱۶
۳۰	۰٫۰۱۲۸	۰٫۰۱۲۶	۰٫۰۱۲۴	۰٫۰۱۲۲	۰٫۰۱۲۰	۰٫۰۱۱۸	۰٫۰۱۱۷	۰٫۰۱۱۵

۲-۶- گزارش

گزارش آزمایش علاوه بر موارد ذکر شده باید شامل موارد زیر نیز باشد

الف- حداکثر اندازه دانه ها در نمونه

ب- جدول درصد عبوری از هر الک

پ- توصیف شکل دانه های شنی و ماسه ای

ت- وزن مخصوص دانه ها

ث- ماده پراکنده استفاده شده

۳- آزمایش حد روانی و حد خمیری (AASHTO T: 89, 90-81 , ASTM D: 4318-87)

۳-۱- مقدمه

خاک های ریزدانه با افزایش مقدار آب جذب شده حالات مختلفی به خود می گیرند. افزایش آب باعث پوشیده شدن دانه ها با یک لایه آب جذب سطحی می شود. با افزایش آب، ضخامت لایه آب دور دانه ها اضافه و لغزش دانه ها روی یکدیگر راحت تر می شود. بنابر این رفتار خاک عملاً به میزان آب داخل مجموعه بستگی دارد.

خاک ریزدانه بر حسب درصد رطوبتش می تواند در یکی از حالات جامد، نیمه جامد، خمیری و مایع دسته بندی شود. حد فاصل این حالات به صورت جدول (۳-۱) تعریف می شود.

جدول (۳-۱): ارتباط میزان رطوبت و حالت مکانیکی یا درجه سختی خاک

میزان رطوبت خاک	حالت مکانیکی (ورز داده شده)	درجه سختی (ورز داده شده)
PI=LL-PL	مایع	خیلی شل
	لزج (شروع حالت خمیری)	شل
LL- حد روانی	خمیری	متوسط
PL- حد خمیری	شروع حالت نیمه جامد	-
SL- حد انقباض	نیمه جامد	سفت
	شروع حالت جامد	-
	جامد	خیلی سفت
	جامد	سخت

حد روانی (Liquid limit)[۱]: مرز بین حالت خمیری و حالت روانی (مایع) خاک.

حد خمیری (Plastic limit)[۲]: مرز بین حالت خمیری و نیمه جامد.

حد انقباض (Shrinkage limit)[۳]: مرز بین حالت نیمه جامد و جامد.

حدروانی، درصد رطوبتی است که در آن و رطوبت های بالاتر از آن، به صورت سیال لزج عمل می کند.

حد خمیری، درصد رطوبتی است که خاک در آن تا قبل از حد روانی، به صورت خمیری رفتار می کند.

حد انقباض، درصد رطوبتی است که اگر رطوبت خاک از آن کمتر شود، تغییری در حجم خاک به وجود نمی آید.

توجه شود که درصد رطوبتی که باید به خاک اضافه شود تا از حد خمیری به حد روانی خود برسد، بیانگر میزان خاصیت خمیری آن خاک است که با شاخص خمیری (PI) مشخص می شود. شاخص خمیری، اختلاف حد روانی و حد خمیری است:

$$PI=LL-PL \qquad (۱-۳)$$

باید توجه داشت که حد روانی و حد خمیری برای خاک هایی تعیین می شوند که ساختار طبیعی خود را بر اثر ورز دادن از دست داده اند، اما حد انقباض را میتوان برای خاک های دست نخورده هم تعیین کرد. تفاوت بین حد انقباض خاک دست

نخورده و دست خورده، با شاخص روانی (LI) آن مشخص می شود. این شاخص نسبت اختلاف بین درصد رطوبت خاک در محل با حد خمیری، به شاخص خمیری است:

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} \qquad (۲-۳)$$

ω: درصد رطوبت خاک در محل

لایه آب جذب شده در اطراف دانه های خاک بستگی به نوع کانی و ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده، اندازه و شکل دانه های یک خاک ریزدانه دارد. با توجه به اینکه خواص از خاک مانند تراکم پذیری، مقاومت و همچنین حدود تعریف شده آتربرگ همگی متاثر از مشخصات این لایه آب جذب شده هستند بنابر این می توان روابطی تقریبی بین این خواص و حدود اتربرگ (Atterberg limits)[1] پیدا کرد.

براین اساس حدود اتربرگ می تواند پایه خوبی برای طبقه بندی و نامگذاری خاکهای ریزدانه باشد. همچنین تعیین حدود اتربرگ مصالح خاکریز می تواند روشی سریع برای کنترل مصالح در عملیات اجرایی باشد.

تعدادی از این ارتباطات کلی بین حدود اتربرگ و خصوصیات مهندسی خاکها که توسط کاساگرانده ارائه شده، در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول (۳-۲): ارتباط حدود اتربرگ و خصوصیات مکانیکی خاک ها

خصوصیات	مقایسه خاکها در LL ثابت و افزایش PI	مقایسه خاکها در PI ثابت و افزایش LL
تحکیم پذیری	تقریباً مشابه	افزایش
نفوذپذیری	کاهش	افزایش
میزان تغییرات حجم	کاهش	افزایش
طاقت در حدود ω_s	افزایش	کاهش
مقاومت خشک	افزایش	کاهش

۳-۲-نمودار خمیری

کاساگرانده در مورد رابطه بین شاخص خمیری و حد روانی چندین نوع از خاکهای طبیعی، مطالعاتی انجام داده و بر اساس نتایج این آزمایش ها، نموداری را به نام نمودار خمیری را مطابق شکل(۳-۱) پیشنهاد کرده است.

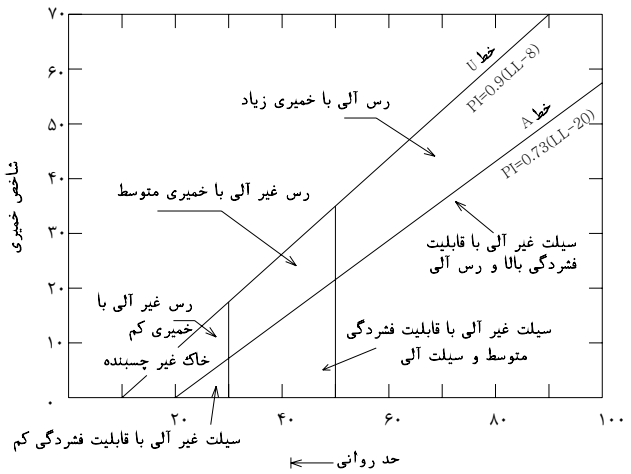
کاربرد خط A و خط U در شکل(۳-۱)، تعیین حد انقباض خاک است. کاساگرانده معتقد است حد انقباض خاک در صورت معلوم بودن شاخص خمیری و حد روانی به طور تقریبی تعیین می شود.

مراحل زیر باتوجه به شکل (۳-۲) چگونگی تعیین حد انقباض را بیان می کند:

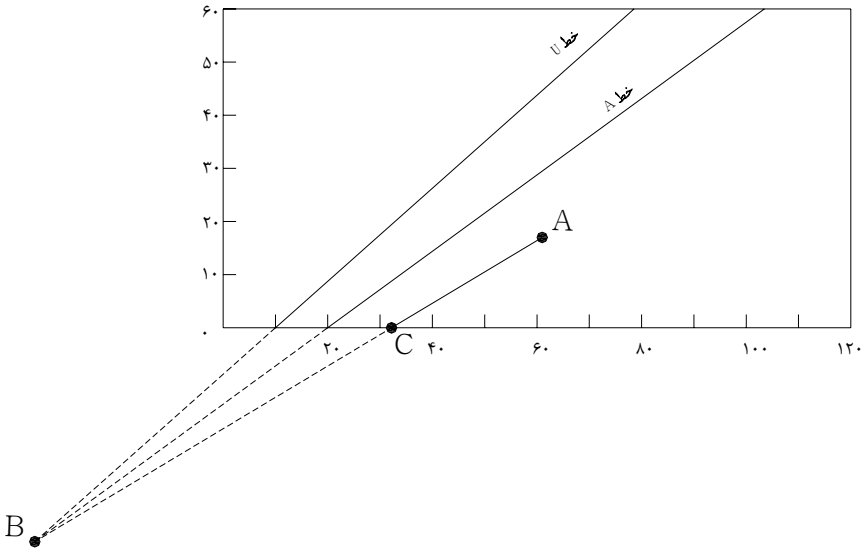
الف) از محل برخورد شاخص خمیری و حد روانی خاک، نقطه A مشخص می شود.

ب) امتداد خط A و خط U همدیگر را در نقطه B قطع می کنند. نقطه B مختصات LL= -۴۳/۵ و PI= -۴۶/۴ دارد.

ج)خط AB محور حد روانی را در نقطه C به عنوان حد انقباض (SL) محسوب می شود.



شکل (۳-۱): نمودار خمیری بر اساس حدود اتربرگ



شکل(۳-۲): تعیین حد انقباض از حد روانی و شاخص خمیری

۳-۳- وسایل مورد نیاز

۳-۳-۱- آزمایش تعیین حد روانی

- دستگاه کاساگرانده و شیارکش استاندارد
- صفحه شیشه ای و کاردکهای مخصوص
- هاون و دسته هاون چینی (برای جدا کردن ذرات خاک)
- ترازو با دقت۰/۰۱ گرم
- الک شماره ٤٠

۳-۳-۲- آزمایش تعیین حد خمیری

- صفحه شیشه ای و کاردکهای مخصوص (برای ورز دادن خاک مرطوب)
- ترازو با دقت ۰,۰۱گرم
- گرمخانه با درجه حرارت۱۰۵ تا ۱۱۰درجه سانتیگراد

۳-۳-۳-آزمایش تعیین حد انقباض

-ظرف انقباض

-صفحه شیشه ای با سه پایه زیر آن

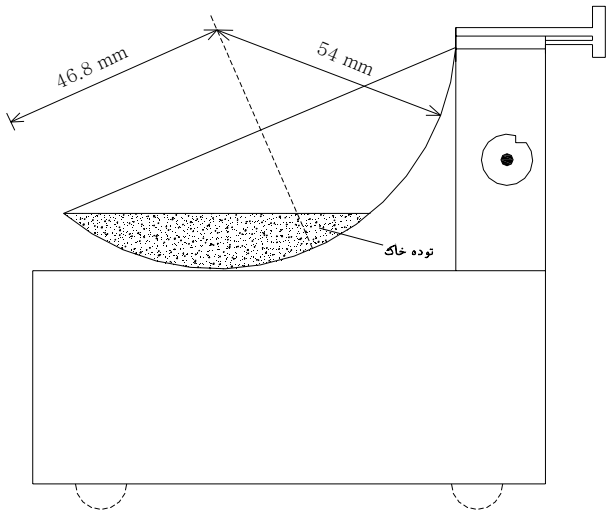
-جیوه

-دستگاه حجم سنج

-ترازو با دقت ۰,۰۱ گرم

۳-٤- آماده کردن دستگاه کاساگرانده

دستگاه کاساگرانده وسیله ای مکانیکی با یک پیاله برنجی به قطر داخلی ٥٤mm، ضخامت ۲mm و وزن ۲۰۰gr است، این پیاله از پشت بوسیله سنجاقی روی دو پایه ای که خود بر سکویی از جنس پلاستیک سخت قرار دارد، لولا می شود. با گرداندن یک دسته، پیاله روی لولا می چرخد، بالا می رود. سپس پایین افتاده 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 شکاف استاندارد در داخل نمونه خاک محتوی پیاله تعبیه شده است.



شکل(۳-۳): دستگاه کاساگرانده برای تعیین حد روانی خاک

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

۳-۵- نمونه ها

آزمایش حدود اتربرگ بر روی قسمت عبوری از الک۴۲۵µm (الک شماره ٤٠) انجام می شود. نمونه انتخابی از مصالح مورد نظر باید به اندازه ای باشد که قسمت عبوری از الک شماره ٤٠ آن حدود ۱۵۰ تا۲۰۰ گرم وزن داشته باشد.

۳-٦- روش انجام آزمایش

الف) وزن ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت تعیین میگردد(W_1)

ب) نمونه انتخابی از خاکی را در هوا خشک شده و از الک نمره ٤٠ عبور کرده است، در ظرف تبخیر قرار داده و به آن مقداری آب اضافه و خاک چنان مخلوط می گردد تا به صورت خمیر یکنواخت درآید.

پ) قسمتی از نمونه خاک آماده شده در جام کاساگرانده قرار گرفته و در حالی که جام روی پایه ثابت است، با کاردک، سطح خاک داخل جام صاف می شود. این عمل به طوری انجام می شود که عمق خاک در گودترین نقطه ۱۰mm باشد. خاک اضافی باقی مانده در یک ظرف جداگانه قرار گرفته و روی آن را یک دستمال خیس پوشانده شود تا رطوبت را از دست ندهد.

ت) با استفاده از شیارکش، روی خاک داخل جام شیاری در امتداد محور تقارن جام به وجود آورده می شود. برای این کار، شیارکش روی سطح خاک قرار داده شود و روی یک منحنی حرکت داده می شود. در خاک هایی که با این حرکت نمی توان شیار بوجود آورد، باید این کار را چندین بار تکرار کرد.

ث) بررسی می شود که خاکی روی پایه یا زیر جام نچسبیده باشد. دسته دستگاه با سرعتی در حدود ۲ ضربه در هر ثانیه چرخانده می شود. با این کار، جام بالا رفته و فرو می افتد و به این وسیله ضربه ای بر جام وارد می شود. این کار باید تا وقتی که شیار در طولی به اندازه ۱۳ mm(۰/۵ in)بسته شود، تکرار شود.

ج) بررسی شود که وجود حباب های هوا باعث بسته شدن زود هنگام شیار نشده باشد. در صورت مشاهده حباب هوا، آزمایش از اول تکرار شود. اگر بعد از چند بار تکرار با درصد رطوبت بالاتر، خاک همچنان داخل جام لغزید و برای بسته شدن شیار، همیشه تعداد ضربات کمتر از ۲۵ به دست آمد، با این روش حد روانی مورد نظر قابل تعیین نبوده و بدون انجام آزمایش حد خمیری، به عنوان یک خاک غیر خمیری معرفی می گردد.

چ) تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار یادداشت می شود. مقداری از خاک داخل جام که شامل قسمت بسته شده شیار است، برای تعیین درصد رطوبت، داخل ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت، داخل ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت ریخته شده و در پوش آن بسته می شود. سپس وزن ظرف و خاک مرطوب(W_2) را تعیین می شود.

ح) جام خالی شده، جام و شیارکش تمیز و برای مرحله بعد آماده می گردد.

خ) به نمونه خاک، مقداری آب اضافه می گردد تا درصد رطوبت آن بالاتر رفته و تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار کم شود. مراحل (پ) تا (ح) مجدداً انجام می شود. این عمل باید برای تعداد ضربات بین ۱۵ تا ۲۵، ۲۰ تا ۳۰، ۲۵ تا ۳۵ انجام شود.

د) درصد رطوبت سه نمونه تعیین می شود. برای این کار ظرف های تعیین درصد رطوبت در گرمخانه قرار داده شده تا خاک خشک شود و به یک وزن ثابت(W_3) برسد.

تذکر:

- مطابق استاندارد، آزمایش از روش خشک به تر انجام می شود به این ترتیب که از درصد پایین آب شروع کرده وبا افزودن آب به نمونه کم کم درصد رطوبت بالارفته تا به حد روانی برسد.

– اگر در این آزمایش خاک روی سطح پیاله بلغزد باید آزمایش را با درصد رطوبت بیشتر تکرار کرد . اگر بعد از چند بار تکرار با درصد رطوبت بالاتر، نمونه خاک همچنان داخل پیاله بلغزد و برای بسته شدن شیار همیشه تعداد ضربات کمتر از ۲۵ بدست آید با این روش نمی توان حد روانی خاک مورد نظر را تعیین کرد و خاک بدون انجام آزمایش حد خمیری بعنوان خاک غیر خمیری معرفی می گردد.

– آزمایش هایی که بیش از ۳۵ ضربه یا کمتر از ۱۵ضربه داشته باشند یادداشت نخواهند شد. درصد رطوبت در تکرارها باید به گونه ای باشد که یک آزمایش با ۲۵ تا ۳۵ ضربه، یک آزمایش با ۲۰ تا ۳۰ ضربه و یک آزمایش با ۱۵ تا ۲۵ ضربه بدست آید.

در ذیل شکل هایی از دستگاه کاساگرانده و روش آزمایش حد روانی خاک ارائه شده است.

۳-٤-الف) دستگاه به دقت تمیز و تنظیم شود.

۳-٤-ب) خاک با دقت و به طور یکنواخت، به میزان لازم در جام قرار گیرد.

۳-٤-ج) با سرعت ۱۲۰RPM به جام ضربه وارد تا دو طرف شیار به اندازه ۱۲/۷mm به هم برسد.

۳-٤- د) بعد از به هم رسیدن نمونه بخشی از آن برای تعیین درصد رطوبت جدا شود.

۳-۷- محاسبات

درصد رطوبت برای هر نمونه از رابطه زیر محاسبه شود:

$$\omega(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \qquad (۱-۳)$$

منحنی درصد رطوبت–لگاریتم تعداد ضربات رسم گردد. این منحنی تقریبا یک خط راست خواهد بود و منحنی جریان نامیده میشود از این خط میزان رطوبت مربوط به ۲۵ ضربه بدست می آید. این درصد رطوبت حد روانی خاک می باشد.

۳-۸-نکات کلی

حد روانی (LL) یک خاک را میتوان از رابطه زیر نیز به طور تقریبی به دست آورد (روش تک نقطه ای):

$$LL = \omega_N \times \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \qquad (۲-۳)$$

ω_N برابر با درصد رطوبت مربوط به بسته شدن شیار در طول ۱۲/۷mm است. در دستگاه حد روانی، ASTM نیز این رابطه را برای تعیین حد روانی خاک ها توصیه کرده است. این رابطه برای حالتی که N بین ۲۰ تا۳۰ باشد، معتبر است. در جدول (۳-۳)، $\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$ برای N های مختلف ارائه شده است:

جدول (۳-۳): محاسبه حد روانی بر اساس تعداد ضربات

N	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲٤	۲۵	۲٦	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
$\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$	۰/۹۷۳	۰/۹۷۹	۰/۹۸۵	۰/۹۹۰	۰/۹۹۵	۱/۰۰۰	۱/۰۰۵	۱/۰۰۹	۱/۰۱٤	۱/۰۱۸	۱/۰۲۲

وجود رس، باعث ایجاد خاصیت خمیری در خاک می شود و حد روانی یک خاک بر حسب مقدار و نوع کانی های رس آن تغییر می کند. مقادیر جدول (۳-٤) حدود تقریبی حد روانی بعضی از کانی های رسی است.

جدول(۳-٤): محدوده حد روانی در برخی از کانی های رسی

کانی رسی	حد روانی
کائولینیت	۳۵–۱۰۰
ایلیت	۵۵–۱۲۰
مونت موریلونیت	۱۰۰–۸٦۰

۳-۹- روش آزمایش تعیین حد خمیری

- از ۲۰گرم خاکی که در آزمایش تعیین حد روانی تهیه شده، ۱/۵تا ۲ برداشته با فشردن بین انگشتان بصورت یک توده بیضی شکل در آورده می شود. این توده خاکی بین انگشتان یا کف دست و یک صفحه شیشه ای که بر روی یک سطح صاف و افقی قرار دارد، با فشار کافی غلتانده شده تا قطر فیتیله ایجاد شده در تمام طول آن ثابت باشد. مقدار فشار اعمال شده با توجه به نوع خاک، کاملا متفاوت خواهد بود. مثلا خاکهای شکننده با خاصیت خمیری کم بهتر است با سطح خارجی دست یا نوک انگشتان بر روی صفحه غلتانده شوند. وقتی فیتیله به قطر۳/۲ میلیمتر رسید به چند قطعه تقسیم قطعات با هم بین دو دست فشرده شده تا، به شکل توده ای یکنواخت و بیضی شکل در آید و دوباره روی سطح شیشه بغلتد. این عمل آنقدر تکرار گردد تا خاک زیر فشار لازم برای غلتاندن آن خرد شود و دیگر نتواند به شکل فیتیله در آید . خرد شدن خاک ممکن است زمانی پیش آید که قطر فیتیله بیش از۳/۲ میلیمتر باشد. در صورتی که خاک قبلا بصورت فیتیله ای به قطر۳/۲ میلیمتر در آمده باشد، باید در این حالت عملیات متوقف گردد.

- تکه های نمونه را جمع کرده در ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت قرار گیرد.

- حدود۱/۵ تا ۲ گرم دیگر از نمونه آماده شده در آزمایش حد روانی را انتخاب و مراحل آزمایش تکرار شود. تکه های خرد شده نمونه را جمع در همان ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت قرار گیرد و بلافاصله در قوطی بسته شود. این کار آنقدر تکرار شود تا وزن نمونه در ظرف تعیین درصد رطوبت حدود ٦ گرم شود.

- بند۱ تا ۳ تکرار شود تا در پایان در دو ظرف تعیین درصد رطوبت حدود ٦ گرم نمونه وجود داشته باشد.

