

آزمایشگاه مکانیک خاک

مکانیک خاک شاخه‌ای از علوم مهندسی است که به مطالعه خواص خاک و رفتار آن تحت تنش و کرنش در شرایط ایده‌آل می‌پردازد و دانشی است که نام آن با آزمایش و تجربه پیوند خورده است؛ چرا که شناخت خواص مهندسی خاک‌ها غیر از این راه میسر نیست. در مهندسی ژئوتکنیک، طراحی و تحلیل سازه‌های خاکی، مانند سدهای خاکی، دیوارهای حائل، شیروانی‌ها و انواع پی بر پایه‌ی تئوری مکانیک خاک و پارامترهای آزمایشگاهی خاک است.

برای طراحی شالوده‌ای که بار مشخصی از سازه را حمل می‌کند، باید از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های مختلف خاک زیر شالوده مطلع بود. مطالعات ژئوتکنیکی جهت شناسایی وضعیت خاک در یک پروژه به طور کلی شامل دو مرحله عملیات ژئوتکنیک صحرایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. دانشجویان مهندسی عمران در آزمایشگاه مکانیک خاک با هر دو گروه آزمایشات آشنا می‌شوند و بدین وسیله ارتباط مستقیمی با مطالب نظری بحث شده در دروسی نظیر مکانیک خاک، طراحی روسازی راه، پی سازی و ... برقرار نموده و با دید بازتری مبادرت به طراحی می‌نمایند.

برخی از آزمایشات عبارتند از:

تعیین درصد رطوبت خاک

تعیین چگالی بخش جامد خاک

به دست آوردن منحنی دانه بندی خاک به روش الک و هیدرومتری

آزمایش حدود اتربرگ - شامل حد روانی، حد خمیری، و حد انقباض

آزمایش تراکم استاندارد

تعیین دانسیته در محل به روش مخروط ماسه

آزمایش برش مستقیم

آزمایش فشاری محصورنشده

آزمایش تحکیم

آشنایی با آزمایش‌های سه محوری **UU , CD , CU**

آزمایش هم ارز ماسه

تعیین نسبت باربری کالیفرنیا

۱. آزمایش هم ارز (معادل) ماسه مشهور به آزمایش **SE (Sand Equivalent)**:

هدف از آزمایش: بدست آوردن نسبت ماسه به کل خاک که به صورت درصد بیان می‌شود.

وسایل لازم: استوانه مدرج - پیمانانه - سمبه - محلول شستشو.

تئوری آزمایش: به وسیله این آزمایش نسبت درصد خاک به ماسه را تعیین کرد تا نوع کارایی خاک بدست آید. این آزمایش

مخصوص خاکهای درشت دانه می‌باشد که دانه ریز آن کم باشد (از خاک رد شده از الک نمره ۴)

شرح آزمایش:

استوانه مدرج که ارتفاع آن بر حسب اینچ مدرج شده است را آماده کرده و داخل آن محلول شستشو را تا ارتفاع ۴ اینچ پر می‌کنیم (محلول شستشو از کلرو کلسیم، گلسیرین، محلول فرمالین ۴۰٪) سپس پیمانانه را پر از نمونه کرده و آن را داخل استوانه می‌ریزیم، بعد از ریختن خاک به درون استوانه در پوش آنرا گذاشته و آنرا به مدت ۳۰ ثانیه و به تعداد ۹۰ بار تکان می‌دهیم

بعد از تکان دادن آن دیواره استوانه را با محلول شسته و ارتفاع محلول را به ۱۵ اینچ می رسانیم و سپس استوانه را در یک جای آرام قرار داده و بعد ۲۰ دقیقه آنرا اندازه گیری می کنیم. اندازه گیری به دو روش انجام خواهد گرفت ۱- به روش چشمی ۲- روش دستگاهی. روش چشمی: در این روش ارتفاع لای را طبق اندازه های درج شده روی استوانه نه قرائت می کنند. روش دستگاهی: در این روش ابتدا قبل از آزمایش ارتفاع سمبه را داخل استوانه ثبت کرده و سپس آنرا بعد ته نشینی نمونه داخل استوانه نه قرار داده و عدد بدست آمده را از عدد قبلی کم می کنیم و در فرمول قرار می دهیم.

۲. آزمایش هیدرو متری:

هدف از آزمایش: دانه بندی خاک های رد شده از الک نمره ۲۰۰ و (خاکهای ریز دانه) تکمیل منحنی دانه بندی. **وسایل لازم:** آبچکان، استوانه مدرج، آب، ۵۰ گرم خاک رد شده از الک نمره ۲۰۰، لیوان فلزی، همزن شیشه ای، همزن برقی. **تئوری آزمایش:** بدلیل اینکه ذرات خاک ریز هستند (قطر دانه ها از ۷۵ میلی متر کمتر هستند نمی توان این آزمایش را مانند آزمایشات دیگر تحت همان شرایط انجام دهیم و برای دانه بندی آن از آب استفاده می کنیم. **توضیحاتی در رابطه با آزمایش:** خاک مورد آزمایش از نظر جنس به دو دسته تقسیم بندی می شود:

- آوارهای ریز سنگها و کانیها
- کانی های رسی

ویژگی کانی های رسی را می توان به دو صورت بیان کرد یکی همیشه ریز دانه هستند و دیگری آنکه حالت ورقه ورقه دارند. نمونه هایی از کانی های رسی از قبیل ایلیت، مونت موریلونیت، کائولونیت را می توان نام برد. *لایه هایی که کانی های رسی را تشکیل می دهند دو نوع هستند:

لایه های سیلیسی: چهار وجهی های سیلیسی (تتراندر یعنی اکسیژن در چهار وجهش قرار دارد).

لایه های آلومینا: هشت وجهی های هیدروکسید آلومینیم (اکتاندر) یعنی در وسط آلومینیم قرار می گیرد و در گوشه ها هیدروکسید.

شرح آزمایش:

به مقدار 125 CC محلول پراکنده ساز را داخل لیوان ریخته و ۵۰ گرم از خاک رد شده از الک نمره ۲۰۰ (خاک ریز دانه) را روی آن ریخته و مخلوط می کنیم و آنرا به مدت ۱۰ دقیقه با هم زن شیشه ای به هم می زنیم تا تمامی ذرات با آب مخلوط شوند و سپس آنرا با استفاده از همزن برقی مخلوط کرده و آنرا داخل استوانه مدرج می ریزیم و ارتفاع آب داخل آنرا به ۸۰۰ رسانده و کف دست را روی استوانه گذاشته و آنرا ۶۰ بار تکان می دهیم تا خوب با آب مخلوط گردد (یکی از دلایلی که نفوذ پذیری خاک را بالا برده پیوند الکتریکی می باشد که باعث می شود آب خوب با خاک مخلوط نشود و علت آن قطبی بودن مولکول آب است) و سپس ارتفاع آب داخل آنرا به ۱۰۰۰ رسانده و استوانه را در جای آرامی قرار داده تا نتایج آزمایش را ثبت کنیم.

- عواملی که در سقوط ذرات موثرند عبارتند از:
- قطر دانه ها با سرعت رابطه مستقیم دارد.
- اختلاف چگالی آب با ذرات رابطه مستقیم دارد.
- شتاب ثقل زمین با سقوط دانه ها رابطه مستقیم دارد.
- غلظت یا گرانیوی آب رابطه مستقیم دارد (Viscosity)

*تعریف گرانیوی: مقاومت مایعات در برابر فشارهای کششی را گرانیوی گویند.

۳. آزمایش حد روانی:

هدف از آزمایش: به دست آوردن میزان رطوبتی که در آن رطوبت خاک از حالت خمیری خارج شده و به صورت روان در می آید

وسایل لازم: آبچکان ، سینی ، آب ، ۳۰۰ گرم خاک رد شده از الک نمره ۴۰ ، کاسه گراند ، گونومتر.

تئوری آزمایش : برای اینکه بتوانیم حد روانی (حدود اتربرگ) خاک را بدست آوریم و یا نقش آب در رفتار مکانیکی خاک را بدست آوریم از این آزمایش استفاده می کنیم .

شرح آزمایش : این آزمایش برای خاکهایی با مواد ریز دانه صورت می گیرد ، نحوه انجام آزمایش به این صورت است که ۳۰۰ گرم خاک رد شده از الک نمره ۴۰ را در سینی ریخته و به آن به اندازه دلخواه آب می افزاییم و آنرا خوب به هم می زنیم تا کاملاً مخلوط گردد و سپس مقداری از آن را با اسباتول براشته به کاسه دستگاه کاسه گراند می مالیم که ارتفاع نمونه داخل کاسه حدود ۱ سانتی متر می باشد (اگر اسباتول را روی کاسه موازی با سطح افق بکشیم باید نمونه با اسباتول هم سطح باشد) . سپس شیاری را روی نمونه می کشیم و دسته دستگاه را به تعداد ۶۰ بار در ثانیه می چرخانیم ، تا آخرین ضربه ای که در آن نمونه به اندازه حدود ۱ سانتی متر بسته شود را ثبت کنیم .

سپس در هر مرحله مقداری از نمونه ها برداشته و به طور جداگانه در اون می گذاریم تا با استفاده از آن بتوانیم مقدار رطوبت را بدست آورده و نمودار خط روانی آنرا رسم کرده و با استفاده از آن مقدار آب لازم (اپتیمم) برای حد روانی را بدست آوریم (در نمودار از عدد ۲۵ خطی عمود یا موازی محور در صد رطوبت رسم می کنیم تا مقدار آب لازم را برای آن خاک تعیین می کند) . باید توجه داشته باشیم که در مرحله اول تعداد ضربات نباید از ۵۵ بیشتر باشد و همچنین در مرحله سوم نباید از ۱۰ ضربه کمتر باشد .

۴. آزمایش دانه بندی به روش سرند کردن (آزمایش الک) :

هدف از آزمایش: دانه بندی، همان طور که از نام آن مشخص است، تفکیک سازی ذرات تشکیل دهنده خاک (توزیع اندازه دانه های شن و ماسه) می باشد که به تبع آن بر حسب محدوده سازی و دسته بندی ذرات، دانه های خاک را از نظر بعد، می توان در این محدوده ها قرار داد. به طور مشخص، برای مقایسه خاک ها از نظر اندازه بعد ذرات، باید از یک استاندارد معین استفاده نمود تا راحت تر بتوانیم خاک مورد نظرمان را انتخاب کنیم. بطور مثال دو استاندارد معروف در جهان، استاندارد های آشتو **ASTM** امریکا و **BS** انگلستان می باشند که در ایران مورد اولی کاربرد عملی بیشتری دارد.

برای این کار از دسته ای از الک ها که سوراخ های کف آن ها دارای اندازه دقیق و مشخص است و این شبکه بندی کف الک به کمک سیم صورت گرفته است استفاده می شود. به این ترتیب که مجموعه الک ها را بر روی هم قرار می دهند، الک با سوراخ های بزرگتر در بالا و الک های ریزتر را در پایین قرار می دهند پس از آن خاک خشک که تمام کلوخه های آن شکسته شده و تنها دانه های خاک در آن حضور دارد را بر روی الک بالایی می ریزند و الک را برای مدت معلومی (استاندارد) تکان می دهند تا دانه های خاک از آن عبور کند واضح است که دانه های با اندازه کوچکتر از سوراخ های الک عبور می کنند و دانه های بزرگتر بر روی سیم های الک باقی می ماند. این روش برای دانه های درشت تر خاک منطقی است ولی برای دانه های کوچکتر از یک حدی مناسب نیست زیرا دانه های بسیار ریز خاک به یکدیگر می چسبند و در نتیجه روش الک دیگر جواب های مناسبی نخواهد داشت. اگر میزان دانه های ریز خاک زیاد باشد ممکن است مجبور شویم اول از روی خاک و دانه های خشن آن آب عبور دهیم و پس از شسته شدن ذرات بزرگتر و از بین رفتن کلوخه ها، شروع به الک کردن کنیم.

مجموعه ای از الک های با اندازه های مختلف در دسترس است. مرز میان ماسه و لای به دلخواه انتخاب می شود. مطابق سامانه

اتحادیه دسته بندی خاک برای جدا کردن ماسه از شن از الک شماره ۴# (۴ سوراخ در طول ۱ اینچ) استفاده می شود اندازه

سوراخ های این الک ۴٫۷۵ میلی متر می باشد و برای جدا کردن ماسه از لای و رس از الک شماره ۲۰# که اندازه سوراخ های آن

۰,۰۷۵ میلی متر است استفاده می شود. مطابق استاندارد انگلیسی ۰,۰۶۳ میلی متر مرز میان ماسه و لای و ۲ میلی متر مرز میان ماسه و شن است.

۵. آزمایش برش مستقیم :

هدف از این آزمایش: راهی برای بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی خاک، برای نمونه خاک مورد آزمایش می باشد. از این پارامترها برای بدست آوردن ضریب اطمینان و میزان ایمنی در مورد مسائل پایداری خاک از جمله پایداری شیب ها و سطوح شیروانی ها و فشارهای جانبی استفاده می شود به این نحو که ابتدا ما باید خصوصیت خاک آن قسمت را در برابر تنش های برشی بررسی کنیم که لازم این کار محاسبه ی پارامترهای برشی خاک است.

البته بستگی به نوع خاک و بسته به نوع مورد بررسی پایداری، نوع و روش آزمایش برش مستقیم کمی تفاوت می کند که این روش ها را می توان به تحکیم نیافته و زهکشی نشده، تحکیم یافته و زهکشی نشده و تحکیم یافته و زهکشی شده تقسیم بندی کرد.

۶. آزمایش سه محوری :

هدف از این آزمایش: بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی، در خاک های چسبنده و غیر چسبنده و دانه ای می باشد. این آزمایش بسیار جامع بوده و انواع خاک ها را پوشش می دهد. در آزمایش سه محوری همچنین می توان انواع حالت های محیطی را نیز شبیه سازی کرد.

از این پارامترها برای بدست آوردن ضریب اطمینان و میزان ایمنی در مورد مسائل پایداری خاک از جمله پایداری شیب ها و سطوح شیروانی ها و فشارهای جانبی استفاده می شود به این نحو که ابتدا ما باید خصوصیت خاک آن قسمت را در برابر تنش های برشی بررسی کنیم که لازم این کار محاسبه ی پارامترهای برشی خاک است.

۷. آزمایش ضریب نفوذ پذیری از طریق آزمایش بار آبی افتان :

برای تعیین ضریب نفوذپذیری، روش های مختلفی را می توان اجرا کرد که از بهترین این روش ها، بار آبی ثابت و افتان است. ضریب نفوذپذیری برای خاک های دانه ای (درشت دانه) را از روش بار آبی ثابت بدست می آورند. اما در این آزمایش یعنی بار آبی افتان، این محدودیت وجود نخواهد داشت و می توان آزمایش را برای خاک های درشت دانه و ریزدانه انجام داد. در انتهای آزمایش ضریب نفوذ پذیری یعنی K را بدست می آید که باید ببینیم که با توجه به اهدافی که برای انجام کار داریم، آیا خاک نمونه، مناسب هست یا نه.

میزان نفوذپذیری خاک یکی از مهم ترین مشخصه های یک خاک محسوب می شود و در پروژه های بزرگ هم چون سدسازی، این شاخص از اهمیت دو چندان برخوردار خواهد گشت. البته باید توجه داشت که نفوذپذیری اندازه گیری شده در آزمایشگاه نمی تواند بیان کننده ی نفوذپذیری واقعی در محل باشد. چون مسلماً خاک دست خورده با خاک دست نخورده تفاوت دارد. هر چند این مقدار K می تواند دید خوبی به میزان نفوذپذیری خاک در محل بدهد.

۸. تعیین ضریب نفوذپذیری از طریق آزمایش بار آبی ثابت:

هدف از این آزمایش: بدست آوردن ضریب نفوذپذیری خاک هایی است که درشت دانه اند و از ضریب نفوذپذیری نسبتاً زیادی برخوردارند. لازم به ذکر است که به ضریب نفوذپذیری، ضریب تراوایی و ضریب نفوذپذیری مهندسی نیز گفته می شود. معمولاً از ضریب نفوذپذیری برای بدست آوردن دبی در واحد عرض در تراش در سد های خاکی یا در تراش در جایی که پرده سپر قرار داده شده و در آن جا هد انرژی آب دو طرف پرده سپر متفاوت است استفاده می شود. همچنین در تحکیم و پدیده ی نشست خاک ها برای بدست آوردن ضریب تحکیم نیاز به محاسبه ی ضریب نفوذپذیری هستیم.

۹. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR :

این آزمایش در سال ۱۹۲۹ میلادی در اداره راهسازی ایالت کالیفرنیا آمریکا کامل گردیده و مورد استفاده قرار گرفته است. به کمک این آزمایش مقاومت برشی خاک در یک رطوبت و وزن مخصوص معین مشخص می شود. از جمله کاربردهای عملی آن این است که در پی سازی برای بیان کیفیت نسبی خاک زیر پی و در راهسازی مقدار ضریب مزبور در انعکاس مقاومت برشی خاک و تحمل آن در برابر بارهای ترافیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در حالت کلی، آزمایش یا نشانه باربری کالیفرنیا جهت تعیین ظرفیت باربری خاکهای زیر پی ها مورد استفاده قرار می گیرد. ارزش این آزمایش در راهسازی بسیار زیاد است و خاک یکی از مهمترین عوامل در طرح ضخامت رویه راه هاست. آزمایش را شخصی به نام پورتر در سال ۱۹۲۶ مطرح کرد که پس از آن در سال ۱۹۲۹ اداره راهسازی ایالت کالیفرنیا آمریکا آن را گسترش داد. این روش در سال های بعد نیز کامل تر شد تا اینکه در سالهای ۱۹۴۰ توسط گروه مهندسی و سپس در سال ۱۹۶۱ توسط انجمن آزمایش و مصالح آمریکا به عنوان یک روش استاندارد تعیین مقاومت خاک ها مورد قبول قرار گرفت. در حال حاضر این روش با وجود داشتن نقاط ضعف فراوان متداولترین روش برای ارزیابی قدرت باربری خاک بستر روسازی راهها و فرودگاهها و همچنین تعیین قدرت باربری مصالح سنگی 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 یافته، بر طبق آن ضخامت این لایه ها را بدست آورد.

۱۰. آزمایش تحکیم:

فشار ناشی از اعمال سربار در لایه های خاک موجب فشردگی، تغییر شکل فشاری و جابجایی ذرات در خاک شده که عملاً موجب خروج آب و هوا از میان حفرات گشته و به نوعی، نشست در خاک را به وجود می آورد. در حالت کلی از نظر مدت زمان لازم برای فشردگی، نشست خاک را می توان در دو دسته ی زیر تقسیم نمود:

(الف) نشست آنی (کوتاه مدت)

(ب) نشست تحکیم (بلند مدت)

هم چنین از نظر شرایط برگشت پذیری، نشست خاک به نشست های «الاستیک» و «غیر الاستیک» تقسیم می شود. تحکیم را این گونه می توان تعریف کرد: «کاهش حجم تدریجی یک خاک اشباع با نفوذپذیری کم در اثر زهکشی بخشی از آب موجود در در حفرات که نهایتاً منجر به تغییر ضخامت و نشست خاک می گردد.» بنابراین زهکشی (تغییر در فشار آب حفره ای) ارتباط تنگاتنگی با مقوله ی تحکیم و نشست خاک دارد. از زمانی که در اثر فشار سربار در داخل خاک اضافه فشار آب حفره ای به وجود می آید، پدیده ی تحکیم آغاز شده و تا زمانی که این اضافه فشار در اثر زهکشی زائل می شود، تحکیم ادامه خواهد داشت.

۱۱. آزمایش تک محوری خاک چسبنده:

هدف از این آزمایش: راهی برای بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی در خاک های چسبنده می باشد به این صورت که در نمونه خاک های چسبنده اشباع، میزان چسبندگی بیشینه یا محاسبه می گردد و در خاک های چسبنده غیر اشباع پارامترهای مقاومت برشی آن خاک ها) در این آزمایش قابل محاسبه است. از این پارامترها ضریب اصطکاک برای بدست آوردن ضریب اطمینان و میزان ایمنی در مورد مسائل پایداری خاک از جمله پایداری شیب ها و سطوح شیروانی ها و فشارهای جانبی استفاده می شود به این نحو که ابتدا ما باید خصوصیت خاک آن قسمت را در برابر تنش های برشی بررسی کنیم که لازم این کار محاسبه ی پارامترهای برشی خاک است.

۱۲. آزمایش تراکم:

عبارتست از کاهش دادن حجم خاک در اثر خارج ساختن هوا با استفاده از اعمال نیرو. که در این حالت اصطکاک بین ذره ها بیشتر می شود و وزن واحد آن زیاد می گردد. و این وزن معیار تراکم خاک است.

تراکم به منظور افزایش مقاومت نیروی برشی است و کاهش نفوذپذیری که این به علت این است که منافذ خاک کوچکتر می شود و در نتیجه عبور آب از این منافذ کمتر است. در خاکهای رسی یک مشکل وجود دارد و آن افزایش پتانسیل تورم است. عوامل موثر در تراکم خاک بستگی دارد به :

- نوع خاک
- انرژی
- رطوبت

نحوه تراکم خاکها با توجه به مشخصات فیزیکی آن مختلف است. عبارتند از تراکم خاکهای غیر چسبنده و تراکم خاکهای چسبنده.

- تراکم خاک های غیر چسبنده(شن و ماسه):

خاکهای غیر چسبنده معمولا از ذرات درشت دانه و نسبتا کروی شکل تشکیل می شوند و درجه تراکم آنها بستگی به طرز قرار گرفتن ذرات در کنار یکدیگر دارد. از آنجایی که ذرات تقریبا غیر قابل تغییر شکل و تراکم ناپذیر هستند استفاده از ارتعاش و لرزه بهترین وسیله جهت متراکم کردن اینگونه خاکها می باشد.

- تراکم خاک های چسبنده(سیلت و رس):

به علت ساختمان ویژه ذرات ریز دانه چسبنده مثل سیلت ریز و رس تراکم آنها به وسیله ارتعاش مقدور نیست و بار یا فشار استاتیک بهترین وسیله برای تراکم این گونه خاکهاست. برای نشان دادن تراکم پذیری این گونه خاکها تحت فشار میتوان مقداری آب به توده ای از خاک میکا افزود و آنرا در یک لیوان قرار داد. چنانچه با یک استوانه فلزی مقداری فشار روی سطح خاک در لیوان وارد آید مشاهده خواهد شد که سطح خاک نشست قابل ملاحظه ای نموده است یعنی تحت تاثیر فشار استاتیک متراکم شده است. با انرژی های مختلف میتوان تراکم های مختلف داشته باشیم. از طرفی برای تراکم کردن خاک میتوان رطوبت را نیز زیاد کرد. و برای این که پروژه ای از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد باید مقدار رطوبت به حد ایتیمم باشد. آزمایشهای دیگر نیز برای تراکم وجود دارد که اصولا به ۸ روش انجام پذیر است. ولی ما برای تراکم از روش های استاندارد و اصلاح شده استفاده میکنیم. روش کار در همه یکسان است ولی تفاوت در مقدار وزنه و دیگر مشخصات می باشد. در هنگام ساخت و اجرای بزرگراه ها و فرودگاهها و سازه ها دیگر متراکم کردن خاک یک امر ضروری جهت بهبود مقاومت خاک می باشد. پروکتور (۱۹۳۳) یک آزمایش تراکم آزمایشگاهی ابداع کرد تا به وسیله آن حداکثر وزن مخصوص خشک خاک که برای تراکم در محل می تواند استفاده شود را تعیین کند این آزمایش به نام آزمایش تراکم پروکتور مشهور می باشد.

نوع آزمایش ها و خدمات به صنعت

نحوه انجام	نام آزمایش
	بارگذاری صفحه
۵×۵ و ۱۰×۱۰ و ۳۰×۳۰	برش مستقیم
زهکشی شده و زهکشی نشده	تحکیم
استاندارد و اصلاح شده	تراکم

	تعیین ارزش ماسه ای S.E
	تعیین چگالی و دانسیته در محل
	تعیین حدود اتربرگ (حد انقباض ، حد روانی ، حد خمیری)
	تعیین درصد رطوبت
	تعیین ضریب تورق و تطویل
	تعیین مقاومت فشاری سه محوری
خشک و اشباع	تعیین نسبت توان باربری کالیفرنیا C.B.R
تر و خشک	دانه بندی خاک
افتان و ثابت	نفوذ پذیری
ساده و دوگانه	هیدرومتری

آزمایشات صحرایی مکانیک خاک

برای مشخص شدن و بدست آوردن پارامترهای **مکانیک خاک** محل پروژه های شهری، نیاز به انجام آزمایشاتی می باشد تا بتوان میزان مقاومت و تراکم خاک، نوع خاک، تراز آبهای سطحی و عوامل تاثیر گذار دیگر هنگام طراحی سازه را مشخص نمود. این **آزمایشات** دارای مراحل اجرایی می باشد که دانستن آن جهت آماده سازی محل انجام آزمایش قبل از اجرای آن، خالی از لطف نیست. زیرا در بسیاری از مواقع، جهت انتقال و مستقر نمودن دستگاه های مورد نیاز انجام آزمایشات باید مسیر عبور و محل استقرار آنها را آماده نمود.

آزمایش مکانیک خاک با حفر گمانه

عملیات حفر گمانه در پروژه های شهری بسته به نوع خاک منطقه، متراژ زیربنای پروژه و نیز تعداد طبقات آن متفاوت می باشد. بدین معنا که در صورت امکان ورود دستگاه حفاری به داخل زمین پروژه این عملیات معمولاً توسط دستگاه صورت می گیرد و در غیر این صورت بوسیله حفاری دستی اقدام به برداشت نمونه از خاک محل می نمایند.

پیشنهاد ویژه: خاکبرداری و گودبرداری، صفر تا صد اصول و اجرا و هزینه ها

آزمایش مکانیک خاک با تست نفوذ استاندارد (SPT)

این آزمایش جهت بدست آوردن معیاری از تراکم لایه های خاک و همچنین تخمین برخی از پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل پذیری خاک صورت می پذیرد. آزمایش **نفوذ استاندارد** با نفوذ یک نمونه گیر استاندارد با ضربات ناشی از سقوط چکشی به وزن مشخص و از ارتفاع مشخص انجام می شود.

مشخص نمودن تراز آب های زیرزمینی در آزمایش خاک

در هنگام حفاری با توجه به عمق برداشت گمانه ها سطح تراز آبهای زیرزمینی را نیز مشخص می نمایند. این مساله با توجه به عمق گودبرداری مورد نیاز پروژه و همچنین نوع خاک دارای اهمیت بالایی می باشد.

آزمایش مکانیک خاک با آزمایش بارگذاری صفحه

آزمایش بارگذاری صفحه روشی برای تخمین میزان نشست بستر، ناشی از ساخت سازه و یا تعیین ظرفیت باربری نهایی بستر ساختمانی است. آزمایش بارگذاری صفحه برای دستیابی به میزان نشست و ظرفیت باربری **پی** با اعمال بار طراحی پیشنهادی بر صفحه‌ای با ابعاد کوچک انجام می‌شود. انجام این آزمایش در سطح زمین و یا در انتهای چاله دستی حفر شده امکان پذیر است اما با ازدیاد عمق ، زمان و هزینه انجام آن به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد.

آزمایش مکانیک خاک با آزمایش برش برجا

بمنظور تعیین پارامترهای مقاومتی خاک در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده این آزمایش انجام می‌شود . در این آزمایش، ابتدا خاک تحت تنش قائم معینی تحکیم یافته و سپس ضمن ثابت نگاه داشتن تنش قائم، تنش برشی با سرعت تنظیم شده به نمونه خاک وارد می‌شود تا نمونه گسیخته شود.

- آزمایش صحرایی دانپول خاک (DHT)
- آزمایش صحرایی لوفران خاک (Lefrane Test)
- آزمایش پرسیومتری یا فشارسنجی (Pressure meter Test)
- آزمایش بارگذاری صفحه خاک
- آزمایش لوژان (Lugeon Test)
- آزمایش برش مستقیم برجا
- آزمایش صحرایی نفوذ استاندارد خاک (SPT)
- آزمایش صحرایی برش پره خاک (Vane Shear Test)
- آزمایش دایلاتومتری تخت (Flat Dilatometer Test)
- آزمایش پیزوکن (CPTU)
- آزمایش دانسیته صحرایی خاک
- هزینه آزمایش های صحرایی خاک

آزمایش های صحرایی خاک یا سنگ، هم اکنون بخش اصلی و مهم فرایند طراحی های ژئوتکنیکی را تشکیل می دهند. آزمایش های صحرایی یا برجا خاک در جهت تکمیل آزمایش های آزمایشگاهی برای کسب پارامترهای اساسی نظیر مقاومت ، تنش های افقی برجا ، مدول های تغییر شکل پذیری و نفوذپذیری ، اهمیت روزافزونی پیدا کرده اند.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش صحرایی خاک کلیک کنید

دلیل افزایش مداوم تقاضا برای **آزمایش های صحرایی خاک** ، ناکافی بودن آزمایش های آزمایشگاهی جهت تشخیص دقیق ویژگی های خاک می باشد. همچنین مهمترین مزیت آزمایش های درجا یا صحرایی خاک این است که پارامترهای خاک بر خلاف آزمون های آزمایشگاهی تحت تاثیر دست خوردگی و افت کیفیت خاک قرار نمی گیرند.



آزمایش صحرائی خاک

آزمایش های صحرائی خاک همچنین از نظر ارزیابی سایت و سازه در مقابل زلزله حائز اهمیت است. امروزه کارایی آزمایش های درجا یا صحرائی خاک مخصوصا آزمایش نفوذ مخروط و آزمایش سرعت موج برشی به عنوان روشی موثر جهت ارزیابی پتانسیل آسیب های ناشی از تکان های لرزه ای به اثبات رسیده است.

آزمایش های صحرائی خاک به کار رفته در مهندسی ژئوتکنیک تنوع گسترده ای دارند که بنا به نوع پروژه، خواص و پارامترهای مورد نیاز در هر پروژه یک یا چند آزمایش خاص مورد توجه قرار می گیرد. مهمترین آزمایش های صحرائی خاک به قرار زیر می باشند:

آزمایش صحرائی دانهول خاک (DHT)

آزمایش درون چاهی دانهول (DHT) یکی از آزمایش های صحرائی خاک است که با هدف شناسایی لایه بندی خاک و مقاومت آن ها استفاده می گردد. اساس **آزمایش لرزه نگاری درون گمانه ای دانهول** بر مبنای اندازه گیری سرعت انتشار امواج فشاری و برشی و استفاده از آن جهت تفکیک لایه ها و تخمین پارامترهای دینامیکی خاک می باشد.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش دانهول خاک کلیک کنید.

در **آزمایش صحرائی DHT** منبع ارتعاش در سطح زمین و ژئوفون ها درون گمانه ، قرار می گیرند و با ایجاد ارتعاش در سطح زمین و دریافت امواج در اعماق مختلف، با توجه به زمان و فاصله طی شده توسط موج های ارتعاشی، سرعت آن ها در اعماق مختلف قابل محاسبه خواهد بود و با توجه به تغییرات سرعت موج در خاک هایی با جنس مختلف، امکان شناسایی لایه بندی، جنس خاک و نیز تخمین پارامترهای خاک وجود دارد.



آزمایش درون چاهی دانهول

آزمایش صحرایی لوفران خاک (Lefrane Test)

آزمایش لوفران روش صحرایی تعیین نفوذپذیری توده های خاک است که به سه صورت آزمایش ایستایی ثابت، سطح آب افتان و سطح آب خیزان، بر اساس شرایط محیطی انجام می گیرد.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش لوفران خاک کلیک کنید.

هر یک از این روش ها به دو روش نقطه ای برای تعیین نفوذپذیری قائم و قطعه ای برای تعیین نفوذ پذیری افقی تقسیم می شوند. که در این روش ها بر اساس میزان نفوذ یا تراوش آب در گمانه، با روش ها و روابط مربوطه، میزان نفوذپذیری خاک در جهت افقی یا قائم اندازه گیری می شود.

آزمایش پرسیومتری یا فشارسنجی (Pressure meter Test)

آزمایش پرسیومتری (PT) بر اساس قرار دادن یک غشای استوانه ای شکل تحت فشار سیال درون یک گمانه استوار است.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش پرسیومتری یا فشارسنجی خاک کلیک کنید.

در آزمایش صحرایی خاک پرسیومتری (PT) حین افزایش فشار سیال و در نتیجه افزایش حجم غشا و حفره، تغییرات حجم و فشار اندازه گیری شده و ثبت می گردد. آزمایش پرسیومتری (PT) به دلیل برخورداری از پشتوانه علمی و تئوریک محکم نسبت به سایر آزمایش های صحرایی خاک، کارایی در اعماق زیاد و قابلیت کسب اطلاعات کمی فراوان در مورد رفتار خاک امروزه به عنوان معتبرترین آزمایش صحرایی مکانیک خاک قلمداد می شود.



