آزمایشگاه مکانیک خاک

مترجمین

مهندس علیرضا صالحین

مهندس مرتضی راضی

SOIL MECHANICS

LABORATORY TESTING

Lynne Roussel-Smith Dante Fratta Jennifer Aguettant

نشردانشگاهی فرهمند

آزمایشگاه مکانیک خاک

مهندس علیرضا صالحین

مهندس مرتضی راضی

SOIL MECHANICS

LABORATORY TESTING

Lynne Roussel-Smith Dante Fratta Jennifer Aguettant

نشردانشگاهی فرهمند

مقدمه

این کتاب راهنمای آزمایشگاهی به منظور کمک به درک مفاهیم آزمایشات آزمایشگاهی مهندسی ژئوتکنیک نوشته شده است. قصد نویسندگان این کتاب راهنما این نیست که کتاب راهنما به عنوان یک ابزار آموزشی کامل که شامل تاریخ، تئوری و استفاده‌های عملی از مهندسی ژئوتکینک است مطرح شود بلکه قصد نویسندگان این بوده است که این کتاب راهنما همراه با سایر کتب مکانیک خاک به عنوان یک راهنما برای دانشجویان لیسانس و فوق لیسانس و نیز تکنسین‌های آزمایشگاهی ایفاء نقش کند. فرآیندهای آزمایشگاهی که در این کتاب راهنما توضیح داده شده‌اند از استانداردهای ارائه شده توسط انجمن آزمایش و مصالح آمریکا (MTSA) که برای آزمایشگاه‌های تجاری مهم معتبر می‌باشد، تبعیت می‌کند.

این کتاب راهنمای آزمایشگاهی از نکات کلاسی مطرح شده در کلاس‌های مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه ایالتی لوئیزیانا پدید آمده است و توسط هیئت علمی و دانشجویان در دانشکده ی مهندسی عمران در دانشگاه ایالتی لوئیزیانا طی پنج سال بسط و توسعه داده شد. بعد از تحقیقات بیشتر و کار روی کتاب راهنما نویسندگان تصمیم گرفتند تا کتاب راهنمای خود را برای کمک به دانشجویان در سایر دانشگاه‌ها و نیز تکنسین‌های آزمایشگاه‌های تجاری ژئوتکنیک به اشتراک بگذارند. آرزوی نویسندگان این است که این کتاب راهنما بتواند برای سالیان زیادی به عنوان یک مرجع کلاسیک و راهنما برای آزمایشات آزمایشگاه مکانیک خاک به کار آید.

فهرست علائم اختصاری

ـ ضریب اصلاح برای وزن‌های مخصوص مختلف دانه‌های خاک
ـ مساحت سطح مقطع لوله ایستاده
ـ فعالیت رس
ـ مساحت
ـ مساحت سطح مقطع اصلاح شده
ـ مساحت سطح مقطع اولیه
ـ ضریب تراکم‌پذیری
ـ ضریب رابطه‌ی هایزن
ـ قطع مقاومت برشی
ـ ضریب انحناء
ـ شاخص تراکم‌پذیری
ـ اصلاح عامل پراکنده‌ساز
ـ ضریب تجربی
ـ تصحیح هلالی
ـ شاخص تراکم مجدد
ـ شاخص شل‌شگی
ـ اصلاح حرارت
ـ ضریب یکنواختی
ـ ضریب تحکیم
ـ فشار ثانویه
ـ قطر
ـ قطر ذره
ـ قطر نمونه
ـ قطر حلقه ادیومتر
ـ چگالی نسبی

ـ اندازه‌ی ذره با ۱۰ درصد عبور
ـ اندازه‌ی ذره با ۳۰ درصد عبور
ـ اندازه متوسط دانه
ـ اندازه‌ی دانه با عبور ٦۰ درصد
ـ نسبت تخلخل
ـ بیشینه‌ی نسبت تخلخل
ـ کمینه نسبت تخلخل
ـ نسبت تخلخل اولیه
ـ ضریب پیش مقیاس کارخانه‌ای (تولیدکننده)
ـ درصد خاک گذرنده از الک نمره ۱۰
ـ درصد عبور کننده از الک نمره ٤۰
ـ درصد عبور کننده از الک نمره ۲۰۰
ـ شتاب گرانش برابر ۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه
ـ شاخص گروه
ـ وزن مخصوص
ـ ضخامت لایه خاک
ـ طول نمونه
ـ هد کل در پارامترهای هد ثابت و هد کاهش‌یابنده
ـ بیشینه‌ی طول مسیر زهکشی
ـ ارتفاع اولیه‌ی نمونه
ـ ارتفاع حلقه
ـ زاویه‌ی بحرانی انکسار
ـ گرادیان هیدرولیکی
ـ هدایت هیدرولیکی
ـ هدایت هیدرولیکی در ۲۰ درجه
ـ ضریب حفره
ـ هدایت هیدرولیکی در دمای T
ـ فاصله‌ی طی شده توسط ذره در آزمایش هیدرومتری، عمق مؤثر هیدرومتر
ـ فاصله‌ی بین مانومترها در هد ثابت
ـ فاصله‌ی بین قرائت‌های هیدرومتر
ـ طول کل هیدرومتر
ـ شاخص آبگونگی
ـ جرم کل

- جرم الک نمره‌ی #
- جرم الک نمره‌ی # و خاک روی آن
- جرم هوا
- جرم ماسه در مخروط
- جرم نمونه‌ی خاک خشک
- جرم نمونه‌ی خاک خشک و حلقه برای آزمایش تحکیم
- جرم نمونه‌ی خاک خشک و ظرف
- جرم نمونه‌ی خاک خشک و پارافین در آب
- جرم ظرف، مخروط و ماسه
- جرم نمونه‌ی خشک گذرنده از الک نمره ۲۰۰
- جرم ظرف نیمه خالی
- جرم حلقه
- جرم خاک
- جرم نمونه‌ی خاک و حلقه
- جرم ماسه
- جرم حلقه به علاوه‌ی نمونه برای آزمایش تحکیم
- جرم کل نمونه خشک در تحلیل الک
- جرم آب
- جرم پارافین
- پوکی
- نیروی قائم
- تعداد ضربات در دستگاه کاساگرانده
- تعداد ضربات در انرژی ۶۰ درصد آزمایش نفوذ استاندارد
- بیشینه‌ی نیروی قائم
- متوسط ٤ مقدار آخر N_s به دست آمده برای استفاده‌ی اولیه
- مقدار شماره استاندارد سازی جریان
- نسبت پیش تحکیم یافتگی
- درصد اصلاح شده‌ی قطر دانه‌های برای دانه‌بندی ترکیبی
- درصد قطر باقی‌مانده در سوسپانسیون
- شاخص خمیری
- فشار پی
- مقاومت فشاری محدود نشده
- قرائت هیدرومتر

- قرائت اصلاح شده‌ی هیدرومتر
- مصالح سطح تراوش آب
- حد انقباض
- درصد اشباع
- وزن مخصوص
- مقاومت برشی زهکشی نشده
- زمان
- نیروی برشی
- دما
- زمان نزدیک به هد قسمت اولیه‌ی منحنی $=4*t_1$
- زمان منطبق بر تحکیم ۵۰ درصد
- زمان منطبق بر تحکیم ۹۰ درصد
- لنگر پیچشی در گسیختگی
- فشار آب حفره‌ای اضافی
- حجم کل
- حجم جریان آب در آزمایش نفوذپذیری
- سرعت آب در دمای ۲۰ درجه
- سرعت لرزه‌ای در لایه‌ی ۱
- سرعت لرزه‌ای در لایه‌ی ۲
- حجم هوا
- حجم شیشه‌ی هیدرومتر
- حجم توده‌ی خاک خشک
- حجم محلول هگزامتافسفات سدیم
- قرائت نهایی اعلام حجم برای روش چگالی بالن
- حجم گودال برای آزمایش چگالی بالن
- قرائت اولیه روی مشخص‌کننده‌ی حجم برای آزمایش چگالی بالن
- حجم خاک‌ها
- حجم آب تراوش‌کننده
- حجم حفره‌ها
- حجم آب
- حجم **پارافین**
- وزن کل
- میزان آب

ـ وزن هوا برابر صفر نیوتن
ـ حد روانی
ـ میزان بهینه‌ی آب
ـ حد خمیری
ـ وزن خاک
ـ حد انقباض
ـ وزن آب
ـ تمرکز هگزامتافسفات در آب
ـ **تغییرمکان** جانبی
ـ **تغییرمکان** قائم
ـ تغییر در نسبت پوکی
ـ تغییر نهایی در ارتفاع
ـ آغاز تحکیم اولیه
ـ نقطه میانی بین H_0 و H_{100}
ـ نقطه‌ی تقاطع دو مماس، این نقطه بر انتهای تحکیم اولیه منطبق است
ـ زمان افت هد کل h_1 به h_2
ـ کرنش محوری
ـ کرنش حجمی
ـ زاویه‌ی اصطکاک
ـ زاویه‌ی اصطکاک بسیج شده
ـ زاویه‌ی اصطکاک بیشینه
ـ زاویه‌ی اصطکاک پسماند
ـ وزن واحد
ـ وزن واحد حفره‌های خاک برابر صفر
ـ وزن واحد خشک خاک
ـ بیشینه‌ی وزن واحد خشک
ـ وزن واحد سیال
ـ وزن واحد دانه‌های جامد
ـ وزن واحد ماسه
ـ وزن واحد خاک اشباع
ـ وزن واحد آب
ـ وزن واحد **پارافین**
ـ لزجت

ـ زاویه
ـ مقاومت الکتریکی لایه‌ی i
ـ چگالی آب در دمای زمان اندازه‌گیری در آزمایش هیدرومتری
ـ چگالی آب
ـ تنش اصلی بزرگ
ـ بیشینه‌ی تنش اصلی بزرگ مؤثر
ـ تنش اصلی کوچک
ـ بیشینه‌ی تنش اصلی کوچک مؤثر
ـ تنش مؤثر
ـ فشار پیش تحکیمی
ـ تنش مؤثر قائم
ـ لزجت (ویسکوزیته) آب در دمای T
ـ لزجت آب در دمای ۲۰ درجه
ـ پیچیدگی
ـ تنش برشی

فصل اول
آزمایشات درجا (صحرائی)

آزمایشات آزمایشگاهی که در این کتاب راهنما توضیح داده می‌شوند اطلاعات مقیدی را در زمینه‌ی شناسایی و ارزیابی نمونه‌های خاک و خواص مهندسی آنها فراهم می‌آورند. معمولا هر بررسی آزمایشی باید با گردآوری و اندازه‌گیری خواص خاک درجا شروع شود. در محل پروژه مهندسین اطلاعات را درباره‌ی توپوگرافی، هیدرولوژی منطقه، پوشش گیاهی و وضعیت زمین‌شناسی محل ساخت و ساز سایت پیشنهادی گردآوری می‌کنند. این اطلاعات با تعدادی از حفاری‌ها و تکنیک‌های آزمایش درجا (مثلا آزمایش نفوذ مخروط، برش پره، دیلاتومتر (اتساع سنج)، آزمایشات ژئوفیزیکی و غیره که امکان جمع‌آوری اطلاعات نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده را برای تعیین رفتار و ویژگی‌های ترکیبات خاک فراهم می‌کنند، ترکیب می‌شوند. اطلاعات جمع‌آوری شده به مهندسین ژئوتکنیک کمک می‌کند یک نقشه کامل را برای محل ساختمان یک پروژه‌ی موفق ساختمانی طرح‌ریزی کنند. با ترکیب بررسی‌های محلی و آزمایشگاهی مهندس پروژه پنج فاز برای مطالعات ژئوتکنیکی را پی‌ریزی می‌کند: مطالعات اولیه، مطالعات میدانی زیرسطحی، آزمایشات آزمایشگاهی، گزارش‌دهی و توصیه نامه‌ها.

مطالب توضیح داده شده در این بخش تکنیک‌های استفاده شده برای توصیف خواص خاک درجا و بررسی‌های محل را دربر می‌گیرد. اطلاعات ارائه شده بر اساس توصیه‌های مطرح شده در استانداردهای ASTM (انجمن آزمایش و مصالح آمریکا)، کتاب‌های راهنمای مهندسی مهندسین ارتش آمریکا و مدارک معتبر مربوط به مطالعات زیرسطحی می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر در رابطه با *مطالعات درجا*، جمع‌آوری نمونه‌ها و بررسی‌های میدانی می‌توانید به استانداردهای ASTM که در زیر آمده‌اند مراجعه کنید:

D420، راهنمای استاندارد برای مشخصات سایت برای اهداف مهندسی (طراحی و ساخت).
D653، اصطلاح شناسی استاندارد خاک، سنگ و سیالات محصور.
D1452، استاندارد اجرایی برای بررسی‌های خاک و نمونه‌گیری از طریق حفاری .مته‌ای
D1586، روش استاندارد برای آزمایش نفوذ و نمونه‌گیری آزمون نفوذ استاندارد.
D1587، استاندارد اجرایی نمونه‌گیری با نمونه‌گیرهای لوله‌ای جدار نازک.
D2113، استاندارد اجرایی مغزه‌گیری از سنگ و نمونه گیری‌های سنگ برای بررسی‌های میدانی.
D2488، استاندارد اجرایی برای شناسایی و توصیف خاک‌ها (فرآیند چشمی- دستی).
D2573، روش استاندارد برای آزمایش صحرایی برش پره در خاک چسبنده.
D3441، روش استاندارد برای آزمایشات مکانیکی نفوذ مخروط در خاک.
D3550، استاندارد اجرایی برای نمونه‌گیری دیوار ضخیم، پیش‌رانش، حلقه‌ای و نمونه‌گیر دوکفه‌ای از خاک‌ها.
D3740، استاندارد اجرایی و ملزومات حداقل برای نمایندگی‌های مرتبط با آزمایشات خاک و بازرسین خاک و سنگ که در طراحی مهندسی و ساخت استفاده می‌شوند.
D4083، استاندارد اجرایی برای توصیف خاک‌های منجمد (فرآیندهای چشمی-دستی).
D4220 استاندارد اجرایی برای نگهداری و انتقال نمونه‌های خاک.
D4428/D4428 روش استاندارد برای آزمایشات لرزه‌ای چاه به چاه.[1]
D4633، روش استاندارد اندازه‌گیری انرژی برای نفوذسنج‌های دینامیکی.
D4719، روش استاندارد برای آزمایشات فشارسنج پیش حفاری در خاک‌ها.
D4729، روش آزمایش استاندارد برای تنش درجا و مدول تغییرشکل با استفاده از روش جک مسطح.
D4750، روش آزمایش استاندارد برای تعیین تراز آب لایه‌های زیرین خاک در حفاری‌ها و چاه‌های مانیتورینگ.
D5092، استاندارد اجرایی برای طراحی و نصب چاه‌های مانیتورینگ آب‌های زیرزمینی .
D5434، راهنمای استاندارد برای گزارش‌دهی اکتشافات میدانی زیرسطحی خاک و سنگ.

۱-۱- شناسایی و توصیف خاک‌های درجا

دانه‌های خاک دارای ویژگی‌های مکانیکی هستند که علامت‌هایی را برای تعیین نوع خاک مورد بررسی ارائه می‌کنند. با انجام مشاهدات کافی نوع خاک را می‌توان تعیین نمود و

1.Cross hole investigation

اطلاعات حاصله می‌توانند به عنوان راهنما در توصیف صحیح خصوصیات مهندسی خاک‌ها به کمک *آزمایشات درجا* و آزمایشگاهی استفاده شوند.

۱-۱-۱- اندازه‌ی دانه

خاک‌ها معمولا به صورت درشت‌دانه و ریزدانه دسته‌بندی می‌شوند. خاک‌های درشت‌دانه شامل تخته سنگ‌ها، قلوه‌سنگ‌ها، شن و ماسه می‌باشند. ریزدانه‌ها را رس‌ها و سیلت‌ها تشکیل می‌دهند. جدول ۱-۱ طیفی از اندازه دانه‌های را برای انواع خاک‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱ اندازه‌ی دانه‌های خاک‌ها

نوع خاک	اندازه ذره
تخته سنگ	mm 300<
قلوه سنگ	to 300 mm 150
شن	to 150 mm 4.76
ماسه	to 4.76 mm 0.076
سیلت (لای)	to 0.076 mm 0.002
رس	0.002mm>

ریزترین دانه‌هایی که با چشم غیرمسلح قابل رؤیت هستند به اندازه‌ی سوراخ الک نمره‌ی ۲۰۰ (۰,۰۷۵ میلی‌متر) می‌باشند. اگر دانه‌ها به تنهایی قابل رؤیت باشند می‌توانند ماسه‌ی ریز باشند، اما در غیر این صورت احتمالاً سیلت یا رس می‌باشند. دانه‌های رس و سیلت معمولا توده‌هایی را تشکیل داده که باعث می‌شود آنها را با دانه‌های ماسه اشتباه بگیریم. در این حالت مرطوب کردن توده باعث جدایی دانه‌های به هم چسبیده می‌شود. به منظور تشخیص سیلت‌ها از رس‌ها خاک‌ها را به شکل ریسمان‌های با قطر ۳ میلی‌متر می‌غلتانیم ، این عمل را می‌توان برای خاک‌های با مقادیر زیاد رس انجام داده، اما خاک‌های لایدار (سیلتی) طی این فرآیند ترک می‌خورند.