- درصد رطوبت نمونه های دو ظرف محاسبه شود.

۳-۱۰-آزمایش تعیین حد خمیری

۳-۱۰-۱-محاسبات

همانطور که گفته شد، حد خمیری همان درصد رطوبتی است که در آن فتیله خاک در قطر ۳/۲ شروع به ترک خوردن میکند.

حد خمیری = (وزن آب نمونه / وزن خاک خشک شده در گرمخانه) ×۱۰۰ (۳-۳)

رطوبت حد خمیری به آسانی قابل اندازه گیری است و هر کسی با کمی تجربه میتواند مقدار آن را با یک یا دو درصد تقریب معین کند.

$$PL = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \qquad (٤-٣)$$

۳-۱۰-۲-دامنه خمیری

دامنه خمیری، اختلاف بین حد روانی و حد خمیری خاک است و مشخص کننده درصد رطوبتی است که در آن،خاک به حالت خمیری می ماند. بنابراین:

$$PI=LL-PL \qquad (٥-٣)$$

وقتی تعیین حد روانی یا حد خمیری یک خاک به روش های استاندارد ذکر شده امکان پذیر نباشد،دامنه خمیری به صورت NP (خاک غیر پلاستیک)گزارش می شود.وقتی حد خمیری مساوی یا بیشتر از حد روانی باشد، دامنه خمیری به صورت عدد صفر گزارش می شود.

شکل (۳-۵): روش انجام آزمایش تعیین حد خمیری غلتاندن نمونه ها و جدا کردن نمونه ها

۳-۱۱- آزمایش حد انقباض

۳-۱۱-۱- تئوری آزمایش

وقتی یک خاک رسی اشباع به تدریج خشک و رطوبت خود را از دست می دهد، حجم آن کاهش می یابد. در حین خشک شدن، شرایطی فراهم میشود که با خشک شدن بیش تر خاک، رطوبت نیز کم می شود ولی تغییری در حجم خاک ایجاد نمی شود. بنابراین حجم نمونه مرطوب در رطوبت حد انقباض، مساوی حجم آن در حالت خشک است. درصد رطوبت خاک که در آن،کاهش حجم متوقف می شود، به عنوان حد انقباض تعریف می شود. این آزمایش روی حجم مشخصی از خاک کاملا اشباع با درصد رطوبتی بیش تر از حد روانی خاک، انجام می شود. در درصد رطوبت های کم تر از حد انقباض، دیگر کاهش رطوبت با کاهش حجم خاک همراه نیست، بلکه آب بین دانه ها وآب حفره ها و فضاهای خالی با هوا جایگزین می شود.

۳-۱۱-۲-روش انجام آزمایش

الف- خاک در ظرف تبخیر ریخته شده و با آب مقطر مخلوط گردد. آب اضافه شده باید به اندازه ای باشد که درصد رطوبت خاک از حد روانی آن بیش تر باشد، البته نه آنقد زیاد که خاک حالت مایع به خود بگیرد. درصد رطوبت باید طوری باشد که اگر خاک تر در ظرف چینی به هم زده شود، دیگر هیچ گونه حباب هوایی ایجاد نشود. روش مطلوب استفاده از کمترین حجم آب ممکن است. این امر برای خاک های با خاصیت خمیری زیاد، اهمیت خاصی دارد و مانع ترک خوردن آنها در حین خشک شدن می شود.

مقدار آبی که در یک خاک ترد لازم است تا حالت نرمی و ناپایداری ایجاد کند، باید مساوی یا کمی بیشتر از حد روانی خاک باشد و مقدار آبی که لازم است تا در یک خاک پلاستیک حالت نرمی و ناپایداری ایجاد کند، باید از حد روانی تا میزان ده درصد بیشتر باشد.

ب- سطح داخلی ظرف انقباض با یک لایه نازک از گریس یا روغن سیلیکون یا اسپری پودر تفلون چرب شود.این امر به منظور جلوگیری از چسبیدن خاک به دیواره ظرف انجام می شود. پس از روغن کاری، وزن ظرف خالی اندازه گرفته و یادداشت گردد.

پ- ظرف انقباض داخل یک ظرف بزرگ قرار گیرد تا جیوه اضافی آن بریزد. ظرف انقباض را از جیوه پر کرده به طوری که لبریز شود، سپس صفحه شیشه ای با فشار روی ظرف انقباض قرار گیرد تا جیوه اضافی خارج شود. نباید بین صفحه و سطح جیوه، حباب هوای محبوس وجود داشته باشد و اگر حباب هوایی وجود داشت، این مرحله تکرار گردد. حجم جیوه ای که ظرف انقباض پر کرده است را تعیین شود. برای این کار میتوان از دو روش استفاده کرد:

روش اول، استفاده از استوانه مدرج و روش دیگر اندازه گیری جرم جیوه و تقسیم آن بر جرم حجمی جیوه ($۱۳/۵۳ \ gr/cm^3$) است. این حجم بعنوان حجم ظرف یا حجم اولیه مرطوب یادداشت شود (V).

ت- مقدار یک سوم از حجم ظرف انقباض با خاک مرطوب پر شود، بدین ترتیب که خاک در وسط ظرف قرار گیرد، با ظرف روی یک سطح محکم که وسیله چند لایه کاغذ خشک کن یا مشابه آن پوشیده شده، چندین ضربه زده تا خاک تر داخل ظرف از وسط به کناره ظرف جریان یابد. مجدداً به همان اندازه دفعه اول از خاک مرطوب به داخل ظرف اضافه، آهسته آهسته ضربه زده تا خاک مرطوب، خوب پهن و متراکم گردد و حباب های هوای داخل خاک در سطح آن ظاهر شود و از آن خارج گردد. باز هم از نمونه خاک به داخل ظرف ریخته و این عمل آنقدر ادامه یابد تا ظرف کاملاً پر و لبریز شود. سپس با خط کش لبه تیز، خاک اضافی را برداشته و اگر در اطراف ظرف نیز مقداری خاک چسبیده، کاملاً تمیز شود. بعد از این مرحله سریعاً ظرف محتوی خاک مرطوب را وزن و جرم ظرف و خاک مرطوب داخل آن یادداشت شود.

ث- ظرف محتوی نمونه را یک روز در فضای آزمایشگاه نگه داشته تا خشک شود. خشک شدن تا زمانیکه رنگ سطح خاک از تیره به روشن تغییر کند ادامه یابد. پس از آن ظرف محتوی خاک در گرمخانه $۱۱۰ \pm ۵ \ C^\circ$ قرار داده تا خشک شود. اگر نمونه خاک ترک بخورد یا به تکه های کوچک تر تبدیل شود، به مرحله اول بر گشته و نمونه دیگری با درصد رطوبت بیش تر تهیه شود. وزن ظرف و خاک خشک تعیین و (M_D) نامیده می شود اگر نمونه هنگام خشک شدن ترک بخورد، آزمایش باید دوباره انجام شود، ولی با وجود این، می توان وزن و حجم بزرگ ترین قطعه را تعیین و بابرقراری یک تناسب حجم خاک خشک را به دست آورد. در این وضعیت محاسبه وزن نمونه به سادگی امکان دارد و مشکل اصلی تعیین حجم کل نمونه است که به طور تقریبی از تناسب زیر به دست می آید.

$$\frac{Vf}{V} = \frac{\text{وزن کل نمونه خشک شده}}{\text{وزن قطعه بزرگ تر}} \qquad (۳-۶)$$

ج- حجم نمونه خاک با بیرون آوردن آن از ظرف انقباض و غوطه ور کردن آن در ظرف پر از جیوه تعیین گردد.

- ظرف پر از جیوه درون ظرفی دیگر قرار داده شده تا جیوه سر ریز شود و داخل آن بریزد. ظرف از جیوه پر شده، صفحه شیشه ای با فشار روی سطح جیوه قرار گیرد 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 خالی و این مراحل را تکرار شود. با دقت جیوه هایی که بیرون ظرف چسبیده است پاک شود.

- ظرف تبخیر در ظرفی قرار گیرد که جیوه اضافی داخل آن بریزد. ظرف پر از جیوه درون ظرف تبخیر و نمونه خاک روی سطح جیوه قرار گیرد. با صفحه شیشه ای، روی نمونه فشار داده تا نمونه در جیوه غوطه ور شود. صفحه را روی لبه ظرف جیوه فشار داده تا جیوه اضافی بیرون بریزید. باز هم باید دقت شود تا هوایی بین صفحه و جیوه باقی نماند که در این

صورت باید از مرحله الف تا ج تکرار شود. حجم جیوه جابه جا شده داخل ظرف تبخیر اندازه گیرد. این کار را می توان مستقیماً با اندازه گیری حجم به وسیله استوانه مدرج انجام یا از اندازه گیری وزن جیوه جابه جا شده و تقسیم آن بر جرم حجمی جیوه بدست آید. این حجم را که حجم نمونه خاک پس از خشک شدن است یادداشت گردد.

٤- آزمایش هم ارز ماسه (AASHTO T: 176-81 , ASTM D: 2419-87)

٤-١- مقدمه

نسبت ماسه به ریز دانه ها (سیلت و رس) در خاک عاملی مهم در عملیات خاکی و ساختمانی محسوب می شود، زیرا وجود ماسه زیاد در مقایسه با ریزدانه در خاک، در زیرسازی راه ها و نیز در احداث سد های خاکی، باعث پایین آمدن درصد آب بهینه و رسیدن سریع تر خاک به حداکثر تراکم خود می شود. در آسفالت نیز درصد بالای ریزدانه موجب مصرف بیش تر نیرو و در نتیجه سست شدن و وارفتن آسفالت زیر بارهای وارد شده میشود. نسبت ماسه به ریزدانه ها در ساخت بتن نیز بر مصرف آب، تراکم بتن و نفوذ پذیری و مقاومت در برابر هوازدگی اثر دارد.

اصول آزمایش هم ارز ماسه به این ترتیب است که مقداری از نمونه مورد نظر را در استوانه مدرجی ریخته و به آن آب و مقدار مواد منعقد کننده اضافه می شود. پس از مدت معینی ارتفاع درشت دانه ها که ته نشین شده اند و ارتفاع تمام خاک در استوانه مدرج اندازه گیری می شود نسبت این دو ارتفاع هم ارز ماسه خواهد بود. ماده منعقد کننده باعث می شود که ذرات رس در محلول منعقد شده و معلق بمانند.

در این آزمایش، عامل تعیین کننده، ماسه است (نفوذ پذیری زیاد، عدم تورم، جذب آب کم، حساسیت کم و...) و اصولاً برای خاک هایی به کار می رود که اندیس خمیری آن ها کمتر از ٤ باشد (I_p). به عبارت دیگر، این آزمایش ویژه خاک های با ریزدانه کم است که با آزمایش حدود اتربرگ، حد روانی و حد خمیری آن ها را نمی توان تعیین کرد (ریزدانه آن ها کم تر از ٤٠ ٪ باشد).

با توجه به این که در راه سازی نوع دانه بندی، نفوذ پذیری، جذب آب، تورم و نشست مسائلی است که باید بررسی شود، این آزمایش در راه سازی کاربرد فراوان دارد.

حدود قابل قبول SE به دست آمده برای استفاده های مختلف در جدول (٤-١) آورده شده است.

جدول(٤-١): ضریب نفوذپذیری خاک ها بر حسب هم ارز ماسه

کارهای ساختمانی	مصالح بتن	مصالح بتن آسفالتی	لایه اساس	لایه زیر اساس	لایه زهکش
درصد SE	٧٠<	٥٠<	٣٠<	٢٥<	٤٠<

ضریب نفوذ پذیری خاک ها بر اساس هم ارز ماسه در جدول(٤-٢) آمده است که از این اعداد می توان برای تخمین ضریب نفوذپذیری استفاده نمود.

٤-٢- وسایل مورد نیاز

- لوله استوانه ای مدرج استاندارد
- سنبه فولادی استاندارد به وزن ١ کیلوگرم
- لوله شستشوی برنجی یا مسی
- چوب پنبه
- زمان سنج
- قیف
- منبع مخصوص محلول شوینده

- ترازو با دقت ۱ گرم
- الک شماره ٤ (٤/٧٥ میلیمتر)
- محلول شوینده با نسبت اختلاط زیر

کلرورکلسیم (٤٥٤ گرم)، گلیسرین (۲۰۵۰ گرم یا ١٦٤٠ سانتی متر مکعب)، فرمالدهید (٤٧ گرم یا ٤٥ سانتی متر مکعب محلول ٤٠ حجم) و آب مقطر به اندازه کافی برای رسیدن حجم مخلوط به معادل یک گالن (۳/۷۸۵ لیتر)

جدول(٤-۲): ضریب نفوذپذیری خاک ها بر حسب هم ارز ماسه

K (cm/s)	نوع ریزدانه مخلوط خاک (٪)SE	
	رس کائولین	لای (سیلت)
۱×۱۰^{-۳}	–	۸۷
۸×۱۰^{-۳}	٤٠	–
۸×۱۰^{-٤}	–	۷۵
۸×۱۰^{-٤}	۲۹	–
٦×۱۰^{-٥}	–	٦۲
۳×۱۰^{-۹}	۲٤	–
٤×۱۰^{-٦}	–	٥۰
٦×۱۰^{-٤}	۲۰	–
۲×۱۰^{-٤}	–	۳۹
۳×۱۰^{-٦}	۱۸	–

٤-۳- روش آزمایش

الف- کلرورکلسیم را در ۲ لیتر آب مقطر حل کنید. محلول را با کاغذ صافی، صاف کرده و فرمالین و گلیسرین را به آن اضافه کنید تا حجم آن به یک گالن (۳/۷۸۵ لیتر) برسد. محلول را در شیشه دربسته نگهداری کنید.

ب- مقدار ٤٦ سانتی متر مکعب از محلول تهیه شده در مرحله ۱ را در ۲ لیتر آب مقطر ریخته و خوب مخلوط کنید. محلول حاصل را در شیشه دربسته جداگانه نگهداری کنید.

پ- برحسب قطر درشت ترین دانه خاک که در جدول (۳-۳) داده شده است مقدار حداقل نمونه را انتخاب کرده و از الک شماره ٤ رد کنید مقدار ۱۱۰ گرم از خاک رد شده از الک شماره ٤ برای آزمایش هم ارز ماسه مورد نیاز است.

ت- در استوانه آزمایش تا ارتفاع ۱۰ سانتی متر (٤ اینچ) محلول شستشو ریخته و نمونه خاک تهیه شده را با قیف در اخل استوانه بریزید.

ث- استوانه را به مدت ۱۰ دقیقه به حال خود به صورت ایستاده قرار دهید و سپس درپوش آنرا در جای خود قرار داده و آنرا به حالت افقی بین دو دست بگیرید و به چپ و راست حرکت دهید بطوری که طول جابجایی استوانه تقریباً ۲۰ سانتی متر باشد.در مدت ۲۰ ثانیه نود بار استوانه را به چپ و راست حرکت دهید.

جدول(٤-۳): حداقل نمونه برای عبور از الک ٤

شماره الک	اندازه الک (میلیمتر)	مقدار نمونه (گرم)
#4	٤/۷۵	۲۵۰
5/16in	۳/۹۷	۵۰۰
1/2in	۲/۵	۱۰۰۰
3/4in	۱۹/۱	۲۰۰۰
1.0in	۲۵/٤	۳۰۰۰
1.5in	۳۸/۱	۵۰۰۰
1.75in	٤٤/٤	۱۰۰۰۰
2.5in	٦۳/۵	۲۰۰۰

ج- استوانه را بصورت ایستاده قرار دهید و با لوله شستشو که به مخزن محتوی محلول شستشو وصل شده جدار استوانه را بشویید و آنقدر محلول شستشو به استوانه بریزید تا سطح محلول در داخل استوانه به ارتفاع ۳۸ سانتی متر برسد.

چ- درجه حرارت محلول داخل استوانه را اندازه بگیرید.

ح- استوانه آزمایش را به مدت ۲۰ دقیقه به صورت ایستاده بدون هیچ گونه لرزش در جایی قرار دهید.

خ- پس از مدت ۲۰ دقیقه اتفاع h_1 (ارتفاع کل خاک) و (ارتفاع درشت دانه ها) را از روی استوانه مدرج اندازه بگیرید.

د- سنبه فولادی را داخل استوانه فرو برده و کف سنبه را روی دانه ها قرار دهید.ارتفاع h_2 (ارتفاع درست دانه ها)را اندازه بگیرید.

ذ- مقدار ۱۱۰ گرم از نمونه رد شده از الک شماره ٤ را وزن کرده و مراحل ٤ تا ۱۱ را دوباره تکرار کنید.

٤-٤- محاسبات

مقدار هم ارز ماسه به صورت زیر محاسبه گردد.

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times ۱۰۰ \qquad (۱-۴)$$

$$(SE)' = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \qquad (۲-۴)$$

در ماسه درشت دو عدد بدست امده تقریبا برابر هستند ولی در ماسه ریز به علت نشست سنبه و کاهش h_2 مقدار SE از (SE)′ کوچکتر می شود.

این محاسبات را برای هر دو تکرار آزمایش انجام دهید.مقدار هم ارزماسه میانگین بدست آمده از دو تکرار می باشد.

۵-آزمایش تعیین چگالی ویژه، (AASHTO T: 100-81, ASTM D: 854-87)

۵-۱- مقدمه

چگالی ویژه یا توده ویژه یک خاک یا G_s عبارت از نسبت وزن حقیقی حجم مشخصی از ذرات خاک به وزن حقیقی همان حجم آب مقطر در دمای$4^{\circ}C$ است. وزن مخصوص ویژه خاک اغلب برای ارتباط وزن به حجم خاک به کار می رود. بنابر این با دانستن نسبت تخلخل(e)، درجه اشباع(S_r) و وزن مخصوص ویژه (G_s) ، می توان وزن واحد حجم یک خاک مرطوب یا خشک را محاسبه نمود. وزن واحد حجم (چگالی) هر خاک، در مسائلی چون نشست و پایداری در مهندسی خاک استفاده می شوند. هم چنین وزن مخصوص ویژه در محاسبات مربوط به بسیاری از آزمون های آزمایشگاهی به کار گرفته می شود. به عنوان مثال در آزمایش تراکم، استفاده از وزن مخصوص ویژه خاک ضروری است.

این آزمایش برای محاسبه وزن مخصوص خاکهایی از الک ٤/٧٥ میلیمتر (الک شماره ٤) عبور می کند مناسب است. برای آن قسمت از خاک که روی الک شماره ٤ قرار می گیرد از آزمایش C127 استاندارد ASTM استفاده می شود.

از دو روش می توان وزن مخصوص دانه های خاک را تعیین کرد.

روش الف) برای نمونه هایی که در گرمخانه خشک شده اند.

روش ب) برای نمونه های مرطوب

برای خاکهای آلی و خاکهای ریز دانه با پلاستیسیته بالا روش دوم مناسبتر است. در صورتی که وزن مخصوصی که از از این آزمایش بدست می آید برای آزمایش هیدرومتری استفاده شود این آزمایش باید بر روی خاک عبوری از الک ۲ میلیمتر (شماره ۱۰) انجام گیرد.

وزن مخصوص ویژه اکثر کانی های خاک در دامنه ای بین ۲/٤ تا ۲/۹ تغییر می کند. وزن مخصوص ویژه قسمت جامد ماسه های با رنگ روشن که غالباً از کوارتز تشکیل شده اند، در حدود ۲/٦٥ تخمین زده می شود؛برای خاک های رسی و سیلتی این مقدار بین ۲/٤ تا ۲/۹ تغییر می کند. G_s خاک های آلی به دلیل آن که این مواد بر اثر حرارت به شدت کاهش وزن می یابد،خیلی پایین است.باید توجه داشت که G_s کانی های آهن، بیشتر از کانی های رس (سیلیکات ها) است. معادله مشخصه G_s به صورت زیر است:

$$Gs = \frac{\gamma_s}{\gamma_\omega} \qquad (۱-۵)$$

γ_s: چگالی مواد جامد خاک

γ_ω: چگالی آب در دمای $4^{\circ}C$

۵-۲- وسایل مورد نیاز

- پیکنومتر
- آب مقطر
- ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم
- گرمخانه برای ایجاد حرارت یکنواخت ۵ ± ۱۱۰ درجه سانتیگراد (شکل۵-۱)
- دماسنج با دقت نیم ۰/۵ درجه سانتیگراد

- خشک کن (دسیکاتور)
- پمپ خلاء
- پیپت (قطره چکان)
- میز لرزنده کوچک
- صفحه داغ (هیتر)

شکل(۵-۱): گرمخانه

۵-۳- تهیه نمونه برای انجام آزمایش

نمونه مورد آزمایش می تواند از خاک خشک شده در گرمخانه یا خاک مرطوب باشد. در هر صورت این نمونه باید نماینده ای از کل خاک باشد؛ به عبارت دیگر نمونه باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا وزن حداقل آن در حالت خشک شده در گرمخانه با حالت های زیر مطابقت داشته باشد:

جدول(۵-۱): حداقل وزن نمونه آزمایشی

بزرگترین اندازه ذرات (mm)	اندازه الک	حداقل وزن نمونه آزمایشی(gr)
۲	# ۱۰	۲۰
٤/۷۵	# ٤	۱۰۰

۵-٤- روش کالیبره کردن پیکنومتر

مراحل آزمایش به شرح زیر است:

الف- مقدار وزن پیکنومتر M_f را در حالت تمیز و خشک اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

ب- پیکنومتر را تا درجه مورد نظر از آب مقطر پر کنید. مطمئن شوید که هیچ حباب هوایی در آب مقطر وجود ندارد. وزن پیکنومتر و آب را اندازه بگیرید و یادداشت نمایید (M_a).