آزمایش پرسیومتری (PT)

آزمایش بارگذاری صفحه خاک

آزمایش بارگذاری صفحه ، روشی صحرائی برای تعیین ظرفیت باربری خاک ، ارزیابی میزان تراکم پذیری و محاسبه مدول عکس العمل بستر در برابر بارهای وارده است.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش بارگذاری صفحه کلیک کنید.

در آزمایش بارگذاری صفحه یک صفحه فلزی تحت بار قائم قرار گرفته و میزان نشست آن ثبت می شود. شرایط این صفحه نظیر یک پی منفرد است، بنابراین می توان نتایج آن را با اعمال ضرایبی برای محاسبه میزان نشست پی های سطحی به کار گرفت.



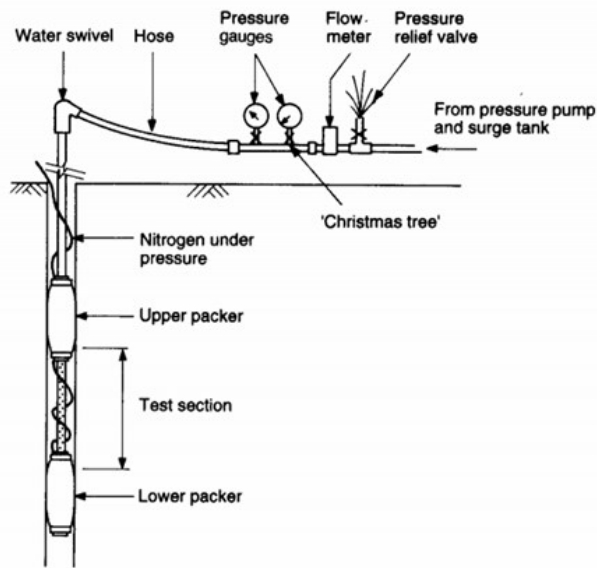
آزمایش بارگذاری صفحه

آزمایش لوژان (Lugeon Test)

آزمایش لوژان مرسوم ترین روش تعیین نفوذپذیری در محیط های سنگی درزه دار است که توسط لوژان در سال ۱۹۳۳ ابداع شده است. یک لوژان، آب خوری یک لیتر در دقیقه برای قطعه ای از گمانه به طول یک متر تحت فشار سیال ۱۰ بار می باشد.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش لوژان کلیک کنید.

در آزمایش صحرائی خاک لوژان پس از حفاری گمانه، شستسوی آب و نصب پکرها، قطعه مورد نظر به مدت ۱۰ دقیقه از آب اشباع می شود. سپس فشار مورد نظر برای آزمایش در ۵ یا ۷ گام به قطعه اعمال و هر ۵ دقیقه میزان خوردن آب (جذب آب) ثبت می شود. اگر اختلاف بین دو قرائت از ۱۰ درصد کمتر شود، آزمایش لوژان در آن قطعه (گام یا مرحله) تمام شده تلقی گشته و اعمال فشار گام بعدی، آغاز می شود. در نهایت با داشتن نتایج فشار و خوردن، ضمن مشخص شدن رفتار محیط در مقابل فشار آب، عدد لوژان که نمایانگر نفوذپذیری توده های سنگی درزه دار است، به دست می آید.



آزمایش لوژان

آزمایش برش مستقیم برجا

ابزار **آزمایش برش مستقیم** اولین بار توسط **Prakash** در سال ۱۹۷۶ ابداع شد. مبنای **آزمایش برش مستقیم برجا** یا صحرایی خاک مشابه **آزمایش برش مستقیم** آزمایشگاهی می باشد که به منظور نزدیکی بیشتر به شرایط واقعی بصورت برجا انجام می شود. در **آزمایش برش برجا** ضمن اعمال بار قائم بر صفحه واقع بر روی سطح خاک یا سنگ، بار افقی ایجاد برش می کند.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش برش مستقیم برجا خاک کلیک کنید.

آزمایش برش برجا یا صحرایی خاک به منظور اندازه گیری مقاومت برشی توده های سنگی در تونل ها، شیروانی های سنگی، پی سدها، اندازه گیری ضریب اصطکاک بین سنگ و بتن در پی سدها، اندازه گیری مقاومت برشی خاکریزها و اندازه گیری مقاومت برشی توده های طبیعی خاکی در پروژه های مختلف، انجام می پذیرد.



آزمایش برش مستقیم برجا

آزمایش صحرایی نفوذ استاندارد خاک (SPT)

آزمایش صحرایی نفوذ استاندارد SPT به دلیل کاربرد مستقیم یا غیر مستقیم نتایج آن، در ارزیابی رفتار خاک ها در مقابل پدیده های مختلف ژئوتکنیکی، تعیین پارامترهای خاک و استفاده در تعیین ظرفیت باربری پی ها با در نظر گرفتن ملاحظات نشست، یکی از متداول ترین آزمایش های صحرایی است.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش نفوذ استاندارد خاک کلیک کنید.

اساس **آزمایش SPT** بر سقوط یک وزنه از ارتفاع مشخص بر یک میله استوانه ای شکل نمونه گیر استوار است.

آزمایش صحرایی برش پره خاک (Vane Shear Test)

در آزمایش صحرائی برش پره یک تیغه برش چهار پره با هندسه ای مشخص و استاندارد، در خاک مورد نظر با اعمال یک لنگر چرخشی فرو برده می شود. با اندازه گیری لنگر پیچشی جهت برش، گسیختگی خاک و همچنین هندسه پره می توان مقاومت برشی خاک رس را اندازه گیری نمود. آزمایش برش پره به طور عمده در خاک های رسی استفاده می شود. البته آزمایش برش پره در خاک های دانه ای و متراکم، کاربردی ندارد.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش برش پره کلیک کنید.

همچنین آزمایش صحرائی برش پره محدود به خاک هایی می شود که چرخش آرام تیغه ها (۶ درجه در دقیقه) بتواند در آن ها باعث گسیختگی برش زهکشی نشده شود. از آن جا که زمان انجام آزمایش برش پره سریع بوده (حدود ۲ تا ۵ دقیقه)، بنابراین جهت اندازه گیری مقاومت برشی زهکشی نشده کاربرد دارد. بر اساس روابط تعادلی بین لنگر اعمال شده و مقاومت برشی خاک در اطراف پره پس از گسیختگی، مقاومت برشی زهکشی نشده خاک به دست می آید.



آزمایش برش پره

آزمایش دایلاتومتری تخت (Flat Dilatometer Test)

آزمایش دایلاتومتری تخت یا اتساع سنجی توسط مارچتی در سال ۱۹۸۰ ابداع شده است. در آزمایش دایلاتومتری تخت ، نوک دستگاه با سرعت ۲۰ میلی متر بر ثانیه به درون زمین رانده می شود و با ثبت چند نوع فشار از جمله فشار بر غشا از طرف زمین، فشار برای صفر کردن تغییر مکان غشا، فشار برای ایجاد تغییر مکان ۱،۱ میلی متر، فشار وارد بر غشاء پس از برداشت بار و با به کارگیری روابط مربوطه متغیرهای دایلاتومتری به دست می آیند.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش دایلاتومتری تخت کلیک کنید.



آزمایش دایلاتومتری تخت

آزمایش پیزوکن (CPTU)

آزمایش نفوذ مخروط الکتریکی با قابلیت اندازه گیری فشار آب حفره ای که پیزوکن یا به اختصار (CPTU) نامیده می شود، یکی از پیشرفته ترین آزمایش های صحرایی خاک می باشد. از **آزمایش پیزوکن (CPTU)** برای تعیین برخی پارامترهای مهندسی خاک های چسبنده و غیرچسبنده و همچنین تشخیص ماهیت خاک استفاده می شود.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش پیزوکن (CPTU) کلیک کنید.

آزمایش پیزوکن (CPTU) به دلیل تکرار پذیری، قابلیت اطمینان و پیوستگی داده ها، یک آزمایش برجای ایده آل برای تعیین نوع خاک، لایه بندی زمین، تخمین پارامترهای مقاومتی، تغییر شکل پذیری لایه های ماسه ای و رسی و ارزیابی پتانسیل روان گرای خاک های ماسه ای است. نتایج **آزمایش CPTU** به دلیل ثبت دیجیتال، در سریع ترین زمان ممکن قابل ارائه و تجزیه و تحلیل می باشد.



آزمایش پیزوکن (CPTU)

آزمایش دانسیته صحرایی خاک

آزمایش دانسیته صحرایی خاک برای کنترل وزن مخصوص خاکریزهای کوبیده شده در سد های خاکی، راهسازی و ... استفاده می گردد. **آزمایش دانسیته درجا** یا صحرایی خاک به همراه آزمایش تراکم به عنوان مبنای پذیرش کفایت عملیات تراکم مورد استفاده قرار می گیرد.

جهت اطلاع از قیمت آزمایش دانسیته صحرایی خاک کلیک کنید.

کاربرد آزمایش دانسیته صحرایی به خاک های اشباع محدود بوده و در خاک های نرم و شدیداً شکننده توصیه نمی شود. همچنین هدف از **آزمایش دانسیته درجا** به دست آوردن وزن مرطوب نمونه ای از خاک حفاری شده از یک گودال با شکل هندسی نامنظم است که اگر حجم آن گودال مشخص باشد دانسیته ظاهری یا مرطوب خاک به سادگی محاسبه می شود.



آزمایش دانسیته صحرایی

هزینه آزمایش های صحرایی خاک

آزمایش های صحرایی خاک از این جهت حائز اهمیت است که دست خوردگی غیر قابل اجتناب نمونه ها بر روی نتایج آزمایش های آزمایشگاهی، اثر گذاشته و اعتبار پارامترهای اندازه گیری شده را زیر سوال می برد. بنابراین خصوصیات خاک ها نماینده

واقعی تری بر مقاومت و سختی درجا یا صحرایی خاک بوده و در نتیجه منجر به طراحی فونداسیون به شکل اقتصادی تری می گردد، چراکه آزمون های متداول آزمایشگاهی عموماً مقاومت های پایین تری را نسبت به آزمایش های درجا یا صحرایی خاک نشان می دهند. لذا بدیهی است که ظرفیت باربری بیشتر باعث صرفه جویی اقتصادی بیشتری به نفع مالک یا کارفرما می گردد. براین اساس **هزینه آزمایش های صحرایی خاک** در قبال مزایای آن بسیار ناچیز است.

▪ درس یکم: آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

- مقدمه
- تجهیزات استفاده شده در آزمایش
- نحوه انجام
- تفسیر نتایج
- تراکم نسبی خاک
- مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت زهکشی نشده خاک
- مدول الاستیسیته و مدول برشی خاک
- زاویه مقاومت برشی
- وزن مخصوص خاک
- مزایا و معایب آزمایش

▪ درس دوم: آزمایش نفوذ مخروط (Cone penetration test)

- هدف آزمایش
- تجهیزات استفاده شده
- نحوه انجام
- تفسیر نتایج
- طبقه بندی خاک ها
- تخمین تراکم نسبت در ماسه
- تعیین زاویه مقاومت برشی
- تعیین مقاومت برشی خاک های چسبنده
- درجه حساسیت رس
- تعیین نسبت پیش تحکیمی
- تعیین نسبت تنش برجا
- تعیین سرعت موج برشی
- زاویه اصطکاک داخلی
- مزایا و معایب آزمایش

▪ درس سوم: آزمایش پرسیومتری (Pressuremeter Test)

- هدف آزمایش
- تجهیزات استفاده شده
- انواع پرسیومتر و محیط های مورد استفاده
- روش انجام آزمایش
- تحلیل و تفسیر نتایج

- ترسیم نتایج
- محاسبه مدول پرسیومتری
- محاسبه فشار حدی PL
- نوع توده خاک
- محاسبه ضریب کشسانی برشی (G)
- ضریب تحکیم افقی
- محاسبه زوایای مقاومت برشی و انبساطی ماسه ها
- تعیین مقاومت نوک نفوذ سنج (QC)
- تعیین مقاومت زهکشی نشده رس ها (CU)
- مزایا و معایب آزمایش
- درس چهارم: آزمایش برش پره (Vane Shear Test)
 - هدف آزمایش
 - تجهیزات استفاده شده
 - روش انجام آزمایش
 - تحلیل و تفسیر نتایج
 - مزایا و معایب آزمایش
- درس پنجم: آزمایش بارگذاری صفحه (Plate Load Test)
 - هدف آزمایش
 - تجهیزات استفاده شده در آزمایش
 - روش انجام آزمایش
 - تحلیل و تفسیر نتایج
 - مزایا و معایب آزمایش
- درس ششم: آزمایش دیلاتومتر تخت (Flat plate Dilatometer Test)
 - هدف آزمایش
 - تجهیزات استفاده شده
 - روش انجام آزمایش
 - تحلیل و تفسیر نتایج
 - مزایا و معایب آزمایش
- درس هفتم: آزمایش بارگذاری صفحه در لبه ترانشه
 - هدف آزمایش
 - تجهیزات
 - روش انجام آزمایش
 - تفسیر نتایج
- درس هشتم: آزمایش نفوذ پذیری (Permeability Test)
 - نفوذ پذیری در سنگ
 - هدف آزمایش

- تجهیزات
 - روش انجام آزمایش
 - تفسیر نتایج
 - نفوذ پذیری در خاک
- آزمایش اس پی تی SPT یا نفوذ استاندارد یکی از آزمایش های متداول ژئوتکنیکی است که با توجه به قیمت پایین و حجم گسترده ای از اطلاعات که در اختیار قرار می دهد، کاربرد گسترده ای در دنیای ژئوتکنیک دارد. در این نوشتار هر آنچه لازم است از آزمایش SPT بدانید، خواهید یافت.
 - SPT چیست؟
 - آزمایش نفوذ استاندارد یا اس پی تی SPT در سال ۱۹۲۷ در آمریکا برای خاک های ماسه ای و شنی ابداع شد. در آن زمان نمونه گیری از خاک ماسه ای و شنی به راحتی نمونه گیری از خاک های رسی نبود. لذا لازم بود دستگاهی اختراع شود که بدون نیاز به نمونه گیری، خصوصیات خاک را در محل نشان دهد. اما امروزه کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد SPT محدود به خاک های درشت دانه نبوده و برای خاک های ریزدانه هم به کار می رود.
 - پس از زلزله نیگاتای ژاپن، محققین در پی یافت ارتباطی بین درصد تراکم و عدد SPT بودند.
 - پس از آن، استفاده از اس پی تی گسترش یافت و عدد SPT جهت حصول پارامترهای ژئوتکنیکی دیگر نیز گسترش یافت.
 - این آزمایش در حین حفاری و در فواصل دو تا سه متری در عمق خاک انجام می شود. استاندارد انجام این آزمایش است.
 - فرم کلی این آزمایش به این صورت است که یک وزنه با وزن ۱۴۰ پوند معادل ۶۳٫۵ کیلوگرم از ارتفاع ۳۰ اینچی که در واقع ۷۶ سانتی متر است سقوط می کند.
 - روی میله متصل به وزنه، سه خط پانزده سانتی متری وجود دارد.
 - تعداد ضربات لازم جهت نفوذ سه خط پانزده سانتی متری اطلاعات مفیدی به مهندسان ژئوتکنیک می دهد که موضوع این مقاله ماست.
 - مجموع ضربات لازم جهت نفوذ خط دوم و سوم، به عدد اس پی تی یا N_{spt} معروف است.
 - پارامترهای موثر بر عدد اس پی تی

- نوع خاک
- در خاک های درشت دانه و تیز گوشه عدد اس پی تی بیشتر و در خاک های ریزدانه و گرد گوشه عدد SPT کمتر است.
- دانسیته نسبی
- هرچه دانسیته طبیعی خاک بیشتر باشد و خاک متراکم تر باشد مقدار عدد اس پی تی SPT بیشتر خواهد شد.
- تاریخچه تنش
- هرچه میزان OCR خاک بالاتر باشد میزان عدد نفوذ استاندارد SPT بالاتر خواهد بود.
- تکنیک استفاده شده
- نحوه انجام آزمایش اس پی تی می تواند در میزان N_{spt} تاثیر گذار باشد.
- به عنوان مثال نوع چکش استفاده شده، تعداد دورپیچ های قرقره، قطر گمانه و... می تواند در عدد SPT تاثیر گذار باشد.

کاربردهای آزمایش نفوذ استاندارد SPT

۱- تخمین تراکم نسبی خاک (Dr)

محققین مختلفی عدد اس پی تی را به درصد تراکم خاک مرتبط کرده اند. معروفترین آنها عبارتند از:

Gibbs and Holts (1957)

peak and Bazara (1969)

در جدول زیر رابطه بین عدد اس پی تی و میزان تراکم در خاک های درشت دانه ارایه گردیده است.

Nspt	۴-۰	۹-۵	۱۹-۱۰	۲۹-۲۰	۳۹-۳۰	۴۹-۴۰	بیش از ۵۰
میزان تراکم	فوق العاده سست	بسیار سست	سست	متوسط	متراکم	خیلی متراکم	کاملاً متراکم

در جدول زیر رابطه بین SPT و میزان تراکم در خاک های ریزدانه ارایه شده است.

Nspt	۲-۰	۵-۲	۹-۵	۲۰-۱۰	۳۰-۲۱	بیش از ۳۰
میزان تراکم	بسیار سست	نرم	متوسط	سفت	خیلی سفت	سخت

۲- تخمین مدول سختی (E)

از دیگر پارامترهایی که می توان از عددهای اس پی تی بدست آورد، مدول الاستیسیته یا مدول سختی خاک است. دانشمندان زیر در این زمینه فعالیت داشته اند:

parry (1978)

clayton (1995)

برخی محققین نیز ارتباط دادن عدد SPT را مدول الاستیسیته صحیح نمی دانند و این عدد را به مدول برشی یا G ارتباط می دهند.

بعضی از روابط مدول الاستیسیته در جدول زیر خلاصه شده است.

مدول الاستیسیته	رابطه با عدد اس پی تی		نام مرجع
E	$15 > N_{spt}$	$(N_{spt}+6) \times 6$	Bowels
	$15 < N_{spt}$	$6 \times (N_{spt}+6) + 20$	Bowels
E	$22,22 \times (N_{spt}^{0.888})$		Nowatzki & Wrench
E	$7,66 \times N_{spt}$		Das
E	$12 \times (N_{spt}+6)$		Bowels

۳- تخمین زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

زاویه اصطکاک داخلی از جمله پارامترهای مقاومت برشی است که از **آزمایش سه محوری** و یا **آزمایش برش مستقیم** به دست می آید.

می توان با روابط ارایه شده توسط محققین زیر، این پارامتر را به صورت غیرمستقیم نیز به دست آورد:

- Meyerhof (1976)
- Peak and Hansen (1967)
- Demell (1971)

برخی از روابط پیشنهادی که رابطه بین زاویه اصطکاک داخلی و عدد اس پی تی را بیان می کنند در جدول زیر آورده شده است.

نام مرجع	رابطه با عدد اس پی تی	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)
Bowels	$0.45 \times N_{spt} + 20$	ϕ
Shioi & Fukui(1982)	$(18 \times N_{spt})^{0.5} + 15$	ϕ
Scott(1981)	$0.36 \times N_{spt} + 27$	ϕ

۴- تخمین مقاومت برشی زهکشی نشده (Cu)

این پارامتر از **آزمایش سه محوری UU** به صورت مستقیم به دست می آید.

اما می توان آنرا به صورت غیر مستقیم از عدد SPT نیز به دست آورد.

برای رسیدن به این هدف باید از روابط ارایه شده توسط Bowels (1996) استفاده کرد.

این دانشمند عقیده داشت که هنگام انجام آزمایش SPT آب فرصت زهکشی نداشته و شرایط مشابه **آزمایش سه محوری زهکشی نشده** است.

۵- ارزیابی روانگرایی

از نتایج آزمایش SPT می توان جهت تخمین پتانسیل روانگرایی در خاک های ماسه ای استفاده کرد.

بدین ترتیب که در خاک های ماسه ای با سطح آب زیرزمینی بالا، هنگامی که N_{spt} در خاک بالا باشد احتمال روانگرایی کم است و بالعکس.

برای کسب اطلاعات بیشتر می توانید مقاله Seed et al. (1986) و یا مقالات روانگرایی ایشیهارا را مطالعه کنید.

۶- تعیین تیپ بندی خاک

به صورت مستقیم با استفاده از سرعت موج برشی و از **آزمایش دانهول** به دست می آید.

اما با استفاده از عدد اس پی تی بدست آمده می توان تیپ خاک را تعیین کرد.

در آزمایش SPT ماشینی اگر عدد اس پی تی بیش از ۵۰ باشد خاک از نوع دو و یک و در صورتی که کمتر از ۵۰ باشد خاک نوع سه یا چهار است.

در آزمایش اس پی تی دستی معیار تقسیم بندی خاک ها عدد ۱۶۰ است. بدین صورت که خاک هایی با عدد spt بیش از ۱۶۰ خاک نوع دو یا یک هستند.

۷- تعیین سرعت موج برشی (V_s)

سرعت موج برشی در خاک ها، به سرعت حرکت موج S یا موج برشی در پروفیل خاک گفته می شود. سرعت این موج به صورت مستقیم از آزمایش دانهول به دست می آید. اما در طول زمان های مختلف روابط زیادی برای تخمین سرعت موج برشی ارائه شده است. با استفاده از جدول زیر می توانید سرعت موج برشی را بر حسب نتایج آزمایش SPT تخمین بزنید. در جدول زیر سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه ارائه شده است. شایان ذکر است در روابط ارائه شده N عدد اس پی تی است که در واقع مجموع دو عدد دوم و سوم در آزمایش SPT می باشد. Z عمق قرار گیری خاک نسبت به صفر-صفر زمین است.

منبع	نوع خاک	سرعت موج برشی (V_s)
Kanai et al. (1966)	تمامی خاک ها	$19 \times (N^{0.6})$
Ohsaki and Iwasaki (1973)	تمامی خاک ها	$82 \times (N^{0.39})$
Imai and Yoshimura (1975)	تمامی خاک ها	$92 \times (N^{0.329})$
Imai et al. (1975)	تمامی خاک ها	$90 \times (N^{0.341})$
Imai (1977)	تمامی خاک ها	$91 \times (N^{0.337})$
Ohta and Goto (1978)	تمامی خاک ها	$85 \times (N^{0.348})$
Seed and Idriss (1981)	تمامی خاک ها	$61 \times (N^{0.5})$
Imai and Tonouchi (1990)	تمامی خاک ها	$97 \times (N^{0.314})$
Imai and Yoshimura (1975)	تمامی خاک ها	$76 \times (N^{0.33})$
Yokota et al. (1991)	تمامی خاک ها	$121 \times (N^{0.27})$
Ohta and Tosiuna (1970)	آبرفت	$85 \times (N^{0.31})$
Jopan (1980)	رس	$100 \times (N^{0.33})$
Lee (1992)	رس	$84.5 \times ((z+1)^{0.246}) \times N^{0.118}$

Ohsaki and Iwasaki (1973)	خاک فاقد چسبندگی	$59 \times (N^{0.47})$
Sykora and Stoeke (1983)	شن	$100 \times (N^{0.29})$
Gatmiri (2000)	شن و ماسه	$116 \times (N^{0.277})$
Ohta and Goto (1978)	شن	$94 \times (N^{0.34})$
Shibata (1970)	ماسه	$32 \times (N^{0.5})$
Ohta et al. (1972)	ماسه	$87 \times (N^{0.36})$
Ohta and Goto (1978)	ماسه	$88 \times (N^{0.34})$
Jopan (1980)	ماسه	$80 \times (N^{0.33})$
Seed et al. (1983)	ماسه	$56 \times (N^{0.5})$
Okamota et al. (1989)	ماسه	$125 \times N.3$
Lee (1990)	ماسه	$57 \times N.49$
Lee (1992)	سیلت	$82,8 \times (z+1).223N.134$
Jamiolkowski et al. (1988)	رس	$69 \times (z^{0.2}) \times (N^{0.17})$
Jamiolkowski et al. (1988)	ماسه و شن	$75,9 \times (z^{0.2}) \times (N^{0.17})$
Jamiolkowski et al. (1988)	شن	$100 \times (z^{0.2}) \times (N^{0.17})$
Yoshida et al. (1988)	تمامی خاک ها	$83 \times (z^{0.14}) \times (N^{0.25})$
Jafari et al.(2000)	خاک فاقد چسبندگی	$22 \times (N^{0.85})$
Baziar et al. (1998)	خاک تهران	$134 \times (z^{0.2}) \times (N^{0.3})$
Jica (2000)	خاک تهران	$161 \times (N^{0.227})$

۸- تخمین مدول عکس العمل بستر (KS)

مدول عکس العمل بستر (KS) مقدار تنشی است که اگر به صورت قائم بر روی بستری وارد شود، موجب نشست به اندازه یک واحد خواهد کرد.

مقدار دقیق این پارامتر، از **آزمایش بارگذاری صفحه** بدست می آید.

اما می توان این مقدار را با استفاده از جدول زیر نیز تخمین زد.

شایان ذکر است در جدول پایین مقاومت محدود نشده بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع و مدول عکس العمل بستر بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مکعب بیان شده است.

برای تخمین مدول مدول عکس العمل بستر در خاک های چسبنده از جدول زیر استفاده کنید.

خاک چسبنده		
مدول عکس العمل بستر	مقاومت محدود نشده	میزان تراکم
۲,۷	۲-۱	سفت
۵,۴-۲,۷	۴-۲	خیلی سفت
۱۰,۸-۵,۴	بیش از ۴	سخت

برای تخمین مدول مدول عکس العمل بستر در خاک های دانه ای از جدول زیر استفاده کنید.

خاک دانه ای		
مدول عکس العمل بستر	عدد SPT	میزان تراکم
۱,۵-۰,۹	کمتر از ۱۰	شل
۴,۷-۰,۹	۳۰-۱۰	متوسط
۱۸-۲,۹	بیش از ۳۰	متراکم

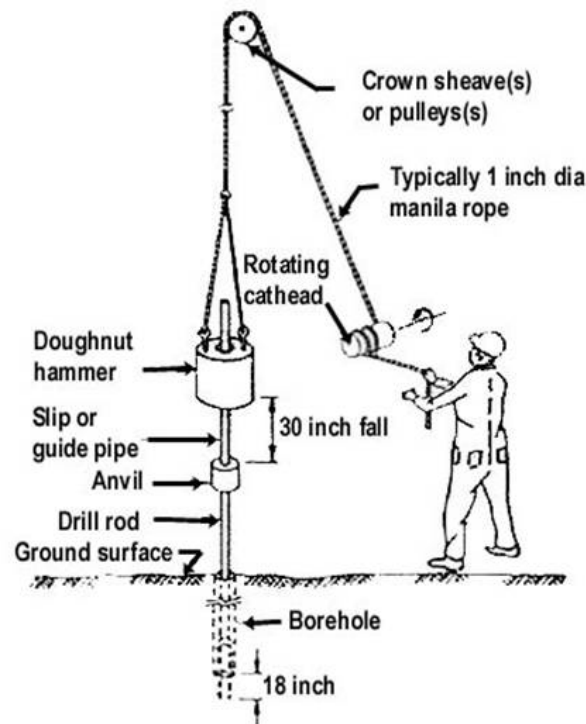
انواع آزمایش نفوذ استاندارد SPT

SPT ماشینی

آزمایش اس پی تی ماشینی یا آزمایش اس پی تی استاندارد، آزمایشی است که توسط **دستگاه حفاری** صورت می گیرد. نوک چکش سه خط پانزده سانتی متری دارد و وزنه ۶۳,۵ کیلوگرمی تا ارتفاع ۷۶ سانتی متری بالا آمده و از بالا رها می شود. نمایی از انجام این آزمایش در تصویر زیر مشاهده می شود.

در این آزمایش اگر عدد اس پی تی بالاتر از عدد پنجاه خاک از نوع دو است.

در ابتدای این مقاله، فیلمی از آزمایش اس پی تی ماشینی قرار گرفته است.



SPT دستی

آزمایش اس پی تی ماشینی در هر موقعیتی قابل انجام نیست. لذا نوع کوچک شده ای از آزمایش اس پی تی استاندارد، SPT دستی یا اس پی تی آلمانی اختراع شد تا بتواند خصوصیات خاک را در همه جا به ما نشان دهد. این آزمایش بر اساس استاندارد DIN آلمان انجام می شود. از این رو به اس پی تی آلمانی نیز معروف است. در این آزمایش مرز بین خاک تیپ دو و تیپ سه، عدد ۱۶۰ است. برای تبدیل نتایج آزمایش اس پی تی دستی به ماشینی از ضریب ۳٫۲ استفاده می شود. مثلاً اگر عدد SPT در آزمایش دستی، ۳۲ شد، به این معناست که اگر آزمایش را با چکش استاندارد ماشینی انجام می دادیم، نتیجه معادل ۱۰ می شد.

آزمایش نفوذ مخروط یا Cone Penetration Test که به اختصار CPT نامیده می شود، از مهمترین آزمایش های مکانیک خاک است.

در این آزمایش یک مخروط به داخل زمین نفوذ می کند. با محاسبه مقاومت نوک و مقاومت جداره این مخروط، اطلاعات مفیدی از ویژگی های آن خاک به دست می آید که موضوع این مقاله است.

در این نوشتار هر آنچه از آزمایش CPT لازم دارید، خواهید یافت.

تاریخچه آزمایش CPT

CPT نخستین بار توسط هلندی ها در سال ۱۹۳۰ ابداع شد.

از این رو به این ابزار آزمایشی، Dutch Cone یا مخروط هلندی نیز گفته می شود.

هدف از ساخت این دستگاه، بررسی مقاومت بستر ریل های راه آهن در هلند بود. هرچند CPT آن زمان با انواع کنونی آن تفاوت چشمگیری داشت، اما ساختار اصلی همانند CPT امروزی است. دستگاهی که در ابتدا ساخته شد، جیبی و کوچک بود و خصوصیات خاک را به صورت ناپیوسته در هر ۲۰ سانتی متر ثبت می کرد. نتایج آن هم باید به صورت دستی ثبت می شد.

بعدها و در سال ۱۹۴۸ این مشکلات با ابداع مخروط های الکتریکی حل شد. در این دستگاه ها، نتایج به صورت پیوسته، توسط ابزارهای الکتریکی ثبت می شدند. در سال ۱۹۶۵ سنجش مقاومت جداره ها هم به سیستم های قبلی اضافه شد. بعد ها و در سال ۱۹۷۴ به مخروط های الکتریکی، یک پیژومتر اضافه شد که با استفاده از آن، می توانستند فشار آب حفره ای را هم محاسبه کنند. به طور کلی شکل و مکانیزم عملکرد دستگاه سی پی تی، به گونه ای است که می توان با اتصال حسگر های مختلف، از خاک محل، اطلاعات مفیدی گرفت.

با توجه به این موضوع از نیم قرن پیش تا کنون، پیشرفت های زیادی در زمینه دستگاه CPT دیده شده است. از جمله معروف ترین این دستگاه ها مخروط لرزه ای یا Sseismic Cone است که توانایی محاسبه سرعت موج برشی در خاک را دارد. از دیگر دستگاه های CPT که به مرور زمان، تکمیل و معرفی شده می توان مخروط با قابلیت اندازه گیری فشار جانبی، مخروط آکوستیک و مخروط لرزه ای را نام برد.

اجزای دستگاه سی پی تی
دستگاه های CPT انواع و اقسام مختلفی دارند. نمی توان نسخه کلی برای همه آنها پیچید. این اجزا از بدو ابداع این آزمایش تا کنون تغییرات چشمگیری داشته اند. اما در حالت کلی، اجزای تشکیل دهنده دستگاه CPT موارد زیر است:

نفوذسنج یا Penetrometer

بخش اصلی دستگاه CPT نفوذسنج است.

این بخش به داخل زمین نود می کند. دارای نوک و غلاف جداره است که با کمک آنها می توان مقاومت نوک و جداره را محاسبه کرد.

در انواع پیشرفته تر این نفوذسنج ها، فیلترهای متخلخلی تعبیه شده که با کمک آنها می توان فشار آب حفره ای در محل آزمایش را محاسبه کرد.

میله های رابط

میله های رابط، میله هایی هستند که با کمک آنها می توان نفوذسنج را به عمق دلخواه از خاک فرو برد.

این میله ها در قطعات یک متری در بازار موجود هستند که با یک سری رزوه به هم متصل می شوند.

جک هیدرولیکی

جک هیدرولیکی تامین کننده نیروی است که با کمک آن بتوان نفوذسنج را به داخل خاک فرو برد.

این جک ها بر روی وانت یا کامیون نصب می شوند.

جک هیدرولیکی موجب می شود نیرو به صورت پیوسته و با آهنگ ثابتی به خاک اعمال شود.