۱-۱-۲- مقاومت خشک

مقاومت خشک یک خاک ریزدانه می‌تواند با خرد کردن یک نمونه‌ی خشک با ضخامت ۳ میلی‌متر بین انگشت شست و سبابه تخمین زده شود. اگر نمونه به آسانی بشکند، بیشتر شامل سیلت می‌باشد. خاک‌های شامل مقادیر بالای رس در مقابل جداشدن سخت‌تر بوده

که بیانگر آن است که آنها دارای مقاومت خشک بیشتری هستند، هرچند این مقاومت با مرطوب کردن می‌تواند از بین برود. ماسه‌ها و سیلت‌ها برخی اوقات شامل عوامل چسباننده نظیر کربنات کلسیم بوده که مقاومت خشک آنها را افزایش می‌دهد. در این موارد اگر خاک‌ها مرطوب شوند، دانه‌های به هم چسبیده مقاومت خشک خود را حفظ می‌کنند ، در حالی که رس‌ها در همین شرایط شل می‌شوند. خاک‌های به هم چسبیده (Cementated) شامل کربنات کلسیم می‌توانند با ریختن مقدار کمی اسید هیدروکلریک روی نمونه‌ی خاک شناسایی شوند. به این ترتیب که اگر خاک با HCL واکنش نشان دهد نتیجه می‌گیریم که شامل کربنات کلسیم است.

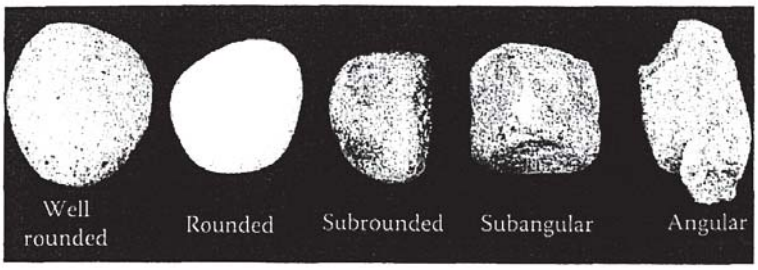
۱-۱-۳- شکل و ترکیبات کانی شناسی خاک‌های درشت‌دانه

درجه‌ی گردگوشگی (Roundness) برای دانه‌های خاک درشت‌دانه نظیر شن، ماسه، قلوه سنگ‌ها و تخته سنگ‌ها تعیین می‌شود. اصطلاحات استفاده شده به منظور توصیف درجه‌ی گردگوشگی شامل گوشه‌دار، نیمه گوشه‌دار، نیمه گردگوشه، گردگوشه و کاملاً گردگوشه می‌باشد (شکل ۱-۱ را ببینید.)

اگر مصالح ضعیف نظیر میکا یا شیل موجود باشند، پایداری یا تراکم‌پذیری خاک کاهش می‌یابد. حضور مصالح ضعیف را می‌توان توسط یک ذره‌بین مشخص نمود.

۱-۱-۴- رطوبت

در آزمایشگاه میزان رطوبت خاک با اندازه‌گیری وزن نمونه‌ی خاک قبل و بعد از قرار دادن آن در اجاق خشک‌کن تعیین می‌شود.



شکل ۱-۱ دانه‌های گردگوشه و تیزگوشه

همان‌طوری که در جدول ۱-۲ آمده است در صحرا (Field) تخمین‌ها بر اساس ظاهر و لمس نمودن خاک به دست می‌آید. همچنین میزان آب را می‌توان با استفاده از دیگر روش‌های میدانی (برای مثال روش اسپیدی) به دست آید. (فصل ٤ را ببینید).

۱-۱-۵- رنگ

رنگ خاک ابزار قابل اعتمادی برای مهندسی ژئوتکنیک نیست زیرا با تغییر میزان رطوبت، رنگ خاک می‌تواند تغییر کند. هر چند برخی از رنگ‌ها دارای اهمیت هستند. به طور مثال خاک‌های با رنگ خاکستری تیره تا رنگ مشکی می‌توانند شامل مقادیر زیادی مواد آلی باشند که می‌تواند در مهندسی ژئوتکنیک مسئله‌ساز باشد.

۱-۱-۶- انسجام

انسجام یا سفتی یک خاک بستگی به نوع خاک، میزان رطوبت، وزن واحد و سایر پارامترهای مکانیکی آن دارد و می‌تواند با گذشت زمان تغییر کند. جدول ۱-۳ و جدول ۱-٤ به ترتیب طبقه‌بندی‌هایی از انسجام خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه را همراه با روش‌های تعیین آنها ارائه می‌دهند.

جدول ۱-۲ میزان تخمینی رطوبت

طبقه‌بندی	توصیف
خشک	گرد و خاکی، سطح تماس خشک
اندکی مرطوب	کمی مرطوب اما دارای ظاهر خشک
مرطوب	مرطوب اما بدون آب قابل رؤیت
خیلی مرطوب	رطوبت کافی برای مرطوب کردن دست‌ها
خیس	اشباع و دارای آب قابل رؤیت

جدول ۱-۳ انسجام طبقه بندی های خاک های ریزدانه

طبقه‌بندی	توصیف	
خیلی نرم	خاک می‌تواند به شکل خمیری فشرده شود یا با انگشت سوراخ شود	kPa 12>
نرم	خاک می‌تواند با فشار اندک انگشت شکل داده شود	to 50 kPa 25
معمولی	خاک می‌تواند با فشار زیاد انگشت شکل داده شود	to 100 kPa 50
محکم	خاک با فشار شست دارای فرورفتگی‌می شود	to 150 kPa 100
سفت	خاک با فشار ناخن شست دندانه‌دار می‌شود	to 200 kPa 150
خیلی سفت	خاک به آسانی با نوک مداد هم فرو نمی‌رود	kPa 200<

جدول ۱-٤ انسجام انواع خاک های درشت دانه

طبقه بندی	توضیح	تعداد ضربه spt	
خیلی سست	به راحتی با فشار میله‌ی با قطر ۱۲ میلی‌متری که توسط دست هل داده می‌شود سوراخ می‌شود	4>	۰to 15%
سست	به سختی با فشار میله‌ی با قطر ۱۲ میلی‌متری که توسط دست هل داده می‌شود سوراخ می‌شود	to 10 4	to 35% 15
با تراکم معمولی	به راحتی با اندازه‌ی ۳۰۰ میلی متر توسط میله با قطر ۱۲ میلی متری که توسط چکش با وزن ۲,۳ کیلوگرم کوبیده می‌شود سوراخ می‌شود	to 17 10	to 65% 35
چگال	به سختی با اندازه‌ی ۳۰۰ میلی متر توسط میله با قطر ۱۲ میلی متری که توسط چکش با وزن ۲,۳ کیلوگرم کوبیده می‌شود سوراخ می‌شود	to 32 17	to 85% 65
خیلی چگال	تنها ۱۵۰ میلی متر توسط ضربه‌ی میله با قطر ۱۲ میلی‌متری که توسط چکش با وزن ۲,۳ کیلوگرم کوبیده می‌شود فرو می‌رود	32<	to 100% 85

۱-۱-۷- بو

خاک آلی را می‌توان با رنگ خاکستری تا مشکی شناسایی نمود، علاوه بر آن این‌گونه خاک‌ها با بوی گیاه زوال یافته یا جسم حیوانی نیز شناخته شود. حرارت می‌تواند شاخصه‌های شناسایی‌کننده‌ی خاک‌های آلی را تقویت نماید.

۱-۱-۸- ساختار

برخی از اصطلاحات معمول که در تعریف نمونه‌های خاک دست‌نخورده به کار می‌روند به شکل زیر هستند:

۱- لایه‌بندی شده- لایه‌های متناوب با مصالح یا رنگ متغیر و با ضخامت حداقل ٦ میلی‌متر.
۲- متورق- لایه‌های تغییرکننده با رنگ متغیر در لایه‌های با ضخامت کمتر از ٦ میلی‌متر.
۳- شکاف دار- دارای شکست‌هایی در طول صفحات شکست با مقاومت اندک در مقابل شکست.
٤- سطح صیقلی- صفحات شکست به شکل براق یا بلورین و گاهی اوقات خط‌دار.
٥- چهارگوش- خاک ریزدانه می‌تواند به تکه‌های ریز تیزگوشه خرد شود که مقاومت بیشتری در مقابل خردشدن دارند.
٦- عدسی- خاک‌های مخلوط شامل یک نوع از خاک درون نوع دیگری از خاک.
۷- همگن- رنگ و ظاهر یکسان در تمام توده‌ی خاک .

برخی ازسیستم‌های طبقه‌بندی خاک نظیر سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS) و انجمن حمل و نقل و بزرگراه‌های ایالتی آمریکا (AASHTO) برای استفاده از پارامترهای ویژه‌ی خاک که از آزمایشات آزمایشگاهی به دست می‌آیند، معرفی شده‌اند. استفاده از این سیستم‌ها بعدا در این کتاب راهنما مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۲ بررسی‌های میدانی خاک

با انجام یک بررسی ژئوتکنیکی مناسب یک مهندس می‌تواند از تأخیرات غیرضروری در فرآیند طراحی و ساخت پیش‌گیری کند. هر پروژه‌ای به روش‌های مختلفی نیاز دارد. هیچ شکل آماده‌ای برای پیروی کردن در طراحی پی یک سازه وجود ندارد. هر محل ساخت باید

به شکل مجزا بررسی شود و کیفیت داده‌ها باید با به دست آوردن اطلاعات جدیدتر به طور مستمر بازبینی و بررسی مجدد شوند. قبل از اینکه بررسی‌های میدانی شروع شوند داده‌های فنی در دسترس شامل نقشه‌های توپوگرافی USGS (مطالعات زمین‌شناسی آمریکا)، عکس‌های هوایی، نقشه‌های خاک کشاورزی، اسناد منابع آب زیرزمینی، نقشه‌های زمین‌شناسی، اطلاعات دقیق از محل‌های مجاور و مشابه، ساکنین محلی، اکتشافات زیرسطحی و آزمایشات میدانی و آزمایشگاهی، باید بازبینی شوند. نباید روی داده‌ها و مشاهدات قدیمی تکیه کرد بلکه باید مطالعات و آزمایشات جدید را به منظور به دست آوردن آگاهی از وضعیت و شرایط کنونی طرح‌ریزی کرد.

یک برنامه شناسایی باید برای محل مورد مطالعه با استفاده از داده‌های موجود طراحی شود. این برنامه باید شامل فعالیت‌های زیر باشد:

- بازنگری داده‌های موجود از محل و مجاورت محل
- تفسیر عکس‌های هوایی و سایر داده‌های راه دور
- اکتشاف میدانی برای شناسایی شرایط زمین‌شناسی سطح
- نقشه‌های پروفیل لایه بندی و رهنمون ها
- آزمایش عملکرد سازه‌های موجود
- بررسی‌های درجا برای مصالح سطحی و زیرسطحی با استفاده از حفاری، گودال‌های آزمایشی و مطالعات ژئوفیزیکی
- بازیابی نمونه‌های دست‌خورده برای آزمایشات طبقه‌بندی خاک، سنگ و مصالح ساختمانی (این نمونه‌ها باید ـ به صورت نمونه‌های دست‌نخورده و مناسب برای تعیین خواص مهندسی تهیه شوند.)
- شناسایی سطح‌تراز آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت.
- شناسایی و ارزیابی محل مناسب برای تهیه‌ی مصالح پی‌ریزی.
- شناسایی نهشت‌های خاک و سنگ با اشاره‌ی ویژه به نوع و درجه‌ی تجزیه، عمق، وقوع و محل گسستگی‌های سازه‌ای آنها.

خطاهای زیادی هستند که امکان وقوع داشته و ممکن است بر روند طراحی و ساخت پی‌تأثیر بگذارند. انتخاب روش‌ها و تجهیزات به ویژه انتخاب روشی که قابل اجرا، قابل اعتماد و به صرفه باشد دارای اهمیت زیادی است. بعضی از روابط مهندسی و آزمایشات

آزمایشگاهی برای انواع خاصی از خاک طراحی شده‌اند و عدم لحاظ این مورد می‌تواند باعث به دست آمدن نتایج ناصحیح از آزمایشات شود. خطاهای انسانی نظیر خطاهای بازنویسی داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها، خطای دستی در نمونه‌گیری‌ها، خطا در کالیبراسیون وسایل و بازبینی‌های ناکافی و نیز خطا در روابط بین داده‌ها می‌توانند منبع ایجاد اختلاف و بروز خطا در طراحی ژئوتکنیکی نهایی شوند.

انتخاب پارامترهای طراحی و نوع مدل‌ها همراه با ارتباط مستمر با کارفرما و پیمانکاران برای دست یافتن به یک محصول نهایی با کیفیت ضروری است.

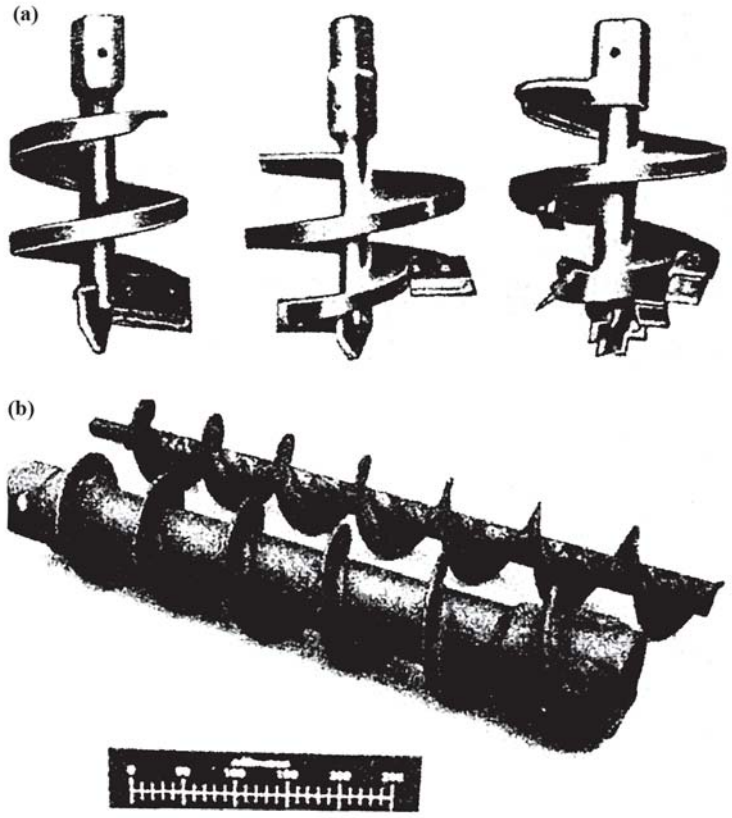
۱-۲-۲- نمونه‌گیری از خاک

یک جنبه‌ی مهم از آزمایشات انجام‌شده در آزمایشگاه، گردآوری نمونه‌ها برای توصیف خاک می‌باشد. فرآیند گردآوری نمونه‌های خاک دست‌نخورده و دست‌خورده، مهارت و تجربه‌ی بالایی را بسته به کیفیت مورد انتظار نمونه‌ها طلب می‌کند.(یگان مهندسی ارتش آمریکا ۱۹۹۶)

نمونه‌های دست‌خورده برای طبقه‌بندی چشمی و طبقه‌بندی قراردادی خاک و نیز برای آماده‌سازی نمونه‌های خاک دوباره شکل داده شده به کار می‌روند. هنگام به دست آوردن نمونه‌های دست‌خورده، دغدغه‌ی مهندسین ژئوتکنیک صرفا حفظ کانی‌های آن و توزیع اندازه‌ی دانه‌بندی خاک می‌باشد. به طور کلی نمونه‌های دست‌خورده‌ای که برای شناسایی خاک‌ها استفاده می‌شوند، اطلاعات تقریبی در رابطه با پاسخ خاک تحت اثر نیروهای مهندسی را برای مهندس فراهم می‌آورند. به علاوه نمونه‌های خاک دوباره شکل داده شده که نوعاً توسط محققین در آزمایشگاه‌ها برای تعیین رفتار مصالح به کار می‌روند، می‌توانند برای فهم فرآیندهای ژئومکانیکی و نیز ارائه مدل‌های بنیادی به کار روند. مته‌های حفاری که مرسوم در گردآوری نمونه‌های خاک دست‌خورده استفاده می‌شوند در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌اند.

