



دانشگاه گیلان  
۱۳۵۲\_۱۹۷۴

# آزمایشگاه مکانیک خاک

تألیف:

دکتر مقداد پایان

استادیار دانشکده فنی دانشگاه گیلان

مژده مشقق نیاتوچانی

کارشناس ارشد عمران گرایش ژئوتکنیک

مهندی سلیمانی

کارشناس ارشد عمران گرایش ژئوتکنیک

چاپ اول

مرکز نشر دانشگاه گیلان

آزمایشگاه مکانیک خاک



# Soil Mechanics Laboratory

By:

Meghdad Payan, Ph. D

Mozhdeh Moshfeghnia Tochae, M. Sc

Mahdi Salimi, M. Sc

University of Guilan Press



دکتر مقداد پایان، مژده مشقق نیاتوچانی، مهندی سلیمانی

کتاب پیش رو یک راهنمای جامع آزمایشات آزمایشگاهی مرسوم در مهندسی ژئوتکنیک است که حاصل تجربه بیش از ۱۵ سال مطالعه، پژوهش و تدریس در داخل و خارج از کشور می باشد. این کتاب شامل تشریح کامل روش انجام آزمایشات اصلی مکانیک خاک است که علاوه بر مشخصات اولیه خاک، ویژگی های مختلف مصالح خاکی از جمله مشخصات تراکمی، تورمی، فیزیکی، مکانیکی و نفوذ پذیری را به تفصیل پوشش می دهد. هر فصل کتاب، شامل مراحل گام به گام انجام آزمایشات به همراه تصاویر بصری دقیق و یک نمونه محاسبات واقعی است. امید است این تلاش ها پاسخگوی بسیاری از نیازهای جامعه علمی به ویژه مهندسین می باشد.



9 786001530555

ISBN: 978-600-153-055-5



## آزمایشگاه مکانیک خاک

تألیف:

دکتر مقداد پایان

استادیار دانشکده فنی دانشگاه گیلان

مژده مشق نیاتوچائی

کارشناس ارشد عمران گرایش ژئوتکنیک

مهدى سليمى

کارشناس ارشد عمران گرایش ژئوتکنیک

مرکز نشر دانشگاه گیلان

۱۴۰۲



۱۳۵۳-۱۹۷۴

شابک: ۵ - ۰۵۵ - ۱۵۳ - ۶۰۰ - ۹۷۸

عنوان و نام پدیدآور	: آزمایشگاه مکانیک خاک-تالیف مقداد پایان، مژده مشقق نیاتوجاتی، مهدی سلیمی؛ ویراستار علمی ایمان حسینپوربابایی؛ ویراستار ادبی بهاره هوشیار.
مشخصات نشر	: رشت: دانشگاه گیلان، انتشارات، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری	: صفحه: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۵۳-۰۵۵-۹
و ضمیمه فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: کتابنامه: ص ۴۰۵ - ۴۰۶.
موضوع	: خاک -- مکانیک
Soil mechanics	
شناسه افزوده	: مشقق نیاتوجاتی، مژده، ۱۳۷۵-
شناسه افزوده	: دریابیگی سلیمی، مهدی، ۱۳۶۶-
شناسه افزوده	: حسینپور بابایی، ایمان، ۱۳۶۲، ویراستار
شناسه افزوده	: دانشگاه گیلان. انتشارات
TA۷۱۰ :	رده بندی کنگره
۶۲۴/۱۵۱۳۶ :	رده بندی دیوبی
شماره کتابشناسی ملی :	۹۴۳۹۲۰۱

## مرکز نشر دانشگاه گیلان

عنوان کتاب	: آزمایشگاه مکانیک خاک
مؤلفان	: دکتر مقداد پایان، مژده مشقق نیا، مهدی سلیمی
ویراستار	: دکتر ایمان حسینپوربابایی
علمی	
ویراستار ادبی	: بهاره هوشیار
نوبت چاپ	: اول، ۱۴۰۲
ناشر	: مرکز نشردانشگاه گیلان
شماره گان	: ۱۰۰۰ جلد

\* هر گونه چاپ و تکثیر صرفاً در اختیار مرکز نشر دانشگاه گیلان است.

## فهرست مطالب

عنوان	
صفحه	
ج	پیشگفتار.....
	<b>فصل اول: شناسایی چشمی خاک‌ها</b>
۲	۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش.....
۱۴	۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....
۱۵	۱-۳) روش انجام آزمایش .....
۲۴	۱-۴) نمونه‌ای از شناسایی چشمی خاک‌ها .....
۲۷	۱-۵) نکات کلی .....
	<b>فصل دوم: آزمایش تعیین درصد رطوبت</b>
۳۰	۲-۱) مقدمه و تئوری آزمایش.....
۳۰	۲-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....
۳۲	۲-۳) روش انجام آزمایش .....
۳۲	۲-۴) محاسبات.....
۳۳	۲-۵) نکات کلی .....
	<b>فصل سوم: آزمایش تعیین چگالی ویژه (وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک)</b>
۳۶	۳-۱) مقدمه و تئوری آزمایش.....
۳۶	۳-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....
۳۹	۳-۳) روش انجام آزمایش .....
۴۶	۳-۴) محاسبات.....
۴۷	۳-۵) نکات کلی .....
	<b>فصل چهارم: آزمایش دانه‌بندی خاک به روش‌های الک و هیدرومتری</b>
۵۰	۴-۱) بخش اول: آزمایش دانه‌بندی خاک به روش الک .....
۵۰	۴-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش .....
۵۱	۴-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش .....
۵۲	۴-۱-۳) روش انجام آزمایش .....
۵۵	۴-۱-۴) محاسبات.....
۵۷	۴-۱-۵) نکات کلی .....
۵۹	۴-۲) بخش دوم: آزمایش دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتری .....
۵۹	۴-۲-۱) مقدمه و تئوری آزمایش .....
۶۳	۴-۲-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش .....
۶۷	۴-۲-۳) روش انجام آزمایش .....
۷۶	۴-۲-۴) محاسبات.....
۷۹	۴-۲-۵) نکات کلی .....

## فصل پنجم: آزمایش تعیین حدود اتربرگ

۱-۱) بخش اول: آزمایش تعیین حد روانی.....	۸۲
۱-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش.....	۸۲
۱-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۸۳
۱-۱-۳) روش انجام آزمایش.....	۸۵
۱-۱-۴) محاسبات.....	۸۹
۱-۱-۵) نکات کلی .....	۹۰
۲-۱) بخش دوم: آزمایش تعیین حد خمیری .....	۹۲
۲-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش.....	۹۲
۲-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۹۲
۲-۱-۳) روش انجام آزمایش.....	۹۲
۲-۱-۴) محاسبات.....	۹۵
۲-۱-۵) نکات کلی .....	۹۵
۳-۱) بخش سوم: آزمایش تعیین حد انقباض .....	۹۷
۳-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش.....	۹۷
۳-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۹۷
۳-۱-۳) روش انجام آزمایش.....	۹۸
۳-۱-۴) محاسبات.....	۱۰۱
۳-۱-۵) نکات کلی .....	۱۰۳

## فصل ششم: طبقه‌بندی مهندسی خاک‌ها

۱-۱) مقدمه و تئوری .....	۱۰۶
۱-۲) محاسبات .....	۱۰۷
۱-۳) نکات کلی .....	۱۱۳

## فصل هفتم: آزمایش همارز ماسه

۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش.....	۱۱۶
۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۱۱۶
۱-۳) روش انجام آزمایش .....	۱۲۱
۱-۴) محاسبات .....	۱۳۸
۱-۵) نکات کلی .....	۱۴۰

## فصل هشتم: آزمایش تهنشینی

۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش .....	۱۴۲
۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۱۴۴
۱-۳) روش انجام آزمایش .....	۱۴۵

۱۴۷	..... ۴-۸) محاسبات
۱۵۰	..... ۵-۸) نکات کلی
<b>فصل نهم: آزمایش تعیین نفوذ پذیری خاک‌های درشت‌دانه و ریز‌دانه</b>	
۱۵۲	..... ۱-۹) بخش اول: آزمایش نفوذپذیری با هد(انرژی) ثابت
۱۵۲	..... ۱-۱-۹) مقدمه و تئوری آزمایش
۱۵۳	..... ۲-۱-۹) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۱۵۴	..... ۳-۱-۹) روش انجام آزمایش
۱۵۵	..... ۴-۱-۹) محاسبات
۱۵۷	..... ۵-۱-۹) نکات کلی
۱۵۸	..... ۲-۹) بخش دوم: آزمایش نفوذپذیری با هد (انرژی) افتان (متغیر)
۱۵۸	..... ۱-۲-۹) مقدمه و تئوری آزمایش
۱۵۸	..... ۲-۲-۹) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۱۶۰	..... ۳-۲-۹) روش انجام آزمایش
۱۶۰	..... ۴-۲-۹) محاسبات
۱۶۱	..... ۵-۲-۹) نکات کلی
<b>فصل دهم: آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد و اصلاح شده</b>	
۱۶۴	..... ۱-۱۰) بخش اول: آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد
۱۶۴	..... ۱-۱-۱۰) مقدمه و تئوری آزمایش
۱۶۷	..... ۲-۱-۱۰) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۱۷۰	..... ۳-۱-۱۰) روش انجام آزمایش
۱۷۳	..... ۴-۱-۱۰) محاسبات
۱۷۶	..... ۵-۱-۱۰) نکات کلی
۱۷۸	..... ۲-۱۰) بخش دوم: آزمایش تراکم (پروکتور) اصلاح شده
۱۷۸	..... ۱-۲-۱۰) مقدمه و تئوری آزمایش
۱۷۸	..... ۲-۲-۱۰) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۱۷۸	..... ۳-۲-۱۰) روش انجام آزمایش
۱۷۸	..... ۴-۲-۱۰) محاسبات
۱۷۹	..... ۵-۲-۱۰) نکات کلی
<b>فصل یازدهم: آزمایش تعیین دانسیته نسبی خاک‌های دانه‌ای (وزن مخصوص خشک و نسبت تخلخل ماکسیمم و مینیمم)</b>	
۱۸۲	..... ۱-۱۱) مقدمه و تئوری آزمایش
۱۸۲	..... ۲-۱۱) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۱۸۴	..... ۳-۱۱) روش انجام آزمایش
۱۹۱	..... ۴-۱۱) محاسبات

۱۹۲	.....	(۵) نکات کلی
<b>فصل دوازدهم: آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل</b>		
۱۹۴	.....	۱-۱) بخش اول: آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل (مخروط ماسه)
۱۹۴	.....	۱-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش
۱۹۴	.....	۱-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۱۹۶	.....	۱-۱-۳) روش انجام آزمایش
۲۰۵	.....	۱-۱-۴) محاسبات
۲۰۶	.....	۱-۱-۵) نکات کلی
۲۰۸	.....	۲-۱) بخش دوم: آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل (دانسیته هسته‌ای)
۲۰۸	.....	۲-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش
۲۰۹	.....	۲-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۲۱۲	.....	۲-۱-۳) روش انجام آزمایش
۲۱۶	.....	۲-۱-۴) محاسبات
۲۱۶	.....	۲-۱-۵) نکات کلی
<b>فصل سیزدهم: آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا</b>		
۲۱۸	.....	۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش
۲۲۰	.....	۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۲۲۷	.....	۱-۳) روش انجام آزمایش
۲۳۵	.....	۱-۴) محاسبات
۲۳۷	.....	۱-۵) نکات کلی
<b>فصل چهاردهم: آزمایش تحکیم</b>		
۲۴۰	.....	۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش
۲۶۱	.....	۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۲۶۸	.....	۱-۳) روش انجام آزمایش
۲۸۱	.....	۱-۴) محاسبات
۲۸۹	.....	۱-۵) نکات کلی
<b>فصل پانزدهم: آزمایش تورم و فشار تورم</b>		
۲۹۲	.....	۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش
۲۹۲	.....	۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش
۲۹۶	.....	۱-۳) روش انجام آزمایش
۲۹۹	.....	۱-۴) محاسبات
۳۰۲	.....	۱-۵) نکات کلی
<b>فصل شانزدهم: آزمایش برش مستقیم</b>		
۳۰۴	.....	۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

۲-۱۶) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۳۱۱
۳-۱۶) روش انجام آزمایش .....	۳۱۷
۴-۱۶) محاسبات .....	۳۲۹
۵-۱۶) نکات کلی.....	۳۳۲
<b>فصل هفدهم: آزمایش تکمحوری ( مقاومت فشاری محصور نشده )</b>	
۱-۱۷) مقدمه و تئوری آزمایش .....	۳۳۴
۲-۱۷) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۳۳۷
۳-۱۷) روش انجام آزمایش .....	۳۴۰
۴-۱۷) محاسبات .....	۳۴۴
۵-۱۷) نکات کلی .....	۳۴۶
<b>فصل هجدهم: آزمایش سهمحوری</b>	
۱-۱۸) مقدمه و تئوری آزمایش .....	۳۵۰
۲-۱۸) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش.....	۳۶۲
۳-۱۸) روش انجام آزمایش .....	۳۶۸
۴-۱۸) محاسبات .....	۳۹۷
۵-۱۸) نکات کلی .....	۴۰۲
منابع .....	۴۰۴



## پیشگفتار

پیش از هر چیز، الطاف خداوند بخشنده و مهربان را سپاس می‌گوییم که فرصتی فراهم نمود تا بتوانیم کتابی در جهت پیشرفت مهندسان و دانشجویان عزیز سرزمینمان گردآوری نماییم. امید است تا این مجموعه بتواند گامی کوچک، اما تأثیرگذار در مسیر ارتقای دانش و درنتیجه بالا بردن کیفیت زندگی یکایک ما ایجاد نماید.

مطالعه کتاب‌هایی که پیرامون آزمایش‌های مکانیک خاک نوشته شده و موجود است نشان می‌دهد که بیشتر آن‌ها شکل‌های مناسب و کاربردی از وسایل آزمایش و روند انجام آن را ارائه نداده است. همچنین مشخص است که بیشتر این کتاب‌ها فاقد قسمت روند انجام محاسبات با جزئیات کامل برای همه آزمایش‌ها است. علاوه بر این، شماری از آزمایش‌های تجربی مهم در مهندسی ژئوتکنیک نیز در همه کتاب‌های موجود توضیح داده نشده است.

این کاستی‌ها سبب گردید تا نویسنده‌گان این کتاب به یاری بیش از ۱۵ سال تجربه کار در آزمایشگاه‌های مکانیک خاک در داخل و خارج از کشور، جزئیات هر آزمایش، شامل وسایل مورد نیاز و روند انجام آزمایش را با افزودن عکس‌های مختلف، برای خواننده تازه کار آشکار کنند. همچنین کتاب حاضر می‌تواند مرجعی باشد تا مهندسان با مراجعه به این عکس‌ها، بار دیگر دانش خود را از نظر بگذرانند تا از آنچه انجام می‌دهند، اطمینان حاصل نمایند. در انتهای هر آزمایش نیز نمونه‌ای از محاسبات انجام شده برای یک آزمایش واقعی ارائه می‌گردد تا به مهندسین جهت به دست آوردن پارامترهای مختلف خاک، از روی نتایج آزمایش‌ها کمک کند. همچنین به دلیل نبودن منبعی جامع و بهروز جهت انجام آزمایش‌های رایج در بین مهندسین ژئوتکنیک، بر آن شدیم تا علاوه بر گردآوری منابع موجود مرتبط و افزودن عکس‌های مختلف، بخش‌های جدیدی را نیز در این کتاب، نسبت به کتاب‌های موجود در بازار اضافه کنیم تا دید درستی به تمامی عزیزان فعال در این حوزه ارائه نماییم. این بخش‌های جدید شامل آزمایش شناسایی چشمی خاک‌ها، تعیین وزن مخصوص خاک در محل به روش هسته‌ای، تهشیینی، تورم و فشار تورم است که در برآورد رفتار مکانیکی خاک‌ها برای کاربرهای مشخص بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر موارد ذکر شده، با دقت در بیشتر کتاب‌های مکانیک خاک و اهمیت دانه‌بندی خاک‌ها در مهندسی ژئوتکنیک، بر آن شدیم تا فصلی به عنوان «طبقه‌بندی مهندسی خاک‌ها» در این کتاب گنجانده شود تا کمکی باشد به منظور دسترسی و درک بهتر این قسمت برای مهندسان و دانشجویان این حوزه.

امید است که این اهداف در مسیر انتشار این کتاب تحقق یابد و زحمات نویسنده‌گان در گردآوری این کتاب ثمر بخش واقع شود.

دکتر مقداد پایان

مهندس مژده مشقق‌نیا توچائی

مهندس مهدی سلیمی

آبان ۱۴۰۱



# فصل اول

## شناسایی چشمی خاک‌ها

## ۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

خاک‌های موجود در طبیعت معمولاً به دسته‌های کلی شن، ماسه، سیلت، رس و آلی تقسیم‌بندی می‌شود. طبقه‌بندی خاک‌ها اولین گام در جهت شناسایی آن‌هاست که می‌تواند مشخصات مکانیکی آن‌ها را تا حدود زیادی مشخص کند. طبقه‌بندی دقیق مهندسی خاک‌ها معمولاً در آزمایشگاه با آزمایش‌های مختلف از قبیل الک، هیدرومتری و حدود اتربرگ انجام می‌شود که این آزمایش‌ها به همراه روش متعدد برای طبقه‌بندی خاک‌ها در فصول چهارم، پنجم و ششم به تفصیل توضیح داده خواهد شد. در این فصل تحت عنوان «شناسایی چشمی خاک‌ها» بر آنیم تا بدون انجام آزمایش‌های مرسوم، خاک‌ها را شناسایی و طبقه‌بندی کنیم. این کار در شناسایی اولیه و سریع خاک‌ها در محل پژوهش کمک شایانی می‌کند. بدین‌جهت است که بیشتر نتایج حاصل از شناسایی چشمی خاک‌ها که در این فصل توضیح داده خواهد شد، با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در فصول ۴، ۵ و ۶ تطبیق داده می‌شود.

توصیف استاندارد خاک‌ها در شناسایی چشمی آن‌ها برای استفاده‌های مهندسی با استفاده از معیارهای زیر انجام

می‌شود:

### الف) ترکیب خاک

- ✓ جزء اصلی خاک - نماد گروه در طبقه‌بندی خاک
- ✓ نام خاک
- ✓ خصوصیات پلاستیک یا ویژگی‌های ذرات خاک و دانه‌بندی آن
- ✓ رنگ و بوی خاک
- ✓ جزء ثانویه خاک - نام، درصد تخمینی، خصوصیات پلاستیک یا ویژگی‌های ذرات، رنگ
- ✓ سایر اجزای جزئی‌تر خاک - نام، درصد تخمینی، خصوصیات پلاستیک یا ویژگی‌های ذرات، رنگ

### ب) شرایط خاک

- ✓ رطوبت (حالت دست‌خوردہ یا دست‌نخوردہ)
- ✓ استحکام<sup>۱</sup> ( فقط حالت دست‌نخوردہ )

### ج) ساختار خاک (حالت دست‌نخوردہ)

- ✓ زون‌بندی<sup>۲</sup>
- ✓ ناپیوستگی‌ها<sup>۳</sup>
- ✓ سیمنتاسیون<sup>۴</sup>

### د) مشاهدات اضافی

- ✓ منشأ خاک (به عنوان مثال خاک سطحی<sup>۵</sup>، آبرفت<sup>۶</sup>، نهشته واریزه‌ای<sup>۷</sup>، خاک بر جا<sup>۸</sup>)
- ✓ موارد مختلف دیگر.

در شناسایی چشمی خاک‌ها سعی می‌شود تا همه ویژگی‌های بالا (تا آنجایی که اطلاعات در دسترس است) در طبقه‌بندی در نظر گرفته شود.

برای شناسایی چشمی خاک‌ها معمولاً از جدولی مطابق جدول ۱-۱ استفاده می‌شود. در این جدول، ابتدا شماره خاک مورد نظر یادداشت می‌شود و سپس ویژگی‌های زیر برای شناسایی خاک‌ها مدنظر قرار می‌گیرد:

- ✓ اندازه ذرات<sup>۹</sup> (جزء اصلی تشکیل‌دهنده خاک)
- ✓ اجزای ثانویه<sup>۱۰</sup> تشکیل‌دهنده خاک

1. Consistency

5. Fill Material

9. Particle size

2. Zoning

6. Alluvium

10. Secondary components

3.. Defects

7. Colluvium

4.. Cementation

8. Residual Soil

- ✓ دانه‌بندی و شکل ذرات خاک<sup>۱</sup>
- ✓ رنگ<sup>۲</sup> / بو<sup>۳</sup>
- ✓ شرایط رطوبت<sup>۴</sup>
- ✓ مقاومت خشک<sup>۵</sup>
- ✓ اتساع<sup>۶</sup>
- ✓ سفتی / پلاستیسیته<sup>۷</sup>
- ✓ نماد طبقه‌بندی متحد<sup>۸</sup>
- ✓ توصیف کامل خاک<sup>۹</sup>

لازم به ذکر است که با توجه به معیارهای بیان شده در ابتدای این فصل، علاوه بر موارد مندرج در جدول ۱-۱، موارد دیگری نیز می‌تواند در شناسایی چشمی خاک‌ها مورد استفاده قرار گیرد، اما در این فصل صرفاً به معرفی آن‌ها بسنده شده است.

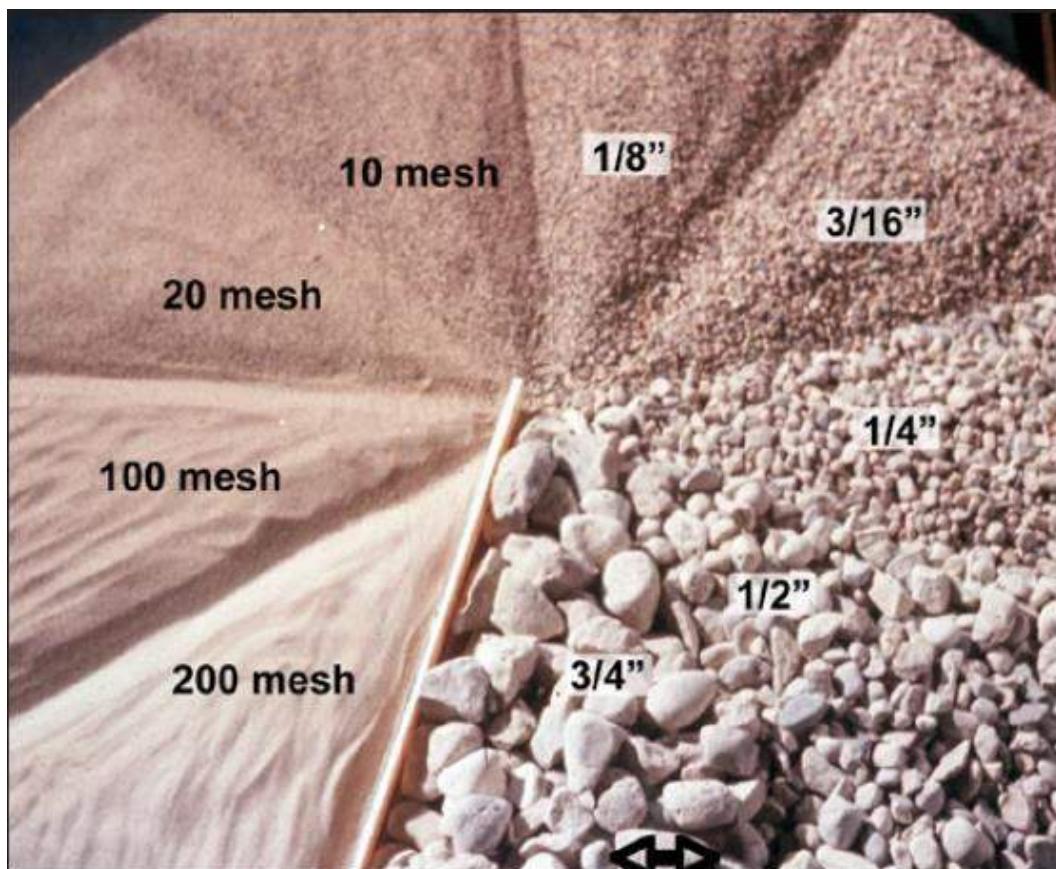
جدول ۱-۱: پارامترهای مورد نیاز برای شناسایی چشمی خاک‌ها

			شماره خاک
رس	رس	<sup>۱۰</sup> رس	اندازه ذرات (جزء اصلی را مشخص کنید)
سیلت	سیلت	<sup>۱۱</sup> سیلت	
ماسه	ماسه	<sup>۱۲</sup> ماسه	
شن	شن	<sup>۱۳</sup> شن	
با اثری از	با اثری از	<sup>۱۴</sup> با اثری از	اجزای ثانویه (اجزای ثانویه را مشخص کنید)
با مقداری	با مقداری	<sup>۱۵</sup> با مقداری	
نام دوگانه یا چندگانه	نام دوگانه یا چندگانه	<sup>۱۶</sup> نام دوگانه یا چندگانه	
			دانه‌بندی و تیزگوشگی ذرات (برای خاک‌های درشت‌دانه)
			رنگ / بو
			شرایط رطوبت
			مقاومت خشک (خاک‌های ریزدانه)
			اتساع (خاک‌های ریزدانه)
			soft / plasticity (خاک‌های ریزدانه)
			نماد طبقه‌بندی متحد
			توصیف کامل خاک

<sup>1</sup>. Particle grading and shape<sup>2</sup>. Colour<sup>3</sup>. Odour<sup>4</sup>. Moisture condition<sup>5</sup>. Dry Strength<sup>6</sup>. Dilatancy<sup>7</sup>. Toughness/Plasticity<sup>8</sup>. Unified Classification Symbol<sup>9</sup>. Full description of soil<sup>10</sup>. Clay<sup>11</sup>. Silt<sup>12</sup>. Sand<sup>13</sup>. Gravel<sup>14</sup>. With a trace of<sup>15</sup>. With some<sup>16</sup>. Dual/Multiple name

### اندازهٔ ذرات (جزء اصلی تشکیل‌دهندهٔ خاک)

در ابتدا، خاک مد نظر را می‌بایست از نظر اندازهٔ ذرات به صورت چشمی طبقه‌بندی کرد (شکل ۱-۱). باید توجه داشت که اندازهٔ ذرات شن بزرگ‌تر از  $4/75$  میلی‌متر، ماسه کوچک‌تر از  $4/75$  میلی‌متر و بزرگ‌تر از  $0/075$  میلی‌متر و اندازهٔ ذرات سیلت و رس (بخش ریزدانه) کوچک‌تر از  $0/075$  میلی‌متر است. تفاوت اصلی بین خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه در این است که ذرات خاک‌های درشت‌دانه با چشم قابل دیدن است. به عبارت دیگر، اگر مقداری خاک را در دست بگیریم و ذرات آن به صورت جداگانه قابل تشخیص باشد، خاک درشت‌دانه است و در غیر این صورت خاک ریزدانه است. برای تمایز بین شن و ماسه از اندازهٔ متوسط ذرات با شناسایی چشمی و قضاوت مهندسی و برای تمایز بین رس و سیلت از خاصیت پلاستیک خاک استفاده می‌کنیم. در این روش، مقدار کمی خاک را در درست گرفته و مقداری آب به آن اضافه می‌کنیم. اگر مجموعهٔ خاک و آب، حالتی چسبنده داشت و به راحتی قابل پاک شدن از روی دست نبود، خاک از جنس رس و در غیر این صورت سیلت است. در ردیف اول جدول ۱-۱، عنصر اصلی و غالب تشکیل‌دهندهٔ خاک را از بین شن، ماسه، سیلت و رس علامت می‌زنیم.



شکل ۱-۱: اندازهٔ ذرات خاک

### اجزای ثانویهٔ تشکیل‌دهندهٔ خاک

درصد اجزای مختلف تشکیل‌دهندهٔ خاک، معمولاً با دقت  $5\%$  به صورت چشمی تعیین می‌شود. بدیهی است که مجموع درصدهای شن، ماسه و ریزدانه در خاک مورد آزمایش می‌بایست  $100$  باشد. برای توصیف اجزای ثانویهٔ تشکیل‌دهندهٔ خاک از جدول ۲-۱ استفاده می‌کنیم.

با توجه به این جدول برای خاک‌هایی که جزء اصلی تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها درشت‌دانه است، اگر جزئی در خاک وجود دارد که مقدار آن به  $5\%$  نمی‌رسد، آن را با عبارت «با اثری از» مشخص می‌کنیم؛ مانند با اثری از ریزدانه. همچنین اگر

جزئی در خاک وجود داشته باشد که مقدار آن بین ۵ تا ۱۲ درصد کل خاک باشد، آن را با عبارت «با مقداری» مشخص می‌کنیم؛ مانند با مقداری ریزدانه. همچنین اگر درصد ریزدانه بیش از ۱۲ درصد کل خاک باشد، خاک را با پسوند «سیلتی/رسی» مشخص می‌کنیم؛ مانند ماسه سیلتی/رسی.

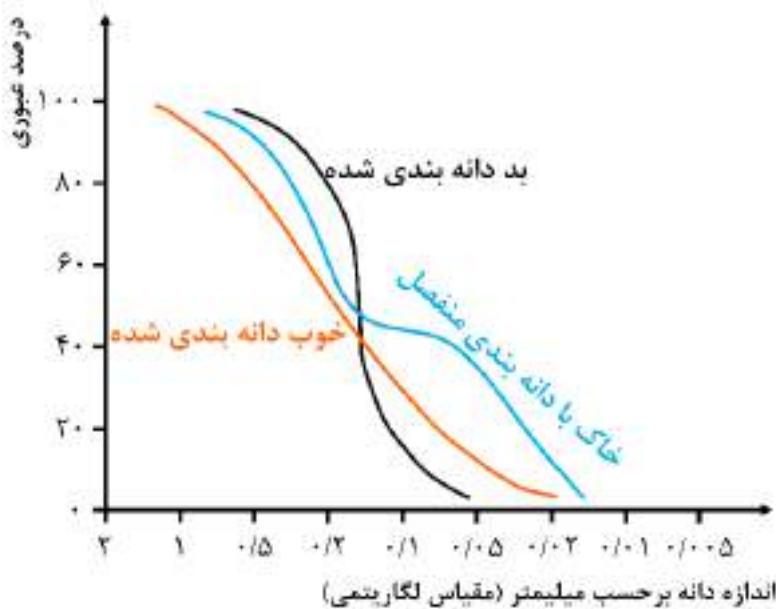
برای خاکهایی که جزء اصلی تشکیل‌دهنده آن‌ها ریزدانه است، اگر درصد درشتدانه در خاک کمتر از ۱۵٪ باشد، آن را با عبارت «با اثری از» مشخص می‌کنیم؛ مانند با اثری از شن. همچنین اگر درصد درشتدانه در خاک بین ۱۵ تا ۳۰ درصد باشد، آن را با عبارت «با مقداری» مشخص می‌کنیم؛ مانند با مقداری ماسه. همچنین اگر درصد درشتدانه بیش از ۳۰ درصد باشد، خاک را با پسوند «ماسه‌ای/شنی» مشخص می‌کنیم؛ مانند رس‌ماسه‌ای.