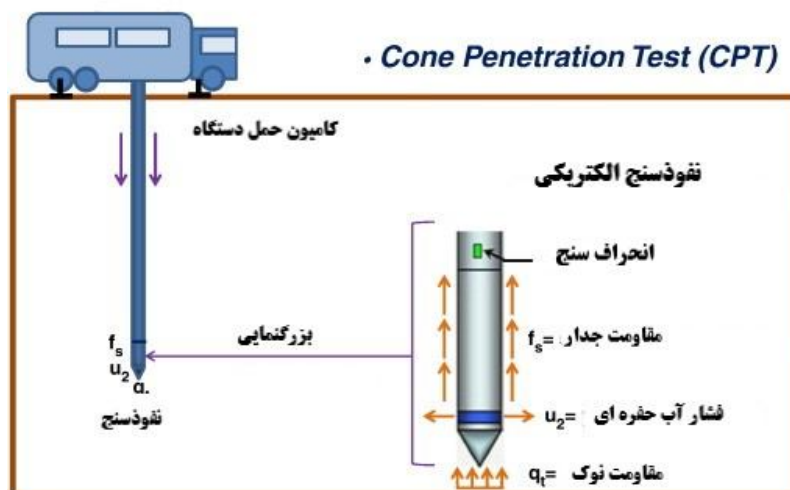
مرکز ثبت نتایج

اطلاعات حاصل از آزمایش خاک، که توسط نفوذ سنج به دست می آید، در ابتدا به صورت آنالوگ است.

باید سیستمی وجود داشته باشد که این اطلاعات آنالوگ را به دیجیتال تبدیل کرده و آنها را ذخیره کند.

ماشین حمل دستگاه

حمل و نقل دستگاه CPT عمدتاً توسط کامیون صورت می‌گیرد. لازم است وزن این کامیون، بیش از ظرفیت دستگاه و در حدود ۲۰ تن باشد. در شکل زیر اجزا تشکیل دهنده CPT را ملاحظه می‌کنید:



تجهیزات آزمایش نفوذ مخروط CPT

انواع دستگاه های CPT

از نظر نحوه اعمال بار، CPT ها به سه دسته کلی تقسیم بندی می شوند.

استاتیکی، دینامیکی و آمیزه ای از هر دو.

سی پی تی های استاتیکی، اعمال نیرو به میله ها توسط جک های هیدرولیکی صورت می گیرد.

این جک ها نیرو را به آرامی و به صورت پیوسته به میله ها منتقل می کنند.

معمول ترین نوع CPT ها، همین نوع استاتیکی آن است.

دسته دوم، سی پی تی هایی هستند که نیرو آن ها توسط چکش و یا سقوط آزاد وزنه به صورت ناپیوسته اعمال می شود. از این جهت، شباهت زیادی به **آزمایش SPT** دارند. دسته سومی هم وجود دارد که بارگذاری آن هم به صورت استاتیکی است و هم به

صورت دینامیکی. اغلب آیین نامه ها و استاندارد ها استفاده از لفظ CPT را صرفاً برای دستگاه های با اعمال بار استاتیکی مجاز دانسته اند و انواع دیگر مثل بارگذاری های دینامیکی نام های دیگری دارند. مثلاً دستگاه CPT دینامیکی به کاوشگر دینامیکی یا DP معروف است.

روش انجام آزمایش نفوذ مخروط CPT

آزمایش سی پی تی بر اساس استاندارد انجام می شود.

مکانیزم کلی این آزمایش به این شکل است که با فرو کردن مخروطی با شکل استاندارد به درون خاک، مقاومت نوک و مقاومت جداره مخروط محاسبه می شود.

با داشتن این مقاومت ها، می توان خصوصیت ها و ویژگی های مختلف خاک ها را به دست آورد.

بر اساس استاندارد این آزمایش، لازم است مخروطی به قطر ۳،۵۷ سانتی متر که دارای زاویه پخی ۶۰ درجه است را با سرعت ۲ سانتی متر در ثانیه به داخل زمین فرو برد.

این فرو بردن توسط جک های هیدرولیکی صورت می گیرد.

با هر میزان نفوذ مقاومت جداره و مقاومت نوک به صورت پیوسته ثبت می شوند. با پایین رفتن نفوذسنج، لازم است میله هایی به انتهای نفوذسنج متصل کنیم تا بتوانیم آنرا به اعماق دلخواه فرو ببریم. باید دقت شود که مرحله اضافه نمودن میله جدید، به آهستگی صورت گیرد تا تغییر فشار خاصی در محیط ایجاد نشود. مقادیر پیوسته اصطکاک جدار و مقاومت نوک در عمای مختلف ترسیم می گردد و با داشتن آنها پارامترهای مختلفی از خاک تخمین زده می شود.

در بخش بعد برخی از این پارامترها معرفی شده اند.

از نتایج CPT چه اطلاعاتی به دست می آید؟

تا کنون راجع به تاریخچه و نحوه انجام آزمایش سی پی تی مفصل بحث کردیم.

در این بخش می خواهیم بدانیم که از نتایج چه استفاده هایی می توان داشت.

با توجه به گستردگی و سهولت انجام آزمایش CPT، محققین زیادی، روابط تخمینی برای مرتبط کردن نتایج این آزمایش با پارامترهای ژئوتکنیکی ارائه کرده اند.

مهم ترین پارامترهای ژئوتکنیکی که با استفاده از نتایج آزمایش سی پی تی به دست می آیند عبارتند از:

۱. مدول برشی یا G

۲. مدول الاستیسیته یا E

۳. زاویه اصطکاک داخلی یا ϕ

۴. مقاومت برشی زهکشی نشده یا C_u

۵. تعیین **طبقه بندی خاک**

۶. ضریب نفوذپذیری خاک

۷. ضریب **تحکیم خاک**

۸. تعیین **دانسیته نسبی خاک**

شایان ذکر است مقادیر بالا را می توان به صورت مستقیم از آزمایش های دیگری نیز به دست آورد.

مثلا می توان زاویه اصطکاک داخلی را از **آزمایش سه محوری** به صورت مستقیم به دست آورد.

اما در مواقعی که صرفا نتایج آزمایش CPT موجود است، می توان پارامترهای بالا را نیز تخمین زد.

مزایا و معایب آزمون نفوذ مخروط

همانند تمام آزمایش های ژئوتکنیکی دیگر، این آزمایش نیز دارای معایب و همچنین نقاط قوتی است که در این بخش به آنها اشاره می کنیم:

مزایای آزمایش نفوذ مخروط CPT

۱. نتایج آزمایش به اپراتور و نحوه انجام آزمایش او، وابسته نیست.

۲. سرعت انجام آزمایش، نسبتا بالاست.

۳. اطلاعات از پروفیل گمانه به صورت پیوسته به دست می آید.

۴. در مقابل هزینه انجام شده، اطلاعات زیادی به دست می آید.

لذا این آزمایش جز تست های اقتصادی در دنیای ژئوتکنیک است.

۵. مبانی تئوری این آزمایش استوار و قوی است.

۶. این آزمایش برای خاک های نرم و **خاک های ریزدانه**، کارایی بالایی دارد.

معایب آزمایش نفوذ مخروط CPT

۱. انجام آزمایش در خاک های سخت و درشت دانه دشوار است و کارایی ندارد.

۲. لازم است برای انجام این آزمایش، از اپراتور مجرب و آموزش دیده استفاده کرد.
 ۳. عمق انجام آزمایش به خصوص در خاک های سخت، محدود است.
 ۴. رفتار خاک در محدوده تنشهای کوچک قابل بررسی نیست.
 ۵. در حین انجام این آزمایش، نمونه خاک به دست نمی آید.
- آزمایش دانهول **Downhole** جز آزمایش های پرکاربرد در ژئوتکنیک است. آزمایش های ژئوفیزیکی با هزینه کم و سرعت زیادی انجام می شوند و اغلب اطلاعات آنها کیفی است و کمی نمی باشد. در این نوشتار شرح کامل تست دانهول بیان شده است.

انواع آزمایش های ژئوفیزیک

این دسته از آزمایش ها می تواند به عنوان اطلاعات تکمیلی مطالعات ژئوتکنیک استفاده شوند.

آزمایش های ژئوفیزیکی به دو دسته کلی تقسیم بندی می شوند:

۱. آزمایش های لرزه ای

۲. آزمایش های ژئوالکتریک

آزمایش های ژئوسسمیک یا آزمایش های لرزه ای خود به دو دسته زیر تقسیم بندی می شوند:

- روش های سطحی

در این سبک از آزمایش های لرزه ای اصلا گمانه ای حفر نمی شود.

شناسایی ها صرفا به صورت سطحی صورت می گیرد.

این دسته از آزمایش ها جز دسته **آزمایش های خاک بدون حفاری** قرار دارند.

- روش های درون گمانه ای

در این روش از آزمایش های لرزه ای، گمانه حفر می گردد.

ابزارهای گیرنده موج را درون گمانه های حفر شده قرار می دهند.

این گمانه می تواند از همان گمانه ای استفاده شود که جهت مطالعه ژئوتکنیکی حفاری شده است.

ساز و کار آزمایش دانهول

آزمایش دانهول **Downhole** طی مراحل گام به گام زیر انجام می شود:

۱- حفاری گمانه یا چاه

در ابتدا لازم است یک گمانه به صورت ماشینی یا دستی حفاری گردد. برای اطلاع از این که کدام نوع از حفاری مناسب تر است



می توانید مقاله **حفاری دستی بهتر است یا ماشینی؟** را مطالعه فرمایید.

تجهیزات آزمایش دانهول **Downhole**

۲- نصب ژئوفن ها

در این بخش و پس از نصب لوله پی وی سی در داخل گمانه ها، ژئوفن ها را در داخل گمانه قرار می دهیم. ژئوفن ها گیرنده هایی هستند که برای دریافت و ثبت امواج ازسال شده از سطح زمین مورد استفاده قرار می گیرند. گاهی جهت سهولت کار می توان از یک ژئوفن استفاده کرده و با بالا کشیدن مرحله ای آن ژئوفن، اطلاعات اعماق دیگر را نیز ثبت کرد.

۳- پر کردن اطراف لوله با ماسه

در این مرحله لازم است اطراف لوله پی وی سی قرار داده شده در داخل گمانه را از شن و ماسه پر کرد تا اتصال مناسبی بین لوله و گمانه برقرار شود.

۴- وارد کردن ضربه

در این بخش لازم است صفحه فلزی در مجاورت گمانه قرار داده و با پتک بر روی آن ضربه ای وارد نماییم. بسته به زاویه ضربه ای که پتک بر صفحه فلزی وارد می نماید، امکان ایجاد امواج برشی یا فشاری وجود دارد. پس از وارد شدن ضربات امواجی ایجاد می شود و به داخل زمین نفوذ می کند. زمان رسیدن این امواج توسط ژئوفن ها ثبت می شود. با داشتن زمان رسیدن امواج و فاصله ژئوفن تا محل ضربه، می توان سرعت امواج را محاسبه کرد.

کاربرد آزمایش Downhole

پس از آماده سازی شرایط ذکر شده در بالا، اطلاعات حاصل از عبور امواج از هر عمق توسط یک دستگاه ثبت می گردد. از اطلاعات حاصل از آزمایش دانهول می توان سرعت موج برشی را تعیین نمود. از سرعت موج برشی می توان **تیپ بندی خاک** را تعیین کرد.

عوامل ایجاد خطا در تست دانهول

عوامل زیر می تواند موجب ایجاد خطا در آزمایش دانهول Downhole گردد.

لذا حتی المقدور لازم است تا از انجام این آزمایش در موارد زیر اجتناب گردد.

۱. نزدیک جاده ها: عبور و مرور اتوموبیل ها ایجاد نویز کرده و در نتایج آزمایش دانهول خلل ایجاد می کند.
۲. نزدیکی به ساحل: برخورد امواج دریا می تواند ایجاد نویز کرده و در نتایج آزمایش دانهول خلل ایجاد کند.
۳. لایه های عمیق تر نرم تر از لایه های بالایی باشند.
۴. سطح بین لایه ها نامنظم باشد.
۵. انجام آزمایش در نهشته های برجا

۶. آزمایش دانسیته در محل یا سنباتل (Sand Bottle) از جمله آزمایش های متداول در مکانیک خاک است که برای به دست آوردن چگالی خاک انجام می شود.

از آزمایش دانسیته در محل برای **سنجش تراکم خاک** نیز استفاده می شود.

در این نوشتار به شرح آزمایش دانسیته در محل می پردازیم.

یک فیلم کامل از این آزمایش آزمایشگاهی نیز در این نوشتار ارائه شده است.

۷. اساس آزمایش سنباتل

۸. هدف از آزمایش دانسیته در محل به دست آوردن چگالی خاک است.

از دوران دبیرستان به یاد داریم که چگالی به معنای جرم تقسیم بر حجم بود.

حالا از همین تعریف برای به دست آوردن چگالی خاک استفاده می کنیم.

درون زمین گودالی حفر می کنیم. مقدار خاکی را که از گودال برآمده به راحتی قابل وزن کردن است.

۹. اما به دست آوردن حجم این خاک کار ساده ای نیست. چرا که شکل منظمی ندارد و با استفاده از قوانین هندسه نمی توان حجم آن را به دست آورد. راه حل این است که داخل گودال حفر شده ماسه ای با چگالی معلوم می ریزند. این ماسه، ماسه استاندارد نام دارد. مقدار وزن ماسه ای که به داخل گودال ریخته شده است را محاسبه می کنیم. چون چگالی ماسه مشخص است، می توان حجم ماسه انتقال یافته به گودال را محاسبه کرد. از این طریق حجم گودال به دست می آید. از تقسیم کردن جرم خاک به حجم خاک، می توان چگالی آن را بدست آورد. گام اول: وزن کردن اولیه

ابتدا لازم است برخی از تجهیزات را توزین کرد. کیسه پلاستیکی که قرار است خاک گودال قرار گیرد وزن می کنیم. با توجه به اینکه وزن نایلون خیلی کم است، برای آزمایش هایی که حساسیت بالایی ندارند می توان از این بخش صرف نظر کرد. سپس باید وزن خود دستگاه سنباتل را محاسبه کنیم. سنباتل در دو نوع کوچک و بزرگ ساخته می شود. وزن نوع بزرگ آن حدود یک کیلو و سیصد گرم است. هنگام وزن کردن دستگاه باید اطمینان حاصل کنیم که سنباتل خالی است. لازم است چند بار آن را سر و ته کنیم و پیچ آن را باز و بسته کنیم تا مطمئن شویم خاکی داخل آن نیست. پس از وزن کردن کیسه و سنباتل، ماسه استاندارد می ریزیم که از قبل خریداری کرده ایم باز کرده و درون دستگاه سنباتل می ریزیم. اینکه چه مقدار ماسه استاندارد درون سنباتل بریزیم، بستگی به حجم حفره ای دارد که قرار است کنده شود. اگر حفره خیلی بزرگ باشد باید ماسه زیادی درون سنباتل بریزیم و برعکس. پس از اینکه ماسه استاندارد درون سنباتل ریخته شد، لازم است وزن ماسه استاندارد به همراه سنباتل نیز محاسبه گردد. گام دوم: حفر گودال

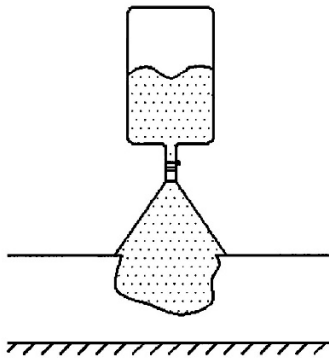
در این مرحله لازم است گودالی درون سطح زمین و یا درون چاه دستی که از قبل حفاری کرده ایم، کنده شود. این کار با کمک یک سینی که درون آن حفره ای به قطر ۱۰ سانتی متر دارد انجام می شود. روش کار بدین صورت است که سینی را روی سطح صافی قرار می دهیم و به کمک قلم و چکش داخل آن را حفاری می کنیم. تمام خاکی که در این مرحله از درون حفره بیرون آمده را درون کیسه پلاستیکی می ریزیم. همان کیسه پلاستیکی که در گام اول وزن کرده بودیم. پس از پر کردن نایلون، در کیسه را به دقت می بندیم تا چیزی بیرون نریزد.



حفر گودال برای انجام آزمایش دانسیته در محل

گام سوم: قرار دادن سنباتل روی سینی
سنباتلی که در گام اول پر از ماسه استاندارد کرده بودیم، روی سینی قرار می دهیم. روی سینی محل مخصوصی برای قرارگیری سنباتل دارد.

اگر دستگاه به درستی روی سینی قرار گیرد دیگر تکان نمی خورد. پس از استقرار دستگاه، پیچ روی دستگاه را باز می کنیم تا ماسه به درون حفره منتقل شود. پس از آنکه ماسه دیگر تکان نخورد و مطمئن شدیم که گودال حفر شده از ماسه استاندارد پر شده است، پیچ روی سنباتل را می بندیم و آن را از روی سینی بر می داریم.



آزمایش دانسیته در محل

گام چهارم: وزن کردن ثانویه
در این مرحله وزن کیسه پر از خاکی که در مرحله دوم محاسبه کردیم و وزن دستگاه سنباتلی که بخشی از خاک آن در مرحله سوم درون گودال رفته بود را به دست می آوریم.
دقت ترازو با توجه به حساسیت آزمایش متفاوت است.

گام پنجم: محاسبات
در بخش آخر لازم است محاسبات نهایی صورت گیرد.
اولین موردی که لازم است محاسبه گردد حجم مخروط زیر سنباتل است.
این حجم با روش های مختلف قابل محاسبه است.
یکی از روش ها این است که سنباتل را روی یک سطح صاف قرار دهید.

آنقدر داخل دستگاه سنباتل ماسه استاندارد بریزد تا مخروط زیر آن پر شود ولی چیزی داخل دستگاه قرار نگیرد. با توجه به اینکه ماسه استاندارد را می دانیم ، با وزن کردن خاک حبس شده زیر دستگاه، می توان حجم مخروط را به دست آورد. از تفاضل وزن سنباتل محاسبه شده در گام اول و چهارم می توان وزن ماسه ای که درون گودال جای گرفته را حساب کرد. چون چگالی ماسه استاندارد را می دانیم، می توانیم حجم حفره را حساب کنیم. حال وزن خاک حاصل از کندن گودال که در گام چهارم به دست آوردیم را تقسیم بر حجم گودال می کنیم تا چگالی خاک به دست آید.

آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) از جمله قدیمی ترین آزمایش های صحرایی در ژئوتکنیک است که با استفاده از نتایج آن می توان داده های زیادی از جمله ظرفیت باربری، مدول عکس العمل بستر و ... را بدست آورد. نام این آزمایش ترجمه شده عبارت انگلیسی آن (Plate Load Test) است که به اختصار به آزمایش PLT شهرت پیدا کرده است. در این نوشتار شرح کامل این تست صحرایی مکانیک خاک به همراه نتایج حاصل از آن، خدمت شما مهندسیین گرامی ارایه می گردد.

تجهیزات آزمایش PLT

تجهیزات انجام آزمایش بارگذاری صفحه، عبارتند از:

- صفحه فولادی

- جک هیدرولیکی
- گیج اندازه گیری فشار قایم
- گیج اندازه گیری نشست

روش انجام آزمایش بارگذاری صفحه

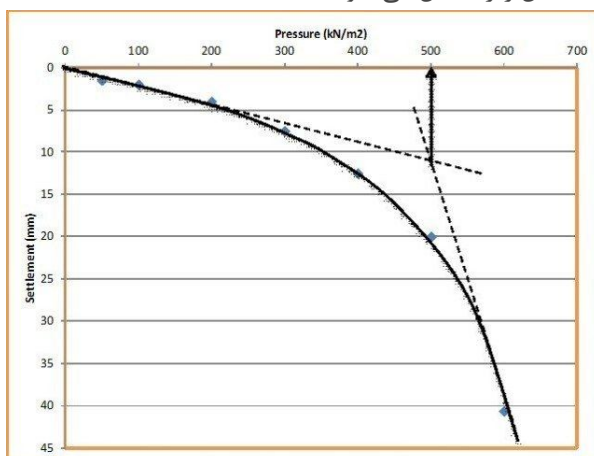
اگر این آزمایش بر روی صفحاتی با اندازه واقعی پی صورت گیرد مستقیماً ظرفیت باربری حاصل می شود. اما این کار در خیلی از مواقع مقرون به صرفه نیست.

چرا که نیاز به بارهای عظیم و بزرگ دارد.

در این شرایط تجهیزات بزرگی جهت انتقال این بار عظیم نیز لازم است که به پیچیدگی های کار می افزاید. چاره کار آن است که از صفحاتی با اندازه های کوچکتر استفاده شود.

از این رو از صفحاتی با اندازه های کوچکتر از پی اصلی در آزمایش بارگذاری صفحه استفاده می شود و با اعمال یک سری ضرایب خاص، اعداد ظرفیت باربری پی اصلی محاسبه می گردد.

استاندارد انجام این آزمایش است. روش انجام آزمایش بدین صورت است که در ابتدا یک ظرفیت باربری برای خاک حدس میزنیم. سپس این بار حدس زده شده را به چهار یا پنج بخش تقسیم بندی می کنیم. هر بخش را به خاک اعمال کرده و یک ساعت صبر می کنیم تا در اثر اعمال این بار نشست لازم در خاک ایجاد شود. در هر مرحله میزان نشست را در برابر بار اعمالی یادداشت می کنیم. در انتهای آزمایش نموداری به شکل زیر حاصل می شود.



با استفاده از دو مماس رسم شده بر قسمت ابتدایی و انتهایی نمودار آزمایش بارگذاری صفحه، می توان ظرفیت باربری را همچون نمودار بالا بدست آورد.

روش های انجام تست PLT در ایران

هر آزمایش ژئوتکنیکی بسته به شرایط محلی در آن کشور ممکن است دستخوش تغییراتی گردد. در کشور عزیزمان ایران، آزمایش بارگذاری صفحه ای به یکی از سه روش زیر انجام می شود.

۱- انجام آزمایش بارگذاری صفحه در گمانه دستی

متداول ترین روش انجام آزمایش بارگذاری صفحه در پروژه های معمول ساختمان سازی در شهر تهران است.

در این روش تراز قرارگیری صفحه همان تراز کف گالری است.

در این روش هدف از حفر گالری، گیردار کردن قسمت بالایی جک هیدرولیکی به سقف است. ابعاد مناسب گالری ۱*۲*۰٫۸ متر می باشد.

۲- انجام آزمایش PLT در ترانسه خاکی

در این روش تراز قرارگیری صفحه همان تراز کف گالری است. هدف از حفر گالری، مهیا کردن شرایطی است که بتوان جک هیدرولیکی را نصب کرد. گالری به شکل کله قندی و با ابعاد ۱ در ۲ در ۰,۸ متر حفاری می شود. انجام آزمایش در ترانسه خاکی حالت خاصی از انجام تست بارگذاری صفحه در گمانه دستی است.

۳- انجام آزمایش در کف چاه

در روش سوم، برای ثابت کردن و گیرداری جک هیدرولیکی از یک تیر بلند یا کامیون و یا هر جسم سنگین دیگر همچون کیسه های سیمان استفاده می شود. نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه

۱- ظرفیت باربری

مقدار ظرفیت باربری در خاک های رسی مستقل از ابعاد پی است.

لذا هنگام انجام آزمایش PLT بر خاک های رسی، همان مقدار حاصله را می توان ظرفیت باربری پی اصلی دانست. البته این موضوع صرفاً برای رس های اشباع صادق است.

در **خاک های رسی** کاملاً اشباع، زاویه اصطکاک داخلی صفر است. لذا مقدار جمله اول در رابطه ظرفیت باربری ترزاقی و هانسن صفر می شود. برای خاک های دیگر که فی و سی دارند نمی توان مقدار ظرفیت باربری را عیناً برابر مقدار برآمده از PLT دانست. برای اینگونه خاک ها مقدار ظرفیت باربری بدست آمده از صفحه، به نسبت طول پی به طول صفحه بزرگ می شود.

۲- محاسبه نشست پی

نشست پی ها به طور غیر مستقیم از ظرفیت باربری به دست می آید. پس اگر مقدار ظرفیت باربری مشخص بود می توان نشست متناظر با آن را نیز محاسبه کرد. پس از محاسبه میزان نشست در صفحه لازم آنرا با ضرایب تبدیلی به نشست در پی اصلی ارتباط داد. برای ایجاد این ارتباط روابط گوناگونی ارائه شده است که معروف ترین آن ها روبرتی است که توسط پک و ترزاقی ارائه شده است. این رابطه ها برای خاک های ریزدانه و درشت دانه دو مقدار متفاوت پیشنهاد می کند.

۳- محاسبه مدول الاستیسیته

یکی از کاربرد های آزمایش **Plate Load Test** محاسبه مقدار E یا مدول الاستیسیته در خاک هاست. پس از پرسیمتری و دیلاتومتری می توان از آزمایش بارگذاری صفحه نتایج خوب و واقع بینانه ای انتظار داشت. مقدار این پارامتر از فرمولی که در استاندارد **BS 5930:1981** ارائه کرده است به دست می آید.

۴- تعیین مقاومت برشی خاک

هر چند روش اصلی بدست آوردن مقاومت برشی انجام **آزمایش سه محوری** است، از تست بارگذاری صفحه نیز می توان جهت تخمین مقاومت برشی در خاک های رسی زهکشی نشده استفاده کرد. در این حالت نباید بار اعمالی به صورت مرحله به مرحله اعمال شود. لازم است بار با یک آهنگ یکنواخت به صفحه اعمال می شود. سپس با استفاده از رابطه ای که کلیتون در سال ۱۹۹۱ ارائه کرده است می توان مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده (Cu) را به دست آورد.

۵- تخمین مدول عکس العمل بستر (KS)

مدول عکس العمل بستر مقدار تنشی است که به صورت کاملاً قائم به بستری وارد می شود و موجب تغییر شکل به اندازه یک واحد در آن می شود. گاهی امکان انجام آزمایش صحرائی بارگذاری صفحه امکان پذیر نبوده و یا اینکه انجام آن مقرون به صرفه نمی باشد در این شرایط می توانیم از نتایج آزمایش های قبلی استفاده نماییم.

یکی از خروجی های آزمایش بارگذاری صفحه ای، مدول عکس العمل بستر است. در صورتی که بخواهیم تقریبی از خاک محل بدست آورده و یا نتایج آزمایش خود را صحت سنجی کنیم می توانیم از جدول زیر استفاده نماییم.

مدول عکس العمل بستر بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مکعب		نوع خاک
حداکثر	حداقل	
۱,۶	۰,۴۸	ماسه سست
۸	۰,۹۶	ماسه با تراکم متوسط
۱۲,۸	۶,۴	ماسه متراکم
۸	۳,۲	ماسه رس دار با تراکم متوسط
۴,۸	۲,۴	ماسه لای دار با تراکم متوسط
۲,۴	۱,۲	رس سست
۴,۸	۲,۴	رس متوسط
۸,۶	۴,۸	رس سفت

روش دیگر محاسبه مقدار **KS** استفاده از نتایج است. در این روش با استفاده از عدد حاصل از آزمایش اس پی تی و یا داشتن میزان تراکم خاک می توان مقدار مدول عکس العمل بستر را تخمین زد. برای تخمین مدول عکس العمل بستر در خاک های دانه ای از جدول زیر استفاده کنید.

خاک دانه ای		
مدول عکس العمل بستر	عدد SPT	میزان تراکم
۱,۵-۰,۹	کمتر از ۱۰	شل
۴,۷-۰,۹	۱۰-۳۰	متوسط
۱۸-۲,۹	بیش از ۳۰	متراکم

برای تخمین مدول عکس العمل بستر در خاک های چسبیده از جدول زیر استفاده کنید.

خاک چسبیده		
مدول عکس العمل بستر	مقاومت محدود نشده	میزان تراکم

۲,۷	۲-۱	سفت
۵,۴-۲,۷	۴-۲	خیلی سفت
۱۰,۸-۵,۴	بیش از ۴	سخت

خطاهای معمول در تست بارگذاری صفحه

خطا در انجام آزمایش های مکانیک خاک امری غیرقابل اجتناب است.

برخی از این خطاها تاثیر زیادی در صحت نتایج داشته و برخی دیگر تاثیر کمتر دارند.

در این بخش چهار مورد از خطاهای رایج در آزمایش PLT بیان شده و راهکارهایی جهت کاهش اثرات خطا معرفی می گردد.

۱- عدم رعایت فاصله تا دیوار

عدم رعایت فاصله صفحه بارگذاری تا دیوار ترانشه اصلی ترین عامل ایجاد خطا در نتایج آزمایش PLT می باشد.

در آزمون هایی که در گمانه دستی یا ترانشه انجام می شود، این خطا غیرقابل اجتناب است و همواره وجود دارد.

۲- تکیه گاه انعطاف پذیر

لازم است محل قرارگیری جک هیدرولیکی کاملا صلب باشد تا مانع از حرکت یا جابجایی شود.

اگر به جای تکیه گاه صلب از محل گیرداری انعطاف پذیر استفاده شود، در نتایج آزمایش خطا ایجاد می شود.

این شرایط برای مواقعی پیش می آید که هنگام حفر گمانه دستی، از سقف گالری به عنوان تکیه گاه استفاده می شود.

سقف گالری محیطی انعطاف پذیر است. چرا که با اعمال فشار متراکم می شود.

۳- عمق آزمایش بارگذاری صفحه

آزمایش بارگذاری صفحه را نباید در اعماق زیاد زمین انجام داد.

هنگامی که آزمایش PLT در گمانه دستی و در گالری انجام می شود، در اعماق زیاد گوه های گسیختگی بر روی نتایج آزمایش

تاثیر می گذارد.

۴- ضرایب تبدیل نامعتبر

هنگام تبدیل نتایج آزمایش برآمده از یک صفحه ۳۰ در ۳۰ به نتایج یک پی واقعی، از ضرایب تبدیلی استفاده می شود.

این ضرایب تبدیل برای یک خاک خاص تحت یک شرایط خاص به دست آمده است و نمی توان آن را برای تمامی خاک ها معتبر

دانست.

استفاده از این ضرایب تبدیل نامعتبر می تواند موجب خطا در تست PLT شود.



آزمایش بارگذاری صفحه

قیمت آزمایش بارگذاری صفحه

هزینه انجام آزمایش بارگذاری صفحه همانند تمامی آزمایش های دیگر ژئوتکنیکی تابع عوامل مختلفی است و ثابت نمی باشد. از مهمترین عوامل موثر در قیمت تست PLT محل انجام آزمایش، فصل انجام آزمایش و... می باشد. در صورتی که قصد انجام آزمایش بارگذاری صفحه، در محل پروژه خود را دارید با ما تماس بگیرید و از آخرین قیمت ها با خبر شوید. برای کسب اطلاعات بیشتر می توانید مقاله **قیمت آزمایش خاک** را مطالعه فرمایید.

آزمایش برش پره یا Vane Shear Test از جمله آزمایش های ساده صحرایی در ژئوتکنیک است که در **خاک های رسی** انجام شده و هدف آن به دست آوردن مقاومت برشی زهکشی نشده خاک هاست. در این نوشتار کوتاه ضمن آشنایی با آزمایش چگونه انجام آن و کاربردهای آن را خواهید آموخت. تجهیزات آزمایش برش پره ابزارهای مورد استفاده در آزمایش VST شامل موارد زیر است:

۱- تیغه چهار پره

این چهار پره به هم عمود است.

ارتفاع پره دو برابر عرض پره هاست.

قطر پره های استاندارد ۶,۵ سانتی متر و ارتفاع آن ۱۳ سانتی متر است.

در پره های استاندارد، ضخامت پره ۲ میلی متر است.

عموما شکل پره ها مستطیلی است، اما گاهی برای نفوذ بهتر در خاک، آنها را به شکل نوک تیز می سازند.

پره ها در سایزها و ابعاد متنوعی ساخته می شوند.

پره های بزرگتر برای خاک های قوی تر به کار می روند و نتایج دقیق تری نیز می توان با آنها به دست آورد.

اما باید توجه کرد که پره بزرگتر، دست خوردگی بیشتری هم در پی دارد.

همچنین چرخاندن پره های بزرگ در خاک بسیار سخت و گاهی غیر ممکن است.

لذا باید اندازه پره را متناسب با میزان سختی خاک انتخاب نمایید.

۲- میله جهت اتصال پره ها به منبع تولید چرخش یا ترک

این میله در اغلب موارد قطری معادل ۱,۲۷ سانتی متر دارند.

۳- منبع تولید چرخه

اعمال ترک یا نیرو چرخشی می تواند به صورت دستی و یا توسط ماشین انجام شود.