نمونه‌های دست‌نخورده برای توصیف ویژگی‌های خاک و تعیین پارامترهای طراحی به کار می‌روند. هنگام به دست آوردن نمونه‌های دست‌نخورده مهندسین ژئوتکنیک این دغدغه را دارند که پس از خارج کردن نمونه از محل نه تنها ترکیب‌بندی معدنی و توزیع دانه‌بندی دانه‌های خاک حفظ شود، بلکه نمونه‌ها با حفظ میزان آب اولیه، نسبت تخلخل و ساختار اولیه‌ی خاک، دست‌خورده نشوند. (به این مسأله دست‌خوردگی نمونه می‌گوئیم که ممکن است به نتایج انحراف‌آمیزی در طراحی منجر گردد - مترجم)

پاورقی- هیچ نمونه‌ی کاملا دست‌نخورده‌ای بعد از خارج کردن آن از محل وجود ندارد. تغییراتی در حجم و تنش‌ها وجود داشته که تکرار و انطباق آنها در آزمایشگاه مشکل است. این کتاب راهنما عبارت دست‌نخورده را برای نمونه‌هایی به کار می‌برد که با احتیاط زیاد و تلاش برای حفظ خصوصیات اولیه‌ی خاک درجا خارج شده‌اند. این نمونه‌ها باید دارای حداقل میزان دست‌خوردگی باشند.



شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از مته‌های حفاری برای استخراج نمونه‌های دست‌خورده از خاک: الف- سوراخ‌کن کوتاه با ساقه‌ی توپر، ب- سوراخ‌کن پیوسته با ساقه‌ی توپر، ج- سوراخ‌کن با ساقه توخالی. (شکل‌ها از کتاب راهنما نمونه‌گیری از خاک متعلق به یگان مهندسین ارتش آمریکا EM1110-1-1906 برداشت شده است.)

به دلیل اینکه نسبت تخلخل و ساختار خاک پارامترهای نسبت به نیروها و محرک‌های خارجی بسیار حساس هستند، به دست آوردن یک نمونه‌ی کاملاً دست‌نخورده غیرممکن است. علیرغم این واقعیت، مهندسین ژئوتکنیک تلاش زیادی را در جمع‌آوری نمونه‌هایی که بتوان آنها را دست‌نخورده به حساب آورد انجام داده‌اند.

نمونه‌های دست‌نخورده را می‌توان به شکل نمونه‌های حاصله از گودال‌های حفرشده به دست آیند. نمونه‌های گودالی از سطوح روباز خاک نیز دیوارهای ترانشه جدا می‌شوند و با یک پارافین برای ممانعت از تبخیر و فرار آب پوشیده می‌شوند. این نوع از نمونه‌گیری را می‌توان برای خاک‌های ریزدانه (رس‌ها و سیلت‌های رسی) به کار برد ، اما روش مذکور برای خاک‌های ماسه‌ای تمیز کاربردی نیستند. نمونه‌های حاصله از نمونه‌گیرها را می‌توان در لوله‌های استخراج‌کننده با انتهای پوشیده شده با پارافین نگهداری نمود، و یا می‌توان نمونه‌ها را خارج نموده و سپس با پارافین آنها را پوشانید. یک روش اجرایی مناسب برای نگهداری کامل نمونه‌ها استفاده از اتاق مرطوب برای حفظ میزان رطوبت خاک می‌باشد. در کتب یگان مهندسی ارتش آمریکا روش‌های مختلفی برای مشاهده‌ی مستقیم شرایط زیرسطحی به صورت خلاصه آمده است و آنها را به صورت ارزیابی‌های درجا و تکنیک‌های حفاری و سوراخ‌کاری تقسیم‌بندی نموده‌اند. خلاصه‌ای از این طبقه‌بندی در جدول ۱–۵ آمده است.

تعدادی از نمونه‌گیرها وجود دارند که مهندسین برای گردآوری نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده استفاده می‌کنند که شامل موارد زیر می‌باشند:

۱– نمونه‌گیر آزمایش نفوذ استاندارد (TPS) یا قاشق دوکفه‌ای[1] (صرفاً برای نمونه‌های دست‌خورده)

۲– لوله‌ی شلبی[2]

۳– نمونه‌گیر وورسلو[3]

٤– نمونه‌گیر بوتلرز[4]

۵– نمونه‌گیر اوستنبرگ[5]

٦– نمونه‌گیر سفالی پیوسته[6]

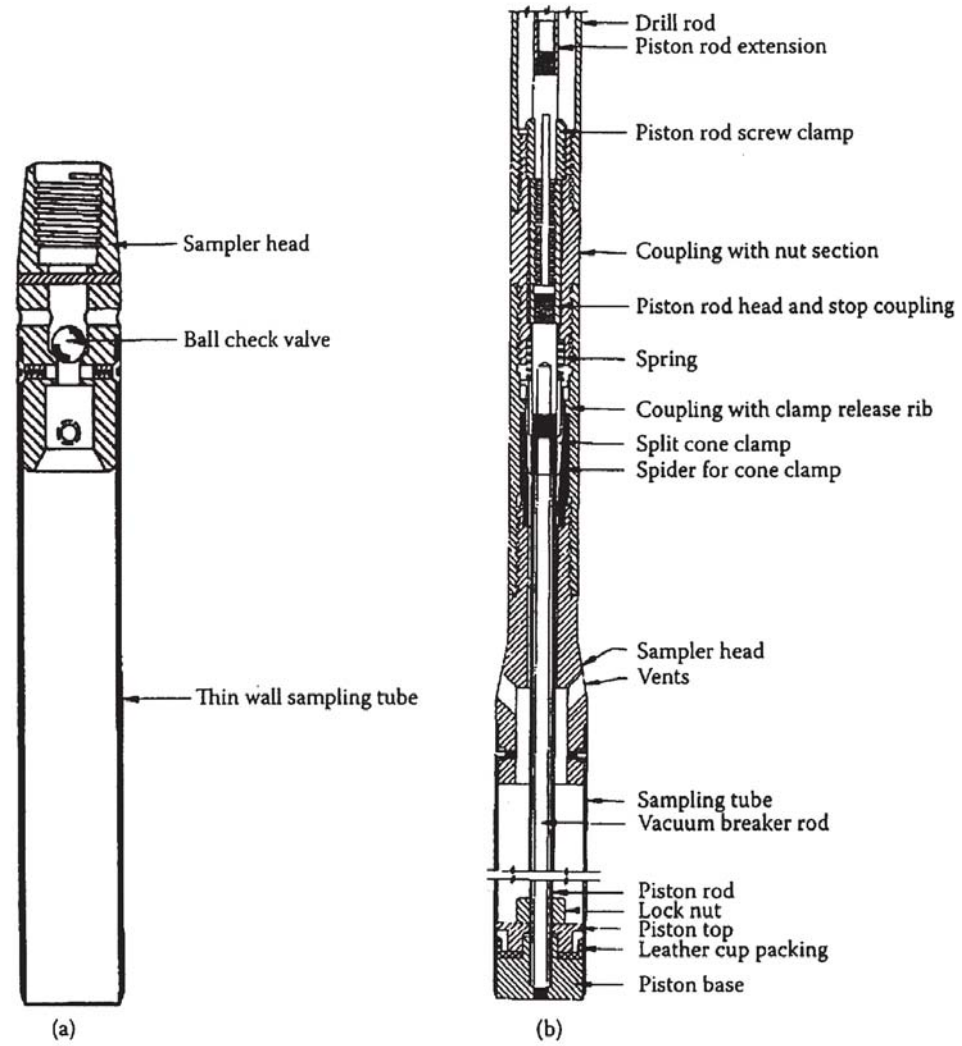
---

1. Split spoon sampler
2. Shelby tube
3. Hvorslev
4. Butters
5. Osterberg
6. Delft continuous sampler

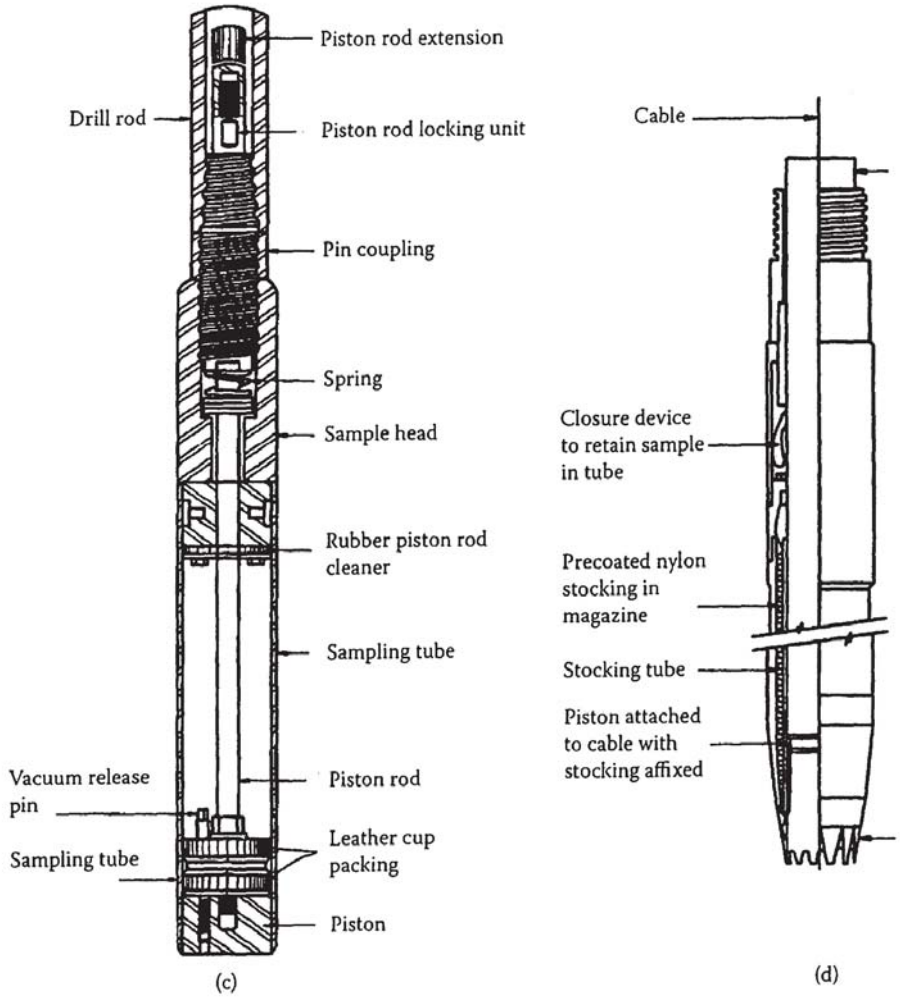
هندسه‌ی نمونه‌گیرهای معمول در شکل ۱-۳ (الف) یا شکل ۱-۳ (د) نشان داده شده است. شکل ۱-٤ (الف) تا شکل ۱-٤ (ج) روندهای عملیاتی معمول برای گردآوری نمونه‌های خاک دست‌نخورده را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۵ روش‌های ارزیابی درجا و تکنیک‌های حفاری

روش	نوع حفاری	توضیحات
ارزیابی درجا	گودال‌های ازمایشی و ترانشه‌ها	حفاری دستی یا ماشینی، عمق توسط تراز آب زیرزمینی محدود می‌شود
	محورهای بزرگ، تونل‌ها و دریفت‌ها	حفاری‌گران است، یک سطح آغشته ناشی از عملیات حفاری وجود دارد
	دوربین عکاسی گمانه	به چاه‌های خشک نیاز دارد
تکنیک‌های حفاری و مته کاری	سوراخ کنی دستی	قابل کاربرد برای خاک‌های سست تا سفت نزدیک سطح زمین، قابل حمل و ارزان
	گمانه‌زنی کوبشی نرم (غلاف و مته)	خاک‌های ریز: لوله فولادی رها شده و نمونه به شکل گوه خارج می‌شود، خاک‌های درشت‌دانه: خاک شل است و و در لوله در بالای غشا رسوب می‌کند
	سوراخ‌کاری با مته مکانیکی	لنگر پیچشی به یک دستگاه سوراخ‌کن که به مته‌هایی متصل است اعمال می‌شود. خاک‌ها ممکن است ترکیب شوند و نماینده‌ی خاک نمونه نباشند و فشار اضافی ممکن است باعث به هم‌خوردگی خاک جلوی صفحه‌ی چاه شود.
	حفاری شوییدنی (wash boring)	توسط یک جت آب در پایه‌ی وسیله‌ی حفاری ذرات خاک به سمت سطح زمین هدایت می‌شوند. خاک‌ها ممکن است ترکیب سوند و نماینده‌ی خاک نمونه منطقه نباشند.
	مغزه‌گیری با سوراخ‌کن گردنده	ترکیب نیرو به سمت پایین و عمل گردشی، معمولا حفاری لبه تیز (cutting tip) به کار می‌رود



شکل ۱-۳ مثال‌هایی از: الف- نمونه‌گیر دیوار نازک، ب- نمونه‌گیر پیستون ورسلو، ج- نمونه‌گیرهای بوتلرز، د- نمونه‌گیر سفالی



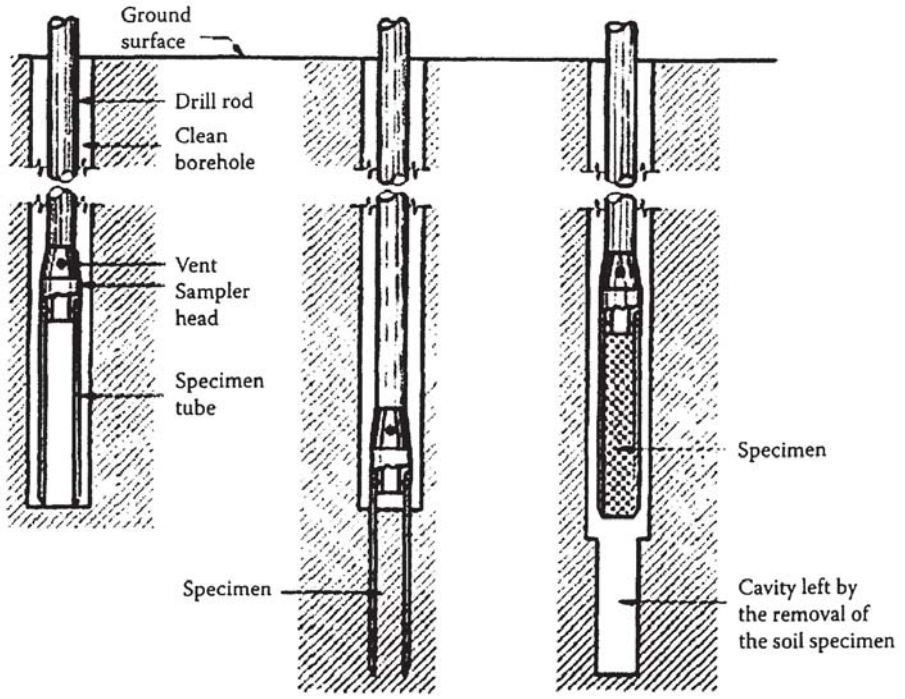
ادامه‌ی شکل ۱-۳ ...

روش‌های گردآوری نمونه‌های دست‌نخورده برای انواع مختلف خاک‌ها و سنگ‌ها در جدول ۱-٦ آمده است.