جدول ۱-۲: تعیین اجزای ثانویه تشکیل‌دهنده خاکها

خاکهای ریزدانه		خاکهای درشتدانه	
توصیف	درصد درشتدانه	توصیف	درصد ریزدانه
حذف یا استفاده از پیشوند «با اثری از»	$\leq 15\%$	حذف یا استفاده از پیشوند «با اثری از»	$\leq 5\%$
استفاده از پیشوند «مقداری ماسه/شن»	$15\% \leq < 30\%$	استفاده از پیشوند «با مقداری سیلت/رس»	$5\% < \leq 12\%$
استفاده از پسوند «ماسه‌ای/شنی»	$> 30\%$	استفاده از پسوند «سیلتی/رسی»	$> 12\%$

### دانه‌بندی و تیزگوشگی<sup>۱</sup> ذرات (خاکهای درشتدانه)

برای خاکهای درشتدانه دو نوع اصلی دانه‌بندی تعریف می‌شود: خوب دانه‌بندی شده<sup>۲</sup> و بد دانه‌بندی شده<sup>۳</sup>. در خاکهای خوب دانه‌بندی شده، محدوده وسیعی از اندازه دانه‌ها در خاک وجود دارد و در خاکهای بد دانه‌بندی شده، اندازه ذرات خاک بیشتر در یک محدوده مشخص بوده و خاک یکنواخت است. همچنین نوع دیگری از خاک‌ها وجود دارد که در آن‌ها محدوده‌ای از اندازه میانی دانه‌ها وجود ندارد. به این نوع خاک‌ها، خاکهایی با دانه‌بندی منفصل<sup>۴</sup> می‌گوییم. (شکل ۱-۱)



شکل ۱-۱: خاکهای خوب دانه‌بندی شده، بد دانه‌بندی شده و با دانه‌بندی منفصل

برای خاکهای درشتدانه، تیزگوشگی ذرات خاک نقش مهمی در رفتار مکانیکی آن‌ها ایفا می‌کند. برای طبقه‌بندی کیفی تیزگوشگی ذرات در شناسایی چشمی، از جدول ۱-۳ استفاده می‌کنیم (شکل ۱-۳). طبق این جدول، خاکهای

1. Angularity

3. Poorly-graded

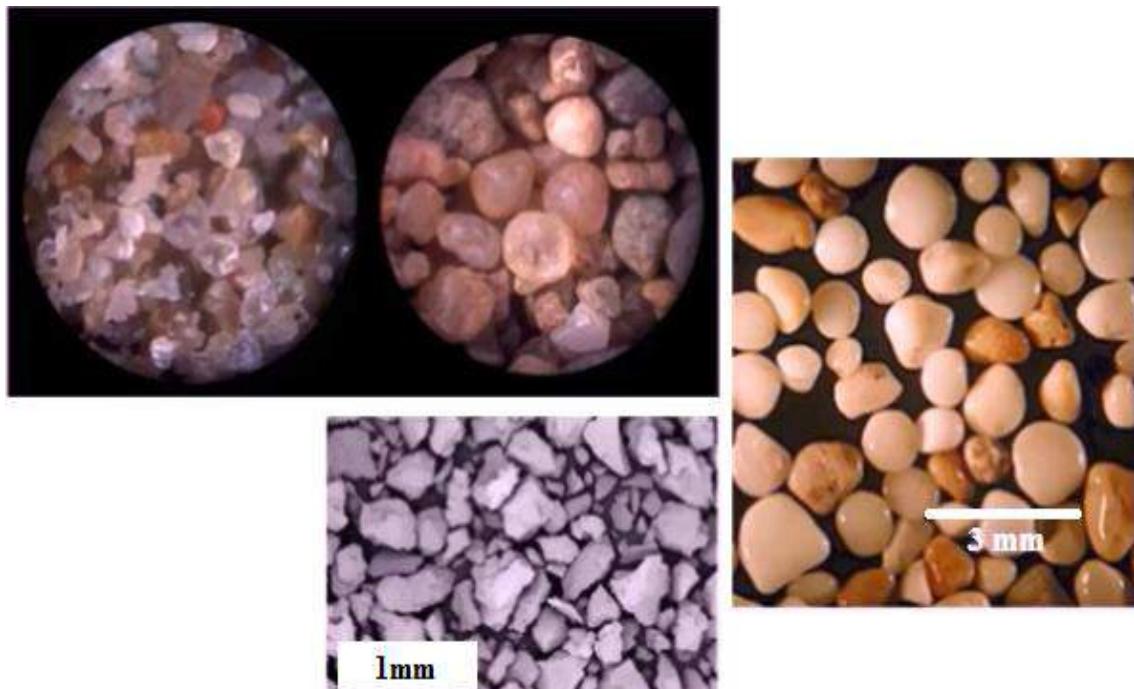
2. Well-graded

4. Gap-graded

درشتدانه از نظر تیزگوشگی ذرات به چهار دسته کلی تیزگوشه<sup>۱</sup>، نیمهتیزگوشه<sup>۲</sup>، نیمهگردگوشه<sup>۳</sup> و گردگوشه<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود (شکل ۱-۳). در بسیاری از خاک‌ها می‌توان از محدوده‌ای از تیزگوشگی ذرات برای توصیف آن استفاده کرد؛ به عنوان مثال خاک با ذرات نیمهگردگوشه تا گردگوشه.

جدول ۱-۳: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های درشتدانه بر اساس تیزگوشگی ذرات خاک

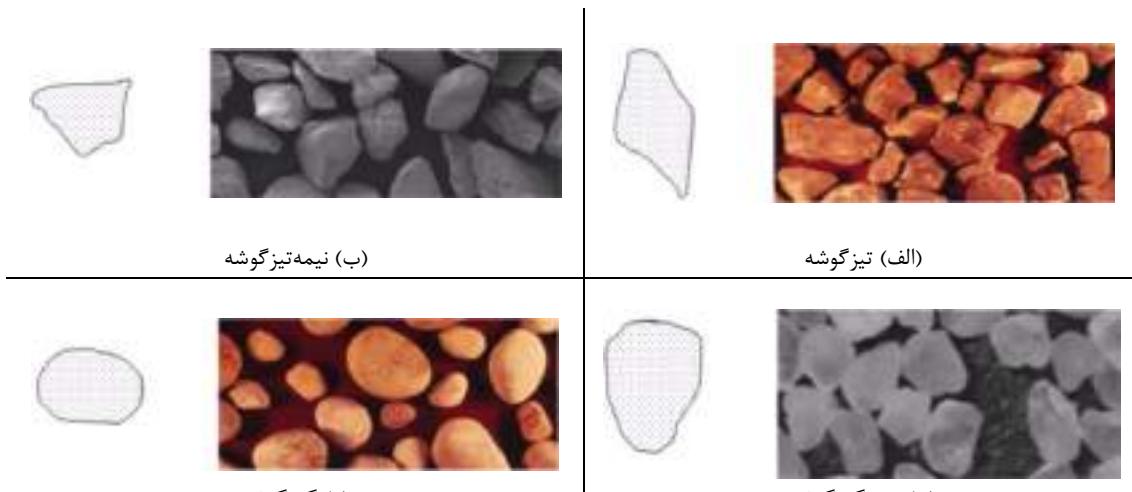
توصیف	تیزگوشگی ذرات
دانه‌های خاک دارای لبه‌های تیز و صفات صاف با سطوح صیقلی نشده است.	تیزگوشه
دانه‌های خاک مشابه خاک تیزگوشه است؛ با این تفاوت که لبه‌های آن‌ها گرد است.	نیمه‌تیزگوشه
دانه‌های خاک دارای صفات صاف با لبه‌ها و گوشه‌های گرد است.	نیمه‌گردگوشه
دانه‌های خاک دارای صفات منحنی شکل هموار و بدون لبه است.	گردگوشه



شکل ۱-۳: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های درشتدانه بر اساس تیزگوشگی ذرات

۱. Angular  
۲. Sub-angular

۳. Sub-rounded  
۴. Rounded



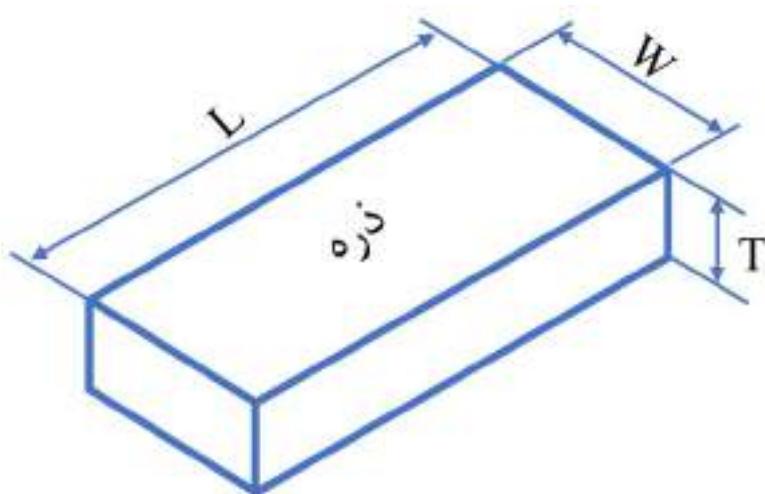
شکل ۱-۴: طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس تیزگوشگی ذرات: (الف) تیزگوشه؛ (ب) نیمهتیزگوشه؛ (ج) نیمهگردگوشه؛ (د) گردگوشه

### شکل ذرات (خاک‌های درشت‌دانه)

شکل ذرات خاک‌های درشت‌دانه، در صورتی که معیارهای جدول ۱-۴ را با توجه به شکل ۱-۵ برآورده کند، به صورت «مسطح (صفحه‌ای)»، «دراز (کشیده)» یا «صفحه‌ای و دراز» توصیف می‌کنیم. در غیر این صورت، نباید شکل را ذکر کنیم، بلکه کسری از ذرات که شکل دار است را بیان می‌کنیم، مانند یک‌سوم ذرات شن صاف است.

جدول ۱-۴: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های درشت‌دانه بر اساس شکل ذرات خاک

توصیف	شکل ذرات
ذرات با $\frac{\text{عرض}}{\text{ضخامت}} < 3$	صفحه‌ای <sup>۱</sup> یا پولکی <sup>۲</sup>
ذرات با $\frac{\text{طول}}{\text{ضخامت}} > 3$	دراز <sup>۳</sup>
ذراتی که هم معیار ذرات صفحه‌ای و هم معیار ذرات دراز را شامل می‌شود.	صفحه‌ای و دراز



شکل ۱-۵: طول (L) و عرض (W) و ضخامت (T) معرفی شده در جدول ۱-۴

<sup>1</sup>. Flat<sup>2</sup>. Platy<sup>3</sup>. Flaky<sup>4</sup>Elongated

### رنگ / بو (خاک‌های آلی)

رنگ یک پارامتر مهم در طبقه‌بندی چشمی خاک‌ها، بهویژه خاک‌های آلی است (شکل ۱-۶). این پارامتر همچنین در شناسایی خاک‌های با منشأ زمین‌شناسی یکسان، می‌تواند مفید باشد. رنگ خاک‌ها در شرایط مرطوب با استفاده از واژه‌های ساده‌ای از قبیل سیاه، سفید، خاکستری، قرمز، آبی، قهوه‌ای، نارنجی، زرد، سبز، ... توصیف می‌شود. این رنگ‌ها می‌تواند با همراهی مشخصه‌هایی از قبیل کمرنگ<sup>۱</sup>، تیره<sup>۲</sup>، لکه‌دار<sup>۳</sup> دقیق‌تر بیان شود. همچنین رنگ‌های مرزی می‌تواند به صورت ترکیبی بیان شود؛ مانند قهوه‌ای قرمز<sup>۴</sup>.

همان‌گونه که گفته شد، رنگ باید بر طبق نمونه‌های مرطوب توضیح داده شود و در صورتی که رنگ برای نمونه‌های خشک است، این مورد باید در گزارش ذکر شود. اگر نمونه خاک، حاوی لایه‌ها یا تکه‌هایی با رنگ‌های مختلف باشد، باید به این نکته توجه شود و تمام رنگ‌های معرف توضیح داده شود. اگر خاک مورد آزمایش بوی خاصی داشته باشد، باید آن را یادداشت کنیم. خاک‌هایی که حاوی مقدار قابل توجهی مواد آلی است، معمولاً بوی متمایزی از پوشش گیاهی در حال پوسیدگی دارد. این امر بهویژه در نمونه‌های تازه مشهود است، اما اگر نمونه‌ها خشک شود، ممکن است بوی آن اغلب با حرارت دادن یک نمونه مرطوب شده، زنده شود. اگر بو غیر معمول باشد (فرآورده‌های نفتی، شیمیایی و مانند آن)، باید شرح داده شود. خاک‌ها معمولاً (غیر از موارد خاص) بوی مشخصی ندارد.



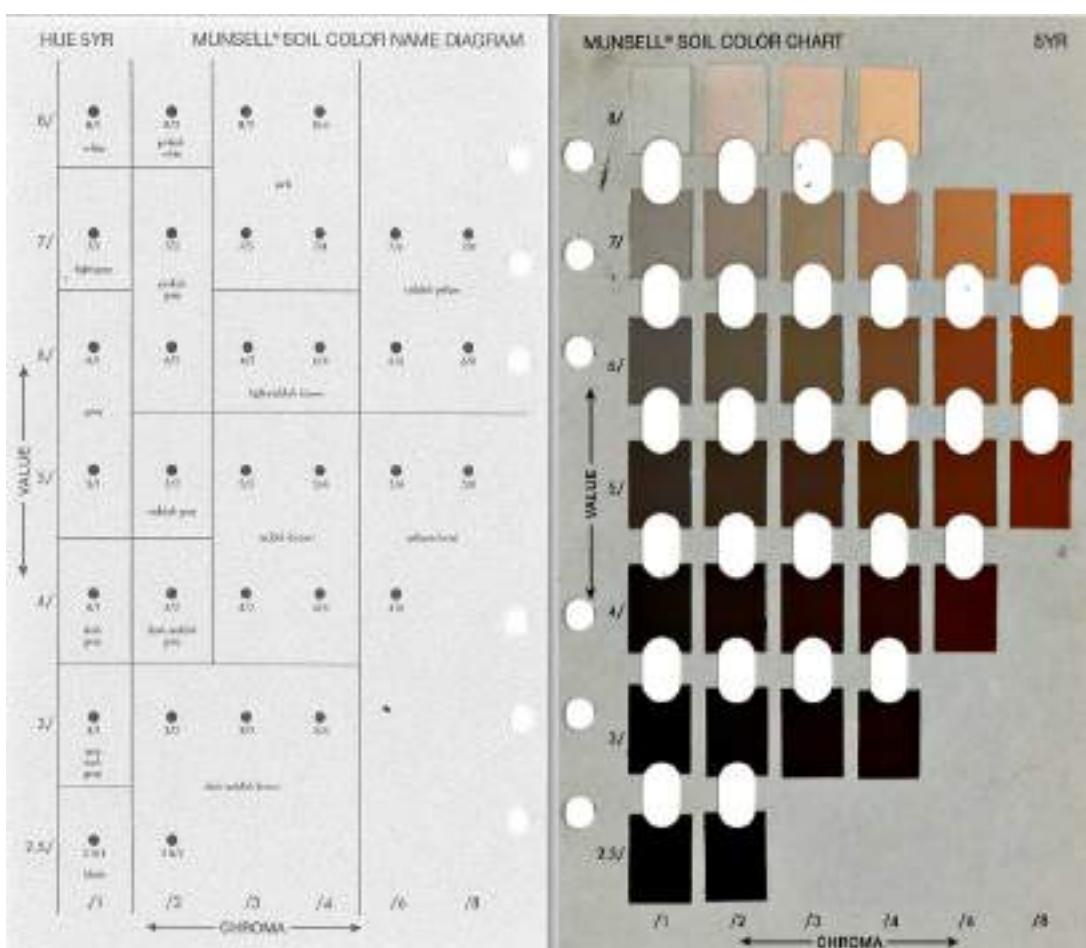
(الف)

۱. Pale  
2. Dark

3. Mottled  
4. Red Brown



(ب)



(ج)

شکل ۱-۶: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های آلی بر اساس رنگ

### شرايط رطوبت

برای طبقه‌بندی کيفي خاک‌ها بر اساس رطوبت آن‌ها، از جدول ۱-۵ استفاده می‌کنيم. بر اين اساس، خاک به سه دسته خشک<sup>۱</sup>، مرطوب<sup>۲</sup> و خيس<sup>۳</sup> تقسيم‌بندی می‌شود.

جدول ۱-۵: طبقه‌بندی کيفي خاک‌ها بر اساس رطوبت

شرايط رطوبت	توصيف
خشک	عدم وجود رطوبت و احساس خشکی در صورت تماس با دست (خاک‌های چسبنده در اين شرايط سخت، پودري و شکننده است. خاک‌های دانه‌اي در اين شرايط بهراحتي جابه‌جا می‌شود.)
مرطوب	احساس رطوبت در تماس با دست، ولی بدون ديدن آب (خاک معمولاً سرد و تيره است. خاک‌های چسبنده در اين شرايط معمولاً ضعيف می‌شود. خاک‌های دانه‌اي در اين شرايط کمي چسبنده می‌شود.)
خيس	داراي آب آزاد قابل مشاهده؛ خاک در اين مورد، معمولاً زير سفره آب زيرزماني است. (مانند حالت مرطوب، خاک معمولاً سرد و تيره است. خاک‌های چسبنده در اين شرايط معمولاً ضعيف می‌شود. خاک‌های دانه‌اي در اين شرايط کمي چسبنده می‌شود.)

### واكنش با اسييد هييدروكلريك (HCL)

واكنش خاک با اسييد هييدروكلريك (HCL) را با معيارهای جدول ۱-۶، تحت عناويني همچون هيج<sup>۴</sup>، ضعيف<sup>۵</sup> يا قوي<sup>۶</sup> توصيف می‌کنند.

جدول ۱-۶: طبقه‌بندی کيفي خاک‌ها بر اساس واكنش با HCL

واكنش با HCL	توصيف
هيج	بدون واكنش قابل مشاهده
ضعيف	اندكي واكنش مي‌دهد و هنگام واكنش، حباب‌هایي که به‌آرامي شکل مي‌گيرد، مشاهده می‌شود.
قوي	بهشتد واكنش مي‌دهد و بلافاصله حباب تشکيل می‌شود.

### قوام<sup>۷</sup> (خاک‌های ريزدانه)

قوام خاک‌های ريزدانه دستنخورده را بر اساس جدول ۱-۷، تحت عناويني همچون بسيار نرم<sup>۸</sup>، نرم<sup>۹</sup>، سفت<sup>۱۰</sup>، سخت<sup>۱۱</sup> يا بسيار سخت<sup>۱۲</sup> توصيف می‌کنند. اين مشاهدات برای خاک‌هایي که مقدار قابل توجهی شن دارد، مناسب نیست.

جدول ۱-۷: طبقه‌بندی کيفي خاک‌های ريزدانه بر اساس قوام

قوام	توصيف
بسیار نرم	انگشت شست بيش از ۱ اینچ (۲۵ ميلي‌متر) در خاک نفوذ می‌کند.
نرم	انگشت شست حدود ۱ اینچ (۲۵ ميلي‌متر) در خاک نفوذ می‌کند.
soft	انگشت شست حدود <sup>۱</sup> /۴ اينچ (۶ ميلي‌متر) در خاک فرو می‌رود.
سخت	انگشت شست در خاک فرو نمی‌رود، اما ناخن انگشت بهراحتي در خاک فرو می‌رود.
خيلي سخت	ناخن انگشت شست داخل خاک فرو نمی‌رود.

1. Dry

2. Moist

3. Wet

4. None

5. Weak

6. Strong

7. Consistency

8. Very soft

9. Soft

10. Firm

11. Hard

12. Very hard

### سیمنتاسیون (خاک‌های درشت‌دانه)

سیمنتاسیون خاک‌های درشت‌دانه دست‌نخورده سیمانته یا ناپیوستگی‌های داخل را طبق معیارهای موجود در جدول ۱-۸ به صورت ضعیف<sup>۱</sup>، متوسط<sup>۲</sup> یا قوی<sup>۳</sup> توصیف می‌کنند. به عبارت دیگر، اگر عامل سیمانی، از شکستگی ذرات خاک در حالت اشباع با دست جلوگیری کند، آن را «قوی» توصیف می‌کنند. ماهیت عامل سیمانی باید با توجه به، ظاهر، مقاومت، واکنش به اسید و سایر پارامترها در توصیف خاک، مشخص شود.

**جدول ۱-۸: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های درشت‌دانه بر اساس سیمنتاسیون**

توصیف	سیمنتاسیون
با دست زدن یا فشار انگشت، خرد می‌شود یا می‌شکند.	ضعیف
با فشار قابل توجه انگشت خرد می‌شود یا می‌شکند.	متوسط
با فشار انگشت خرد نمی‌شود و نمی‌شکند.	قوی

### ساختار<sup>۴</sup>

ساختار خاک‌های دست‌نخورده را مطابق با معیارهای جدول ۹-۱ می‌توان شرح داد.

**جدول ۹-۱: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های دست‌نخورده بر اساس ساختار**

توصیف	سیمنتاسیون
لایه‌های متناوب متشکل از مواد یا رنگ‌های مختلف با ضخامت حداقل ۶ میلی‌متر	لایه‌بندی شده <sup>۵</sup>
لایه‌های متناوب متشکل از مواد یا رنگ‌های متفاوت با ضخامت کمتر از ۶ میلی‌متر	لمینت شده <sup>۶</sup>
در امتداد سطوح مشخصی از شکستگی، با مقاومت کمی می‌شکند.	شکافته شده <sup>۷</sup>
صفحات شکستگی صیقلی یا براق؛ گاهی اوقات مخطط <sup>۸</sup> به نظر می‌رسند.	صفا شده <sup>۹</sup>
خاک چسبنده‌ای که می‌تواند به توده‌های متراکم <sup>۱۰</sup> کوچک تیزگوشه تجزیه شود و در برابر شکست بیشتر، مقاومت کند.	مخطط
وجود پاکت‌های کوچک خاک‌های مختلف، مانند لنزهای کوچک شن و ماسه پراکنده در میان توده‌ای از خاک رس	لنزدار <sup>۱۱</sup>
رنگ و ظاهر یکسان در سراسر محدود خاک	همگن <sup>۱۲</sup>

### مقاومت خشک (خاک‌های ریزدانه)

آزمایش مقاومت خشک، روی بخش تقریباً ریزدانه خاک (کوچک‌تر از ۰/۲ میلی‌متر) انجام می‌شود. برای این منظور، مقداری خاک ریزدانه را با مقداری آب مخلوط کرده و ترکیب حاصل را پس از ورز دادن به صورت کره‌ای با قطر حدوداً ۱۲ میلی‌متر درمی‌آوریم. این خاک به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد خشک می‌شود. سپس با استفاده از جدول ۱۰-۱، خاک را بر اساس مقاومت خشک آن طبقه‌بندی می‌کنیم. طبق این جدول، خاک در یکی از دسته‌های با مقاومت خشک صفر<sup>۱۳</sup>، کم<sup>۱۴</sup>، متوسط<sup>۱۵</sup>، زیاد<sup>۱۶</sup> و خیلی زیاد<sup>۱۷</sup> قرار می‌گیرد.

مقاومت خشک با افزایش پلاستیسیته افزایش می‌یابد. مقاومت خشک بالا، مشخصه رس‌هایی با پلاستیسیته بالا (گروه CH) است. یک سیلت غیر آلی معمولی، مقاومت خشک بسیار کمی دارد. ماسه‌های ریز سیلتی و سیلت‌ها تقریباً مقاومت خشک یکسان کمی دارد، اما هنگام پودر کردن نمونه خشک، می‌توان آن‌ها را با لمس کردن از هم تشخیص داد. این خاک، ماسه‌های ریزی مانند ریگ دارد؛ در حالی که یک سیلت معمولی مانند آرد نرم است.

<sup>۱</sup>. Weak

<sup>7</sup>. Fissured

<sup>13</sup>. None

<sup>2</sup>. Moderate

<sup>8</sup>. Slickensided

<sup>14</sup>. Low

<sup>3</sup>. Strong

<sup>9</sup>. striated

<sup>15</sup>. Medium

<sup>4</sup>. Structure

<sup>10</sup>. Jumps

<sup>16</sup>. High

<sup>5</sup>. Stratified

<sup>11</sup>. Lensed

<sup>17</sup>. Very High

<sup>6</sup>. Laminated

<sup>12</sup>. Homogeneous

جدول ۱۰-۱: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های ریزدانه بر اساس مقاومت خشک

مقاومت خشک	توصیف
صفر	نمونه خشک شده در اثر تنها فشار جابجایی پودر می‌شود
کم	نمونه خشک شده با مقداری فشار بین انگشتان پودر می‌شود
متوسط	نمونه خشک شده با فشار فراوان بین انگشتان تکه‌تکه می‌شود
زیاد	نمونه خشک شده با فشار بین انگشتان خرد نمی‌شود؛ نمونه با فشار بین انگشت شست و یک سطح سخت تکه‌تکه می‌شود.
خیلی زیاد	نمونه خشک شده با فشار بین انگشت شست و یک سطح سخت خرد نمی‌شود.

## اتساع (خاک‌های ریزدانه)

آزمایش اتساع روی بخش تقریباً ریزدانه خاک (کوچک‌تر از ۰/۲ میلی‌متر) انجام می‌شود. برای این منظور، مقداری خاک ریزدانه را با مقداری آب مخلوط کرده و ترکیب حاصل را پس از ورز دادن به صورت کره‌ای با قطر حدوداً ۱۲ میلی‌متر در می‌آوریم. تکه‌خاک را در کف باز یک دست قرار داده و به صورت افقی تکان می‌دهیم و چندین بار نیز به شدت به دست دیگر ضربه می‌زنیم. یک واکنش مثبت عبارت است از ظاهر شدن آب روی سطح تکه‌خاک که باعث برآق شدن سطح آن می‌شود. هنگامی که نمونه، بین انگشتان فشرده می‌شود، آب و درخشش آن از سطح محو می‌شود، خاک سفت شده و درنهایت ترک می‌خورد یا خرد می‌شود. سرعت ظاهر شدن آب هنگام تکان دادن و ناپدید شدن آن هنگام فشردن به شناسایی خصوصیات ریزدانه‌ها در خاک کمک می‌کند. با استفاده از جدول ۱۱-۱، خاک را بر اساس ویژگی اتساع آن طبقه‌بندی می‌کنیم. طبق این جدول، خاک در یکی از دسته‌های با خاصیت اتساع صفر<sup>۱</sup>، آرام<sup>۲</sup> و سریع<sup>۳</sup> قرار می‌گیرد. ماسه‌های تمیز بسیار ریز، سریع‌ترین و مشخص‌ترین واکنش را نشان می‌دهند؛ در حالی که خاک رس پلاستیک هیچ واکنشی ندارد. سیلت‌های غیر آلی واکنش نسبتاً سریعی از خود نشان می‌دهد.

جدول ۱۱-۱: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های ریزدانه بر اساس خاصیت اتساع

اتساع	توصیف
صفر	عدم مشاهده تغییر در نمونه
آرام	هنگام تکان دادن، آب به آرامی روی سطح نمونه ظاهر می‌شود و هنگام فشردن، ناپدید نشده یا به آرامی ناپدید می‌شود.
سریع	هنگام تکان دادن، آب به سرعت روی سطح نمونه ظاهر می‌شود و هنگام فشردن، به سرعت ناپدید می‌شود.

## سفتی / پلاستیسیته (خاک‌های ریزدانه)

آزمایش سفتی روی بخش تقریباً ریزدانه خاک (کوچک‌تر از ۰/۲ میلی‌متر) انجام می‌شود. برای این منظور، مقداری خاک ریزدانه را با مقداری آب مخلوط کرده و سپس نمونه را با دست روی سطح صاف یا بین یک دست با صورت رشته‌ای به قطر حدود ۳ میلی‌متر پهن می‌کنند. این رشته خاک چندین بار تا شده، چرخانده می‌شود و دوباره به صورت رشته در می‌آید تا درنهایت در قطری حدود ۳ میلی‌متر خرد شود. هنگام انجام این آزمایش، رطوبت خاک به تدریج کاهش می‌یابد و نمونه سفت می‌شود؛ درنهایت خاصیت پلاستیک خود را از دست می‌دهد و با رسیدن به رطوبت حد پلاستیک، خرد می‌شود. پس از انجام آزمایش، با استفاده از جدول ۱۲-۱ خاک را بر اساس سفتی آن طبقه‌بندی می‌کنیم. طبق این جدول، خاک در یکی از دسته‌های با سفتی کم<sup>۴</sup>، متوسط<sup>۵</sup> و زیاد<sup>۶</sup> قرار می‌گیرد.