۴- ابزاری جهت اندازه گیری گشتاور اعمالی به میله

۵- تجهیزاتی جهت کاهش اصطکاک میله ها

در شکل زیر نمایی از ابزارآلات و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش برش پره را مشاهده می کنید:



تجهیزات آزمایش برش پره

روش انجام آزمایش برش پره
این آزمایش با استفاده از استاندارد انجام می شود.
شیوه کار به این صورت است که پره ای متناسب با نوع خاک انتخاب شده و به داخل زمین فرو برده می شود.
پس از قراردادن پره در داخل زمین ۵ دقیقه صبر می کنیم تا خاک شرایط قبلی خود را بازیابد.
سپس پره را با سرعت ۶ درجه در دقیقه می چرخانیم.
پس از ۲ تا ۵ دقیقه خاک به گسیختگی می رسد.
مدت زمان گسیختگی در خاک های مختلف، متفاوت است.
مثلا در رس های خیلی نرم، زمان گسیختگی گاهی تا ۱۵ دقیقه هم ادامه می یابد.
در دستگاه هایی که عملیات به صورت کاملا دستی انجام می شود، باید میزان گشتاور اعمالی را هر سی ثانیه ثبت کنیم و سپس نمودار گشتاور نسبت به زمان را ترسیم کنیم.
امروزه این کار توسط نرم افزارها و ابزارهای دیجیتال انجام می شود.
خروجی این آزمایش، مقاومت زهکشی نشده خاک است.
باید دقت شود که در حین انجام آزمایش، مقداری اصطکاک بین خاک و میله در حال دوران وجود دارد.
باید با استفاده از ابزارهایی این میزان اصطکاک محاسبه شده و از گشتاور اصلی کم شود.
آزمایش VST چه کاربردی دارد؟

عمده کاربرد آزمایش برش پره، تخمین خصوصیات خاک های ریزدانه مثل رس یا سیلت در حالت اشباع است و در **انواع دیگر خاک** کاربرد ندارد.

این آزمایش را نمی توان در خاک های درشت دانه مثل شن ها انجام داد.
چرا که به دلیل ظرافت پره ها، امکان فرو بردن آنها داخل خاک های سختی مثل شن ها نیست.
مشخصات زیر را با استفاده از آزمایش پره می توان به طور مستقیم تعیین کرد:

۱. درجه حساسیت خاک
۲. مقاومت برشی زهکشی نشده خاک در حالت ریمولد شده
۳. مقاومت برشی زهکشی نشده
۴. آزمایش پرسومیتری یا فشارسنجی از جمله قوی ترین و پرکاربردترین آزمایش های صحرایی در ژئوتکنیک است که به سبب روش خاص بارگذاری در آن و اطلاعات مفید فراوانی که به ما می دهد، جایگاه ویژه ای در علم مکانیک خاک پیدا کرده است.
در این نوشتار، هر آنچه از تست پرسومیتری بخواهید، خواهید یافت.
۵. پرسومیتری چیست؟
۶. آزمایش پرسومیتری در سال ۱۹۵۴ توسط محقق فرانسوی با نام لوییس منارد ابداع شد.
شیوه کلی این آزمایش به این صورت است که یک بالون لاستیکی به داخل زمین فرو برده می شود.
با استفاده از منبع تولید فشار، داخل این بادکنک پر از باد می شود.
باد شدن این بالون لاستیکی موجب می شود که به خاک فشار وارد شود و خاک، مقداری جابجا شود.
با محاسبه فشار اعمالی در مقابل جابجایی صورت گرفته می توان پارامترهای ارزشمند ژئوتکنیکی زیادی به دست آورد که موضوع بحث این مقاله است.
۷. پرسومیتری تنها آزمایشی است که نیروی افقی بر خاک وارد می کند.
از آنجایی که نحوه بارگذاری بر خاک در این آزمایش خیلی به بارگذاری در طبیعت شبیه است، داده های حاصل از

آزمایش فشارسنجی بسیار با ارزش و قابل اعتناست.

این آزمایش در خاک و سنگ قابل انجام است.

اما به طور کلی هر چه خاک قوی تر باشد، دیتای به دست آمده از این تست صحرائی دقیق تر بوده و در خاک های

سست، نتایج قابل اعتمادی در بر نخواهد داشت.

انواع آزمایش پرسیومتری

پرسیومتری به سه روش مختلف انجام می شود. با اینکه اصول کلی آزمایش در تمام انواع ثابت است، در جزییات و نحوه اجرا با یکدیگر متفاوت هستند.

تست پرسیومتری به طور کلی به سه روش انجام می شود:

- آزمایش پرسیومتری پیش حفار
- آزمایش پرسیومتری خود حفار
- آزمایش پرسیومتری تغییر مکانی

حال به تشریح و بررسی هر کدام از سه روش بالا می پردازیم:

۱- تست پرسیومتری پیش حفار

در این نوع از آزمایش، ابتدا لازم است درون زمین **گمانه** حفاری شود.

سپس تجهیزات انجام آزمایش از طریق گمانه ای که قبلا حفاری کرده بودیم به درون زمین منتقل می شود.

سپس آزمایش ها به طریقی که قبلا گفتیم صورت می پذیرد.

این روش، برای انجام آزمایش در سنگ ها و خاک های متراکم مناسب است.

چرا که تنها در این نوع از خاک ها پایدار می ماند. اگر خاک ضعیف یا سست باشد، احتمال آن وجود دارد که گمانه، قبل از ارسال تجهیزات به درون زمین، ریزش کند.

ابعاد پراب یا سوندی که قرار است داخل گمانه ارسال شود باید طوری باشد که بتوان به راحتی آن را داخل گمانه منتقل کرد.

از این رو برای انجام این نوع آزمایش، از سوند های تک سلولی و یا سه سلولی استفاده می شود.

برخی محققین اعتقاد دارند این روش از انجام آزمایش به دلیل اینکه سر مته دستگاه حفاری قبلا موجب دست خوردگی خاک شده است، نتایج دقیقی نخواهد داشت.

اولین پرسیومتری که توسط منارد ساخته شده بود از این نوع بود.

این گونه آزمایش ها به دو روش تغییر شعاعی و تغییر حجمی انجام می شوند.

۲- تست پرسیومتری خود حفار

آزمایش پرسیومتر خود حفار دو ایراد بزرگ داشت.

یکی اینکه **دستگاه حفاری** که قبلا زمین را سوراخ کرده بود، خاک را دست خورده کرده بود و نتایج آزمایش را نادرست می کرد.

دوم اینکه در خاک های نرم و سنگ های ضعیف قابل انجام نبود.

چرا که گمانه پایدار نمی ماند.

محققین برای رفع دو مشکل بالا، دستگاه پرسیومتر خود حفار را ابداع کردند.

در این دستگاه، ساز و کاری تعبیه شده که می تواند به طور مستقل زمین را حفاری کند.

در این شرایط میزان دست خوردگی خیلی کاهش می یابد.

در این روش امکان انجام آزمایش خاک های سست و نرم هم وجود دارد.

چرا که میله متصل به پرسیومتر داخل گمانه است و در حین حفاری گمانه ریزش نمیکنند.

این روش به دو روش انگلیسی و فرانسوی انجام می شود.
نوع انگلیسی آن عمدتاً برای انجام آزمایش در **خاک های رسی پیش تحکیم** یافته انجام می شود.
۳- پرسیومترهای دریایی
دو روش آزمایش قبلی صرفاً در خشکی کاربرد داشت.
در سال ۱۹۸۲ دستگاهی ابداع شد تا با کمک آن امکان انجام تست پرسیومتری در داخل دریا نیز میسر می شد.
این پرسیومتر دارای سوند تک سلولی تغییر حجمی است که می تواند فشاری معادل ۲,۵ مگا پاسکال را تحمل کند.
ظرفیت کرنشی این سوند به قدری زیاد است که می تواند تا دو برابر اندازه اولیه خود تغییر حجم دهد.
اجزای پرسیومتر

هر دستگاه پرسیومتر به طور کلی از سه بخش تشکیل شده است:

الف- سوند یا پراب

سوند یا پراب سر دستگاه پرسیومتر است.

این قسمت وظیفه منبسط شدن و فشار آوردن به خاک را دارد.

در برخی از انواع پرسیومترها، وسیله ای جهت حفاری زمین نیز روی سوند تعبیه شده است.

ب- واحد کنترل

این بخش از دستگاه روی زمین قرار می گیرد.

وظیفه آن تامین فشار و کنترل فشار درون بالون و همچنین ثبت و نگهداری اطلاعات را دارد.

ج- بخش رابط

این بخش وظیفه اش ایجاد ارتباط بین دو بخش قبلی است.

این بخش شامل لوله های انتقال فشار و کابل های برق می باشد.

مراحل انجام آزمون پرسیومتری

آزمایش پرسیومتری با توجه به استاندارد انجام می شود.

این آزمایش به دو روش کنترل تنش و کنترل کرنش انجام می شود.

شیوه کلی آزمایش بدین شکل است که در ابتدا گمانه ای حفر می شود.

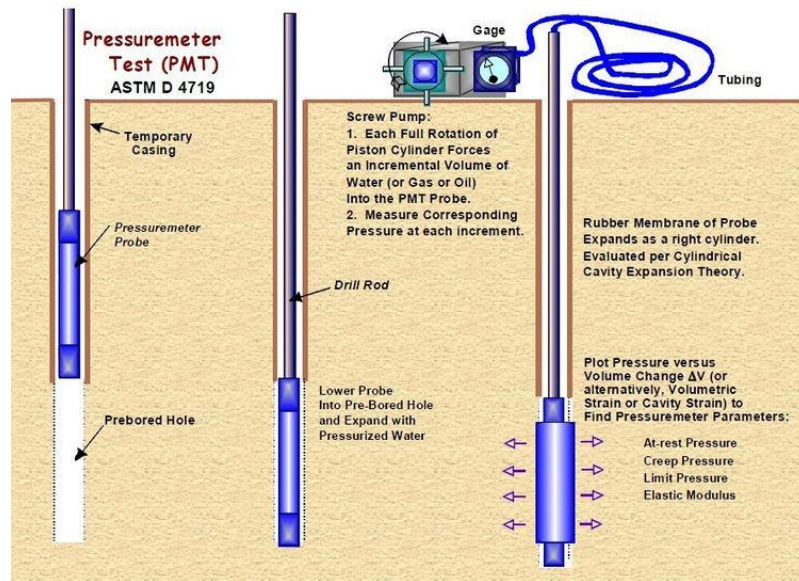
حال این گمانه می تواند توسط پرسیومتر خودحفر تولید شود یا توسط

باید مراقب بود که هنگام حفاری، دستخوردگی در خاک، حداقل مقدار ممکن باشد.

چرا که دست خوردگی تاثیر زیادی در نتایج خواهد داشت.

به طور کلی مراحل انجام آزمایش پرسیومتری در موارد زیر خلاصه می گردد:

- کالیبره کردن تجهیزات مختلف دستگاه پرسیومتر
- حفاری زمین در شرایطی که پرسیومتری به روش پیش حفار صورت گیرد
- فرو بردن سوند داخل خاک
- اعمال فشار به سوند و محاسبه کرنش خاک
- تحلیل داده ها و ترسیم نمودار فشار-کرنش
- استخراج و به دست آوردن پارامترهای مهندسی



مراحل انجام آزمایش پرسیومتری

کاربردهای آزمایش فشارسنجی

مهمترین خروجی آزمایش پرسیومتری به دست آوردن سختی خاک در حین بارگذاری شعاعی است. اما از این تست صحرایی برای تخمین پارامترهای دیگری همچون موارد زیر هم استفاده می شود:

- محاسبه مدول الاستیسیته در انواع خاک ها
- محاسبه ظرفیت باربری انواع پی ها به خصوص پی های عمیق
- محاسبه مقاومت زهکشی نشده در خاک های رسی اشباع
- ضریب تحکیم افقی در خاک ها
- زاویه انبساط در خاک های ماسه ای
- محاسبه پارامترهای **مقاومت برشی** در ماسه و رس
- محاسبه فشار جانبی موجود در خاک مورد آزمایش

مزایای تست پرسیومتر

- بنیان نظری این آزمایش محکم و قوی است. لذا نتایج این آزمایش برگشت پذیری خوبی دارد.
- نسبت به آزمایش های صحرایی دیگر، اطلاعات بیشتری به ما ارائه می کند.
- خاک مورد آزمایش، انتباق بیشتری با شرایط واقعی دارد.
- در طول یک آزمایش واحد، حجم زیادی از خاک مورد آزمایش قرار می گیرد.
- دست خوردگی خاک در حین آزمایش پرسیومتری خودحفر زیاد نیست.
- آزمایش در محدوده کرنش های بزرگ انجام می شود.
- لذا مقدار مدول الاستیسیته به دست آمده در پروژه های عملی کاربرد زیادی دارد.
- با استفاده از منحنی به دست آمده، تخمین خوبی از رفتار تنش-کرنش خاک می توان زد.
- از این نمودار می توان در بررسی نشست خاک ها استفاده کرد.
- نتایج آن در تخمین فشار افقی خاک و همچنین طراحی شمع ها تحت فشار جانبی شمع ها استفاده می شود.
- در پرسیومترهای اتوماتیک، نتایج به دست آمده مستقل از نظرات شخصی اپراتور است.

معایب تست پرسیومتر

- برای انجام این آزمایش نیاز به اپراتور متخصص و زبده است.
 - انجام این تست صحرایی بسیار پر هزینه و گران قیمت است.
 - بار اعمالی به خاک به صورت افقی است.
 - در صورتی که در اکثر شرایط ژئوتکنیکی بار اعمالی به فونداسیون ها و بارهای ثقیلی، عمودی هستند.
 - ابزار و تجهیزات این آزمایش باید مرتبا کالیبره شوند.
 - تجهیزات انجام آزمایش پرسیومتری بسیار ظریف و حساس هستند و برای محافظت از آنها باید اقدامات ویژه ای انجام داد.
- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی خاک از جمله آزمایش های متداول صحرایی است که علاوه بر مهندسی ژئوتکنیک، در بسیاری از زیر شاخه های مهندسی، کاربرد فراوان دارد.
- روش مقاومت ویژه الکتریکی در طی مطالعات برادران شلومبرژه در سال ۱۹۲۰ کشف شد.
- این روش در طول ۶۰ سال اخیر، برای تفسیر برداشت های سونداژ زنی، استفاده می شده است.
- در این نوشتار، هر آنچه از این تست پرکاربرد بخواهید، خواهید یافت.
- آزمایش مقاومت الکتریکی چیست؟
- این روش زیر مجموعه روش های ژئوالکتریکی است.
- بطوریکه طیف گسترده ای از مطالعات زیرسطحی را شامل می شوند.
- کاربردهای متفاوتی از قبیل حل مسائل مهندسی، پروژه های معدن کاری، ساختمان سازی، باستان شناسی، محیط زیست و ژئوهیدرولوژی را شامل می شوند.
- بسته به اهداف مورد نظر، از این روش ها می توان در اکتشاف منابع معدنی، مطالعات ساختگاه سازه ها، اکتشاف منابع آبی و سایر بررسی های زیرسطحی در مراحل پی جویی تا اکتشافات تکمیلی استفاده کرد.
- در روش مقاومت ویژه، پارامتر اصلی در برداشت و پردازش داده ها، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری لایه های زیرسطحی است.
- به این صورت که تباین مقادیر مقاومت ویژه مواد، سبب آشکار سازی پدیده های زیرسطحی جهت مدل سازی اهداف خاص می شود.
- تجهیزات مورد استفاده در برداشت داده های مقاومت ویژه به اختصار شامل موارد زیر می باشد:
- سیم یا کابل
 - الکترودهای فلزی
 - دستگاه فرستنده جریان الکتریکی

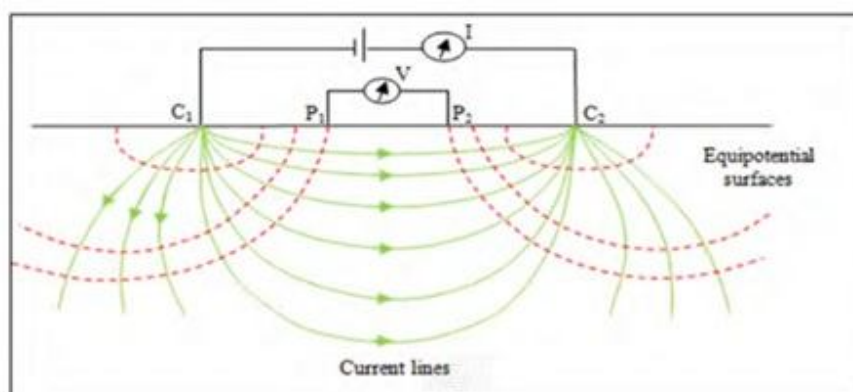


تجهیزات مورد استفاده در آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی خاک

تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی از نظر تئوری، جریان الکتریکی به سه شکل الکترولیتی، الکترونیکی و یا ترکیب هر دو در لایه های زیرسطحی انتشار می یابند. انتقال جریان به شیوه الکترولیتی، غالباً در لایه های اشباع از سیال امکان پذیر است و این کار توسط حرکت یون ها انجام می پذیرد. در لایه های زیرسطحی رسانا، انقال جریان غالباً از طریق جابه جایی الکترون ها صورت می گیرد. در حالتی که فضای زیرسطحی شامل سیال و مواد رسانا باشد، انتقال جریان به هر دو شکل انجام می گیرد. روش اندازه گیری مقاومت ویژه به این ترتیب است که جریان به وسیله دو الکتروود به درون زمین تزریق می گردد. سپس اختلاف پتانسیلی که به دلیل تزریق جریان به وجود می آید، در دو الکتروود پتانسیل اندازه گرفته می شود. پس از آن، با در اختیار داشتن مقادیر جریان (I) و اختلاف پتانسیل (V) مقاومت ویژه ظاهری محاسبه می گردد.

$$\rho_a = K \Delta V / I$$

K فاکتور هندسی است و با واحد متر (m) سنجیده می شود و بستگی به نوع آرایش الکتروودی به کار رفته دارد.



نحوه انتشار خطوط جریان الکتریکی و پتانسیل در فضای زیرسطحی

مقاومت ویژه ای که به این ترتیب به دست می آید، مقدار دقیق مقاومت ویژه در زیر سطح زمین نیست بلکه مقداری ظاهری است. ارتباط بین مقاومت ویژه ظاهری و مقاومت ویژه حقیقی، ارتباطی پیچیده است. برای تعیین مقاومت ویژه موجود در زیر سطح زمین بر اساس مقاومت ویژه ظاهری، از فرایند معکوس سازی استفاده می شود. مقاومت ویژه مواد مختلف چقدر است؟ دامنه تغییرات مقاومت ویژه مواد بسیار گسترده است و به عوامل مختلفی از جمله میزان تخلخل، محتوای سیال درون حفره ای، دما، سن زمین شناسی و جنس ماده بستگی دارد. در جدول زیر مقاومت ویژه برخی مواد مختلف آورده شده است.

مقاومت ویژه (Ωm)	مواد و مصالح
۰/۲	آب دریا
۵۰-۱۰۰	آب چشمه های طبیعی
۱۰-۳۰	آب سفره های آبرفتی

۲۰	آب های اسیدی معدنی
۳۰-۵۰۰	گرانیت هوازده
۲۰-۱۰۰۰۰	شیست (آهکی و میکادار)
۱۰-۱۰۰	شیست (گرافیتی)
۲۰-۲۰۰۰	شیل سفت شده
۲۰۰۰-۱۰۰۰۰	کنگومرا
۳-۷۰	مارن
۱-۱۰۰	رس
۸	(۴۰٪ رس)
۳۳	خاک (۲۰٪) رس
۸۰-۱۰۵۰	خاک ماسه ای خشک
۳۰-۲۱۵	ماسه رسی

مراحل انجام آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی خاک

این آزمایش در سه گام انجام می شود:

گام اول: برداشت داده های صحرائی

اولین مرحله در انجام پروژه های مقاومت ویژه، عملیات صحرائی برداشت داده ها می باشد.

در این مرحله باتوجه به اهداف مورد مطالعه، آرایه های الکترودی مناسب انتخاب و نحوه چینش آنها بر روی سطح زمین طراحی می گردد.

باید توجه کرد که انتخاب یک آرایه الکترودی مناسب در عملیات صحرائی بسیار مهم است.

برخی فاکتورهای موثر در انتخاب آرایه الکترودی مناسب شامل عمق مورد بررسی، توپوگرافی محدوده مورد مطالعه، قدرت تفکیک پذیری جانبی، حساسیت به اهداف مورد مطالعه و غیره می باشد.

در عملیات صحرائی مقاومت ویژه آرایه ونر، آرایه شلومبرژه، آرایه های دوقطبی - دوقطبی، قطبی - دوقطبی و آرایه گرادیان از پرکاربردترین آرایه ها می باشند.

پس از طراحی و انتخاب آرایه الکترودی نوبت به انجام عملیات برداشت داده ها می رسد.



عملیات برداشت داده ها در آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

عملیات صحرائی برداشت داده های مقاومت ویژه الکتریکی به دو روش پروفیل زنی یا سونداژزنی یا تلفیقی از هر دو روش انجام می گیرد.

- **روش پروفیل زنی**

در این روش عمق مورد بررسی ثابت فرض می شود و اندازه گیریها بر روی یک خط راست و با فواصل الکترودی ثابت انجام می گیرد.

بطوریکه پس از هر اندازه گیری در طول پروفیل، با گام های ثابت تمامی الکترودها جابه جا می شوند. کارایی این روش بیشتر در مواردی است که نیاز به بررسی تغییرات جانبی در فضای زیرسطحی داریم.

- **روش سونداژزنی الکتریکی (VES)**

در این روش از تغییرات جانبی مقاومت ویژه صرف نظر می شود و بیشتر به بررسی تغییرات عمقی می پردازیم.

بطوریکه با در نظر گرفتن یک نقطه مرکزی، فواصل الکترودی آن قدر افزایش می یابد تا به عمق مورد بررسی برسیم.

گام دوم: پردازش و مدل سازی

داده های برداشت شده در مرحله قبل جهت پردازش و مدل سازی به نرم افزار داده می شود.

در این مرحله داده ها قبل از ورود به نرم افزار باید مورد ارزیابی کیفی قرار گیرند تا در صورت وجود داده های بد یا ناسالم، از فرآیند مدل سازی حذف گردند.

گام سوم: تفسیر نتایج و تهیه گزارش

در نهایت پس از پردازش و مدل سازی داده ها، مدلی که بهترین سازگاری را با شرایط واقعی زمین دارد انتخاب می گردد.

سپس مدل نهایی با توجه به اطلاعات موجود از گمانه های حفاری و سایر بررسی های میدانی مورد تفسیر قرار گرفته و گزارش نهایی تهیه می گردد.

چه زمانی استفاده از روش مقاومت ویژه اجباری است؟

با پیشرفت صنعت ساخت و ساز، مسائل مربوط به نشست پی ها و کج شدن و تخریب ساختمانها، خرابی سیستم های خط لوله مدفون (آب، فاضلاب، روغن و گاز) در زیر خاک، ایجاد فروچاله های عظیم در مناطق شهری و غیره، همگی بدلیل دانش کم و یا نداشتن آگاهی مهندسان از شرایط زیرسطحی رو به افزایش است.

در چنین شرایطی انجام برداشت های ژئوفیزیکی قبل از آغاز ساختمان سازی و خصوصا احداث سازه های عظیم به منظور جلوگیری از خطرات احتمالی امری ضروری است.

از جمله روشهای پرکاربرد ژئوفیزیکی در مطالعه ساختارهای زیرسطحی، کاربردهای این روش آورده شده است:

- بررسی شرایط ساختگاه از نظر وجود حفرات، قناتها یا گسل های احتمالی مدفون و ...

- مطالعات زیرسطحی لایه های خاک به منظور بررسی مناطق خرد شده و سست، تخمین عمق سنگ بستر و ضخامت خاک روباره، عمق سطح آب زیرزمینی و ...
 - مطالعات بررسی شرایط ساختگاه به منظور بررسی میزان خوردگی خاک جهت احداث چاه ارت و یا طراحی حفاظت کاتودی تاسیسات مدفون در محل احداث سازه ها
 - در پی جویی محدوده مطالعاتی به منظور کاهش هزینه های حفاری و یا در تکمیل اطلاعات گمانه های حفر شده محدودیت های آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی
 - روش های مقاومت ویژه علی رغم کاربردهای گسترده ای که دارند همانند سایر روش های مهندسی، دارای محدودیت هایی می باشند که در هنگام استفاده از آنها باید مد نظر قرار گیرند تا میزان خطاهای احتمالی به حداقل ممکن برسد.
 - از جمله محدودیت های استفاده از روش مقاومت ویژه به اختصار:
 - روش مقاومت ویژه در مناطقی بهترین کارایی را می تواند داشته باشد که تباین قابل ملاحظه ای بین هدف مورد نظر و محیط اطراف وجود داشته باشد.
 - بنابراین قبل از اجرای این روش هدف مورد نظر باید بخوبی مورد بررسی قرار گیرد..
 - عمق بررسی در این روش به نوع آرایش الکترودی مورد استفاده، طول پروفیل و توانایی دستگاه فرستنده جریان دارد.
 - در مواردی که ساختمانها، لوله های فلزی و کابل های موجود یا خطوط راه آهن، در منطقه حضور داشته باشند، اندازه گیری هاتوسط این روش تحت تأثیر قرار می گیرند.
 - در هنگام تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه، ممکن است لایه های کم ضخامت نادیده گرفته شود.
 - قیمت آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی خاک
 - هزینه ی اجرای پروژه های ژئوفیزیکی بسته به شرایط مختلف می تواند تا حدودی متغیر باشد که از آن جمله می توان به اهداف پروژه مورد نظر- بعد مسافت و راه های دسترسی به منطقه مورد مطالعه- پیچیدگی زمین شناسی منطقه مورد نظر- شرایط توپوگرافی- عمق مورد بررسی و ... اشاره کرد.
 - آزمایش تحلیل چند کاناله امواج سطحی یا MASW، یکی از روش های اساسی در تخمین پارامترهای دینامیکی و تعیین پروفیل سرعت موج برشی می باشد.
 - امروزه داشتن دانش کافی در مورد خصوصیات دینامیکی لایه های زیرسطحی خاک در مکان های مختلف، در پروژه های مهندسی زلزله و مهندسی عمران بسیار ضروری است.
 - از روش های اصلی در تعیین خصوصیات دینامیکی خاک، استفاده از روش های مهندسی ژئوفیزیک خصوصا روش لرزه نگاری جهت بدست آوردن مدول های دینامیکی خاک می باشد.
 - در این نوشتار کوتاه بر آنیم تا شرح کامل آزمایش MASW را برای شما ارایه نماییم.
- MASW چیست؟**
- روش MASW از جمله روشهای اکتشافی لرزه نگاری سطحی است که نخستین بار در سال ۱۹۹۹ توسط آقای پارک معرفی شد. اساس این روش بر مبنای خاصیت پاشندگی امواج سطحی (خصوصا امواج رایلی) استوار است.
- یک منبع لرزه ای طول موجهای مختلفی از امواج آکوستیکی مانند امواج حجمی P و S منتشر می کند.
- امواج سطحی از برهم کنش این امواج حجمی بوجود می آیند.
- حرکت این امواج شبیه به حرکت امواج دریاست با این تفاوت که بصورت عقبگرد در مدارهای بیضوی متمایل به منشا چشمه حرکت می کنند.
- در یک زمین لایه ای امواج سطحی در لایه های نزدیک به سطح زمین منتشر می شوند.
- چون لایه های سطحی نقش عمده ای در تقویت امواج ناشی از زلزله دارند؛ از این جهت حاوی اطلاعات ارزشمندی می باشند.

مهندسان ژئوفیزیک و ژئوتکنیک از این اطلاعات در جهت شناخت خصوصیات زیرسطحی ساختگاه از طریق استخراج پارامترهای اساسی از قبیل سرعت موج برشی، مدول برشی و ... بهره می برند. این پارامترها نقش کلیدی در توصیف محل ساختگاه ایفا می کنند. با در دست داشتن این اطلاعات مهندسان قادر هستند تا رفتار سازه های عظیم مانند سدها و نیروگاهها را در برابر زلزله های بزرگ پیش بینی کنند. با انجام محاسبات دقیق تدابیر ویژه ای جهت احداث این سازه ها با صرف هزینه کمتر و استحکام بیشتر اتخاذ نمایند.



نمایی از انجام آزمایش MASW

دانهول بهتر است یا MASW ؟

در اکثر پروژه های ژئوتکنیک برای بدست آوردن پروفیل سرعت موج برشی، از روش مرسوم **دانهول (DHT)** استفاده می گردد. این تست، بر اساس اندازه گیری سرعت امواج حجمی بنا شده است. آزمایش دانهول، نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. با این وجود بدلیل نیاز به حفر **گمانه** ، این روش معایبی از جمله تخریب محیط زیست، صرف زمان و هزینه زیاد را به همراه دارد. این مورد، منجر به غیر قابل اجرا بودن این روش در برخی شرایط می شود. با پیشرفت فن آوری در زمینه علم مهندسی ژئوفیزیک، روشهایی که تخمین سرعت موج برشی و سایر پارامترهای دینامیکی را بدون نیاز به حفر گمانه، در مدت زمان کوتاه و با دقت قابل قبولی تعیین می کنند، مورد توجه قرار گرفته اند. یکی از این روشها، تحلیل چند کاناله امواج سطحی (MASW) است. این آزمایش، از جمله **آزمایش های بدون نیاز به حفر گمانه** است. مراحل کلی اجرای آزمایش MASW بطور کلی آزمایش MASW شامل مراحل زیر می باشد:

۱- عملیات صحرائی برداشت داده ها

در گام اول جهت برداشت داده های صحرائی، آرایه ای از ژئوفون ها بر روی سطح زمین قرار می گیرند. نحوه چیدمان، تعداد و فواصل ژئوفونها بستگی به عمق مورد بررسی و توانایی دستگاه لرزه نگار در ثبت امواج را دارد. بسته به اهداف مورد مطالعه، ژئوفون های مورد استفاده در برداشت های ... می باشند.

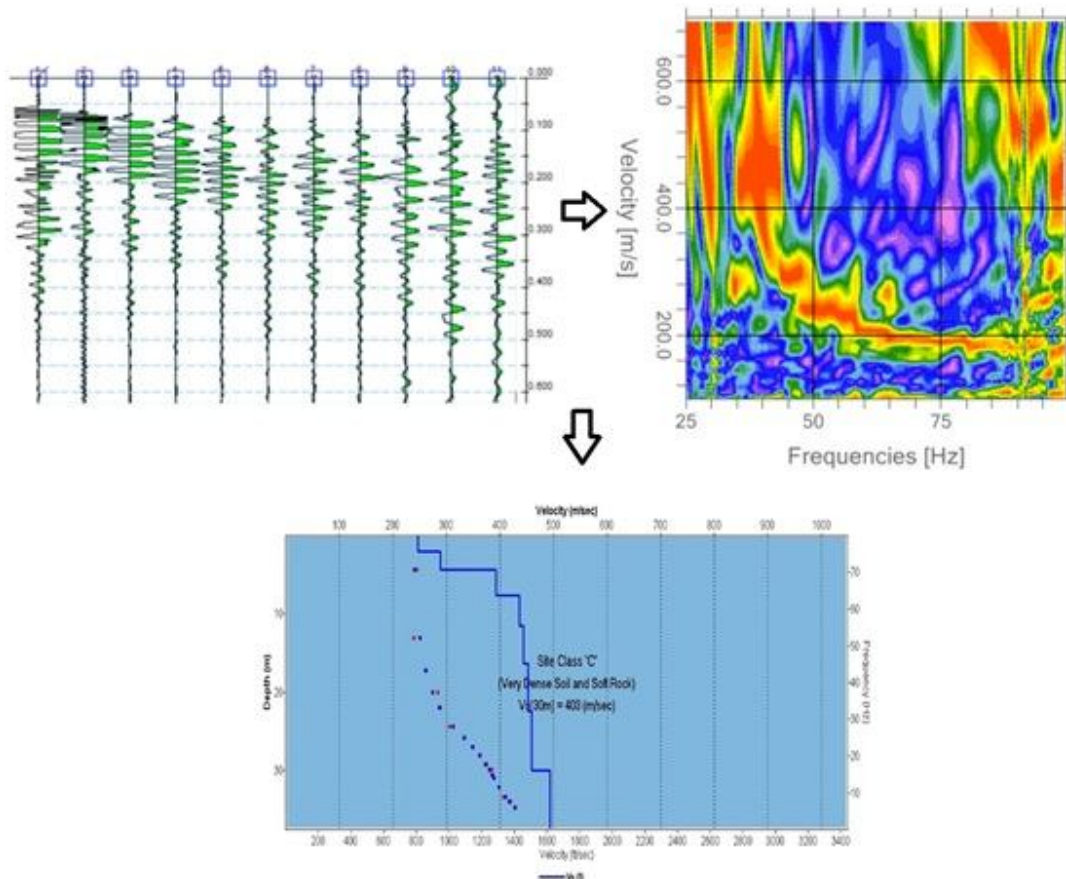
۲- پردازش و تحلیل داده های برداشت شده

در گام دوم لرزه نگاشت های جمع آوری شده، با استفاده از نرم افزارهای بخصوصی مورد پردازش و تحلیل قرار می گیرند. بدین ترتیب، بهترین مدل ها جهت تفسیر نهایی انتخاب می گردند.