پ- با استفاده از دماسنج دقیق، دمای آب را اندازه بگیرید (T_a) (دقت تا$^{\circ}$C۰/۵).

ت- برای دماهای مختلف، وزن پیکنومتر و آب مربوط به هر دما را با توجه به رابطه (٤-۲) محاسبه و در جدولی ثبت کنید:

T_x=[(چگالی آب در دمای T_a/چگالی آب در دمای T_a (در دمای M_a) - M_f)]+M_f (۲-۵)

که در آن،

M_a: وزن پیکنومتر و آب (gr)،

M_f: وزن پیکنومتر (gr)،

T_a: دمای مشاهده شده در مرحله (۳) (°C)

T_x: هر دمای اندازه گیری شده دیگر (°C) است.

۵-۵- روش انجام آزمایش

۵-۵-۱- روش (الف): برای نمونه خاک خشک شده در گرمخانه

الف- نمونه را در گرمخانه ای با دمای°C ۵±۱۱۰ خشک ودر خشک کننده (دسیکاتور) خشک کنید.

ب- وزن یک پیکنومتر تمیز و خشک و کالیبره شده را اندازه بگیرید و یادداشت کنید (M_f).نمونه را درون پیکنومتر قرار دهید. وزن پیکنومتر و نمونه را اندازه بگیرید، آن گاه مقدار وزن پیکنومتر (M_f) را از این مقدار کم کنید تا وزن نمونه خشک شده در گرمخانه به دست آید (M_0).

پ- 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.

ت- با استفاده از روش جوشاندن یا پمپ خلاء 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 داقیقه جوشانده می شود تا حبابهای هوا خارج شود. در روش پمپ خلاء فشار منفی حداکثر ۱۰۰ میلیمتر جیوه و حداقل به مدت ۳۰ دقیقه به نمونه اعمال می شود.

برای خاک های ماسه ای،احتیاجی به حرارت برای خروج حباب هوا نیست و این کار صرفاً با ارتعاش و به هم زدن میسر می شود.

ث- پیکنومتر را دقیقاً تا زیر علامت کالیبره آن از آب مقطر پر کنید. برای جلوگیری از ایجاد حباب های هوا، آب مقطر را به آرامی و به دقت اضافه کنید. مدتی صبر کنید تا دمای آب به مقدار ثابتی برسد.

ج- پیکنومتر را تا خط نشانه پر کنید. پیکنومتر را کاملاً تمیز و خشک کرده و وزن آنرا یادداشت کنید (M_b).

چ- دماسنج را در آب فرو ببرید و دمای آب (T_b) را یادداشت کنید (تا دقت ۰/۵°C).

۵-۵-۲- روش(ب): برای نمونه های مرطوب

الف- نمونه را داخل یک پیکنومتر کالیبره شده بریزید.

ب- گامهای ٤ تا ۷ در روش الف را تکرار کنید.

پ- نمونه را از پیکنومتر خارج کرده و آن را در گرمخانه با دمای ۵± ۱۱۰ درجه سانتی گراد خشک کنید.نمونه را در خشک کن سرد کنید.

ت- وزن نمونه خشک شده را اندازه گیری کنید (M_O).

۵-٦- محاسبات

۱. مقدار وزن مخصوص خاک (Gs) را با دقت ۰/۰۱ در دمای آب (T_b) به صورت زیر محاسبه کنید:

$$G_s\ (T_b \text{ در دمای}) = M_0 / \left[M_0 + (M_a - M_b)\right] \qquad (۳-۵)$$

که در آن،

M_0:وزن نمونه خشک شده در گرمخانه(gr)

M_a:وزن پیکنومتر پر از آب در دمای T_a(gr)

M_b:وزن پیکنومتر پر از آب و خاک در دمای T_b(gr)

T_b:دمای محتویات درون پیکنومتر ، وقتی وزن M_b اندازه گرفته می شود(°C).

۲. ممکن است مقدار G_s در آب با دمای ۲۰ °C مورد نیاز باشد،در این صورت :

$$G_s\ (T_b \text{ در دمای}) = \frac{G_s}{K}\ (\text{در دمای ۲۰ °C}) \qquad (٤-۵)$$

۵-۷- بررسی روند آزمایش

۱- با اینکه این آزمایش بسیار ساده است اما برای بدست آوردن نتیجه ای با دقت قابل قبول لازم است اندازه گیری دما و وزن های مورد نیاز با حداکثر ممکن انجام شود. به این دلیل که در رابطه محاسبه وزن مخصوص دانه ها از اندازه گیری انجام شده، اختلاف این کمیت ها است که وارد می شود که مقدار آن به نسبت مقدار وزنهای 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 بدست 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 (۵-۲) ارائه شده اند.

جدول (۵-۲): مقادیر نمونه چگالی ویژه محاسبه شده در خاک های مختلف

Soil/Drying method	Desicator	۹۰°C	۱۰۵°C	۱٤۰°C	۱۹۰°C
Ottawa sand	۲/٦۷	۲/۷٦	۲/۷٦	۲/۷٦	۲/۷٦
Piatomaceons earth	۱/۹۱	۱/۹۹	۲/۰۰	۲/۰۸	۲/۵۰
Boston blue clay	۲/۷٦	۲/۷۸	۲/۷۸	۲/۷۸	۲/۷۹
Mexico city clay	۲/۲۲	۲/۳۳	۲/۳۵	۲/۳۷	۲/٦۲
Leda clay	۲/۷٤	۲/۷۵	۲/۷۷	۲/۸۰	۲/۸۲

۵-۸- مقادیر مورد انتظار

وزن مخصوص دانه های بیشتر خاکها در بازه ۲/۸۵ تا ۲/٦۵ قرار می گیرد.وزن مخصوص دانه ها در خاکهایی که شامل مواد آلی هستند یا از دانه های متخلخل تشکیل شده اند ممکن است کمتر از ۲ نیز باشد.از طرف دیگر خاکهایی که شامل ترکیبات فلزات سنگین مانند آهن باشند وزن مخصوص دانه های آنها ممکن است بیشتر از ۳ نیز بدست آید.

٦- آزمایش تعیین وزن واحد حجم خاک به روش مخروط ماسه

(ASTM D: 1556-82 , AASHTO T: 191-86)

٦-١- مقدمه

آزمایش تعیین وزن واحد حجم خشک خاک در محل، برای ارزیابی میزان تراکم خاکریز صورت می گیرد. تراکم مجموعه عملیاتی است که موجب افزایش وزن واحد حجم خاک در محل می شود. افزایش وزن واحد حجم خاک بر اثر به هم فشرده تر شدن دانه ها و کاهش فضای خالی میان دانه ای است. دقت شود که حجم آب موجود در خاک بر اثر تراکم تغییر نمی کند و فقط از حجم هوا کاسته می شود. درجه کوبش خاک بر اساس اندازه گیری وزن واحد حجم خشک آن مشخص می شود. درجه کوبش خاک بر اساس اندازه گیری وزن واحد حجم خشک آن مشخص می شود. اگر وزن واحد حجم ظاهری خاک برابر γ_t و درصد رطوبت آن برابر ω فرض شود، با استفاده از روابط $\gamma_d = \frac{G_S}{1+e}\gamma_\omega$ و $\gamma_t = \frac{G_S(1+\omega)}{1+e}\gamma_\omega$، وزن واحد حجم خشک خاک از رابطه $\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+\omega}$ به دست می آید. این وزن واحد حجم خاک کوبیده شده تابع جنس خاک، میزان رطوبت و نیروی تراکمی است که برای کوبیدن خاک صرف شده است.

این آزمایش برای تعیین وزن مخصوص خاکهایی که بزرگترین اندازه دانه های آنها از۲/۱ اینچ (۳۸ میلیمتر) بزرگتر نباشند استفاده کرد. همچنین اندازه حفرات طبیعی خاک نباید به اندازه ای بزرگ باشد که دانه های ماسه به داخل آنها نفوذ کند. خاک مورد نظر باید چسبندگی کافی داشته باشد تا بتوان در آن بدون ایجاد تغییر شکل و دست خوردگی گودالی بصورت دستی حفاری کرد. بنابراین این روش برای خاکهای آلی، خاکهای اشباع با پلاستیسیته بالا که در حین حفاری فشرده شده یا تغییر شکل میدهند مناسب نیست. همچنین این آزمایش را برای خاکهای دانه ای سیمانته نشده که امکان حفر گودالی با دیواره های پایدار در آن وجود ندارد نمیتوان استفاده کرد.

این آزمایش روش بسیار مناسبی برای کنترل تراکم مصالح در اجرای خاکریزهای بستر راهها، بدنه سدهای خاکی، بستر سازی ها و اجرای کانالهای انتقال آب می باشد.

٦-٢- وسایل مورد نیاز

– وسیله مخروط ماسه که شامل قطعات زیر می باشد:

- یک بطری با حجمی بیشتر از حجم گودال حفاری شده که امکان اتصال به قیف مخصوص را داشته باشد.
- یک قیف دو طرفه که از طرف قیف کوچکتر به بطری ماسه متصل می شود. قیف کوچکتر از طریق روزنه ای به قطر تقریبا ۱۳ میلیمتر که بوسیله یک شیر کنترل می شود به قیف بزرگتر (مخروط ماسه) متصل می شود. برای بدست آوردن ماسه با توزیع یکنواخت دانسیته، زاویه دیواره مخروط ماسه با کف آن حدود ٦٠ درجه در نظر گرفته می شود.
- صفحه نشیمن مخروط ماسه وصفحه ای فلزی با قطری حدود ۷۵ میلیمتر بزرگتر از قطر مخروط ماسه است که در وسط آن سوراخی به اندازه مخروط ماسه قرار دارد. لبه های سوراخ به صورتی است که لبه آن با لبه مخروط ماسه چفت شود کف صفحه باید کاملا صاف بوده و به اندازه کافی صلب باشد.
- وسایل کندن زمین: قلم فلزی به ۲۵cm و چکش به وزن ۱kg برای کندن چاله آزمایش.

– ماسه: ماسه مورد نظر باید خشک، تمیز و یکنواخت (از نظر نوع دانه ها و دانه بندی) و سیمانته نشده باشد. دانه بندی ماسه باید ضریب یکنواختی ($C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$) کوچکتر از ۲ داشته باشد. بزرگترین دانه ها باید از ۲ میلیمتر (الک شماره ۱۰) کمتر بوده همچنین کمتر از ۳ درصد وزنی ماسه از الک ۲۵۰ میکرومتر (الک شماره ٦۰) عبور کند. استفاده از ماسه با دانه بندی یکنواخت موجب جلوگیری جدایی دانه ها در هنگام ریختن ماسه و در نتیجه رسیدن به دانسیته یکنواخت خواهد شد.

– ترازو: ترازویی به ظرفیت ۱۵kg و به دقت ۱gr و ترازویی به ظرفیت ۵۰۰gr و دقت ۰/۱gr .

– گرمخانه(آون).

٦-۳- روش انجام آزمایش

الف– محلی را که آزمایش در آن باید انجام شود انتخاب کنید.

ب– وسیله مخروط ماسه و شیر آن را چک کنید که سالم باشد. بطری را با ماسه کالیبره شده پر کرده و وزن کل وسیله را محاسبه نمایید.

پ– سطح محلی را که آزمایش باید در آن انجام شود صاف کنید. برای این کار میتوان از صفحه نشیمن مخروط استفاده کرد.

ت– صفحه نشیمن را روی زمین قرار دهید، صفحه در محل لبه های سوراخ وسط باید کاملا با زمین در تماس باشد. کناره های صفحه حین آزمایش قابل کنترل باشد.

ث– در صورتی که سطح کاملا صاف نباشد یا حفره هایی در سطح وجود داشته باشد باید ابتدا حجمی که بین صفحه، زمین و قیف بوجود 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 کاملا جارو نمایید.

ج– 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 (٦–۱) پیشنهاد می شود. عمق گودال باید به گونه ای باشد که نمونه ای که از خاک برداشته می شود نماینده خاک مورد نظر باشد. در مواردی که این آزمایش برای کنترل عملیات خاک ریزی انجام می شود عمق گودال باید در حدود ضخامت یک لایه اجرایی یا بیشتر باشد.

جدول(٦–۱): مقادیر حداقل برای حجم حفره و نمونه

حداقل وزن نمونه برای تعیین درصد رطوبت (gr)	حداقل حجم حفره (cm^3)	حداکثر درشتی دانه های خاک (mm)
۱۰۰	۷۱۰	٤/۷۵
۳۰۰	۱٤۲۰	۱۲/۵
۵۰۰	۲۱۲۰	۲۵
۱۰۰۰	۲۸۳۰	۵۰

چ- گودال را در 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 تقریبا صاف باشد دیواره ها نباید گوشه دار یا حاوی مصالح سست شده باشند. در خاکهایی که ساختار دانه ای دارند گودال باید به صورت یک مخروط حفر شود. تمام خاکهای حفر شده را با دقت از گودال خارج کرده و در ظرفی که رطوبت را حفظ کند قرار دهید.

ح- لبه های صفحه نشیمن را تمیز کنید. مخروط ماسه را بصورت 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 در هنگام ریختن ماسه هیچگونه ضربه یا ارتعاشی به ظرف وارد نشود. وقتی ریختن ماسه به داخل قیف پایین پایان یافت، شیر را ببندید.

خ-وزن وسیله مخروط ماسه را با ماسه باقیمانده در آن را اندازه گیری نمایید، وزن ماسه استفاده شده را محاسبه کنید.

د- وزن خاکی را که از گودال حفاری شده است اندازه گیری کنید.

ذ-خاکی را که از گودال حفاری شده کاملا مخلوط کنید و نمونه ای از آن را برای تعیین درصد رطوبت انتخاب کنید یا از همه آن برای تعیین در صد رطوبت استفاده نمایید.

ر- درصد رطوبت نمونه را بدست آورید.

٦-٤- محاسبات

الف- محاسبه وزن واحد حجم ماسه

$$\gamma_s = \frac{M_1}{V_1} \qquad (١-٦)$$

γ_s: وزن واحد حجم ماسه

M_1: وزن ماسه داخل قالب

V_1: حجم داخلی قالب

ب- محاسبه حجم گودال

$$V = \frac{M_2 - M_3}{\gamma_S} \qquad (٢-٦)$$

V: حجم گودال حفر شده در زمین

M_2: وزن ماسه لازم برای پر کردن گودال، قیف و ضخامت صفحه زیرین

M_3: وزن ماسه لازم برای پر کردن قیف و ضخامت صفحه زیرین

۵-٤-۳- محاسبه وزن واحد حجم مرطوب خاک

با استفاده از رابطه زیر می توان وزن مخصوص خشک را محاسبه نمود.

$$\gamma_t = \frac{M_4}{V} \qquad (۳-٦)$$

γ_t: وزن واحد حجم مرطوبظاهری

M_4: وزن مرطوب خاکی که از گودال خارج شده است

محاسبه درصد رطوبت خاک

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W - W_S}{W_S} \qquad (٤-٦)$$

W: وزن اولیه نمونه ، W_s : وزن قسمت جامد خاک (وزن بعد از خارج کردن نمونه از گرمخانه)

۷- آزمایش CBR یا تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (ASTM D: 1883-87, AASHTO T: 193-81)

۷-۱- مقدمه

آزمایش CBR را شخصی به نام پورتر (Porter) در سال ۱۹۲٦ مطرح کرد و پس از آن در سال ۱۹۲۹، توسط اداره راه سازی ایالت کالیفرنیا آمریکا گسترش یافت. آزمایش CBR متداول ترین روش تعیین مقاومت نسبی خاک ها برای راه سازی است. با استفاده از نتایج این آزمایش می توان ظرفیت باربری خاک بستر و کلیه لایه های روسازی از قبیل زیر اساس و اساس را تعیین و بر اساس آن ضخامت این لایه ها را بدست آورد. عدد CBR به صورت درصد بیان می شود و به صورت زیر محاسبه می شود.

$$CBR = \frac{\text{بار یا فشار لازم برای نفوذ } (0/1\text{in}) \text{ پیستون استاندارد}}{\text{بار یا فشار لازم برای نفوذ } (0/1\text{in}) \text{ پیستون استاندارد}} \qquad (۷-۱)$$

در راهسازی از عدد CBR به عنوان شاخصی برای مقاومت مصالح روسازی، اساس و زیر اساس جاده و فرودگاهها استفاده میشود. در صورتی که مصالح مورد نظر به گونه ای باشند که اثر رطوبت تراکم در نتیجه آزمایش CBR کم باشد (مصالح غیر چسبنده و درشت دانه) عدد CBR برای درصد رطوبت بهینه و یک مقدار از انرژی تراکم و یا دانسیته خشک مصالح بدست می آید. در مواردی که اثر رطوبت تراکم بر نتیجه آزمایش نامشخص است یا لازم است که چگونگی این اثر مشخص شود آزمایش برای بازه ای از تغییرات تراکم که معمولا برابر با بازه تغییرات مجاز رطوبت تراکم در اجرای لایه مورد نظر در کارگاه انتخاب شده انجام می شود.

۷-۲- وسایل آزمایش

- قالب با ارتفاع ۱۷/۸ cm و قطر ۱۵/۲ cm و حلقه بالایی و یک دیسک پایینی به قطر ۱۵/۱ cm و ارتفاع ٦/۱٤ cm و سایر ملحقات،

- چکش تراکم به وزن ٤/٥ kg،
- دستگاه کرنش سنج برای اندازه گیری تورم خاک با دقت ۰/۰۱ mm،
- وزنه های اعمال سربار،
- پیستون فولادی با سطح مقطع ۱۹/۳٤ cm^2،
- وسیله اعمال فشار، که با سرعت ۱/۲۷ $\frac{mm}{min}$ ($\frac{1}{20}$ اینچ در دقیقه) پیستون فولادی را در خاک فرو می برد که به وسیله دو گیج، نیرو و مقدار نفوذ اندازه گیری می شود (شکل۷-۱).
- مخزن آب برای اشباع کردن نمونه ها. ارتفاع آن باید طوری باشد که وقتی نمونه داخل آن گذاشته می شود، تا ۲/٥cm بالای سطح نمونه را آب گرفته باشد،
-گرمخانه برای خشک کردن نمونه و تعیین درصد رطوبت،
- لوازم متفرقه، شامل سینی، قاشق، کاردک، کاغذ صافی، ترازو و خط کش لبه تیز.

شکل(۷-۱): دستگاه CBR

۷-۳- آماده کردن نمونه ها

الف- آزمایش برای مصالح با حداکثر اندازه دانه های $\frac{3}{4}$ اینچ (۱۹ میلیمتر) انجام می شود. در صورتی که مصالح مورد نظر دارای دانه های بزرگتر از ۱۹ میلیمتر باشند برای انجام این آزمایش باید دانه بندی مصالح اصلاح شود. اصلاح دانه بندی بصورت حذف دانه های بزرگتر از ۱۹ میلیمتر و جایگزین کردن آنها با دانه های شنی کوچکتر از ۱۹ میلیمتر انجام میشود به طوری که درصد ذرات شنی (بین الک شماره ۳ و ٤ اینچ) در آزمون ثابت بماند.

ب- در صورتی که آزمایش در یک رطوبت تراکم انجام می شود (رطوبت بهینه) سه نمونه با درصد رطوبت مورد نظر باید تهیه شود. این نمونه ها با سه انرژی تراکم متفاوت متراکم می شوند تا نمونه ای با تراکم کمتر، بیشتر و نزدیکی تراکم مورد نظر بدست آید. بعد از اشباع کردن نمونه (در صورت نیاز) بر روی هر کدام آزمایش نفوذ (CBR) انجام می شود. عدد CBR در تراکم مورد نظر از منحنی "دانسیته خشک نمونه-عدد CBR" بدست می آید.

پ- در صورتی آزمایش برای بازه ای از رطوبت تراکم انجام می شود برای هر رطوبت تراکم سه نمونه 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 "دانسیته خشک-عدد CBR" برای هر رطوبت تراکم برای تعیین حداقل CBR در بازه رطوبت مورد نظر مورد نظر استفاده می شود.

۷-٤- تئوری آزمایش

آزمایش CBR مقاومت برشی خاک را تحت شرایط کنترل شده درصد رطوبت و وزن مخصوص به دست می دهد. این آزمایش در نهایت یک عدد را به عنوان نسبت باربری به دست می دهد. بدیهی است که این عدد برای یک خاک مشخص ثابت نیست و بستگی به شرایط تراکمی و رطوبتی خاک دارد.