هر چه رشته خاک در نزدیکی حد پلاستیک سخت‌تر باشد و هر چه توده خاک زمانی که درنهایت خرد می‌شود سفت‌تر باشد، بخش رس کلوبیدی در خاک قوی‌تر است. ضعیف بودن رشته خاک در رطوبت حد پلاستیک و از دست دادن سریع

<sup>1</sup>. None<sup>2</sup>. Slow<sup>3</sup>. Rapid<sup>4</sup>. Low<sup>5</sup>. Medium<sup>6</sup>. High

انسجام توده در زیر حد پلاستیک یا نشان دهنده خاک رس غیر آلی با پلاستیسیته کم، یا رس‌های نوع کائولن و رس‌های آلی موجود در زیر خط A در نمودار پلاستیسیته کاساگراند است (در مورد این نمودار در فصول آینده به طور مفصل توضیح داده خواهد شد). رس‌های بسیار آلی در رطوبت حد پلاستیک بسیار ضعیف و اسفنجی است.

جدول ۱۲-۱: طبقه‌بندی کیفی خاک‌های ریزدانه بر اساس سفتی

سفتی	توصیف
کم	تنها فشار کمی جهت غلتاندن و به رشتہ تبدیل کردن خاک در نزدیکی حد پلاستیک نیاز است. رشتہ و توده خاک ضعیف و نرم است.
متوسط	فشار متوسطی جهت غلتاندن و به رشتہ تبدیل کردن خاک در نزدیکی حد پلاستیک نیاز است. رشتہ و توده خاک دارای سختی متوسطی است.
زیاد	فشار فراوانی جهت غلتاندن و به رشتہ تبدیل کردن خاک در نزدیکی حد پلاستیک نیاز است. رشتہ و توده خاک دارای سختی بسیار زیادی است.

بر اساس مشاهدات صورت گرفته در آزمایش سفتی، خاصیت پلاستیک خاک مطابق با جدول ۱۳-۱ ارزیابی می‌شود. طبق این جدول، خاک در یکی از دسته‌های غیر پلاستیک<sup>۱</sup>، با خاصیت پلاستیک کم<sup>۲</sup>، با خاصیت پلاستیک متوسط<sup>۳</sup> و با خاصیت پلاستیک زیاد<sup>۴</sup> قرار می‌گیرد.

جدول ۱۳-۱: طبقه‌بندی کیفی خاک‌ها بر اساس خاصیت پلاستیک

خاصیت پلاستیک	توصیف
غیر پلاستیک	یک رشتہ با قطر ۳ میلی‌متر در هیچ درصد رطوبتی قابل غلتاندن نیست.
کم	رشته به سختی قابل غلتاندن بوده و تکه‌خاک در رطوبت کمتر از حد پلاستیک شکل نمی‌گیرد.
متوسط	رشته به آسانی غلتانده شده و زمان زیادی برای رسیدن به حد پلاستیک مورد نیاز نیست. رشتہ پس از رسیدن به حد پلاستیک نمی‌تواند دوباره غلتانده شود. تکه‌خاک در رطوبت کمتر از حد پلاستیک خرد می‌شود.
زیاد	زمان بسیار زیادی جهت غلتاندن و وزد دادن برای رسیدن به حد پلاستیک مورد نیاز است. رشتہ پس از رسیدن به حد پلاستیک می‌تواند چندین بار دوباره غلتانده شود. تکه‌خاک در رطوبت کمتر از حد پلاستیک می‌تواند بدون خرد شدن شکل گیرد.

### نماد طبقه‌بندی متحده

برای خاک‌های با اندازه غالب درشت‌دانه، در صورت ماسه بودن از نماد S و در صورت شن بودن از نماد G به عنوان حرف اول استفاده می‌کنیم. برای قسمت غالب درشت‌دانه خاک، با توجه به خوب دانه‌بندی شده یا بد دانه‌بندی شده بودن به ترتیب نمادهای W و P را به عنوان حرف دوم خاک انتخاب می‌کنیم. در صورت وجود اجزای ثانویه در خاک، عبارت‌هایی مورد نظر مطابق با جدول ۱-۲ در توصیف خاک به کار می‌روند.

برای خاک‌های با اندازه غالب ریزدانه، در صورت سیلت بودن از نماد M و در صورت رس بودن از نماد C به عنوان حرف اول استفاده می‌کنیم. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت خشک، اتساع و سفتی، از جدول ۱۴-۱ برای طبقه‌بندی دقیق‌تر خاک استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است که در صورت وجود اجزای ثانویه در خاک عبارت‌های مورد نظر مطابق با جدول ۲-۱ در توصیف خاک به کار می‌روند.

۱. Non-plastic

2. Low

3. Medium

4. High

جدول ۱-۱: شناسایی و نام‌گذاری خاک‌های ریزدانه با استفاده از نتایج آزمایش‌های مقاومت خشک، اتساع و سفتی

نماد خاک	مقاطومت خشک	اتساع	softness
ML	صفر تا کم	آرام تا سریع	کم یا شرایطی که رشتہ خاک نمی‌تواند تشکیل شود.
CL	متوسط تا زیاد	صفر تا آرام	متوسط
MH	کم تا متوسط	صفر تا آرام	کم تا متوسط
CH	زیاد تا خیلی زیاد	صفر	زیاد

### توصیف کامل خاک

همه توصیفات ذکر شده در مراحل بالا را در انتهای گردآوری کرده و توصیف کاملی از شناسایی چشمی خاک ارائه می‌دهیم.

### ۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- خاک مورد نظر جهت شناسایی چشمی (شکل ۷-۱)
- ۲- کاردک (شکل ۸-۱)
- ۳- بطری پلاستیکی حاوی آب (شکل ۹-۱)
- ۴- ذرهبین (شکل ۱۰-۱)
- ۵- ظرف‌های فلزی (شکل ۱۱-۱)
- ۶- دستمال کاغذی (شکل ۱۲-۱)



شکل ۱-۱: کاردک



شکل ۷-۱: خاک



شکل ۱۰-۱: ذرهبین



شکل ۹-۱: بطری پلاستیکی آب



شکل ۱۲-۱: دستمال کاغذی



شکل ۱۱-۱: ظرف‌های فلزی

### ۳-۱) روش انجام آزمایش

- ۱- نمونه‌ای از خاک مورد نظر، به اندازه‌ای که تقریباً کف دست را پر کند، برمی‌داریم.
- ۲- خاک را پختش کرده و به دنبال اندازه‌های غالب دانه‌های خاک می‌گردیم. اگر توده‌هایی تشکیل شد، آن‌ها را حرکت می‌دهیم و سعی می‌کنیم با انگشتانمان آن‌ها را بشکنیم. بخش غالب را بین انگشتان مالش داده و تخمین می‌زنیم که چه نسبتی از دانه‌ها را می‌توانیم احساس کنیم.
- ۳- اگر دانه‌های بخش غالب خاک، زیر دست حس شد یا با دیدن قابل شناسایی بود، بخش عمدۀ خاک درشت‌دانه است (شکل ۱۳-۱). برای تعیین ماسه یا شن بودن بخش عمدۀ خاک، به اندازه دانه‌ها و مرز بین ماسه و شن (۴/۷۵ میلی‌متر) توجه می‌کنیم.



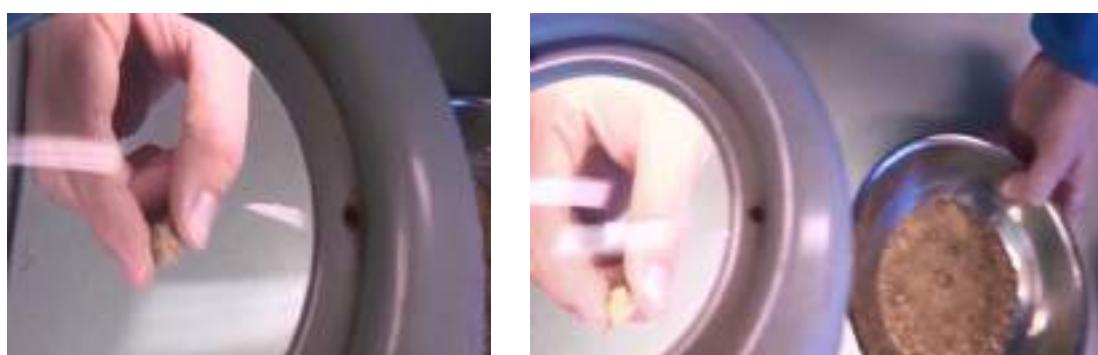
شکل ۱۳-۱: دیدن و لمس ذرات مستقل خاک به عنوان نشانه‌ای برای درشت‌دانه بودن آن

- ۴- اگر دانه‌های بخش غالب خاک، زیر دست حس نشد یا با دیدن قابل شناسایی نبود، بخش عمدۀ خاک ریز‌دانه است. برای تعیین سیلت یا رس بودن بخش عمدۀ خاک، قسمت ریزدانه خاک را خیس می‌کنیم و بعد از مالیدن بین انگشتان مشاهده می‌کنیم که به دست می‌چسبد و به سختی پاک می‌شود یا خیر. در صورتی که خاکِ مرتبط به‌آسانی پاک شود، بخش ریزدانه عمدتاً سیلت است و اگر خاک مرتبط به‌آسانی پاک نشود و به انگشتان دست بچسبد، بخش ریزدانه خاک رس است (شکل ۱۴-۱).



شکل ۱۴-۱: تشخیص بین رس و سیلت بودن بخش ریزدانه با اضافه کردن آب

- ۵- با توجه به مراحل ۳ و ۴، جز اصلی خاک را در جدول ۱-۱ مشخص می‌کنیم.
- ۶- سایر اجزای تشکیل‌دهنده خاک را به دقت بررسی می‌کنیم و درصد تخمینی هر کدام از اجزا را یادداشت می‌کنیم.
- ۷- مطابق جدول ۱-۲، اجزای ثانویه خاک را با عبارت‌های «با اثری از»، «با مقداری» و یا با پسوند «سیلنتی/ رسی» یا «ماسه‌ای/ شنی» مشخص می‌کنیم.
- ۸- در صورتی که بخش عمده‌ای از خاک، درشت‌دانه (ماسه یا شن) باشد، آن قسمت را داخل ظرفی ریخته و محدوده اندازه دانه‌های آن را به دقت بررسی می‌کنیم. در صورتی که اندازه دانه‌ها محدوده وسیعی را پوشش دهد به خاک، خوب دانه‌بندی شده می‌گوییم؛ در صورتی که اندازه دانه‌ها تقریباً در یک محدوده کوچک بوده و خاک یکنواخت باشد به خاک بد دانه‌بندی شده می‌گوییم.
- ۹- دانه‌های مختلف و تصادفی از بخش درشت‌دانه را زیر ذره‌بین بررسی می‌کنیم و تیزگوشگی غالب دانه‌ها را با توجه به جدول ۱-۳ تعیین می‌کنیم (شکل ۱۵-۱). در این مورد می‌توان محدوده‌ای از تیزگوشگی ذرات را نیز بیان کرد.





شکل ۱-۱۵: تعیین تیزگوشگی ذرات خاک با استفاده از ذرهبین

۱۰- رنگ خاک را تعیین می‌کنیم (شکل ۱-۱۶). اگر خاک دارای بوی خاصی است، آن را یادداشت می‌کنیم.



شکل ۱-۱۶: تعیین رنگ خاک: (الف) قهوه‌ای؛ (ب) خاکستری؛ (ج) زرد کمرنگ

۱۱- با مشاهده و لمس خاک، شرایط رطوبت آن را مطابق با جدول ۱-۵ تعیین می‌کنیم (شکل ۱-۱۷).



شکل ۱-۱۷: تعیین شرایط رطوبت خاک: (الف)، (ب)، (ج) خشک

۱۲- آزمایش مقاومت خشک: ابتدا ذرات بزرگ‌تر از  $2/0$  میلی‌متر را به صورت چشمی و با دست از خاک جدا می‌کنیم. پس از حذف ذرات بزرگ‌تر از  $2/0$  میلی‌متر، به یک تکه از خاک، آب اضافه می‌کنیم تا به قوام بتونه برسد. تکه خاک را ورز داده و به کره‌هایی به قطر حدود  $12$  میلی‌متر تبدیل می‌کنیم. این آزمایش باید حداقل روی سه کره انجام شود. کره‌های خاکی را به مدت  $24$  ساعت در آفتاب یا هوای خشک قرار می‌دهیم. همچنین می‌توان از گرم‌کن جهت خشک کردن نمونه‌ها استفاده کرد؛ به شرطی که دمای آن از  $60$  درجه سانتی‌گراد تجاوز نکند. پس از  $24$  ساعت خشک کردن کره‌ها، آن‌ها را ابتدا با فشار بین انگشتان دست خرد می‌کنیم. در صورت عدم خرد شدن کره‌ها، آن‌ها

را بین انگشت شست و یک سطح سخت قرار داده و خرد می‌کنیم (شکل ۱۸-۱). با استفاده از یافته‌های این آزمایش، مقاومت خشک خاک‌ها را بر اساس جدول ۱۰-۱ تخمین می‌زنیم.





شکل ۱-۱۸: آزمایش مقاومت خشک

۱۳- آزمایش اتساع: ابتدا ذرات بزرگ‌تر از  $0/2$  میلی‌متر را به صورت چشمی و با دست از خاک جدا می‌کنیم. پس از حذف ذرات بزرگ‌تر از  $0/2$  میلی‌متر، به یک تکه از خاک، به اندازه کافی آب اضافه کرده تا نرم شود، اما چسبناک نشود. تکه خاک را ورز داده و به کره‌ای به قطر حدود  $12$  میلی‌متر تبدیل می‌کنیم. تکه خاک را با استفاده از کاردک در کف باز یک دست پهنه می‌کنیم و به صورت افقی تکان می‌دهیم و چندین بار به شدت به دست دیگر ضربه می‌زنیم. به واکنش آب که روی سطح خاک ظاهر می‌شود توجه می‌کنیم. نمونه را بین انگشتان فشرده کرده و به واکنش آب

روی سطح خاک دقت می‌کنیم (شکل ۱۹-۱). این آزمایش را حداقل سه بار تکرار می‌کنیم. با توجه به مشاهدات در این آزمایش، خاصیت اتساع خاک را بر اساس جدول ۱۱-۱ طبقه‌بندی می‌کنیم.





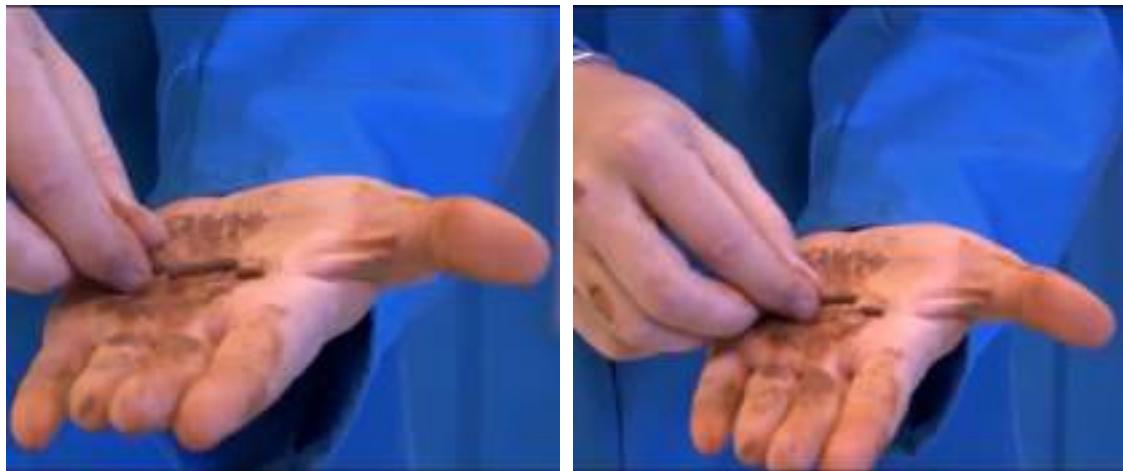


شکل ۱۹-۱: آزمایش اتساع

**۱۴- آزمایش سفتی / پلاستیسیته:** پس از حذف ذرات بزرگ‌تر از  $2/0$  میلی‌متر، به نمونه خاک، آب اضافه می‌کنیم. در صورت وجود رطوبت و چسبندگی زیاد، نمونه را در یک لایه نازک پخش کرده و اجزاء می‌دهیم تا مقداری از رطوبتش را در اثر تبخیر از دست بدهد. سپس نمونه را با دست، روی سطح صاف یا بین کف دست‌ها به صورت رشته‌ای به قطر حدود  $3$  میلی‌متر پهن می‌کنیم. این رشته‌خاک چندین بار تا شده و چرخانده می‌شود و دوباره به صورت رشته درمی‌آید تا درنهایت در قطری حدود  $3$  میلی‌متر خرد شود. وقتی رشته در قطری حدود  $3$  میلی‌متر خرد شود، می‌توان گفت که رطوبت خاک در نزدیکی رطوبت حد پلاستیک قرار دارد. پس از خرد شدن رشته، قطعات باید به هم چسبانده شود و تا زمانی که توده خرد شود به طور خفیف ورز داده شود (شکل ۱-۲۰). با توجه به مشاهدات در این آزمایش، میزان سفتی خاک را بر اساس جدول ۱۲-۱ ارزیابی می‌کنیم. همچنین بر اساس مشاهدات صورت گرفته در آزمایش سفتی، خاصیت پلاستیک خاک مطابق با جدول ۱۳-۱ ارزیابی می‌شود.







شکل ۲۰-۱: آزمایش سفتی

- ۱۵- خاک‌های با اندازهٔ غالب درشت‌دانه را با توجه به ماسهٔ یا شن بودن و خوب دانه‌بندی‌شده بودن یا بد دانه‌بندی‌شده بودن نمادگذاری می‌کنیم. خاک‌های با اندازهٔ غالب ریز‌دانه را نیز با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت خشک، اتساع و سفتی، مطابق جدول ۱۴-۱ طبقه‌بندی می‌کنیم. همچنین اجزای ثانویهٔ این خاک‌ها را با عبارت‌های مورد نظر مطابق با جدول ۲-۱ توصیف می‌کنیم.
- ۱۶- کلیه مشاهدات مراحل ۳ تا ۱۴ را در این مرحله گردآوری کرده و بدین ترتیب توصیف کاملی از ویژگی‌های خاک ارائه می‌دهیم.

#### ۴-۱) نمونه‌ای از شناسایی چشمی خاک‌ها

در این قسمت یک نمونه از نتایج آزمایش شناسایی چشمی خاک‌ها ارائه می‌شود. خلاصه نتایج توصیف شده در زیر، برای این نمونه در جدول ۱۵-۱ نشان داده شده است.

##### نمونه اول:

- ✓ بررسی این نمونه خاک، نشان می‌دهد که بیش از نیمی از مواد آن از ذراتی تشکیل شده است که با چشم غیر مسلح قابل مشاهده است، بنابراین خاک «درشت‌دانه» است.
- ✓ بیش از نیمی از دانه‌های درشت مشاهده شده، کوچک‌تر از  $4/75$  میلی‌متر است؛ بنابراین خاک «ماسه» است. درنتیجه نماد گروه با «S» شروع می‌شود.
- ✓ از آنجایی که محدوده وسیعی از اندازه دانه‌ها در این خاک وجود دارد، ماسه «خوب دانه‌بندی‌شده» بوده و با نماد «SW» نشان داده می‌شود.
- ✓ همچنین مشاهدات ذرات این ماسه نشان می‌دهد که دانه‌ها عمدتاً به شکل گردگوشه تا نیمه‌تیزگوشه است.
- ✓ با مشاهده، تخمین زده می‌شود که خاک حاوی حدود ۲۰ درصد شن تیزگوشه تا اندازه حدود ۱۰ میلی‌متر است. این مقدار بیش از ۱۲ درصد بوده و بنابراین از صفت «شنی» برای این خاک استفاده می‌شود.
- ✓ تقریباً ۱۰ درصد خاک از ذرات بسیار ریز تشکیل شده است که به صورت مجزا دیده نمی‌شود. مشخص شده است که ریزدانه‌ها دارای مقاومت خشک کم یا بدون مقاومت خشک است؛ همچنین مقداری اتساع و سفتی ناچیز دارد؛ بنابراین ریزدانه‌ها را می‌توان تحت عنوان سیلت توصیف کرد و از آنجایی که کمتر از ۱۲ درصد خاک را تشکیل می‌دهد، از اصطلاح «با مقداری سیلت» برای توصیف جز ثانویهٔ آن‌ها استفاده می‌شود.

- ✓ رنگ خاک قهوه‌ای کمرنگ است، اگرچه با خشک شدن، کمرنگ‌تر می‌شود. خاک سرد بوده و دانه‌ها تمایل به چسبیدن به هم دارد. پس از گذاشتن خاک روی دست‌ها، آب آزاد دیده نمی‌شود، بنابراین خاک، مرطوب توصیف می‌شود.
- ✓ خاک از یک دشت سیلابی جمع‌آوری شده است. این مشخصه و ماهیت لایه‌ای بسترهاي خاک، نشان می‌دهد که خاک احتمالاً منشأ آبرفتی دارد.
- ✓ بنابراین توصیف کامل خاک به این شرح است: SW، ماسه شنی با مقداری سیلت، با محدوده وسیعی از دانه‌ها از درشت تا ریز، دانه‌های گردگوشه تا نیمه‌تیزگوشه، قهوه‌ای کمرنگ، حدود ۲۰٪ ذرات شن تیزگوشه با حداکثر اندازه ۱۰ میلی‌متر، حدود ۱۰٪ سیلت، مرطوب، احتمالاً آبرفتی.

جدول ۱-۱۵: نمونه‌هایی از نتایج آزمایش شناسایی چشمی خاک‌ها

		۱	شماره خاک
رس	رس	رس	
سیلت	سیلت	سیلت	اندازه ذرات (جزء اصلی را مشخص کنید)
ماسه	ماسه	✓ ماسه	
شن	شن	شن	
با اثری از	با اثری از	- با اثری از -	
با مقداری	با مقداری	با مقداری سیلت	اجزای ثانویه (اجزای ثانویه را مشخص کنید)
نام دوگانه یا چندگانه	نام دوگانه یا چندگانه	نام دوگانه یا چندگانه ماسه شنی	دانه‌بندی و تیزگوشگی ذرات (برای خاک‌های درشت‌دانه)
		خوب دانه‌بندی شده / گردگوشه تا نیمه تیزگوشه	
		قهوهای کمرنگ / بدون بو	رنگ / بو
		مرطوب	شرایط رطوبت
		صفر تا کم	مقاومت خشک (خاک‌های ریزدانه)
		آرام	اتساع (خاک‌های ریزدانه)
		کم	سفتی / پلاستیسیته (خاک‌های ریزدانه)
		SW	نماد طبقه‌بندی متحد
		SW، ماسه شنی با مقداری سیلت، با محدوده وسیعی از دانه‌ها از درشت تا ریز، دانه‌های گردگوشه تا نیمه تیزگوشه، قهوهای کمرنگ، حدود ۲۰٪ ذرات شن تیزگوشه با حداقل اندازه ۱۰ میلی‌متر، حدود ۱۰٪ سیلت، مرطوب، احتمالاً آبرفتی.	توصیف کامل خاک

### ۱-۵) نکات کلی

- ۱- همان‌گونه که در مقدمه بیان شد، توصیف ساختار خاک نیز می‌تواند شناسایی چشمی خاک را کامل‌تر کند. ساختار خاک شامل زون‌بندی، ناپیوستگی‌ها و سیمانتسیون است.
- ۲- زون‌بندی: یک نمونه یا مجموعه‌ای از نمونه‌ها ممکن است شامل زون‌های مختلفی از خاک منطقه باشد که از نظر رنگ، اندازه دانه‌ها و سایر خصوصیات متفاوت است. کلیه ضخامت‌ها، جهت‌گیری‌ها و سایر ویژگی‌های متمایز مناطق در توصیف خاک باید شرح داده شود. مرزهای بین این مناطق به صورت «منظم تیز<sup>۱</sup>»، «نامنظم تیز<sup>۲</sup>»، «تدریجی<sup>۳</sup>» توصیف می‌شود. ضخامت هرگونه ناحیه انتقالی باید بیان شود.
- ۳- ناپیوستگی‌ها: هرگونه شکاف، ترک یا سطحی که در امتداد آن خاک به راحتی می‌شکند باید توصیف شود. در صورت وجود شکاف:
  - (الف) اندازه قطعات باید گزارش شود.
  - (ب) شکل قطعات باید از نظر بافت (زبر، صیقلی) و یا هر نوع پوششی شرح داده شود.
- ۴- در صورت امکان و با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، منشأ خاک بهتر است در توصیف آن بیان شود.
- ۵- نکات اضافی مانند وجود ریشه، مشکل در حفاری، کندن ترانشه یا گودال، یا وجود، باید در گزارش شناسایی چشمی خاک‌ها ذکر شود.

<sup>1</sup>. Sharp regular

<sup>2</sup>. Sharp irregular

<sup>3</sup>. Gradual



## فصل دوم

آزمایش تعیین درصد رطوبت (ASTM D-2216)

## ۱-۲) مقدمه و تئوری آزمایش

در بیشتر تست‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک، لازم است مقدار رطوبت خاک تعیین شود. مقدار رطوبت خاک (دست-خوردہ) را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$w = \frac{\text{جرم آب موجود در توده خاک مرطوب}}{\text{جرم خاک خشک}} \quad (1-2)$$

معمولًاً مقدار رطوبت، به صورت درصد گزارش می‌شود. این درصد، از مقدار رطوبت کم که متعلق به خاک‌های ماسه‌ای خشک است تا مقدار رطوبت بیش از ۱۰۰٪ برای رس‌های با پلاستیسیته زیاد، متغیر است. حتی خاک‌هایی که «خشک» به نظر می‌رسد نیز مقداری رطوبت دارد.

برای کسب نتایج بهتر در این آزمایش، توصیه می‌شود حداقل مقدار نمونه‌های مرطوب خاک، تقریباً مطابق با مقادیر موجود در جدول ۱-۲ انتخاب شود. این مقادیر بر اساس آییننامه ASTM D-2216 انتخاب شده است.

جدول ۱-۱: حداقل مقدار نمونه‌های خاک مرطوب برای تعیین درصد رطوبت

حداقل جرم مورد نیاز از نمونه خاک (g)	شماره الک در استاندارد آمریکایی	حداکثر اندازه دانه‌های خاک (mm)
۲۰	۴۰	۰/۴۲۵
۵۰	۱۰	۲/۰
۱۰۰	۴	۴/۷۵
۵۰۰	۳/۸ اینچ	۹/۵
۲۵۰۰	۳/۴ اینچ	۱۹/۰

## ۲-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- مقدار مشخصی از نمونه دست‌خوردہ خاک مرطوب بر اساس جدول ۱-۲.

۲- سه ظرف تعیین رطوبت (شکل ۲-۱): این ظرف‌ها، در اندازه‌های مختلف موجود است؛ به عنوان مثال به قطر ۲

اینج (۵۰/۸ میلی‌متر) و ارتفاع  $\frac{7}{8}$  اینچ (۲۲/۲ میلی‌متر) و همچنین به قطر  $\frac{3}{5}$  اینچ (۸۸/۹ میلی‌متر) و ارتفاع ۲ اینچ (۵۰/۸ میلی‌متر).

۳- گرم‌کن با قابلیت کنترل دما (شکل ۲-۲): برای خشک کردن خاک، دمای گرم‌کن معمولًاً بین ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته می‌شود. بهتر است از دمای بالاتر از این مقدار، برای خشک کردن خاک اجتناب شود تا از سوختن مواد ارگانیک (آلی) موجود در خاک جلوگیری شود.

۴- ترازو (شکل ۳-۲): بهتر است برای مقدار ۲۰۰ گرم از نمونه خاک و کمتر از آن، از ترازوی با دقیقه ۰/۰۱ گرم و برای مقادیر بیشتر از ۲۰۰ گرم، از ترازوی با دقیقه ۱/۰ گرم استفاده شود.

۵- دستکش مقاوم در برابر گرما (شکل ۴-۲): به منظور جلوگیری از سوختن دست‌ها هنگام خارج کردن نمونه‌ها از گرم‌کن، بهتر است از دستکش مخصوص استفاده شود.

۶- کاردک (شکل ۲-۵): به منظور انتقال نمونه‌های خاک به داخل ظرف تعیین رطوبت، بهتر است از کاردک استفاده شود.



شکل ۲-۲: گرم کن



شکل ۲-۱: ظروف تعیین رطوبت در سایزهای مختلف



شکل ۲-۴: دستکش عایق گرما



شکل ۲-۳: ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم



شکل ۲-۵: کاردک

### ۳-۲) روش انجام آزمایش

- ۱- ابتدا ظرف تعیین رطوبت را تمیز کرده، سپس جرم ظرف را به همراه درب آن اندازه می‌گیریم ( $M_1$ ). پس از آن، شماره‌ای روی ظرف یادداشت می‌کنیم تا نمونه‌ها پس از خشک شدن، قابل تشخیص باشد (دقت شود که این شماره‌گذاری به گونه‌ای صورت گیرد که پس از گرم کردن در گرم‌کن، باز هم قابل دیدن باشد).
- ۲- مقدار مشخصی از نمونه خاک مرطوب را با کاردک داخل ظرف ریخته و بلافاصله درب ظرف را می‌بندیم تا رطوبت نمونه تعییر نکند (برای دقت در محاسبه درصد رطوبت، معمولاً رطوبت سه نمونه از یک خاک را اندازه می‌گیریم و سپس میانگین این سه نمونه را به عنوان درصد رطوبت گزارش می‌کنیم).
- ۳- بار دیگر، جرم ظرف را به همراه درب و نمونه‌ای که داخل آن است، اندازه می‌گیریم ( $M_2$ ).
- ۴- درب ظرف را برداشته و آن را در زیر ظرف قرار می‌دهیم و به همین صورت، بلافاصله درون گرم‌کن می‌گذاریم. معمولاً ساعت زمان لازم است تا نمونه به طور کامل خشک شود.
- ۵- پس از گذشت زمان مذکور، ظرف را با دستکش، از گرم‌کن خارج کرده و به همراه درپوش آن، دوباره روی ترازو قرار می‌دهیم تا جرم آن مشخص شود ( $M_3$ ).