۳- تفسیر نتایج و استخراج پارامترهای دینامیکی

در گام سوم بمنظور تفسیر دقیق نتایج، مدل های ژئوفیزیکی بدست آمده با سایر اطلاعات ژئوتکنیکی موجود از محل ساختگاه، مورد بررسی قرار می گیرند و در نهایت مدل سرعت نهایی و سایر پارامترهای دینامیکی مورد نیاز جهت ارزیابی های مهندسی استخراج می گردند.

مراحل فوق به صورت شماتیک در تصویر زیر به نمایش درآمده است:



پردازش و مدل سازی داده های آزمایش MASW

کاربردها و مزایای استفاده از روش MASW

- امکان اجرای این روش بدون نیاز به حفر چاه دستی یا گمانه ماشینی بر روی سطح زمین

- امکان اجرا در ملک های جنوبی و یا در زمین هایی که امکان **حفاری ماشینی** یا دستی (زمین های سخت) در آنها بسادگی وجود ندارد.
- امکان اجرای این روش در شرایط زمین شناسی مختلف از قبیل وجود رولایه متراکم (آسفالت، پیاده رو و ...)
- تعیین پروفیل سرعت موج برشی میانگین سی متر (Vs30).
- **تعیین تیپ خاک بر اساس آئین نامه استاندارد ۲۸۰۰** و سایر آیین نامه های بین المللی جهت ارائه به سازمان نظام مهندسی و سایر سازمان های مربوطه
- استخراج پارامترهای ژئوتکنیکی و تخمین مدول های دینامیکی خاک جهت برآوردهای مهندسی
- به نقشه در آوردن توپوگرافی سنگ بستر
- تخمین ضخامت خاک روبراه جهت ارزیابی میزان تراکم پذیری (نشست) و ظرفیت باربری خاک در محل احداث سازه ها
- مطالعات زیرسطحی خاک در مکان هایی که نیاز به بررسی جهت تزریق ملات و بهسازی خاک دارند.
- محدودیت ها و معایب تست MASW
- روش های ژئوفیزیکی علی رغم کاربردهای گسترده که در حل مسائل مهندسی داشته اند، همانند سایر روشهای مهندسی بسته به اهداف مورد استفاده، دارای محدودیت هایی می باشند.
- در صورت کاربرد درست و هوشمندانه از آنها، این محدودیت ها را می توان به حداقل ممکن رساند.
- از جمله محدودیت های استفاده از روش MASW به اختصار:
 - عمق بررسی در روش MASW به پارامترهای مختلفی بستگی دارد.
 - از آن جمله می توان به فرکانس گیرنده، قدرت دستگاه لرزه نگار و انرژی چشمه تولید امواج اشاره کرد.
 - بطور معمول عمق بهینه برای کاربردهای مهندسی را تا ۵۰ متر می توان در نظر گرفت.
 - در شرایط ایده آل عمق مورد بررسی را تا ۱۰۰ متر می توان افزایش داد.
- به دلیل ماهیت تفسیری این روش (مانند سایر روش های ژئوفیزیکی) صحت نتایج آن، به شدت وابسته به دانش و تجربه اپراتور و مفسر مهندس ژئوفیزیک می باشد.
- در صورت نداشتن مهارت و تخصص کافی، نتایج حاصل از آن در ارزیابی های مهندسی می تواند گمراه کننده باشد.
- در روش MASW، وجود نوفه می تواند بر کیفیت داده ها و دقت نتایج تاثیر نامطلوب داشته باشد.
- بنابراین تا حد امکان از ورود نوفه های موجود اعم از محیطی و دستگاهی، باید جلوگیری کرد.
- یا در صورت امکان با فیلترسازی مناسب آنها را کاهش داد.

قیمت آزمایش MASW

هزینه ی اجرای پروژه ها بسته به شرایط مختلف می تواند تا حدودی متغیر باشد.
از جمله موارد تاثیرگذار بر قیمت آزمایش MASW می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **اهداف پروژه مورد نظر**
- **بعد مسافت**
- **راه های دسترسی به منطقه مورد مطالعه**
- **پیچیدگی زمین شناسی منطقه مورد نظر**
- **شرایط توپوگرافی**
- **عمق مورد بررسی**

آزمایش دانه بندی از جمله اصلی ترین آزمایش های مکانیک خاک است. اساس آزمایش دانه بندی، رده بندی **انواع خاک ها** بر اساس اندازه دانه ها و نیز رفتار خمیری آن هاست. از جمله مهمترین کاربردهای آزمایش دانه بندی ارائه زبانی مشترک جهت در توصیف و پیش بینی رفتار خاک ها می باشد. در این نوشتار شرح کامل تست دانه بندی خاک به همراه جزییات، خدمت شما مهندسین گرامی ارایه می گردد.

مفهوم دانه بندی خاک خاک ها مخلوطی از ذرات هستند که اندازه های مختلفی دارند. اندازه گیری اندازه تک تک ذرات امکان پذیر نیست. چون تعداد آنها بی نهایت زیاد است. لذا با استفاده از الک ها، تعدادی بازه اندازه تعیین می شود. با استفاده از وزن باقیمانده روی هر الک، می توان فهمید چه میزان از خاک در آن بازه قرار دارد. مقدار خاک باقی مانده روی هر الک نشاندهنده یک محدوده از اندازه دانه هاست که اندازه آن دانه ها از قطر سوراخ روی الک بزرگ تر است. در یک نگاه کلی خاک ها را بر اساس اندازه آنها بدین گونه می توان تقسیم بندی کرد:

انواع خاک	قطر دانه ها بر حسب میلی متر
شن	بیشتر از ۴,۷۵
ماسه درشت	بین ۲ تا ۴,۷۵
ماسه متوسط	بین ۰,۴۲۵ تا ۲
ماسه ریز	بین ۰,۰۷۵ تا ۰,۴۲۵
لای یا رس	ریزتر از ۰,۰۷۵

- بعد از انجام دانه بندی متوجه می شویم که بیشتر اندازه های دانه ها، از چه نوعی است. به عنوان مثال اگر اکثر ذرات خاک، اندازه ای کمتر از ۰,۰۷۵ میلی متر داشته باشند، مطابق جدول بالا، احتمالاً آن خاک، رس است.

به این فرآیند دانه بندی کردن خاک می گویند.

کاربردهای آزمایش دانه بندی

تست دانه بندی خاک، از جمله پرکاربردترین آزمایش های ژئوتکنیکی است. از این آزمایش در ساخت جاده، ساخت فرودگاه، طراحی سد و... استفاده می شود. با انجام دانه بندی، اطلاعات مفیدی از خاک می توان به دست آورد و بازه تقریباً درستی از پارامترهای طراحی خاک ها را تخمین زد.

از مهمترین پارامترهایی که با داشتن دانه بندی قابل تخمین است می توان به نفوذپذیری خاک، خاصیت مویینگی و حساسیت خاک اشاره کرد.

به طور خلاصه مهمترین کاربردهای آزمایش دانه بندی عبارتند از:

- طبقه بندی و نامگذاری خاک ها بر اساس استانداردها و آیین نامه های بین المللی
- طراحی اجزای مختلف سدهای خاکی مثل طراحی هسته، فیلتر و ...
- ارایه طرح اختلاط بتن

- تشخیص خطرناک بودن خاک در برابر ریسک های ژئوتکنیکی مثل روانگرایی، رگاب و...
 - تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مثل نفوذپذیری، مقاومت برشی و ...
 - تعیین منبع قرضه مناسب جهت خاکریزی
- انواع روش های دانه بندی
- آزمایش دانه بندی به روش خشک
- در این روش کلوخه ای از خاک انتخاب شده و به حالت خشک روی مجموعه الک ها قرار میگیرند. سپس به مدت ده دقیقه بر روی لرزاننده الک قرار می گیرد. بعد از اتمام لرزش، وزن باقی مانده روی هر الک یادداشت می شود. با محاسبه درصد باقی مانده روی هر الک، می توان منحنی دانه بندی را ترسیم کرد. آزمایش دانه بندی به روش خشک، عمدتاً برای خاک های درشت دانه مناسب تر است. چرا که ذرات درشت دانه از یکدیگر منفصل هستند و به راحتی می توانند از سوراخ های الک عبور نمایند. این روش همراه با خطاست. چرا که گاهی ذرات به دلیل داشتن چسبندگی به یکدیگر می چسبند و تشکیل ذره ای بزرگتر می دهند.
- هرچند در واقعیت متشکل از چند ذره کوچک بوده است. این روش از نظر نحوه اجرا، بسیار راحت است و انجام آن زمان زیادی نمی برد.
- آزمایش دانه بندی به روش تر
- در این روش، خاک را بر روی الک ریخته و با فشار آب شستشو می دهند. این عمل تا جایی ادامه پیدا می کند که آب خارج شده از الک به حالت شفاف در آید. سپس خاک را خشک می کنند. نتایج حاصل از دانه بندی به روش تر، عمدتاً نتایج بهتر و دقیق تری می دهد. چرا که با شستشو دادن خاک ها، چسبندگی بین ذرات تا حدود زیادی از بین می رود و امکان چسبیدن ذرات به هم و تشکیل دانه هایی بزرگ تر از اندازه واقعی، تقریباً غیرممکن است. می توان اطمینان داشت در روش تر، ذرات با اندازه های واقعی خود در آزمایش دانه بندی شرکت می کنند. این روش بسیار سخت تر و زمان بر تر از روش خشک است. این روش برای دانه بندی خاک های ریزدانه مناسب تر است.
- وسایل مورد نیاز جهت آزمایش دانه بندی
- ترازو با دقت ۰٫۱ گرم
 - چکش لاستیکی
 - فرچه یا مسواک برای تمیز کردن الک ها
 - آون یا گرمخانه
 - دسیکاتور
 - هاون
 - آب فشان
- چه مقدار خاک برای انجام آزمایش کافی است؟
- نمونه خاکی که برای انجام آزمایش دانه بندی انتخاب می گردد، باید نماینده خوبی از خاک محل باشد. پس در زمینی که تنوع سنگدانه های آن زیاد است و بزرگترین دانه آن ۵۰۰ گرم است، اگر ۳۰۰ گرم خاک انتخاب کنیم، نتیجه آزمایش نادرست خواهد بود. مراجع معتبر ژئوتکنیکی حداقل مقدار خاک برای انجام آزمایش را به شرح جدول زیر پیشنهاد کرده اند:

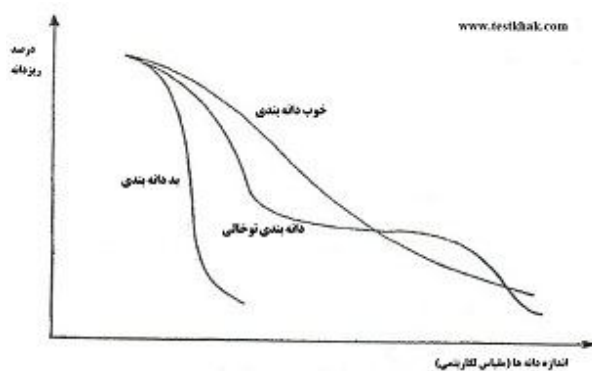
حد اقل وزن نمونه خاک (کیلوگرم)	بزرگترین قطر دانه ها (میلی متر)
۰,۵	۹,۵
۱	۱۹
۲	۲۵,۴
۳	۳۸,۱
۴	۵۰,۸
۵	۷۶,۲

فرآیند آزمایش دانه بندی

در ابتدا لازم است مقداری خاک با وزن پیشنهادی در جدول بالا انتخاب کنیم. سپس الک ها را به صورت مرتب روی هم بچینید. الک ها به صورت نز و مادگی داخل یکدیگر فرو می روند و همانند ستونی در می آیند. الک ها باید به ترتیب چیده شده باشند. به طوری که الک های با سوراخ گشادتر در بالا و الک هایی با سوراخ ریز پایینتر قرار بگیرند. حال نمونه خاک انتخاب شده را روی بالاترین الک بریزید. هم اکنون لازم است مجموعه الک ها را روی دستگاه لرزاننده قرار دهید تا خاک ها به لرزه درآیند و به الک های پایین منتقل شوند. زمان لرزش بستگی به مقدار خاکی دارد که داخل الک ها ریخته ایم. طبیعی است که هر چقدر خاک درون الک ها بیشتر باشد، لازم است دستگاه شیکر، زمان بیشتری روشن باشد. آیین نامه ها توصیه کرده اند حداق زمان لرزش تا زمانی باشد که هیچگونه خاکی از الک شماره ۲۰۰ عبور نکند. بعد از پایان فرآیند لرزش، الک ها را از داخل جعبه شیکر خارج نموده و وزن باقیمانده روی هر الک را یادداشت نمایید. مجموع مقادیر باقیمانده روی هر الک نباید تفاوت چشمگیری با وزن خاک انتخاب شده در ابتدای آزمایش داشته باشد.

دانه بندی خاک درشت دانه

خاک های درشت دانه به دو دسته کلی خوب دانه بندی و بد دانه بندی شده تقسیم می شوند. خاک های خوب دانه بندی شامل طیف با گستره مناسبی از خاک های ریز و درشت تشکیل شده است. خاک های بد دانه بندی شده دارای دانه بندی یکنواخت بوده و یا دانه بندی منفصل دارند. در دانه بندی یکنواخت اندازه دانه ها تقریبا یکسان است و در دانه بندی منفصل، منحنی دانه بندی دارای شکاف است. شکل کلی منحنی دانه بندی خاک های خوب دانه بندی شده و بد دانه بندی شده و همچنین منحنی دانه بندی خاک های منفصل قابل مشاهده است.



منحنی خوب دانه بندی منحنی بد دانه بندی و منحنی تو خالی

دانه بندی خاک ریز دانه

خاک های ریزدانه شامل رس ها و لای ها هستند.

لای ها عمدتاً فاقد خاصیت خمیری می باشند.

اما رس ها دارای کانی های بلورین نظیر ایلیت، مونت مورونیت و کائولینیت هستند که موجب پدید آمدن خاصیت خمیری، چسبندگی و قدرت جذب یون در آن ها می شود.

لای و رس از نظر اندازه ذرات تفاوت چندانی نداشته و برای تفکیک آنها از خاصیت خمیری استفاده می شود.

برای ترسیم منحنی دانه بندی خاک ها، بسته به اندازه ذرات تشکیل دهنده خاک می توان از روش الک، و یا از روش

هیدرومتری استفاده کرد.

آزمایش الک برای ذراتی با قطر بیشتر از ۰,۰۷۵ میلی متر و آزمایش هیدرومتری برای ذراتی با قطر کوچکتر از ۰,۰۷۵ میلی متر کاربرد دارد.

محاسبات آزمایش دانه بندی

برای آنالیز دانه های روی الک شماره ۱۰، درصد عبوری از روی این الک را با تقسیم وزن عبور کرده از الک شماره ۱۰ بر وزن کل نمونه ریخته شده روی الک شماره ۱۰ بدست آورده و ضربدر ۱۰۰ می نماییم.

برای مابقی الک ها نیز فرآیند مشابهی انجام دهید. با داشتن مقادیر درصد عبوری از هر الک، می توان منحنی دانه بندی خاک را ترسیم نمود. خروجی آزمایش دانه بندی، منحنی های دانه بندی است.

ترسیم این منحنی ها به صورت دستی میسر است اما بسیار دشوار و وقت گیر است.

امروزه برای ترسیم منحنی های دانه بندی از نرم افزارهای آزمایشگاه خاک که مختص ترسیم دانه بندی است استفاده می شود.

آزمایش هیدرومتری بخشی از **آزمایش دانه بندی** است که جهت تعیین اندازه خاک های بسار ریز دانه که عبوری از الک شماره ۲۰۰ هستند انجام می شود.

اساس آزمایش هیدرومتری بر پایه تفاوت در سرعت ته نشین شدن ذرات خاک بنا شده است.

در این نوشتار شرح کامل آزمایش هیدرومتری بیان می شود.

قانون استوکس

در آزمایش هیدرومتری از قانون استوکس استفاده می شود.

این قانون بیانگر آن است که ذرات خاک با چگالی و قطر بزرگتر، با سرعت بیشتری ته نشین می شوند.

در این آزمایش از ابزاری به نام هیدرومتر که دارای چگالی ثابت و معینی است استفاده می شود. آزمایش هیدرومتری مخصوص **خاک های رسی** است و نمی توان از آن برای خاک های درشت دانه استفاده کرد. چرا که ذرات خاکی اندازه بزرگی داشته باشند، هنگام حرکت جریان را مغشوش کرده و در این شرایط قانون استوکس برقرار نبوده و به جای آن قانون حرکت براونی حاکم می شود که مانع از سقوط دانه های خاک می گردد.

وسایل مورد نیاز آزمایش هیدرومتری

- ترازو با دقت ۰,۰۱ گرم
- مخلوط کن استاندارد
- هیدرومتر با استاندارد H۱۵۱ و یا H۱۵۲
- ماده پراکنده ساز مثل هگزامتافسفات سدیم
- کرومومتر یا هر وسیله دیگر برای اندازه گیری زمان مثل ساعت
- استوانه رسوب گذاری مدرج با قطر ۲,۵ اینچ و ارتفاع ۱۸ اینچ دارای حجم یک لیتر
- دماسنج با دقت ۰,۵ درجه سلسیوس



وسایل آزمایش هیدرومتری

فرآیند تست هیدرومتری

آزمایش هیدرومتری بر اساس استاندارد انجام می شود. روند انجام این تست آزمایشگاهی به صورت زیر است:

- در صورتی که بیشتر دانه های موجود در نمونه خاک مد نظر جهت انجام آزمایش سیلتی یا رسی بوده، ۵۰ گرم و در صورتی که بیشتر دانه ها ماسه ای باشند ۱۰۰ گرم خاک جهت آزمایش هیدرومتری انتخاب نمایید.
- نمونه را با ۱۲۵ میلی لیتر محلول ۴۰ گرم بر لیتر هگزا متا فسفات سدیم مخلوط کنید.
- لازم است نمونه را به مدت ۱۶ ساعت در این حالت قرار دهید تا نمونه کاملا خیس خورده و دانه های به هم چسبیده جدا شوند.
- نمونه را داخل مخلوط کن ریخته و کاملا مخلوط نمایید.
- تمام محتویات ظرف را درون استوانه مدرج ریخته و با اضافه کردن آب مقطر، حجم آن را به یک لیتر برسانید.
- درپوش لاستیکی را روی دهانه استوانه قرار دهید.
- با واژگون کردن استوانه کاری کنید تا محتویات استوانه کاملا مخلوط گردد.
- این عمل را یک دقیقه ادامه دهید تا اطمینان حاصل گردد که تمامی ذرات معلق بوده و هیچ دانه ای ته نشین نشده است.
- استوانه را در محل صاف و بدون حرکتی قرار داده و هیدرومتر را در داخل آن قرار دهید.
- مقادیر هیدرومتر را در بازه های زمانی ۲، ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۲۵۰ و ۱۴۴۰ دقیقه قرائت نمایید.
- پس از هر قرائت، دمای مخلوط را اندازه گیری نمایید.

تذکر

تذکر ۱: حدود ۲۰ تا ۳۰ ثانیه قبل از قرائت، هیدرومتر را درون مخلوط قرار داده و پس از قرائت آنرا خارج کرده و در آب مقطر قرار دهید.

تذکر ۲: قرائت ها را بر اساس عدد بالای قوس تشکیل شده در سطح مایع انجام دهید.

محاسبات تست هیدرومتری

گاوم اول: محاسبه عمق موثر (L)

در این قسمت لازم است عمق موثر را با استفاده از جدول زیر محاسبه کنید:

عمق موثر در جدول زیر بر حسب سانتی متر است.

عمق موثر (L)	قرائت اولیه هیدرومتر	عمق موثر (L)	قرائت اولیه هیدرومتر
۱۱,۲	۳۱	۱۶,۳	۰
۱۱,۱	۳۲	۱۶,۱	۱
۱۰,۹	۳۳	۱۶	۲
۱۰,۷	۳۴	۱۵,۸	۳
۱۰,۵	۳۵	۱۵,۶	۴
۱۰,۴	۳۶	۱۵,۵	۵
۱۰,۲	۳۷	۱۵,۳	۶
۱۰,۱	۳۸	۱۵,۲	۷
۹,۹	۳۹	۱۵	۸
۹,۷	۴۰	۱۴,۸	۹
۹,۶	۴۱	۱۴,۷	۱۰
۹,۴	۴۲	۱۴,۵	۱۱
۹,۲	۴۳	۱۴,۳	۱۲
۹,۱	۴۴	۱۴,۲	۱۳
۸,۹	۴۵	۱۴	۱۴

۸,۸	۴۶	۱۳,۸	۱۵
۸,۶	۴۷	۱۳,۷	۱۶
۸,۴	۴۸	۱۳,۵	۱۷
۸,۳	۴۹	۱۳,۳	۱۸
۸,۱	۵۰	۱۳,۲	۱۹
۷,۹	۵۱	۱۳	۲۰
۷,۸	۵۲	۱۲,۹	۲۱
۷,۶	۵۳	۱۲,۷	۲۲
۷,۴	۵۴	۱۲,۵	۲۳
۷,۳	۵۵	۱۲,۴	۲۴
۷,۱	۵۶	۱۲,۲	۲۵
۷	۵۷	۱۲	۲۶
۶,۸	۵۸	۱۱,۹	۲۷
۶,۶	۵۹	۱۱,۷	۲۸
۶,۵	۶۰	۱۱,۵	۲۹
		۱۱,۴	۳۰

گام دوم: محاسبه مقدار K
در گام دوم لازم است مقدار K را با توجه به جدول زیر محاسبه کنید:
در جدول زیر مقدار دما، بر حسب سیلسیوس می باشد.

مقدار چگالی ویژه خاک (Gs)				دما
۲,۸۵	۲,۷۵	۲,۶۵	۲,۵۵	

۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۳۹	۰,۰۱۴۴	۰,۰۱۴۸	۱۶
۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۸	۰,۰۱۴۲	۰,۰۱۴۶	۱۷
۰,۰۱۳۲	۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۴۰	۰,۰۱۴۴	۱۸
۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۴	۰,۰۱۳۸	۰,۰۱۴۳	۱۹
۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۳	۰,۰۱۳۷	۰,۰۱۴۱	۲۰
۰,۰۱۲۷	۰,۰۱۳۱	۰,۰۱۳۵	۰,۰۱۳۹	۲۱
۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۳	۰,۰۱۳۷	۲۲
۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۸	۰,۰۱۳۲	۰,۰۱۳۶	۲۳
۰,۰۱۲۳	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۳۰	۰,۰۱۳۴	۲۴
۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۲۵	۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۳۳	۲۵
۰,۰۱۲۰	۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۷	۰,۰۱۳۲	۲۶
۰,۰۱۱۹	۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۳۰	۲۷
۰,۰۱۱۷	۰,۰۱۲۱	۰,۰۱۲۴	۰,۰۱۲۸	۲۸
۰,۰۱۱۶	۰,۰۱۲۰	۰,۰۱۲۳	۰,۰۱۲۷	۲۹
۰,۰۱۱۵	۰,۰۱۱۸	۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۲۶	۳۰

گام سوم: محاسبه قطر ذرات (D)

با استفاده از فرمول زیر و با استفاده از دو جدول قبلی، مقدار قطر ذرات را محاسبه کنید:

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

فرمول محاسبه قطر ذرات در آزمایش هیدرومتری

که در رابطه بالا:

D قطر ذرات بر حسب میلی متر می باشد.

K ضریب ثابتی است که بستگی به دمای مخلوط و چگالی دانه های خاک دارد.

این ضریب مطابق جدول گام دوم به دست می آید.

L عمق موثر بوده و مطابق جدول گام اول به دست می آید.

T زمان قرائت بر حسب دقیقه است.

گام چهارم: محاسبه ضریب تصحیح هیدرومتر (α)

با استفاده از جدول زیر می توانید ضریب تصحیح هیدرومتر را برای خاک مورد نظرتان محاسبه کنید.

چگالی ویژه (Gs)	ضریب تصحیح هیدرومتر (α)
۲,۹۵	۰,۹۴
۲,۹	۰,۹۵
۲,۸۵	۰,۹۶
۲,۸	۰,۹۷
۲,۷۵	۰,۹۸
۲,۷	۰,۹۹
۲,۶۵	۱
۲,۶	۱,۰۱
۲,۵۵	۱,۰۲
۲,۵	۱,۰۳
۲,۴۵	۱,۰۵

گام پنجم: محاسبه درصد ریزدانه

با استفاده از فرمول زیر می توانید مقدار درصد ریزدانه که اندازه آنها از قطر محاسبه شده در گام سوم کمتر است را محاسبه کنید:

$$P = 100 \times \frac{R \times a}{W_s}$$

"t" فرمول محاسبه درصد ریزدانه در آزمایش هیدرومتری
فرمول محاسبه درصد ریزدانه در آزمایش هیدرومتری

که در رابطه بالا:

α ضریب تصحیح برای قرائت هیدرومتر است

P درصد ریزدانه می باشد

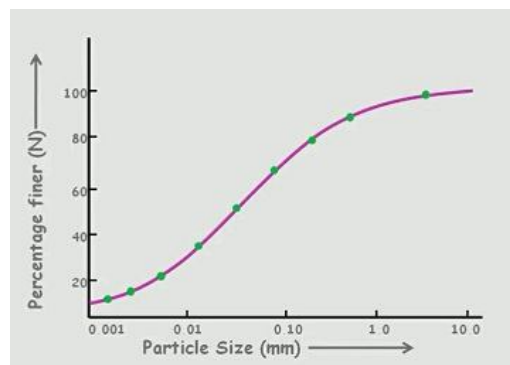
R قرائت تصحیح شده هیدرومتر است

W_s وزن خاک خشک شده کل انتخاب شده، برای آزمایش هیدرومتری می باشد.

Gs چگالی ویژه دانه های خاک

گام ششم: ترسیم نمودار دانه بندی

گام های یک تا پنج را برای زمان های مختلف تکرار کنید. با استفاده از مقادیر به دست آمده در گام های پنجم و سوم، می توانید نمودار دانه بندی خاک ریزدانه را ترسیم کنید. نمودار ترسیم شده نهایی شما شبیه شکل زیر می شود. در این نمودار بخش افقی، اندازه دانه هاست که از گام سوم به دست می آید. بخش عمودی نمودار، درصد ذرات ریزدانه کوچکتر از D است که از گام پنجم به دست آمد.



نمودار دانه بندی خاک در آزمایش هیدرومتری

امروزه ترسیم نمودار دانه بندی و محاسبات آزمایش دانه بندی توسط نرم افزار های آزمایشگاه خاک صورت می گیرد.

برای تهیه نرم افزارهای آزمایش هیدرومتری می توانید به لینک **دانلود نرم افزارهای آزمایشگاه خاک** مراجعه یا با ما تماس بگیرید.

نمودار حاصل شده از آزمایش هیدرومتری در واقع تکمیل کننده نمودار ترسیم شده در آزمایش دانه بندی است. پس لازم است بدانید آزمایش هیدرومتری و دانه بندی مکمل یکدیگر هستند و لازم است حین این آزمایش، تست دانه بندی خاک را نیز به خوبی انجام دهید.

آزمایش سه محوری با هدف تعیین پارامترهای مقاومت برشی مثل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) انجام می گیرد. این تست ژئوتکنیکی، از آزمایش های دیگر مقاومت برشی مثل **آزمایش برش مستقیم** پیچیده تر و گران تر است. اما نتایج آن دقیق تر و قابل اعتمادتر می باشد.

در این نوشتار آزمایش سه محوری به طور کامل شرح داده می شود. ابتدا تجهیزات این تست آزمایشگاهی معرفی می شود. سپس روند انجام آزمایش به صورت گام به گام بیان می شود. برای بهتر تفهیم شدن این آزمایش، فیلم کامل از آزمایش سه محوری دوبله فارسی و به صورت رایگان ارائه شده است. در آخر نکات مفیدی از نحوه انجام این تست و نتایج حاصل از آن آورده شده است.

انواع آزمایش های سه محوری

در آزمایش سه محوری نمونه ای از خاک انتخاب شده و اطراف آن غشا لاستیکی قرار داده می شود. نمونه خاک درون سلولی قرار می گیرد که توسط آب یا گلیسرین محصور شده و تحت تنش همه جانبه قرار می گیرد. علاوه بر این نیرو، یک نیروی قائم نیز به نمونه وارد می شود که به تنش انحرافی معروف است. آزمایش سه محوری بسته به اینکه شیر خروجی آب در چه وضعیتی باشد به سه دسته کلی تقسیم بندی می شود:

• **تست UU:**

در این آزمایش شیر زهکشی، در تمام مراحل آزمایش بسته است. نام دیگر این آزمایش، آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده است. این آزمایش برای های درشت دانه که کاملا اشباع باشد قابل استفاده نیست.

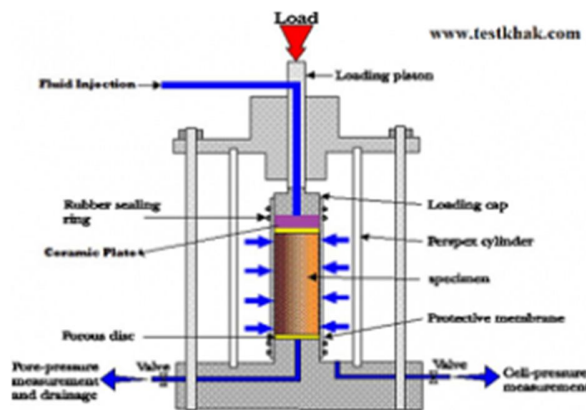
• **تست CU:**

در این حالت، نمونه در ابتدا به صورت کامل تحت تنش همه جانبه تحکیم می شود. در این شرایط شیر زهکشی باز است. سپس شیر زهکشی بسته شده و تنش انحرافی اعمال می شود تا اینکه نمونه به گسیختگی برسد.

• **تست CD:**

در این شرایط شیر زهکشی در تمام حالات باز است. در ابتدا نمونه با شیر زهکشی باز توسط تنش همه جانبه تحکیم شده و در مرحله بعد نمونه تحت تنش انحرافی به گسیختگی می رسد.

باید دقت شود که در طول این آزمایش، نیروها به کندی و با آرامش به نمونه وارد شود تا در اثر اعمال نیروی سریع، در نمونه فشار آب حفره ای ایجاد نشود.



سلول آزمایش سه محوری

وسایل آزمایش سه محوری

۱. سلول فشار
۲. وسیله ای جهت اعمال نیرو به سلول
۳. وسیله ای جهت اصلاح نمونه خاک
۴. اره سیمی
۵. منبع ایجاد کننده خلا
۶. آون

۷. کولیس
۸. ظرف تبخیر
۹. غشا لاستیکی
۱۰. قالبی استوانه ای جهت قرار دادن غشا لاستیکی روی خاک
۱۱. کاغذ صافی برای قرارگیری بر پایین و بالای نمونه. این کاغذ صافی جهت وارد نشدن دانه های خاک به سنگ متخلخل است. این کاغذهای صافی باعث تسهیل زهکشی نیز می شود.
۱۲. ترازو
۱۳. بورت. وظیفه بورت اندازه گیری تغییر حجم نمونه است.
۱۴. کش لاستیکی
۱۵. دستگاهی جهت اعمال تنش همه جانبه
۱۶. دستگاهی جهت محاسبه فشار آب حفره ای
۱۷. تشتک فلزی جهت جایگزینی با سنگ های متخلخل
۱۸. زمان سنج

۱۹. قوطی هایی جهت نمونه گیری و تعیین درصد رطوبت

۲۰. وسیله ای جهت اعمال نیرو در حالت کنترل کرنش (پرس)

نکات عمومی پیرامون آزمایش های سه محوری

تست سه محوری به طور کلی به دو صورت انجام می شود:

- کنترل تنش: در این روش وزنه هایی در گام های مساوی به نمونه خاک وارد می شود تا اینکه نمونه به گسیختگی برسد.
- کنترل کرنش: در این روش تغییر شکل محوری به صورت سرعت ثابت بر نمونه اعمال شده و نیرو در هر مرحله قرائت می گردد. پارامترهای مقاومت برشی خاک ها

۱. به دلیل اینکه خاک دارای خاصیت غیرهمسانی است، زاویه گسیختگی از قبل مشخص نیست. گسیختگی بر روی ضعیف ترین صفحه صورت می گیرد.