طبق تعریف CBR یک خاک نسبت نیروی لازم برای فرو بردن پیستونی با شکل، سرعت و عمق معین در خاک مورد آزمایش به نیروی لازم برای فرو بردن همان پیستون با همان سرعت و به همان عمق در مصالح استاندارد است،که در رابطه زیر نشان داده شده است. مصالح استاندارد نوعی سنگ شکسته است که با استاندارد ی طبق جدول (۷-۱) برای نفوذ پیستون استاندارد در آن مورد نیاز است.

جدول(۷-۱): مقادیر استاندارد

نفوذ (mm)	بار (kg)	فشار (kg/cm^2)	فشار (MPa)
۲/۵	۱۳٦٦	۷۰	٦/۹
۵	۲۰۳۹	۱۰۵	۱۰/۳
۷/۵	۲۵۷۲	۱۳۳	۱۳/۰
۱۰	۳۱٦۲	۱٦۳	۱٦/۰
۱۲/۷	۳۵٦۲	۱۸٤	۱۸/۰

آزمایش CBR معمولاً روی نمونه هایی انجام می شود که با درصد رطوبت بهینه متراکم شده باشند. تراکم خاک در استاندارد ASTM به دو روش آزمایش تراکم استاندارد (D 698) و آزمایش تراکم اصلاح شده (D 1557) انجام می شود که در جدول(۷-۲) مشخصات آن ها بسته به نوع خاک آورده شده است.

جدول(۷-۲): روش ترا کم خاک بر اساس استاندارد ASTM

توضیحات	روش تراکم	
شماره آزمایش	D 698	D 1557
تعداد لایه ها	۳	۵
تعداد ضربه چکش	۵٦	۵٦
وزن چکش(kg)	۲/۵	٤/۵

پس از متراکم کردن 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 به مدت ۹٦ ساعت در آب مستغرق شده و در حین اشباع سازی، سرباری تقریباً معادل با وزن روسازی در محل روی آن قرار می گیرد. در هیچ حالتی وزن سربار نباید کمتر از ٤/۵ kg باشد. در همین مدت مقدار تورم با فاصله زمانی مشخص قرائت می شود و در پایان دوره استغراق آزمایش CBR روی نمونه در شرایط اشباع انجام می شود.

۷-۵- روش اشباع کردن آزمونه ها

الف- قالب را روی صفحه پایه نصب کنید. دیسک پایینی را در کنار قالب قرار دهید و روی آن یک صفحه کاغذ فیلتر قرار دهید. مطابق آزمایش تراکم مشخص شده نمونه های مورد نظر را متراکم کنید.

ب- حلقه بالایی قالب را برداشته و سطح آزمونه 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 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 آزمونه با کاغذ فیلتر در تماس است.

ج- به اندازه کافی وزنه های سر بار روی نمونه قرار دهید. بار وارده برابر بار روسازی انتخاب می شود که بوسیله وزنه های ۵ پوندی (۲/۲۷ کیلوگرم) به نمونه وارد می شود و در هیچ حالتی بار وارده نباید از ۱۰ پوند (٤/٥٤ کیلوگرم) کمتر باشد.

د- نمونه را در آب غوطه ور کنید. به نمونه اجازه دهید مدت ۲٦ ساعت آب جذب کند قرائت های تورم را مطابق برنامه مورد نیاز انجام دهید این قرائت ها را میتوان در فواصل زمانی ۰، ۱، ۲، ۸، ۱۲، ۲٤، ٤۸، ۷۲ و ۹٦ ساعت انجام داد.

ه- بعد از ۹٦ ساعت (٤ روز) نمونه را داخل آب خارج کرده سر بارها و صفحه مشبک را بردارید و تا ۱۵ دقیقه صبر کنید تا آب اضافی از آزمونه زهکشی شود.

و- نمونه ها را به همراه قالب وزن کنید.

۷-٦- روش انجام آزمایش

۷-٦-۱- آزمایش روی نمونه خشک

الف- ۵/۵ kg خاک را که از الک ۱۹ mm گذشته و در صورت نیاز طبق روش گفته شده خاک را اصلاح کنید.

ب- قبل از انجام تراکم، یک نمونه از خاک را برای تعیین درصد رطوبت آن اختیار کنید.

پ- خاک را به رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش های تراکم برسانید و آن را متراکم کنید.

ت- قالب محتوی خاک را وزن کنید و سرباری به وزن بیش از ٤/۵ kg روی آن قرار دهید.

ث- مجموعه را روی دستگاه بگذارید و با چرخاندن دسته، آن را آن قدر بالا بیاورید تا پیستون متصل به رینگ در تماس قرار گیرد و نیروسنج تکان بخورد.

ج- گیج های نفوذسنج و نیروسنج را روی صفر قرار دهید، آن گاه با سرعت ۱/۲۷ $\frac{mm}{\min}$ دستگاه را بالا بیاورید و در هر دقیقه نیروسنج را قرائت کنید.

چ- این عمل را تا ۱۵ دقیقه و نفوذپذیری ۱۲/۵ mm ادامه دهید.

ح- از زیر قسمت فشرده، وسط نمونه و زیر آن، نمونه هایی جداگانه برای تعیین درصد رطوبت بردارید.

۷-٦-۲- آزمایش روی نمونه اشباع

الف- به همان روش گفته شده در قسمت (الف) نمونه را تراکم کنید.

ب- قالب محتوی خاک را توزین کنید، صفحه مشبک را روی آن قرار دهید و به اندازه کافی وزنه های سربار (٤/۵kg) روی آن قرار دهید، در ضمن حتماً یک کاغذ صافی روی خاک و بین خاک و صفحه قرار دهید تا خاک به صفحه نچسبد.

پ- حلقه را بگذارید و نمونه را در مخزن آب غوطه ور کنید.

ت- شاخص تورم سنج را به صفحه مماس کنید، سپس آن را صفر و آزمایش را شروع کنید.

ث- قرائت های مقدار تورم را در فواصل زمانی تقریباً برابر با صفر، ۱، ۲، ۸، ۱۲، ۲٤، ۳٦، ٤۸، ۷۲، ۹٦ ساعت یادداشت کنید.

ج- بعد از ۹٦ ساعت (٤ روز) نمونه را خارج کنید، سربارها و صفحه مشبک را بردارید و تا ۱۵ دقیقه صبر کنید تا آب اضافی از نمونه زهکشی شود.

چ- نمونه را به همراه قالبش توزین کنید.

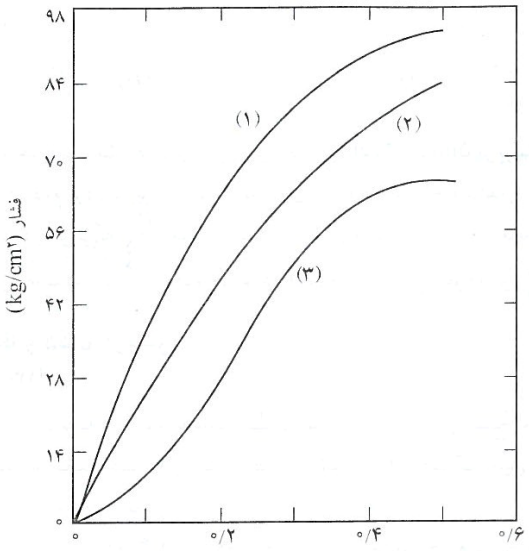
ح- گام های ٤ به بعد روش خشک را تکرار کنید.

۷-۷- محاسبات

الف- تنش نفوذ پیستون را در واحد پوند بر اینچ مربع محاسبه کرده و منحنی تنش-نفوذ را رسم کنید. در بعضی مواقع تعقر قسمت ابتدایی منحنی تنش-نفوذ به قسمت بالا بدست می آید که می تواند به علت ناهمواری سطح نمونه یا موارد دیگری باشد. در اینگونه شرایط باید منحنی تنش-نفوذ اصلاح شود.

برای تصحیح منحنی مطابق شکل (۷-۲) باید قسمت خطی منحنی را ادامه داد تا محور افقی را در نقطه ای قطع کند. این نقطه محل جدید محور مبدأ مختصات است و محاسبات باید در محورهای مختصات جدید انجام شود.

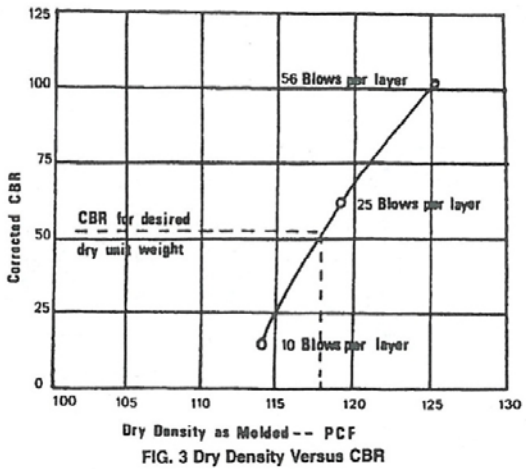
در صورتی که منحنی دارای یک نقطه عطف مشخص است بر روی منحنی از نقطه ای که دارای بیشترین شیب است خطی مماس بر منحنی رسم می شود تا محور افقی را در نقطه ای قطع کند که این نقطه محل جدید مبدأ مختصات است.



شکل(۷-۲): روش تصحیح نمودار آزمایش CBR

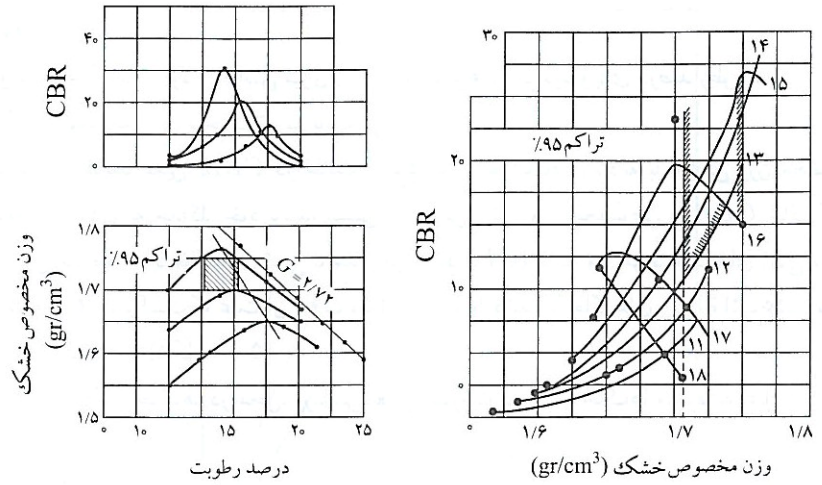
ب- از روی منحنی اصلاح شده تنش- نفوذ مقادیر تنش را برای نفوذ ۰/۱ اینچ (۲/۵٤ میلیمتر) و ۰/۲ اینچ (۵/۰۸ میلیمتر) بدست آورید. نسبت باربری با تقسیم تنش های بدست آمده بر ۱۰۰۰Psi (٦/۹MPa) و ۱۵۰۰psi (۱۰/۳MPa) محاسبه کنید. در صورتی که حداکثر تنش در نفوذی کمتر از ۰/۲ اینچ اتفاق افتاده نسبت باربری را برای این نقطه نیز محاسبه کنید. مقدار CBR هر آزمونه برابر مقدار محاسبه شده نفوذ ۰/۱ اینچ می باشد. اگر شیب باربری بدست آمده در نفوذ ۰/۲ اینچ بزرگتر از این نسبت برای ۰/۱ اینچ باشد آزمایش دوباره تکرار شود. اگر در آزمایش تکرار نیز نتیجه مشابهی بدست آمد در ۰/۲ اینچ به عنوان نتیجه آزمایش گزارش می شود.

پ- اگر آزمایش برای آزمونه هایی با در صد رطوبت ثابت انجام شده است، منحنی وزن مخصوص خشک-عدد CBR را مانند شکل (۷-۳) رسم کنید. CBR طراحی را از روی این منحنی بر اساس حداکثر دانسیته خشک درخواست شده بدست آورید.



شکل(۷-۳): منحنی وزن مخصوص خشک - CBR

ت- اگر آزمایش برای آزمونه هایی که در یک بازه درصد رطوبت متراکم میشوند انجام شده است، نتیجه آزمایش های در سه انرژی تراکم برای آزمونه ها را مطابق شکل (۷-٤) رسم کنید. منحنی های شکل ۳ نشانگر رفتار خاک در بازه انتخاب شده رطوبت تراکم می باشند.



شکل(۷-٤): محاسبه CBR برای یک بازه رطوبت مشخص شده

CBR طراحی کمترین اعداد CBR بدست آمده برای آزمونه ها در محدوده درصد رطوبت تراکم مشخص شده خواهد بود که دانسیته آن بین حد پایین مشخص شده برای آزمایش ها و دانسیته بدست آمده بوسیله تراکم آزمونه ها در محدوده درصد رطوبت است.

اطلاعات زیر از آزمایش و اندازه گیری های ذکر شده قابل استنتاج است:

الف- وزن مخصوص خشک(γ_d)

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} = \frac{W_t}{V_t(1+\omega)} \qquad (۲-۷)$$

که در آن:

W_s: وزن نمونه کوبیده شده در داخل قالب،

ω: درصد خاک که در حقیقت همان درصد رطوبت بهینه است،

V_t: حجم خاک داخل قالب.

ب-تورم پذیری

اگر تفاضل بین مقادیر خوانده شده روی گیج در ابتدای مرحله استغراق در آب و انتهای انبساط را با s نمایش دهید، مقدار تورم خطی نسبی عبارت خواهد بود از:

$$\text{تورم خطی} = \frac{S}{H} \times 100 \qquad (۳-۷)$$

پ- مدت زمان لازم برای اشباع شدن خاک (انتهای تورم پذیری) که اطلاعاتی در مورد قابلیت آبگذری خاک مورد نظر خواهد داد.

ت- عدد CBR

روی کاغذ میلی متری تغییرات فشار را در برابر فرورفتگی پیستون رسم کنید. پس از رسم منحنی و تعیین مبدا آن (تصحیح این منحنی در بخش ٦ ذکر خواهد شد) می توان به راحتی عدد CBR را که از یکی از دو نسبت زیر حاصل می شود تعیین کرد:

$$CBR = \frac{P_{2.5}}{70} \qquad \text{یا} \qquad CBR = \frac{P_5}{105} \qquad (٤-۷)$$

که در آن، $P_{2.5}$ و P_5 عبارتند از فشارهای لازم برای فرو بردن ۲/۵ mm یا ۵ mm از پیستون در خاک و ۷۰ و ۱۰۵ kg/cm^2 ، فشارهای لازم برای فرو بردن پیستون و همان اندازه در مصالح استاندارد است. معمولاً عدد CBR مقدار $\frac{P_{2.5}}{70}$ است. در صورتی که $\frac{P_5}{105}$ مقدار بیشتری را نشان دهید، آزمایش باید مجدداً انجام شود. اگر نتیجه یکسان با حالت قبل به دست آمد، در آن صورت عدد CBR مقدار $\frac{P_5}{105}$ خواهد بود.

۸- آزمایش تک محوری محصور نشده (AASHTO T: 208-90, ASTM D: 2166-87)

۸-۱- مقدمه

آزمایش تک محوری یک روش سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده خاکهای چسبنده است. این آزمایش برای خاکهایی قابل استفاده است که چسبندگی آنها برای تهیه آزمونه های پایدار که مقاومت خود را بعد از حذف فشار همه جانبه حفظ کنند مانند رسها و خاکهای سیمانته شده کافی باشد. خاکهای سیلتی، ماسه ای یا خاکهای کلوخه ای و ترک خورده و پیت ها را نمی توان به این روش آزمایش کرد. در آزمایش تک محوری یک آزمونه از خاک مورد نظر تا رسیدن به گسیختگی تحت بارمحوری به صورت کرنش کنترل قرار گرفته و مقاومت آن بر اساس تنش کل ایجاد شده در آزمونه در هنگام گسیختگی محاسبه می شود. آزمونه ها در این آزمایش بسته به شرایط مورد نظر طراح می توانند دست نخورده، بازسازی شده یا ساخته شده در آزمایشگاه با درصد تراکم و رطوبت مورد نظر باشند.

۸-۲- تئوری آزمایش

مکانیزم مقاومت برشی در خاک های چسبنده بسیار پیچیده تر از خاک های دانه ای است. خاک های دانه ای از ذراتی تشکیل شده اند که به علت اندازه و شکلشان، دارای سطح مخصوص کوچکی هستند و در آنها رفتار نیروهای جرمی مانند وزن، بیشتر از نیروهای سطحی کنترل کننده است. از طرف دیگر ذرات خاک چسبنده به علت شکل و اندازه ای که دارند (اغلب پولکی شکل هستند)، دارای سطح مخصوص بالایی هستند و رفتار آنها بیشتر تابع نیروهای سطحی تا نیروهای جرمی است.
مقاومت برشی خاک های چسبنده از دو نوع مقاومت اصطکاکی و مقاومت چسبندگی ناشی می شود. مقاومت اصطکاکی تابع نیروهای وزنی است که بیشتر در خاک های دانه ای به چشم میخورد و مقاومت چسبندگی تابع نیروهای سطحی است. البته رفتار دقیق نیروهای سطحی که باعث چسبندگی می شود هنوز ناشناخته است.باید توجه داشت که چسبندگی خاک یک پارامتر ثابت نبوده،بلکه تابعی از بار منتقل شده توسط سازه خاک است. همچنین مقدار آن بستگی به بار های بین دانه ای و چگونگی انجام آزمایش دارد. در حالتی که هیچ بار جانبی ای بر نمونه وارد نشود، چسبندگی به عنوان مقاومت برشی خاک مطرح می گردد.

۸-۳- وسایل آزمایش

۱- دستگاه آزمایش فشاری ساده.
۲- دستگاه خارج کردن نمونه از نمونه گیر.
۳- کرنش سنج که قابلیت اندازه گیری تغییر شکل تا ۲۰ درصد طول آزمونه را داشته باشد.
٤- استوانه نمونه و درپوش.
۵- ترازو با حساسیت gr ۰/۰۱ و gr ۰/۱.

شکل(۸–۱): ترازو با دقت ۰/۰۱gr

٦– گرمخانه

۷– کرنومتر

۸– نقاله

۹– ماله

۱۰– ظرف تبخیر

۱۱– کاغذ مومی یا شفاف

۸–٤– ابعاد آزمونه ها

قطر آزمونه ها در این آزمایش نباید از ۳۰ میلیمتر(۱/۳ اینچ) کمتر باشد. در این شرایط اندازه بزرگترین دانه موجود در آزمونه باید از یک دهم قطر آزمونه کوچکتر باشد. در صورتی که آزمونه ها قطری بزرگتر از ۷۲ میلیمتر(۲/۸ اینچ) داشته باشند نسبت اندازه بزرگترین دانه ها به قطر آزمونه را می توان به ۱/٦ کاهش داد. در مورد آزمونه های دست نخورده اگر بعد از انجام آزمایش معلوم شود که دانه هایی با قطر بزرگتر از مقدار مجاز در آزمونه وجود داشته است باید این مطلب در قسمت توضیحات گزارش ذکر شود. نسبت طول به قطر آزمونه ها باید بین ۲ تا ۲/۵ باشد.

۸–۵– تهیه آزمونه ها

الف– آزمونه های دست نخورده: نمونه را به 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 بکار برد. بعد از خارج کردن نمونه از نمونه گیر برای حمل آن باید دقت کرد که هیچگونه دست خوردگی،تغییر شکل یا تغییر رطوبت در نمونه ایجاد نشود. در صورتی که برای تهیه آزمونه ها نیاز به تراشیدن نمونه باشد باید دقت زیادی

برای این کار به کار رود تا هیچگونه دست خوردگی در نمونه ایجاد نشود. برای حفظ رطوبت نمونه اصلاح نمونه باید در اطاق با رطوبت کنترل شده انجام شود.

آزمونه های تهیه شده باید با مقطع دایره ای و دو انتهای کاملا صاف و عمود بر محور آزمونه تهیه شوند. در صورتی که حین تراشیدن آزمونه دانه هایی از سطح تراشیده شده کنده شده و سطح آن فرورفتگی هایی ایجاد شود، این فرورفتگی ها را باید با استفاده از خاکهای حاصل از تراش بعد از ورز دادن کافی پر کرد. مقداری از باقیمانده های خاک برای تعیین درصد رطوبت در جعبه مخصوص نگهداری شود.

ب- آزمونه های بازسازی شده: آزمونه 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 بوسیله انگشت ورز دهید تا کاملا یکنواخت شود. هنگام ورز دادن باید دقت شود که هوایی داخل نمونه محبوس نشود. سپس نمونه را در قالبی به اندازه آزمونه مورد نظر برای آزمایش با دانسیته نمونه اصلی (که بازسازی می شود) قرار دهید.

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

۸-٦- روش آزمایش

همانند سایر آزمایش های برشی، در این جا نیز هر دو روش کرنش کنترل شده و تنش کنترل شده به کار می روند. روش ارائه شده در این قسمت برای حالت کرنش کنترل شده است.

۱- نمونه را در جایگاه مخصوص خود در دستگاه آزمایش قرار می دهیم، به طوری که محور عمودی آن نزدیک مرکز بارگذاری باشد.اگر راستای نمونه بر صفحه های دستگاه عمود نباشد، خیلی زود منحنی تنش- کرنش به حالت افقی خود نزدیک می شود.برای تماس مطمئن تر می توان بار kg ۰/۵ بر نمونه وارد کرد. این بار اولیه در نمونه یک تغییر مکان اولیه ایجاد می کند که در ابتدای آزمایش باید تصحیح شود.