۱-۲-۳- آزمایشات درجا (صحرائی)

این آزمایش‌ها به دلیل نیاز در حصول ویژگی‌های خاک‌ها در *وضعیت درجای* آنها صورت می‌پذیرند. ویژگی‌های خاک در تنش‌های درجا بحرانی است زیرا بیشتر سازه‌های خاکی

بر اساس این ویژگی‌ها طراحی می‌گردند. هرچند تکنیک‌های آزمایشات آزمایشگاهی برای طراحی کافی باشند، اما برای ارزیابی ویژگی‌های سیستم‌های خاکی کافی نیستند. دلیل این نقص از شکل افتادن خاک دست‌خورده هنگام خارج کردن آنها از زمین مور بررسی می‌باشد. اگر چه اقدامات بزرگی برای کاهش دست‌خوردگی نمونه طی فرآیندهای بازیابی نمونه‌ها انجام شده است ، اما به هر حال خاک حالت درجای خود از نقطه نظر تنش‌ها و بسیاری از موارد دیگر نظیر فشار موئینگی را از دست می‌دهد. این پارامترها مشکلات عمده‌ای را برای بازتولید در آزمایشگاه ایجاد می‌نماید. *بنابراین آزمایشاتی که در آزمایشگاه انجام می‌شوند آثار اعوجاجات نمونه‌گیری حاصل از انتقال نمونه از صحرا تا آزمایشگاه را به همراه دارند. اثر دست‌خوردگی می‌تواند تأثیر قابل توجهی روی آزمایشات آزمایشگاهی بگذارد. به ویژه این موضوع برای ماسه‌ها بارزتر است.*



شکل ۱-۴ فرآیندهای معمول اجرایی نمونه‌گیری با استفاده از نمونه‌گیر لوله‌باز: الف- شروع پیش‌رانش، ب- انتهای پیش‌رانش، ج- بازیابی نمونه

جدول ۱-٦ نمونه‌گیرها: انواع و روش‌های گردآوری نمونه‌های خاک دست‌نخورده

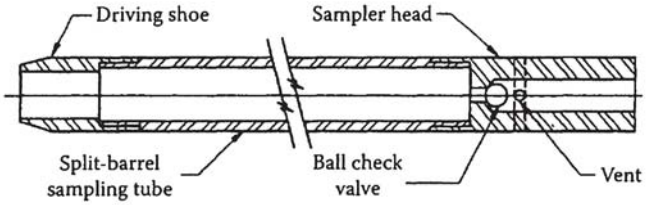
نوع خاک	نوع نمونه‌گیری
خاک‌های خمیری نرم، خاک‌های آلی و رس سالچینه شده (varved clays)	نمونه‌گیر خاک یا نمونه‌گیر پیستون ثابت
خک‌های خمیری نرم تا متوسط	نمونه‌گیر پیستون ثابت
ماسه‌های ریز تا متوسط (بالای تراز اب)	آرایش دستی، نمونه‌گیر پیستون ثابت درون چاه قالب‌گیری شده یا گلی
ماسه‌های ریز تا متوسط (زیر تراز اب)	فریز کردن درجا و مغزه‌گیری، نمونه‌گیر پستون ثابت داخل چاه گلی
لایه‌های خاک و سنگ، خاک‌های بیش تحکیم یافته، سنگ‌ها	نمونه‌گیر مغزه‌گیر چرخنده

برای اجتناب از آثار دست‌خوردگی در نتایج آزمایش، آزمایشات درجا می‌توانند به کار گرفته شوند. آزمایشات درجا نسبت به آزمایشات آزمایشگاهی دارای چندین مزیت هستند از جمله اینکه این آزمایش‌ها ارزان‌تر هستند و به همین دلیل تعداد بیشتری از آزمایش‌ها قابل انجام هستند و نتایج به سرعت قابل دسترس هستند. آزمایش‌ها اطلاعات دقیق‌تر و با جزئیات بیشتر از پروفیل خاک در وضعیت‌های خاص در محل نظیر چینه‌شناسی لایه‌های خاک و تغییرات مکانی ویژگی‌های آنها را ارائه می‌کنند. برخی از اشکالات این روش به این صورت بوده که اغلب هیچ نمونه‌ای حاصل نگردیده و این موضوع باعث مشکل شده طبقه‌بندی خاک گریده و مهندس کنترل کمتری روی محدود کردن تنش‌ها و زهکشی خواهد داشت.

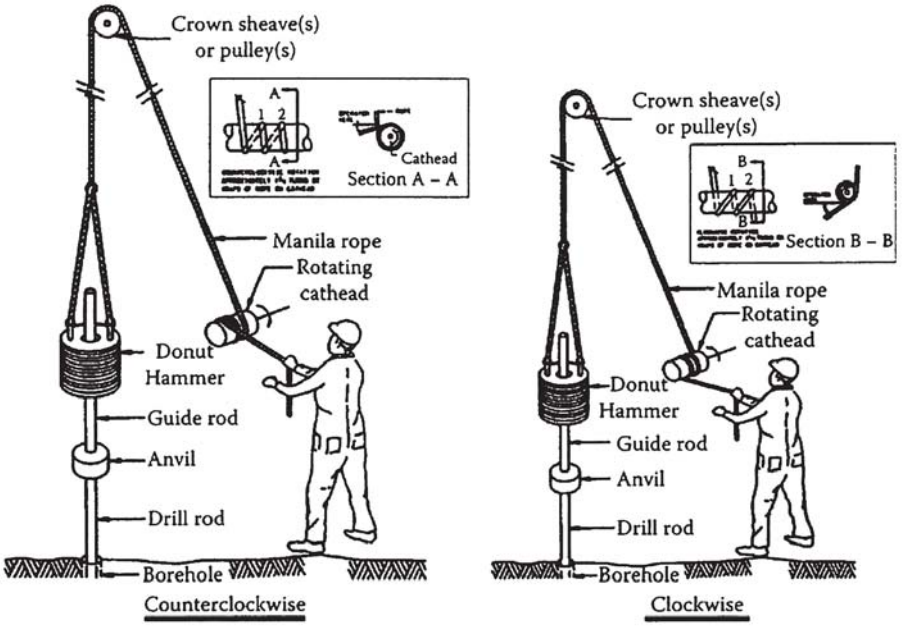
خصوصیات خاک حاصله از ارزیابی‌های میدانی بر مبنای روابط تجربی بین کمیت‌های اندازه‌گیری شده در صحرا و خواص اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه قرار دارند. بیشتر روابط برای رس‌ها با حالت خمیری کم و متوسط و یا برای ماسه‌ها ارائه شده‌اند و برای خاک‌های خاص نظیر رس‌های خیلی نرم، رس‌های آلی، رس‌های حساس، خاک‌های سمنته شده (چسبیده)، خاک‌های گسیخته شده و خاک‌های یخزده نمی‌توانند قابل اعتماد باشند. رایج‌ترین آزمایشات در جا: آزمایش SPT، آزمایش نفوذ مخروط (CPT)، آزمایش برش پره، آزمایش فشارسنجی و تکنیک‌های زمین‌شناسی می‌باشند.

۱-۲-۳-۱- آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

آزمایش SPT یکی از رایج‌ترین آزمایش‌ها می‌باشد (شکل ۱-۵). این آزمایش به شکل صحیح و مناسبی برای اجرای مهندسی در اواخر دهه‌ی ۱۹۲۰ طراحی شده و اکنون نیز در سراسر جهان کاربرد دارد. این آزمایش از لحاظ اجرایی بسیار ارزان است و برای تعیین خصوصیات خاک‌ها به ویژه در خاک‌های درشت‌دانه به کار می‌رود.



شکل ۱-۵ نمونه‌گیر SPT



شکل ۱-۶ نمونه‌گیر SPT کار گذاشته در گودال همراه با چکش، طناب و لنگربند[1]

1. cathe

برای اجرای آزمایش یک نمونه‌گیر قاشق دوکفه‌ای (split spoon) به یک میله‌ی حفار متصل شده و درون خاک با یک چکش به پیش رانده می‌شود. از نمونه‌گیر برای گردآوری نمونه‌های دست‌خورده به منظور طبقه‌بندی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه استفاده می‌شود.

فرآیند آزمایش:

۱- ابتدا یک گودال را تا عمق مشخصی ایجاد می‌کنیم و ابزار حفاری را خارج می‌سازیم.
۲- نمونه‌گیر قاشق دو کفه‌ای درون گودال قرار داده شده و به میله فولادی متصل می‌شود. میله فولادی نمونه‌گیر را به یک چکش با نیروی ۳۲٦ نیوتن وصل می‌کند.
۳- چکش تا فاصله‌ی ۰٦۷ میلی‌متر بالا برده شده و سپس رها می‌شود. این عمل تا زمانی که نمونه‌گیر به اندازه‌ی ۷٥٤ میلی‌متر درون خاک فرو رود ادامه می‌یابد. (شکل ۱-٦)
٤- تعداد ضربات در بازه‌های ۰٥۱ میلی‌متری ثبت می‌شود.
٥- شماره‌ی N که ازجمع بستن تعداد ضربات برای بازه‌های نمونه‌گیری اولین و سومین ۰٥۱ میلی‌متر به دست می‌آید، محاسبه می‌شود. اولین ۰٥۱ میلی‌متر به منظور ارجاع دادن استفاده می‌شود.
٦- خارج کردن قاشق نمونه‌گیر، خارج کردن خاک از نمونه‌گیر و حفظ و نگهداری نمونه برای آزمایشات آزمایشگاهی
۷- حفاری گودال برای اعماق بیشتر و تکرار روند بالا

۱-۲-۳-۲- آزمایش نفوذ مخروط (CPT)

آزمایش CPT به طور گسترده‌ای در اروپا (برای سالیان طولانی) مورد استفاده قرار می‌گیرد و در آمریکای شمالی نیز در حال کسب محبوبیت می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای روی آزمایش CPT و مفیدسازی آن برای کارهای مهندسی انجام شده است. دو نوع از مخروط‌های مورد استفاده در CPT شامل مخروط مکانیکی و مخروط پیزو[1] می‌باشند. برای انجام CPT مخروط که روی یک ارابه سوار است درون زمین رانده می‌شود. یک پیستون هیدرولیکی با نیروی ۳۰ تنی مخروط را هل می‌دهد و حس‌گرها در مخروط مقاومت نفوذ را اندازه می‌گیرند(شکل ۱,۹). مقاومت مخلوط q_c نیروی کل مخروط تقسیم بر سطح تصویر آن است. اصطکاک

1. piezo cone

جانبی مخروط f_{sc} مجموع نیروهای اصطکاکی عمل‌کننده در غلاف‌های[1] اصطکاکی تقسیم بر مساحت سطح مقطع آن می‌باشد. همچنین حس‌گرهای مخروط پیزو برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی تولیدشده طی پیش‌رانش حفره در خاک به کار می‌رود. اندازه‌گیری‌های فشار آب حفره‌ای به تعریف نوع خاک و ارزیابی‌های خصوصیات درجای خاک شامل ضریب تحکیم، رسانش هیدرولیکی کمک می‌کند. مخروط مکانیکی مقاومت مخروط و اصطکاک جانبی مخروط را در بازه‌های ۲۰ سانتی‌متری را اندازه می‌گیرد. مخروط الکتریکی دارای یک کرنش‌سنج توکار بوده که مقاومت مخروط و اصطکاک جانبی مخروط را به طور مستمر در عمق اندازه گرفته و نتایج روی یک نمودار ترسیم می‌گردد. آزمایش CPT پروفیل خاک را با جدایش[2] بیشتری نسبت به SPT تعریف می‌کند. اشکالات آزمایش CPT در مقایسه با آزمایش SPT این است که هیچ نمونه خاکی به دست نیامده و هیچ شانسی برای بازرسی خاک وجود ندارد ، همچنین CPT در خاک‌های با مقادیر زیاد شن غیرقابل استفاده و نیز غیرقابل اعتماد است. اگر CPT همراه با آزمایش SPT در یک محل انجام شود پروفیل خاک تهیه شده با CPT می‌تواند با نتایج آزمایش SPT ارزیابی شود.

۱-۲-۳-۳- آزمایش برش پره (VS)

این آزمایش برای تعیین مقاومت برشی درجای خاک‌های رسی نرم *به ویژه آنهایی که مقاومت خود را در حالت دست‌خوردگی از دست می‌دهند به کار می‌رود.* تجهیزات لازمه شامل دو تیغه‌ی فلزی نازک بوده که به یک محور قائم متصل هستند(شکل ۱-۸). هنگام انجام آزمایش پره‌ها به داخل خاک رانده می‌شوند و پیچشی با سرعت استاندارد برابر 0.1 درجه بر ثانیه به محور اعمال می‌شود. دستگاه برش پره تا زمانی که خاک به صورت برشی گسیخته شود به چرخش خود ادامه می‌دهد. با استفاده از این روش، مقاومت برشی زهکشی نشده و لنگر گسیختگی تعیین می‌شود. مقاومت برشی زهکشی نشده را می‌توانیم به طور ذیل محاسبه کنیم:

$$S_u = \frac{6T_f}{7\pi d^3} \qquad (۱-۱)$$

که در آن T_f پیچش گسیختگی و d قطر پره می‌باشد.

1. sleeve
2. resolution

مهم‌ترین نقص آزمایش برش پره این است که نمونه‌های خاک قابل گردآوری نیستند. این آزمایش برای رس‌ها مناسب است. از نسبت لنگرپیچش بیشینه به لنگر پیچشی پسماند برای تعیین حساسیت رس استفاده می‌شود.

۱-۲-۳-۴- آزمایش فشارسنجی (PMT)

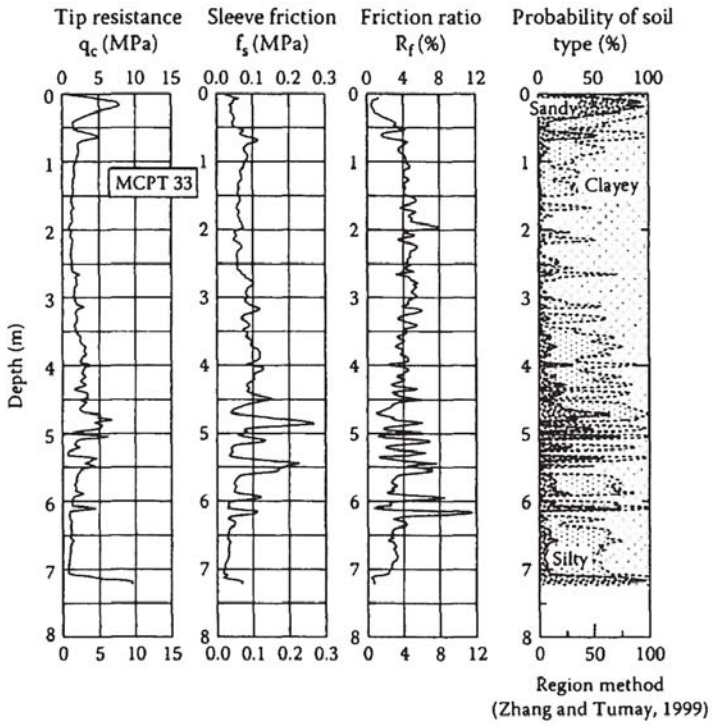
آزمایش فشارسنجی (PMT) برای اندازه‌گیری فشار و حجم به منظور تعیین فشارپذیری و مقاومت خاک مجاور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۱-۷ آزمایش نفوذ مخروط، الف- مخروط‌های پیزو معمولی- (ب) ارابه‌های نفوذ مخروط مربوط به مرکز تحقیقات حمل و نقل دانشگاه ایالتی لوئیزیانا- وسیله با پیستون هیدرولیکی که در ارابه‌ها قرار است و مخروط را با کمک گرفتن از وزن ارابه به عنوان نیروی عکس‌العمل درون خاک هل می‌دهد، (ج) نمودارهای نوعی مخروط‌های پیزو و تفسیر داده‌ها

تجهیزات داخل چاه از پیش حفاری شده قرار گرفته یا به یک مته حفار وصل می‌شود تا یک فشارسنج خودکار را بسازد. فشارسنج یک بالن استوانه‌ی بوده که داخل زمین قرار می‌گیرد و با فشار از باد پرمی‌شود. (شکل ۱-۹).

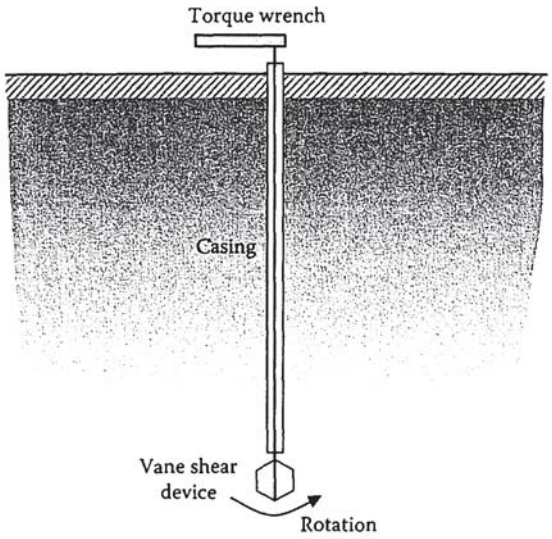
انبساط حجمی بالن تا زمان گسیختگی خاک یا رسیدن فشار به حد وسیله اندازه‌گیری ادامه می‌یابد. حد وسیله زمانی است که کل حجم محفظه‌ی منبسط شده دو برابر محفظه‌ی اولیه باشد. نتایج PMT اندازه‌گیری‌های مستقیم‌تری از تراکم‌پذیری خاک و تنش‌های جانبی را نسبت به SPT و CPT ارائه می‌دهد. *نقص این آزمایش مشکلات اجرائی آن است. بدین‌معنی که مجری باید در اجرای آن ماهر باشد.* این روش آزمایش هراز چند گاهی در سراسر جهان انجام می‌شود اما پیش‌بینی می‌شود در آینده محبوبیت بیشتری نیز پیدا کند.