### ۴-۲) محاسبات

$$1 - \text{محاسبه جرم آب (رطوبت) موجود در خاک مرطوب: } M_2 - M_1$$

$$2 - \text{محاسبه جرم خاک خشک: } M_3 - M_1$$

$$3 - \text{محاسبه درصد رطوبت:}$$

$$w(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_1} \times 100 \quad (4-2)$$

نمونه‌ای از محاسبه درصد رطوبت خاک در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲: نمونه‌ای از محاسبات آزمایش تعیین درصد رطوبت

نوع خاک: خاک رس سیلتدار قهوه‌ای	شماره نمونه: ۴
محل نمونه‌گیری:	.....
تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....	شخص نمونه‌گیری: .....

شماره آزمایش			مورد
۳	۲	۱	
۵۴	۳۱	۴۲	شماره ظرف
۱۶/۰۷	۱۸/۹۲	۱۷/۳۱	جرم ظرف + درپوش، <sub>(g)</sub> $M_1$
۳۹/۴۳	۵۲/۱۹	۴۳/۵۲	جرم ظرف + درپوش + جرم خاک مرطوب، <sub>(g)</sub> $M_2$
۳۶/۱۳	۴۷/۶۱	۳۹/۸۶	جرم ظرف + درپوش + جرم خاک خشک، <sub>(g)</sub> $M_3$
۳/۳۰	۴/۵۸	۳/۶۶	جرم آب (رطوبت) موجود در خاک مرطوب، <sub>(g)</sub> $M_1 - M_2$
۲۰/۰۶	۲۸/۶۹	۲۲/۵۵	جرم خاک خشک، <sub>(g)</sub> $M_3 - M_1$
۱۶/۵	۱۶/۰	۱۶/۲	درصد رطوبت، $w(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_1} \times 100$

میانگین درصد رطوبت: ۱۶/۲ %

## ۲-۵) نکات کلی

۱- اغلب خاک‌های دانه‌ای مانند شن و ماسه در حالت طبیعی و اشباع، دارای حداکثر رطوبت ۱۵ تا ۳۰٪ است. در صورتی که اغلب خاک‌های ریزدانه مانند سیلت و رس در حالت طبیعی، دارای حداکثر رطوبت ۵۰ تا ۸۰٪ است که البته برای رس‌های با خاصیت پلاستیسیته زیاد به دلیل قابلیت جذب آب، این مقدار حتی می‌تواند بیشتر از ۱۰۰٪ نیز باشد. در خاکبرگ‌ها و خاک‌های شدیداً آلی نیز مقدار حداکثر رطوبت ۵۰٪ است که البته استفاده از این نوع خاک‌ها در کارهای مهندسی رایج نیست. جدول ۲-۳ نمونه‌ای از مقادیر معمول درصد رطوبت در حالت اشباع برای خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳: مقدار معمول درصد رطوبت در حالت اشباع

درصد رطوبت طبیعی خاک در حالت اشباع (%)	خاک
۲۵-۳۰	ماسه سست و یکنواخت
۱۲-۱۶	ماسه متراکم و یکنواخت
۲۵	ماسه سیلتدار سست و تیزگوش <sup>۱</sup>
۱۵	ماسه سیلتدار متراکم و تیزگوش <sup>۲</sup>
۲۰	رس سخت <sup>۳</sup>
۳۰-۵۰	رس نرم <sup>۴</sup>
۸۰-۱۳۰	رس نرم آلی <sup>۵</sup>
۱۰	تیل یخچالی <sup>۶</sup>

۲- بعضی از خاک‌های آلی ممکن است در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد گرم کن، تجزیه شود. همچنین دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد ممکن است برای خاک‌های حاوی گچ خیلی بالا باشد؛ به این دلیل که این مصالح به طور آهسته دهیدراته می‌شود. استاندارد ASTM در این موقع توصیه می‌کند که بهمنظور خشک کردن این نوع خاک‌ها، از دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شود.

<sup>۱</sup>. Loose angular-grained silty sand

<sup>۲</sup>. Dense angular-grained silty sand  
<sup>۳</sup>. Stiff clay

<sup>۴</sup>. Soft clay  
<sup>۵</sup>. Soft organic clay  
<sup>۶</sup>. Glacial till



**فصل سوم**  
**آزمایش تعیین چگالی ویژه**  
**(وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک)**  
**(ASTM D854, AASHTO T100-81)**

### ۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

چگالی ویژه یک ماده معین به صورت نسبت وزن یک حجم معین از ماده به وزن آب مقطر در همان حجم، تعریف می‌شود. در مکانیک خاک نیز می‌توان تعریف مشابهی ارائه داد؛ نسبت وزن مخصوص (چگالی) دانه‌های جامد خاک به وزن مخصوص (چگالی) آب، چگالی ویژه (وزن مخصوص) دانه‌های جامد<sup>۱</sup> نامیده می‌شود که با اختصار به آن چگالی ویژه گفته می‌شود. این پارامتر، یک کمیت بدون بعد و کاربردی در روابط وزنی و حجمی خاک است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\frac{M_s}{V_s}}{\rho_w} = \frac{M_s}{V_s \rho_w} \quad (1-3)$$

$M_s$ : جرم دانه‌های جامد خاک (g)

$V_s$ : حجم دانه‌های جامد خاک ( $cm^3$ )

$\rho_w$ : چگالی آب ( $g/cm^3$ )

دامنه تغییرات  $G_s$  برای خاک‌های مختلف در جدول ۱-۳ ارائه شده است.

جدول ۱-۳: دامنه تغییرات کلی  $G_s$  برای خاک‌های مختلف

محدوده تغییرات $G_s$	نوع خاک <sup>۲</sup>
۲/۶۳ - ۲/۶۷	ماسه
۲/۶۵ - ۲/۷	سیلت
۲/۶۷ - ۲/۹	رس و رس سیلتدار
کمتر از ۲	خاک آلی

لازم به ذکر است روش تعیین  $G_s$  که در ادامه توضیح داده می‌شود، برای خاک‌های عبوری از الک شماره ۴/۷۵ (میلی‌متر) است.

### ۲-۱) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- فلاکس حجمی<sup>۳</sup> (۵۰۰ ml) (شکل ۱-۳)

۲- دماستج مخصوص<sup>۴</sup>: دماستج انتخابی باید به گونه‌ای باشد که قادر به خوانش با دقت نزدیک به  $0/5^{\circ}\text{C}$  باشد. (شکل ۲-۳)

۳- ترازوی حساس با دقت ۰/۱ گرم (شکل ۳-۳)

۴- آب مقطر

۵- چراغ شعله با پایه (شکل ۴-۳) و یا دستگاه مکش (شکل ۵-۳)

۶- ظرف تبخير چینی (شکل ۶-۳)

۷- کاردک (شکل ۷-۳)

۸- بطری پلاستیکی (شکل ۸-۳)

۹- گرم کن (شکل ۹-۳)

۱۰- قیف (شکل ۱۰-۳)

۱۱- الک شماره ۴ (شکل ۱۱-۳)

۱. Specific gravity of soil solids

۲. برای کسب اطلاعات دقیق‌تر در رابطه با انواع خاک‌ها، به فصل ششم همین کتاب مراجعه نمایید.

۳. Volumetric flask

۴. Waterproof (Digital) Pocket Thermometer



شکل ۳-۲: دماسنجد



شکل ۳-۱: فلاکس حجمی



شکل ۳-۴: چراغ شعله با پایه



شکل ۳-۳: ترازو با دقت ۰/۱ گرم



شکل ۳-۵: دستگاه مکش



شکل ۳-۷: کاردک



شکل ۳-۶: ظرف تبخیر چینی



شکل ۳-۹: گرم کن



شکل ۸-۳: بطری پلاستیکی



شکل ۱۰-۳: قیف



(ب)

(الف)

شکل ۱۱-۳: (الف) الک شماره ۴؛ (ب) درپوش الک

### ۳-۳) روش انجام آزمایش

- ۱- فلاکس حجمی را با دقیق تریز و آن را خشک می‌کنیم.
- ۲- فلاکس حجمی مرحله قبل را با آب مقطر عاری از هوا تا علامت ۵۰۰ ml به دقت پر می‌کنیم (انتهای هلالی آب باید روی عدد ۵۰۰ ml قرار گیرد) (شکل‌های ۱۲-۳ و ۱۳-۳).

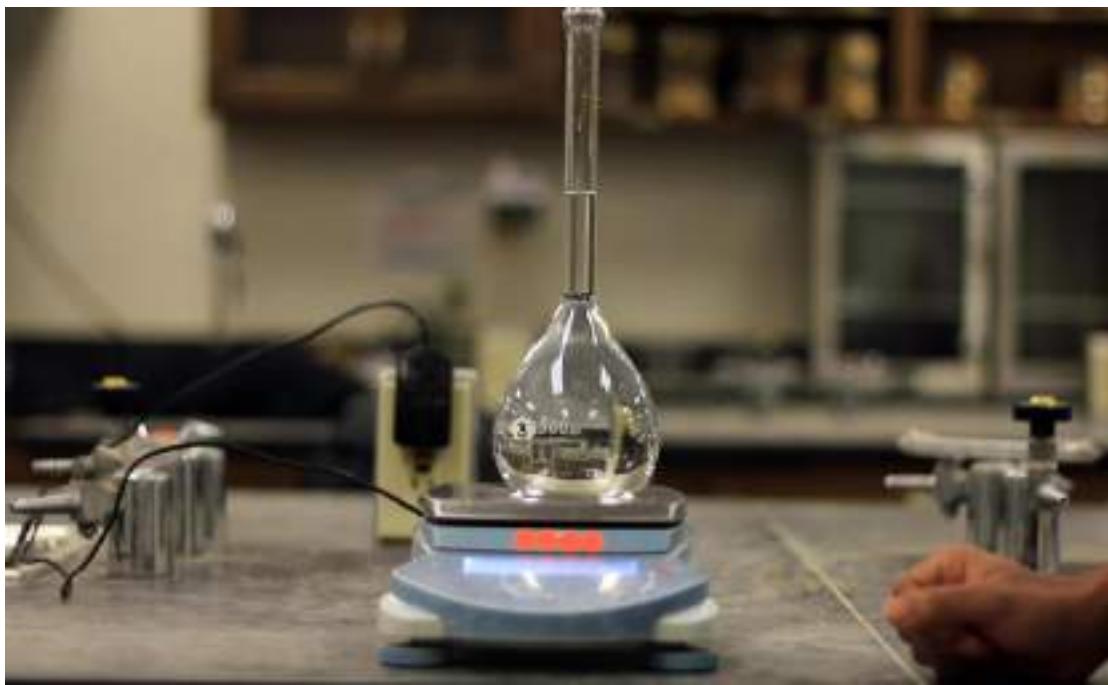


شکل ۱۲-۳: افزودن آب بدون هوا به فلاکس حجمی



شکل ۱۳-۳: شکل نهایی آب مقطر افزوده شده تا علامت مشخص

۳- جرم فلاکس و آب داخل آن را اندازه می‌گیریم ( $M_1$ ) (شکل ۱۴-۳).



شکل ۱۴-۳: اندازه‌گیری جرم فلاکس حجمی به همراه آب درون آن

۴- دماسنجه را داخل فلاکس گذاشته و دمای آب را اندازه می‌گیریم ( $T^{\circ}\text{C}$ ) (شکل ۱۵-۳).



شکل ۱۵-۳: اندازه‌گیری دمای آب فلاکس حجمی

۵- مقداری خاک را برداشته و از الک شماره ۴ عبور می‌دهیم<sup>۱</sup>. این مقدار باید تا حدی باشد که تقریباً ۱۰۰ گرم خاک خشک پس از عبور از الک، در زیر الک باقی بماند. این خاک خشک بدون هوا را داخل ظرف تبخیر قرار می‌دهیم (شکل ۳-۱۶).



شکل ۳-۱۶: برداشتن مقدار ۱۰۰ گرم از نمونه خاک؛ (الف) صفر کردن ترازو؛ (ب) ریختن خاک درون ظرف تبخیر چینی

۶- چنانچه خاک چسبنده باشد، آب مقطر عاری از هوا را به آن اضافه و کاملاً مخلوط می‌کنیم تا خمیر نرمی به دست آید. خاک را به مدت حدود نیم تا یک ساعت در ظرف تبخیر می‌گذاریم تا خیس بخورد (این مرحله برای خاک‌های دانه‌ای غیر چسبنده لازم نیست).

۷- قیف را روی فلاکس حجمی قرار می‌دهیم. خاک (چنانچه دانه‌ای است) و یا خمیر خاک را (چنانچه خاک چسبنده باشد) برداشته و داخل فلاکس حجمی منتقل می‌کنیم (در این مرحله هم می‌توان پیش از ریختن خاک درون فلاکس حجمی، بطربی را به صورت کامل خالی نمود و یا این که مقداری از آب را خالی کرد و سپس خاک را اضافه نمود؛ همانند شکل ۳-۱۷).

<sup>۱</sup> برای جزئیات بیشتر در رابطه با چگونگی الک کردن، به فصل آزمایش دانه‌بندی خاک به روش الک، مراجعه شود.



شکل ۱۷-۳: ریختن خاک به داخل فلاکس حجمی

۸- آب مقطر را به فلاکس حجمی حاوی خاک (خمیر خاک) اضافه می‌کنیم تا حدود دو سوم آن پر شود (شکل ۱۸-۳).



شکل ۱۸-۳: شکل نهایی مخلوط آب- خاک تا ارتفاع حدودی دو سوم فلاکس حجمی

- ۹- در این مرحله باید هوا را از مخلوط خاک و آب خارج نمود. این عمل را می‌توان با یکی از روش‌های زیر انجام داد:
- **روش اول:** فلاکس حاوی مخلوط خاک و آب را به آرامی به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه می‌جوشانیم. هنگام جوشیدن باید فلاکس را به صورت مداوم روی شعله حرارت دهیم تا حرارت به صورت یکسان روی آن پخش شود. (اگر حرارت بیش از حد اعمال شود، ممکن است خاک بجوشد).

- روش دوم: هوای محبوس را به کمک یک پمپ خلاً یا مکش<sup>۱</sup>، خارج می‌کنیم. هنگام این کار، باید فلاکس حجمی را به صورت دورانی تکان داد. عمل خلأگیری را تا زمانی که تمام هوای محبوس شده خارج شود، ادامه می‌دهیم (شکل‌های ۱۹-۳ و ۲۰-۳).
- این مرحله بسیار مهم است؛ زیرا بیشتر اشتباهات موجود در نتایج این آزمایش به دلیل حذف نکردن هوای محبوس شده اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۹-۳: خارج کردن هوای موجود در داخل نمونه آب- خاک



شکل ۲۰-۳: نمونه پیشرفته‌تر از عمل خروج هوای محبوس از داخل نمونه آب - خاک: در این حالت فلاکس حجمی روی دستگاه لرزاننده مخصوص قرار گرفته و از قسمت فوقانی به دستگاه مکش متصل می‌شود.

---

۱. Aspirator

- ۱۰- دمای مخلوط خاک و آب موجود درون فلاکس حجمی را به دمای اتاق می‌رسانیم (یعنی  $T^{\circ}\text{C}$ ).  
 ۱۱- آب مقطر بدون هوا را به فلاکس حجمی اضافه کرده تا زمانی که به علامت ۵۰۰ ml برسد (شکل ۲۱-۳). پس از آن، قسمت بیرونی و داخلی گردنه فلاکس را خشک می‌کنیم.



شکل ۲۱-۳: افزودن آب فاقد هوا به مخلوط آب- خاک تا علامت مشخص

- ۱۲- در این مرحله، جرم فلاکس حجمی همراه با مخلوط خاک و آب را تعیین می‌کنیم ( $M_2$ ) (شکل ۲۲-۳).



شکل ۲۲-۳: اندازه‌گیری جرم مخلوط

- ۱۳- صرفاً جهت اطمینان، دمای مخلوط خاک و آب داخل فلاکس را اندازه می‌گیریم تا بررسی کنیم که آیا مقدار آن  $T^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  هست یا خیر.

۱۴- خاک و آب را در ظرف تبخیر می‌ریزیم. با کمک بطری پلاستیکی، داخل فلاکس را کاملاً می‌شوییم تا مطمئن شویم که هیچ خاکی داخل آن باقی نمانده باشد.

۱۵- ظرف تبخیر را درون گرمکن قرار می‌دهیم تا خاک درون آن خشک شود.

۱۶- جرم خاک خشک موجود در ظرف تبخیر را تعیین می‌نماییم ( $M_s$ ).

#### ۴-۳) محاسبات

۱- چگالی ویژه ( $G_s$ ) در دمای مشخص  $T$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G_{s(T \text{ } ^\circ\text{C})} = \frac{M_s}{M_w} \quad (4-3)$$

جهت معرفی:  $M_s$

جهت آب (در همان حجم خاک):  $M_w$

که در این رابطه مقدار  $M_w$  برابر است با:

$$M_w = (M_1 + M_s) - M_\gamma \quad (3-3)$$

۲- چگالی ویژه معمولاً بر اساس مقدار چگالی آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد گزارش می‌شود؛ بنابراین:

$$G_{s(20^\circ\text{C})} = G_{s(T^\circ\text{C})} \left( \frac{\rho_w(T^\circ\text{C})}{\rho_w(20^\circ\text{C})} \right) = G_{s(T^\circ\text{C})} \times A \quad (4-3)$$

که در این رابطه مقدار  $A$  برابر است با:

$$A = \frac{\rho_w(T^\circ\text{C})}{\rho_w(20^\circ\text{C})} \quad (5-3)$$

مقدار  $A$  را می‌توان از جدول تعیین نمود. نحوه تغییرات مقادیر  $A$  با دما در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

جدول ۲-۳: تغییرات مقادیر  $A$  در دماهای مختلف

$A$	( $T$ $^\circ\text{C}$ ) دما	$A$	( $T$ $^\circ\text{C}$ ) دما
۰/۹۹۹۱	۲۴	۱/۰۰۰۷	۱۶
۰/۹۹۸۸	۲۵	۱/۰۰۰۶	۱۷
۰/۹۹۸۶	۲۶	۱/۰۰۰۴	۱۸
۰/۹۹۸۳	۲۷	۱/۰۰۰۲	۱۹
۰/۹۹۸۰	۲۸	۱/۰۰۰۰	۲۰
۰/۹۹۷۷	۲۹	۰/۹۹۹۸	۲۱
۰/۹۹۷۴	۳۰	۰/۹۹۹۶	۲۲
		۰/۹۹۹۳	۲۳

نمونه‌ای از محاسبات مربوط به آزمایش تعیین چگالی ویژه خاک در جدول ۳-۳ ارائه شده است.

## جدول ۳-۳: نمونه‌ای از محاسبات آزمایش تعیین چگالی ویژه خاک

شماره نمونه: ۲۳

نوع خاک: سیلت ماسه‌دار قهوه‌ای روش

دماه آزمایش: C=۰/۹۹۹۳ ۲۲ °C

حجم فلاکس حجمی در دمای ۲۰ °C: ۵۰۰ ml

محل نمونه‌گیری:

شخص نمونه‌گیری:

تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

شماره آزمایش			مورد
۳	۲	۱	
شماره فلاکس حجمی			
۶۵۲/۰	۶۷۴/۰	۶۶۶/۰	جرم فلاکس حجمی + جرم آب درون آن تا علامت مشخص، $M_1(g)$
۷۰۹/۹۳	۷۳۸/۳	۷۲۲/۰	جرم فلاکس حجمی + جرم آب و خاک درون آن تا علامت مشخص، $M_2(g)$
۹۲/۰	۱۰۳/۰	۹۹/۰	جرم خاک خشک، $M_s(g)$
۳۴/۰/۷	۳۸/۷	۳۷/۰	جرم آب در همان حجم مواد جامد خاک، $M_w(g) = (M_1 + M_s) - M_2$
۲/۷۰	۲/۶۶	۲/۶۸	$G_{s(T\ ^\circ C)} = \frac{M_s}{M_w}$
۲/۷۰	۲/۶۶	۲/۶۸	$G_{s(20^\circ C)} = G_{s(T\ ^\circ C)} \times A$

میانگین:  $G_s = 2/68$ 

## ۳-۵) نکات کلی

۱- همان‌طور که در مرحله ۹ اشاره شد، محتمل‌ترین منبع خطا، هنگام اندازه‌گیری چگالی ویژه ناشی از عدم حذف هوای محبوس در مخلوط خاک و آب است که باعث به دست آمدن  $G_s$  کمتر از مقدار واقعی آن می‌شود. از این‌رو استاندارد ASTM D854 توصیه می‌کند در روش دوم مرحله ۹ آزمایش، برای هوا زدایی کافی نمونه‌های رسی خشک شده در گرم‌کن، حدود ۲ تا ۴ ساعت مکش اعمال شود. با این حال، اگر این آزمایش برای نمایش پروسه و با در نظر گرفتن زمان آزمایشگاهی انجام شود، زمان هواگیری ۳۰ دقیقه‌ای توصیه می‌شود. همچنین توصیه می‌شود که در این موارد، از خاک درشت‌دانه برای بهبود دقت اندازه‌گیری (با توجه به زمان کوتاه خلاً گیری) استفاده شود.

۲- چگالی ویژه مواد جامد خاک توسط کانی‌شناسی خاک<sup>۱</sup> کنترل می‌شود. در خاک‌های درشت‌دانه مانند ماسه‌ها و شن‌ها که کانی‌های کوارتز و فلدسپات در آن‌ها غالب‌اند،  $G_s$  معمولاً حدود ۲/۶۵ است، اما در خاک‌های ریز‌دانه، به دلیل وجود کانی‌های رسی،  $G_s$  متغیرتر است و معمولاً بین ۲/۷۰ تا ۲/۸۵ است.

۳- در غیاب آزمایش‌های آزمایشگاهی،  $G_s$  اغلب بر اساس کانی‌شناسی غالب خاک فرض می‌شود. با این حال، انواع خاصی از خاک‌ها، از جمله خاک‌های آلی، گچ و خاکستر بادی<sup>۲</sup>، دارای مقادیر چگالی ویژه‌ای است که به‌طور قابل توجهی کمتر از محدوده ۲/۸۵-۲/۶۵ است که اغلب توسط مهندسان حرفه‌ای فرض می‌شود؛ بنابراین، هنگام برخورد با چنین خاک‌هایی، اندازه‌گیری  $G_s$  به جای فرض یک مقدار، اهمیت ویژه‌ای دارد.

۴- برای دقت در نتایج به‌دست‌آمده، معمولاً این آزمایش دو الی سه مرتبه برای یک خاک، انجام می‌شود. در این‌گونه موارد (بر اساس استاندارد ASTM D854)، با فرض این‌که همه آزمایش‌ها توسط یک تکنسین آزمایشگاهی انجام شود، باید مقادیر به‌دست‌آمده  $G_s$  برای دو آزمایش جداگانه از یک خاک، در فاصله ۰/۰۶ از یکدیگر باشد تا قابل قبول در نظر گرفته شود.

<sup>1</sup>. Soil mineralogy<sup>2</sup>. Fly ash



## فصل چهارم

### آزمایش دانه‌بندی خاک به روش‌های الک و هیدرومتری

#### (۴-۱) بخش اول: آزمایش دانه‌بندی خاک به روش الک (ASTM D2487)

##### (۴-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

گونه‌های مختلف خاک از ذرات منفرد یا دانه‌ها تشکیل شده است. به منظور طبقه‌بندی یک خاک برای اهداف مهندسی، باید از توزیع اندازه دانه‌ها در یک توده خاک مشخص آگاه بود. دانه‌بندی روشی است که برای تعیین توزیع درصد جرمی اندازه ذرات خاک‌ها استفاده می‌شود. توزیع اندازه ذرات یک خاک درشت‌دانه را می‌توان با روش الک کردن تعیین نمود؛ به‌این‌ترتیب که نمونه خاک از یک سری از الک‌های مشبک استاندارد (جدول ۴-۱) با قطر سوراخ‌های مختلف که از بالا به پایین کاهش می‌یابد، عبور داده می‌شود. جرم خاک باقیمانده روی هر الک تعیین و بر اساس آن، درصد عبوری از هر الک محاسبه می‌شود. اگر ذرات ریزدانه در خاک وجود داشته باشد، نمونه باید با یک ماده پراکنده‌ساز (لخته زدا)<sup>۱</sup> تصفیه و از طریق الک شسته شود. ذکر این نکته نیز ضروری است که روش الک کردن، اطلاعاتی در مورد شکل ذرات ارائه نمی‌دهد.

جدول ۴-۱: شماره و اندازه الک‌ها در استاندارد آمریکایی

قطر سوراخ (mm)	شماره الک	کاربرد
۴/۷۵	۴	مرز بین شن و ماسه
۴/۰۰	۵	
۳/۳۵	۶	
۲/۸۰	۷	
۲/۳۶	۸	
۲/۰۰	۱۰	
۱/۷۰	۱۲	
۱/۴۰	۱۴	
۱/۱۸	۱۶	
۱/۰۰	۱۸	
۰/۸۵	۲۰	
۰/۷۱	۲۵	
۰/۶۰	۳۰	
۰/۵۰	۳۵	
۰/۴۲۵	۴۰	کاربردی برای اکثر آزمایش‌های
۰/۳۵۵	۴۵	
۰/۳۰۰	۵۰	
۰/۲۵۰	۶۰	
۰/۲۱۲	۷۰	
۰/۱۸۰	۸۰	
۰/۱۵۰	۱۰۰	
۰/۱۲۵	۱۲۰	
۰/۱۰۶	۱۴۰	
۰/۰۷۵	۲۰۰	مرز بین خاک درشت‌دانه و ریزدانه
۰/۰۵۳	۲۷۰	
۰/۰۳۸	۴۰۰	

<sup>۱</sup>. Deflocculating agent

#### ۴-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- الک‌ها: معمولاً برای اکثر دانه‌بندی‌ها از الک‌های شماره ۴، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۱۴۰ و ۲۰۰ استفاده می‌شود (شکل ۴-۱)

۲- زیر الک (شکل ۴-۲)

۳- دریوش الک (شکل ۴-۳)

۴- ترازو با دقیق ۰/۱ گرم (شکل ۴-۴)

۵- هاون و میله با نوک پلاستیکی<sup>۱</sup> (شکل ۴-۵)

۶- گرم کن<sup>۲</sup> (شکل ۴-۶)

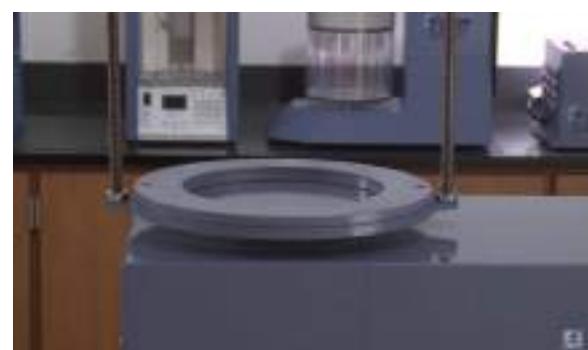
۷- لرزاننده مکانیکی مخصوص دانه‌بندی<sup>۳</sup>



شکل ۴-۱: الک در اندازه‌های مختلف



شکل ۴-۳: دریوش



شکل ۴-۲: زیر الک

<sup>1</sup> Mortar and rubber-tipped pestle

<sup>2</sup> Oven

<sup>3</sup> Mechanical sieve shaker



شکل ۴-۵: هاون و میله با نوک پلاستیکی



شکل ۴-۴: ترازو با دقت ۰/۱ گرم



شکل ۴-۶: گرم کن

#### ۳-۱-۴) روش انجام آزمایش

- ۱- مقدار مشخصی از نمونه خاکی را که می‌خواهیم دانه‌بندی کنیم، جهت خشک شدن در گرم کن قرار می‌دهیم. مقدار جرم انتخابی برای خاک‌هایی که بزرگ‌ترین دانه آن‌ها به اندازه قطر سوراخ الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) است، حدود ۵۰۰ گرم است و برای خاک‌هایی دارای دانه‌های بزرگ‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر، مقدار جرم بیشتری مورد نیاز است.
- ۲- چنانچه در نمونه خاک، کلوخه و دانه‌های به هم چسبیده وجود داشته باشد، با استفاده از هاون و میله پلاستیکی، آن‌ها را از هم جدا می‌کنیم. هدف از این کار به هیچ‌وجه خرد کردن خود ذرات نیست.
- ۳- جرم نمونه را به طور دقیق با ترازو می‌سنجیم ( $M_1$ ).
- ۴- جرم تمامی الک‌های موجود را نیز با کمک ترازو، اندازه می‌گیریم ( $M_2$ ).
- ۵- الک‌ها را به ترتیب از قطر بزرگ (که معمولاً الک شماره ۴ است، در بالاترین قسمت) به قطر کوچک (که معمولاً الک شماره ۲۰۰ است، در پایین‌ترین قسمت) روی هم قرار می‌دهیم (شکل ۷-۴). در این آزمایش، ترتیب

قرارگیری الک‌ها از بالا به پایین عبارت است از: الک با شماره‌های ۴، ۱۰، ۲۰، ۶۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۲۰۰. در زیر الک ۲۰۰، یک ظرف (زیر الک) جهت جمع‌آوری خاک‌های ریزدانه عبوری قرار می‌گیرد (شکل ۴-۲).



شکل ۷-۴: نمونه‌ای از چیدمان الک‌ها

۶- نمونه‌های تهیه شده در مرحله ۲ را از بالا درون الک‌ها می‌ریزیم (شکل ۴-۸). سپس درپوش الک بالایی را می‌گذاریم (شکل ۴-۹).



شکل ۸-۴: ریختن نمونه خاک درون الک‌ها



شکل ۹-۴: بستن درپوش ظرف و قرار دادن در دستگاه لرزاننده

۷- الکها را بر روی دستگاه لرزاننده به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه، الک می‌کنیم (شکل ۱۰-۴).



شکل ۱۰-۴: الکها پس از جایگذاری در دستگاه لرزاننده

۸- دستگاه را خاموش و الکها را جدا می‌کنیم.

۹- جرم هر الک و خاک مانده روی آن را به کمک ترازو تعیین می‌کنیم ( $M_۳$ ). سپس از تفاضل دو مقدار  $M_۲$  و  $M_۱$ ، مقدار جرم مانده روی هر الک را محاسبه می‌کنیم ( $M_۴$ ).