این یکی از محاسن آزمایش های سه محوری نسب به **آزمایش برش مستقیم** است که صفحه برش در آن اجباری بود.

۲. مقاومت برشی هر خاک وابسته به میزان فشار آب حفره ای ایجاد شده در حین آزمایش دارد.

در شرایطی که زهکشی در نمونه خاک صورت گرفته باشد، سرعت بارگذاری عامل تاثیر گذار بر مقاومت برشی است.

۳. به طور کلی با تغییر درصد رطوبت مقدار زاویه اصطکاک داخلی (فی) تغییری نمی کند. با افزایش درصد رطوبت، مقدار چسبندگی (سی) کاهش می یابد.

۴. هر چه اندازه دانه های خاک بزرگتر باشد مقدار زاویه اصطکاک داخلی (فی) افزایش می یابد.

۵. در آزمایش های سه محوری مقدار چسبندگی خاک بستگی به تحکیم یافته یا تحکیم نیافته بودن نمونه خاک خواهد داشت.

۶. در خاک های دانه ای به دلیل نفوذپذیری بالا، فشار آب حفره ای به سرعت زائل می شود.

لذا برای تحلیل اینگونه خاک ها باید از آزمایش های سه محوری زهکشی شده استفاده شود. از سویی دیگر خاک های رسی ضریب گذردهی کمی برای آب دارند.

لذا فشار آب حفره ای در آن ها ایجاد می شود.

بهتر است برای این خاک ها از تست های سه محوری زهکشی نشده استفاده شود.

تفاوت در انواع آزمایش های سه محوری

۱. در آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده UU قطر بزرگترین دانه باید کوچکتر از ۰٫۱ قطر نمونه باشد.

۲. در آزمایش های CU و CD برای خاک های عادی تحکیم یافته مقدار $C=0$ و برای خاک های بیش تحکیم یافته مقدار $C < 0$ می باشد.
۳. آزمایش تک محوری حالت خاصی از آزمایش UU است.
۴. در آزمایش UU بر روی خاک های غیراشباع، پوش مور به صورت منحنی می باشد.
۵. در خاک های خشک، نتایج پارامترهای مقاومت برشی در تمامی آزمایش های سه محوری UU و CU و CD یکسان است.
۶. در خاک های اشباع و یا غیراشباع دانه ای، زاویه اصطکاک داخلی با زاویه اصطکاک داخلی در حالت خشک برابر است. مگر اینکه خاک بسیار ریزدانه باشد و یا کرنش با نرخ بالایی صورت گیرد.
۷. در آزمایش سه محوری UU مقدار زاویه اصطکاک داخلی برابر صفر و در آزمایش سه محوری CU این مقدار ناچیز است.

نکات اجرایی

۱. قطر غشا باید بیشتر از 0.75 قطر نمونه باشد.
۲. غشا لاستیکی نباید سوراخ باشد.
۳. سرعت بارگذاری مناسب به اندازه نمونه و قطر ذرات بستگی داشته و مقدار استاندارد ندارد. این مقدار با سعی و خطا بدست می آید.
۴. برای اشباع سازی نمونه از تکنیک پس فشار استفاده می شود.
۵. قطر نمونه بر اساس قطر بزرگترین دانه انتخاب گردد.
۶. در اغلب موارد آزمایش سه محوری به صورت کنترل کرنش صورت می گیرد.
۷. آزمایش کنترل تنش عمدتاً برای تحلیل روانگرایی خاک ها استفاده می شود.
۸. آزمایش سه محوری زمانی به انتها می رسد که نیرو به جای افزایش، حالت کاهشی به خود می گیرد. حالت دوم اتمام آزمایش، زمانی است که نمونه تا بیست درصد کرنش را تجربه نماید.

www.TestKhak.com



۸. نمونه خاک نباید دارای شکستگی یا ترک خوردگی باشد
تجهیزات آزمایش سه محوری

تخمین پارامترهای مقاومت برشی

گاهی به دلیل گران قیمت بودن انجام آزمایش سه محوری و یا به دلیل وجود اشکالاتی در دستگاه سه محوری، امکان انجام آزمایش وجود ندارد. در این شرایط می توانیم از نتایج آزمایش های قبلی که بر روی انواع خاک ها صورت گرفته است استفاده کرد. همچنین گاهی امکان دارد آزمایش سه محوری بر روی خاک خاصی انجام داده باشیم و بخواهیم از صحت آزمایش های انجام شده مطمئن شویم. در این حالت نیز می توانیم از جداول زیر که محدوده نتایج پارامترهای مقاومت برشی را ارائه می کند استفاده کرد. شایان ذکر است که این نتایج تقریبی بوده و صرفاً جهت تخمین زدن و برآورد کلی مناسب است و استفاده از آنها جهت طراحی توصیه نمی گردد.

تخمین زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی در خاک های مختلف می توانید از جدول زیر استفاده کنید.

تخمین زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر حسب درجه		نوع خاک
حداکثر	حداقل	
۴۴	۴۰	شن شکسته ، بدون ناخالصی - با تراکم کم
۴۰	۳۸	شن و ماسه شکسته ، بدون ناخالصی - با تراکم کم
۳۷	۳۴	مخلوط شن و ماسه طبیعی ، بدون ناخالصی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط
۳۶	۳۲	مخلوط شن و ماسه طبیعی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط و با داشتن ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلیسی و رسی
۳۲	۳۰	مخلوط شن و ماسه طبیعی با تراکم متعارف (متوسط) و با ناخالصی ۱۲ تا ۲۵ درصد سیلت و رس و دانه بندی نامنظم
۳۵	۳۲	ماسه با دانه بندی منظم و گسترده ، بدون ناخالصی و تراکم متوسط
۳۲	۲۸	ماسه متوسط و ریز ، با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلتی و رسی تراکم متوسط و دانه بندی نامنظم
۳۱	۲۷	ماسه با تراکم متوسط و مخلوط با سیلت

۳۰	۲۵	ماسه با تراکم متوسط و مخلوط با سیلت و رس
۲۸	۲۶	سیلت (فاقد چسبندگی) و بدون ناخالصی رسی و تراکم متوسط
۲۴	۲۲	مخلوط سیلت و رس با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی ماسه ریز و تراکم متوسط
۲۲	۱۸	مخلوط سیلت و رس بدون ناخالصی ماسه ای و تراکم متوسط
۱۸	۱۲	رس با ناخالصی سیلت
۱۶	۰	رس

تخمین چسبندگی خاک (C)

در صورتی که تمایل به دانستن چسبندگی خاک های مختلف داشته باشید می توانید از مقادیر تقریبی در جدول زیر استفاده کنید.

تخمین چسبندگی خاک (C) بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع		نوع خاک
حداکثر	حداقل	
۰	۰	شن شکسته ، بدون ناخالصی - با تراکم کم
۰	۰	شن و ماسه شکسته ، بدون ناخالصی - با تراکم کم
۰	۰	مخلوط شن و ماسه طبیعی ، بدون ناخالصی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط
۰,۵	۰,۲۵	مخلوط شن و ماسه طبیعی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم

		متوسط و با داشتن ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلیسی و رسی
۰,۸	۰,۴	مخلوط شن و ماسه طبیعی با تراکم متعارف (متوسط) و با ناخالصی ۱۲ تا ۲۵ درصد سیلت و رس و دانه بندی نامنظم
.	.	ماسه با دانه بندی منظم و گسترده ، بدون ناخالصی و تراکم متوسط
۰,۵	۰,۲۵	ماسه متوسط و ریز ، با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلتی و رسی تراکم متوسط و دانه بندی نامنظم
۰,۷	۰,۲۵	ماسه با تراکم متوسط و مخلوط با سیلت
۰,۸	۰,۲۵	ماسه با تراکم متوسط و مخلوط با سیلت و رس
۰,۲۵	۰,۱	سیلت (فاقد چسبندگی) و بدون ناخالصی رسی و تراکم متوسط
۰,۶۵	۰,۲۵	مخلوط سیلت و رس با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی ماسه ریز و تراکم متوسط
۱	۰,۵	مخلوط سیلت و رس بدون ناخالصی ماسه ای و تراکم متوسط
۱,۵	۰,۵	رس با ناخالصی سیلت
۲,۵	۰,۵	رس

آزمایش سه محوری CD یا آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده، آزمایشی است که طی آن شیر زهکشی در مرحله اول و دوم آزمایش باز است.

این آزمایش بر اساس استاندارد انجام می شود.

این آزمایش به دلیل زمانبر بودن و لزوم آهسته انجام شدن آن چندان متداول نیست.

هر چند اطلاعات به دست آمده از این تست، برای تحلیل پایداری درازمدت شیروانی ها به کار می رود.

انواع دیگر آزمایش سه محوری، آزمایش های **تست سه محوری CU** و **تست سه محوری UU** می باشند.

تئوری آزمایش سه محوری CD

در این تست آزمایشگاهی در ابتدا نمونه تحت تنش همه جانبه قرار می گیرد.

این تنش همه جانبه، توسط مایعی که اطراف نمونه قرار گرفته تامین می شود.

در این مرحله شیرهای زهکشی به حالت باز شده باقی می ماند تا در اثر فشار همه جانبه، فشار آب حفره ای زایل شده از بین برود.

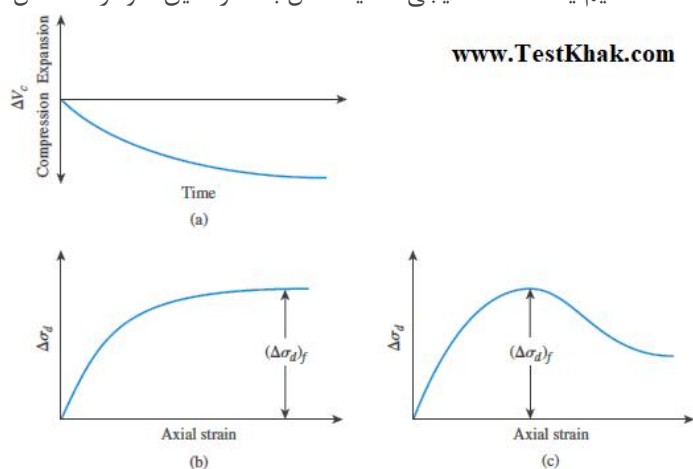
در این شرایط میزان تغییر حجم نمونه، با اندازه گیری میزان آب خارج شده از نمونه قابل محاسبه است.

پس از تحکیم یافتن کامل نمونه، تنش انحرافی به آرامی به نمونه اعمال می شود.

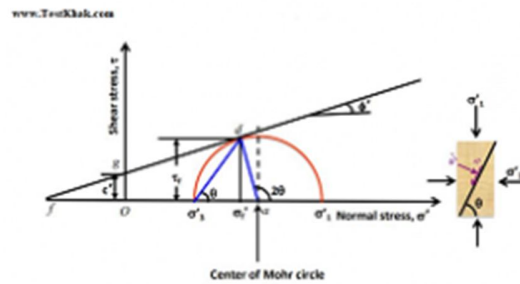
در این مرحله نیز شیر زهکشی آب باز است.

در این شرایط به دلیل ایجاد نشدن فشار آب حفره ای، تنش موثر و تنش کل با هم برابر است.

آزمایش سه محوری زهکشی شده تحکیم یافته CD نتایج مشابهی شکل بالا دارد. این نمودارها شامل اشکال زیر است:



- در شکل **a** نمودار تغییر حجم نمونه نسبت به زمان ترسیم شده است. با گذشت زمان، نمونه آب از دست داده و حجم آن کاهش می یابد.
 - در شکل **b** نمودار تنش کرنش نمونه خاک شل ملاحظه می گردد. نمودار رفتار سخت شوندهگی دارد.
 - در شکل **c** نمودار تنش کرنش نمونه خاک متراکم دیده می شود. در این حالت خاک رفتار نرم شونده دارد. با تغییر فشار محصور کننده و محاسبه نیرو انحرافی که موجب گسیختگی در خاک می شود، می توان آزمایش های گوناگونی بر روی نمونه خاک انجام داد.
- با تغییر دادن تنش های همه جانبه و تنش انحرافی، می توان دایره مورهای مختلفی ترسیم نمود. نمونه ای از این دایره مور و نحوه محاسبه فی و سی در خاک در شکل زیر قابل مشاهده است.
- خط مماس ترسیم شده بر دایره مور دارای یک شیب است. این شیب در واقع زاویه اصطکاک داخلی است. عرض از مبدا این خط، سی خاک یا همان چسبندگی است.



آزمایش سه محوری CD

آزمایش سه محوری UU پارامترهای مقاومت برشی خاک را تحت شرایط زهکشی نشده تحکیم نیافته به دست می آورد. در طی این آزمایش شیر زهکشی در تمام طول آزمایش بسته است. از نتایج این تست آزمایشگاهی می توان برای کنترل و محاسبه پایداری سد در مرحله آبیگری در پایان عملیات ساخت سد استفاده نمود.

این آزمایش بر اساس استاندارد انجام می شود.

انواع دیگر **آزمایش سه محوری**، **تست سه محوری CU** و **تست سه محوری CD** می باشند.

مراحل انجام آزمایش سه محوری UU

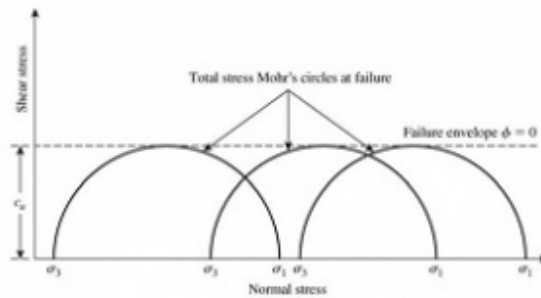
آماده سازی نمونه خاک

- غشا لاستیکی را بر روی نمونه خاک بکشید.
- برای این کار می توانیم از قالب استوانه ای استفاده کنیم.
- روغن کاری ابتدا و انتهای قالب ما را در انجام این کار کمک می کند.
- نمونه پوشانده شده با غشا لاستیکی را درون سلول قرار دهید.
- **دستگاه سه محوری** را آماده نمایید.
- لازم است اطمینان حاصل شود که کلاهک روی نمونه با پیستون اعمال نیرو درست در یک راستا قرار دارند.
- پس از اطمینان از همراستایی، پیستون را روی کلاهک نمونه قرار داده و گیج را قرائت نمایید.
- سلول را زیر پیستون قرار دهید.
- محفظه را با مایع پر کنید.
- وسایل اندازه گیری فشار را تنظیم نمایید.
- در برخی مواقع ممکن است جایگذاری پیستون اعمال بار قائم، پس از پر کردن سلول با مایع صورت گیرد.
- در هر شرایط، لازم است مطمئن شویم که قبل از اعمال نیرو، محفظه در جای خود قفل شده باشد.
- این کار به دلیل اندازه گیری نیروی آپلیفت صورت می گیرد.
- در صورتی که وسیله اندازه گیری فشار خارج از سلول قرار داشته باشد، فشار داخل محفظه نیرویی ایجاد می کند که در جهت خلاف حرکت پیستون بوده و ممکن است خطایی در روند آزمایش ایجاد نماید. لازم است این خطا تصحیح شود.

شروع فرآیند آزمایش

- بار قائم را اعمال نمایید.
- این بار قائم باید کرنش ثابتی در نمونه ایجاد نماید.
- این کرنش برای مصالح نرم یک درصد و برای مصالح ترد سه درصد مناسب است.

- بارگذاری را تا کرنش ۱۵ درصد و یا کاهش تنش انحرافی به میزان ۲۰ درصد و یا وقتی که کرنش به اندازه ۵ درصد بعد از تنش انحرافی بیشینه افزایش یافت، ادامه دهید.
- میزان بار و تغییر شکل را در زمان های مختلف انجام می دهیم.
- برای اینکه منحنی بدست آمده دقیق تر ترسیم گردد، لازم است قرائت ها در ابتدا و انهای بارگذاری بیشتر باشد.
- نمایی از نمودار حاصل از **تست سه محوری** تحکیم نیافته زهکشی نشده در شکل زیر قابل مشاهده است.
- پس از اتمام بارگذاری نمونه را از داخل سلول خارج کرده و میزان آب موجود در آن را با استفاده از **آزمایش درصد رطوبت** بدست آورید.
- در صورت امکان زاویه شکست حاصل شده روی نمونه را اندازه گیری کنید.



آزمایش سه محوری UU

آزمایش سه محوری CU یا آزمایش سه محوری تحکیم شده زهکشی نشده متداول ترین نوع **آزمایش سه محوری** است که طی آن نمونه به صورت کامل تحکیم می یابد. در این تست آزمایشگاهی، در طی مرحله اول شیر زهکشی باز است. اما در مرحله دوم و در هنگام اعمال تنش انحرافی، شیر زهکشی بسته است و یا آزمایش آنچنان با سرعت انجام می شود که نمونه فرصت زهکشی پیدا نمی کند. این آزمایش بر اساس **استاندارد ASTM D4767** انجام می شود. از این آزمایش می توان جهت مدل سازی رفتار خاک اشباع حین زلزله و یا حالت تخلیه سریع سدهای خاکی استفاده کرد. انواع دیگر **آزمایش سه محوری**، آزمایش های **سه محوری CD** و **سه محوری UU** می باشند. مراحل انجام آزمایش سه محوری CU

۱- قبل از اشباع

بعد از آماده کردن دستگاه، مراحل زیر انجام می شود:

۱. پیستون و کلاهک را طوری تغییر می دهیم که مطمئن شویم پیستون و کلاهک در یک راستا قرار گرفته اند.
 ۲. محفظه سلول را با مایع پر می کنیم و بررسی می کنیم که داخل مایع حباب هوا محبوس نگردد.
- ۲- اشباع

اشباع کردن نمونه به معنای آن است که حفرات داخل خاک، بدون اعمال نیروی پر از آب شود.

برای اطمینان از اشباع بودن نمونه از پارامتر B اسکمپتون استفاده می شود.

هنگامی که پارامتر B اسکمپتون برابر یک باشد، به معنای آن است که خاک کاملاً اشباع است.

اشباع کردن نمونه معمولاً به وسیله پس فشار و با طی کردن مراحل زیر صورت می گیرد:

۱. به کار بردن سیستم زهکشی خشک و ایجاد خلا

۲. جوشاندن صفحات متخلخل به طوری که آب در داخل سیستم جریان پیدا کند و به داخل نمونه جریان یافته و خاک را اشباع سازد.

اشباع کردن نمونه فرآیندی زمانمند است و ممکن است مدت زیادی طول بکشد تا نمونه به طور کامل اشباع گردد.



۳- تحکیم

مرحله اول **آزمایش سه محوری** اصطلاحاً مرحله تحکیم نامگذاری می شود.

در این مرحله نمونه تحت بارگذاری همه جانبه قرار گراگر گرفته و به دلیل باز بودن شیرهای زهکشی، آب داخل نمونه از آن خارج می گردد.

مراحل تحکیم عبارتند از:

۱. زمانی که اشباع سازی نمونه به اتمام رسید، پیستون اعمال بار محوری را به نمونه نزدیک کرده و آن را در محل مخصوص خود قرار می دهیم.

در این مرحله گیج تغییر شکل را قرائت می کنیم.

پس از ثبت تغییر شکل، پیستون را کمی بالاتر برده و آن را قفل می کنیم.

۲. شیر زهکشی را بسته و پس فشار را ثابت نگه می داریم.

فشار سلول را افزایش داده تا به فشار تحکیمی دلخواه برسد.

تفاضل فشار محفظه ای و پس فشار مساوی فشار تحکیمی است.

۳. حجم اولیه بورت قرائت می شود.

سیس شیر زهکشی را باز می کنیم. امکان زهکشی از هر دو طرف نیز برای نمونه میسر است.

مقادیر تغییر حجم در زمان های ۰,۱ و ۰,۲ و ۰,۵ و ۱ و ۴ و ۸ و ۱۵ و ۳۰ دقیقه و ۱ و ۲ و ۴ و ۸ ساعت را ثبت می کنیم.

۴. پس از ۱۵ دقیقه همزمان با ثبت تغییر حجم، میزان تغییر شکل قائم را نیز ثبت می نماییم.

۵. منحنی های تغییر شکل را در برابر لگاریتم زمان یا ریشه دوم زمان ترسیم می نماییم.

۶. با توجه به منحنی ترسیم شده، زمان پنجاه درصد تحکیم اولیه را مشخص می کنیم

۴- برش

آخرین مرحله از آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده، مرحله برش است.

در طول مرحله برش، اجازه زهکشی به نمونه داده نمی شود. در این مرحله لازم است موارد زیر انجام شود:

۱. شیرهای زهکشی متصل به سلول را به گونه ای می بندیم که در حین برش هیچگونه زهکشی از داخل نمونه صورت نگیرد.

شرایط جوری فراهم باشد که امکان اندازه گیری فشار آب حفره ای فراهم باشد.

۲. سلول را در زیر پیستون اعمال نیرو قرار می دهیم.

لازم است دقت شود که محور سلول با راستای اعمال نیرو در یک راستا باشد تا تیروی خمشی در نمونه ایجاد نشود.

۳. اگر وسیله اندازه گیری نیرو، خارج از سلول قرار داشته باشد، به علت ایجاد نیرو خلاف جهت بارگذاری پیستون، باعث ایجاد خطا در روند آزمایش ها می شود.
لازم است این خطا تصحیح شود.
۴. نیرو محوری انحرافی را اعمال می کنیم.
باید دقت شود که این نیرو، میزان کرنشی با نرخ ثابت ایجاد نماید.
۵. بارگذاری را تا کرنش ۱۵ درصد و یا کاهش تنش انحرافی به میزان ۲۰ درصد و یا وقتی که کرنش به اندازه ۵ درصد بعد از تنش انحرافی بیشینه افزایش یافت، ادامه می دهیم.
۶. آزمایش CBR چیست؟ در این نوشتار می خواهیم این آزمایش را به طور مفصل شرح دهیم.
نسبت باربری کالیفرنیا CBR با هدف تعیین ظرفیت باربری خاک متراکم شده انجام می شود. این آزمایش از متداول ترین آزمایش ها در صنعت راهسازی است.
ابتدا به تشریح مفهوم آزمایش سی بی آر پرداخته می شود.
فیلم کوتاهی نیز از نحوه انجام این آزمایش ژئوتکنیکی برای شما تهیه کرده ایم.
در بخش بعد نحوه انجام این تست آزمایشگاهی بیان می شود.
۷. تاریخچه سی بی آر
۸. آزمایش سی بی آر در سال ۱۹۲۶ توسط شخصی به نام پورتر به دنیای ژئوتکنیک معرفی شد.
سه سال بعد در سال ۱۹۲۹ و پس از گسترش استفاده از این آزمایش در اداره راهسازی ایالت کالیفرنیا آمریکا به آزمایش نسبت ضریب باربری کالیفرنیا CBR معروف شد.
این آزمایش متداول ترین روش به دست آوردن ظرفیت باربری لایه های مختلف راهسازی از جمله اساس و زیراساس است.
از نتایج این آزمایش برای طراحی ضخامت لایه های مختلف در راهسازی استفاده می شود.
۹. CBR چیست؟
۱۰. طبق تعریف، نسبت باربری کالیفرنیا CBR در یک خاک، نسبت نیروی لازم جهت فروبردن یک پیستون با شکل، سرعت و عمق معین در خاک مورد نظر، به نیروی لازم جهت فرو بردن همان پیستون در مصالح استاندارد است.
۱۱. به زبان ساده تر در دنبال آن هستیم که بدانیم اگر ۱۳۶۶ کیلوگرم بار برای نفوذ ۲٫۵ سانتی متر در مصالح استاندارد نیاز است، در خاک مد نظر خودمان چند کیلوگرم بار وارد کنیم تا همان نفوذ ۲٫۵ میلی متری ایجاد شود؟
بعد از اینکه آن مقدار را به دست آوردیم، آنرا تقسیم بر ۱۳۶۶ می کنیم تا عدد سی بی آر به دست آید.
مثلا فرض کنید خاکی داریم که آنرا به تراکم رسانده ایم.
برای نفوذ ۲٫۵ میلی متر در آن نیاز به ۳۰ کیلوگرم نیرو است.
حال عدد CBR آن حاصل تقسیم ۳۰۰۰ بر ۱۳۶۶ و ضرب در عدد ۱۰۰ می باشد.
یعنی عدد CBR آن ۲٫۲ می باشد.
امروزه این فرآیندها توسط نرم افزارهای آزمایشگاه مکانیک خاک انجام می شود.
۱۲. مصالح استاندارد چیست؟
مصالح استاندارد نوعی سنگ شکسته است که بار استاندارد برای نفوذ پیستونی با شکل استاندارد در آن مورد نیاز است.
مقادیر بار وارد شده در ازای میزان نفوذ در مصالح استاندارد مطابق جدول زیر است:

میزان نفوذ	بار	فشار	فشار
۲,۵ میلی متر	۱۳۶۶ کیلوگرم	۶,۹ مگا پاسکال	۷۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع
۵ میلی متر	۲۰۳۹ کیلوگرم	۱۰,۳ مگا پاسکال	۱۰۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع
۷,۵ میلی متر	۲۵۷۲ کیلوگرم	۱۳ مگا پاسکال	۱۳۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع
۱۰ میلی متر	۳۱۶۲ کیلوگرم	۱۶ مگا پاسکال	۱۶۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع
۱۲,۷ میلی متر	۳۵۶۲ کیلوگرم	۱۸ مگا پاسکال	۱۸۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

جدول بالا به ما می گوید که برای نفوذ پیستون به اندازه ۲,۵ میلی متر، نیرویی معادل ۱۳۶۶ کیلوگرم به مصالح استاندارد، وارد کنیم. عدد سی بی آر با استفاده از فرمول زیر به دست می آید:

$$CBR = \frac{\text{بار استفاده شده در آزمایش}}{\text{بار استاندارد}} \times 100$$

فرمول سی بی آر CBR

وسایل آزمایش CBR

- قالب با قطر ۱۵,۲ سانتی متر و ارتفاع ۱۷,۸ سانتی متر و دیسک پایینی با قطر ۱۵,۱ سانتی متر و ارتفاع ۶,۱۴ سانتی متر و سایر ملحقیات که در شکل زیر قابل مشاهده است.
- چکش جهت متراکم سازی با وزن ۴,۵ کیلوگرم
- کرنش سنج جهت محاسبه میزان تورم خاک با دقت ۰,۰۱ میلی متر
- وزنه های اعمال بار
- پیستون فولادی به مساحت ۱۹,۳۴ سانتی متر مربع
- ابزاری جهت اعمال فشار. باید دقت شود که فشار اعمالی با سرعت ۱,۲۷ میلی متر در دقیقه اعمال گردد.
- مخزن جهت نگهداری آب و اشباع کردن نمونه
- **گرمخانه یا آون** جهت تعیین رطوبت در آزمایش درصد رطوبت خاک
- لوازم عمومی در آزمایشگاه مکانیک خاک مثل فاشق، کارک، سینی، کاغذ صافی، ترازو و خط کش لبه تیز



آزمایش CBR

روش انجام آزمایش CBR

استاندارد انجام آزمایش می باشد.

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

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

ب) نمونه در ابتدا اشباع شده و سپس تحت آزمایش قرار می گیرد.

در این حالت نمونه به مدت ۹۶ ساعت در آب قرار داده می شود و برای بهتر اشباع شدن، سرباری معادل نصف وزن روسازی به نمونه خاک اعمال می شود.

حداقل وزن اعمالی باید ۴٫۵ کیلوگرم باشد.

تست CBR بر روی نمونه خشک

۱. مقداری خاک به وزن تقریبی ۵٫۵ کیلوگرم انتخاب کرده و از الک ۱۹ میلی متر عبور دهید.
۲. مقداری خاک را برای **تعیین درصد رطوبت خاک** جدا نمایید و درصد رطوبت خاک را به دست آورید.
۳. خاک را به درصد رطوبت بهینه رسانده و مطابق دستورالعمل آزمایش تراکم خاک ، متراکم نمایید.
۴. قالب محتوی خاک را وزن کرده و سرباری با وزن بیش از ۴٫۵ کیلوگرم روی آن قرار دهید.
۵. مجموعه خاک و قالب را روی دستگاه CBR قرار داده و با پیچاندن اهرم آنرا به پیستون نزدیک نمایید.
۶. گیج های نفوذسنج و نیروسنج را صفر کنید. مجموعه را با سرعت ۱٫۲۷ میلی متر در دقیقه بالا آورده و نیرو را در هر دقیقه قرائت نمایید.

۷. فرآیند را تا ۱۵ دقیقه و نفوذ تقریبی ۱۲٫۵ میلی متر ادامه دهید.

۸. از زیر قسمت فشرده، زیر آن و قسمت میانی نمونه، نمونه هایی جهت تعیین درصد رطوبت انتخاب نمایید

تست CBR بر روی نمونه اشباع

۱. با استفاده از اصول گفته شده در **آزمایش تراکم خاک** نمونه را متراکم نمایید
۲. قالب محتوی خاک را وزن کرده و صفحه مشبک را بر روی آن قرار دهید.
۳. بر روی مجموعه وزنه هایی قرار دهید. بین خاک و صفحه، کاغذ صافی قرار دهید تا خاک به صفحه نچسبد.
۴. نمونه خاک را در مخزن آب غوطه ور سازید.
۵. گیج سنجش تورم را به نمونه نزدیک کنید. آن را صفر کرده و آزمایش را شروع کنید.
۶. مقادیر تورم را در فواصل زمانی ۰، ۱، ۲، ۸، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت قرائت و ثبت نمایید.
۷. بعد از طی شدن ۹۶ ساعت، نمونه را خارج نمایید. سربارها و صفحه مشبک را بردارید. تا ۱۵ دقیقه صبر کنید تا آب اضافی از نمونه خارج شود.
۸. نمونه خاک و قالب را وزن کنید.

۸. مراحل ۴ تا ۸ از بخش آزمایش خشک را تکرار نمایید.

www.TestKhak.com



آزمایش CBR

عوامل تاثیر گذار بر CBR

جنس خاک

مقدار نسبت باربری کالیفرنیا در خاک های درشت دانه از خاک های ریزدانه بیشتر است.

تراکم خاک

خاک های متراکم تر مقدار CBR بیشتری دارند.

رطوبت

افزایش رطوبت باعث کاهش مقدار CBR در خاک ها می شود. این تاثیر کاهشی، در خاک های ریزدانه بیشتر است.

وزن مخصوص

با افزایش وزن مخصوص در خاک ها، میزان سی بی آر افزایش پیدا می کند

نحوه انجام آزمایش

سربار اعمالی حین آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR می تواند در نتایج تغییراتی ایجاد کند.

عدم وجود سربار می تواند باعث شود که مقادیر CBR کمتر از مقدار واقعی بدست آید.

عدد CBR مناسب چند است؟

چه عدد سی بی آر خوب و چه عددی از CBR نامناسب محسوب می شود؟

فرض کنید شما آزمایش CBR را به درستی انجام دادید و عدد سی بی آر شما مساوی ۲۰ شد. حالا سوال این است آیا این خاک

با این نتیجه خاک خوبی است یا خاک بدی؟

جواب این است که بستگی به محلی دارد که قرار است از آن خاک استفاده کنید.

خلاصه ای از مفهوم عدد های CBR مختلف در جدول زیر خلاصه شده است.

محل مناسب جهت استفاده	توصیف خاک	عدد CBR
خاک بستر	ضعیف	صفر تا سه
خاک بستر	ضعیف تا نسبتا خوب	سه تا هفت

زیر اساس	نسبتا خوب	هفت تا بیست
اساس و زیراساس	خوب	بیست تا پنجاه
اساس	عالی	بیش از پنجاه

به عنوان مثال اگر سی بی آر خاک شما ۱۵ بود می توانید آنرا در لایه زیراساس استفاده کنید. اما استفاده از این خاک برای لایه اساس، مناسب نیست.

آزمایش درصد رطوبت خاک جز تست های آزمایشگاهی پایه ای در مکانیک خاک است. به طوری که بسیاری از آزمایشگاه صحرایی یا آزمایشگاهی ژئوتکنیکی بدون انجام تست درصد رطوبت امکان پذیر نیست. در این نوشتار شرح کامل از آزمایش درصد رطوبت خاک به همراه محاسبات مربوط به آن ارائه می گردد. وسایل آزمایش درصد رطوبت خاک

- **ظروف تعیین درصد رطوبت:** برای آزمایش درصد رطوبت خاک لازم است از ظرفی آلومینیومی یا حلبی استفاده کرد که حین آزمایش تغییر حجم نداشته باشد. برای نمونه های با وزن کمتر از دویست گرم لازم است از ظرفی با درپوش فلزی استفاده کرد. برای سنجش درصد رطوبت در خاکهای با وزن زیاد، نیاز به درپوش نمی باشد.
- **گرمخانه:** گرمخانه یا آون برای تیخیر کردن آب موجود در خاک ها استفاده می شود. دمای گرمخانه لازم است در حدود ۱۱۰ درجه سانتی گراد تنظیم گردد. دماهای کمتر از این مقدار آب را از داخل خاک بیرون نمی آورد. دماهای بیش از این مقدار هم ممکن است بافت خاک را دچار آسیب نماید.
- ترازو: برای نمونه خاک های کمتر از ۲۰۰ گرم از ترازویی با حساسیت ۰,۰۱ گرم استفاده شود. برای نمونه خاک هایی با وزن بیش از ۲۰۰ گرم از ترازویی با حساسیت ۰,۱ استفاده گردد.