(a) (b)



(c)

شکل ۱-۸ دستگاه آزمایش برش پره



شکل ۱-۹ وسایل فشارسنج و نتایج معمول

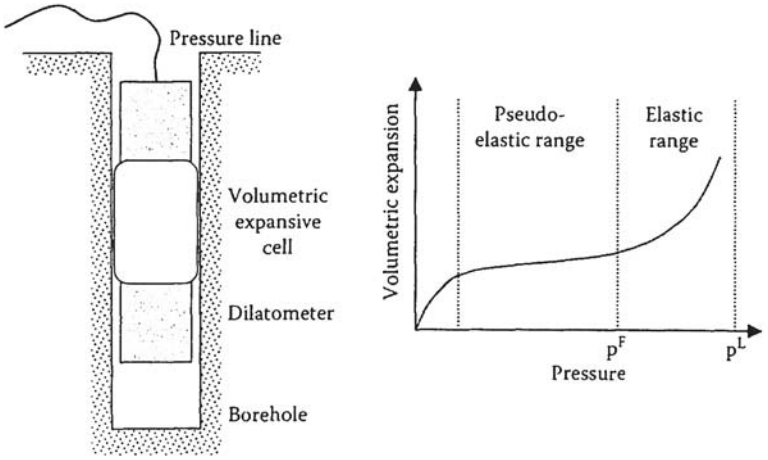
۱-۲-۳-۴-۵ شناسایی‌های ژئوفیزیکی

برخلاف آزمایشاتی که قبلا مورد بحث قرار دادیم، روش شناسایی ژئوفیزیکی امکان ارزیابی سریع از لایه‌های خاک زیرین و نیز امکان پوشش نواحی بزرگ‌تر را فراهم می‌آورد و در برخی موارد ارزان‌تر می‌باشد. نتایجی که از این آزمایش‌ها به دست می‌آیند صریح نبوده و نیاز به تفسیرهایی موردی (توسط استفاده‌کننده) دارند. سه مورد از اکتشافات ژئوفیزیکی عبارتند از: انکسار لرزه‌ای، مقاومت الکتریکی و لرزه‌ای چاه‌به‌چاه (برای اطلاعات بیشتر به بوتلر[1] ۲۰۰۵ مراجعه شود).

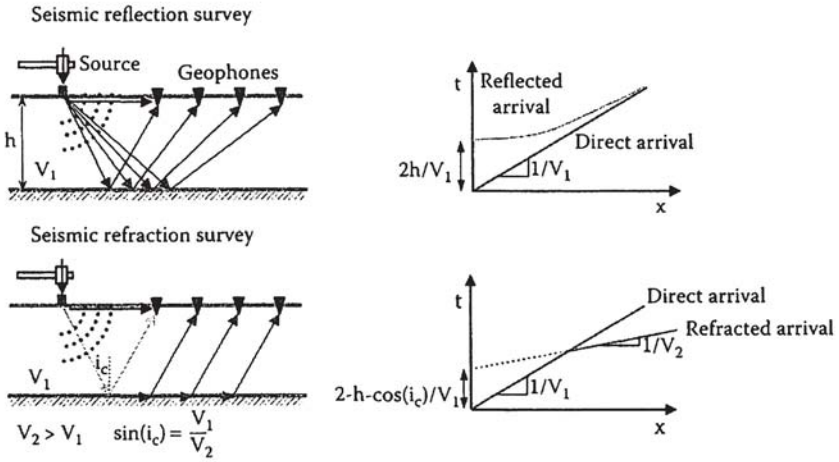
انعکاس لرزه‌ای مطالعات انکساری هستند (شکل ۱-۱۰) که برای به دست آوردن اطلاعات اولیه در مورد ضخامت لایه‌های خاک و عمق سنگ در محل آزمایش استفاده می‌شوند. برای انجام این آزمایش یک وسیله‌ی کوبنده چکش یا یک بار انفجاری کوچک برای ایجاد یک اثر روی یک نقطه‌ی کوچک A روی سطح استفاده می‌شود و زمان رسیدن اعوجاجات در نقطه‌ی دیگر مشاهده و ثبت می‌شوند. رسیدن اعوجاجات با یک ژئوفون[2] ثبت می‌شود. امواج لرزه‌ای حرکت‌کننده در مصالح خاک و سنگ مرتبط با چگالی و الاستیسیته‌ی مصالح هستند. اگر خاک

1. Butler 2005
2. Geophone

خیلی متراکم باشد سرعت حرکت امواج در آن بالاتر می‌باشد. اگر یک لایه‌ی سخت‌تر زیر لایه‌ی سطحی خاک موجود باشد امواج لرزه‌ای حرکت‌کننده به سمت پایین نقطه‌ی اثر، درون خاک طوری منکسر می‌شوند که به صورت طولی درون بخش بالایی لایه‌ی خاک حرکت کرده و سرانجام به سطح زمین بر می‌گردند. *این تکنیک برای تخمین عمق لایه‌های سخت، مکان‌یابی چاه‌های فاضلاب و پیدا کردن عمق آب زیرزمینی به کار می‌رود.*



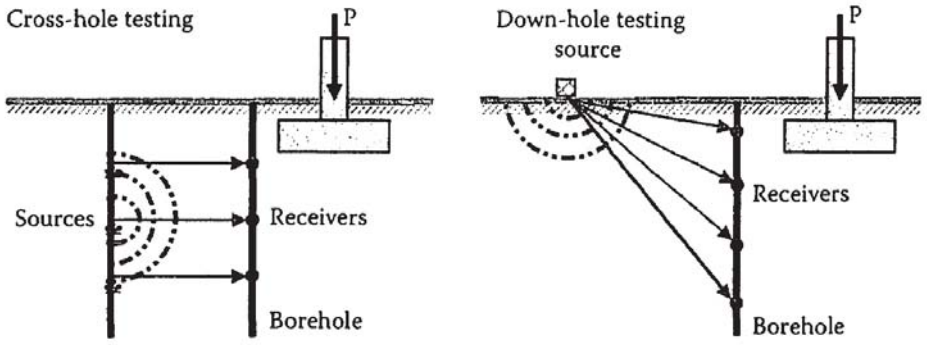
شکل ۱-۱۰هندسه‌ی مطالعات انکسار و انعکاس لرزه‌ای و داده‌های معمول آن



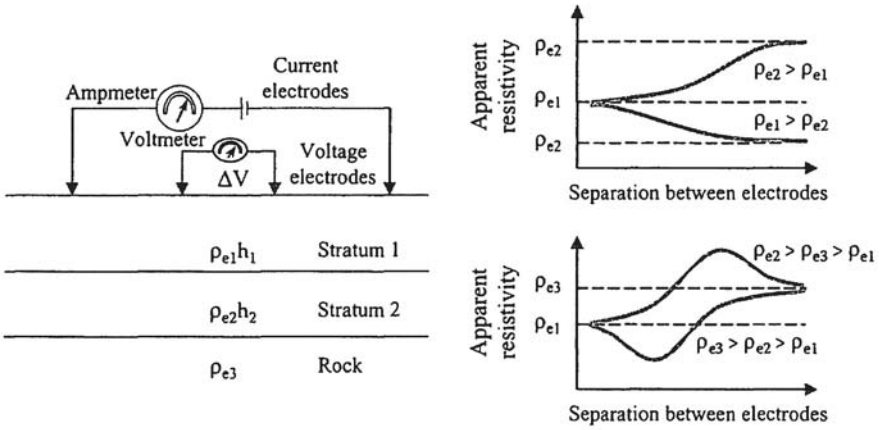
شکل ۱-۱۱ هندسه‌ی کلی مطالعات لرزه‌ای چاه‌به‌چاه و درون چاهی[1]

1. Down-hole investigation

مطالعات لرزه‌ای چاه‌به‌چاه و درون‌چاهی (شکل ۱-۱۱) از سرعت موج برشی برای محاسبه‌ی مدول برشی خاک در عمق مشخص استفاده می‌کنند. به طوری که برای مطالعات لرزه‌ای چاه‌به‌چاه دو چاه در فاصله‌ی مشخص از هم حفاری می‌شوند. یک منبع موج لرزه‌ای درون یکی از چاه‌ها قرار داده شده و درون چاه دیگر یک دستگاه گیرنده موج قائم نصب شده که امواج فرستاده شده را ثبت می‌نماید. برای مطالعات لرزه‌ای درون‌چاهی تنها یک چاه حفر می‌شود؛ به صورتی که گیرنده‌ی سرعت درون آن نصب شده و امواج لرزه‌ای از روی سطح زمین منتشر می‌شوند. روش مقاومت الکتریکی (شکل ۱-۱۲) با به کار بردن یک جریان الکتریکی، مقاومت در مقابل حرکت را در مسیر خاک تعیین می‌کند. انواع خاک‌ها با مقادیر مختلف تجمع یون‌های محلول در آب دارای مقاومت‌های الکتریکی مختلفی هستند. برای این هدف چهار الکترود در یک خط سیستم روی سطح قرار داده می‌شوند، یک جریان الکتریکی بین دو الکترود برقرار شده و افت ولتاژ بین دو الکترود دیگر ثبت می‌شود و این روند برای چیدمان‌ها و وضعیت‌های مختلف الکترودها تکرار می‌شود تا وجود و عمق لایه‌های مختلف خاک و عمق جدول آب زیرزمینی تعیین شود.



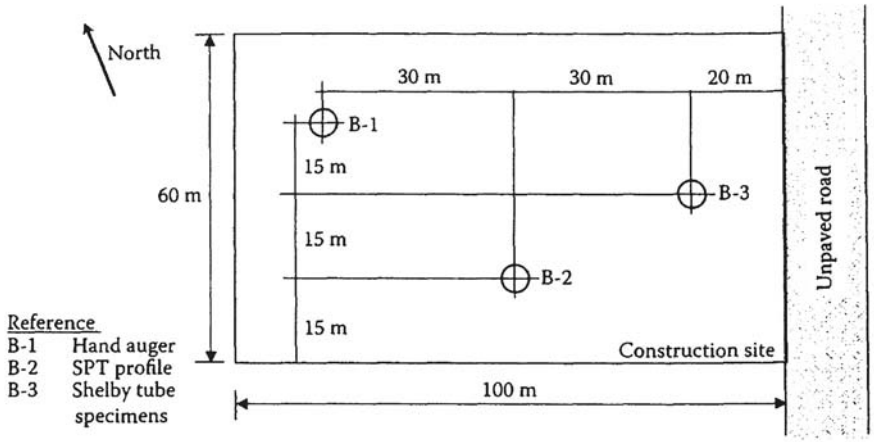
شکل ۱-۱۲ تجهیزات مربوط به مطالعات مقاومت الکتریکی چهار الکترودی و نتایج کلی به شکل تابعی از مقاومت ویژه‌ی لایه‌ها.



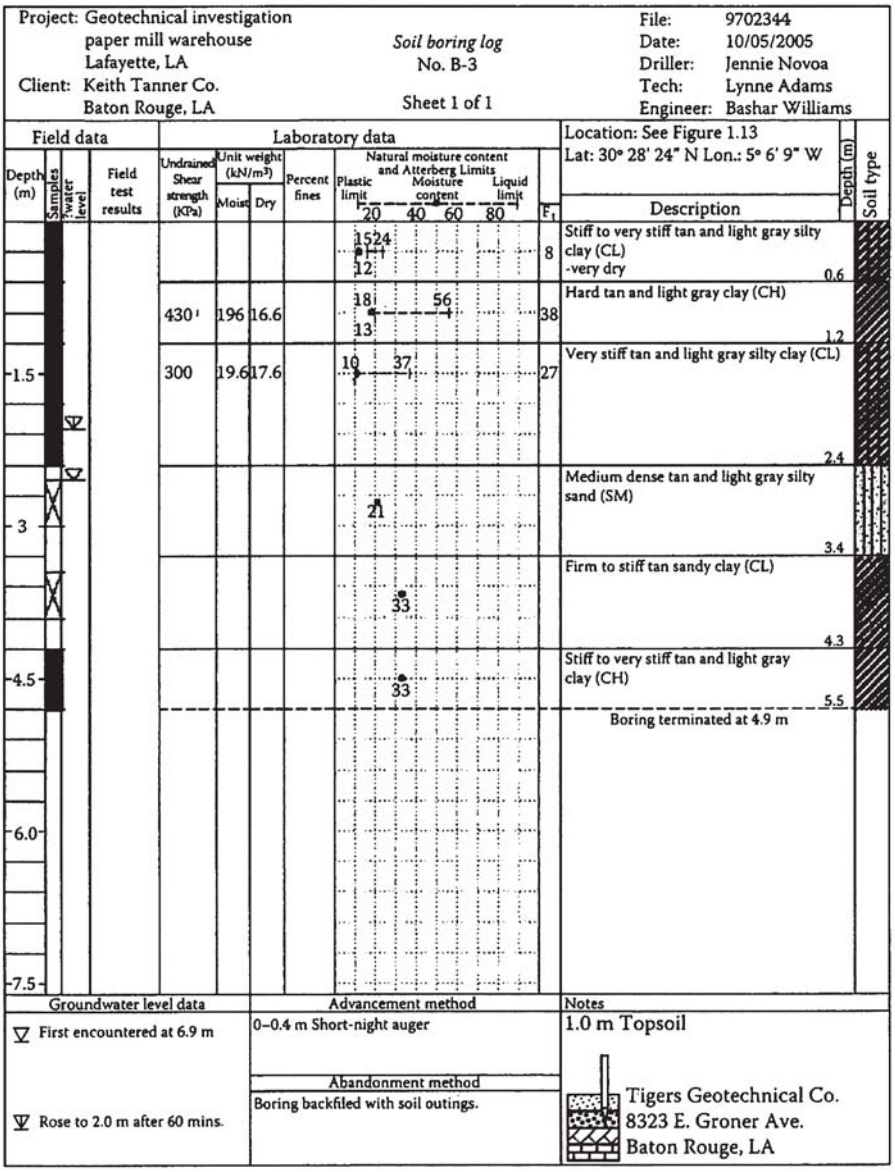
شکل ۱-۱۳ مثالی از طرح مهندسی نشان‌دهنده‌ی موقعیت چاه‌های شناسایی

۱-۲-۴- نتایج مطالعات شناسایی خاک

مهندسی ژئوتکنیک به ثبت و نگهداری سازمان یافته‌ی اطلاعات حاصل از مطالعات شناسایی خاک نیاز دارد. به همین دلیل تهیه و ترسیم یک نقشه یا طرح مهندسی برای تعیین موقعیت‌ها و وضعیت‌های شناسایی خاک به شکلی که تمام گودال‌ها، چاه‌ها و موقعیت آزمایش‌ها به طور مشخصی مکان‌یابی شوند، دارای اهمیتی بالائی می‌باشد. شکل ۱-۱۳ یک مثال کلی از طرح مهندسی برای تعیین موقعیت چاه‌های شناسایی خاک در یک سایت ساختمانی را نشان می‌دهد. اطلاعات به دست آمده از چاه‌های مختلف معمولا در پروفیل‌های خاک ارائه شده و در قالب جدول مرتب‌سازی می‌شوند. اطلاعات برای هر یک از لایه‌های خاک ارائه می‌شوند که شامل توصیف و طبقه‌بندی خاک (در صورت در دسترس بودن)، عمق جدول آب زیرزمینی، میزان آب درجا، حد روانی و خمیری، مقادیر ضربه‌ی SPT ، نتایج آزمایش SV و سایر مقادیر به دست آمده از آزمایشات آزمایشگاهی (نظیر زاویه‌ی اصطکاک، مقاومت فشاری محدود نشده، ضریب تحکیم، تنش پیش‌تحکیمی، شاخص فشار، شاخص تورم و...) می‌باشد. پروفیل خاک همچنین باید شامل اطلاعات مورد نیاز برای شناسایی کامل پروژه، کارفرما، شرکت آزمایش‌کننده‌ی خاک، موقعیت چاه‌ها، وسیله‌ی حفاری، زمان، آب و هوا، نوع پوشش‌ها، نمونه‌گیر، نوع چکش (SPT) و مواردی نظیر آنها باشد. شکل ۱-۱٤ نمونه‌ی یک پروفیل خاک را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۱۴ مثالی از پروفیل‌های معمول بررسی ژئوتکنیکی خاک


Project: Geotechnical investigation
paper mill warehouse
Lafayette, LA
Client: Keith Tanner Co.
Baton Rouge, LA
Soil boring log
No. B-3
Sheet 1 of 1
File: 9702344
Date: 10/05/2005
Driller: Jennie Novoa
Tech: Lynne Adams
Engineer: Bashar Williams
Field data
Laboratory data
Location: See Figure 1.13
Lat: 30° 28' 24" N Lon.: 5° 6' 9" W
Depth (m)
Samples
Water level
Field test results
Undrained Shear strength (KPa)
Unit weight (kN/m³)
Moist
Dry
Percent fines
Natural moisture content and Atterberg Limits
Plastic limit
Moisture content
Liquid limit
20 40 60 80
Description
Depth (m)
Soil type
Stiff to very stiff tan and light gray silty clay (CL)
-very dry
0.6
Hard tan and light gray clay (CH)
1.2
Very stiff tan and light gray silty clay (CL)
2.4
Medium dense tan and light gray silty sand (SM)
3.4
Firm to stiff tan sandy clay (CL)
4.3
Stiff to very stiff tan and light gray clay (CH)
5.5
Boring terminated at 4.9 m
Groundwater level data
First encountered at 6.9 m
Rose to 2.0 m after 60 mins.
Advancement method
0–0.4 m Short-night auger
Abandonment method
Boring backfiled with soil outings.
Notes
1.0 m Topsoil
Tigers Geotechnical Co.
8323 E. Groner Ave.
Baton Rouge, LA

Butler, D., Ed., *Near Surface Geophysics,* Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, *OK,* 2005.