۱۰- چنانچه مقدار زیادی از خاک سیلتی یا رسی روی الک ۲۰۰ مانده باشد، باید الک مذکور را به همراه خاک مانده روی آن شست (شکل ۱۱-۴) و این روند تا زمانی که آبی که از الک ۲۰۰ رد می‌شود شفاف و بدون ذرات خاک شود، ادامه می‌یابد. پس از این مرحله، خاک مانده روی الک ۲۰۰ را بار دیگر در گرم‌کن خشک و جرم مانده روی الک ۲۰۰ را در این مرحله به کمک ترازو تعیین می‌کنیم ( $M_۵$ ). تفاضل مقادیر  $M_۴$  و  $M_۵$ ، مقدار خاک شسته شده را نشان می‌دهد که این مقدار باید به جرم مانده در زیر الک اضافه شود.



شکل ۴-۱۱: شستن الک شماره ۲۰۰

**۴-۱-۴) محاسبات****۱- تعیین درصد عبوری**۱- درصد خاک مانده روی الک  $n$  ام (از بالا به پایین):

$$\frac{\text{جرم خاک مانده}}{\text{جرم کل}} = \frac{100}{\text{درصد خاک مانده روی الک } n \text{ ام}} \quad (1-4)$$

۲- درصد خاک مانده روی کل الکها تا  $n$  امین الک:

$$\sum_{i=1}^{i=n} R_n = \text{درصد خاک مانده روی کل الکها} \quad (2-4)$$

۳- درصد عبوری از هر الک:

$$100 - \sum_{i=1}^{i=n} R_n = \text{درصد عبوری} \quad (3-4)$$

نمونه‌ای از محاسبات مربوط به آزمایش دانه‌بندی خاک به روش الک در جدول ۴-۲-۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۲: نمونه‌ای از محاسبات آزمایش دانه‌بندی خاک به روش الک  
نوع خاک: ماسه با مقداری رسیدانه  
شماره نمونه: ۲  
 $M = 500 \text{ g}$

محل نمونه‌گیری:

شخص نمونه‌گیری:

تاریخ نمونه‌گیری:

درصد عبوری	مجموع درصد مانده تا الک $\pi/4$ م	درصد مانده روی هر الک	جرم مانده روی هر الک (g)	قطر سوراخ الک (mm)	شماره الک
۱۰۰/۰	۰	۰	۰	۴/۷۵	۴
۹۲/۰	۸/۰	۸/۰	۴۰/۲	۲/۰۰	۱۰
۷۵/۱	۲۴/۹	۱۶/۹	۸۴/۶	۰/۸۵۰	۲۰
۶۵/۱	۳۴/۹	۱۰/۰	۵۰/۲	۰/۶۰۰	۳۰
۵۷/۱	۴۲/۹	۸/۰	۴۰/۰	۰/۴۲۵	۴۰
۳۵/۸	۶۴/۲	۲۱/۳	۱۰۶/۴	۰/۲۵۰	۶۰
۱۴/۰	۸۶/۰	۲۱/۸	۱۰۸/۸	۰/۱۰۶	۱۴۰
۲/۱	۹۷/۹	۱۱/۹	۵۹/۴	۰/۰۷۵	۲۰۰
			۸/۷	-	زیر الک

### ۲- محاسبه درصد خطای:

$$M_1 = \sum (0 + 40/2 + 84/6 + 50/2 + 40 + 106/4 + 108/8 + 59/4 + 8/7) = 498/3 \text{ g} \quad (4-4)$$

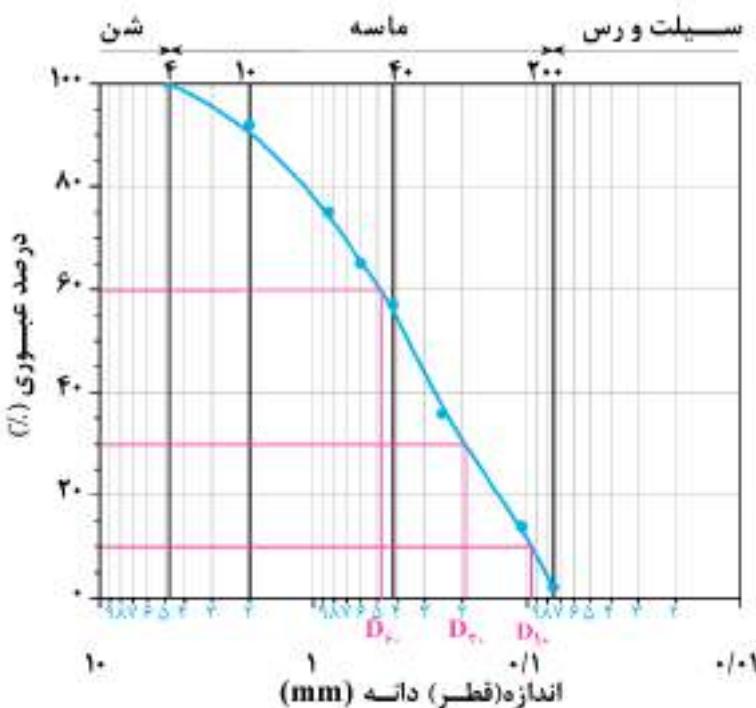
$$\left( \text{از } ۲\% \text{ کمتر است لذا قابل قبول است.} \right) \times 100 = ۰/۳۴ \% \quad \text{درصد خطای} \quad (5-4)$$

### ۳- رسم منحنی دانه‌بندی

منحنی تغییرات درصد عبوری بر حسب لگاریتم اندازه قطر سوراخ الکها را روی یک کاغذ نیمه‌لگاریتمی یا توسط نرم‌افزارهای ترسیمی کامپیوترا مانند اکسل<sup>۱</sup>، اوریجین<sup>۲</sup>... رسم می‌کنیم (شکل ۴-۱۲).

۱. Excel

۲. Origin



شکل ۱۲-۴: ترسیم نمودار دانه‌بندی بر اساس داده‌های جدول ۲-۴

۴- تعیین ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب انحنا ( $C_c$ )

مقادیر  $D_{10}$ .  $D_{50}$ . و  $D_{90}$ . (شکل ۱۲-۴) را که به ترتیب به قطرهای ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد عبوری مربوط است از روی نمودار می‌خوانیم (اندازه خوانده شده از نمودار مثلاً برای  $D_{10}$ . به این معناست که ۱۰ درصد از الک مشخص شده عبور کرده است یا به عبارت دیگر ۱۰ درصد از دانه‌های خاک، قطری کوچک‌تر از شماره الک خوانده شده روی نمودار دارد). سپس مقادیر ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب انحنا ( $C_c$ ) را با استفاده از روابط زیر تعیین می‌کنیم:

$$C_u = \frac{D_{50.}}{D_{10.}} \quad (6-4)$$

$$C_c = \frac{(D_{50.})^2}{D_{50.} \times D_{10.}} \quad (7-4)$$

به عنوان مثال، از شکل ۱۲-۴،  $D_{10.} = ۰/۰۹۸ mm$  و  $D_{50.} = ۰/۲۱ mm$ .  $D_{90.} = ۰/۴۸ mm$ . به دست می‌آید، لذا می‌توان نوشت:

$$C_u = \frac{۰/۴۸}{۰/۰۹۸} = ۴/۹۰ \quad (8-4)$$

$$C_c = \frac{(۰/۲۱)^2}{۰/۴۸ \times ۰/۰۹۸} = ۰/۹۴ \quad (9-4)$$

## ۴-۱-۵) نکات کلی

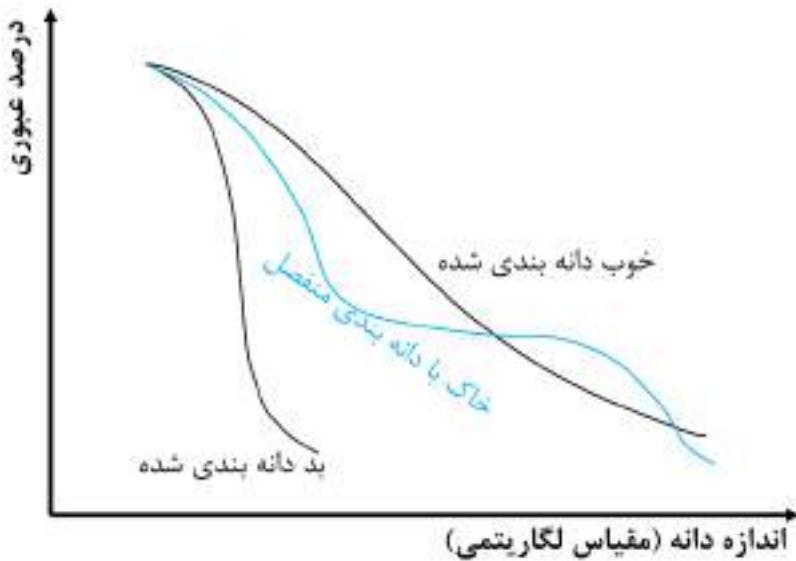
۱- قطر  $D_{10.}$  که در قسمت قبل توضیح داده شد، اندازه مؤثر نامیده می‌شود و در روابط تجربی بسیاری مانند ضریب نفوذپذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال:

رابطه هازن (۱۸۹۵) برای تخمین نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت:

$$k = ۰/۰۱ \times D_{10.}^2 \quad (10-4)$$

۲- ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) پارامتری است که محدوده توزیع اندازه دانه‌ها را نشان می‌دهد. اگر  $C_u$  نسبتاً بزرگ باشد، نشان‌دهنده آن است که خاک خوب دانه‌بندی شده است. اگر  $C_u$  تقریباً برابر با یک باشد، به این معنی است که اندازه دانه‌های خاک تقریباً برابر است و خاک را می‌توان بد دانه‌بندی شده نامید. شکل ۱۳-۴ شمای کلی منحنی‌های دانه‌بندی را برای خاک‌های خوب دانه‌بندی شده و بد دانه‌بندی شده نشان می‌دهد. در برخی موارد، یک خاک ممکن است ترکیبی از دو یا چند بخش یکنواخت دانه‌بندی شده باشد که به این خاک اصطلاحاً «خاک با دانه‌بندی منفصل<sup>۱</sup>» گفته می‌شود. منحنی دانه‌بندی خاک‌های منفصل نیز در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده است.

۳- از قطرهای  $D_{15}$  و  $D_{85}$  برای طراحی فیلترها استفاده می‌شود. همچنین از اندازه  $D_5$  در روابط مربوط به پتانسیل روانگرایی خاک دانه‌ای اشباع در هنگام زلزله استفاده می‌شود.



شکل ۱۳-۴: شمای کلی دانه‌بندی خاک‌های خوب دانه‌بندی شده، بد دانه‌بندی شده و با دانه‌بندی منفصل

<sup>1</sup>. Gap-graded soil

#### ۴-۲) بخش دوم: آزمایش دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتری (ASTM D2487)

##### ۴-۲-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

منحنی دانه‌بندی خاک را نمی‌توان به طور قابل اعتمادی برای ذرات کوچک‌تر از الک شماره ۲۰۰ (کمتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) با استفاده از روش الک کردن تعیین نمود؛ زیرا ذرات رسی در خاک تشکیل کلوخه می‌دهد و نمی‌تواند به طور جداگانه از صفحه‌ها عبور کند. با این حال می‌توان این بخش از منحنی دانه‌بندی را با استفاده از روش هیدرومتری به دست آورد. در این روش، کمترین اندازه دانه‌ای که می‌توان دانه‌بندی نمود در حدود ۰/۰۰۱ میلی‌متر است.

آزمایش هیدرومتری بر اساس قانون استوکس<sup>۱</sup> طراحی شده است. قانون استوکس در مکانیک سیالات به صورت زیر بیان می‌شود: «اگر ذرات کروی شکل با قطرهای مختلف داخل سیالی ریخته شود، ذرات بزرگ‌تر (با قطر بیشتر) سریع‌تر از ذرات ریزتر (با قطر کوچک‌تر) در سیال تهنشین می‌شود». با این فرض، نمونه‌ای از خاک در آب پخش و پراکنده شده و به تدریج دانه‌های خاک بسته به قطرشان، یک‌به‌یک رسوب می‌کند. سرعت تهنشینی دانه‌ها بر اساس قانون استوکس طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\nu = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \quad (10-4)$$

$\nu$ : سرعت ( $\frac{cm}{s}$ )

$\rho_s$ : چگالی دانه‌های جامد خاک ( $\frac{g}{cm^3}$ )

$\rho_w$ : چگالی آب ( $\frac{g}{cm^3}$ )

$\eta$ : لزجت آب ( $\frac{g.s}{cm^2}$ )

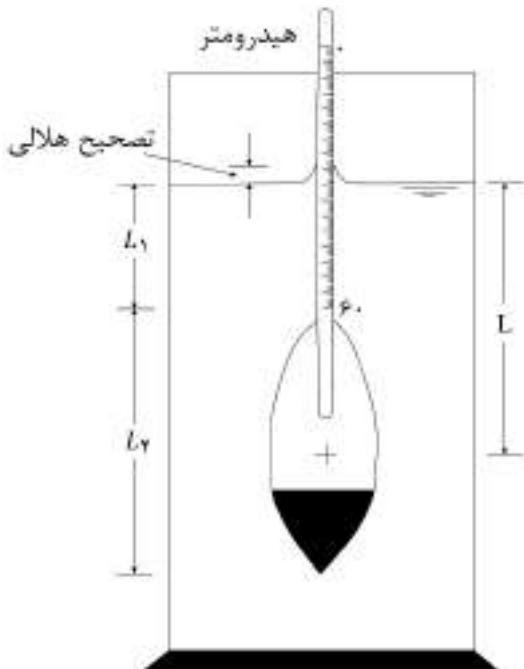
$D$ : قطر دانه خاک (mm)

جدول ۳-۴ تغییرات چگالی و لزجت آب با دما را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴: تغییرات چگالی و لزجت آب با دما

$\eta (\frac{g.s}{cm^2})$	$\rho_w (\frac{g}{cm^3})$	دما (C°)
۰/۰۰۰۰۱۶	۱	۴
۰/۰۰۰۰۱۱۳	۰/۹۹۸۹۷	۱۶
۰/۰۰۰۰۱۱۱	۰/۹۹۸۸۰	۱۷
۰/۰۰۰۰۱۰۸	۰/۹۹۸۶۲	۱۸
۰/۰۰۰۰۱۰۵	۰/۹۹۸۴۴	۱۹
۰/۰۰۰۰۱۰۲	۰/۹۹۸۲۳	۲۰
۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۹۸۰۲	۲۱
۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۹۹۸۷۰	۲۲
۰/۰۰۰۰۹۵	۰/۹۹۷۶۷	۲۳
۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۹۹۷۳۳	۲۴
۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۹۹۷۰۸	۲۵
۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۹۹۶۸۲	۲۶
۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۹۹۶۵۵	۲۷
۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۹۹۶۲۷	۲۸
۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۹۹۵۹۸	۲۹
۰/۰۰۰۰۸۲	۰/۹۹۵۶۸	۳۰

۱. Stoke's law



شکل ۱۴-۴: هیدرومتر معلق در آبی که خاک در آن پراکنده شده است.

اگر هم زمان با پخش خاک در آب، یک هیدرومتر در آب به حالت معلق قرار گیرد (شکل ۱۴-۴)، به کمک آن، چگالی ویژه مخلوط سوسپانسیون<sup>۱</sup> آب-خاک در یک عمق  $L$  (عمق مؤثر) تعیین می‌شود؛ بنابراین در زمان  $t$  دقیقه پس از شروع آزمایش، دانه‌های خاک در زیر محل اندازه‌گیری (پایین‌تر از عمق مؤثر  $L$ )، تنهشین می‌شود. طبق قانون استوکس، نسبت برابر است با:

$$\frac{L \text{ (cm)}}{t \text{ (min)} \times 60} = \frac{(\rho_s - \rho_w) \left( \frac{g}{cm^3} \right)}{18 \eta \left( \frac{g \cdot s}{cm^2} \right)} \times \left( \frac{D \text{ (mm)}}{10} \right)^2 \quad (11-4)$$

با طرفین - وسطین کردن و ساده‌سازی رابطه ۱۱-۴، قطر ذرات تنهشین شده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D \text{ (mm)} = \frac{10}{\sqrt{60}} \times \sqrt{\frac{18 \eta}{(\rho_s - \rho_w)}} \times \sqrt{\frac{L}{t}} = A \sqrt{\frac{L \text{ (cm)}}{t \text{ (min)}}} \quad (12-4)$$

که در رابطه ۱۲-۴ مقدار  $A$  برابر خواهد بود با:

$$A = \sqrt{\frac{1800 \eta}{60(\rho_s - \rho_w)}} = \sqrt{\frac{30 \eta}{(\rho_s - \rho_w)}} \quad (13-4)$$

در این آزمایش، معمولاً از هیدرومتر نوع ASTM-152H استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۴-۴ مشخص است، مقدار  $L$  بر اساس قرائت هیدرومتر (که در نوع ASTM-152H از ۰ تا ۶۰ درجه‌بندی شده است)، تغییر می‌کند. مقدار  $L$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$L = L_1 + \frac{1}{2} (L_2 - \frac{V_B}{A_c}) \quad (14-4)$$

<sup>۱</sup>. سوسپانسیون مخلوط ناهمگنی از یک مایع به همراه ذرات جامد به اندازه کافی بزرگ به حالت معلق است که در نهایت و پس از زمان طولانی، ذرات جامد تنهشین می‌شود؛ اما این محلول فقط در صورت تعلیق ذرات حل شونده، سوسپانسیون نامیده می‌شود.

که در رابطه فوق،  $L_1$  فاصله بین بالای حباب هیدرومتر تا علامت برای خواندن هیدرومتر در سطح آب است. برای یک قرائت صفر هیدرومتر، مقدار  $L_1$  برابر با  $10/5$  سانتی‌متر و همچنین برای یک قرائت  $g/L$  هیدرومتر، مقدار  $L_1$  برابر با  $2/3$  سانتی‌متر است؛ بنابراین، به طور کلی، برای یک قرائت معین هیدرومتر، مقدار  $L_1$  برابر است با:

$$L_1(cm) = 10/5 - \left( \frac{10/5 - 2/3}{5} \right) \times (\text{قرائت هیدرومتر}) \quad (15-4)$$

و همچنین سایر پارامترهای تعریف شده در رابطه ۱۴-۴ برابر است با:

$$L_2 = \text{طول کلی حباب هیدرومتر} = 14 cm \quad (16-4)$$

$$V_B = \text{حجم حباب هیدرومتر} = 67 cm^3 \quad (17-4)$$

$$A_c = \text{مساحت سطح مقطع استوانه هیدرومتر} = 27/8 cm^2 \quad (18-4)$$

بر اساس رابطه ۱۴-۴، تغییرات  $L$  با قرائت‌های هیدرومتر در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

برای انجام محاسبات همچنین لازم است تا مقدار  $A$  که به وسیله رابطه ۱۳-۴ داده شده است، تعیین شود. از رابطه چگالی ویژه دانه‌های جامد خاک ( $G_s$ ) داریم:

$$\rho_s = G_s \times \rho_w \quad (19-4)$$

بنابراین با جایگذاری رابطه ۱۹-۴ در رابطه ۱۳-۴ داریم:

$$A = \sqrt{\frac{30 \cdot \eta}{(G_s - 1)\rho_w}} \quad (20-4)$$

به عنوان مثال، یک نمونه از محاسبه مقدار  $A$  در ادامه آورده شده است. بر اساس جدول ۴-۳، اگر درجه حرارت آب  $25^\circ C$  باشد، داریم:

$$\eta = 0.911 \times 10^{-4} \left( \frac{g \cdot S}{cm^2} \right) \quad (21-4)$$

$$\rho_w = 0.99708 \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad (22-4)$$

و با در نظر گرفتن  $G_s = 2/7$  داریم:

$$A = \sqrt{\frac{30 \times (0.911 \times 10^{-4})}{(2/7 - 1)(0.99708)}} = 0.127 \quad (23-4)$$

تغییرات  $A$  با  $G_s$  و درجه حرارت آب در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴: تغییرات L با قرائت هیدرومتر نوع H ASTM 152-H

L(cm)	قرائت هیدرومتر	L(cm)	قرائت هیدرومتر
۱۲/۰	۲۶	۱۶/۳	.
۱۱/۹	۲۷	۱۶/۱	۱
۱۱/۷	۲۸	۱۶/۰	۲
۱۱/۵	۲۹	۱۵/۸	۳
۱۱/۴	۳۰	۱۵/۶	۴
۱۱/۲	۳۱	۱۵/۵	۵
۱۱/۱	۳۲	۱۵/۳	۶
۱۰/۹	۳۳	۱۵/۲	۷
۱۰/۷	۳۴	۱۵/۰	۸
۱۰/۶	۳۵	۱۴/۸	۹
۱۰/۴	۳۶	۱۴/۷	۱۰
۱۰/۳	۳۷	۱۴/۵	۱۱
۱۰/۱	۳۸	۱۴/۳	۱۲
۹/۹	۳۹	۱۴/۲	۱۳
۹/۷	۴۰	۱۴/۰	۱۴
۹/۶	۴۱	۱۳/۸	۱۵
۹/۴	۴۲	۱۳/۷	۱۶
۹/۲	۴۳	۱۳/۵	۱۷
۹/۱	۴۴	۱۳/۳	۱۸
۸/۹	۴۵	۱۳/۲	۱۹
۸/۸	۴۶	۱۳/۰	۲۰
۸/۶	۴۷	۱۲/۹	۲۱
۸/۴	۴۸	۱۲/۷	۲۲
۸/۳	۴۹	۱۲/۵	۲۳
۸/۱	۵۰	۱۲/۴	۲۴
۷/۹	۵۱	۱۲/۲	۲۵

جدول ۴-۵: تغییرات A با G<sub>s</sub> و دمای آب

(°C) دما	G <sub>s</sub>									
	۲/۴۵	۲/۵۰	۲/۵۵	۲/۶۰	۲/۶۵	۲/۷۰	۲/۷۵	۲/۸۰	۲/۸۵	
۱۶	-/-۱۵۱۰	-/-۱۵۰۵	-/-۱۴۸۱	-/-۱۴۵۷	-/-۱۴۳۵	-/-۱۴۱۴	-/-۱۳۹۴	-/-۱۳۷۴	-/-۱۳۵۶	
۱۷	-/-۱۵۱۱	-/-۱۴۸۶	-/-۱۴۶۲	-/-۱۴۳۹	-/-۱۴۱۷	-/-۱۳۹۶	-/-۱۳۷۶	-/-۱۳۵۶	-/-۱۳۳۸	
۱۸	-/-۱۴۹۲	-/-۱۴۶۷	-/-۱۴۴۳	-/-۱۴۲۱	-/-۱۳۹۹	-/-۱۳۷۸	-/-۱۳۵۹	-/-۱۳۳۹	-/-۱۳۲۱	
۱۹	-/-۱۴۷۴	-/-۱۴۴۹	-/-۱۴۲۵	-/-۱۴۰۳	-/-۱۳۸۲	-/-۱۳۶۱	-/-۱۳۴۲	-/-۱۳۲۲	-/-۱۳۰۵	
۲۰	-/-۱۴۵۶	-/-۱۴۳۱	-/-۱۴۰۸	-/-۱۳۸۶	-/-۱۳۶۵	-/-۱۳۴۴	-/-۱۳۲۵	-/-۱۳۰۷	-/-۱۲۸۹	
۲۱	-/-۱۴۳۸	-/-۱۴۱۴	-/-۱۳۹۱	-/-۱۳۶۹	-/-۱۳۴۸	-/-۱۳۲۸	-/-۱۳۰۹	-/-۱۲۹۱	-/-۱۲۷۳	
۲۲	-/-۱۴۲۱	-/-۱۳۹۷	-/-۱۳۷۴	-/-۱۳۵۳	-/-۱۳۳۲	-/-۱۳۱۲	-/-۱۲۹۴	-/-۱۲۷۶	-/-۱۲۵۸	
۲۳	-/-۱۴۰۴	-/-۱۳۸۱	-/-۱۳۵۸	-/-۱۳۳۷	-/-۱۳۱۷	-/-۱۲۹۷	-/-۱۲۷۹	-/-۱۲۶۱	-/-۱۲۴۳	
۲۴	-/-۱۳۸۸	-/-۱۳۶۵	-/-۱۳۴۲	-/-۱۳۲۱	-/-۱۳۰۱	-/-۱۲۸۲	-/-۱۲۶۴	-/-۱۲۴۶	-/-۱۲۲۹	
۲۵	-/-۱۳۷۲	-/-۱۳۴۹	-/-۱۳۲۷	-/-۱۳۰۶	-/-۱۲۸۶	-/-۱۲۶۷	-/-۱۲۴۹	-/-۱۲۳۲	-/-۱۲۱۵	
۲۶	-/-۱۳۵۷	-/-۱۳۳۴	-/-۱۳۱۲	-/-۱۲۹۱	-/-۱۲۷۲	-/-۱۲۵۳	-/-۱۲۳۵	-/-۱۲۱۸	-/-۱۲۰۱	
۲۷	-/-۱۳۴۲	-/-۱۳۱۹	-/-۱۲۹۷	-/-۱۲۷۷	-/-۱۲۵۸	-/-۱۲۳۹	-/-۱۲۲۱	-/-۱۲۰۴	-/-۱۱۸۸	
۲۸	-/-۱۳۲۷	-/-۱۳۰۴	-/-۱۲۸۳	-/-۱۲۶۴	-/-۱۲۴۴	-/-۱۲۰۵	-/-۱۱۸۰	-/-۱۱۹۱	-/-۱۱۷۵	
۲۹	-/-۱۳۱۲	-/-۱۲۹۰	-/-۱۲۶۹	-/-۱۲۴۹	-/-۱۲۳۰	-/-۱۲۱۲	-/-۱۱۹۵	-/-۱۱۷۸	-/-۱۱۶۲	
۳۰	-/-۱۲۹۸	-/-۱۲۷۶	-/-۱۲۵۶	-/-۱۲۳۶	-/-۱۲۱۷	-/-۱۱۹۹	-/-۱۱۸۲	-/-۱۱۶۵	-/-۱۱۴۹	

هیدرومتر نوع ASTM 152-H در دمای  $20^{\circ}C$  تا مقدار قرائت ۶۰، برای خاک‌های دانه‌ای با  $G_s = 65/2$  کالیبره شده است. به عنوان مثال، قرائت عدد ۳۰ هیدرومتر در یک زمان مشخص به معنای آن است که ۳۰ گرم از دانه‌های جامد خاک ( $G_s = 2/65$ ) در ۱۰۰۰ سی‌سی از مخلوط خاک - آب، در دمای حرارت  $20^{\circ}C$  در عمقی که چگالی مخلوط سوسپانسیون آب - خاک اندازه گرفته می‌شود (L)، به حالت معلق وجود دارد. اکنون با این اندازه‌گیری می‌توان درصد خاکی را که هنوز در زمان t از شروع آزمایش به حالت معلق است و مقدار ذرات دارای قطر کمتر از D محاسبه شده از رابطه  $12-4$  را تعیین نمود. با این وجود، لازم است در کارهای آزمایشگاهی واقعی، تصحیحی برای اعداد خوانده‌شده از هیدرومتر به کار رود. این تصحیح‌ها به قرار زیر است:

۱- تصحیح دما ( $F_T$ ): در حالاتی ممکن است دمای واقعی آزمایش  $20^{\circ}C$  نباشد که در این صورت رابطه تقریبی

تصحیح دما ( $F_T$ ) به صورت زیر خواهد بود:

$$F_T = -\frac{4}{85} + \frac{0.25T}{28^{\circ}C \text{ تا } 15^{\circ}C \text{ تا } 28^{\circ}C} \quad (24-4)$$

$F_T$ : تصحیح دما برای قرائت خوانده‌شده (می‌تواند مثبت یا منفی باشد)

T: دمای آزمایش بر حسب  $^{\circ}C$

۲- تصحیح هلالی ( $F_m$ ): معمولاً قسمت بالای سطح هلالی آب که مماس به هیدرومتر است، به عنوان عدد آزمایش خوانده می‌شود ( $F_m$  همواره مثبت است).

۳- تصحیح صفر ( $F_z$ ): برای آماده‌سازی آزمایش، یک ماده پراکنده‌ساز به مخلوط سوسپانسیون آب قطر - خاک اضافه می‌گردد. این مسئله باعث می‌شود وقتی هیدرومتر درون آب قطر قرار می‌گیرد، روی صفر نایستد ( $F_z$  می‌تواند مثبت یا منفی باشد).

#### ۴-۲-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- هیدرومتر از نوع ASTM 152-H (شکل ۱۵-۴)

۲- مخلوط‌کن (شکل ۱۶-۴)

۳- دو استوانه مدرج به حجم ۱۰۰۰ سی‌سی (شکل ۱۷-۴)

۴- دماسنج (شکل ۱۸-۴)

۵- ظرف، جهت ثابت نگهداشت درجه حرارت<sup>۱</sup> (شکل ۱۹-۴)

۶- ماده پراکنده‌ساز (هگزا متافسفات سدیم)<sup>۲</sup> (شکل ۲۰-۴)

۷- کاردک (شکل ۲۱-۴)

۸- جام (شکل ۲۲-۴)

۹- ترازو (شکل ۲۳-۴)

۱۰- بطری پلاستیکی (شکل ۲۴-۴)

۱۱- آب قطر

۱۲- درپوش

شکل کلی وسایل مورد نیاز برای انجام این آزمایش در شکل ۲۵-۴ آورده شده است.

۱. Constant temperature bath

۲. NaPO<sub>3</sub>



شکل ۴-۱۶: مخلوطکن



شکل ۴-۱۵: هیدرومتر از نوع ASTM 152-H



شکل ۴-۱۸: دماسنچ



شکل ۴-۱۷: استوانه مدرج به حجم ۱۰۰۰ سی سی



شکل ۱۹-۴: ظرف جهت ثابت نگهداشتن درجه حرارت



شکل ۲۱-۴: کاردک



شکل ۲۰-۴: ماده پراکنده‌ساز



(ب)



(الف)

شکل ۲۲-۴: جام مخلوطکن: (الف) شکل کلی؛ (ب) نمای داخلی



شکل ۲۴-۴: بطری پلاستیکی



شکل ۲۳-۴: ترازو



شکل ۲۵-۴: شکل کلی وسایل مورد نیاز برای آزمایش هیدرومتری

#### ۳-۲-۴) روش انجام آزمایش

تذکر: این روش زمانی استفاده می‌شود که بیش از ۹۰ درصد خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کرده باشد.  
۱- ۵۰ گرم از خاک کاملاً دانه‌دانه شده و خشک شده در گرم کن را تهیه می‌کنیم (شکل ۲۶-۴).