آزمایش درصد رطوبت خاک

روش انجام تست در صد رطوبت

آزمایش درصد رطوبت خاک با هدف تعیین درصد وزنی آب در خاک نسبت به دانه های خاک صورت می گیرد. این آزمایش در بسیاری از آزمایش های دیگر مکانیک خاک همچون **آزمایش حدود اتربرگ**، **آزمایش تراکم خاک** و ... کاربرد

دارد.

استاندارد انجام این آزمایش و AASHTO T 265-81 می باشد.

در این بخش روش گام به گام این تست آزمایشگاهی تشریح می شود.

۱. وزن ظرف خالی به همراه درب آن را اندازه بگیرید (W_1)
۲. نمونه خاک را درون ظرف قرار دهید.
درپوش آنرا روی ظرف قرار دهید تا رطوبت آن از دست نرود.
سپس آن را توزین نمایید (W_2).
۳. بعد از وزن کردن نمونه درپوش را بردارید و نمونه را به مدت ۲۴ ساعت درون گرمخانه قرار دهید تا رطوبت آن کاملاً از آن خارج شود.
زمان قرارگیری خاک درون آن به نوع خاک بستگی دارد.
در بسیاری از مواقع قرارگیری خاک به مدت ۱۶ ساعت در گرمخانه کافی می باشد.
۴. هنگامی که از خارج شدن کامل تمامی آب درون خاک اطمینان حاصل شد، آنرا از داخل آن خارج کرده و درپوش آنرا قرا می دهید تا در مجاورت هوا، رطوبت جذب نکند.
قوطی و نمونه خاک موجود در آن را وزن کرده و مقدار آنرا یادداشت کنید (W_3).
محاسبه درصد رطوبت خاک
درصد رطوبت به صورت درصدی از وزن خشک خاک بیان می شود و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\omega = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100$$

W_2 = وزن ظرف و خاک مرطوب (قبل از آون)

W_3 = وزن ظرف و وزن خاک خشک (بعد از آون)

W_1 = وزن ظرف خالی

ω = درصد رطوبت

آزمایش حدود اتربرگ یکی از اصلی ترین آزمایش های مکانیک خاک بوده که طی آن حد خمیری، حد روانی و حد انقباض خاک تعیین می گردد.

در این نوشتار برآنیم تا با بررسی تخصصی آزمایش حدود اتربرگ، اصول کلی و نحوه انجام این آزمایش را به طور کامل شرح دهیم. آزمایش حدود اتربرگ، متداول ترین آزمایش جهت بررسی خواص خمیری **خاک های چسبنده** است.

حدود اتربرگ یعنی چه؟

مواد مختلف در طبیعت به سه شکل جامد، مایع و گاز هستند.

برخی مواد تنها در یک فاز نیستند و در شرایط مختلف تغییر حالت می دهند.

مثل خاک ها.

خاک رس خشک شده ای را در نظر بگیرید.

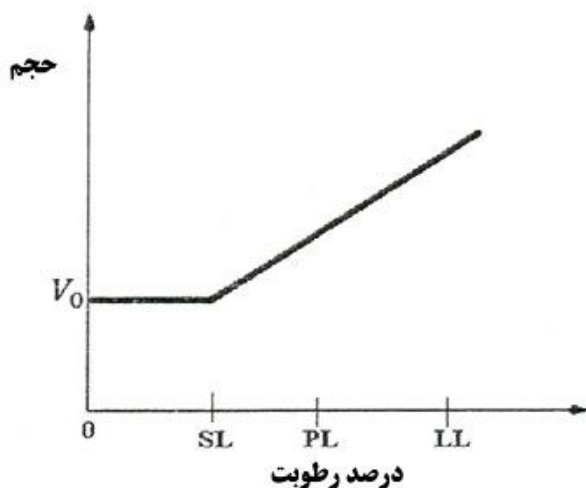
مقداری به آن آب زده و آنرا مرطوب می کنیم.

اگر این آب به مقدار کافی باشد، خاک حالت خمیری به خود می گیرد.
 اگر باز هم مقدار آب را افزایش دهیم خاک روان شده و به حالت مایع تبدیل می شود.
 مشاهده کردید که خاک ها در حضور آب می توانند از حالت جامد به حالت مایع تبدیل شوند.
 حال سوال اینجاست که چه مقدار آب به خاک بزنیم تا خاک حالت خمیری به خود بگیرد؟
 چه مقدار آب بزنیم تا خاک به مایع تبدیل شود؟
 اینها سوالاتی بود که یک دانشمند سوئدی به نام آلبرت اتربرگ به آنها پاسخ داد.

حد مایع یا حد روانی (LL)

حد روانی یا حد مایع که آنرا با LL نمایش می دهند در صد رطوبتی که طی آن مقاومت برشی خاک تا حدی کم می شود که به حالت روان در میان می آید.
 کاساگرانده این شرایط را با دستگاه استاندارد شیبیه سازی کرد که موسوم به جام کاساگرانده است و طی آن خاک قرار گرفته در این جام که توسط شیارکش برش خورده است، با ۲۵ ضربه بسته می شود.
 حد مایع، جداکننده حالت مایع و خمیری در خاک ریزدانه است.
 به عبارتی دیگر اگر در صد رطوبتی بیش از حد روانی به خاک دهیم، خاک به صورت روان، و در صد رطوبت کمتر از حد روانی، شرایط خمیری در خاک ایجاد می کند. کاساگرانده هر ضربه در دستگاه استاندارد خود را معادل ۰,۱ کیلونیوتن بر متر مربع تخمین زده بود.

لذا حد روانی خاک، مقاومت برشی معادل ۲,۵ کیلونیوتن بر متر مربع دارد که مقدار ناچیزی است.
 می توان اذعان کرد که خاکها در حد روانی مقاومت برشی یکسان اما ناچیزی دارد. یکی از کاربردهای حد روانی، محاسبه ضریب فشردگی خاک های رسی با استفاده از روابط اسکمپتون است.
 از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر مقدار حد روانی، در صد رس است. با افزایش در صد رس خاک، مقدار جذب آب بالاتر رفته و خاک دیرتر به حالت مایع می رسد. لذا حد روانی افزایش می یابد.



نمودار تغییرات حجم نسبت به حدود اتربرگ

حد خمیری (PL)

میزان رطوبتی است که به ازای آن اگر فتیله ای از خاک به قطر ۳,۲ میلیمتر ساخته شود، ترک برمیدارد.
 به عبارتی دیگر، این درصد رطوبت جداکننده حالت نیمه جامد و خمیری در خاک می باشد.

با افزایش در صد رس خاک حد خمیری در خاک پایین می آید. علت آن بیشتر شدن "آب جذب سطحی" می باشد که موجب می شود خاک با رطوبت کمتری به حالت خمیری در آید.

حد انقباض (SL)

با کاهش پیوسته رطوبت، خاک منقبض می گردد و تا جایی می رسد که دیگر کاهش حجم در آن مشاهده نمی شود.

میزان رطوبتی که در آن دیگر شاهد کاهش حجم نباشیم، حد انقباض نامیده می شود.

یکی از کاربردهای حد انقباض، بررسی پتانسیل تغییر حجم خاک هاست.

هرچه حد انقباض پایینتر باشد، پتانسیل تغییر حجم در آن خاک بیشتر است.

دلیل این پدیده، آن است که آب کمتری برای شروع تغییر حجم نیاز دارد.

نشانه خمیری (PI)

نشانه خمیری به صورت $PI=LL-PL$ تعریف شده و پارامتری مناسب جهت ارزیابی میزان خاصیت خمیری در خاک ها به حساب می آید.

نشانه خمیری محدوده ای از درصد رطوبت را نشان می دهد که خاک، در آن محدوده حالت خمیری دارد.

هر چقدر PI در خاک بالاتر باشد، نشان دهنده آن است که خاک خصوصیت خمیری بیشتری دارد.

نشانه خمیری تابعی از مقدار رس موجود در خاک و نوع کانی های رسی آن خاک است و تابعی از درصد رطوبت نیست.

نشانه روانی (LI)

نشانه روانی معیاری جهت بررسی میزان سفتی نسبی خاک است و به صورت زیر تعریف می شود:

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

فرمول نشانه روانی یا LI

که در آن W درصد رطوبت خاک است. درصد رطوبت خاک رس تحکیم نیافته می تواند بزرگتر از حد مایع باشد و در خاک های

رسی پیش تحکیم یافته، میزان رطوبت می تواند کمتر از حد مایع خاک باشد.

نشانه روانی می تواند نزدیک به صفر و یا حتی منفی شود.

در دو حالت، خاک غیر خمیری محسوب می شود:

• اول آنکه از آزمایش فتیله کردن قادر به دریافت درصد رطوبت حالت خمیری خاک نباشیم.

• دوم زمانی است که حد خمیری با حد روانی برابر شده و یا اینکه حد خمیری بزرگتر از حد روانی گردد.

روش به دست آوردن حد انقباض از نمودار خمیری

نمودار خمیری خاک برای اولین بار توسط کاساگرانده ارایه شد.

این نمودار رابطه بین PI و LL را بیان می کرد و به وسیله این نمودار می توان حد انقباض خاک های ریزدانه را بدین ترتیب بدست

آورد:

گام اول

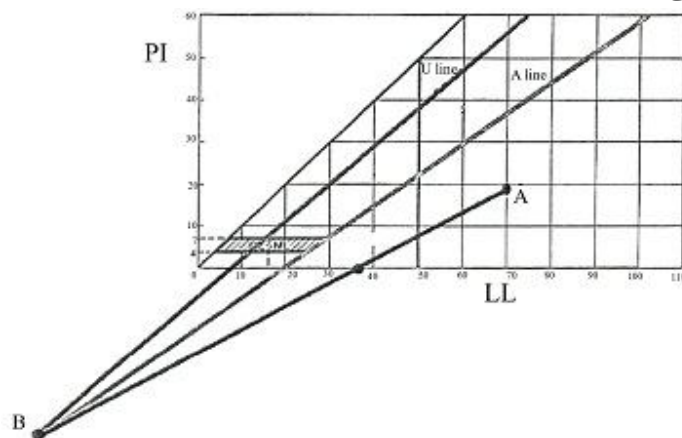
خط A و u که در شکل زیر ترسیم شده را ادامه داده تا یکدیگر را در نقطه فرضی مثل B قطع نمایند.

گام دوم

با داشتن LL و PI مختصات آن را روی نمودار خمیری (نقطه A) مشخص می کنیم.

گام سوم

نقاط بدست آمده **A** و **B** را به یکدیگر متصل می نماییم. این خط محور مربوط به حد مایع را در نقطه ای مثل **C** قطع می نماید. طول نقطه **C** به صورت تقریبی، حد انقباض خاک خواهد بود.



نحوه به دست آوردن حد انقباض

از جمله کاربردهای آزمایش حدود اتربرگ، کنترل مصالح در عملیات اجرایی و یکی از ابزارهای مفید جهت **طبقه بندی و نام گذاری خاک های ریزدانه** است. همچنین از مقایسه حد روانی خاک قبل و بعد از خشک کردن در آون، میزان مواد آلی موجود در خاک را تشخیص داد.

وسایل مورد نیاز آزمایش حدود اتربرگ

الف) آزمایش حد روانی

۱. شیار زن استاندارد و دستگاه کاساگرانده
 ۲. کاردک های مخصوص و صفحه شیشه ای
 ۳. هاون و دسته آن جهت جداسازی ذرات خاک
 ۴. الک شماره چهل
 ۵. ترازو با دقت یک صدم گرم
- ب) آزمایش حد خمیری

۱. صفحه شیشه ای و کاردک های مخصوص به آن جهت ورز دادن خاک
۲. ترازو با دقت یک صدم گرم
۳. آون با درجه حرارت ۱۱۰ درجه سانتی گراد

ج) آزمایش تعیین حد انقباض

۱. ظرف شیشه ای با سه پایه
 ۲. ظرف انقباض
 ۳. جیوه
 ۴. ترازو با دقت یک صدم گرم
 ۵. دستگاه سنجش حجم
- روش انجام آزمایش حدود اتربرگ

آزمایش حدود اتربرگ بر اساس استاندارد انجام می گردد. این تست آزمایشگاهی خود شامل چند آزمایش کوچک دیگر است. این آزمایشات عبارتند از:

الف- آزمایش تعیین حد روانی

وسایل مورد نیاز در آزمایش حد روانی

۱- جام کاساگرانده

دستگاه کاساگرانده وسیله ای است مکانیکی که دارای یک پیاله به قطر داخلی ۵۴ میلی متر، ضخامت ۲ میلی متر و وزن ۲۰۰ گرم که عمدتاً از جنس برنج ساخته می شود.

این پیاله توسط دو گیره، از پشت به پایه ای پلاستیکی لولا گردیده است.

به وسیله گرداندن یک دسته پیاله، لولا چرخیده، به بالا رفته و سپس به سمت پایین رها می شود و در حقیقت ضربه ای به کف آن زده می شود.

ارتفاع سقوط در حد استاندارد قابل تنظیم است.

هنگام تنظیم دستگاه لازم است به این نکته توجه داشته باشیم که لولا اتصال دهنده پیاله به پایه، ساییده شده نباشد تا باعث جابجایی یا حرکت پیاله نشود.

همچنین لازم است دقت داشته باشیم که پیچ های اتصال کاسه به دستگیره کاملاً سفت بوده و کف پیاله در اثر ضربات زیاد، گود نشده باشد.

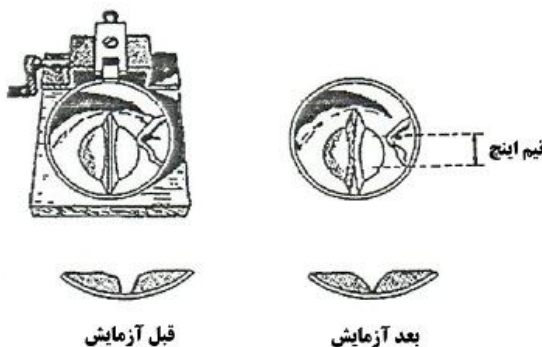
۲- میله شیار

میله شیار دهنده استاندارد، می تواند شکافی با مقطع دوزنقه ای که قاعده کوچک آن در پایین به عرض دو میلی متر، ارتفاع هشت میلی متر و قاعده بزرگ در بالا به عرض یازده میلی متر ایجاد نماید.

انتهای میله شیارکش گرد بوده و ضخامت آن ده میلی متر است.

از انتهای آن می توان جهت تنظیم ارتفاع سقوط استفاده نمود. روش تنظیم ارتفاع بدین صورت است که قسمت انتهایی میله شیارکش را زیر پیاله قرار داده با پیچ های اتصال پیاله به پایه آن را تنظیم می کنند.

برای بررسی می توان چندین بار چرخاندن سریع، مجموعه را محک زد. اگر هنگام چرخاندن، صدای زنگ ضعیفی به گوش رسید، نشان دهنده آن است که دستگاه به درستی تنظیم شده است.



وسایل آزمایش حد روانی (جام کاساگرانده)

شرایط نمونه ها در آزمایش تعیین حد روانی

آزمایش حدود اتربرگ ، بر روی خاک های عبوری از الک نمره ۴۰ صورت میگیرد. نمونه های انتخاب شده باید بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم وزن داشته باشند.

مراحل انجام آزمایش آزمایش تعیین حد روانی

مرحله اول:

ظرفی را جهت انجام آزمایش انتخاب نموده و وزن آن را محاسبه کنید. (W1)

مرحله دوم:

نمونه انتخابی را که در هوا خشک شده است از الک شماره چهل عبور داده و در ظرف تبخیر قرار دهید و اندکی آب به آن اضافه نمایید.

آب را به طور کامل با آن مخلوط نموده تا به صورت خمیره ای در آید.

سپس لازم است خمیره به مدت ۱۶ ساعت در آن وضعیت باقی مانده تا آب اضافه شده به خوبی جذب خاک گردد.

مرحله سوم:

قسمتی از نمونه خاکی که در مرحله قبلی تهیه شده بود را در داخل پیاله کاساگرانده قرار داده و با استفاده از کاردک، سطح آنرا صاف کنید، به طوری که عمق خاک در گودترین نقطه، ۱۰ میلی متر باشد.

در حین صاف کردن لازم است دقت نمایید که حباب هوا داخل خاک حبس نشود.

الباقی خاک را با دستمالی مرطوب بپوشانید تا رطوبت آن حفظ گردد.

مرحله چهارم:

با استفاده از شیارزن استاندارد، شیاری روی خاک داخل پیاله در امتداد محور تقارن آن بکشید.

مرحله پنجم:

دسته دستگاه را با سرعتی در حدود دو ضربه در ثانیه بچرخانید.

ملاحظه خواهید کرد که با چرخاندن دسته، پیاله بالا می رود و به سمت پایین رها می شود و بدین ترتیب ضربه ای به پیاله وارد می گردد.

این کار را تا آنجایی ادامه می دهید طوری از شیار به اندازه ۱۳ میلی متر بسته شود.

مرحله ششم:

بررسی نمایید که وجود هوای محبوس باعث بسته شدن زود هنگام شیار نشده باشد، در صورت مشاهده آثاری از محبوس شدگی فشار هوا، لازم است آزمایش مجدداً تکرار گردد.

مرحله هفتم:

تعداد ضرباتی که موجب بسته شدن شیار گردید را یادداشت نمایید.

مقداری از خاک بسته شده را جهت اندازه گیری درصد رطوبت، از داخل پیاله برداشته، داخل ظرف قرار داده و وزن کنید. (W2)

مرحله هشتم:

پیاله را خالی کرده و پیاله و شیارزن را تمیز کنید.

مرحله نهم:

به نمونه خاک، مقدار رطوبت اضافه کرده تا درصد رطوبت آن بالاتر رفته و بدین ترتیب شیار با تعداد ضربات کمتری بسته شود. این مراحل را بین ۳ تا ۸ بار تکرار نمایید.

مرحله دهم:

نمونه هایی که در مرحله قبلی بدست آمده را به همراه ظرف، در داخل گرمخانه قرار دهید و پس از خشک شدن وزن آن ها را یادداشت نمایید. (W3)

تذکره: باید دقت شود که مطابق استاندارد ASTM برای آزمایش حدود اتربرگ، لازم است آزمایش از حالت خشک به تر انجام شود.

بدین ترتیب که نمونه های ابتدایی دارای درصد رطوبت کمی بوده و به تدریج به آن آب اضافه کنیم تا درصد رطوبت آن افزایش

یابد.

آزمایش هایی که با بیش از ۳۵ ضربه و یا با کمتر از ۱۵ ضربه بسته می شوند یادداشت نخواهند شد. درصد رطوبت در تکرار ها باید به گونه ای انتخاب شود که در یک آزمایش، شیار ایجاد شده در محدوده ۱۵ تا ۳۵ ضربه بسته شود. محاسبات آزمایش تعیین حد روانی درصد رطوبت برای هر نمونه از رابطه زیر به دست می آید.

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

فرمول محاسبه درصد رطوبت

منحنی درصد رطوبت برحسب لگاریتم تعداد ضربات را ترسیم نمایید.

این منحنی به طور تقریبی، یک خط مستقیم است و اصطلاحاً منحنی جریان نامیده می شود.

با استفاده از این خط، میزان رطوبت مربوط به ۲۵ ضربه را به دست آورید.

این درصد رطوبت، همان حد روانی خاک است.

(ب) مراحل انجام آزمایش تعیین حد خمیری

مرحله اول:

از ۲۰ گرم خاکی که در آزمایش حد روانی تهیه شده بود، ۱,۵ تا ۲ گرم برداشته و با فشردن بین انگشتان دست، به صورت توده ای بیضی شکل درآورید. با فشردن خاک بین انگشتان خود و صفحه شیشه ای، خاک را به صورت فتیله درآورید. با غلتاندن، قطر فتیله را در تمام طول فتیله ثابت کنید. وقتی فتیله به قطر ۳,۲ میلی متر رسید، آن را به چند قطعه تقسیم نمایید. قطعات را بین دو دست فشرده و با ورز دادن به حالت بیضی در آورید و دوباره در سطح شیشه بغلتانید. این عمل را آنقدر تکرار نمایید تا خاک حین عمل غلتاندن ترک برداشته و خرد شود و دیگر امکان فتیله شدن نداشته باشد. در صورتی که خرد شدن قبل از قطر ۳,۲ میلی متری پیش آید عملیات را متوقف می نمایم.

نکته:

مقدار فشار اعمال شده با توجه به نوع خاک متفاوت است.

مثلاً بهتر است خاک های شکننده با خاصیت خمیری کم را با سطح خارجی دست یا نوک انگشتان بر روی صفحه بغلتانید.

مرحله دوم:

تکه های خرد شده را جمع آوری نموده در ظرف قرار داده و بلافاصله درب ظرف را ببندید.

مرحله سوم:

حدود ۱,۵ تا ۲ گرم از نمونه آماده شده در آزمایش حد روانی را جدا کنید.

مرحله اول را برای آن تکرار نمایید.

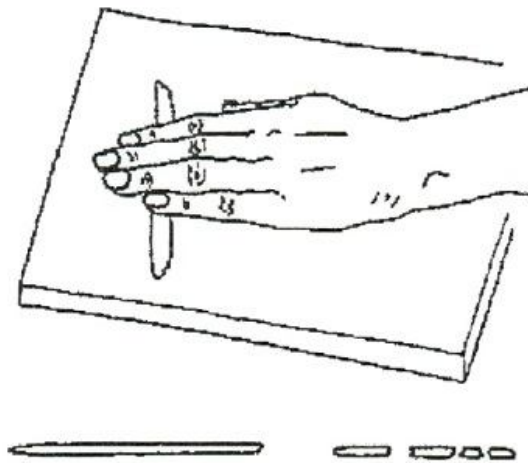
مرحله چهارم:

بند یک تا سه را تکرار نمایید.

بدین ترتیب در پایان آزمایش، دو ظرف تعیین درصد رطوبت حاوی شش گرم نمونه دارید.

مرحله پنجم:

درصد رطوبت را در نمونه های موجود در دو ظرف تعیین نمایید.



آزمایش تعیین حد خمیری خاک

ج) مراحل انجام آزمایش تعیین حد انقباض

مرحله اول:

حدود ۳۰ گرم از خاک عبوری از الک شماره ۴۰ را انتخاب کنید. آنرا در ظرف تبخیر ریخته و با آب مقطر مخلوط نمایید. مقدار آب اضافه شده باید به حدی باشد که درصد رطوبت خاک، از حد روانی خاک بیشتر باشد. باید دقت شود که حین به هم زدن خاک، در آن هوایی محبوس نگردد. برای اجتناب از ترک خوردن خاک حین خشک شدن در خاک های با خاصیت خمیری بالا، لازم است از کمترین حجم آب استفاده شود.

مرحله دوم:

سطح داخلی ظرف انقباض را با لایه نازکی از گریس یا روغن سیلیکون یا پودر تفلون چرب نمایید. پس از روغنکاری، وزن ظرف خالی را اندازه گیری کرده و یادداشت نمایید (Mt).

مرحله سوم:

ظرف انقباض را داخل ظرف بزرگتری قرار داده و داخل آن را پر از جیوه نمایید تا لبریز گردد. صفحه شیشه ای را با فشار روی ظرف قرار داده تا مقادیر اضافی جیوه سرریز نماید. حجم جیوه ای که در ظرف انقباض انباشته شده را تعیین نمایید. این کار را می توان با استفاده از اندازه گیری جرم جیوه و تقسیم آن بر چگالی جیوه بدست آورد. روش دیگر استفاده از استوانه مدرج است.

این حجم را به عنوان حجم ظرف و یا حجم اولیه خاک مرطوب یادداشت نمایید (V₀).

مرحله چهارم:

یک سوم از حجم ظرف انقباض را با خاک مرطوب پر نمایید.

به این ترتیب که خاک را در وسط ظرف قرار دهید.

چندین ضربه روی آن بزنید تا خاک داخل ظرف از وسط به کناره ها جریان یابد.

بدین ترتیب در صورت محبوس شدن حباب هوا، از آن خارج می گردد.

این عمل را آنقدر تکرار نمایید تا ظرف کاملا پر و لبریز گردد.

سپس با خط کشی یا وسیله ای لبه تیز سطح ظرف را صاف نمایید.
 بعد از این مرحله سریعاً محتوای ظرف را وزن کرده و وزن خاک مرطوب و ظرف را یادداشت نمایید (Mw).
 مرحله پنجم:

ظرف محتوی خاک مرطوب را یک روز در فضای آزمایشگاه قرار دهید تا خشک شود.
 این خشک شدن تا زمانی ادامه پیدا کند که سطح خاک از تیره به روشن تغییر کند.
 پس از آن ظرف را در گرمخانه ای با دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار دهید تا کاملاً خشک شود.
 بعد از خشک شدن نمونه ها وزن آنها را ثبت نمایید (Md).
 مرحله ششم:

ظرف پر از جیوه را درون ظرفی بزرگتر قرار دهید تا در صورت سرریز شدن داخل آن ظرف بریزد.
 مرحله هفتم:

ظرف تبخیر را در ظرفی قرار دهید تا جیوه اضافی درون آن بریزد.
 ظرف پر از جیوه را درون ظرف تبخیر قرار دهید و نمونه خاک را روی سطح جیوه بگذارید.
 با صفحه شیشه ای به نمونه فشار وارد کنید.
 بدین ترتیب خاک، داخل جیوه غوطه ور شود و بخشی از جیوه سرریز گردد.
 سپس حجم را در شرایط جدید با توجه به مقدار جیوه سرریز شده محاسبه نمایید (V).
 محاسبات آزمایش تعیین حد انقباض

۱. جرم اولیه خاک مرطوب را محاسبه نمایید. $(M=Mw-Mt)$

۲. وزن خاک خشک را محاسبه نمایید. $(M0=Md-Mt)$

۳. درصد رطوبت خاک را محاسبه نمایید. $(w=M-M0/M)$

۴. حد انقباض را از این رابطه بدست آورید:

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

فرمول محاسبه حد انقباض خاک

در روابط بالا Mt وزن ظرف خالی است.

Mw وزن ظرف و خاک مرطوب داخل آن است.

M وزن خالص خاک مرطوب است.

Md وزن ظرف و خاک خشک است.

$M0$ وزن خالص خاک خشک است.

V حجم نمونه خاک پس از خشک شدن است.

$V0$ حجم اولیه خاک مرطوب است.

آزمایش برش مستقیم خاک با هدف تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک، نظیر زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) انجام می شود.

این آزمایش بر خلاف **آزمایش سه محوری**، ساده و ارزان قیمت است.

در بخش اول این نوشتار شرح کامل آزمایش برش مستقیم را خواهید خواند.
 سپس جداولی جهت تخمین پارامترهای مقاومت برشی ملاحظه خواهید کرد.

کاربردهای آزمایش برش مستقیم خاک

- سدسازی
یکی از مهمترین کاربردهای آزمایش برش مستقیم در سد سازی است.
از نتایج این آزمایش می توان در تعیین پارامترهای برشی آبرفت های اطراف سد، منابع قرضه و بررسی پایداری شیروانی های سد استفاده کرد.
 - تونل سازی
ساخت تونل، مغارهای زیرزمینی و سایر سازه های زیر سطح زمین، نیازمند دانش کافی از خصوصیات برشی خاک است.
 - پایداری شیروانی ها
بدون تخمین درست پارامترهای برشی خاک ممکن است شیروانی ها دچار لغزش یا گسیختگی گردند.
 - بررسی پدیده های مخرب ژئوتکنیکی
همچون روانگرایی، زمین لغزش و ...
وسایل آزمایش برش مستقیم
وسایل آزمایش برش مستقیم شامل موارد زیر است.
۱. جعبه برش مستقیم
 ۲. سنگ متخلخل
 ۳. دستگاه جهت بارگذاری نیرو قائم
 ۴. دستگاه جهت بارگذاری نیرو برشی
 ۵. لودسل
 ۶. محفظه رطوبت
 ۷. کرنش سنج
 ۸. وسایل عمومی آزمایشگاهی همچون گرمخانه



دستگاه برش مستقیم خاک

نحوه انجام تست برش مستقیم
یکی از مهمترین ویژگی های یک خاک مقاومت برشی خاک است.
تخمین درست مقاومت برشی خاک می تواند مهندسین ژئوتکنیک را در طراحی درست یک شیروانی، تخمین فشارهای افقی و

- بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی یاری دهد.
- پارامترهای مقاومت برشی خاک از بسیاری از آزمایش های خاک قابل دستیابی است که هر یک شامل مزایا و معایب خاص خود هستند.
- یکی از انواع این آزمایش ها، آزمایش برش مستقیم است.
- آزمایش برش مستقیم ساده و ارزان است.
- تست برش مستقیم خاک با توجه به نوع خاکی که مورد آزمایش قرار می گیرد متفاوت است. از این بابت نحوه انجام آزمایش را به دو دسته کلی تقسیم بندی کرده ایم و برای خاک های دانه ای و خاک های ریزدانه به صورت جداگانه تشریح کرده ایم.
- روش انجام آزمایش در خاک های دانه ای
۱. ظرفی پر از ماسه خشک را وزن کنید.
 - این مقدار باید به اندازه ای باشد که جهت انجام سه آزمایش کافی باشد.
 ۲. جعبه برش را به دقت در محل خود ثابت نمایید.
 ۳. نمونه خاک را داخل جعبه برش بریزید به طوریکه ۵ میلی متر بالایی آن خالی بماند.
 - صفحه اعمال بار را تراز و افقی نمایید.
 ۴. ظرف محتوی خاک را وزن کنید تا وزن خاک خشک و ظرف به دست بیاید.
 - بار قائم مناسبی به نمونه اعمال کنید.
 - این بار با توجه به عمق نمونه گیری خاک تعیین می شود.
 - توجه کنید که وزن ملحقات دستگاه برش مستقیم نیز جز همین بار است.
 ۵. با باز کردن پیچ اتصال دو فک، دو بخش بالایی و پایینی را از یکدیگر جدا کنید.
 - این فاصله کمی بزرگتر از بزرگترین دانه خاک باشد.
 ۶. کرنش سنج ها را جهت قرائت جابجایی های افقی و قائم نصب کنید.
 ۷. در صورتی که قصد انجام آزمایش به صورت اشباع دارید، لازم است در اطراف نمونه آب ریخته و آنرا غرقاب نمایید و مدتی را جهت اشباع شدن کامل نمونه اختصاص دهید.
 ۸. بارگذاری افقی را شروع کرده و پس از جابجایی دو فک در هر جابجایی خاص، مقدار نیرو و مقدار جابجایی قائم قرائت گردد.
 - این فرآیند را تا جایی ادامه دهید که بار قرائت شده توسط لودسل به حداکثر خود رسیده و روند نزولی به خود بگیرد.
 - قرائت دو نیرو پس از بار حداکثر کافی است.
 ۹. نمونه را از جعبه خارج کرده و مراحل یک تا هشت را حداقل برای دو نمونه خاک دیگر انجام دهید.
- روش انجام آزمایش در خاک های چسبنده
۱. حداقل سه نمونه از یک خاک را انتخاب نموده و آنها را با کاتر یا یک وسیله برنده تیز برش دهید تا اندازه جعبه برش شوند.
 ۲. ابعاد جعبه برش را یادداشت و مساحت آن را به دست آورید.
 ۳. نمونه را داخل جعبه طوری قرار دهید که ۵ میلی متر از بالای آن خالی بماند.
 - صفحات اعمال بار را به صورت افقی تنظیم کنید و کرنش سنج قائم را روی آن متصل نمایید.
 ۴. پیچ های اتصال دو فک را باز کنید تا دو فک قابلیت جابجایی داشته باشند.
 ۵. کرنش سنج جهت اندازه گیری جابجایی های افقی را نصب و مقدار اولیه آنرا صفر نمایید.
 - در صورتی که قصد انجام آزمایش به صورت اشباع دارید، لازم است در اطراف نمونه آب ریخته و آنرا غرقاب نمایید.
 - مدتی را جهت اشباع شدن کامل نمونه اختصاص دهید.

۶. بارگذاری افقی را شروع کرده و پس از جابجایی دو فک در هر جابجایی خاص، مقدار نیرو و مقدار جابجایی قائم قرائت گردد. این فرآیند را تا جایی ادامه دهید که بار قرائت شده توسط لودسل به حداکثر خود رسیده و روند نزولی به خود بگیرد. قرائت دو نیرو پس از بار حداکثر کافی است.