۲- گیج اندازه گیری بار و تغییر مکان را روی صفر تنظیم می کنیم. سپس بارگذاری با نرخ کرنش ۰/۵ تا ۲ درصد در دقیقه اعمال می شود..

۳- قرائت های بارگذاری در کرنش های ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰، ۳/۰، ٤/۰، ۵/۰، ٦/۰، ۸/۰، ۱۰/۰، ۱۲/۰، ۱٤/۰، ۱٦/۰، ۱۸/۰ و ۲۰/۰ درصد اندازه گیری می شود.

٤- فشار همچنان بر نمونه اعمال می شود تا آن که ترک در نمونه ظاهر شود یا آن که منحنی تنش- کرنش از مقدار ماکزیمم خود عبور کند. در واقع قرائت ها تا جایی که یکی از سه حالت زیر اتفاق بیفتد، ادامه می یابد:

الف) بار در نمونه کاهش یابد.

ب) بار برای قرائت یکسان شود.

ج) تغییر مکان تا ۱۵ درصد(یا ۲۰ تا ۲۵ درصد) ادامه پیدا کرده باشد.

۵- نمونه ی گسیخته شده را در اتاق مرطوب می بریم و زاویه ی ترک را با افق اندازه می گیریم(باید توجه داشت که این زاویه پش ازایجاد ترک خوانده شود). نمونه ی گسیخته شده را به دقت بررسی می کنیم. این مشاهده در تهیه ی اطلاعات و ارئه ی بهتر نتایج به ما کمک می کند. نمونه را وزن می کنیم و بعد از خشک کردن کامل در گرمخانه، درصد رطوبت آن به دست می آید.

٦- شکل آزمونه بعد از آزمایش را برای ثبت در گزارش آزمایش رسم کنید یا از آن عکس تهیه کنید.

۸-۷- محاسبات

محاسبات را بر اساس کرنش و تنش های محوری انجام می دهیم و مقدار تنش نهایی (q_u) از روی منحنی های تنش-کرنش به دست می آید.

کرنش محوری ϵ از رابطه زیر بدست می آید:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \qquad (۲-۸)$$

ΔL : تغییر طول نمونه خوانده شده از کرنش سنج.

L_0 : طول اولیه نمونه.

تنش لحظه ای را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (۳-۸)$$

P : بار روی نمونه در لحظه قرائت ΔL

A : سطح مقطع نمونه در لحظه قرائت P

تعیین مقدار دقیق سطح مقطع در هر لحظه مهم است. سطح مقطع در هر لحظه را می توان با ثابت در نظر گرفتن حجم نمونه به دست آورد. در لحظه شروع آزمایش، حجم نمونه عبارت است از:

$$V_T = A_O \times L_O \qquad (۳-۸)$$

بعد از تغییر طول نمونه، حجم نمونه عبارت است از:

$$V_T = A_O(L_O - \Delta L) \qquad (٤-۸)$$

با تساوی این دو رابطه، مساحت سطح مقطع واقعی در هر لحظه عبارت است از:

$$A = \frac{A}{1 - \epsilon} \qquad (۵-۸)$$

تنش برشی حداکثر C_u نصف تنش فشاری q_u است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_u = \frac{q_u}{2} = \frac{P}{2A} \qquad (۶-۸)$$

۹- آزمایش تراکم (AASHTO T: 99-90 - ASTM D: 698-78)

۹-۱- مقدمه

در بسیاری از سازه های خاکی، مثل سدها، دیوارهای حائل، بزرگ راه ها، فرودگاه ها و ... متراکم کردن خاک، امری ضروری برای بهبود مقاومت خاک است. متراکم کردن خاک که عبارت است از قرار دادن خاک در موقعیت چگال تر، به چند دلیل مطلوب است:

الف) کاهش نشست ها در آینده، ب) افزایش مقاومت برشی، ج) کاهش نفوذپذیری، د) بهبود خواص مکانیکی خاک ه)کاهش قابلیت تورم خاک.

در کارگاه برای تراکم خاک از غلتک های چرخ استوانه ای صاف، غلتک های پاچه بزی، غلتک های چرخ لاستیکی و غلتک های ارتعاشی استفاده می شود. غلتک های ارتعاشی اغلب برای تراکم خاک های دانه ای به کار می روند. تاثیر تراکم حاصل از دستگاه های فوق، محدود به اعماق ۱۵ تا ۳۰ سانتی متر سطحی است.

وقتی آب به خاک اضافه می شود، ذرات خاک آب اضافه شده را به صورت لایه ای اطراف خود جذب می کنند و هر چه میزان آب زیادتر باشد ضخامت این لایه جذبی نیز زیادتر خواهد بود. در صورت وجود تنش برشی بین ذرات خاک این لایه نقشی شبیه روغن کاری در ماشین های مکانیکی را در مکانیزم لغزش بین دانه ها خواهد داشت. در خاک های درشت دانه به دلیل اینکه ضخامت لایه آب جذبی نسبت به قطر دانه ها ناچیز است چنین مکانیزمی در مورد آنها برقرار نخواهد شد.

بدلیل نقش لایه آب جذبی در آسان تر کردن حرکت ذرات نسبت به یکدیگر افزایش درصد رطوبت باعث آسان تر شدن تراکم خاک خواهد شد ولی با اضافه تر شدن مقدار آب از حد معینی آب اضافه شده فضای خالی بین دانه ها را می تواند با ذرات خاک پر شود پر خواهد کرد. به همین دلیل درصد آب بهینه ای وجود دارد که با یک انرژی تراکم معین، حداکثر وزن خاک در واحد حجم قابل دستیابی است. هدف آزمایش تراکم بدست آوردن درصد رطوبت مناسب برای عملیات اجرای تراکم خاکریزی و مشخص کردن دانسیته مورد انتظار از عملیات کوبش در محل اجرا می باشد. برای رسیدن به این هدف لازم است تراکم آزمایشگاهی به گونه ای انتخاب شود که تراکمی که در آزمایش به خاک داده می شود قابل مقایسه با تراکمی که بوسیله ماشین آلات مورد استفاده در کارگاه به خاک داده می شود باشد. در سال های اولیه قرن ۲۰ به دلیل اینکه بااستفاده از ماشین آلات موجود تراکم های کمتری قابل دسترس بود، روش آزمایشگاهی تراکم با انرژی نسبی کمی برای شبیه سازی شرایط اجرایی استفاده می شد. با پیشرفت ماشین آلات اجرایی و ساخت غلتک های سنگین تر تراکم های بالاتری در عملیات اجرایی قابل دسترس بود بنابراین روش آزمایشگاهی با انرژی بالاتری نیز برای بدست آوردن آن تراکم ها در آزمایشگاه استفاده شد.

در آزمایش تراکم استاندارد رابطه بین درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک (منحنی تراکم) خاک مورد نظر با انرژی ۱۲٤۰۰ft- lbf/ft^3 (٦۰۰ KN-m/m^3) متراکم می شود بدست می آید. تراکم در قالبی با قطر ٤ یا ٦ اینچ (۱۰۱/٦ یا ۱۵۲/۵ میلیمتر) و با چکشی به وزن ۵/۵ پوند (۲٤/٤ نیوتن) که از ارتفاع ۱۲ اینچی (۳۰۵ میلیمتر) رها می شود انجام می گردد.

این آزمایش فقط برای خاک هایی که درصد وزنی مانده از الک ۳/٤ اینچ (۱۹ mm) آنها از ۳۰٪ کمتر باشد قابل استفاده است.

بسته به نمونه مورد نظر آزمایش تراکم استاندارد در ۳ روش انجام می شود.

روش الف: در صورتی که درصد مانده روی الک ٤ (٤/٧٥ mm) نمونه کمتر یا مساوی ٢٠ درصد باشد از این روش استفاده می شود.

روش ب: در صورتی که درصد مانده روی الک ٤ از ٢٠ درصد بیشتر باشد ودرصد مانده روی الک ٣/٨ اینچ (٩/٥ mm) از ٢٠ درصد کمتر باشد از این روش استفاده می شود.

روش ج: در صورتی که درصد مانده روی الکی که ٣/٨ اینچ از ٢٠ درصد بیشتر باشد و درصد مانده روی الک ٣/٤ اینچ (١٩mm) از ٣٠ درصد کمتر باشد از این روش استفاده می شود.

مشخصات این ٣ روش در جدول (٩-١) آورده شده است.

جدول(٩-١): مشخصات سه روش انجام آزمایش تراکم

مشخصات	الف	ب	ج
قطر قالب (اینچ)	٤	٤	٦
نمونه (عبوری از الک)	شماره ٤	٣/٨ اینچ	٣/٤ اینچ
تعداد لایه	٣	٣	٣
تعداد ضربه در هر لایه	٢٥	٢٥	٥٦

در صورتی که نمونه اولیه بیشتر از ٥ درصد دانه های بزرگتر از مقدلر حداکثر داشته باشد نتیجه آزمایش تراکم یعنی حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه باید با استفاده از ASTM D: 4253 تصحیح می شود.

٩-٢- وسایل آزمایش

وسایل خاص: وسیله ی متراکم کردن خاک

الف)قالب با ٤/٦ in (١١٥mm) عمق، ٤in (١٠٠mm) قطر و ١/٣٠ ft^3 (٩٦٤/٧ cm^3) حجم.

ب)حلقه ی متحرک دور قالب با ٢/٥ in (٦٢/٥mm) عمق و ٤ in (١٠٠mm) قطر.

ج)چکش با ٢ in (٥٠mm) قطر مقطع و ٥/٥ lb یا ١٠ lb وزن و وسایل کنترل ارتفاع سقوط چکش.

٩-٣- وسایل عمومی

- اسپری آبپاش
- الک شماره ٤
- چکش لاستیکی
- پیمانه
- تابه ی بزرگ برای مخلوط کردن

- لبه ی نوک تیز یا چاقو به طول حداقل ۲۵cm
- دو ترازو با حساسیت ۰/۱gr و ۰/۰۱gr
- گرم خانه
- خشک کننده
- قوطی های خشک
- دستگاه خاک مخلوط کن
- وسیله برای بیرون آوردن نمونه از قالب.

شکل(۹-۱): چکش و قالب تراکم

۹-٤- روش انجام آزمایش

۱- قالب خالی را همراه با ته آن و بدون حلقه ی دور قالب وزن کنید.

۲- یک نمونه نماینده ی ۲/۷ kg (٦ lb) از خاکی که باید آزمایش شود، آماده کنید. همه ی کلوخه های خاک را در یک هاون با چکشی که سر آن لاستیکی است خرد کنید و خاک را با الک شماره ٤ سرند کنید.

تذکر: باید در نظر داشت که اگر قسمت درشت دانه ی خاک (مانند روی الک ٤) بیش از مقدار معینی باشد، آزمایش پراکتور از دقت کافی برخوردار نخواهد بود. برای حل این معضل اگر ذرات با اندازه ی بالای ۲۰ mm کمتر از ۲۰ درصد وزنی نمونه باشد، آزمایش را می توان انجام داد به شرط آن که ذرات با اندازه ی بالای ۲۰ mm جداشده و به جای آن به طور همگن، ذرات با اندازه ی بین ۵ mm تا۲۰ mm جای گزین شود.

۳- با خاکی از الک شماره ٤ عبور داده شده، یک لایه ی ۵ cm تا ۸ cm در قالب درست کنید.

٤- به ملایمت خاک را فشار دهید تا سطح آن صاف شود و بعد با ۲۵ ضربه ی یکنواخت و پخش شده در تمام سطح با چکش، خاک را متراکم کنید. ارتفاع سقوط چکش را ۳۰ cm بگیرید. بین هر سقوط چکش، هم قالب و هم چکش باید به خاطر پخش یکنواخت ضربات در تمام سطح نمونه به آرامی چرخانده شود.

۵- آزمایش را برای لایه های دوم و سوم تکرار کنید. ارتفاع سقوط چکش را ۳۰ cm بالاتر از سطح خاک مورد آزمایش تنظیم کنید. وقتی عمل متراکم کردن سومین لایه ی خاک را نیز به اتمام رساندید، دور و سطح قالب را از زواید خاک پاک کنید.

٦- حلقه ی دور قالب را بردارید. در برداشتن حلقه ی دور قالب، آن را بچرخانید تا اتصالی که بین حلقه و خاک ایجاد شده، قبل از آن که آن را از روی قالب بردارید، جدا شود. این عمل باعث می شود هنگام برداشتن حلقه ازدور ستون قالب از جابه جایی یا حرکت مقداری از خاک متراکم شده جلوگیری شود.

عمل صاف کردن روی نمونه ی درون قالب باید با کشیدن خط کش فلزی روی نمونه صورت گیرد. صاف کردن را از محور مرکزی شروع کنید و تا لبه های قالب کار را ادامه دهید.

۷- هنگامی که سطح بالایی نمونه اصلاح شد و تمام خاک های شل از اطراف آن پاک گردید، سیلندر و نمونه را وزن کنید

۸- خاک را از درون سیلندر خارج کنید و یک نمونه ی نماینده را که دارای وزنی در حدود ۱۰۰ gr است،برای تعیین مقدار آب آن آماده کنید.مقدار آب باید از روی نمونه هایی که از قسمت بالا، وسط و ته خاک متراکم شده به دست آمده، تعیین شود.

۹- خاکی را که از داخل سیلندر خارج کرده اید، با دست خرد و دوباره با نمونه ی اصلی مخلوط کنید و مقدار آب آن را تا حدود ۳٪ با اضافه کردن آب به وسیله ی اسپری افزایش دهید. مراقب باشید که آب را به طور یکسان پخش و خاک را کاملا مخلوط کنید. با وزن کردن اسپری قبل و بعد از پاشیدن آب، می توانید مقدار آب اضافه شده را تخمین بزنید. دانستن مقدار آب اضافه شده کمک می کند تا مقدار رطوبت را کنترل کنید.

۱۰- عمل متراکم کردن را تکرار کنید. هر بار مقدار آب را در حدود ۳٪ افزایش دهید. ۵تا ٦ بار این کار را انجام دهید تا وقتی که خاک خیلی مرطوب و چسبنده شود.

۹-۵- محاسبات

چگالی خشک خاک، γ_d (وزن ذرات خاک در واحد حجم) را می توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\gamma_d = \frac{W}{V(1+\omega)} \qquad (۹-۱)$$

که در آن،

W: وزن خاک متراکم شده مرطوب در استوانه (سیلندر)،

V: حجم قالب،

ω: درصد آب موجود در خاک متراکم شده است.

از نظر تئوری، مطلوب آن است که به منحنی حفره های هوای صفر (خط اشباع) برسیم که در حالت حفره های هوای صفر، نمونه با رطوبت موجود، در حالت اشباع است:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_\omega}{(\frac{\omega}{S_r} + \frac{1}{G_s})} \qquad (۹-۲)$$

که در آن،

G_s: وزن مخصوص خاک،

S_r: درجه اشباع،

ω: درصد آب موجود در خاک متراکم شده است.

γ_ω: دانسیته آب.

برای رسم منحنی خشک – درصد رطوبت، روی محور افقی درصد آب و روی محور قائم، چگالی خشک را در نظر می گیریم. منحنی را می توان با داشتن نقاط تجربی به دست آمده از آزمایش رسم کرد.برای منحنی اشباع (منحنی هوای صفر)نیز کافی است در رابطه اخیر مقدار S_r را برابر ۱۰۰٪ قرار دهید.آنگاه نقاط به دست آمده را روی همان محور های مختصات قبلی (در کنار نمودار چگالی خشک– درصد رطوبت) رسم کنید.

گفتنی است در بسیاری از کارهای خاکی، دانسیته خشک خاک در محل باید ۹۰٪ تا ۹۵٪ حداکثر دانسیته خشک به دست آمده از آزمایشگاه باشد. نسبت این دو را به عنوان تراکم نسبی تعریف می کنند و با R نشان می دهند:

$$R(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d(\max)}} \times 100 \qquad (۳-۹)$$

برای خاک های دانه ای می توان نوشت:

$$R(\%) = \frac{R_\circ}{1 - D_r(1 - R_\circ)} \times 100 \qquad (٤-۹)$$

$$R_c = \frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_{d(\min)}} \qquad (۵-۹)$$

۱۰- آزمایش تحکیم (AASHTO T: 216-83 , ASTM D: 2435-90)

۱۰-۱- مقدمه

این آزمایش روشی است برای محاسبه مقدار و سرعت تحکیم خاک در شرایط یک بعدی تحت اثر بارگذاری تنش-کنترل. در این آزمایش یک آزمونه در شرایطی که به صورت جانبی محدود شده است تحت اثر بارگذاری محوری قرار میگیرد. بار به صورت پله ای به آزمونه اعمال می شود در در هر مرحله از بارگذاری ضمن اندازه گیری تغییرات ارتفاع، به آزمونه امکان تحکیم (خارج شدن آب حفره ای) داده می شود. مقادیر اندازه گیری شده برای محاسبه رابطه تخلخل- تنش موثر و همچنین سرعت تحکیم مورد استفاده قرار می گیرند.

برای تعیین میزان نشست خاک ها به علت تحکیم از تئوری تحکیم ترزاقی با فرضیات زیر استفاده می شود:

۱- خاک همگن است.

۲- خاک ها اشباع است.

۳- زهکشی و تراکم یک بعدی است.

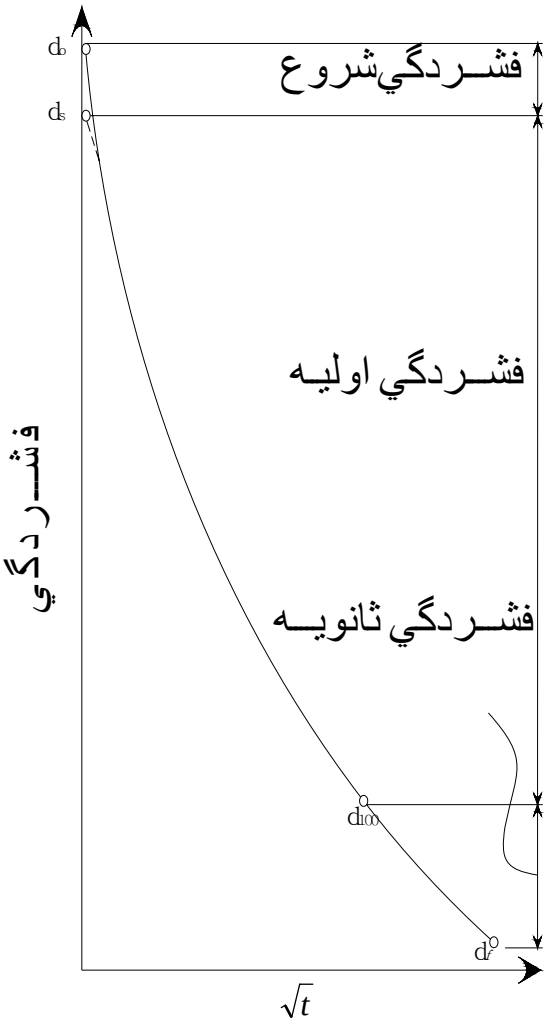
٤- خواص خاک ثابت است.

۵- منحنی $e - \log p$ یک خط راست را تشکیل می دهد.

در شکل (۱۰-۱)، منحنی فشردگی نمونه خاک نسبت به جذر زمان رسم شده است. در این شکل، d_0 شروع فشردگی است. d_s نقطه شروع اصلاح شده است که از امتداد مماس بر منحنی به دست آمده است. d_{100} نقطه ۱۰۰٪ فشردگی d_f حد نهایی آن است. فشردگی از d_O تا d_{100} تحکیم اولیه خوانده می شود و از d_{100} تا d_f تحکم ثانویه خواهد بود. d_O معمولاً بالای d_s قرار دارد. با اعمال بارگذاری، تحکیم اولیه شروع می شود و بعد از اتمام تحکیم، فشردگی ادامه می یابد. در این حالت هیچ نوع فشار هیدروستاتیکی اضافه یا محو نمی شود. در واقع این حالت تحکیم ثانویه است که به علت شکستگی تدریجی باند های بین دانه ها یا زهکشی آب جذب سطحی خود ذرات است. محاسبات زمانی تئوری ترزاقی فقط برای تحکیم اولیه صحت دارد. نسبت فشردگی اولیه به فشردگی نهایی (r) نمایانگر میزان فشردگی کل است که با تئوری ترزاقی پوشش داده می شود. به عبارت دیگر هر چه r بیشتر شود، تئوری ترزاقی جواب های بهتری می دهد. در غیر اینصورت معمولاً نشستی که پیش بینی می شود بزرگ تر از نشست واقعی خواهد بود.

$$r = \frac{d_s - d_{100}}{d_o - d_f} \qquad (۱۰-۱)$$

آزمایش تحکیم معمولا بر روی آزمونه هایی که از نونه های دست نخورده از نهشته های ریز دانه تهیه شده اند انجام می شود. این آزمایش را می توان بر روی نمونه های ساخته شده نیز انجام داد. نتایج آزمایش تحکیم پایه ای برای محاسبه مقدار و سرعت نشست پی های سازه ها و خاکریزهایی که بر روی نهشته های ریز دانه ساخته می شوند خواهد بود. همچنین از این آزمایش میتوان برای تعیین پارامترهای مدلهای رفتاری مصالح مانند مدل تحکیم یک بعدی ترزاقی یا مدهای حالت حدی استفاده کرد. با استفاده از مدل تحکیم یک بعدی ترزاقی و نتایج این آزمایش می توان نفوذپذیری خاک مورد آزمایش را نیز تخمین زد.