شکل ۲۶-۴: برداشتن ۵۰ گرم خاک خشک عبوری از الک شماره ۲۰۰

۲- یک ماده پراکنده‌ساز (معمولًاً محلول ۴٪ هگزا متافسفات سدیم - کالگون) تهیه می‌کنیم. این محلول را می‌توان با اضافه کردن ۴۰ گرم کالگون در ۱۰۰۰ سی سی آب م قطر و مخلوط کردن کامل آن به دست آورد.

۳- از مخلوط تهیه شده در مرحله ۲، مقدار ۱۲۵ سی سی تهیه کرده و در داخل جام، به خاک مرحله شماره ۱ اضافه می کنیم (شکل های ۲۷-۴ و ۲۸-۴) و به صورت دستی هم می زنیم (شکل ۲۹-۴). بین ۸ تا ۱۲ ساعت صبر می کنیم تا خاک کاملاً خیس بخورد.



شکل ۲۷-۴: ریختن مخلوط ۴٪ هگزاماتافسفات سدیم به داخل جام



شکل ۲۹-۴: مخلوط کردن مخلوط ۴٪ ماده پراکندهساز و خاک



شکل ۲۸-۴: ریختن خاک به داخل جام محتوى مخلوط ۴٪ هگزاماتافسفات سدیم

۴- یک استوانه مدرج ۱۰۰۰ سی سی را برداشته و ۱۲۵ سی سی مخلوط ماده پراکندهساز (هگزا متافسفات سدیم) (شکل ۴-۳۰) را همراه ۸۷۵ سی سی آب مقطر در آن می ریزیم (شکل ۳۱-۴) که درنهایت مخلوط به دست آمده به صورت شکل ۳۲-۴ خواهد بود و پس از آن، مخلوط را کاملاً هم می زنیم ( محلول شاهد).



شکل ۳۰-۴: ریختن ۱۲۵ سی سی مخلوط ماده برآکنده‌ساز در استوانه مدرج



شکل ۳۱-۴: افزودن ۸۷۵ سی سی آب مقطر به استوانه مدرج



شکل ۳۲-۴: پر کردن استوانه مدرج تا مقدار ۱۰۰۰ سی سی ( محلول شاهد )

۵- استوانه مرحله ۴ را درون ظرف آبی با درجه حرارت ثابت<sup>۱</sup>، قرار داده و درجه حرارت ظرف،  $T$  را برحسب درجه سانتی گراد یادداشت می کنیم.

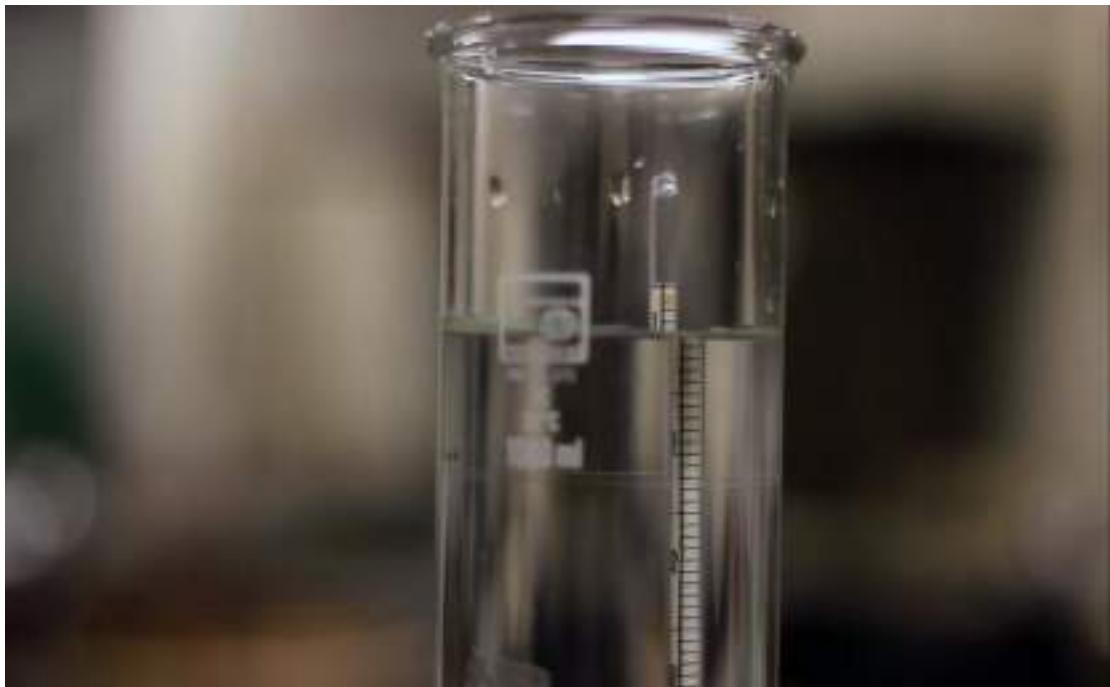
۶- هیدرومتر را در استوانه مدرج ( مرحله ۵ ) قرار داده ( شکل ۳۳-۴ ) و عدد به دست آمده ( شکل ۳۴-۴ ) را یادداشت می کنیم ( توجه: عدد بالای هلالی باید خوانده شود؛ همانند شکل ۴-۳۵ ). این همان تصحیح صفر ( $F_Z$ ) است که می تواند مثبت یا منفی باشد. همچنین تصحیح هلالی ( $F_m$ ) را نیز تعیین می کنیم ( فاصله بین قسمت بالای هلالی و پایین هلالی بر حسب درجات ظرف مدرج ).



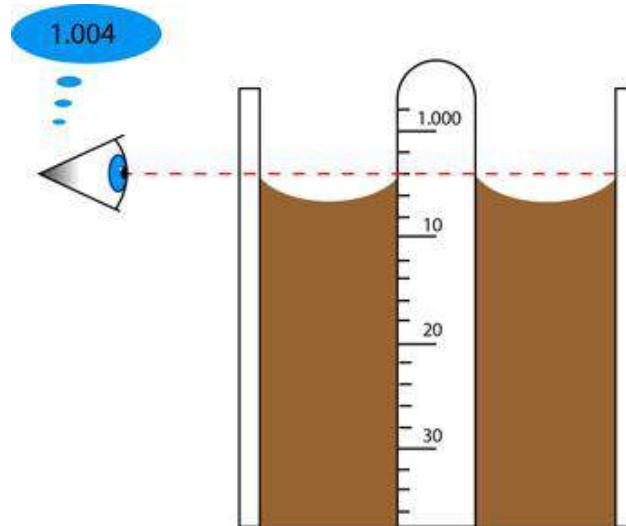
شکل ۳۳-۴: قراردادن هیدرومتر در استوانه مدرج مرحله ۵ ( محلول شاهد )

---

<sup>1</sup>. Constant temperature bath



شکل ۳۴-۴: قرائت عدد هیدرومتر



شکل ۳۵-۴: قرائت عدد بالای هالی

- ۷- با استفاده از یک کاردک، خاک تهیه شده در مرحله ۳ را کاملاً ورز داده و آن را به داخل جام مخلوط کن برمی‌گردانیم. تذکر: حین انجام این مرحله، قسمتی از خاک ممکن است به اطراف جام بچسبد. با فشردن بطری پلاستیکی و پاشیدن آب مقطر آن را شسته و داخل جام می‌ریزیم.
- ۸- به جام فوق آب مقطر اضافه کرده تا حدود «دوسوم» آن پر شود (شکل ۴-۳۶). با استفاده از مخلوط کن حدود ۲ دقیقه آن را مخلوط می‌کنیم (شکل ۴-۳۷).



شکل ۳۶-۴: افزودن آب مقطر تا حدود دوسوم جام



شکل ۳۷-۴: مخلوط کردن نمونه با مخلوط کن به مدت ۲ دقیقه

۹- مخلوط را داخل استوانه مدرج دوم می‌ریزیم (شکل ۳۸-۴) و مطمئن می‌شویم که تمام خاک از داخل جام مخلوط کن خارج شده است. سپس استوانه مدرج را با آب مقطر تا علامت مخصوص ۱۰۰۰ سی سی پر می‌کنیم (شکل ۳۹-۴).



شکل ۴-۳۸: ریختن مخلوط مرحله ۸ به داخل استوانه مدرج دوم



شکل ۴-۳۹: پر کردن استوانه حاوی نمونه با آب مقطر تا علامت ۱۰۰۰ سی سی

- ۱۰- یک درپوش پلاستیکی را بالای استوانه (مرحله ۹) قرار داده و آن را محکم می‌کنیم. با تکان دادن استوانه به حالت رفت و برگشت، از بالا به پایین، چند مرتبه مخلوط آب و خاک را کاملاً هم می‌زنیم (شکل ۴-۴).



شکل ۴۰-۴: تکان دادن استوانه بسته شده با دربوش، به صورت رفت و برگشت

۱۱- استوانه را داخل ظرف درجه حرارت ثابت در کنار استوانه مرحله ۵ قرار داده (شکل ۴۱-۴) و زمان را بلا فاصله یادداشت می کنیم. این زمان  $t = ۰$  است. هیدرومتر را داخل استوانه حاوی محلول آب و خاک معلق قرار می دهیم (شکل ۴۲-۴).



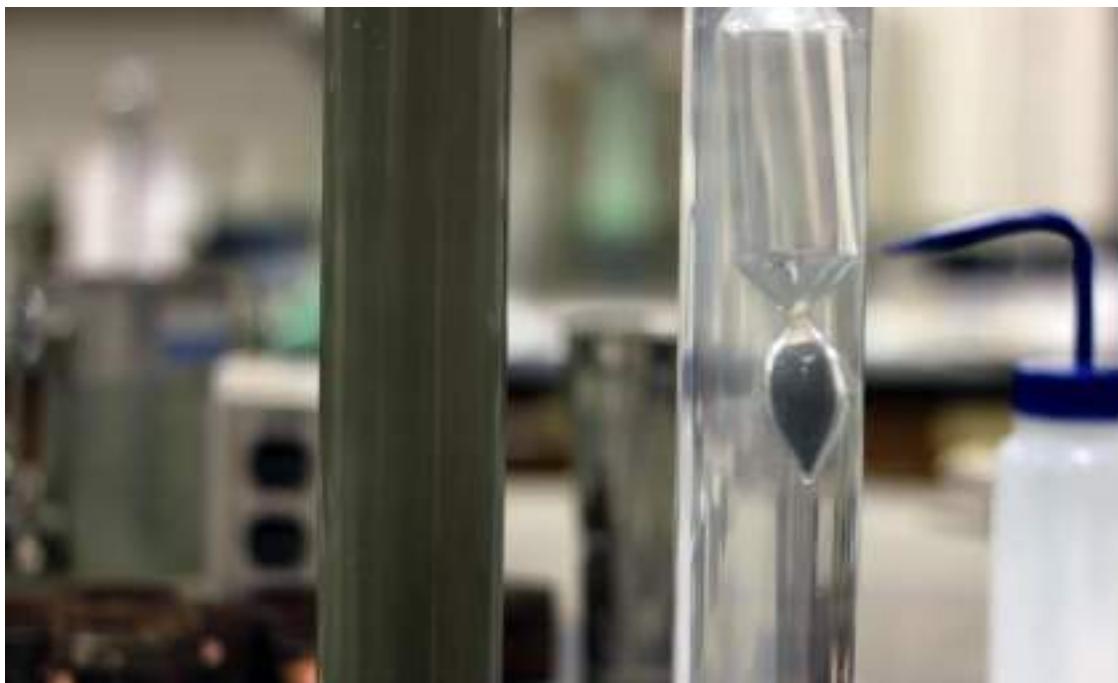
شکل ۴۱-۴: قرار دادن استوانه حاوی نمونه در کنار استوانه مرحله شماره ۵ (شکل سمت راست، محلول شاهد)



شکل ۴-۴: قراردادن هیدرومتر در استوانه حاوی نمونه

۱۲- قرائت هیدرومتر را در زمان‌های  $0/25$ ،  $0/05$  و  $0/01$  دقیقه انجام می‌دهیم و توجه داریم که همیشه قسمت بالای هلالی آب خوانده و یادداشت شود.

۱۳- بعد از دو دقیقه، هیدرومتر را بیرون می‌آوریم و داخل استوانه کناری ( محلول شاهد) می‌گذاریم ( مرحله ۵ ) ( شکل ۴-۴۳ ).



شکل ۴-۵: قراردادن هیدرومتر در استوانه حاوی آب مقطر و محلول ۴٪ ( محلول شاهد )

۱۴- هیدرومتر را در زمان‌های ۱۵، ۸، ۴ و ۳۰ دقیقه و ۲۴، ۸، ۴ و ۴۸ ساعت می‌خوانیم و برای انجام هر قرائت، هیدرومتر را ۳۰ ثانیه قبل از زمان‌های مذکور وارد استوانه حاوی مخلوط آب و خاک معلق می‌کنیم و پس از این که قرائت انجام شد، هیدرومتر را بیرون آورده و در استوانه کناری قرار می‌دهیم (مرحله ۵).

#### ۴-۲-۴) محاسبات

جدول داده‌ها و محاسبه پارامترها (با مراجعه به جدول ۷-۴):

۱- ستون دوم جدول: این اعداد مربوط به قرائت‌های هیدرومتر ( $R$ ) در زمان‌های مندرج در ستون اول است.

۲- ستون سوم جدول:  $R_{cp}$  معرف قرائت‌های تصحیح شده هیدرومتر برای محاسبه درصد عبوری:

$$R_{cp} = R + F_T - F_z \quad (24-4)$$

۳- ستون چهارم جدول: درصد عبوری  $\frac{a \times R_{cp}}{M_s} \times 100$

$M_s$ : جرم خاک خشک مورد استفاده برای دانه‌بندی به روش هیدرومتری

$a$ : تصحیح برای چگالی ویژه (به این دلیل که هیدرومتر برای  $G_s = ۲/۶۵$  کالیبره شده است)

$$a = \frac{G_s(1/65)}{(G_s - 1)2/65} \quad (25-4)$$

جدول ۴-۶: تغییرات  $a$  با  $G_s$

$a$	$G_s$
۱/۰۴	۲/۵۰
۱/۰۲	۲/۵۵
۱/۰۱	۲/۶۰
۱/۰۰	۲/۶۵
۰/۹۹	۲/۷۰
۰/۹۸	۲/۷۵
۰/۹۷	۲/۸۰

۴- ستون پنجم جدول:  $R_{cL}$  معرف قرائت‌های تصحیح شده هیدرومتر جهت تعیین طول مؤثر ( $L$ ):

$$R_{cL} = R + F_m \quad (26-4)$$

۵- ستون ششم جدول: تعیین طول مؤثر ( $L$ ) برای مقادیر متناظر  $R_{cL}$  (ستون پنجم جدول) بر اساس جدول ۴-۴

۶- ستون هفتم جدول: تعیین مقدار A از جدول ۵-۴

۷- ستون هشتم جدول: تعیین مقدار D از رابطه زیر:

$$D(mm) = A \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}} \quad (27-4)$$

## جدول ۷-۴: نمونه‌ای از محاسبات آزمایش دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتری

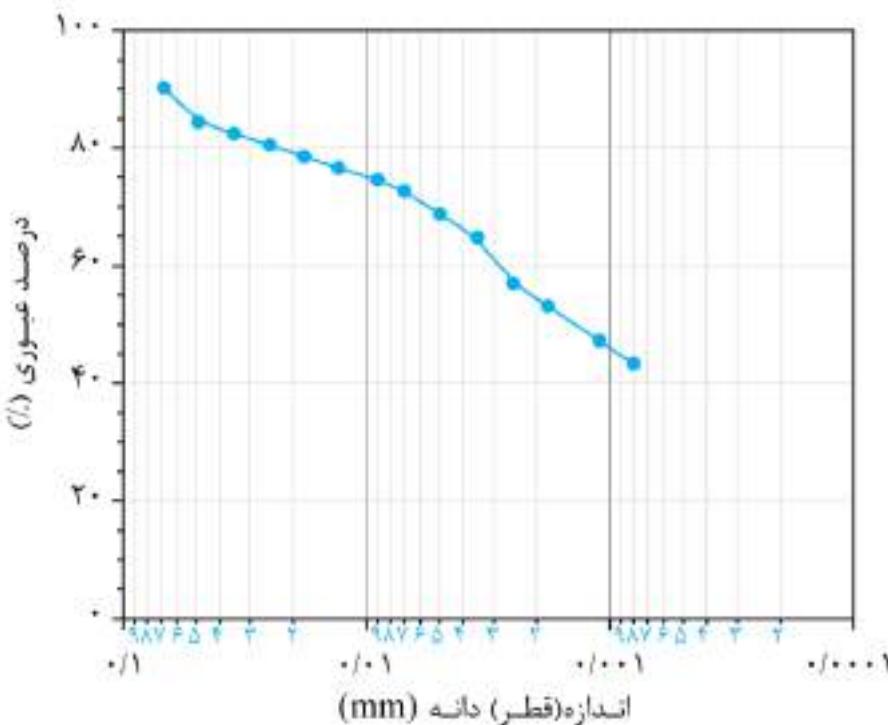
نوع خاک: رس قهوه‌ای سیلت‌دار	شماره نمونه:.....
محل نمونه‌گیری:.....	
نوع هیدرومتر: ASTM 152-H	مقدار $G_s$ : ۲/۷۵
دماه آزمایش: $T = ۲۸^{\circ}C$	جرم نمونه خشک‌شده در گرم کن: $M_s = ۵۰ g$
تصحیح دما: $F_T = +۲/۱۵$ (معادله ۲۴-۴)	تصحیح صفر: $F_z = +۷$
تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....	تصحیح هلالی: $F_m = ۱$
شخص نمونه‌گیر: .....	

$D(mm)$ (۸)	A (۷)	L (cm) (۶)	$R_{cL}$ (۵)	$\frac{درصد عبوری،}{a \times R_{cp}} \times ۱۰۰$ (۴)	$R_{cp}$ (۳)	قرائت هیدرومتر، $R$ (۲)	زمان (min) (۱)
۰/۰۶۸	۰/۰۱۲۱	۷/۸	۵۲	۹۰/۳	۴۶/۱۵	۵۱	۰/۲۵
۰/۰۴۹	۰/۰۱۲۱	۸/۳	۴۹	۸۴/۴	۴۳/۱۵	۴۸	۰/۵
۰/۰۳۵	۰/۰۱۲۱	۸/۴	۴۸	۸۲/۴	۴۲/۱۵	۴۷	۱
۰/۰۲۵	۰/۰۱۲۱	۸/۶	۴۷	۸۰/۵	۴۱/۱۵	۴۶	۲
۰/۰۱۸	۰/۰۱۲۱	۸/۸	۴۶	۷۸/۵	۴۰/۱۵	۴۵	۴
۰/۰۱۳	۰/۰۱۲۱	۸/۹۵	۴۵	۷۶/۶	۳۹/۱۵	۴۴	۸
۰/۰۰۹	۰/۰۱۲۱	۹/۱	۴۴	۷۴/۶	۳۸/۱۵	۴۳	۱۵
۰/۰۰۷	۰/۰۱۲۱	۹/۲۵	۴۳	۷۲/۷	۳۷/۱۵	۴۲	۳۰
۰/۰۰۵	۰/۰۱۲۱	۹/۶	۴۱	۶۸/۸	۳۵/۱۵	۴۰	۶۰
۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۲۱	۹/۹	۳۹	۶۴/۸	۳۳/۱۵	۳۸	۱۲۰
۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۲۱	۱۰/۵	۳۵	۵۷/۰	۲۹/۱۵	۳۴	۲۴۰
۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۲۱	۱۰/۹	۳۳	۵۳/۱	۲۷/۱۵	۳۲	۴۸۰
۰/۰۰۱۱	۰/۰۱۲۱	۱۱/۳۵	۳۰	۴۷/۲۳	۲۴/۱۵	۲۹	۱۴۴۰
۰/۰۰۰۸	۰/۰۱۲۱	۱۱/۶۵	۲۸	۴۳/۳	۲۲/۱۵	۲۷	۲۸۸۰

## رسم منحنی

منحنی تغییرات درصد عبوری (ستون ۴ از جدول ۷-۴) بر حسب اندازه دانه‌ها (ستون ۸ از جدول ۷-۴) در مقیاس لگاریتمی را روی یک کاغذ نیمه‌لگاریتمی یا به وسیله نرم‌افزارهای ترسیمی کامپیووتری مانند اکسل<sup>۱</sup>، اوریجین<sup>۲</sup>... ترسیم می‌کنیم (شکل ۴-۴).

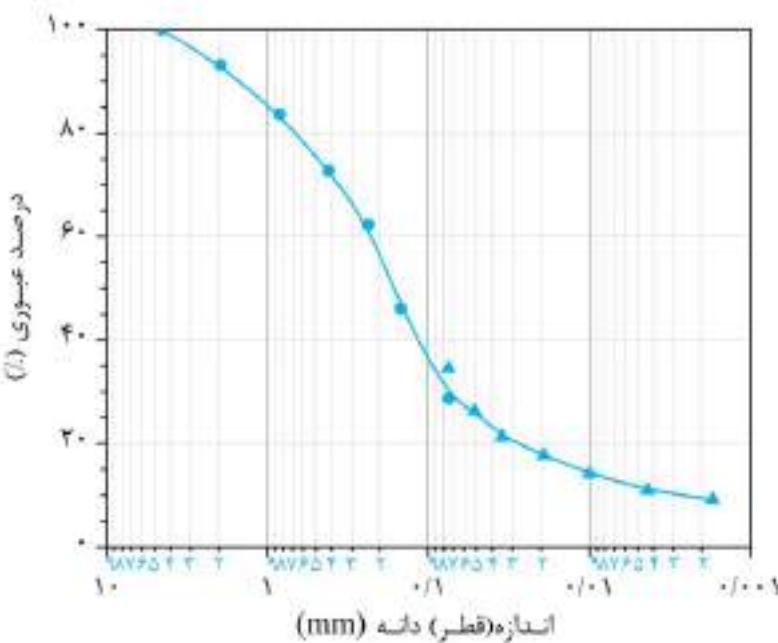
<sup>1</sup>. Excel<sup>2</sup>. Origin



شکل ۷-۴؛ منحنی تغییرات درصد عبوری نسبت به اندازه دانه‌ها بر اساس داده‌های موجود در جدول ۷-۴

#### مراحل تصحیح

- هنگامی که کمتر از ۹۰٪ خاک، از الک شماره ۲۰۰۰ عبور کرده باشد، باید مراحل زیر برای اصلاح، اعمال شود:
- ۱- نمونه‌ای از خاک خشک شده در گرم کن را تهیه کرده و جرم آن را تعیین می‌نماییم ( $M_1$ ).
  - ۲- با استفاده از هاون و میله با نوک پلاستیکی (همانند آزمایش الک)، دانه‌های خاک را از یکدیگر جدا می‌کنیم.
  - ۳- خاک مرحله ۲ را همانند آزمایش الک می‌کنیم.
  - ۴- خاک عبوری از الک شماره ۲۰۰ را در ظرفی جمع‌آوری می‌نماییم.
  - ۵- خاک باقیمانده روی الک شماره ۲۰۰ را (همانند آزمایش الک) می‌شوییم. سپس آب شسته شده از الک شماره ۲۰۰ را در این مرحله جمع‌آوری کرده و در گرم کن خشک می‌کنیم.
  - ۶- مقدار خاک عبور کرده از الک شماره ۲۰۰ (مرحله ۴) و قسمت عبوری خشک شده از این الک (مرحله ۵) را با هم مخلوط می‌کنیم.
  - ۷- درصد عبوری برای خاک باقیمانده بر روی الک شماره ۲۰۰ و بالاتر از آن را مطابق جدول ۷-۴ به دست می‌آوریم.
  - ۸- ۵۰ گرم از خاک عبوری از الک شماره ۲۰۰ (مرحله ۶) را بر می‌داریم و مراحل ۱ تا ۱۴ آزمایش هیدرومتری را برای آن انجام می‌دهیم.
  - ۹- محاسبات مربوط به آزمایش هیدرومتری را همانند آنچه در جدول ۷-۴ آمده است، ثبت و یادداشت می‌کنیم. توجه شود درصد عبوری ای که اکنون محاسبه می‌شود (همانند ستون ۴ از جدول ۷-۴)، درصد عبوری ای نیست که برای جرم کل نمونه باشد. درصد عبوری برای جرم کل نمونه از رابطه  $20 - \frac{P_T}{2}$  به دست می‌آید. اکنون می‌توان منحنی دانه‌بندی خاک عبوری از الک شماره ۲۰۰ را به منحنی دانه‌بندی به روش الک (مراحل ۳ و ۷)، متصل نمود (مطابق شکل ۷-۴).
- $$P_T = \left( \frac{\text{درصد عبوری از الک شماره } 200}{\frac{\text{ستون ۴ جدول ۷-۴}}{100}} \right) \quad (28-4)$$
- درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ از مرحله ۷ به دست می‌آید.



شکل ۴-۴: منحنی دانه‌بندی نتایج ترکیبی آزمایش‌های الک و هیدرومتری

۱۰- منحنی ترکیبی برای درصد عبوری، برحسب روش الک و هیدرومتری را مطابق شکل ۴-۴ رسم می‌کنیم. با توجه به شکل، دیده می‌شود که در ناحیه‌ای نتایج روی هم می‌فتد. ممکن است در بیشتر موارد، درصد عبوری‌ای که از آزمایش الک برای دانه‌های مشخصی به دست می‌آید با آنچه از آزمایش هیدرومتری برای همان دانه‌ها به دست می‌آید، کاملاً تطابق نداشته باشد. این امر به دلیل فرضیات مختلفی است که در این دو آزمایش وجود دارد. اندازه دانه‌هایی که از روش الک به دست می‌آید کمترین اندازه دانه‌های خاک بوده و اندازه دانه‌هایی که از روش هیدرومتری به دست می‌آید، مربوط به قطر کره معادل دانه خاک است.

#### ۴-۲-۵) نکات کلی

- ۱- در روش هیدرومتری می‌توان درصد عبوری خاک‌ها با اندازه دانه‌های  $2/000$  میلی‌متر را محاسبه نمود. دانه‌های ریزتر از  $2/000$  میلی‌متر، رس یا به اندازه رس است. اکثر دانه‌های رسی کوچک‌تر از  $1/000$  میلی‌متر بوده و عدد  $2/000$  میلی‌متر حد بالای اندازه آن است. حضور رس در یک خاک باعث افزایش پلاستیسیته آن خاک می‌شود.
- ۲- منابع احتمالی خطا در این آزمایش عبارت است از:

پراکندگی ناکافی ذرات رس: خاک در طول آنالیز هیدرومتری با محلول هگزامتفسفات سدیم ترکیب می‌شود تا ذرات پراکنده شود. برای دستیابی به پراکندگی کافی، ASTM D1140 و ASTM D422 نشان می‌دهد که خاک باید به ترتیب حداقل ۱۶ ساعت و ۲ ساعت در محلول خیس بخورد. در اینجا، یک بازه زمانی ۳۰ دقیقه‌ای برای خیس خوردن نمونه در هر آزمایش، با توجه به محدودیت‌های زمانی آزمایشگاه مکانیک خاک در مقطع کارشناسی توصیه می‌شود.

اختلاط کم یا بیش از حد مخلوط پراکنده‌ساز با خاک قبل از آزمایش هیدرومتری: قبل از آزمایش هیدرومتری، مخلوط هگزامتفسفات سدیم به مدت دو دقیقه با خاک مخلوط می‌شود. اختلاط کمتر از دو دقیقه ممکن است منجر به پراکندگی ناقص شود؛ در حالی که مخلوط کردن بیش از دو دقیقه ممکن است منجر به شکستگی ذرات خاک شود که بر توزیع اندازه دانه‌ها تأثیر می‌گذارد.

رها کردن هیدرومتر در مخلوط سوسپانسیون آب-خاک بین قوائت‌ها: هیدرومتر نباید بین قوائت‌ها در مخلوط سوسپانسیون آب-خاک باقی بماند. چنانچه این عمل انجام شود، ذرات خاک شروع به چسبیدن به هیدرومتر می‌کند که این امر روی شناوری آن‌ها تأثیر می‌گذارد.

فصل پنجم  
آزمایش تعیین حدود اتربرگ

### (ASTM D4318) تعیین حد روانی (1-۵)

#### آزمایش و تئوری آزمایش (۱-۵)

خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه سیلتی به علت نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده‌شان، هنگام مواجهه شدن با رطوبت‌های مختلف، در شکل ظاهری و رفتارشان تغییری ایجاد نمی‌شود، اما در خاک‌های ریزدانه رسی، رفتار خاک بهشدت متأثر از میزان رطوبت آن است. زمانی که یک خاک چسبنده رسی با مقدار زیادی از آب مخلوط شود، به علت افزایش لایه جذب آب سطحی در اطراف دانه‌های رس، به یک حالت روان (مایع) درمی‌آید و مانند یک سیال ویسکوز جریان می‌یابد. اگر این سیال ویسکوز به تدریج با از دست دادن رطوبت، خشک شود، به یک حالت خمیری (پلاستیک) می‌رسد. این خاصیت چسبنده‌گی به علت کاهش مقدار آب جذب‌شده‌ای است که ذرات رس را احاطه کرده است. با ادامه روند کاهش رطوبت، این خاک به حالت نیمه‌جامد و سپس به حالت کاملاً جامد درخواهد آمد. این مرحله در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. میزان رطوبتی را که در آن یک خاک چسبنده رسی از حالت روان به حالت خمیری (پلاستیک) می‌رسد حد روانی<sup>۱</sup> خاک می‌گویند. به صورت دقیق‌تر می‌توان گفت حد روانی، درصد رطوبتی است که در آن یک شیار مشخص در خاک (به عمق حدکثر ۸ میلی‌متر)، در اثر ۲۵ ضربه دستگاه کاساگراند<sup>۲</sup>، در یک طول مشخص (۱۲/۷ میلی‌متر)، بسته می‌شود. بر اساس مشاهدات کاساگراند، هر ضربه در دستگاه کاساگراند متناظر با مقاومت برشی خاک در حدود  $0.1 \text{ kN/m}^3$  است. از این‌رو در حد روانی، نمونه خاک دارای مقاومت برشی تقریباً معادل با  $2/5 \text{ kN/m}^3 = 0.1 \times 25$  است که مقدار کمی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت گونه‌های مختلف خاک در حد روانی، مقاومت برشی یکسان و ناچیزی دارد.