Coduto, D.P., *Geotechnical Engineering: Principles and Practice,* Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.

Kulhawy, EH. and Mayne, P.W., *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design,* EL-6800 Research Project 1493-6, EPRI, Palo Alto, CA, 1990.

U.S. Army Corps of Engineers, Geophysical exploration for engineering and environmental investigations, Engineering Manual EM 1110-1-1802, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC, 1995.

U.s. Army Corps of Engineers, Soil Sampling, Engineering Manual EM 1110-1-1906, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC, 1996.

Zhang, Z. and Tumay, M.T., Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification, *ASCE Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,* 125, 3, 179-186, 1999.

فصل ۲

خواص فیزیکی

در این بخش به ارزیابی خصوصیات فیزیکی خاک‌ها شامل جرم، وزن، چگالی و وزن واحد توده‌ی خاک و فازهای اجزاء آن می‌پردازیم. سپس این خصوصیات را برای تعریف روابط وزنی و حجمی مورد استفاده قرار می‌دهیم. این پارامترها برای توصیف و تفسیر بیشتر آزمایشات ارائه شده در این کتاب و تعیین رفتار مهندسی خاک‌ها به کار گرفته می‌شوند.

برای اطلاعات بیشتر در رابطه با اصول روش استفاده شده در تعیین پارامترهای فیزیکی خاک می‌توانید به مراجع زیر مراجعه کنید:

استانداردهای انجمن آزمایش و مصالح آمریکا (ASTM) شامل موارد زیر:

D2216، روش‌های آزمایش استاندارد برای تعیین آزمایشگاهی محتوای جرمی آب در خاک و سنگ

D4253، روش آزمایش استاندارد در تعیین شاخص چگالی بیشینه و وزن واحد خاک‌ها با استفاده از میز لرزان

D4254، روش‌های آزمایش استاندارد برای شاخص چگالی کمینه و وزن واحد خاک‌ها و محاسبه‌ی چگالی نسبی

D4404، روش آزمایش استاندارد برای تعییین حجم فضاهای توخالی و توزیع تخلخل در خاک و سنگ با استفاده از تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه

D4531، روش آزمایش استاندارد برای تعیین چگالی حجمی خاک نباتی

D4643 روش آزمایش استاندارد برای تعیین میزان آب خاک با استفاده از روش اجاق مایکروویو

D4718، استاندارد اجرایی برای اصلاح وزن واحد و میزان آب برای خاک‌های شامل دانه‌های خیلی درشت

D4753، راهنمای استاندارد برای ارزیابی، انتخاب و تعیین ترازوها و جرم‌های استاندارد برای استفاده در آزمایشات خاک، سنگ و مصالح ساختمانی

D4944، روش آزمایش استاندارد برای تعیین درجای میزان آب (رطوبت خاک) توسط آزمایش فشار گاز کربید کلسیم

D4959، روش آزمایش استاندارد برای تعیین میزان رطوبت خاک از طریق گرمادهی مستقیم

D854، روش آزمایش استاندارد برای تعیین وزن مخصوص توده‌ی خاک با استفاده از چگالی‌سنج آبی

D5490، روش آزمایش استاندارد برای تعیین وزن مخصوص توده‌ی خاک با استفاده از چگالی‌سنج گازی

۲–۱ روابط وزنی و حجمی

۲–۱–۱ نمودار فاز (دیاگرام فازی)

خاک‌ها از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده‌اند. فاز جامد خاک را دانه‌های معدنی تشکیل می‌دهند. آب به عنوان فاز مایع و فاز گاز به شکل هوا فازهای دیگر تشکیل‌دهنده‌ی توده‌ی خاک هستند، هرچند سایر اجزاء نظیر مواد آلی، ناخالصی‌ها و گازها و مایعات هیدروکربنی نیز می‌توانند در ساختار خاک وجود داشته باشند. هر سه فاز باید برای ارزیابی روابط بین وزن و حجم و همچنین تعیین پارامترهای مشخصه‌ی مصالح در نظر گرفته شوند. این روابط و پارامترها برای ارزیابی خصوصیات مهندسی و محیطی خاک و نیز رفتار خاک‌ها دارای اهمیت هستند. برخی از این پارامترها عبارتند از:

جرم کل

$$M = M_W + M_S \qquad (۱-۲)$$

وزن کل

$$W = W_W + W_S = gM \qquad (۲-۲)$$

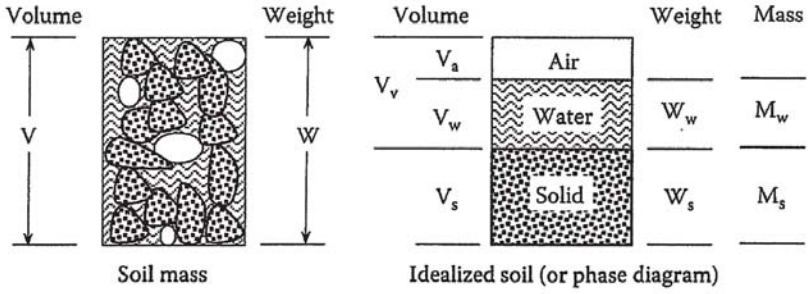
حجم کل

$$V = V_V + V_S = V_a + V_W + V_S \qquad (۳-۲)$$

حجم کل فضای خالی

$$V_V = V_a + V_W \qquad (۲-٤)$$

که در این روابط M، M_wو M_s به ترتیب برابر جرم خاک، آب و فازهای جامد هستند. W، W_w و W_s به ترتیب برابر وزن جرم خاک، آب و فازهای جامد هستند. V، V_s و V_w به ترتیب حجم توده‌ی خاک، منافذ خاک و بخش جامد خاک هستند. V_a و V_w نیز به ترتیب حجم هوا و حجم خاک هستند و g شتاب گرانش برابر ۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه است. توجه کنید که جرم و وزن هوا قابل صرف‌نظر کردن هستند (یعنی $W_a=0$, $M_a=0$). این روابط با مطالعه‌ی نمودار فاز در شکل ۲-۱ روشن می‌شوند.



شکل ۲-۱ نمودار فاز، فازهای مختلف در یک المان خاک می‌تواند به شکل ایده‌آل برای استخراج روابط وزنی و حجمی به سه فاز مجزا تقسیم شوند.

ترکیب مقادیر جرم و حجم امکان به دست آوردن نسبت‌های مهم مهندسی را فراهم می‌آورد. چگالی جرمی به صورت تقسیم جرم بر حجم و وزن واحد برابر نسبت وزن به حجم تعریف می‌شود. بنابراین به صورت کلی چگالی جرمی و وزن واحد از طریق رابطه‌ی زیر به هم مرتبط هستند:

$$\gamma = \frac{W}{V} = g\frac{M}{V} = g\rho \qquad (۲-۵)$$

برای فازهایی که به طور معمول در خاک‌ها وجود دارند وزن‌های مخصوص به شکلی که می‌آید تعریف می‌شوند:

وزن واحد دانه‌های جامد خاک

$$\gamma_S = \frac{W_S}{V_S} = g\frac{M_S}{V_S} \qquad (۶-۲)$$

وزن واحد آب

$$\gamma_W = \frac{W_W}{V_W} = g\frac{M_W}{V_W} \qquad (۷-۲)$$

وزن واحد توده ی خاک

$$\gamma = \frac{W}{V} = g\frac{M}{V} = g\frac{M_S + M_W}{V_S + V_W + V_a} \qquad (۸-۲)$$

دو رابطه‌ی حدی نیز وجود دارند. حالتی که تمام فضاهای خالی با هوا پر شوند (خاک خشک) و حالتی که فضاهای خالی با آب پر شوند (خاک اشباع شده). برای این دو مورد وزن واحد به شکل زیر تعریف می‌شود:

وزن واحد خاک خشک

$$\gamma_d = \frac{W_S}{V} = \frac{W_S}{V_S + V_a} \qquad (۹-۲)$$

وزن واحد خاک اشباع شده

$$\gamma_{Sat} = \frac{W_S + W_W}{V} = \frac{W_S + V_V.\gamma_W}{V_S + V_W} \qquad (۱۰-۲)$$

وزن واحد برای تعیین فشاری که توده‌ی خاک روی خود و سازه اعمال می‌کند دارای اهمیت است. ارزیابی وزن واحد خاک‌ها در تعیین تنش‌های قائم در جا ضروری هستند. به علاوه اندازه‌گیری وزن واحد برای کنترل کیفیت در ساخت خاک‌ریزها، پی‌ها، پایه‌ها و سایر سازه‌های خاکی نقش اساسی دارند (فصل ٤ را برای مطالعه‌ی بحث تراکم و ارزیابی وزن واحد در سایت (Site) مشاهده فرمائید.)

برخی از مهم‌ترین روابط موجود عبارتند از:

وزن مخصوص (G_s):

$$G_S = \frac{\gamma_S}{\gamma_W} = \frac{1}{\gamma_W}\frac{W_S}{V_S} \qquad (۱۱-۲)$$

نسبت پوکی

$$e = \frac{V_V}{V_S} \qquad (۱۲-۲)$$

نسبت تخلخل

$$n = \frac{V_V}{V} = \frac{e}{1+e} \qquad (۱۳-۲)$$

محتوای وزنی آب

$$w = \frac{W_W}{W_S}.100 = \frac{M_W}{M_S}.100[\%] \qquad (۱٤-۲)$$

درجه‌ی اشباع

$$S_r = \frac{V_W}{V_V}.100[\%] \qquad (۱۵-۲)$$

محتوای حجمی آب

$$\theta = \frac{V_W}{V}.100 = nS_r = w\frac{\gamma_d}{\gamma_w}[\%] \qquad (۱٦-۲)$$

چگالی نسبی (خاک‌های درشت‌دانه)

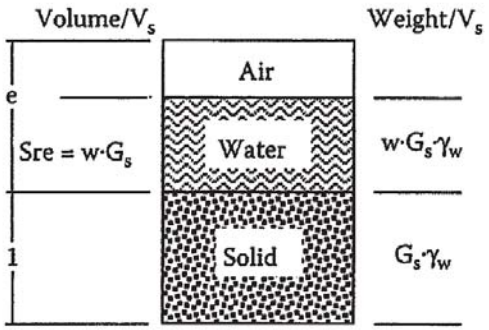
$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}.100[\%] \qquad (۱۷-۲)$$

که در آن e_{max} و e_{min} مقادیر بیشینه و کمینه‌ی پوکی تعریف شده توسط استاندارد D4253 ASTM (روش‌های آزمایش استاندارد برای تعیین بیشینه‌ی چگالی شاخص و وزن واحد خاک‌ها با استفاده از میز ارتعاش) و D4254 (روش آزمایش استاندارد برای کمینه شاخص چگالی و وزن واحد خاک‌ها و محاسبه‌ی چگالی نسبی) هستند.

پارامترهای معرفی شده در معادلات ۲-۶ تا ۲-۱۶ می‌توانند برای به دست آوردن سایر روابط با هم ترکیب شوند. (شکل ۲-۲ را به عنوان یک مثال ببینید.)

۲-۱-۱-۱- تلفیق کمیت‌های معمول خاک‌ها

اگرچه وزن مخصوص در بیشتر کانی‌های خاک در بازه‌ی کوچکی تغییر می‌کند (بیشتر مقادیر بین ۲,۶ و ۲,۸ قرار می‌گیرند. جدول ۲-۱ را ببینید)، وزن واحد در خاک‌ها بین ۱۲ کیلونیوتن بر مترمکعب برای نهشت‌های سست و ۲۰ کیلونیوتن بر مترمکعب (برای خاک‌ها متراکم) تغییر می‌کند. این موضوع را می‌توان به سادگی با توجه به تغییر در تخلخل خاک‌ها توضیح داد (جدول ۲-۲ رابببینید). همچنین یک رابطه‌ی برگشتی واضح بین تخلخل و اندازه‌ی دانه‌ها وجود دارد. (شکل ۲-۳ را ببینید) (باردر [1] ۱۹۹۷ و داس [2] ۲۰۰۲، سانتامارینا و همکارانش [3] و...).



شکل ۲-۲ فازهای وزن و حجم در نمودار فاز به صورت توابعی از میزان آب، وزن واحد آب و وزن مخصوص و نسبت پوکی

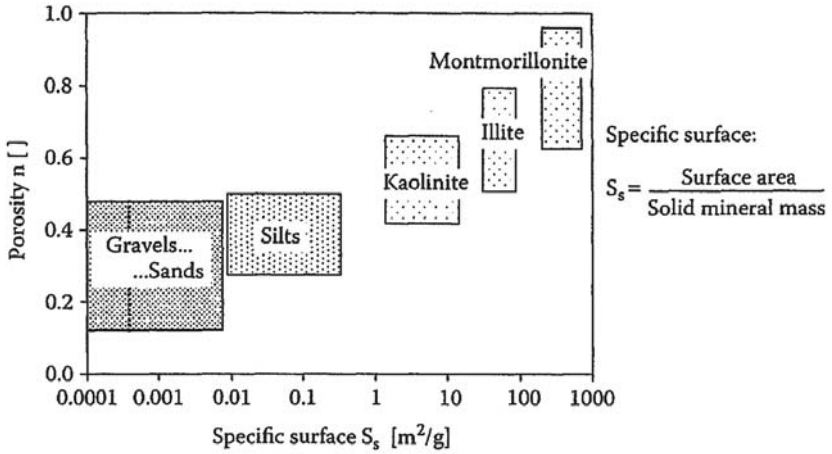
1. Bardet 1997
2. Das 2002
3. Santamarina et al. 2005

جدول ۲-۱ مقادیر وزن مخصوص (G_s) برای کانی‌های خاک‌های متداول

مواد معدنی	وزن مخصوص (G_s)
مونت موریلونیت	2.75-2.78
ایلیت	2.60-2.86
کائولینیت	2.62-2.66
کوارتز	2.65
فلداسپار	2.54-2.76
یخ	0.92
آب	1

جدول ۲-۲ محدوده‌ی وزن واحد، تخلخل و نسبت پوکی برای خاک‌های معمولی

خاک‌های متداول	وزن واحد خشک	وزن واحد اشباع	تخلخل	پوکی
رس‌ها	13-20	18-24	0.1-0.7	0.7-2.3
سیلت‌ها	13-19	18-22	0.3-0.5	0.4-1.0
ماسه‌ها	13-18	17-22	0.15-0.45	0.2-0.8
شن	14.0-21.0	18-23	0.15-0.45	0.2-0.8



شکل ۲-۳ رابطه‌ی بین تخلخل و سطح ویژه‌ی خاک. برای اندازه‌های کوچک‌تر خاک سطح مخصوص بزرگتر و تخلخل نیز بیشتر می‌باشد.(سانمارینا، رینالدی، فراتا، کلین و وانگ و چه، کاسکانته و بوتلر و تولسا)[1]

۲-۱-۲ -روش تغییرمکان آب برای ارزیابی وزن واحد خاک

ارزیابی وزن واحد نمونه‌های همگن خاک ساده است، زیرا حجم نمونه‌های منظم می‌تواند به سادگی محاسبه شود (برای جزئیات بیشتر به Head 2006 مراجعه فرمائید). اما به هر حال بسیاری از نمونه‌های خاک دست‌نخورده را نمی‌توان در قالب اشکال هندسی منظم در آورد، زیرا یا شکننده هستند یا ممکن است دارای توده‌هایی باشند که انسجام خاک به آنها وابسته است و هنگام شکل‌دهی باعث از شکل افتادن نمونه می‌شوند. برای این موارد روش تغییرمکان آب یک روش ساده را ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب برای ارزیابی وزن واحد خاک‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این بخش روش جایگذینی آب را برای تعیین وزن واحد خاک معرفی می‌شود.