شکل(۱۰-۱): منحنی نشست-جذر زمان

۱۰-۲- وسایل مود نیاز

۱۰-۲-۱- دستگاه بارگذاری

دستگاه باید به طور مناسبی بار عمودی را به آزمونه ها وارد کند. بار عمودی بوسیله وزنه هایی که بر روی دستگاه قرار می گیرند به آزمونه ها اعال می شوند. دستگاه باید قادر باشد بار مورد نظر را برای مدت طولانی با خطای کمتر از ۰/۵ درصد ثابت نگه دارد. هر افزایش بار بدون وارد کردن ضربه در زمان حدود ۲ ثانیه انجام می شود.

افزایش بار باید در زمانی حدود $۰/۰۱ t_{100}$ به آزمونه اعمال شود.

۱۰-۲-۲- دستگاه تحکیم

۱۰-۲-۲-۱- بدنه دستگاه تحکیم

ظرف استوانه ای است که در داخل آن حلقه فلزی جای داده می شود به جداره ظرف استوانه ای دو نیرو سنج برای مشاهده سطح آب نصب و حدفاصل حلقه فلزی و جداره ظرف استوانه ای آب ریخته می شود. در نتیجه نمونه در طول آزمایش همیشه در داخل آب غوطه ور است و به حالت اشباع باقی می ماند.

۱۰-۲-۲-۲- حلقه فلزی

از برنج یا فلز زنگ نزن دیگری ساخته می شود نمونه را در بر می گیرد. این حلقه باید شرایط زیر را داشته باشد:

الف) متناسب با حداقل قطر نمونه باشد. حداقل قطر نمونه ۲ in (۵ cm) است.

ب) متناسب با حداقل ضخامت نمونه باشد. حداقل ضخامت نمونه ۰/۵ (۱۳ mm) است. باید توجه داشت که این حداقل ضخامت نباید از ۱۰ برابر قطر درشت ترین دانه موجود در خاک کمتر باشد.

ج) متناسب با حداقل نسبت قطر به ضخامت نمونه باشد (حدود ۲/۵).

د) سختی و استحکام حلقه در بیشترین فشار هیدرواستاتیک وارد بر نمونه باید طوری باشد که افزایش قطر آن از ۳٪ تجاوز نکند. حلقه فلزی باید از فلز ضد زنگ ساخته شده، در برابر مواد موجود در خاک نیز مقاوم باشد. سطح داخلی حلقه باید کاملاً صیقلی باشد یا از ماده ای باحداقل قابلیت اصطکاک پوشانده شده باشد. گریس سیلیکون یا پلی تترا فلورتیلن برای خاک های غیر ماسه ای پیشنهاد می شود.

۱۰-۲-۲-۳- سنگ های متخلخل

در بالا و پایین نمونه قرار می گیرند و باید دارای مشخصات زیر باشند:

الف) سنگ های متخلخل باید از سیلیکون کاربید، اکسید آلومینیوم یا فلزی ساخته شوند که مواد موجود در خاک و رطوبت خاک روی آن ها تاثیر نداشته باشد.

ب) خلل و فرج سنگ ها باید به حدی باشد که دانه های ریز خاک به داخل آن ها نفوذ نکند. بهتر است از فیلتر کاغذی که بین سنگ های متخلخل و نمونه قرار داده می شود استفاده کرد تا از داخل شدن دانه های ریز خاک به خلل و فرج سنگ جلوگیری شود. البته زهکشی نمونه نیز نباید به تاخیر افتد. همچنین سنگ های متخلخل باید همیشه تمیز، بدون ترک و لب پریدگی و بدون غیر یکنواختی باشد.

ج) قطر سنگ متخلخل بالای نمونه ۰/۲ mm تا ۰/۵ mm کمتر از قطر داخلی حلقه فلزی است. اگر از حلقه شناور استفاده می شود، قطر سنگ متخلخل زیر نمونه باید مساوی قطر سنگ متخلخل بالایی باشد.

د) ضخامت سنگ های متخلخل باید به اندازه ای باشد که براثر بارگذاری نشکنند.

۱۰-۲-۲-٤- صفحه بارگذاری

صفحه فلزی ضد زنگی با قطر مساوی سنگ متخلخل بالایی است. بار وارده از طریق یک گلوله فلزی به صفحه سربار و نمونه وارد میشود و در نتیجه موجب سالم ماندن سنگ متخلخل بالایی می گردد.

۱۰-۲-۲-۵- گیج اندازه گیری

برای تعیین تغییر ضخامت نمونه با دقت ۰/۰۰۲۵ mm (میکرومتر).

۱۰-۲-۲-٦- وسیله آماده سازی نمونه

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 برید و به اندازه قطر داخلی حلقه درآورده و سپس به داخل آن منتقل کرد. سطح داخلی این استوانه باید کاملاً صیقلی و با ماده ای با حداقل ضریب اصطکاک پوشانده شود.

۱۰-۲-۲-۷- جک

برای بیرون آوردن نمونه از قالب مورد استفاده قرار می گیرد.

۱۰-۲-۲-۸-سایر وسایل

شامل ترازو با حساسیت gr ۰/۱، گرمخانه با کنترل درجه حرارت، اره سیمی، کارد و کاردک، قوطی های تعیین رطوبت و کرنومتر.

وقتی در طی آزمایش تحکیم، بار به نمونه خاک وارد می شود، اصطکاک ایجاد شده بین محیط داخلی حلقه برنجی و محیط جانبی نمونه برای دو نوع دستگاه تحکیم با حلقه ثابت و شناور تفاوت دارد. در اغلب موارد، اصطکاک جانبی در حدود ۱۰٪ بار اعمال شده است.

شکل(۱۰-۲): دستگاه تحکیم و متعلقات

۱۰-۳- اندازه آزمونه ها

۱- حداقل قطر آزمونه باید ۵۰ میلیمتر باشد.

۲- حداقل ضخامت اولیه آزمونه باید ۱۲ میلیمتر باشد. این ضخامت نباید کمتر از ۱۰ برابر حداکثر اندازه دانه های موجود در خاک باشد.

۳- حداقل نسبت قطر به ضخامت آزمونه باید ۲/۵ باشد.

۱۰-٤- آماده سازی آزمونه ها

درآماده سازی آزمونه ها بایددقت کرد که حداقل دست خوردگی یا تغییر در رطوبت یا دانسیته مصالح بوجود 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 ۵ میلیمتر بزرگتر از قطر حلقه فلزی دستگاه اشته باشند پس از بریدن نمونه بوسیله استوانه مخصوص که در بالا توضیح داده شد به آرامی آن را در داخل حلقه قرار دهید. برای بریدن نمونه در

خاکهای نرم از اره سیمی و برای خاکهای سفت از یک تیغه لب تیز استفاده کنید. در خاکهای آلی یا خاکهای الیاف دار که در اثر بریدن دست خوردگی در آنها ایجاد می شود میتوان آزمونه ها را مستقیما از لوله های نمونه گیر به داخل حلقه تحکیم وارد نمونه در این صورت باید قطر نمونه گیر و حلقه تحکیم یکسان باشد.

۱۰-۵- تعیین مشخصات آزمونه

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

۲- ارتفاع ائلیه آزمونه (H_0) را حداقل در ٤ نقطه از آزمونه اندازه گیری کنید (با دقت ۰/۰۲۵ میلیمتر).

۳- حجم اولیه آزمونه (V_0) را با دقت ۰/۲۵ سانتیمتر مربع با استفاده از قطر آزمونه و ارتفاع اولیه آن محاسبه کنید.

٤- درصد رطوبت آزمونه را با استفاده از قطعه هایی که در هنگام آماده سازی آزمونه بدست آمده اند محاسبه کنید.

۵- برای انجام محاسبات و تفسیر نتایج، مشخص بودن حدود آتربرگ و وزن مخصوص دانه های خاک لازم است. در صورتی که این کمیت ها تعیین نشده اند با استفاده از خاکهای باقیمانده آنها را تعیین کنید.

۱۰-٦- روش انجام آزمایش

۱- آزمونه را درون حلقه قرار دهید و صفحات متخلخل و صافی ها رادر دو طرف آن قرار دهید. برای خاکهای خشک منبسط شونده از سنگهای متخلخل خشک باید استفاده شود. برای خاکهای نیمه اشباع از سنگهای متخلخل مرطوب و برای خاکهای اشباع از از سنگهای متخلخل اشباع استفاده شود. صفحه سربار را بر رروی سنگ متخلخل بالایی قرار داده و مخزن اطراف آزمونه 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 d_o اولیه را ثبت نمایید. در صورت نیاز برای جلوگیری از تورم آزمونه باید بار بیشتری به آن اعمال نمود. اگر پیش بینی گردد که بار ۵ kPa تحکیم قابل توجهی را ایجاد خواهد کرد میتوان از بار کمتر مثلا ۲ یا ۳ کیلو پاسکال استفاده کرد.

۳- اگر آزمونه دست نخورده اشباع شده باشد یا عمق برداشت نمونه زیر تراز آب زیرزمینی باشد بعد از اعمال بار۵ kPa به آرامی آزمونه را غرقاب نمایید. برای جلوگیری از تورم بار وارده بر آزمونه را افزایش دهید. بار لازم برای جلوگیری از تورم همچنین تغییر مکان ایجاد شده در طول زمان ثبت گردد.

٤- اگر شیب و شکل منحنی تراکم یا تعیین فشار پیش تحکیمی مورد نظر باشد فشار نهایی وارد بر آزمونه باید تا ٤ 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.

٤-۱- نسبت افزایش بار برای آزمایش تحکیم باید یک باشد به این ترتیب در هر مرحله از بارگذاری مقدار بار ۲ برابر می شود. به عنوان مثال معمولا مراحل بارگذاری به صورت (۱۲ و ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ و ...kPa) می باشد.

٤-۲- نسبت کاهش بار برای بار برداری نیز معمولا به صورت نصف کردن بار در هر مرحله از باربرداری انجام می شود. میتوان مراحل باربرداری را نصف کرد به صورتیکه درهر مرحله از باربرداری بار وارد بر آزمونه را ربع کرد.

۵- قبل از اعمال هر بار اضافی، ارتفاع اولیه آزمونه (d_f) را ثبت کنید.

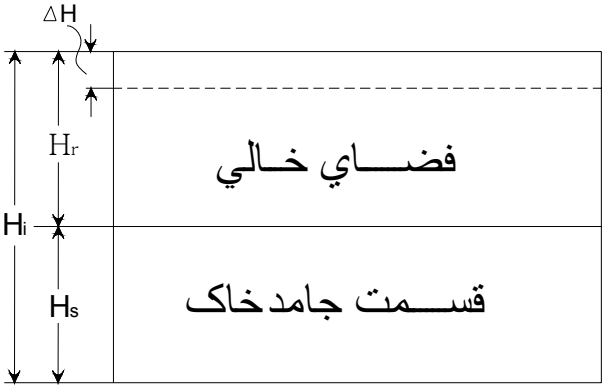
٦-فاصله گام های بارگذاری به اندازه ٢٤ ساعت خواهد بود. در طول این مدت تغییر شکل آزمونه را با قرائت عقربه میکرومتر در زمانهای ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ٤، ٦، ۸، ۱۵، ۳۰ دقیقه، ۱، ۲، ٤، ۸ و ٢٤ ساعت اندازه گیری نمایید.

۱۰-۷- محاسبات

محاسبات بر مبنای شکل(۱۰-۳) انجام می شود. حجم کل نمونه که برای مجموع حجم مواد جامد و آب است از حاصل ضرب ارتفاع H_i در سطح مقطع نمونه A به دست می آید

$$A \times H_i = V_s = V_s + V_w \qquad (۱-۱۰)$$

حجم آب در انتهای آزمایش که V_{wf} نام گذاری می شود، از آزمایش درصد رطوبت در انتهای آزمایش به دست می آید. در این حالت، درصد اشباع ۱۰۰٪ است.



شکل(۱۰-۳): تغییرات منافذ با تغییرات ارتفاع نمونه

$$H_f = H_i - \Delta H \qquad (۲-۱۰)$$

$$V_f = H_f \times A = H_s + V_{wf} \qquad (۳-۱۰)$$

بنابراین ارتفاع معادل خاک عبارت است از:

$$H_s - H_f - \frac{V_{wf}}{A} \qquad (۴-۱۰)$$

در روابط فوق، A مساحت حلقه فلزی است.

ارتفاع منافذ عبارت خواهد بود از:

$$H_v = H_i - H_s \qquad (۵-۱۰)$$

بنابراین نسبت منافذ اولیه عبارت است از:

$$e_i = \frac{H_v}{H_s} \qquad (۶-۱۰)$$

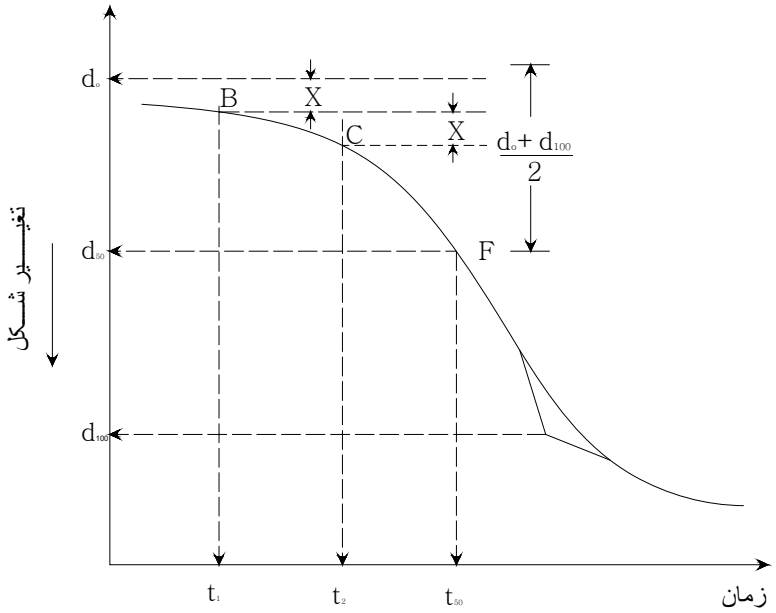
برای محاسبه زمان تحکیم و مقدار تحکیم(نشست خاک ها)، با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمایش ها، منحنی نشست نسبت به لگاریتم زمان رسم می شود. از روی این منحنی مقدار ۱۰۰٪ تحکیم اولیه نمونه را در هر فشار به دست آورید. محل برخورد مماس های قسمت با شیب زیاد و شیب کم در انتهای آزمایش را انتهای تحکیم اولیه می گویند. زمان مربوط به این نقطه را زمان صددرصد تحکیم یا t_{100} می نامند.

برای یافتن قرائت گیج در صفر درصد تحکیم اولیه (یعنی زمانی که هنوز تغییر ضخامت نمونه شروع نشده است)، از دو زمان انتخابی که معمولاً در ابتدای قسمت سهمی شکل منحنی اند و نسبت آن ها بین ۱ به ٤ است، استفاده می شود.به اندازه فاصله

بین دو زمان روی محور قرائت گیج از t_1 به طرف بالا جدا کنید و از آن محور تغییر مکان عمود کنید. در محل تقاطع این عمود با محور می توان رابطه زیر را برای تغییر مکان در حالت تحکیم اولیه نوشت:

$$\Delta H_v = d_{100} - d_0 \qquad (۷-۱۰)$$

برای یافتن ۵۰٪ تحکیم در هر افزایش بار روی منحنی شکل (۱۰-٤)، میانگین صفر درصد تحکیم d_0 و ۱۰۰٪ تحکیم d_{100} را محاسبه و روی نمودار محل آن را پیدا کنید، سپس زمان ۵۰٪ تحکیم یعنی t_{50} را نیز به دست آورید.



شکل (۱۰-٤): منحنی d-log t

برای هر افزایش بار ضریب تحکیم (C_v) را در ۵۰٪ تحکیم از رابطه زیر به دست آورید:

$$C_v = \frac{TH_d^2}{t_{50}} \qquad (۸-۱۰)$$

$$C_v = 0.197 H^2 / t_{50} \qquad (۹-۱۰)$$

در رابطه فوق، H میانگین طولانی ترین راه زهکشی آب در بارگذاری است.

روش دیگر برای تعیین d_0، d_{100} و C_v، رسم منحنی قرائت گیج-جذر زمان است. مطابق شکل (۹-۱)، قسمتی از ابتدای منحنی را تقریباً خط مستقیم است با خط کش از دو طرف ادامه دهید، محل تقاطع این خط با محور زمان را به دست آورید و به این زمان مقدار ۱۵٪ اضافه کنید و از نقطه جدید روی محور زمان ها به d_0 وصل کنید. محل تقاطع این خط با منحنی، نقطه تحکیم ۹۰٪ است. d_{90} و t_{90} را به دست آورید. مقدار d_{100} را از رابطه زیر بدست آورید:

$$d_{100} = d_0 - \frac{10}{9}\left(d_0 - d_{90}\right) \qquad (۱۰-۱۰)$$

ضریب تحکیم به این روش از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_v = \frac{0.848 H^2}{t_{90}} \qquad (۱۱-۱۰)$$

شیب قسمت دوم نمودار نشست لگاریتم زمان نشان دهنده خزش و تحکیم ثانویه است. برای یک خاک این شیب تقریباً ثابت است. این شیب از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_\alpha = \frac{\Delta H}{\log\frac{t_2}{t_1}} \qquad (۱۳-۱۰)$$

رسم محنی نسبت منافذ–فشار: با توجه به شکل ۹–۲، می توان نسبت منافذ اولیه e_i را از رابطه زیر به دست آورد:

$$e_i = \frac{H_v}{H_s} \qquad (۱۴-۱۰)$$

$$e = e_i - \Delta e \,, \Delta e = \frac{\Delta H}{H_s} \qquad (۱۴-۱۰)$$

ΔH همان است که از قرائت سنج ها خوانده می شود.

در صورتی که منحنی e-p رسم شود، می توان ضریب تراکم پذیری a_v را ار رابطه زیر به دست آورد:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \qquad (۱۵-۱۰)$$

ضریب تغییر حجم m_v نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_o} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta p} = \frac{1}{E_{oed}} \qquad (۱۶-۱۰)$$

دیده می شود که ضریب تغییر حجم m_v معادل عکس مدول الاستیسیته تحکیم (مدول اودومتری E_{oed}) است. در این مرحله می توان ضریب نفوذپذیری خاک را از رابطه زیر به دست آورد:

$$k = \frac{C_v \gamma_\omega G_s}{1+e_o} \qquad (۱۷-۱۰)$$

در صورتی که منحنی e-log p رسم شود، شاخص فشردگی C_C از رابطه به دست می آید:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log\frac{p_2}{p_1}} \qquad (۱۸-۱۰)$$

و درصورتی که شیب قسمت باربرداری محاسبه شود، شاخص تورم C_s عبارت خواهد بود از:

$$C_s = \frac{\Delta e_s}{\log\frac{p_2}{p_1}} \qquad (۱۹-۱۰)$$

شیب بخش بارگذلری مجدد، اندیس تراکم مجدد است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_r = \frac{\Delta e_r}{\log\frac{p_2}{p_1}} \qquad (۲۰-۱۰)$$

۱۱- آزمایش برش مستقیم (AASHTO T: 236-90, ASTM D: 3080-90)

۱۱-۱- مقدمه

در آزمایش برش مستقیم مقاومت برشی یک آزمونه از خاک مورد نظر بر روی یک صفحه مشخص گسیختگی تعیین می شود. معمولا در این آزمایش برای تعیین اثر تنش عمودی در صفحه گسیختگی بر مقاومت خاک و تعیین پوش گسیختگی (در حالت خاص تعیین پارامترهای پوش مور-کولمب) سه آزمونه در فشارهای عمودی متفاوت آزمایش می شوند.
در این آزمایش آزمونه تهیه شده در داخل جعبه برش قرار داده شده و تنش عمودی مورد نظر بر روی آزمونه اعمال می شود. جعبه برش از دو قالب مربع شکل یا دو حلقه فلزی تشکیل شده است که روی یکدیگر قرار دارند. پس از پایان تحکیم آزمونه بر اثر تنش عمودی اعمال شده دو قالب جعبه برش با نرخ جابجایی ثابت نسبت به هم حرکت داده می شوند و در حین حرکت نیروی لازم برای اعمال این جابجایی اندازه گیری می شود.

۱۱-۲- کاربردهای آزمایش برش مستقیم

۱۱-۲-۱- سدسازی

یکی از کاربردهای آزمایش برش مستقیم در طراحی و یا ساخت سدهاست. از این آزمایش برای تعیین مقاومت برشی پی های آبرفتی، مقاومت برشی منابع قرضه مورد استفاده در بخش های مختلف بدنه سد و بررسی لغزش شیروانی های مشرف به مخزن استفاده می شود.