حد خمیری<sup>۳</sup> نیز، مقدار رطوبتی است که در آن خاک از حالت خمیری به حالت نیمه‌جامد درمی‌آید و درنهایت، به میزان رطوبتی که خاک از حالت نیمه‌جامد به جامد تغییر پیدا می‌کند، حد انقباض<sup>۴</sup> گفته می‌شود. این حدود، به حدود اتربرگ<sup>۵</sup> (۱۹۱۱ میلادی) معروف است. از طرفی، درصد رطوبتی که باید به خاک اضافه شود تا از حد خمیری به حد روانی خود برسد، بیانگر میزان خاصیت خمیری خاک است و با شاخص خمیری<sup>۶</sup> مشخص می‌شود. تفاضل حد روانی و حد خمیری، شاخص خمیری است:

$$PI = LL - PL \quad (1-5)$$

$LL$  : حد روانی (%)

$PL$  : حد خمیری (%)

$PI$  : شاخص خمیری (%)

شاخص خمیری، تابعی از مقدار و نوع کانی‌های رسی است. هراندازه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده آن است که خصوصیات خمیری خاک بیشتر است.

حد روانی و حد خمیری در حالتی برای خاک‌ها تعیین می‌شود که ساختار طبیعی خود را بر اثر ورز دادن از دست داده است، اما حد انقباض را می‌توان برای خاک‌های دست‌نخورده هم تعیین نمود.

میزان فاصله رطوبت طبیعی خاک در محل تا حد خمیری با شاخص روانی سنجیده می‌شود. این شاخص به صورت نسبت تفاضل درصد رطوبت خاک در محل با حد خمیری به شاخص خمیری تعریف می‌شود:

$$LI = \frac{W - PL}{LL - PL} \quad (2-5)$$

$W$  : مقدار رطوبت خاک در محل (%)

$LI$  : شاخص روانی (%)

۱. Liquid Limit

۲. Casagrande

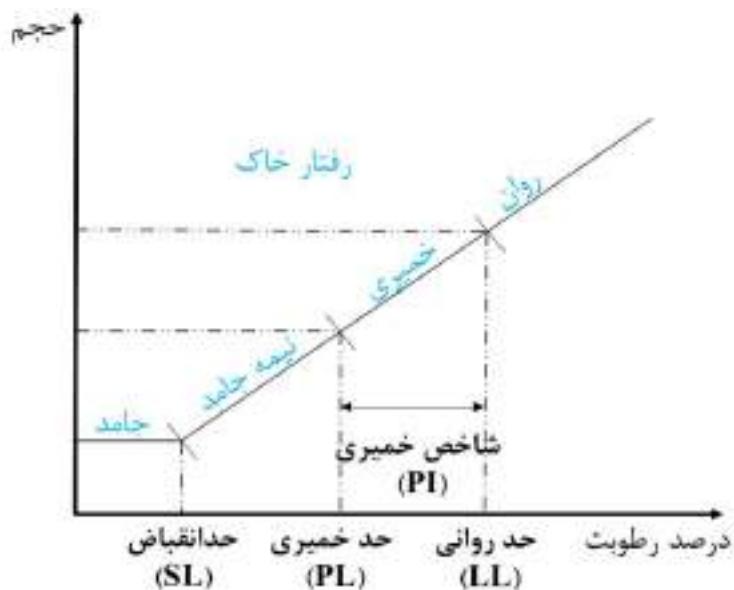
۳. Plastic Limit

۴. Shrinkage Limit

۵. Atterberg Limits

۶. Plasticity Index

حد روانی و حد خمیری اطلاعاتی درباره اثر رطوبت بر خصوصیات مکانیکی خاک، به ویژه تغییر حجم و قوام خاک<sup>۱</sup>، ارائه می‌دهد.



شکل ۵-۱: تغییر حجم خاک با افزایش رطوبت و تعريف حدود اتربرگ

#### ۲-۱-۵) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- نمونه خاک به مقدار ۲۵۰ گرم
- ۲- دستگاه حد روانی گاساگرانده: این دستگاه دارای یک جام از جنس برنج است. با چرخاندن اهرم تعیین شده در این دستگاه، جام تا ارتفاع ۱۰ میلی‌متر بالا آورده می‌شود و سپس تحت اثر جرم خودش روی قسمت پلاستیکی کف دستگاه، سقوط می‌کند (شکل ۲-۵ و ۱۱-۵).

- ۳- شیارکش<sup>۲</sup> (شکل ۵-۲ و ۱۱-۵)
- ۴- ظروف تعیین رطوبت (شکل ۳-۵)
- ۵- ظرف تبخیر چینی<sup>۳</sup> (شکل ۴-۵)
- ۶- کاردک (شکل ۵-۵)
- ۷- گرمکن (شکل ۶-۵)
- ۸- ترازو با دقیق ۱۰۰ گرم (شکل ۷-۵)
- ۹- بطری پلاستیکی (حاوی آب مقطر) (شکل ۸-۵)
- ۱۰- الک شماره ۴۰ (شکل ۹-۵)
- ۱۱- دستمال (حوله) کاغذی

نمای کلی وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش حد روانی در شکل ۱۰-۵ آورده شده است.

<sup>1</sup>. Soil consistency

<sup>2</sup>. Grooving tool

<sup>3</sup>. Porcelain evaporating dish



شکل ۵-۳: ظروف تعیین رطوبت



شکل ۵-۴: دستگاه حد روانی کاساگرانده به همراه شیارکش



شکل ۵-۵: کاردک



شکل ۵-۶: ظرف تبخیر چینی



شکل ۵-۷: ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم



شکل ۵-۸: گرم کن



شکل ۵-۹: الک شماره ۴۰



شکل ۵-۸: بطری پلاستیکی



شکل ۵-۱۰: نمای کلی بخشی از تجهیزات آزمایش حد روانی شامل: ظروف تعیین رطوبت، ظرف چینی تعیین رطوبت، شیارکش، کاردک و بطری پلاستیکی

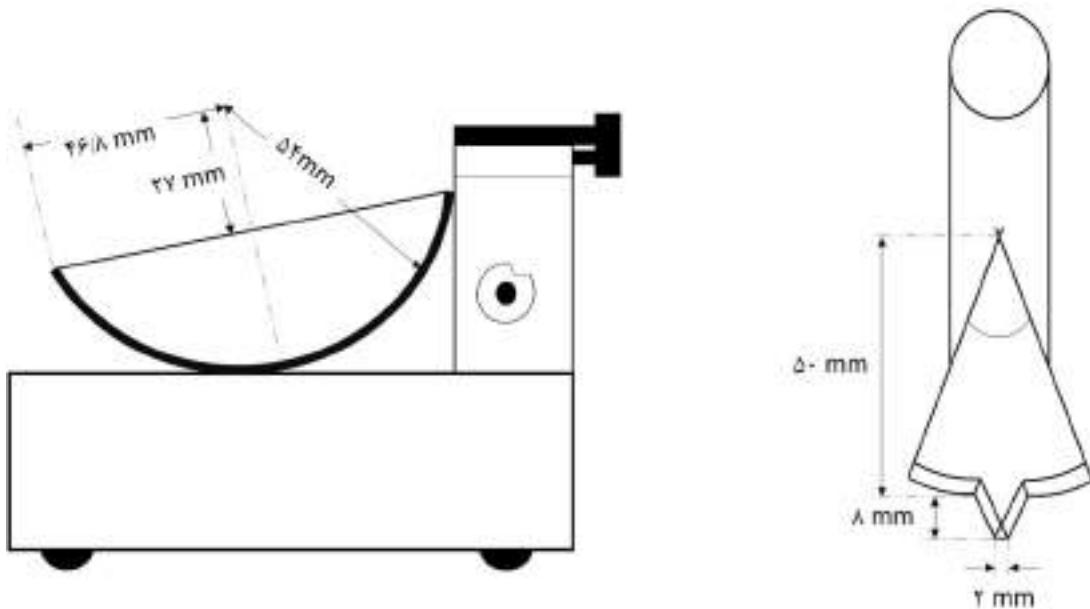
### ۳-۱-۵) روش انجام آزمایش

- ۱- ظرف تعیین رطوبت را برداشته و تمیز کرده، سپس جرم آن را با کمک ترازو محاسبه می کنیم ( $M_1$ ).
- ۲- مقدار ۲۵۰ گرم از خاک مورد نظر را که در هوای آزاد خشک شده است برداشته و از الک شماره ۴۰ عبور می دهیم.

نمونه های الک شده را در ظرف تبخیر قرار داده و با فشردن بطری پلاستیکی، به آن آب اضافه می کنیم و خاک را آن قدر مخلوط می کنیم که به صورت یک خمیر یکنواخت در بباید (لازم به ذکر است که در برخی موارد به جای ظرف تبخیر از صفحه شیشه ای مسطح برای ورز دادن نمونه استفاده می کنیم). باید توجه داشت که مطابق استاندارد، آزمایش می تواند به دو روش انجام شود: روش تر به خشک و روش خشک به تر؛ که در اینجا روش خشک به تر ارائه می شود و برای اطلاع از روش تر به خشک به استاندارد ASTM D4318 مراجعه شود؛ روش خشک به تر به این ترتیب است که از درصد کم آب شروع کرده و با افزودن آب به نمونه، به تدریج درصد رطوبت نمونه را افزایش می دهیم تا به حد روانی برسیم.

- ۳- قسمتی از خمیر به دست آمده را در جام دستگاه کاساگراند (شکل ۱۱-۵) قرار داده و با استفاده از کاردک، سطح خاک داخل جام را صاف می کنیم (در حالتی که جام بر روی پایه پلاستیکی خود قرار دارد). ارتفاع نهایی پس

از صاف شدن، باید حداقل ۸ میلی‌متر باشد (شکل ۱۲-۵). روی مقدار اضافی نمونه خاک را باید با یک دستمال خیس پوشاند تا رطوبتش برای مراحل بعدی آزمایش حفظ شود.



شکل ۱۱-۵: شکل شماتیک دستگاه کاساگرانده و شیارکش



شکل ۱۲-۵: نمونه ساخته شده در جام برنجی

۴- با استفاده از شیارکش (شکل ۱۱-۵)، در محور تقارن جام، شیاری روی نمونه ایجاد می‌کنیم (شکل‌های ۱۳-۵ و ۱۴-۵).



شکل ۵-۴: نمونه‌ای از شیار ایجادشده در جام برنجی



شکل ۵-۵: ایجاد شیار در نمونه

۵- اهرم دستگاه را با سرعت ۲ دور در ثانیه می‌چرخانیم. با این روش، جام هر بار از ارتفاع ۱۰ میلی‌متری سقوط کرده و خاک از طرفین به سمت مرکز جام حرکت می‌کند. تعداد ضرباتی ( $N$ ) را که لازم است تا شیار ایجادشده در طول ۰/۵ میلی‌متر (۱۲/۷ اینچ) بسته شود یادداشت می‌کنیم (شکل ۵-۵). در این قسمت چند حالت ممکن است رخدده:

- اگر  $N$  بین ۲۵ تا ۳۵ ضربه باشد، نمونه را جهت تعیین درصد رطوبت، در ظرف مخصوص قرار می‌دهیم و درب ظرف را بسته و جرم ظرف و خاک مريطوب را تعیین می‌کنیم ( $M_r$ ). بقیه خاک درون جام را برداشته و داخل ظرف تبخیر می‌گذاریم. به منظور تمیز کردن جام، از حوله (دستمال) کاغذی می‌توان استفاده نمود.
- اگر رطوبت خاک خیلی کم باشد،  $N$  بزرگ‌تر از ۳۵ خواهد شد. در این صورت خاک را به وسیله کاردک به ظرف تبخیر منتقل نموده و به آن آب اضافه می‌کنیم. پس از تمیز کردن جام با دستمال کاغذی، آزمایش را دوباره تکرار می‌کنیم تا  $N$  بین ۲۵ تا ۳۵ شود.
- اگر خاک خیلی مريطوب باشد، مقدار  $N$  کوچک‌تر از ۲۵ خواهد شد. در این حالت ابتدا باید بررسی شود که در نمونه، حباب‌های هوا وجود نداشته باشد؛ زیرا باعث بسته شدن زودهنگام شیار می‌شود. در صورت مشاهده حباب هوا، آزمایش باید از اول تکرار شود. اگر در خاک حباب‌های هوا وجود نداشته باشد، در این صورت خاک را از داخل جام به ظرف تبخیر منتقل می‌کنیم و با کاردک آن قدر هم می‌زنیم و وزن می‌دهیم تا کمی خشک شود. به منظور تسهیل در این روند می‌توان نمونه را چند دقیقه در گرمکن نیز قرار داد. دقت شود که هرگز نمی‌توان به منظور کاهش رطوبت نمونه، به آن مقداری خاک خشک اضافه کرد. آزمایش را مجدداً تکرار می‌کنیم تا به تعداد ضربات مطلوب برسیم. اگر در این آزمایش، خاک روی سطح جام بلغزد، باید آزمایش را با درصد رطوبت بیشتر تکرار کرد. اگر بعد از چند بار تکرار آزمایش با درصد رطوبت بالاتر، نمونه خاک همچنان داخل جام بلغزد و همچنان در تمامی دفعات، در تعداد ضربات کمتر از ۲۵ ضربه شیار بسته شود، با این روش حد روانی مورد نظر قابل تعیین نبوده و بدون انجام آزمایش حد خمیری، می‌توان آن را به عنوان یک خاک غیر خمیری معرفی نمود.

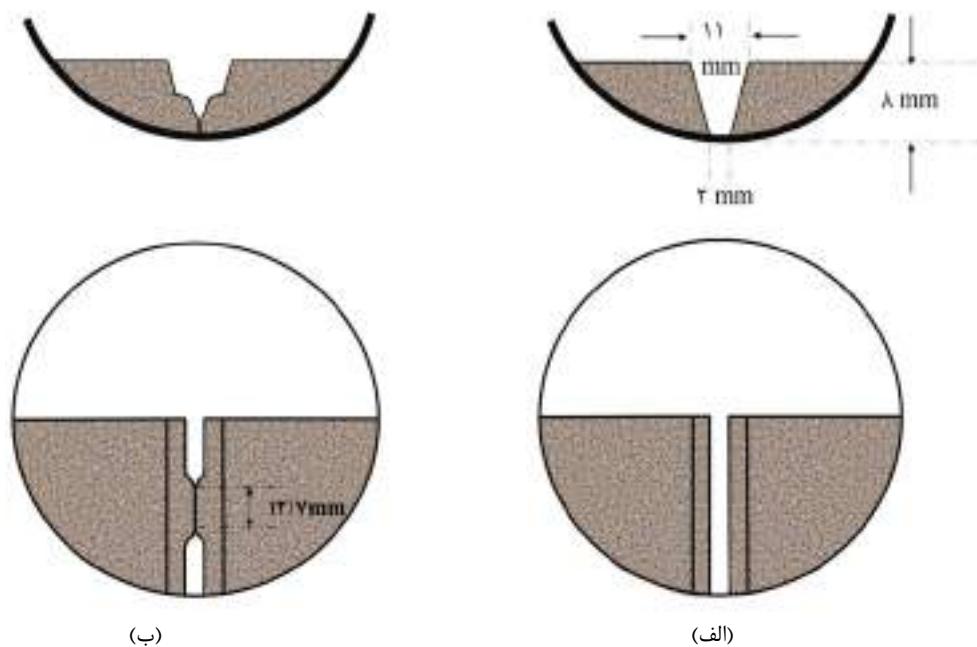


شکل ۱۵-۵: شیار بسته شده در طول بیش از ۵/۰ اینچ

- ۶- به خمیر خاک داخل ظرف تبخیر، آب اضافه کرده و کاملاً آن را هم می‌زنیم و سپس مراحل ۳ تا ۵ را تکرار می‌کنیم تا شیار ایجاد شده در جام در طول ۵/۰ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) با تعداد ضربات ۲۰ تا ۲۵ ضربه بسته شود. در انتهای این مرحله نیز از خاک داخل جام، نمونه‌ای به منظور تعیین رطوبت جدا کرده و جام را با دستمال کاملاً تمیز می‌کنیم.
- ۷- به خمیر خاک موجود در ظرف تبخیر آب اضافه کرده و آن را خوب مخلوط می‌کنیم و مراحل ۳ تا ۵ را تکرار می‌کنیم تا این بار شیار در طول ۵/۰ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) با تعداد ۱۵ تا ۲۰ ضربه بسته شود. در انتهای این مرحله نیز رطوبت نمونه را تعیین می‌کنیم.

- ۸- در پوش ظرف‌های تعیین رطوبت را برداشته و آن‌ها را داخل گرم کن قرار می‌دهیم تا خاک خشک شود. پس از گذشت ۲۴ ساعت، جرم نمونه‌ها را یادداشت می‌کنیم ( $M_3$ ).

شکل ۱۶-۵ تصویر شماتیک قرارگیری خاک در جام کاساگراند را در شروع و پایان آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۱۶-۵: تصویر شماتیک قرارگیری خاک در جام کاساگراند در (الف) شروع آزمایش؛ ب) پایان آزمایش

بهمنظور دقت در نتایج آزمایش، مراحل ۱ تا ۸ را سه بار بهصورت جداگانه تکرار کرده و در انتهای میانگین اعداد را بهعنوان حد روانی گزارش می‌نماییم.

#### ۴-۱-۵) محاسبات

##### تعیین درصد رطوبت

درصد رطوبت برای هر سه نمونه (مراحل ۵، ۶ و ۷) را با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌کنیم:

$$w(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (3-5)$$

$M_1$  : جرم ظرف خالی (g)

$M_2$  : جرم ظرف و خاک مرطوب (g)

$M_3$  : جرم ظرف و خاک خشک (g)

##### رسم نمودار جریان و تعیین حد روانی

نتیجه آزمایش حد روانی را بهصورت یک منحنی نیمه لگاریتمی برای تغییرات درصد رطوبت، نسبت به تعداد ضربات N (در مقیاس لگاریتمی) رسم می‌کنیم. فرم کلی نمودار بهدست آمده، تقریباً بهصورت یک خط مستقیم خواهد بود. این نمودار، منحنی جریان<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. از منحنی جریان، میزان رطوبت (برحسب درصد) مربوط به تعداد ضربات ۲۵ را با کمک درون‌بایی تعیین می‌کنیم که این رطوبت، حد روانی خاک است.

شیب خط جریان، ضریب (شاخص) جریان<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$F_1 = \frac{w_1(\%) - w_2(\%)}{\log N_2 - \log N_1} \quad (4-5)$$

بهمنظور درک بهتر این روند، نمونه‌ای از مdatas می‌دانند. از مdatas حد روانی و منحنی مربوط به آن در جدول ۱-۱-۵ و شکل ۱-۱۷ آورده شده است.

جدول ۱-۵: آزمایش حد روانی

شماره نمونه: ۴

نوع خاک: خاک رس سیلتدار خاکستری

محل نمونه‌گیری: ...../...../.....

تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

شخص نمونه‌گیر: .....

شماره آزمایش			مورد
۳	۲	۱	
۲۵	۲۱	۸	شماره ظرف
۱۵/۱۷	۱۷/۰۱	۱۵/۲۶	جرم ظرف، $M_1(g)$
۳۱/۴۵	۳۱/۵۸	۲۹/۳۰	جرم ظرف + جرم خاک مرطوب، $M_2(g)$
۲۶/۹۶	۲۷/۷۲	۲۵/۸۴	جرم ظرف + جرم خاک خشک، $M_3(g)$
۳۸/۱	۳۶/۰۴	۳۲/۷	$w(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100$ درصد رطوبت،
۱۷	۲۳	۳۵	تعداد ضربات

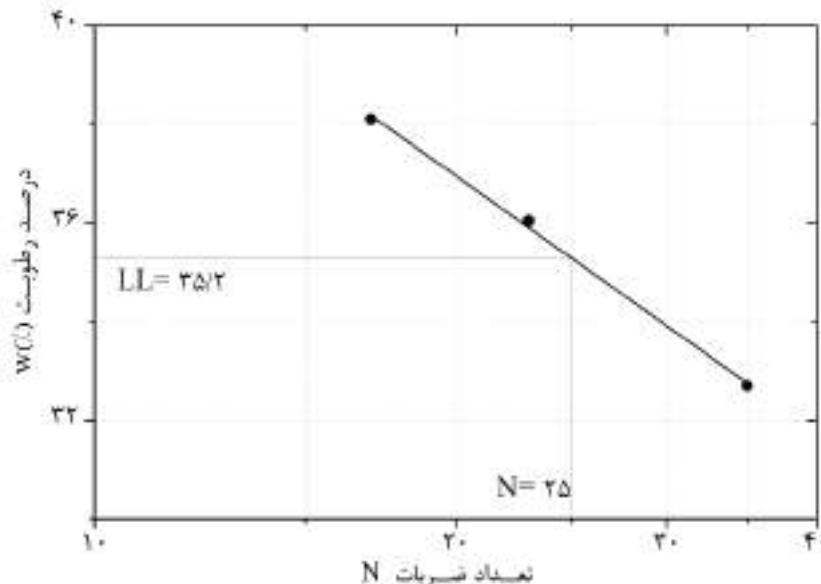
حد روانی: ۳۵٪

۱. Flow curve

2. Flow index

## شاخص جریان

$$\frac{37-32/7}{\log 30 - \log 20} = 18/74$$



شکل ۱۷-۵: منحنی تغییرات درصد رطوبت بر حسب تعداد ضربات (در مقیاس لگاریتمی) بر اساس نتایج آزمایش حد روانی ارائه شده در جدول ۱-۵

## ۱-۵) نکات کلی

- ۱- هنگام تنظیم دستگاه حد روانی، باید به این نکته توجه شود که سنجاق اتصال دهنده جام به پایه، ساییده نشده باشد تا باعث جابه‌جایی یا حرکت جام نشود. همین‌طور پیچ‌هایی که کاسه را به دستگیره متصل می‌کند باید سفت باشد و کف جام نیز نباید در اثر استفاده زیاد، گود شده باشد.
- ۲- تعداد ضربات برای بسته شدن شیار در آزمایش حد روانی باید بین ۱۵ تا ۳۵ باشد؛ در غیر این صورت آزمایش باید تکرار شود.

۳- به عنوان یک تقریب خوب از مقدار حد روانی (LL) یک خاک، می‌توان از رابطه زیر بهره جست:

$$LL = w_N(\%) \left( \frac{N}{25} \right)^{1/121} \quad (5-5)$$

درصد رطوبت مربوط به بسته شدن شیار در طول ۵/۰ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) برای تعداد N ضربه این رابطه توسط استاندارد ASTM D4318 نیز معرفی شده است و زمانی معتبر است که N در بازه ۲۰ تا ۳۰ قرار گرفته باشد (جدول ۲-۵).

جدول ۲-۵: مقادیر  $\left( \frac{N}{25} \right)^{1/121}$  برای مقادیر مختلف N

$\left( \frac{N}{25} \right)^{1/121}$	N	$\left( \frac{N}{25} \right)^{1/121}$	N
۱/۰۰۵	۲۶	۰/۹۷۳	۲۰
۱/۰۰۹	۲۷	۰/۹۷۹	۲۱
۱/۰۱۴	۲۸	۰/۹۸۵	۲۲
۱/۰۱۸	۲۹	۰/۹۹۰	۲۳
۱/۰۲۲	۳۰	۰/۹۹۵	۲۴
		۱/۰۰۰	۲۵

۴- وجود رس در خاک سبب ایجاد خاصیت خمیری (پلاستیسیته) می‌شود؛ از این‌رو حد روانی یک خاک تابع مقدار و نوع کانی‌های رس موجود در آن است. مقادیر زیر حدود تقریبی حد روانی بعضی از کانی‌های رسی است.

جدول ۵-۳: بازه مربوط به حد روانی کانی‌های مختلف رسی (داس ۲۰۰۲)

LL	نوع کانی رسی
۲۵-۱۰۰	کائولینیت
۵۵-۱۲۰	ایلیت
۱۰۰-۸۰۰	مونت موریلونیت

## (۲-۵) بخش دوم: آزمایش تعیین حد خمیری (ASTM D4318)

### ۱-۲-۵) مقدمه و تئوری آزمایش

در بخش قبل، در ارتباط با کلیات حدود اتربرگ توضیحاتی ارائه و بیان شد که حد خمیری، درصد رطوبتی از خاک است که در آن، خاک از حالت خمیری به حالت نیمه‌جامد تبدیل می‌شود. به عبارت دقیق‌تر، حد خمیری درصد رطوبتی است که در آن پس از فتیله کردن خاک و رسیدن به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ (۳/۱۸ میلی‌متر)، نمونه ترک بخورد. از آنجایی که تشخیص این قطر با چشم و حتی با وسایل دیگر قدری مشکل است، مقدار گزارش شده تا حدود زیادی به دقت و تجربه فرد بستگی دارد، اما می‌توان با تمرین و تکرار مقادیر را به یکدیگر نزدیک نمود.

### ۲-۲-۵) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- نمونه خاک به مقدار ۲۰ گرم

۲- ظرف تبخیر چینی

۳- کاردک

۴- بطربی پلاستیکی (حاوی آب مقطر)

۵- ظروف تعیین رطوبت

۶- شیشه مسطح

۷- ترازو با دقت ۱۰/۰ گرم

۸- میله مرجع به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ (۳/۱۸ میلی‌متر)

### ۳-۲-۵) روش انجام آزمایش

۱- مقدار ۲۰ گرم از نمونه خاکی را که در هوای آزاد خشک شده است از الک شماره ۴۰ عبور داده و داخل یک ظرف تبخیر چینی قرار می‌دهیم.

۲- مقداری آب از طریق فشردن بطربی پلاستیکی، به نمونه اضافه کرده و آن را خوب مخلوط می‌کنیم. مقدار رطوبت نمونه در این حالت به گونه‌ای است که در صورت پرتاب، به دیوار می‌چسبد (البته نباید نمونه را پرتاب کنید و این توضیح صرفاً جهت ملموس شدن حالت نمونه بیان گردید).

۳- ظرف تعیین رطوبت را تمیز کرده و سپس جرم آن را با کمک ترازو اندازه‌گیری می‌کنیم ( $M_1$ ).

۴- تعدادی از نمونه‌های خاک ساخته شده در مرحله ۲ را جدا کرده و بین انگشتان فشار می‌دهیم تا شکل بیضی به خودشان بگیرد (شکل ۱۸-۵).



شکل ۱۸-۵: نمونه‌ای از بیضی‌های ساخته شده در مرحله ۴

۵- یکی از نمونه‌های بیضی شکل را انتخاب کرده و بر روی شیشه قرار داده و با کف دست با سرعت ۸۰ دور در دقیقه شروع به فتیله کردن آن می‌کنیم. یک مرتبه فتیله کردن نمونه به سمت عقب و یک مرتبه به سمت جلو توسط کف دست، یک دور را شامل می‌شود (شکل ۱۹-۵).



شکل ۱۹-۵: فتیله کردن نمونه ساخته شده از مرحله ۴

۶- با رسیدن قطر فتیله به مقدار  $\frac{1}{8}$  اینچ (۳/۱۸ میلی‌متر)، آن را چند قسمت می‌کنیم (برای پی بردن به قطر فتیله از یک میله مرجع به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ استفاده می‌شود مانند شکل ۲۰-۵) و مانند مرحله ۴، با انگشتان فشار می‌دهیم تا دوباره به شکل بیضی درآید. اگر نمونه پیش از رسیدن به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ (۳/۱۸ میلی‌متر) ترک بخورد، باید به نمونه آب اضافه کرد و مراحل ۴ تا ۶ را دوباره تکرار نمود.



شکل ۲۰-۵: نمونه ساخته شده بدون ترک به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ و میله مبنا به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ

۷- مراحل ۵ و ۶ را تکرار می کنیم تا درنهایت فتیله در قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ (۳/۱۸ میلی متر) ترک بخورد که رطوبت موجود در نمونه در این حالت حد خمیری خاک است (شکل ۲۱-۵). باید توجه شود که این امکان وجود دارد که فتیله در قطر بزرگتر از  $\frac{1}{8}$  اینچ (۳/۱۸ میلی متر) ترک بخورد؛ در حالی که در مرحله قبل در این قطر بدون ترک باقی مانده باشد.



شکل ۲۱-۵: نمونه ساخته شده ترک خورده به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ و میله مبنا به قطر  $\frac{1}{8}$  اینچ

۸- تکه های ترک خورده در مرحله ۷ را به منظور تعیین رطوبت، بلا فاصله در ظرف مخصوص ریخته و درب ظرف را می بندیم.

۹- نمونه ای دیگر از خاک مرطوب مرحله ۴ را برداشته و مراحل ۵ تا ۸ را برای آن تکرار می کنیم.

۱۰- برای هر نمونه، مجموع جرم ظرف و خاک مرطوب را اندازه می گیریم ( $M_2$ ). در پوش ظروف را برداشته و در زیر آن قرار می دهیم و نمونه ها را بلا فاصله جهت خشک شدن، به داخل گرم کن منتقل می کنیم.

۱۱- پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه ها را از داخل گرم کن خارج کرده و جرم ظرف و خاک خشک را تعیین می کنیم ( $M_۳$ ).

**۴-۲-۵) محاسبات**

حد خمیری با محاسبه درصد رطوبت نمونه ترک خورده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{جرم رطوبت} \times 100 = \frac{\text{جرم خاک خشک}}{\text{جرم خاک خشک}} \quad (6-5)$$

$$PL = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (7-5)$$

چنانچه حد روانی خاک معلوم باشد، شاخص (دامنه) خمیری (PI) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PI = LL - PL \quad (8-5)$$

نمونه‌ای از محاسبات آزمایش حد خمیری در جدول ۴-۵ نشان شده است.