هدف

تعیین وزن یک واحد توده‌ی خاک با شکل نامنظم

---

1. Santamarina, re., Rinaldi, V.A., Fratta, D., Klein, K.A., Wang, Y.-H., Cho, G.-e./ and Cascante, G., in *Near-Surface Geophysics,* D. Butler, Ed., Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, *OK, 2005*

نمونه

ـ نمونه‌ی خاک دست‌نخورده (نمونه‌های دست‌نخورده را می‌توان توسط نمونه‌گیر لوله‌ای یا گودال‌های آزمایش، ترانشه‌ها یا حفاری‌های در دسترس به دست آورد. برای اطلاعات بیشتر در رابطه با نمونه‌گیری به بخش ۱ و نیز به کتاب راهنمای راهنمای نمونه‌گیری خاک‌ها به نشریه‌ی انجمن مهندسی آمریکا (ASCE) ۱۹۹۶ مراجعه کنید.)

وسایل آزمایش

ـ ترازو با دقت ۰٫۰۱ گرم
ـ ریسمان برای اتصال نمونه‌ی خاک به کف ترازو
ـ پارافین
ـ صفحه‌ی داغ و کفه برای ذوب کردن پارافین
ـ برس رنگ برای تسهیل در به کارگیری پارافین پارافین در نمونه‌های خاک
ـ ظرف پر از آب

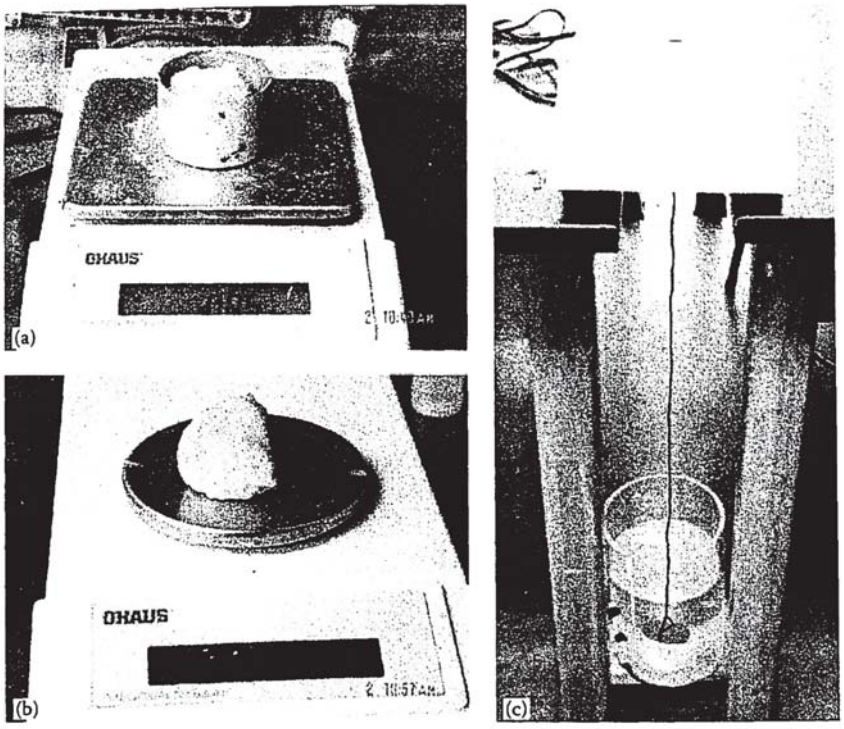
نمونه

نمونه باید از توده‌ای از خاک به دست آید که قادر به حفظ شکل خود باشد (برای مثال نمونه‌های خاک رسی و سیلتی اشباع نشده). وزن واحد خاک‌های ماسه‌ای تمیز نمی‌تواند با استفاده از این فرآیند به دست آید. (برای مطالعه‌ی اصول روش ارزیابی وزن واحد درجا برای انواع مختلف خاک‌ها به فصل ٤ مراجعه کنید.)

فرآیند

۱- نمونه‌ی خاک را در شکل و اندازه‌ی حجمی ساده در آورید.
۲- جرم نمونه‌ی خاک $M_{nemiceps}$ را به دست آورید. (شکل ۲-٤ الف)
۳- نمونه را با پارافین ذوب شده با استفاده از یک برس رنگ بپوشانید و مطمئن شوید که نمونه به طور کامل پوشانده شده است، طوری که این لایه کاملا نفوذناپذیر باشد. (مواظب باشید تا از تماس با پارافین اجتناب کنید زیرا ممکن است باعث سوختگی خای موضعی در پوست شما شود.)
٤- جرم نمونه‌ی خاک پوشانده شده را به دست آورید (جرم خاک و پارافین $M_{xaw+nemiceps}$، شکل ۲-٤).

۵- جرم مستغرق نمونه $M_{degrembus}$ را با قرار دادن یک ریسمان حلقه‌ای حول نمونه به دست آورید. نمونه را کاملاً در آب فرو برده و با اتصال ریسمان به پیچ در طرف دیگر ترازو مستغرق کنید (شکل ۲-٤ الف را ببینید). مطمئن شوید که توده‌ی خاک پوشانده شده با پارافین با کف آب تماس ندارد.



شکل ۲-۴ تعیین وزن واحد توده‌ی خاک: الف- وزن توده‌ی خاک (توده‌ی خاک درون قوطی قرار دارد.)، ب- وزن خاک پوشیده شده با پارافین، ج- تعیین وزن توده‌ی خاک پوشیده شده با پارافین در حالت مستغرق

محاسبات

حجم خاک به علاوه‌ی پارافین

$$V_{specimen+wax} = g\frac{M_{specimen+wax} - M_{submerged}}{\gamma_{water}} \qquad (۱۸-۲)$$

حجم پارافین

$$V_{wax} = g\frac{M_{specimen+wax} - M_{specimen}}{\gamma_{wax}} \qquad (۱۹-۲)$$

حجم خاک

$$V = V_{specimen+wax} - v_{wax}$$

به طوری که وزن واحد پارافین است و برابر ۹٫۸۱ کیلونیوتن بر مترمکعب وزن واحد آب می‌باشد.

وزن واحد خاک

$$\gamma = g\frac{M_{specimen}}{V} \qquad (۲۰-۲)$$

رابطه‌ی (۲-۲۰) وزن واحد توده را به شکل زیر می‌دهد:

$$\gamma = g\frac{M_S + M_W}{V} \qquad (۲۱-۲)$$

برای تعیین وزن واحد خشک اثر محتوای وزنی رطوبت باید از محاسبات وزن واحد خارج شود. سه روش مختلف برای تعیین محتوای وزنی آب در خاک‌ها در بخش بعدی آمده است.

سؤال

۲-۱- آیا این فرآیند می‌تواند برای هر شکلی از نمونه‌ی خاک انجام شود؟

۲-۱-۳- تعیین محتوای وزنی رطوبت با استفاده از خشک کردن در اجاق گرم‌کن

هدف

تعیین میزان آب نمونه‌ی خاک با استفاده از اجاق گرم کن (این فرآیند در استاندارد ASTM D2216، روش آزمایش استاندارد برای تعیین میزان آب (رطوبت) خاک‌ها با استفاده از گرمادهی مستقیم، شرح داده شده است.)

نمونه

نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده

وسایل

- ترازو با دقت ۰,۰۱ گرم برای جرم‌های تا حد ۲۰۰ گرم یا با دقت ۰,۱ گرم برای اجرام سنگین‌تر
- ظروف بخار: باید در مقابل خوردگی مقاوم باشند و یک توده‌ی پایدار را طی سیکل‌های پی در پی گرم کردن و سرد کردن در حضور خاک‌های با ترازهای PH متغیر داشته باشد. همچنین طی فرآیند تمیز کردن ظروف باید دارای درپوش‌های عایق رطوبت باشند. (تا امکان انتقال نمونه‌ها را به آزمایشگاه را فراهم کنند) و نیز باید به تعدادی باشند که امکان شناسایی دقیق نمونه‌های خاک را فراهم کنند.
- اجاق خشک کن (با حرارت درجه باشند) برای نمونه‌هایی که دارای سنگ گچ یا مواد معدنی آلی هستند حرارت ٦٠ درجه برای اجاق توصیه می‌شود.
- سایر وسایل: ماله و کمچه

فرآیند

۱- اندازه‌گیری و ثبت جرم ظرف بخار (M_e)

۲- قرار دادن نمونه در ظرف بخار و به دست آوردن جرم ظرف بخار و جرم خاک ($M_{ed+specimen}$)

۳- قرار دادن ظرف بخار و خاک درون اجاق خشک‌کن تا زمانی که مقدار جرم ظرف بخار و نمونه‌ی خاک به میزان ثابتی برسد. (معمولا نمونه‌ها در اجاق بین ۱۲ تا ١٦ ساعت باقی می‌مانند.)

٤- به دست آوردن جرم ظرف بخار و خاک خشک (M_{ed+d})

محاسبات

محتوای وزنی آب

$$w = \frac{M_W}{M_S}.100 = \frac{M_{ed+specimen} - M_{ed+d}}{M_{ed+d} - M_{ed}}.100[\%] \qquad (۲۲-۲)$$

محتوای وزنی آب به دست آمده از رابطه‌ی (۲-۲۲) می‌تواند برای کم کردن مشارکت آب از وزن واحد نمونه و به دست آوردن وزن واحد خشک به کار رود.

وزن واحد خشک

$$\gamma_d = \frac{M_S}{V} = \frac{\gamma}{1+\frac{w}{100}} \qquad (۲۳-۲)$$

محتوای وزنی آب و وزن واحد خشک می‌توانند برای به دست آوردن محتوای حجمی آب ترکیب شوند.

محتوای حجمی بخار

$$\theta = \frac{V_W}{V} = w\frac{\gamma_d}{\gamma_w} \qquad (۲۴-۲)$$

سؤالات

۲-۲ آیا می‌توانید رابطه‌ی ۲-۱۹ را از نمودار فاز به دست آورید.

۲-۳ در رابطه با منابع خطای احتمالی در تعیین وزن واحد و محتوای وزنی آب بحث کنید.

۲-٤ با استفاده از نمودار فاز تساوی نشان داده شده در رابطه‌ی (۲-٤) را اثبات کنید.

۲-۱-۴- روش‌های دیگر تعیین محتوای وزنی رطوبت

میزان رطوبت خاک‌ها یا سنگ‌ها را همیشه می‌توان با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مطرح شده در استاندارد ASTM D2216 (بخش ۲-۱۲) تعیین نمود. هر چند این روش نیاز به چندین ساعت خشک کردن مناسب نمونه‌ی خاک دارد. اگر نتایج در بازه‌ی زمانی کوتاه‌تری مورد نظر باشند، استانداردهای D4643 (روش آزمایش استاندارد برای تعیین محتوای آب خاک‌ها با استفاده از گرمادهی اجاق مایکروویو) و نیز استاندارد D4644 (روش آزمایش استاندارد برای تعیین درجای میزان آب خاک توسط آزمایش‌گر فشار گاز کربید کلسیم) می‌توانند به کار گرفته شوند.

این روش‌ها نباید با روش آزمایش D2216 جایگزین شوند. هرچند این آزمایش‌ها

می‌توانند برای به دست آوردن پاسخ‌های سریع و نیز زمانی که استفاده از اجاق عملی نیست به عنوان یک روش قابل اجرا استفاده شوند. اما به هر حال روش D2216 باید برای مقایسه و کنترل دقت و تصحیح به کار گرفته شود.

۲-۱-۴-۱- تعیین میزان رطوبت با استفاده از اجاق مایکروویو (استاندارد D4643)

نمونه

نمونه خاک می‌تواند به شکل دست‌خورده یا دست‌نخورده باشد.

وسایل و تجهیزات آزمایش:

- ترازو با دقت ۱۰,۰ گرم
- ظرف نمونه از جنس شیشه یا پروسلین (ایمن در مقابل اشعه‌ی مایکروویو) (ماده‌ای سرامیکی که از حرارت دادن رس به صورت کائولین در درجه حرارت ۱۴۰۰ درجه تولید شده و شبیه به ظرف چینی می‌باشد. مترجم)
- اجاق مایکروویو با قابلیت کنترل توان متغیر (و میزان ورودی حدود W007)
- گرماگیر[1]: یک ماده یا مایعی که در مایکروویو قرار داده می‌شود تا انرژی را بعد از اینکه رطوبت از نمونه‌ی آزمایش گرفته شد، جذب کند و از این طریق باعث کاهش دادن احتمال بیش‌گرمایش نمونه و خرابی اجاق شود.

فرآیند

۱- جرم ظرف بخار M_{de} را اندازه بگیرید.

۲- نمونه‌ی خاک را در ظرف بخار قرار داده و جرم آنها را با هم اندازه بگیرید. ($M_{nemiceps+de}$)

۳- ظرف بخار و خاک را در اجاق مایکروویو به همراه گرماگیر قرار دهید و اجاق را برای ۳ دقیقه روشن کنید.(سه دقیقه به عنوان تنظیم اولیه برای نمونه‌ی با جرم حداقل ۰۰۱ گرم می‌باشد.)

٤- بعد از سه دقیقه ظرف و نمونه را از اجاق خارج کنید و سپس اجاق مایکروویو را خاموش کرده و جرم نمونه را ثبت کنید.(M_{d+de})

1. Heat sink

۵- با یک ماله‌ی کوچک به دقت خاک را مخلوط کنید. (اجازه‌ی از دست رفتن هیچ ذره‌ی خاکی از نمونه را ندهید.)
٦- ظرف خاک را به داخل اجاق برگردانده و برای ۱ دقیقه حرارت دهید.
۷- مراحل ٤ تا ٦ را تا زمانی که تفاوت بین دو جرم متوالی به دست آمده دارای اثر کمی بر میزان رطوبت محاسباتی داشته باشد (تغییر ۰,۱ درصد یا کمتر قابل‌پذیرش است) تکرار کنید.
۸- از مقدار نهایی M_{d+de} برای محاسبه‌ی محتوای وزنی آب استفاده کنید.

محاسبات

محتوای وزنی آب

$$w = \frac{M_w}{M_s}.100 = \frac{M_{ed+specimen} - M_{ed+d}}{M_{ed+d} - M_{ed}}.100[\%] \qquad (۲۵-۲)$$

۲-۱-۴-۲- تعیین میزان رطوبت با استفاده از آزمایش فشار گاز کربید کلسیم (استاندارد D4644)

تجهیزات این آزمایش با نام تجاری "آزمایش‌گر رطوبت اسپیدی[1]" شناخته می‌شود و از بیشتر شرکت‌های تجهیزات آزمایشگاهی قابل تهیه است. در این آزمایش رطوبت در خاک با واکنش‌گر کربید کلسیم واکنش می‌دهد. طی این فرآیند گاز استالین آزاد می‌شود. در یک محفظه‌ی بسته گاز کربید کلسیم فشاری را تولید می‌کند که با یک حسگر فشار اندازه‌گیری می‌شود. میزان فشار وابسته به محتوای وزنی آب موجود در خاک است. این روند کاملا سریع است و می‌تواند در سایت برای برآورد میزان آب خاک‌ها به کار رود.

وسایل

ـ مجموعه‌ی آزمایش‌گر فشار کربید کلسیم: شامل محفظه‌ی فشار همراه با درجه (Guage) فشارسنج متصل به آن، مجموعه‌ی ترازوهای اندازه‌گیری برای آزمایش میزان آب نمونه‌هایی که دارای حداقل جرم ۲۰ گرم هستند. (برای جزئیات بیشتر از فرآیندهای کالیبراسیون به استاندارد D4944 مراجعه کنید.)
ـ واکنش‌گر کربید کلسیم: باید به شکل مناسبی خرد شود تا بتواند به آسانی با رطوبت

1. Speedy Moisture Tester

موجود نمونه‌ها ترکیب شود.
ـ پیمانه برای اندازه‌گیری توده‌ی واکنش‌گر کربید کلسیم.
ـ دو گلوله‌ی فولادی که توسط سازنده‌ی دستگاه تأمین می‌شود و برای شکستن توده‌های خاک و تسهیل واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شوند.
ـ برس و پارچه برای پاک کردن محفظه‌ی آزمایش.
ـ الک نمره‌ی ٤ استاندارد.
ـ ماسک بخار و پارچه‌های با پوشش‌های بزرگ، دستکش و چشم‌بند که برای جلوگیری از وارد آمدن اثرات نامطلوب روی چشم‌ها، سیستم تنفسی، دست‌ها بازوها ناشی از واکنش‌گر کربید کلسیم مورد نیاز هستند.