۱۱-۲-۲- حفاری ها

برای احداث مترو، تونل، معادن زیرزمینی و خاکبرداری پی سازه ها، داشتن اطلاعات حاصل از نتایج آزمایش برش مستقیم ضروری است.

۱۱-۲-۳- بررسی پدیده های مخرب در توده های ژئوتکنیکی

از این جمله می توان به زمین لرزه، شکست هیدرولیکی، روان گرایی و .... اشاره کرد.

۱۱-۲-٤- پایداری

بررسی پایداری شیروانی ها، دیوارهای حائل و کلیه سازه های نگهدارنده محیط های ژئوتکنیکی.
از دیگر کاربردهای آزمایش برش مستقیم، تلفیق نتایج آن با نتایج به دست آمده از آزمایش سه محوری است. به علت زیاد بودن هزینه آزمایش سه محوری و مشکلات آن، معمولاً تعداد کمتری از آن انجام می شود و با انجام تعداد بیشتری آزمایش برش مستقیم که ارزانتر است و تلفیق نتایج آن، پارامترهای مورد نیاز به دست می آید.
تعداد آزمایش برش مستقیم، برای دستیابی به نتایج دقیق تر، به موارد زیر بستگی دارد:

- میزان همگن بودن توده مورد بررسی.
- تغییر شرایط محیط مورد بهره برداری(تغییرات تنش در المان های مختلف، تغییرات زهکشی و ....)
- اهمیت سازه.
- مرحله مطالعات (فاز ۱، فاز۲ و ...)

۱۱-۳- روش اعمال بار

در آزمایش برش مستقیم، برای اعمال بار می توان یکی از دو روش زیر را به کار گرفت:

الف) آزمایش کنترل تنش، که در آن نیروی برشی توسط وزنه وارد می شود و مقدار کرنش اندازه گیری می شود.

ب)آزمایش کنترل کرنش، که در این روش میزان تغییر شکل یا کرنش ثابت و مقدار نیرو به وسیله دینام اندازه گرفته می شود.

روش کنترل کرنش دارای مزیت بیشتری است، چرا که سرعت تغییر شکل ایجاد شده در نمونه خاک ثابت است و می توان به وسیله آن در خاک هایی مانند ماسه متراکم به مقاومت برشی باقی مانده که از مقاومت برشی حداکثر کمتر نیز دسترسی پیدا کرد، در حالی که در حالت کنترل تنش فقط مقاومت حداکثر به دست می آید.

۱۱-٤- وسایل آزمایش

الف- جعبه برش: جعبه های برش به شکل مربع یا دایره ای برای آزمایش استفاد می شوند. جعبه برش از فولاد زد زنگ، آلومینیوم یا برنز ساخته می شود. جعبه برش روی یک صفحه افقی به دو قسمت با ضخامت مساوی تقسیم شده است برای مطبق کردن دو قسمت جعبه از پیچ های تنظیم استفاده می شود. برای تنظیم فاصله بین دو نیمه جعبه نیز از پیچ های دیگری استفاده می شود. در سقف و کف جعبه نیز سوراخ هایی برای زهکشی تعبیه شده است.

ب- سنگ های متخلخل: این سنگها برای زهکشی نمونه در بالا و پایین نمونه استفاده می شوند.

پ- دستگاه بارگذاری جهت اعمال نیروی قائم.

ت- دستگاه بارگذاری جهت اعمال نیروی برشی.

ث- حلقه نیرو سنج.

ج- اتاق رطوبت.

چ- کرنش سنج.

ح- گرمخانه.

خ- کرنومتر و وسایل تراکم برای تهیه نمونه دست نخورده.

شکل(۱۱-۱): دستگاه برش مستقیم کوچک و متعلقات

شکل(۱۱-۲): دستگاه برش مستقیم بزرگ

۱۱-۵- اندازه آزمونه ها

الف- مقدار نمونه خاک مورد نظر باید به اندازه ای باشد که بتوان از آن حداقل سه آزمونه یکسان با ابعاد مشخص شده تهیه کرد.

ب- حداقل قطر آزمونه های دایره ای یا حداقل عرض آزمونه های مربعی باید ۲ اینچ (۵۰ میلیمتر) باشد. همچنین حداقل عرض یا قطر آزمونه نباید کمتر از ۱۰برابر حداکثر اندازه دانه های خاک مورد نظر باشد.

پ- حداقل ضخامت اولیه باید ۰/۵ اینچ (۱۲ میلیمتر) باشد. همچنین این مقدار نباید از ٦ برابر حداکثر اندازه دانه های خاک کمتر باشد.

۱۱-٦- آماده کردن آزمونه ها

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

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

۱۱-۷- روش انجام آزمایش

۱۱-۷-۱- خاک های غیر چسبنده

الف- یک ظرف بزرگ پر از ماسه خشک را وزن کنید. مقدار ماسه باید به اندازه ای باشد که برای انجام حداقل سه آزمایش با چگالی یکسان کافی باشد.

ب- جعبه برش را با دقت سوار و در یک وضعیت مناسب، ثابت کنید. بهتر است ابعاد جعبه برش طوری انتخاب شود که حجم جعبه و در نتیجه چگالی نمونه خاک به راحتی قابل محاسبه باشد و مساحت سطح مقطع نمونه A را بدست آورید. اگر نمونه شما شن مرطوب یا اشباع است، سنگ های متخلخل را تا حد امکان اشباع کنید.

پ- نمونه را داخل جعبه برش بریزید، به طوری که حدود ۵ mm روی جعبه خالی باشد و صفحه اعمال بار را تراز کنید تا در یک سطح افقی قرار گیرد. ظرف محتوی نمونه را وزن کنید تا جرم خشک نمونه تعیین شود. ضخامت مشخصی از خاک را به عنوان مرجع در نظر بگیرید و روی محیط جعبه برش با علامت هایی آن را مشخص کنید. اگر نمونه خاک متراکم شده استفاده شده، می توان خاک را با رطوبت و وزن مخصوص مورد نظر در چند لایه داخل جعبه برش کوبید.

ت- بار قائم مناسبی بر نمونه اعمال کنید و عقربه اندازه گیری تغییر شکل های قائم یا LVDT را روی نمونه نصب کنید. توجه کنید که وزن خود صفحه بارگذاری و نیمه بالایی جعبه برش را هم به عنوان بخشی از P_v در نظر بگیرید.

اگر آزمایش از نوع تحکیم یافته است، پس از اعمال بار قائم تازمانی که نشست کاملاً متوقف نشده، صبر کنید و پس از آن که عقربه متوقف شد، آزمایش را انجام دهید. معمولاً برای خاک های غیر چسبنده، این زمان تقریباً بلافاصله بعد از اعمال بار قائم P_v است.

ث- دو قسمت جعبه ی برش را با باز کردن پیچ های نیمه ی بالایی جعبه از هم جدا کنید. فاصله ی بین دو نیمه باید کمی بیشتر از اندازه ی بزرگ ترین دانه ی موجود در نمونه باشد. صفحه ی بارگذاری را با محکم کردن سه پیچ کناری که به همین منظور در اطراف نیمه ی بالایی جعبه تعبیه شده اند، سر جای خود قرار دهید. سپس پیچ های نیمه ی بالایی جعبه ی برش را برگردانید.

وزن این نیمه (نیمه ی بالایی جعبه) و صفحه ی بارگذاری و بار اعمال شده، توسط سطح نمونه تحمل می شود.

ج- کرنش سنج عقربه ای را برای اندازه گیری تغییر شکل های برشی (افقی) نصب کنید.

چ- در صورتی که آزمایش با نمونه ی اشباع انجام می شود، برای اشباع نمونه، جعبه ی برش را از آب پر کنید و مدت زمان مناسبی برای اشباع نمونه اختصاص دهید.

ح- بارگذاری افقی را شروع کنید و مقدار نیروی نشان داده شده روی نیرو سنج عقربه ای و عقربه ی اندازه گیری تغییر شکل های برشی و در صورت نیاز، تغییر شکل های قائم (تغییر حجم نمونه) را در هر مرحله قرائت کنید. اگر آزمایش از نوع کنترل کرنش است، قرائت ها را برای کرنش های ۵و ۱۰و ازآن به بعد هر ۱۰ یا ۲۰ واحد انجام دهید.

سرعت تغییرات کرنش افقی را بین ۰/۵ mm/min تا حداکثر ۲ mm/min در نظر بگیرید. توجه کنید که از سرعت های خیلی بالا در این آزمایش استفاده نشود؛ سرعت آزمایش (سرعت تغییر کرنش) در این آزمایش باید طوری باشد که شکست نمونه در ۳ تا ۵ دقیقه صورت پذیرد.

قرائت ها را ادامه دهید تا جایی که بار برشی به حداکثر مقدار خود برسد. بعد از این مرحله از مقدار بار برشی کاسته می شود. بعد از قرائت بار برشی حداکثر، دو قرائت دیگر کافی است.

خ-اکنون نمونه ی داخل جعبه ی برش را بیرون آورید و مراحل ۱تا ۸ را حداقل برای دو نمونه ی دیگر تکرار کنید. جرم این نمونه ها باید تقریبا برابر جرم نمونه ی اولیه باشد (حداکثر اختلاف جرم قابل قبول،بین ۵ gr تا ۱۰ gr است) و نیز حجم مشابهی اشغال کنند.

در مرحله ی (٤) برای هر آزمایش، بارهای قائم متفاوتی اعمال کنید. پیشنهاد می شود بار قائم را در هر مرحله دو برابر کنید، یعنی از بارهای ٤ kg و ٨ kg و ١٦ kg استفاده کنید. اگر دریافتید که وقتی بار قائم بزرگ تری وارد کرده اید، بار برشی کمتری نسبت به قبل قرائت شده، باید آزمایش را تکرار کنید. زیرا به احتمال زیاد اشتباهی رخ داده است.

۱۱-۷-۲- خاک های چسبنده

الف- سه یا چهار نونه ی هم اندازه، هم وزن و با چگالی تقریبا یکسان آماده کنید. برای بریدن نمونه ها از کاتر مخصوص که دقت زیادی دارد استفاده کنید. دقت کنید که اندازه ی نمونه ها طوری باشد که به راحتی داخل جعبه ی برش جای گیرند. همچنین باید توجه کرد که حداکثر اختلاف وزن قابل قبول برای نمونه ها ۵ gr تا ۱۰ gr باشد؛ در غیر این صورت نمونه باید کنار گذاشته شود.

اگر خاک پیش تحکیم یافته باشد، باید ٦ نمونه آماده کنید. سعی شود نمونه ها در هنگام ساخت نمونه و آماده کردن دستگاه ثابت بماند و همچنین دقت بیشتر در انجام جزئیات آزمایش ضروری است.

ب- پیچ های نیمه ی بالایی جعبه ی برش را شل و دوقسمت جعبه را روی هم سوار کنید. اگر آزمایش را برای یک خاک خشک انجام نمی دهید، ابتدا مطمئن شوید که سنگ های متخلخل کاملا اشباع شده اند. ابعاد جعبه ی برش را برای به دست آوردن مساحت A اندازه گیری کنید.

پ- نمونه ی خاک را با دقت داخل جعبه ی برش جای دهید. نمونه باید به راحتی داخل جعبه ی برش قرار گیرد و کاملا به اندازه ی فضای داخل جعبه باشد و حدود ۵ mm از بالای جعبه خالی باشد. پس از گذاشتن نمونه داخل جعبه، صفحه ی بارگذاری را روی آن قرار دهید، بار قائم P_v را اعمال کنید و عقربه ی اندازه گیری تغییر شکل های قائم را هم نصب کنید.

اگر آزمایش از نوع تحکیم یافته باشد، برای فهمیدن این که تحکیم به طور کامل انجام شده یا نه، باید تغییر شکل های قائم را پس از اعمال بار P_v اندازه گیری کرد.

ت- با دقت دو نیمه ی جعبه ی برش را با استفاده از پیچ های محکم کننده از هم جدا کنید، به طوری که فاصله ی بین دو نیمه کمی بیشتر از بزرگترین دانه ی خاک نمونه باشد. دستگاه اعمال بار را با استفاده از پیچ هایی که به همین منظور تعبیه شده اند، سر جای خود محکم کنید و پیچ ها را ببندید. دقت کنید که بار قائم وارد شده بر نمونه برابر بار اعمال شده به اضافه وزن صفحه ی بارگذاری و نیمه ی بالایی جعبه ی برش است.

ث- عقربه ی اندازه گیری تغییر شکل های برشی را نصب کنید و صفر عقربه های اندازه گیری تغییر شکل های قائم (در صورت نیاز)و افقی را تنظیم کنید. برای آزمایش با نمونه های اشباع، جعبه ی برش را از آب پر کنید و مدت زمان قابل قبولی را برای کاملا اشباع شدن نمونه در نظر بگیرید.

ج- بارگذاری افقی (برشی) را آغاز و مقادیر بار افقی، تغییر شکل های برشی و تغییر شکل های قائم (تغییر حجم نمونه) را قرائت کنید. اگر روش آزمایش بر اساس کنترل کرنش باشد، قرائت های تغییر شکل های افقی را باید در کرنش های ۵ و ۱۰ و از آن به بعد در هر ۱۰ یا ۲۰ واحد تعیین شده روی عقربه انجام داد.

سرعت تغییر کرنش را در حدود ۰/۵ mm/min تا ۲ mm/min انتخاب کنید؛ سرعت آزمایش نباید بیش از این حد باشد و باید طوری انتخاب شود؛ که گسیختگی نمونه در ۵ تا ۱۰ دقیقه انجام گیرد، مگر این که آزمایش از نوع CD باشد.

۱۱-۸- محاسبه سرعت اعمال تغییر شکل نسبی

با توجه به اینکه از این آزمایش بدست آوردن مقاومت تحکیم یافته زهکشی شده آزمونه ها است سرعت بارگذاری برشی باید به گونه ای انتخاب شود که در موقع گسیختگی فشار آب حفره ای اضافی در آزمونه وجود نداشته باشد از رابطه زیر می توان برای تعیین حداقل زمان لازم برای آزمایش (از ابتدای بارگذاری تا زمان گسیختگی) استفاده کرد:

$$t_f = 5 \cdot t_{50} \qquad (۱۱-۱)$$

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

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

در صورتی که زمان ۹۰ درصد تحکیم آزمونه در دسترس باشد می توان t_{50} از رابطه زیر تخمین زد.

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4.25} \qquad (۲-۱۱)$$

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 باشند، t_f را می توان ۶۰ دقیقه انتخاب کرد.

سرعت اعمال تغییر شکل نسبی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$d_r = \frac{d_f}{t_f} \qquad (۳-۱۱)$$

d_r: سرعت اعمال تغییر شکل نسبی(اینچ بر دقیقه یا میلیمتر بر دقیقه)

d_f: تغییر شکل نسبی آزمونه در زمان گسیختگی.

t_f:زمان کل آزمایش.

d_r به عوامل متعددی از جمله تاریخچه بارگذاری بر روی نمونه و نوع مصالح بستگی دارد به عنوان حدس اولیه برای خاک های ریزدانه عادی تحکیم یافته یا با تحکیم یافتگی کم می توان d_f را ۰/۵ اینچ (۱۲ میلیمتر) در نظر گرفت. برای شرایط دیگرd_f=۰/۲in (۵ میلیمتر) مناسب خواهد بود.

۱۱-۹- محاسبات

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

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad (۴-۱۱)$$

τ: تنش برشی اسمی.

F: نیروی برشی اندازه گیری شده.

A: سطح اولیه نمونه.

ب- تنش قائم بر روی نمونه محاسبه گردد.

$$\sigma = \frac{N}{A} \qquad (۵-۱۱)$$

σ: تنش قائم وارد بر نمونه.

N: نیروی قائم اعمالی بر روی نمونه.

پ- نرخ واقعی اعمال تغییر شکل به نمونه محاسبه گردد.

$$d_r = \frac{d_n}{t_e} \qquad (۶-۱۱)$$

d_r: نرخ اعمال تغییر شکل

d_n: تغییر شکل نسبی نمونه.

t_e: زمان آزمایش.

ت- مشخصات زیر محاسبه گردد.

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

ث- نمودار تغییر مکان نسبی-تنش برشی اسمی را برای نمونه رسم کنید.

ج- مقادیر تنش برشی اسمی بیشینه یا تنش برشی اسمی گسیختگی را برای هر کدام از نمونه پیدا گردد.

چ- مقادیر تنش برشی گسیختگی در مقابل تنش قائم را برای همه نمونه ها 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 بدست آورید.

ح- نمودار تغییر شکل قائم نمونه در مقابل تغییر مکان نسبی افقی را برای نمونه ها رسم کنید. این منحنی تغییرات حجم نمونه را در ازای تغییر شکل های برشی نشان می دهد.

۱۲- آزمایش سه محوری (AASHTO T: 234-90, ASTM D: 2850-87)

۱۲-۱- مقدمه

در این آزمایش ، فشار همه جانبه نماینده ی فشار جانبی خاک در محل واقعی است و معمولا معادل مقدار تقریبی$K_0\gamma Z$ انتخاب می شود که K_0 ضریب فشار خاک در حالت سکون، γ وزن مخصوص المان خاک و Z عمق المان در این آزمایش است. در این آزمایش نمونه ای از خاک با مشخصات استاندارد برداشته و یک غشای ظریف و نازک دور آن کشیده می شود و سپس در داخل محفظه ی استوانه شکلی از جنس پلاستیک یا شیشیه که معمولا مملو از آب یا گلیسیرین است، قرار می گیرد (البته گاهی نیز از هوا استفاده می شود).برای آن که نمونه تحت برش گسیخته شود، یک تنش محوری از طریق یک بازوی قائم برای اعمال بار نصب شده،به نمونه اعمال می شود. این تنش، تنش محوری اضافی نام دارد. به طور کلی آزمایش ها به دو صورت انجام می گیرد:

الف-کنترل تنش(با اضافه کردن وزنه هایی با گام مساوی تا لحظه ی گسیختگی نمونه)

ب- کنترل کرنش(اعمال تغییر شکل محوری با سرعت ثابت به وسیله ی یک پرس هیدرولیک تا لحظه ی گسیختگی نمونه).

در این روش مقدار بار محوری وارده ی مربوط به یک تغییر شکل محوری مشخص با یک حلقه یا سلول اندازه گیری نیرو که روی بازوی دستگاه نصب شده است، اندازه گیری می شود.

۱۲-۲- انتخاب آزمایش سه محوری برای انواع مختلف خاک

نوع آزمایش سه محوری که باید انجام شود، بستگی به نوع خاک و چگونگی مسئله ی مورد مطالعه دارد.

در آزمایشگاه های مکانیک خاک معمولا آزمایش های زیر صورت می گیرند:

آزمایش CD روی خاک های دانه ای (ماسه ها) و برای بررسی رفتار دراز مدت خاک های چسبنده، آزمایش های UU و CU در شرایط اشباع همراه با اندازه گیری فشار منفذی برای بررسی رفتار خاک های ریز دانه در شرایط زهکشی نشده و آزمایش UU در شرایط اشباع برای بررسی رفتار خاکریز حین ساخت استفاده می شود.

آزمایش های سه محوری بسته به این که شیر خروج جریان منفذی باز یا بسته باشد، به سه صورت انجام می گیرد:

۱-آزمایش زهکشی نشده که آزمایش تحکیم نیافته ی زهکشی نشده (و به اختصار) U، UU و Q هم نامیده می شود.

این آزمایش در شرایطی انجام می شود که شیر زهکشی در تمام مراحل بسته است و آزمایش بلافاصله بعد از نصب سلول فشار آغاز می شود. برای خاک های دانه ای نرم اگر درصد اشباع $S\neq ۱۰۰٪$ باشد، تفاوت اندکی بین باز و بسته بودن شیر وجود دارد. این آزمایش برای خاک های غیر چسبنده با درجه ی اشباع $S=۱۰۰٪$ قابل استفاده نیست.

۲- آزمایش تحکیم یافته ی زهکشی نشده که CU، R یا آزمایش سریع تحکیم یافته هم نامیده می شود. در این آزمایش بعد از این که نمونه تحت فشار محفظه (σ_3) تحکیم شد، بار محوری در شرایط زهکشی نشده اعمال می شود. برای برخی آزمایش ها وسایلی برای نشان دادن توقف تغییرات حجم نمونه (متوقف شدن جریان آب منفذی) و نشان دادن پایان عمل تحکیم وجود دارد، زیرا اصولا تحکیم، خصوصا برای خاک های رسی، زمان قابل توجهی می برد. به علاوه تکنیک هایی برای افزایش سرعت زهکشی مانند استفاده از سنگ های متخلخل یا استفاده از کاغذ صافی به کار برده می شوند. وقتی تحکیم

پایان یافت، شیر زهکشی بسته می شود و تنش محوری اضافی اعمال می شود تا نمونه گسیخته شود. قسمت آخر آزمایش مانند آزمایش تحکیم نشده ی زهکشی نشده است.