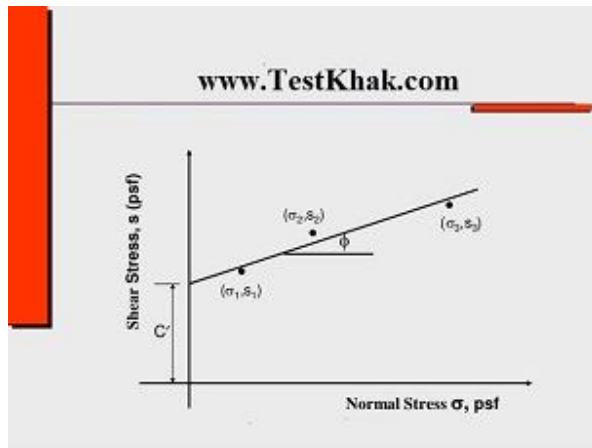
۷. نمونه را از جعبه خارج کرده و مراحل یک تا شش را حداقل برای دو نمونه خاک دیگر انجام دهید. محاسبات

۱. تنش قائم اسمی که از حاصل تقسیم بار قائم اعمال شده بر مساحت جعبه برش است را محاسبه کنید.

۲. منحنی تغییر شکل افقی نسبت به نیروهای ثبت شده را ترسیم کنید. از طریق آن حداکثر نیروی تحمل شده توسط خاک را به دست آورید.

۳. مقادیر تنش برشی ماکزیمم بدست آمده از مرحله قبل در مقابل تنش قائم در تمامی آزمایش ها را ترسیم کنید. بهترین خط عبوری از این نقاط را برازش دهید.

۴. شیب خط ترسیم شده زاویه اصطکاک و مقدار عرض از مبدا این خط برابر میزان چسبندگی خاک است. (مطابق شکل زیر)



نحوه به دست آوردن زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی از آزمایش برش مستقیم

وزنه چند کیلویی روی دستگاه قرار بدیم؟

یکی از مهمترین سوالاتی که هنگام کار با دستگاه برش مستقیم پیش می آید آن است که بر روی دستگاه چند کیلوگرم وزنه قرار بدیم؟

صد کیلوگرم؟

پنج کیلوگرم؟

پنجاه کیلوگرم؟

برای پاسخ به این پرسش، باید یک نکته کلیدی را به شما بگویم: "در تمام آزمایش های مکانیک خاک، تلاش میکنیم که شرایط نمونه خاک، مشابه شرایط آن نمونه در طبیعت باشد".

حالا این جمله یعنی چی؟

معنی این جمله این است که در طبیعت هر نیرویی به آن نمونه خاک وارد می شود، به نمونه داخل دستگاه برش مستقیم وارد کنیم.

بگذارید با یک مثال، قضیه را روشنتر کنم.

فرض کنید نمونه ای از عمق ۴ متری را برای شما آورده اند که تحت آزمایش قرار دهید.

در قدم اول لازم است به این فکر کنیم که خاک در عمق ۴ متری چه فشاری را تحمل می کند. از فیزیک دوران دبیرستان به یاد داریم که فشار از رابطه زیر به دست می آمد:

$$P = h\rho g$$

فشار شتاب جاذبه زمین
ارتفاع چگالی

فرمول فشار

کاری که ما باید انجام بدیم آن است فشار وارد بر خاک در عمق ۴ متری را محاسبه نموده و عینا همان فشار را بر نمونه خاک داخل جعبه برش اعمال کنیم.

با فرض اینکه مقدار چگالی را قبلا از **آزمایش دانسیته در محل** ، برابر ۲ گرم در سانتی متر مکعب، به دست آورده ایم، می توانیم فشار وارد بر خاک در عمق ۴ متری را حساب کنیم.

مقدار این فشار حاصلضرب عدد ۴۰۰ در ۱۰ در ۲ خواهد بود.

پس در واقع فشار واقعی وارد بر خاک در عمق ۴ متری، معادل ۸۰۰۰ گرم در سانتی متر مربع می باشد. حال به آزمایش برش برگردیم.

از طرفی می دانیم فرمول دیگر فشار، نیرو تقسیم بر سطح است.

سطح انجام آزمایش در جعبه ۱۰*۱۰ معادل صد سانتی متر مربع است.

پس برای تامین فشار ۸۰۰۰ گرم بر سانتی متر مربعی روی چنین جعبه ای، نیاز به ۸۰۰۰۰۰ نیوتن یا ۸۰ کیلوگرم است.

پس برای انجام آزمایش خاک در عمق ۴ متری، نیاز به وزنه ۸۰ کیلوگرمی است.

دقت کنید که در دستگاه های برش مستقیم امروزی، بازویی وجود دارد که با کمک اهرم هایی که دارد، وزنه را ده برابر می کند. پس می توانید بخشی از وزنه را روی این اهرم ها قرار دهید تا نیاز به وزنه های کمتری جهت انجام آزمایش باشد.

تخمین پارامترهای مقاومت برشی

گاهی به دلیل گران قیمت بودن انجام آزمایش برش مستقیم و یا به دلیل وجود اشکالاتی در دستگاه برش مستقیم، امکان انجام آزمایش وجود ندارد.

در این شرایط می توانیم از نتایج آزمایش های قبلی که بر روی انواع خاک ها صورت گرفته است استفاده کرد.

همچنین گاهی امکان دارد آزمایش برش مستقیم بر روی خاک خاصی انجام داده باشیم و بخواهیم از صحت آزمایش های انجام شده مطمئن شویم.

در این حالت نیز می توانیم از جداول زیر که محدوده نتایج پارامترهای مقاومت برشی را ارایه می کند استفاده کرد.

شایان ذکر است که این نتایج تقریبی بوده و صرفا جهت تخمین زدن و برآورد کلی مناسب است و استفاده از آنها جهت طراحی توصیه نمی گردد.

تخمین زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) از آزمایش برش مستقیم

برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی در خاک های مختلف می توانید از جدول زیر استفاده کنید.

نوع خاک	تخمین زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر حسب درجه
---------	---

حداکثر	حداقل	
۴۴	۴۰	شن شکسته، بدون ناخالصی با تراکم کم
۴۰	۳۸	شن و ماسه شکسته شده، بدون ناخالصی - با تراکم کم
۳۷	۳۴	مخلوط شن و ماسه طبیعی، بدون ناخالصی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط
۳۶	۳۲	مخلوط شن و ماسه طبیعی دارای دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط و با داشتن ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلیسی و رسی
۳۲	۳۰	مخلوط شن و ماسه طبیعی با تراکم متوسط و با ناخالصی ۱۲ تا ۲۵ درصد سیلت و رس و دانه بندی نامنظم
۳۵	۳۲	ماسه با دانه بندی منظم و گسترده، بدون ناخالصی و تراکم متوسط
۳۲	۲۸	ماسه متوسط و ریز، با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلتی و رسی تراکم متوسط و دانه بندی نامنظم
۳۱	۲۷	ماسه با تراکم متوسط و مخلوط با سیلت
۳۰	۲۵	ماسه با تراکم متوسط و مخلوط با سیلت و رس
۲۸	۲۶	سیلت بدون ناخالصی رسی و تراکم متوسط

۲۴	۲۲	مخلوط سیلت و رس با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی ماسه ریز و تراکم متوسط
۲۲	۱۸	مخلوط سیلت و رس بدون ناخالصی ماسه ای و تراکم متوسط
۱۸	۱۲	رس با ناخالصی سیلت
۱۶	۰	رس

تخمین چسبندگی خاک (C) از آزمایش برش مستقیم در صورتی که تمایل به دانستن چسبندگی خاک های مختلف داشته باشید می توانید از مقادیر تقریبی در جدول زیر استفاده کنید.

تخمین چسبندگی خاک (C) بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع		نوع خاک
حداکثر	حداقل	
۰	۰	شن شکسته تمیز با تراکم کم
۰	۰	شن و ماسه شکسته بدون ناخالصی با تراکم کم
۰	۰	مخلوط شن و ماسه طبیعی بدون ناخالصی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط
۰,۵	۰,۲۵	مخلوط شن و ماسه طبیعی با دانه بندی منظم و گسترده و تراکم متوسط و با داشتن ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلیسی و رسی
۰,۸	۰,۴	مخلوط شن و ماسه طبیعی با تراکم متعارف (متوسط) و با ناخالصی ۱۲ تا ۲۵ درصد سیلت و رس و دانه بندی نامنظم

۰	۰	ماسه با دانه بندی منظم و گسترده، بدون ناخالصی و تراکم متوسط
۰,۵	۰,۲۵	ماسه متوسط و ریز، با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی سیلتی و رسی تراکم متوسط و دانه بندی نامنظم
۰,۷	۰,۲۵	ماسه با تراکم متوسط ، مخلوط با سیلت
۰,۸	۰,۲۵	ماسه با تراکم متوسط ، مخلوط با سیلت و رس
۰,۲۵	۰,۱	سیلت (بدون چسبندگی) و بدون ناخالصی رسی و تراکم متوسط
۰,۶۵	۰,۲۵	مخلوط سیلت و رس با ۵ تا ۱۲ درصد ناخالصی ماسه ریز با تراکم متوسط
۱	۰,۵	مخلوط سیلت و رس بدون ناخالصی ماسه ای با تراکم متوسط
۱,۵	۰,۵	رس به همراه ناخالصی سیلت
۲,۵	۰,۵	رس

آزمایش تحکیم خاک از جمله آزمایش های مخصوص رس هاست. **نحوه تشخیص خاک رس** پیشتر گفته شد. هدف از این آزمایش تعیین پارامترهای موثر در پیش بینی نشست سازه هایی است که بر روی خاک های رسی ساخته شده اند، می باشد. در این نوشتار، در ابتدا شرح کامل مفاهیم مربوط به تحکیم بیان می شود. سپس دستگاه های مورد نیاز این آزمایش و نحوه انجام آزمایش به صورت گام به گام تشریح می گردد.

مفهوم تحکیم

نمونه اشباعی از یک خاک رسی را در نظر بگیرید که تحت بارگذاری قرار میگیرد.

در ابتدا تمامی بار توسط آب تحمل می گردد.

اگر شرایط زهکشی نشده باشد، فشار آب بالا می رود.

اما اگر شرایط زهکشی شده حاکم باشد، آب از مجموعه خارج شده و نمونه کاهش حجم خواهد یافت.

به پدیده کاهش حجم در اثر خروج آب، تحکیم گویند.

پدیده تحکیم در مورد خاک های رسی بیان می شود.

آزمایش تحکیم آزمایشی جهت تخمین پارامترهای تحکیم یک بعدی ترزاقی است. این آزمایش از حل همزمان دو معادله تعادل و معادله پیوستگی به دست می آید. فرضیات تئوری تحکیم ترزاقی

- خاک همگن است
 - خاک اشباع است
 - زهکشی و تراکم در خاک به صورت یک بعدی است.
 - خواص خاک در تمام خاک ثابت است.
 - منحنی تنش-تخلخل به صورت یک خط راست است.
- به دلیل به کارگیری حلقه فلزی ثابت یا شناور اطراف نمونه خاک، در آزمایش تحکیم تغییر شکل جانبی صفر است و تمامی تغییر شکل در خاک در راستای عمودی رخ می دهد.
- نمونه هایی که در آزمایش تحکیم مورد استفاده قرار می گیرند ضخامت ۲۰ الی ۴۰ میلی متر و قطر ۴۵ تا ۱۳۵ میلی متر دارند. در برخی از آزمایش های تحکیم، فشار آب حفره ای قابل کنترل است. این دستگاه ها امکان اعمال پس فشار نیز دارند.

حالات مختلف زهکشی در خاک

- زهکشی از بالا
 - زهکشی از بالا و پایین
 - زهکشی از جدار حلقه
 - زهکشی از مرکز حلقه به صورت شعاعی
- وسایل آزمایش تحکیم خاک
- **دستگاه بارگذاری (ادئومتر):** دستگاهی است جهت اعمال بار به خاک. وزنه های این دستگاه باید نیروی اعمالی به نمونه را در مدت زمان طولانی به صورت ثابت نگه دارند. باید دقت شود که تعویض وزنه روی دستگاه تحکیم باید در سریعترین زمان و بدون اعمال ضربه صورت گیرد.

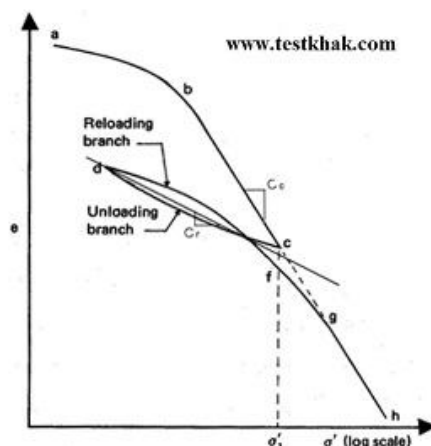
www.testkhak.com



دستگاه ادئومتر برای انجام آزمایش تحکیم

- بدنه دستگاه تحکیم: شامل ظرف استوانه ای شکل پلاستیکی است که حلقه فلزی را در خود جای داده و داخل آن از آب پر می شود تا همیشه نمونه اشباع باشد.

- حلقه فلزی: از جنس فلز برنج یا هر فلز دیگری که دچار زنگ زدگی نمی شود ساخته شده و وظیفه آن در برگیری نمونه خاک است.
 - سنگ متخلخل: سنگ هایی است جهت عبور آب و ممانعت از حرکت خاک که در بالا و پایین نمونه قرار داده می شوند.
 - صفحه بارگذاری: صفحه ای فلزی است که در بالای سنگ متخلخل قرار گرفته و هدف از به کارگیری آن، این است که سنگ متخلخل حین بارگذاری آسیب نبیند.
 - گیج اندازه گیری تغییر ضخامت نمونه: لازم است دقت این گیج ۰,۰۰۲۵ میلی متر باشد.
 - وسایل آماده سازی نمونه: وسیله ای است که به کمک آن می توان نمونه دست نخورده تهیه کرد و در داخل حلقه قرار داد.
 - جک: از این وسیله جهت بیرون آوردن نمونه خاک استفاده می شود.
 - سایر وسایل: وسایل عمومی آزمایشگاهی همچون ترازو، **گرمخانه**، اره سیمی، کاردک، **قوطی های آزمایش درصد رطوبت** و
روش انجام آزمایش تحکیم
آزمایش تحکیم خاک بر اساس استاندارد
انجام می شود. روش گام به گام انجام آزمایش تحکیم به شرح زیر است:
۱. دستگاه تحکیم طوری مستقر شود که نمونه در حین آزمایش خواص خود را از دست ندهد.
سنگ های متخلخل و سایر صفحات برای خاک های متورم شونده کاملاً خشک باشد.
این اجزا برای خاک های اشباع مرطوب باشند.
نمونه را داخل حلقه قرار دهید و صفحات فلزی و سنگ متخلخل را روی آن سوار کنید.
 ۲. دستگاه تحکیم را در بخش بارگذاری قرار داده و باری معادل ۵ کیلوپاسکال بر آن اعمال نمایید.
به محض اعمال این بار جابجایی انجام شده را قرائت و یادداشت نمایید.
 ۳. اگر نمونه اشباع دست نخورده بوده و یا خاک نمونه گیری شده از زیر سطح آب زیرزمینی باشد، در ظرف استوانه ای آب ریخته تا نمونه اشباع گردد.
 ۴. ارتفاع نمونه را یادداشت کنید.
 ۵. بار مختلف به نمونه اعمال کرده و جابجایی متناظر با آن را بدست آورید.
افزایش بارگذاری هر ۲۴ ساعت یکبار باشد.
 - اگر هدف به دست آوردن خصوصیات بیش تحکیمی خاک باشد باید بارگذاری تا چهار برابر فشار بیش تحکیمی ادامه یابد.
اگر هدف به دست آوردن پارامترهای تورمی خاک باشد لازم است حداقل یک مرتبه بار برداری صورت گیرد.
 ۶. پس از خاتمه آزمایش و جهت جلوگیری از تورم ناشی از باربرداری، بهتر است نمونه تحت فشار کم قرار گیرد.
 ۷. نمونه را به دقت از حلقه خارج کرده آنرا وزن نمایید و مطابق با دستور العمل **آزمایش درصد رطوبت خاک**، درصد رطوبت آنرا تعیین کنید.
 ۸. با محاسبه فشار اعمالی و تخلخل هر مرحله از بارگذاری می توان نمودار تحکیم را به شکل زیر ترسیم کرد.
 ۹. با استفاده از شیب نمودار در بخش های مختلف می توان پارامترهایی همچون **CC**، **Cs** و **Cr** را بدست آورد.



گراف آزمایش تحکیم خاک

آزمایش تراکم خاک با هدف کاهش میزان تخلخل خاک ها صورت می گیرد. مهندسين ژئوتکنیک دريافته اند که اگر هنگام متراکم کردن به خاک مورد نظر آب اضافه کنند این عملیات راحت تر انجام می شود. افزودن رطوبت موجب روغنکاری و آسان شدن تراکم می شود. اما اگر مقدار آب از حدی بیشتر شود چگالی خاک کاهش می یابد و تراکم به خوبی صورت نمی گیرد. هدف از انجام آزمایش تراکم خاک، یافتن مقدار رطوبت بهینه است. در این نوشتار شرح کامل این تست آزمایشگاهی خدمت شما مهندسين گرامی ارایه می گردد.

کاربرد تست تراکم

در ساخت بسیاری از پروژه های ژئوتکنیکی لازم است خاک را متراکم نمود. به عنوان مثال هنگام ساخت پروژه ای همچون ساخت باند فرودگاه و یا راهسازی به نقاطی برخورد می کنیم که خاک نسبتاً ضعیفی دارند. لازم است این خاک ها را متراکم نمود تا به چگالی و تراکم مد نظر ما برسند. این تراکم توسط غلتک های مختلفی انجام می شود که متداول ترین آنها، غلتک های چرخ استوانه ای صاف، غلتک پاچه بزی، غلتک های چرخ لاستیکی، غلتک های ارتعاشی و... نام برد. عمق تاثیر تراکم تابع وزن غلتک و نوع خاک است

وسایل آزمایش تراکم

- قالب مخصوص تراکم
- حلقه متحرک دور قالب
- چکش مخصوص آزمایش تراکم
- اسپری آب پاش
- چکش لاستیکی
- پیمان
- تابه بزرگ برای مخلوط کردن
- تیغ تیز یا چاقویی به طول حداقل ۲۵ سانتی متر
- ترازو
- دستگاه های مخلوط کن خاک



تجهیزات آزمایش تراکم خاک

روش انجام آزمایش تراکم خاک این آزمایش بر اساس استاندارد D 698-78 صورت میگیرد. در این بخش به تشریح آزمایش پروکتور استاندارد پرداخته می شود. انواع دیگر آزمایش تراکم روش انجام مشابهی دارند و فقط اندازه محفظه و کوبه در آنها تغییر می کند. روش انجام آزمایش تراکم به شرح زیر است:

۱. قالب تراکم را خالی کرده و آنرا وزن نمایید.
۲. نمونه ای از خاک را انتخاب کرده و نمونه را از الک شماره چهار عبور دهید.
۳. با خاکی که در مرحله دوم از الک عبور داده شده یک لایه به ضخامت ۵ تا ۸ سانتی متر درست کنید.
۴. با آرامی به وسیله کوبه مخصوص تراکم نقاط مختلف را تحت ضربه قرار دهید. این ضربات باید در مجموع ۲۵ ضربه شود.
۵. لایه دوم و سوم را همانند لایه اول تشکیل داده و ۲۵ ضربه به آن بزنید.
۶. حلقه فلزی دور قالب را بردارید و سطح رویی آن را صاف کنید.
۷. سیلندر و نمونه را وزن کنید.
۸. خاک درون قالب را خارج کرده و بخشی از آن را جهت سنجش میزان آب درون نمونه جدا کنید.
۹. به خاک مقداری آب اضافه کنید تا درصد رطوبت آن اندکی بیشتر شود و مراحل را مجدداً تکرار نمایید.
۱۰. تا زمانی که خاک کاملاً مرطوب و چسبیده شود مراحل را تکرار نمایید.



آزمایش تراکم خاک

محاسبات آزمایش پروکتور خاک

چگالی خاک خشک را از رابطه زیر بدست آورید: $Y = W/V(w+1)$

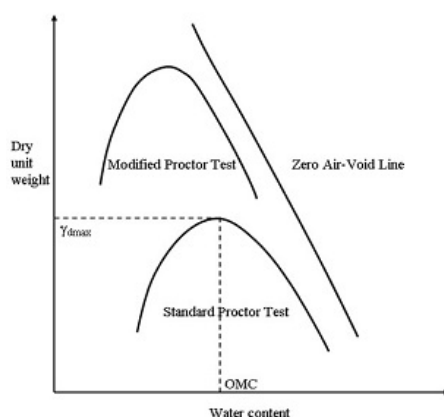
که در آن:

W وزن کل خاک متراک شده در قالب است

V حجم قالب

W درصد آب موجود در خاک

با محاسبه در صد رطوبت خاک و چگالی خشک خاک می توانید منحنی تراکم خاک را ترسیم نمایید. درصد رطوبت بخش افقی و چگالی خشک خاک قسمت عمودی نمودار است. با رسم این نمودار می توان چگالی خشک حداکثر و درصد رطوبت متناظر با آن را بدست آورد. در شکل زیر نمونه ای از اینگونه نمودار های تراکم را ملاحظه می کنید.



نمودار آزمایش تراکم خاک

آزمایش تک محوری یکی از تست های متداول در آزمایشگاه مکانیک خاک است که با عناوین دیگری نظیر آزمایش فشاری ساده و آزمایش محصور نشده نیز شناخته می شود.

در این نوشتار در ابتدا مفاهیم پایه ای این آزمایش تشریح، سپس نحوه انجام آزمایش بیان می گردد. فیلم کامل آزمایش تک محوری با زیر نویس فارسی را نیز در ادامه خواهید دید.

مفهوم مقاومت برشی خاک چسبنده

خروجی اصلی آزمایش فشاری ساده، C_u یا مقاومت برشی خاک در حالت محدود نشده است.

حال توضیح می دهیم که مقاومت برشی خاک در حالت های زهکشی شده و نشده چه مفهومی دارد.

مقاومت خاک های چسبنده از دو بخش تشکیل شده است.

مقاومت اصطکاکی و مقاومت چسبندگی. مقاومت اصطکاکی تابعی از نیروهای وزنی است و بستگی به قفل و بست ذرات دارد.

این مقاومت بیشتر در خاک های دانه ای قابل توجه است.

مقاومت چسبندگی ناشی از نیروهای سطحی است.

نیروهای سطحی بر روی ذرات خاک تاکنون به صورت کامل شناخته نشده است.

این مقدار از چسبندگی همواره مقدار ثابتی نیست و تابعی از بار اعمالی به خاک است.

لذا در یک خاک ثابت هر چقدر به عمق خاک می رویم، مقدار چسبندگی بیشتر می شود.

در حالتی که هیچگونه بار جانبی به خاک وارد نشود، چسبندگی به عنوان مقاومت برشی در خاک در نظر گرفته می شود که اساس

کار دستگاه تک محوری است.

قسمتی از نیرویی که به خاک اعمال می شود توسط اسکلت خاک تحمل می شود و بخش دیگر توسط آب موجود در خاک.

لذا مقاومت برشی در خاک های رسی در دو حالت زیر بررسی می شود:

مقاومت برشی زهکشی شده

در این حالت فرصت کافی جهت خارج شدن آب از داخل نمونه وجود دارد. فشار آب حفره ای صفر است و تمام نیرو توسط اسکلت خاک تحمل می شود. در این حالت مقاومت برشی خاک نسبت به حالت زهکشی نشده بالاتر است. خاک رس زیر پی ساختمان که تحت بار تدریجی در طول سالیان متمادی قرار گرفته است مثالی از این نوع خاک است.

مقاومت برشی زهکشی نشده

در این شرایط بارگذاری به سرعت انجام شده و فرصتی جهت فرار آب از داخل نمونه خاک وجود ندارد. لذا فشار آب حفره ای مقداری بیش از صفر است. بخشی از نیروی اعمال شده توسط آب و بخش دیگر توسط اسکلت خاک تحمل می شود.

از آنجایی که مقاومت برشی آب از خاک کمتر است، مقاومت برشی خاک زهکشی نشده از مقاومت برشی خاک زهکشی شده کمتر است.

مثالی از این نوع خاک، افت سریع آب مخزن در یک سد خاکی می باشد.

در اکثر مواقع در طبیعت نمی توان خاکی را یافت که به طور کامل زهکشی شده و یا زهکشی نشده باشد. در حقیقت تمام خاک ها در حالتی بینابین حالت زهکشی شده و زهکشی نشده قرار دارند.

ویژگی های آزمایش تک محوری

آزمایش تک محوری بر اساس استاندارد انجام می شود.

هدف از انجام این آزمایش، به دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی در خاک های چسبنده به صورت تقریبی است.

برای مقادیر دقیق تر مقاومت برشی می توان از آزمایش برش مستقیم و یا آزمایش سه محوری استفاده کرد.

علی رغم تقریبی بودن نتایج این آزمایش، می توان آنرا ساده ترین و سریع ترین تست آزمایشگاهی جهت تعیین مقاومت برشی دانست.

آزمایش تک محوری را می توان حالت خاصی از **آزمایش سه محوری UU** دانست که در آن تنش محصور کننده صفر است. محاسن آزمایش فشاری ساده

۱. این آزمایش صرفاً در خاک های رسی دارای چسبندگی کاربرد دارد.

چرا که خاک های دانه ای را نمی توان به شکل یک استوانه بدون تنش همه جانبه درآورد.

۲. آزمایش فشاری ساده ساده ترین و سریع ترین روش دستیابی به پارامترهای مقاومت برشی خاک های چسبنده است.

۳. آزمایش تک محوری برای تعیین مقاومت برشی در جای خاک به کار می رود

۴. از جمله محاسن آزمایش فشاری ساده نسبت به **آزمایش برش مستقیم** آن است که تنش و کرنش در نمونه به صورت یکنواخت اعمال می شود. سطح شکست ضعیف ترین سطح بر روی خاک است.

معایب آزمایش فشاری ساده

آزمایش فشاری ساده با وجود محاسنی که دارد، به دلایل زیر نتایجش گاهی غیر قابل اعتماد است.

۱. اثر تنش جانبی از روی خاک برداشته شده است.

در طبیعت همچنین موردی کمتر پیش می آید.

۲. برخی از شرایط خاک مثل درجه اشباع، فشار آب حفره ای و اثرات تغییر درجه اشباع در روی نمونه خاک در نظر گرفته نمی شود.

۳. در ابتدا و انتهای نمونه خاک تنش های اضافه ای به خاک اعمال می شود که اثرات ناشناخته ای بر روی خاک دارد.

خطای اول و دوم با تبدیل آزمایش تک محوری به آزمایش فشاری محصور شده و یا **آزمایش سه محوری** برطرف کرد. اما خطای سوم نیاز به تحقیق و پژوهش بیشتری دارد. راه دیگر بر طرف کردن این خطاها، رعایت طول به عرض مناسب در نمونه خاک است و وسایل آزمایش فشاری ساده و وسایل تست آزمایشگاهی تک محوری به دو دسته کلی ابزارهای عمومی و ابزارهای اختصاصی تقسیم بندی می شود.

۱. دستگاه آزمایش فشاری ساده

۲. ابزار تمیز کردن نمونه
۳. استوانه جهت نمونه گیری و در پوش
- وسایل عمومی آزمایش تک محوری
۱. سطحی صاف جهت مالش نمونه
۲. ترازوهای با حساسیت یک صدم و یک هزارم گرم

۳. آون

۴. خشک کننده یا دسیکاتور
۵. کرومومتر
۶. نقاله
۷. ماله
۸. ظروف جهت تبخیر
۹. سلفون

روش تهیه نمونه خاک

برای تهیه نمونه خاک باید دقت شود که حتی المقدور شرایط نمونه، همچون شرایط واقعی خاک در طبیعت باشد. بدین ترتیب که سعی شود که درصد رطوبت، میزان تراکم و... نمونه خاک با شرایط واقعی یکسان باشد. در تهیه نمونه باید به دست خوردگی یا دست نخوردگی نمونه توجه کرد. مثلا اگر بخواهیم خاک رس زیر پی را تست کنیم باید نمونه دست نخورده بگیریم. اما اگر خواهان تست خاک بر روی ترانشه یا خاکریز باشیم بهتر است از نمونه خاک دست خورده استفاده کنیم. در این بخش روش تهیه نمونه خاک در دو حالت دست خورده و دست نخورده به تفکیک بیان می شود. روش تهیه نمونه دست نخورده

۱. اولین نکته در تهیه نمونه دست نخورده توجه به ابعاد آن است.

حداقل قطر نمونه ۳,۳ سانتی متر است. حداکثر قطر بزرگترین دانه نمونه، ۱,۰ قطر نمونه باشد.

نسبت طول به قطر نمونه باید بین ۲ تا ۳ باشد.

۲. با استفاده از دستگاه بیرون آورنده نمون، نمونه را به آرامی خارج نمایید تا در اثر فشردگی، نمونه دچار دست خوردگی نشود. جهت کاهش اثرات دست خوردگی می توان نمونه گیر را از وسط شکافت.

۳. از نمونه درآورده شده سه قطعه برش داده می شود و جهت **تعیین درصد رطوبت** به محیط دیگری انتقال داده می شود.

شایان ذکر است که محیط باید به نوعی مرطوب باشد که هیچگونه تغییر رطوبتی در خاک ایجاد نشود.

گاهی می توان جهت حفظ رطوبت از موم و یا گریس یا لایه های پلاستر استفاده کرد.

روش تهیه نمونه دست خورده

برای تهیه نمونه دست خورده به دو شیوه می توان عمل کرد:

۱. در روش اول نمونه خاک در یک نایلون محبوس می گردد و کاملا ورز داده می شود تا خاک به طور کامل مخلوط شده و همگن شود.

در این حالت باید دقت شود که درصد رطوبت خاک با درصد رطوبت خاک واقعی یکسان باشد.

۲. در روش دوم خاک در داخل ظرفی ریخته شده و می کوبند.

ابتدا و انتهای نمونه را می تراشند تا کاملا صاف بشود.

بخش مرکزی می تواند نماینده خاک دست خورده محل باشد.

روش انجام آزمایش تک محوری

همانند تمامی آزمایش های مقاومت برشی مثل آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه محوری ، این تست آزمایشگاهی هم به دو شیوه کنترل تنش و کنترل کرنش صورت می گیرد.

به دلیل سهولت انجام کار در روش کنترل کرنش، مراحل انجام آزمایش فشاری ساده به روش کنترل کرنش تشریح می شود:

۱. نمونه خاک را در محل مخصوص خود در دستگاه تک محوری قرار دهید به طوری که بار اعمالی در مرکز نمونه وارد شود.

۲. گیج های افقی و عمودی که برای اندازه گیری بار و تغییر مکان است را صفر کنید.

۳. بارگذاری را با نرخ کرنش ۰٫۵ تا ۲ در صد در دقیقه اعمال کنید.

۴. قریات های بارگذاری را در کرنش های ۰ و ۰٫۱ و ۰٫۲ و ۰٫۵ و ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۸ و ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۶ و ۱۸ و ۲۰ درصد اندازه گیری و ثبت نمایید.

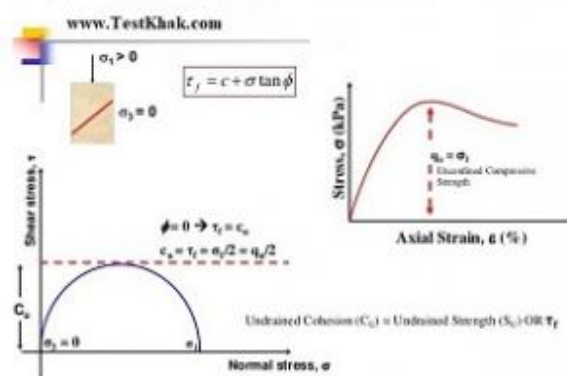
۵. لارگذاری بر روی خاک را تا جایی ادامه دهید تا بر روی نمونه ترک ظاهر شده و یا منحنی تنش کرنش خاک به صورت افقی درآید.

۶. نمونه گسیخته شده را در اتاق مرطوبی انتقال داده و زاویه ترک خوردگی را نسبت به افق ثبت نمایید.

بخشی از نمونه را جدا کرده و برای انجام آزمایش درصد رطوبت انتخاب نمایید.

۷. پس از ترسیم نمودار تنش کرنش مطابق شکل زیر، مقدار Q را به دست آورید.

۸. مقدار چسبندگی از تقسیم کردن مقدار Q بر ۲ به دست می آید.



آزمایش تک محوری