نمونه

نمونه‌های دست خورده یا دست‌نخورده با دانه‌های خاک کوچک‌تر از الک استاندارد نمره‌ی ٤

فرآیند

۱- محفظه‌ی فشار آزمایش را باز کنید و مقادیری از واکنش‌گر کربید کلسیم که توسط سازنده توصیه شده را درون آن قرار دهید. وسیله‌ای که برای آزمایش یک نمونه‌ی خاک ۲۰ گرمی استفاده شده است به ۲۲ گرم واکنش‌گر نیاز دارد. دو گلوله را داخل محفظه‌ی آزمایش قرار دهید.
۲- ترازوی آماده شده را استفاده کرده و جرم توصیه شده‌ی خاک را به دست آورید. (مرحله‌ی ۱ را ببینید). نمونه باید شامل دانه‌هایی کوچک‌تر از الک نمره‌ی ٤ باشد.
۳- خاک مورد آزمایش را روی درپوش[1] محفظه‌ی فشار آزمایش قرار دهید.
٤- محفظه‌ی فشار آزمایش را در حالت افقی قرار دهید و درپوش را به همراه نمونه‌ی خاک در محفظه‌ی آزمایش قرار دهید و گیره را برای آب‌بندی کردن درپوش محکم کنید.
۵- محفظه‌ی درپوش‌دار فشار آزمایش را به شکل قائم در آورید. در وضعیت قائم نمونه‌ی خاک درون محفظه‌ی فشار آزمایش قرار می‌گیرد. درپوش محفظه‌ی آزمایش را با دست باز، ضربه بزنید تا مطمئن شوید تمام مصالح در کف محفظه افتاده است.

1. cap

٦- با انرژی کافی دستگاه را با یک حرکت چرخشی بچرخانید طوری که گلوله‌های فولادی درون محفظه‌ی آزمایش بغلتند و باعث خرد شدن دانه‌های خاک و واکنش‌گر شوند. دستگاه را برای ماسه حداقل یک دقیقه بچرخانید. این زمان برای سیلت‌ها (لای‌ها) بیشتر است و برای رس‌ها در حد سه دقیقه می‌باشد. برای رس‌های با خاصیت خمیری زیاد بیش از سه دقیقه استفاده شود.

۷- روند پیشروی عقربه در صفحه‌ی مدرج فشارسنج را کنترل کنید. اجازه دهید تا زمان کافی برای خارج شدن حرارت از واکنش‌گر شیمیایی وجود داشته باشد.

۸- بعد از این‌که عقربه‌ی صفحه‌ی مدرج از حرکت باز ایستاد، با نگاه داشتن دستگاه در وضعیت افقی درجه را بخوانید. (اگر صفحه‌ی مدرج برای قرائت عدد محدود شود، فرآیند باید با یک نمونه‌ی جدید که دارای نصف جرم نمونه‌ی قبلی است جایگزین شود.)

۹- مقدار فشار نهایی را با استفاده از منحنی‌های کالیبراسیون مناسب برای تعیین محتوای آب اصلاح شده بر حسب درصد جرم خشک خاک و رکورد ثبت شده، قرائت و یادداشت کنید. دستگاه اسپیدی همراه با یک گیج اندازه‌گیر است که به طور مستقیم میزان آب را اندازه می‌گیرد.

۰۱- جهت درپوش را به دور از اپراتور قرار دهید. فشار گاز را از طریق بازکردن آهسته‌ی درپوش تخلیه کنید. محفظه را خالی نمائید. خاک را برای وجود کلوخه‌ها امتحان کنید. اگر نمونه کاملا خرد نشده باشد، آزمایش باید تکرار شود.

۱۱- محفظه و درپوش را با یک پارچه یا برس تمیز کنید و بگذارید تا قبل از آزمایش بعدی سرد شود.

۲۱- نمونه را در مکان دیگری کنار بگذارید به طوری که با آب تماس نداشته باشد زیرا ممکن است گازهای منفجره تولید کند.

۲-۱-۵- وزن مخصوص

وزن مخصوص (معادله‌ی ۲-۱۱) برابر نسبت متوسط وزن واحد مصالح جامد به وزن واحد آب در دمای ۲۰ درجه می‌باشد. این پارامتر در تعیین نسبت‌های پوکی و تخلخل در خاک‌ها و نیز ارزیابی نتایج آزمایشات هیدرومتری و تراکم در خاک‌ها کاربرد دارد (فصل‌های ۳ و ٤ را ملاحظه کنید).

هدف

تعیین وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک. (فرآیند تعیین وزن واحد خاک در استاندارد D854 (روش آزمایش استاندارد برای تعیین وزن مخصوص خاک‌ها به وسیله‌ی چگالی‌سنج آبی) آمده است.

نمونه

ـ نمونه‌ی خاک بیش خشک شده

تجهیزات آزمایش

ـ پینومتر(چگالی سنج)[1]

ـ فلاسک‌های مدرج با حجم ۲۵۰ یا ۵۰۰ میلی‌لیتر. حجم خاک مورد آزمایش باید حداقل ۲ تا ۳ برابر کمتر از حجم فلاسک باشد.

ـ ترازو: باید به ترتیب دارای حداقل ظرفیت ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم برای فلاسک‌های ۲۵۰ یا ۵۰۰ میلی‌متری باشد. (ترازو باید دارای دقت حداقل ۰٫۰۱ گرم باشد.)

ـ ظروف بخار

ـ اجاق خشک کن (با دمای تنظیم درجه سانتیگراد)

ـ پمپ خلأ: برای خالی کردن هوای به دام افتاده در نمونه‌ی خاک مستغرق شده

ـ به طور جایگزین می‌توان از صفحه‌ی داغ برای جوشاندن مخلوط آب وخاک استفاده کرد و هوای به دام افتاده را آزاد کرد.

ـ آب مقطر هواگیری شده

ـ دماسنج مدرج با گام‌های ۰٫۱ سانتی گرادی

ـ سایر ابزار: نگهدارنده‌ها[2] و قیف

فرآیند آزمایش

کالیبراسیون فلاسک

۱- جرم فلاسک مدرج خشک و تمیز (M_p) را با تقریب 1/400 گرم تعیین کنید. این

1. pycnometer
2. stopper

اندازه‌گیری را ۵ بار تکرار کنید. متوسط و انحراف استاندارد را محاسبه کنید. انحراف استاندارد باید کمتر یا مساوی ۰٫۰۲ گرم باشد. اگر انحراف استاندارد بزرگ‌تر از ۰٫۰۲ باشد باید تعداد اندازه‌گیری‌ها را افزایش دهیم و یک توازن دقیق‌تر و پایدارتری را به دست آوریم.

۲- تقریبا سه چهارم فلاسک را با آب مقطر پر کنید.

۳- آب را با اعمال خلأ از هوا خالی کنید(شما باید حباب‌هایی که از آب خارج می‌شوند را ملاحظه کنید، شکل ۲-۵ الف را ببینید). (نکته: گرم کردن دستی فلاسک باعث افزایش سرعت فرآیند هواگیری می‌شود.)

٤- فلاسک را با آب خالی از هوا تا حجم مشخصی پر کنید و جرم آن را (M_{p+w}) به دست بیاورید.

۵- حرارت آب را (T_w) به دست آورید. این حرارت باید منطبق با حرارت آب در طول آزمایش باشد.

٦- حجم فلاسک مدرج را حساب کنید.

$$V_p = \frac{M_{p+w} - M_p}{\rho_{W@T_W}} \qquad (۲٦-۲)$$

۷- به طوری که $\rho_{W@T_W}$ چگالی آب در دمای کالیبراسیون T_w است.(برای مشاهده ی جدول چگالی مقابل حرارت به استاندارد D854 یا به شکل ۳-۱۱ در این کتاب مراجعه فرمائید).

۸- این فرآیند را برای به دست آوردن ۵ اندازه گیری مستقل برای هر یک از فلاسک های مدرج تکرار کنید. مقدار متوسط و انحراف استاندارد ۵ حجم تعیین شده را حساب کنید. انحراف استاندارد باید برابر یا کمتر از ۰٫۰۵ میلی لیتر باشد.(تا دو رقم اعشار گرد فرمائید.)

تعیین وزن مخصوص (روش B در استاندارد D854)

۱- M_s را اندازه‌گیری و ثبت کنید. و تقریبا ۳۰ گرم از خاک بیش خشک شده را با استفاده از یک قیف داخل فلاسک مدرج قرار دهید.

۲- آن را با آب هواگیری شده پر کنید تا جایی که تراز آب تا نصف عمق فلاسک شود. مطمئن شوید که تمام خاک از گردنه‌ی فلاسک مدرج شسته شده است.

۳- آب را تا وقتی که دوغاب شکل گیرد تکان دهید. وقتی به جای دوغاب، ماده‌ی خمیری شکل می‌گیرد باید از فلاسک با حجم بیشتری استفاده کرد تا مخلوط رقیق‌تری از خاک و آب به دست آید.

٤- با اعمال خلأ تمام هوا را از مخلوط خارج کنید (این کار حدود ۲ ساعت به طول می‌انجامد، شکل ۲-۵ (ب)). همچنین می‌توانید به جای آن فلاسک را روی یک صفحه‌ی داغ قرار دهید تا آب بجوشد. مخلوط خاک و آب باید برای دو ساعت بجوشد.

۵- فلاسک را تا حجم مشخص شده با آب هواگیری شده پر کنید و جرم آن را به دست آورید.(M_{p+w+s})

٦- حرارت مخلوط خاک و آب را اندازه بگیرید (T_{w+s}). حرارت اندازه‌گیری شده باید برابر حرارت T_w اندازه‌گیری شده طی کالیبراسیون فلاسک مدرج باشد.

۷- جرم یک ظرف بخار را (M_{ed}) را به دست آورید.

۸- خاک را از فلاسک خارج کرده و آن را داخل ظرف تبخیر قرار دهید.

۹- اجازه دهید تا خاک برای ۲٤ ساعت خشک شود.

۱۰- جرم ظرف بخار و خاک خشک (M_{ed+d}) را به دست آورید.

محاسبات

وزن مخصوص

$$G_S = \frac{M_{ed+d} - M_{ed}}{M_{ed+d} - M_{ed} + M_{p+w} - M_{p+w+s}} \qquad (۲۷-۲)$$

$$= \frac{M_S}{M_S + M_{p+w} - M_{p+w+s}}$$

به طوری که جرم خاک برابر است با: $M_s=M_{ed+d}-M_{ed}$

سؤالات

۲-۵ آیا می‌توانید رابطه‌ی ۲-۲۷ را به دست آورید.

۲-٦ اگر هوا در داخل فلاسک مدرج باقی بماند، وزن مخصوص اندازه‌گیری شده از مقدار واقعی بزرگ‌تر می‌شود یا کوچک‌تر؟

۲-۷ در رابطه با منابع خطای ممکن در تعیین وزن مخصوص بحث کنید.

۲-۱-۶- نمونه‌ی محاسبات

محاسبه‌ی وزن واحد

جدول ۲-۳ داده‌های مربوط به محاسبات وزن واحد

$M_{submerged}$ (kg)	$M_{specimen+wax}$ (kg)	$M_{specimen}$ (kg)	γ_{wax} (m^3/Nk)
0.0709	0.1900	0.1720	8.93

حجم خاک به علاوه‌ی پارافین

$$V_{specimen+wax} = g\frac{M_{specimen+wax} - M_{submerged}}{\gamma_w}$$

$$= 9.81\frac{m}{s^2}\frac{0.1900kg - 0.0709kg}{9.81.10^3\frac{N}{m^3}} = 1.191.10^{-4}m^3$$

حجم پارافین

$$V_{wax} = g\frac{M_{specimen+wax} - M_{specimen}}{\gamma_{wax}}$$

$$= 9.81\frac{m}{s^2}\frac{0.1900kg - 0.1720kg}{8.93.10^3.\frac{N}{m^3}} = 1.98.10^{-5}m^3$$

حجم خاک

$$V = V_{specimen+wax} - V_{wax}$$

$$= 1.191.10^{-4}m^3 - 0.198.10^{-4}m^3 = 0.993.10^{-4}m^3$$

وزن واحد

$$\gamma = g\frac{M_{specimen}}{V}$$
$$= 9.81\frac{m}{s^2}\frac{0.1720kg}{0.993.10^{-4}m^3} = 16.99\frac{N}{m^3}$$

محاسبه‌ی میزان رطوبت

جدول ۲-٤ داده‌های محاسبات میزان رطوبت

W (٪)	M_{ed+dry} (g)	$M_{ed+soil}$ (g)	M_{ed} (g)
31.4	87.81	105.45	31.64

محتوای وزنی آب

$$\omega = \frac{M_{ed+specimen} + M_{ed+d}}{M_{ed+d} + M_{ed}}.100[\%]$$
$$= \frac{105.45g - 87.81g}{87.81g - 31.64g}.100 = 31.4\%$$

وزن واحد خشک

$$\gamma_d = \frac{M_s}{V} = \frac{\gamma}{1+\frac{w}{100}}$$
$$= \frac{16.99kN/m^3}{1+\frac{31.4\%}{100}} = 12.93\frac{kN}{m^3}$$

محاسبه‌ی محتوای حجمی آب

محتوای حجمی آب

$$\theta = w\frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

$$= 31.4\%\frac{12.93\frac{kN}{m^3}}{9.81\frac{kN}{m^3}} = 41.4\%$$

محاسبه ی وزن مخصوص

جدول ۲-۵ داده‌های محاسبات وزن مخصوص

G_s	M_{ed+d} (g)	M_{ed} (g)	M_{p+w+s} (g)	M_{p+w} (g)
۲.٦٤	٤١٦.٢	۳۸۷.۲	۳۸۷.۱	۳٦۹.۱

وزن مخصوص

$$G_s = \frac{M_{ed+d} - M_{ed}}{M_{ed+d} - M_{ed} + M_{p+w} - M_{p+w+s}}$$

$$= \frac{416.2g - 387.2g}{416.2g - 387.2g + 369.1g - 387.1} = 2.64$$

برگه داده‌ها برای روابط وزنی ـ حجمی آزمایشگاه مهندسی ژئوتکنیک

Unit Weight	
جرم نمونه خاک	$M_{specimen}=$ kg
جرم نمونه خاک و واکس جرم مستغرق شده	$M_{pecimen+wax}=$ kg
وزن واحد	$M_{ubmerged}=$ kg
میزان رطوبت	$\gamma = kN/m^3$
Moisture Content	
جرم ظرف بخار	$M_{ed}=$ kg
جرم ظرف بخار و خاک	$M_{d+specimen}=$ kg
جرم ظرف بخار و خاک خشک شده با بخار	$M_{ed+d}=$ kg
میزان رطوبت وزن مخصوص	=w ٪
Specific Gravity	
جرم فلاکس و آب هواگیری شده	$M_{p+w}=$ kg
جرم فلاسک، آب و خاک جرم ظرف بخار	$M_{p+w+s}=$ kg
جرم ظرف بخار و خاک خشک شده در اجاق	$M_{ed}=$ kg
دمای آب هواگیری شده	$M_{ed+d}=$ kg
دمای آب و خاک وزن مخصوص	$M_{d}=$ kg

Bardet, J.P., *Experimental Soil Mechanics,* Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997. Das, B.M., *Soils Mechanics: Laboratory Manual,* 6th ed., Oxford University Press, Oxford, 2002.

Fredlund, DJ. and Rahardjo, H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils,* John Wiley & Sons, New York, 1993.

Head, K.H., *Manual of Soil Laboratory Testing. Volume* 1: *Soil Classification and Compaction Tests,* 3rd ed., CRC Press, 2006.

Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., *An Introduction to Geotechnical Engineering,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.

Lambe, T.W. and Whitman, R.V, *Soil Mechanics,* John Wiley & Sons, New York, 1969.

Mitchell, J.K., *Fundamentals of Soil Behavior,* John Wiley & Sons, New York, 1993.

Santamarina, J.c., Rinaldi, VA., Fratta, D., Klein, K.A., Wang, Y.-H., Cho, G.-c., and Cascante, G., A Survey of Elastic and Electromagnetic Properties of NearSurface Soils, in *Near-Surface Geophysics,* D. Butler, Ed., Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2005.

U.s. Army Corps of Engineers, Soil Sampling, Engineering Manual EM 1110-1-1906, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC, 1996.