۳- آزمایش تحکیم یافته ی زهکشی شده که اختصاراً CD و S نیز نامیده می شود. در این آزمایش در مرحله ی اعمال تنش همه جانبه و تنش محوری اضافی، شیرهای زهکشی باز هستند. درمرحله ی اول آزمایش رفتار نمونه برای بررسی اتمام تحکیم بررسی می شوند. تنش محوری اضافی باید با سرعت بسیار کم اعمال شود تا فشار آب منفذی در طول شکست به وجود نیاید یا آن قدر کوچک باشد که در پارامترهای خاک تاثیر نگذارد.

به علت حساسیت بیش از حد خاک و تاثیرپذیری زیاد پارامترهای خاک از میزان دست خوردگی و نوع آن، آزمایش های سه محوری طبقه بندی های خاصی دارند و در کلاس های مختلف انجام می شوند. به عنوان مثال آزمایش های CD، CU، UU برای خاک های چسبنده و غیر چسبنده، خاک های عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته متفاوت است. همچنین آزمایش ها را می توان در شرایطی با اندازه گیری فشار آب منفذی و بدون اندازه گیری فشار آب منفذی انجام داد.

معیار اشباع بودن نمونه، پارامتر فشار آب منفذی اسکمپتون، $B = \frac{\Delta u_c}{\Delta \sigma_3}$ است. در همه ی موارد اساس کار یکسان است، یعنی نمونه ابتدا بر اثر فشار سیال داخل محفظه تحت یک فشار محیطی همه جانبه (σ_3) قرار می گیرد. بسته به نوع آزمایش ممکن است اجازه ی تحکیم و زایل شدن فشار آب منفذی به نمونه داده شود. بر اثر این فشار، فشار آب منفذی نمونه به مقدار U_c افزایش می یابد که اثر آن را با پارامتر بدون بعد $B = \frac{\Delta u_c}{\Delta \sigma_3}$ نشان می دهند (B، پارامتر فشار آب منفذی اسکمپتون است). در خاک های اشباع، B=1 است. بعد از آن که نمونه تحکیم شد، در آزمایش های CU و CD تنش محوری اضافی $\Delta\sigma_d$ روی نمونه اعمال می شود. در این مرحله هم بسته به نوع آزمایش ، سرعت بارگذاری متفاوت است و شیر زهکشی هم می تواند باز یا بسته باشد.

۱۲-۳- وسایل آزمایش

الف- محفظه ی فشار.

ب- وسیله ی اعمال فشار با اعمال بارگذاری قائم به صورت کنترل کرنش.

شکل(۱۲-۱): محفظه ی فشار و وسیله ی اعمال فشار

پ- نمونه ی اصلاح کن.

ت- اره ی سیمی.

ث- منبع ایجاد خلاء.

ج- قالب استوانه ای برای قرار دادن غشای لاستیکی روی نمونه ی خاک.

شکل(۱۲-۲): منبع ایجاد خلاء و قالب استوانه ای

چ- کولیس.

ح- ظرف تبخیر.

خ- غشای لاستیکی.

د- گرمکن.

ذ- ورقه های کاغذ صافی در زیر و روی نمونه (بین نمونه ی خاک و سنگ های متخلخل) برای جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون سنگ متخلخل و همچنین در اطراف نمونه برای تسهیل زهکشی جانبی.

ر- ترازو با دقت ۰/۱ گرم.

ز- بورت برای اندازه گیری تغییر حجم.

شکل(۱۲-۳): بورت برای اندازه گیری تغییر حجم

ژ- یک یا دو حلقه ی لاستیکی(کش) در بالای نمونه در شیار مخصوص کلاهک فوقانی و درپایین نمونه در شیار مخصوص پایه برای جلوگیری از نفوذ آب به درون نمونه.

س- دستگاه کمپرسور مربوط به فشار هیدرواستاتیک جانبی.

شکل(۱۲-٤): دستگاه کمپرسور

ش- دستگاه تعیین فشار آب درون خاک.

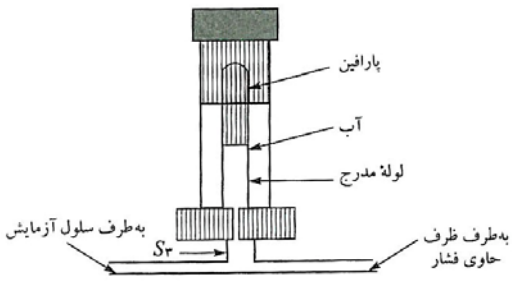
ص- یک یا دو صفحه ی فلزی که در مواقعی که زهکشی لازم نیست، جانشین سنگ های متخلخل می شود.

ض- زمان سنج، قوطی های مخصوص برای تعیین درصد رطوبت و ...

ط- وسیله ی اعمال فشار با کنترل کرنش (پرس): این وسیله شامل یک قاب بارگذاری است که در قسمت پایین آن،یک پایه به وسیله ی موتوری که سرعت آن قابل کنترل است، به طرف بالا یا پایین می رود. بین این پایه و اتکای فوقانی، سلول فشار و فشارسنج برای اندازه گیری تغییرات فشار در حین آزمایش قرار دارد. قاب بارگذاری با ظرفیت های مختلف، معمولا بین ۱۰ تا ۵۰ تن که برای آزمایش های خاک مورد استفاده است، ساخته می شود.

۱۲-٤- بورت برای اندازه گیری تغییر حجم

اندازه گیری تغییر حجم آب درون نمونه به وسیله ی بورت صورت می گیرد، بدین طریق که با تغییر حجم نمونه ی خاک، مقداری از آب (از شیر S_3) به بورت وارد یا از آن خارج می شود. این وارد و خارج شدن، سطح پارافین در لوله ی وسطی را تغییر می دهد که بدین ترتیب حجم ΔV معلوم خواهد شد. معمولا شیر S_3 را به قسمت تحتانی یا فوقانی نمونه ی خاک وصل می کنند. پس از آن که نمونه ی خاک کاملا اشباع شد، تغییر حجم نمونه ی خاک باعث خارج شدن (یا وارد شدن) مقداری آب از (یا به) درون نمونه ی خاک خواهد شد که نشان دهنده ی تغییر حجم نمونه ی خاک است.



شکل(۱۲-۵): بورت اندازه گیری تغییر حجم

۱۲-۵- دستگاه مربوط به فشار هیدرواستاتیک جانبی

این دستگاه معمولا در سه نوع ساخته می شود که نوع جیوه ای آن در اکثر دستگاه های سه محوری به کار می رود. این دستگاه دارای دو مخزن جیوه ای است که یکی از آن ها در سطحی ثابت و دیگری آویزان است و مقدار فشار منتقل شده به وسیله ی این دستگاه از روی اختلاف ارتفاع این دو مخزن به دست می آید و مقدار آن به وسیله ی فشارسنج عقربه ای خوانده می شود. برای خواندن دقیق، یک فشارسنج U شکل جیوه ای هم به سیستم اضافه می شود که فشارهای کوچک را به خوبی تعیین می کند (البته در دستگاه های سه محوری پیشرفته،این فشار به وسیله یک سیستم هیدرولیکی قابل کنترل اعمال می شود).

یک پیستون هیدرولیکی برای خارج کردن هوای درون لوله ها وجود دارد. این پیستون همچنین برای میزان کردن مبداء (صفر) فشارسنج عقربه ای و نیز برای تعیین سطح جیوه درمخزن آویزان به کار برده می شود. فشار جانبی که به وسیله ی این مخازن جیوه ایجاد می شود، بستگی به اختلاف سطح دو مخزن دارد. برای آن که فشار بزرگتری ایجاد شود، باید دو یا چند مخزن را به طور سری به هم وصل کرد که در این صورت می توان فشارهای معادل ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع را به وجود آورد.

۱۲-٦- دستگاه تعیین فشار آب درون خاک

این دستگاه از قسمت های زیر تشکیل شده است:

*بلوک شفاف که در آن لوله U شکل تا نیمه از جیوه پر شده است و یک طرف آن به انتهای تحتانی نمونه ی خاک وصل می شود. این قسمت قطر نازکی برابر ۱ میلی متر است.

*شاخص متحرک برای تعیین سطح جیوه در لوله.

تذکر۱: هنگام آزمایش باید همه ی مجرای زهکشی و اندازه گیری فشار از آب پر شود و به خصوص باید دقت کرد که در قسمتی از مجرای زهکشی که بین نمونه ی خاک و نمایانگر فشار قرار گرفته است، هیچ حباب هوایی وجود نداشته باشد.

۱۲-۷- قالب استوانه ای برای قرار دادن غشا روی نمونه ی خاک

۱۲-۸- قالب غشای لاستیکی برای خاک های چسبنده

قطر استوانه ی غشاگیری برای این نوع خاک ها چند میلی متر بیشتر از قطر نمونه ی مورد آزمایش است (حداقل این اختلاف قطر ٤ میلی متر است) و به وسیله ی مکش در پشت غشای لاستیکی نمونه در داخل این استوانه قرار می گیرد، بدین ترتیب که با مکش هوای محبوس بین غشا و قالب، غشا کاملا به قالب می چسبد و نمونه را می توان به سادگی داخل آن قرار داد.

۱۲-۹- قالب غشای لاستیکی برای خاک های دانه ای خشک

قالب استوانه ای که برای قرار دادن غشای لاستیکی به کار می رود، قطری بیشتر از قطر نمونه دارد. این اختلاف قطر تقریبا دو برابر ضخامت غشای لاستیکی است. این قالب می تواند دو یا سه تکه ای باشد. این استوانه در قسمت پایین دارای یک گلوگاه است که بدین ترتیب عمل قرار دادن حلقه های لاستیکی (کش ها) روی پایه ی محفظه امکان پذیر است.

مانند حالت قبل، غشای لاستیکی در داخل قالب استوانه ای قرار می گیرد و بعد از عمل مکش، نمونه وارد غشا می شود.

۱۲-۱۰- قالب غشا برای خاک های دانه ای اشباع شده

برای این خاک می توان قالب استوانه ای حالت قبل را به کار برد، همچنین می توان از قالبی استوانه ای که به موازات سه مولد بریده شده است، استفاده کرد. در این حالت فشار آب نمونه، غشای لاستیکی را به دیواره ی داخلی قالب می چسباند، بنابراین ایجاد مکش بین غشای لاستیکی و دیواره ی داخلی قالب ضروری نیست.

۱۲-۱۱- شرایط و خصوصیات نمونه

هرچه شرایط نمونه بیشتر شبیه شرایط خاک در محل باشد، آزمایش نتایج دقیق تری به دست خواهد آمد. در صورتی که نمونه ی خاک نماینده ی خاک پی یک سازه باشد، تهیه ی یک نمونه ی دست نخورده (در صورت امکان) بسیار مفید است، لیکن در صورتی که نماینده ی خاکریز باشد، باید یک نمونه ی دست نخورده با همان شرایط تراکم محلی را آزمایش کرد.

الف- تهیه ی نمونه ی دست نخورده از خاک های دانه ای بسیار مشکل است و اغلب نمونه ای دست نخورده با همان چگالی نسبی در محل تهیه می شود.

ب- در خاک های چسبنده ی ریزدانه نمونه باید عینا دست نخورده باشد یا حداقل دست نخوردگی را داشته باشد (خصوصا اگر خاک حساس باشد).

پ- ابعادنمونه ۷۱/۱ mm (قطر) ✕ ۱۶/۵ mm (ارتفاع) یا ۳۵/۶ mm (قطر) × ۸۸/۹ mm (ارتفاع) باشد.

ت- در استفاده های آموزشی می توان از نمونه ی باز سازی شده در قالب تراکم استفاده کرد.

ث- نمونه های تهیه شده با نمونه گیر جدار نازک (شلبی) می تواند به وسیله ی یک نمونه اصلاح کن به ابعاد دلخواه درآید.

ج- برای اندازه گیری ابعاد نمونه طول را ٤ و هر بار با ۹۰ درجه تغییر زاویه اندازه می گیریم، قطر را هم در سه منطقه بالا، وسط و پایین و در هر منطقه ٤ بار اندازه می گیریم. سپس طول و قطر متوسط را به دست می آوریم و در محاسبات به کار می بریم.

چ- نسبت طول به قطر نمونه باید بین ۲ و ۳ باشد، زیرا اگر ارتفاع نمونه کمتر از ۲D باشد، اجازه ی تغییر شکل به نمونه نمی دهد و اصطکاک بین سطح نمونه و استوانه باعث برش نمونه می گردد. اگر L>۳D باشد، نمونه کمانش خواهد کرد و گسیختگی به جای مکانیکی، هندسی خواهد بود. بنابراین بهترین اندازه $\frac{L}{D} \approx ۲/۵$ است.

ح- هنگام خارج کردن نمونه ی خاک از لوله ی حفاری، اگر خاک چسبنده است یا قابلیت تراکم زیاد دارد، نباید آن را با جک زدن خارج کرد و در صورت اجبار، نیرو در همان جهتی که نمونه به استوانه وارد شده، بر نمونه ی داخل استوانه اعمال شود.

خ- پس از خارج شدن نمونه، سریعا بریده می شود تا خشک نشود.

د- قسمت های بالا و پایین نمونه ی خاک، دست خورده است. در صورت تمایل به استفاده از نمونه ی دست نخورده، بالا و پایین نمونه کنار گذاشته می شود.

ذ- اگرناهمگنی خاک زیاد باشد، آزمایش روی خاک صحیح نخواهد بود.

۱۲-۱۲- اشباع نمونه

به دست آوردن پارامترهای برشی خاک به وسیله ی آزمایش سه محوری هم در حالت اشباع کامل و هم در شرایط نیمه اشباع خاک امکان پذیر است و آزمایش سه محوری روی خاک های غیر اشباع فقط برای اندازه گیری تنش های کل است. به علاوه

ممکن است در زمان بهره برداری، خاک اشباع شود. اشباع کردن نمونه های خاک به روش های مختلف انجام می گیرد که در این جا به اختصار به سه روش که برای اشباع نمونه ی سه محوری به کار می رود، اشاره خواهیم کرد.

۱۲-۱۳- استفاده از پس فشار(Back Pressure)

در حالی که شیر زهکشی مرتبط با بالای نمونه باز است تا هواخارج شود، آب را با فشار مشخصی از انتهای نمونه وارد می کنیم.

۱۲-۱٤- استفاده از پمپ خلاء

برای خارج کردن هوای داخل نمونه به وسیله ی مکش البته هم زمان می توان از پس فشار هم استفاده کرد.

۱۲-۱۵- استفاده از گاز co_2

پیش از استفاده از دو روش بالا، از گاز CO_2 استفاده می شود. در این حالت گاز CO_2 جایگزین هوای حفره ای می شود و در مراحل بعد آب به راحتی جایگزین CO_2 می گردد. پس از مراحل فوق در شرایطی که شیر زهکشی بالای نمونه بسته است، پس فشار از پایین نمونه وارد می شود. این امر موجب می شود تا هوای محبوس داخل نمونه در آب حل شود و به اشباع شدن نمونه کمک کند.

۱۲-۱٦- تحکیم نمونه ی خاک

در دو آزمایش CD و CU لازم است قبل از این که نمونه تحت تنش محوری اضافی $\Delta\sigma_d$ گسیخته شود، تحکیم گردد. بدین منظور بلافاصله بعد از برقراری فشار σ_3 شیرهای زهکشی را باز می کنیم و تغییر سطح آب در بورت های متصل به آن ها را در زمان های استاندارد شده توسط ASTM اندازه گیری می کنیم و بر اساس این داده ها می توان نمودارهای (ΔV_s -log t)، (ΔV_s - $\sqrt{t}$) (ΔV_s تغییرات حجم نمونه است) را رسم کرد.

۱۲-۱۷- اندازه ی آزمونه ها

آزمونه ها باید استوانه ای با نسبت ارتفاع به قطر ۲ تا ۲/۵ و با حداقل قطر ۳/۳ سانتیمتر (۱/۳ اینچ) باشد. حداکثر اندازه دانه موجود در آزمونه باید حداکثر ۱/٦ قطر آزمونه باشد. در صورتی که بعد از انجام آزمایش بر روی آزمونه های دست نخورده مشخص شود که دانه های با اندازه بزرگ در آزمونه وجود داشته این مسئله حتما باید به همراه گزارش نتایج اعلام شود.

۱۱-۱۸- تهیه آزمونه ها

آزمونه های دست نخورده یا بازسازی شده همانند آزمونه های آزکایش تک محوری تهیه می شوند.

۱۱-۱۹- روش انجام آزمایش

الف- برای کشیدن غشا بر روی آزمونه، غشاء را داخل قالب استوانه ای قرار دهید و طرفین آن را روی بالا و پایین قالب بکشید. به وسیله ی مکش درپشت غشاء لاستیکی این غشاء به سطح داخلی استوانه می چسبد. قطر استوانه غشاء گیری چند

میلیمتر بیشتر از قطر آزمونه ها می باشد. آزمونه را داخل قالب استوانه ای قرار دهید. سنگ های متخلخل و سرپوش آزمونه را قرار داده و غشاء را به وسیله حلقه های لاستیکی به آنها متصل کنید.

ب- آزمونه را در داخل سلول سه محوری قرار دهید. پیستون بارگذاری محوری را روی سرپوش آزمونه قرار دهید. با چندین بار آزمایش مطمئن شوید که پیستون بارگذاری کاملا و بدون خروج از مرکز بر روی سرپوش آزمونه قرار می گیرد. بعد از اطمینان از تماس پیستون با سرپوش آزمونه عقربه تغییر شکل را قرائت کنید. در این حالت تنش اعمال شده بر روی آزمونه نباید بیشتر از ۰/۵ درصد مقتومت نهاییی آزمونه باشد. در صورتی که وزن پیستون باعث بوجود آمدن تنشی بیش از مقدار یاد شده می شود، پیستون را بعد از تماس با سرپوش قفل کنید.

پ- 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 آزمونه قبل از ادامه آزمایش حدود ۱۰ دقیقه صبر کنید.

ت- 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 آزمونه قراردارد‌شروع کنید و قبل از اینکه پیستون با سرپوش تماس پیدا کند می توان به یکی از دو صورت زیر عمل کرد:

الف-تاثیر اولیه اصطکاک بین پیستون و جداره و نیروی وارده ناشی از فشار سلول را اندازه گیری کرده و قرائت های بعدی نیروی محوری را بوسیله آن تصحیح کنید.

ب-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 آزمونه اتصال پیدا کرد قرائت اولیه وسیله اندازه گیری تغییر شکل قائم را انجام دهید.

پ- بارگذازی را به صورت کرنش محوری با نرخ ثابت به آزمونه اعمال کنید. نرخ کرنش محوری برای مصالح شکل پذیر حدود ۱ درصد بر دقیقه و برای آزمونه های ترد ۰/۳ درصد بر دقیقه خواهد بود. آزمونه هایی که در کرنش محوری در حدود ۳ تا ٦ درصد گسیخته می شوند ترد در نظر گرفته می شوند. با این سرعت بارگذاری زمان آزمایش حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه خواهد بود. بارگذاری را تا کرنش محوری ۱۵ درصد یا زمانی که تنش محوری اضافی تا ۲۰ درصد مقدار بیشینه کاهش یابد یا کرنش محوری به میزان ۲۰ درصد از میزان کرنش در تنش تفاضلی بیشینه بیشتر شود ادامه دهید.

ت-میزان بار و تغییر شکل را در کرنش های حدود ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ درصد و تا رسیدن به کرنش ۳ درصد با گام های ۰/۵ درصد و پس از آن با گام های ۱ درصد قرائت کنید.

ث- بعد از اتمام آزمایش آزمونه را از دستگاه خارج کرده و درصد رطوبت آن را اندازه گیری کنید.

ج- شکل آزمونه را در پایان آزمایش رسم کنید یا از آن عکس تهیه کنید- زاویه سطح گسیختگی با محور آزمونه را اندازه گیری کنید.

چ- آزمایش را به تعداد درخواست شده برای تنشهای همه جانبه مورد نظر بر روی آزمونه های جدید تکرار کنید.

۱۱-۲۰- محاسبات

الف- برای قرائت کرنش محوری ϵ محاسبه گردد.

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \qquad (۱۰-۱۲)$$

ΔH: تغییر ارتفاع نمونه

H_0: ارتفاع اولیه نمونه قبل از اعمال بار

ب- مساحت متوسط نمونه در زمان هر قرائت محاسبه گردد.

$$A = \frac{A_0}{(1-\epsilon)} \qquad (۲-۱۲)$$

A_0: مساحت متوسط اولیه نمونه

ϵ: کرنش محوری در قرائت مورد نظر

پ- تنش محوری اضافی برای هر قرائت محاسبه گردد.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} \qquad (۳-۱۲)$$

P: بار وارده بر نمونه (تصحیح شده)

A: مساحت متوسط نمونه

ت- منحنی تنش انحرافی اضافی- کرنش برای نمونه های آزمایش شده رسم گردد. مقاومت نمونه ها و کرنش در زمان گسیختگی را مطابق تعریف ارائه شده تعیین گردد.

ث- دایره مور مربوط به شرایط گسیختگی نمونه را رسم کرده و پوش گسیختگی را بدست آورید.

ج- با استفاده از ابعاد و وزن و درصد رطوبت نمونه درجه اشباع نمونه محاسبه گردد.