**جدول ۴-۵: آزمایش حد خمیری**

نوع خاک: خاک سیلت رس دار خاکستری

شماره نمونه: ۳

محل نمونه‌گیری:

...../...../..... تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

شخص نمونه‌گیری:

شماره ظرف
۱۰۳
۱۳/۳۳
۲۳/۸۶
۲۲/۲۷
۱۷/۷۸ %
$PL = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100$

$$PI = LL - PL = ۳۴ - ۱۷/۷۸ = ۱۶/۷۸ = ۱۶/۲۸ \% \text{ شاخص خمیری: } ۱۶/۲۸ \%$$

**۴-۲-۵) نکات کلی**

۱- معمولاً حد خمیری، متوسط درصد رطوبت به دست آمده از نمونه‌ها است. در صورتی که اختلاف بین دو آزمایش حد خمیری بیشتر از حد مجاز (۲ درصد) باشد، آزمایش باید تکرار شود. در صورتی که آزمایش توسط یک فرد انجام شده باشد، حد مجاز  $1/4$  درصد است.

۲- شاخص خمیری معیار (کیفی) خوبی برای ارزیابی پتانسیل تورم در خاک است. خاک‌های رسی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا شامل بنتونیت، مونتموریلونیت و اسمکتیت<sup>۱</sup>، بیشترین قابلیت تورم در بین خاک‌ها را دارا است. دستور کار کلی برای پتانسیل تورم در جدول ۵-۵ خلاصه شده است.

**جدول ۵-۵: بازه تغییرات LL و PI برای خاک‌های ریزدانه رایج (کالینسکی<sup>۲</sup> ۲۰۱۱)**

طبقه‌بندی خاک بر اساس استاندارد USCS	نوع کانی	پتانسیل تورم	LL	PI
ML, CL	کائولینیت	کم	< ۵۰%	< ۲۵%
CL	ایلیت	متوسط	/۶۰-۵۰	/۳۵-۲۵
CH	بنتونیت، مونتموریلونیت، اسمکتیت	زیاد	> ۶۰%	> ۳۵%

<sup>1</sup>. Smectite

<sup>2</sup>. Michael E. Kalinski

۳- در بخش قبل نیز اشاره شد که ممکن است تعیین حد روانی یا حد خمیری یک خاک به روش‌های استاندارد ذکر شده امکان‌پذیر نباشد. در این صورت، دامنه خمیری خاک به صورت NP (خاک غیر پلاستیک) گزارش می‌شود. از طرف دیگر ممکن است حد خمیری مساوی یا بیشتر از حد روانی باشد که در این حالت دامنه خمیری به صورت عدد صفر گزارش می‌شود.

۴- حد روانی و شاخص خمیری خاک‌های چسبنده، پارامترهایی مهم جهت طبقه‌بندی خاک‌ها است. از آنجایی که خاصیت خمیری یک خاک رسی به علت آب جذب سطحی است که ذرات رس را احاطه می‌کند، می‌توان انتظار داشت که نوع کانی‌های رسی و درصد آن‌ها در یک خاک، بر حد روانی و خمیری تأثیر بگذارد. مقادیر زیر، مربوط به چند کانی رسی است:

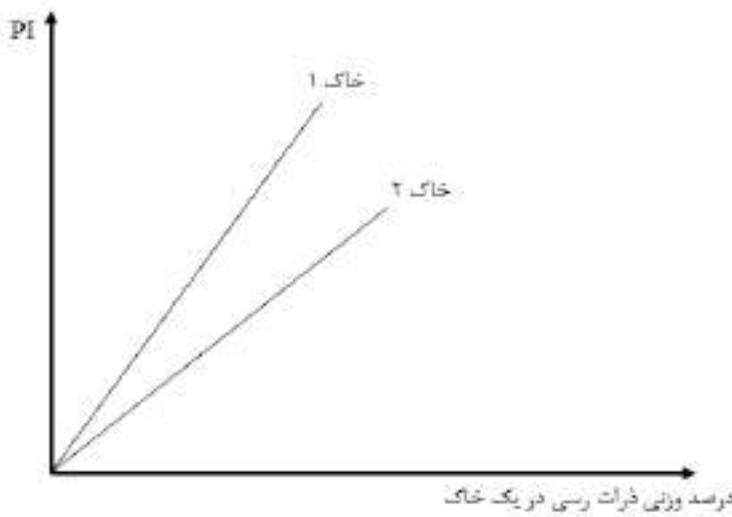
جدول ۵-۶ بازه مربوط به شاخص خمیری کانی‌های مختلف رسی (دادس ۲۰۰۲)

PI	کانی رسی
۲۰-۴۰	کائولینیت
۳۵-۵۵	ایلیت
۵۰-۱۰۰	مونت موریلونیت

۵- میزان فعالیت یک خاک توسط پارامتر فعالیت خاک (A) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = \tan \alpha = \frac{PI}{درصد وزنی ذرات رسی در خاک} \quad (9-5)$$

هرچه مقدار پارامتر A بیشتر باشد، خاک فعال‌تر است. به طور مثال می‌توان گفت در شکل ۲۲-۵، خاک ۱ از خاک ۲ فعال‌تر است و قابلیت جذب آب بیشتری دارد.



شکل ۲۲-۵: رابطه بین نشانه خمیری و درصد وزنی ذرات رسی

### ۵-۳) بخش سوم؛ آزمایش تعیین حد انقباض (ASTM D4318)

#### ۵-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

در بخش اول، به تعریف حدود اتربرگ و حد انقباض پرداخته شد. روند اشباع شدن خاک تا رسیدن به حد انقباض در شکل ۲۳-۵ نشان داده شده است. خاک رسی اشباع در شرایطی می‌تواند خشک شود و کاهش حجم دهد. اگر روند خشک شدن ادامه یابد، خاک به نقطه‌ای می‌رسد که رطوبتش را از دست می‌دهد، اما دیگر تغییر حجمی در آن رخ نمی‌دهد (شکل‌های ۱-۵ و ۲۳-۵). به عبارت دیگر حد انقباض مقدار رطوبتی است که خاک در حال خشک شدن پس از آن تغییر حجم نمی‌دهد و خاک در حال تر شدن در این نقطه اشباع می‌شود.



شکل ۲۳-۵: روند اشباع شدن خاک تا رسیدن به حد انقباض: (الف) در حالت خشک؛ (ب) در حالت نیمه اشباع؛ (ج) در حالت اشباع کامل (SL).

#### ۵-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- کاسه حد انقباض: معمولاً از جنس چینی بوده و حدوداً  $1/75$  اینچ ( $44/4$  میلی‌متر) قطر و  $0/5$  اینچ ( $12/7$  میلی‌متر) ارتفاع دارد.

۲- فنجان شیشه‌ای: قطر این وسیله معمولاً بین  $2/5$  تا  $2/5$  اینچ ( $57/15$  تا  $63/5$  میلی‌متر) و ارتفاع آن بین  $1/25$  تا  $1/5$  اینچ ( $31/75$  تا  $38/1$  میلی‌متر) است.

۳- صفحه شیشه‌ای با سه شاخک

۴- ظرف تبخیر چینی

۵- کاردک

۶- بطری پلاستیکی (حاوی آب مقطر)

۷- ورق فلزی با لبه صاف

۸- جیوه

۹- ژله نفتی<sup>۱</sup>

۱۰- نعلبکی شیشه‌ای

۱۱- ترازو با دقیق  $0/01$  گرم

در شکل ۲۴-۵ تعدادی از وسایل مورد نیاز برای این آزمایش نشان داده شده است.

<sup>1</sup>. Petroleum jelly



شکل ۲۴-۵: تعدادی از وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش حد انقباض

### ۳-۳-۵) روش انجام آزمایش

- ۱- مقدار ۸۰ تا ۱۰۰ گرم از خاک مورد نظر که در هوای آزاد خشک شده است را برداشته و از الک شماره ۴۰ عبور می‌دهیم. سپس نمونه‌های الک شده را در ظرف تبخیر قرار می‌دهیم.
- ۲- از طریق بطربی پلاستیکی به خاک، آب اضافه می‌کنیم (شکل ۲۵-۵) و آن را توسط کاردک آنقدر مخلوط می‌کنیم که به صورت یک خمیر یکنواخت دربیاید (شکل ۲۶-۵). توجه شود که مقدار آب اضافه شده باید بیشتر از حد روانی خاک باشد تا نمونه به صورت کامل اشباع شود. البته باید دقت شود که این مقدار آنقدر زیاد نباشد که خاک به صورت مایع سرازیر شود.



شکل ۲۶-۵: مخلوط کردن آب و نمونه توسط کاردک

شکل ۲۵-۵: افزودن آب به نمونه

- ۳- سطح داخلی کاسه حد انقباض را با کمی ژله نفتی چرب کنید (شکل ۲۷-۵) تا نمونه خاک پس از خشک شدن براحتی قابل جدا شدن باشد. سپس جرم کاسه و ژله را با استفاده از ترازو تعیین می‌کنیم ( $M_1$ ).



شکل ۲۷-۵: چرب کردن کاسه حد انقباض توسط ژله نفتی

۴- نمونه تهیه شده در مرحله ۲ را در کاسه حد انقباض ریخته به طوری که  $\frac{1}{3}$  ارتفاع کاسه را پر کند (شکل ۲۸-۵). سپس با وارد کردن چند ضربه به کاسه، تمام هوای آن را خارج می کنیم.



شکل ۲۸-۵: ریختن نمونه داخل کاسه حد انقباض توسط کاردک

۵- مرحله ۴ را تا پر شدن کاسه ادامه می دهیم (شکل ۲۹-۵).



شکل ۲۹-۵: نمونه ساخته شده در مرحله ۵

- ۶- خاک اضافی را توسط ورق فلزی لبه صاف، برداشته و کف کاسه و اطراف را توسط حوله کاغذی تمیز می کنیم.
- ۷- جرم کاسه و خاک مرطوب را اندازه می گیریم ( $M_۲$ ).
- ۸- حدود ۶ ساعت، کاسه را در هوای آزاد قرار می دهیم تا پس از گذاشتن در گرم کن، در نمونه ترک ایجاد نشود. پس از این مرحله، کاسه را به مدت ۲۴ ساعت داخل گرم کن قرار می دهیم تا کاملاً خشک شود (شکل ۳۰-۵). دقต شود اگر پس از خشک شدن نمونه در گرم کن، ترک هایی در نمونه خاک ایجاد شود، آزمایش از ابتدا، با نمونه جدید و رطوبت بیشتر باید دوباره تکرار شود.



شکل ۵-۳۰: نمونه پس از خشک شدن در گرم کن بدون داشتن ترک

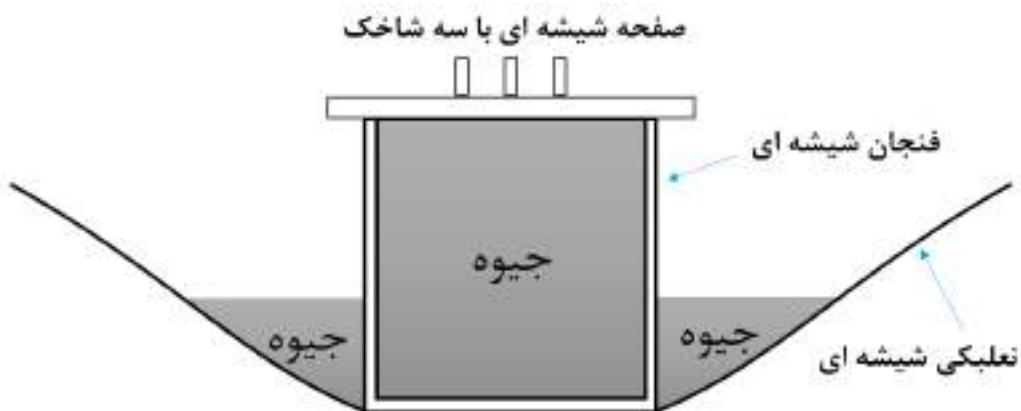
- ۹- جرم کاسه و خاک خشک شده را اندازه می گیریم ( $M_۳$ ).
- ۱۰- خاک را از داخل کاسه خارج می نماییم.
- ۱۱- کاسه حد انقباض را درون نعلبکی شیشه ای قرار داده (تا جیوه اضافی در درون این ظرف بریزد) و این بار با جیوه پر می کنیم تا حجمش را محاسبه کنیم ( $V_i$ ) (شکل ۳۱-۵). بهوسیله صفحه شیشه ای که دارای سه شاخک است، سطح جیوه موجود در کاسه حد انقباض را ترازو می کنیم (شکل ۳۲-۵). این کار ممکن است چندین بار با جابه جا کردن صفحه شیشه ای روی جیوه موجود صورت گیرد. حال کاسه را برداشته، دور آن را تمیز می کنیم و به همراه جیوه درون آن، روی ترازو قرار داده و جرم آن را یادداشت می کنیم ( $M_۴$ ).



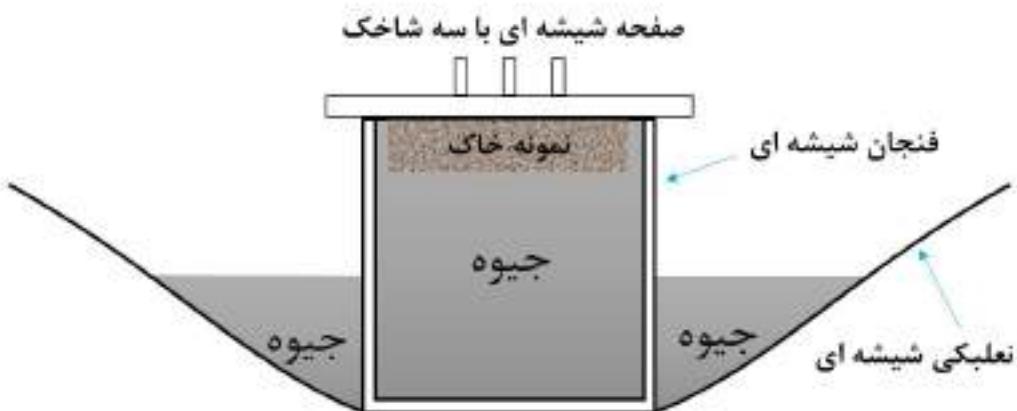
شکل ۵-۳۲-۵: ترازو کردن سطح فوقانی جیوه در کاسه حد انقباض توسط صفحه شیشه ای دارای سه شاخک

شکل ۵-۳۱-۵: پر کردن کاسه حد انقباض با جیوه

۱۲- به منظور محاسبه حجم خاک خشک شده ( $V_f$ )، فنجان شیشه‌ای را درون نعلبکی شیشه‌ای قرار می‌دهیم. فنجان را از جیوه پر کرده و با استفاده از صفحه شیشه‌ای دارای سه شاخک سطح آن را تراز می‌کنیم (شکل ۳۴-۵). مقدار جیوه‌های اضافی ریخته شده درون نعلبکی شیشه‌ای را خارج می‌کنیم. تکه خاک را به درون جیوه هل داده و بار دیگر سطح را تراز می‌کنیم (شکل ۳۴-۵). این بار، مقدار جرم جیوه ریخته شده به درون نعلبکی شیشه‌ای را اندازه می‌گیریم.  
 $(M_5)$



شکل ۳۴-۵: شکل شماتیک سطح فوقانی فنجان شیشه‌ای تراز شده توسط صفحه شیشه‌ای دارای سه شاخک



شکل ۳۴-۶: شکل شماتیک سطح فوقانی فنجان شیشه‌ای تراز شده توسط صفحه شیشه‌ای دارای سه شاخک پس از قرار دادن نمونه

#### ۴-۳-۵) محاسبات

۱- درصد رطوبت اولیه خاک بازسازی شده:

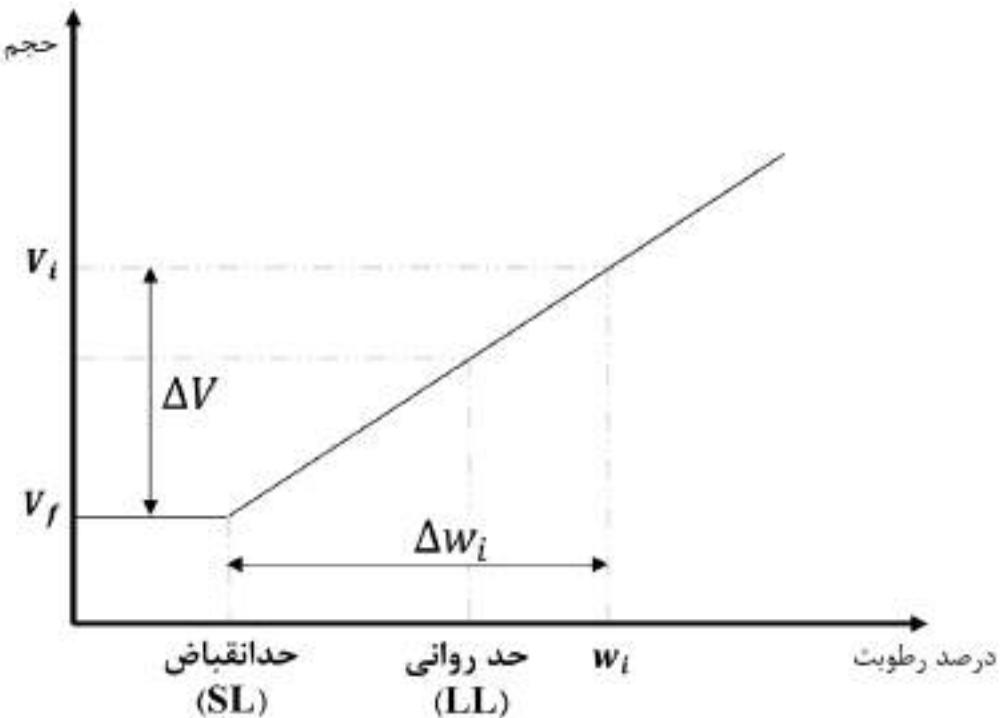
$$w_i(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_1} \times 100 \quad (10-5)$$

۲- تغییر درصد رطوبت خاک پیش از توقف کاهش حجم بر اساس شکل ۳-۵:

$$\Delta w_i(\%) = \frac{(V_i - V_f) \rho_w}{\text{جرم نمونه خاک خشک}} = \frac{M_4 - M_5}{13/6(M_3 - M_1)} \times 100 \quad (11-5)$$

$\rho_w$ : چگالی آب ( $g/cm^3$ ). دقت شود که  $13/6$  در این رابطه وزن مخصوص جیوه است.

$$SL = w_i(\%) - \frac{M_f - M_d}{13/6(M_r - M_1)} \times 100 \quad (12-5)$$



شکل ۵-۵: تعریف حد انقباض

نمونه‌ای از محاسبات آزمایش حد انقباض در جدول ۷-۵ نشان شده است.

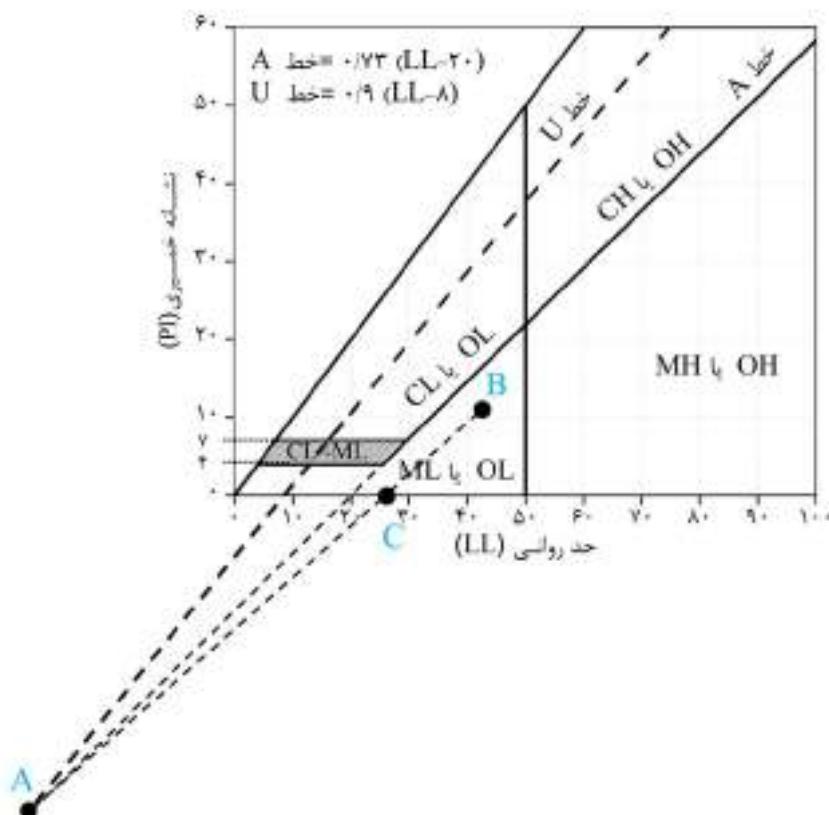
جدول ۷-۵: آزمایش حد انقباض

نوع خاک: خاک سیلت رس دار قهوه‌ای تیره	شماره نمونه: ۸
محل نمونه‌گیری ...../...../.....	شخص نمونه‌گیری: .....
تاریخ نمونه‌گیری: .....	

۱	شماره آزمایش
۱۲/۳۴	جرم کاسه حد انقباض + ژله داخل آن، $M_1(g)$
۴۰/۴۳	جرم کاسه + جرم خاک مرطوب، $M_r(g)$
۳۳/۶۸	جرم کاسه + جرم خاک خشک، $M_d(g)$
۳۱/۶۳	$w_i(\%) = \frac{M_r - M_d}{13/6(M_r - M_1)} \times 100$
۱۹۸/۸۳	جرم جیوه برای پر کردن کاسه، $M_f(g)$
۱۵۰/۳۰	جرم جیوه هم حجم نمونه خاک (جیوه جابه‌جاشده در اثر قرار دادن نمونه خاک)، $M_\delta(g)$
۱۶/۷۲	$\Delta w_i(\%) = \frac{M_f - M_\delta}{13/6(M_r - M_1)} \times 100$
۱۴/۹۱	$SL = w_i(\%) - \frac{M_f - M_\delta}{13/6(M_r - M_1)} \times 100$

## ۵-۳-۵) نکات کلی

- ۱- در هنگام کار با جیوه لازم است بسیار دقت شود که این فلز مایع که سمی و خطرناک است، با پوست دست تماس پیدا نکند و استنشاق نیز نشود.
  - ۲- نسبت حد روانی به حد انقباض  $\frac{LL}{SL}$  یک خاک، اطلاعات ارزندهای در رابطه با خاصیت انقباض آن خاک ارائه می‌دهد؛ به طوری که اگر این نسبت بزرگ باشد، این احتمال وجود دارد که در اثر تغییر رطوبت، خاک تغییر حجم نامطلوبی را تجربه کند. از طرف دیگر، در پی‌هایی که به ترازگی روی این خاک‌ها ساخته شده است نیز به دلیل انقباض یا انبساط در اثر تغییرات رطوبت فصلی، به وجود آمدن ترک محتمل است.
  - ۳- با دانستن مقادیر LL و PI یک خاک و رجوع به نمودار پلاستیسیته کاساگرانده، می‌توان بخش ریزدانه آن خاک را طبقه‌بندی نمود (این مبحث در فصل ششم توضیح داده خواهد شد). در این قسمت نیز با استفاده از نمودار پلاستیسیته و مقادیر LL و PI خاک مورد نظر، پس از طی مراحل زیر، می‌توان مقدار حد انقباض آن خاک را به صورت تقریبی تعیین نمود (شکل ۳۶-۵):
- الف- ابتدا خطوط A و U را امتداد می‌دهیم تا یکدیگر را در نقطه‌ای مانند A قطع کنند.
- ب- با توجه به مقدار LL و PI، مختصات خاک مورد نظر را در نمودار پلاستیسیته تعیین می‌کنیم (نقطه .B).
- ج- نقاط A و B را به یکدیگر وصل می‌کنیم. خط حاصل، محور LL را در نقطه‌ای مانند C قطع می‌کند که این نقطه، مقدار تقریبی حد انقباض خاک مدنظر است.



شکل ۳۶-۵: روش تقریبی یافتن مقدار حد انقباض در نمودار پلاستیسیته



## **فصل ششم**

**طبقه‌بندی مهندسی خاک‌ها (ASTM D2487)**

#### ۱-۶) مقدمه و تئوری

از منظر مهندسی عمران، خاک‌ها عبارت‌اند از تجمع هرگونه ذرات معدنی بدون سیمان یا ضعیف که در اثر هوازدگی سنگ‌ها به وجود می‌آید و در اغلب موارد، همراه با فضای خالی بین ذرات (هوای آب) بوده و یک سیستم سه‌فازی را تشکیل می‌دهد (شکل ۱-۶). گونه‌های مختلف خاک، یکی از قدیمی‌ترین و پیچیده‌ترین مصالح ساختمانی محسوب می‌شود.



شکل ۱-۶: دیاگرام سه‌فازی یک توده خاک

جهت به کارگیری هرچه بهتر خاک‌ها برای اهداف مهندسی، به شناخت ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آن‌ها نیازمندیم. خاک‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های متفاوتی مانند اندازه دانه‌ها، جنس کانی‌ها، مقاومت و منشأ ایجادشان طبقه‌بندی نمود. خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک‌ها غالباً تابعی از جنس، شکل، اندازه و چگونگی توزیع اندازه دانه‌ها است؛ ازین‌رو در سیستم طبقه‌بندی متحده (USCS<sup>۱</sup>)، اندازه دانه‌ها و خاصیت خمیری خاک‌ها، معیار مهندسین ژئوتکنیک برای طبقه‌بندی خاک‌ها قرار گرفته است. خاک‌هایی که دارای طبقه‌بندی متحده (USCS) یکسان است، خواص مهندسی مشابهی از جمله مقاومت، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری دارد.

در سیستم طبقه‌بندی متحده، خاک‌ها به سه دسته کلی درشت‌دانه<sup>۲</sup>، ریز‌دانه<sup>۳</sup> و خاک‌های آلی<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. خاک‌های درشت‌دانه خود به دو زیرمجموعه شن و ماسه و خاک‌های ریز‌دانه نیز به دو بخش سیلت (لای) و رس تقسیم می‌شود. در این روش، هر خاک با یک اسم «دوحرفی» معرفی می‌شود که حرف اول در نام‌گذاری بیانگر «گروه» خاک است و خاک را به شرح زیر توصیف می‌کند:

G: <sup>۵</sup> شن

S: <sup>۶</sup> ماسه

C: <sup>۷</sup> رس

M: <sup>۸</sup> سیلت

O: <sup>۹</sup> آلی

حرف دوم یک تکمیل‌کننده است که توضیحات بیشتری از خاک ارائه می‌دهد:

P: <sup>۱۰</sup> بد دانه‌بندی شده

W: <sup>۱۱</sup> خوب دانه‌بندی شده

<sup>1</sup> Unified Soil Classification System

<sup>2</sup> Coarse-grained soil

<sup>3</sup> Fine-grained soil

<sup>4</sup> Organic soils

<sup>5</sup> Gravel

<sup>6</sup> Sand

<sup>7</sup> Clay

<sup>8</sup> Silt (Muck)

<sup>9</sup> Organic

<sup>10</sup> Poorly-graded

<sup>11</sup> Well-graded

M: سیلیت<sup>۱</sup>C: رسی<sup>۲</sup>خاصیت پلاستیسیته کم<sup>۳</sup>:خاصیت پلاستیسیته زیاد<sup>۴</sup>:

پنج نوع اصلی از خاک‌ها و نمادهای گروهی که در هر نوع خاک قرار می‌گیرد، عبارت است از:

شن: GW, GP, GM و GC

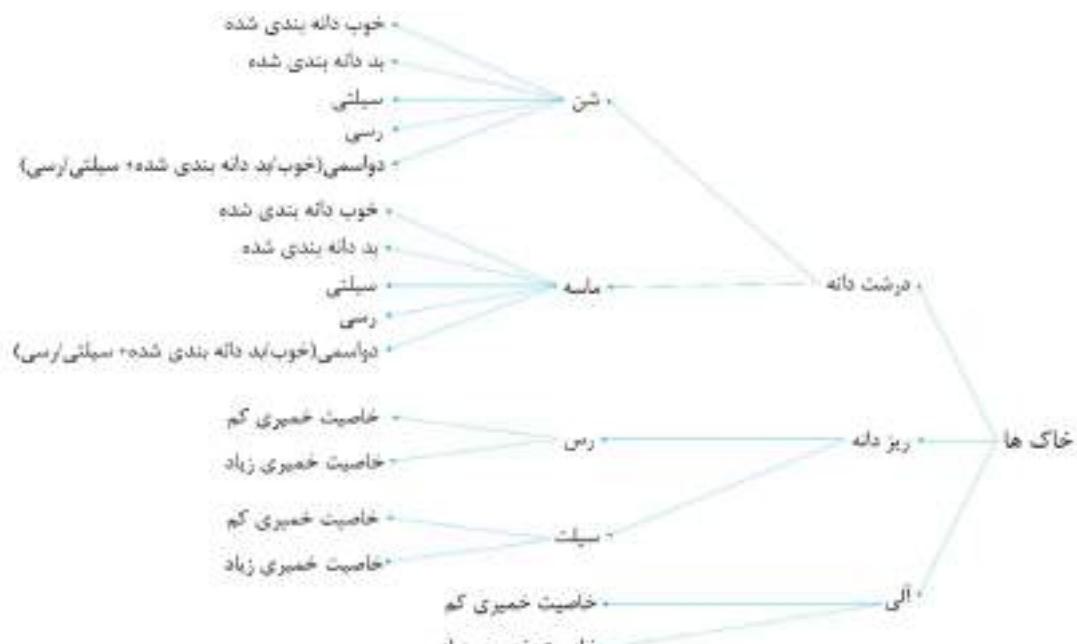
ماسه: SW, SP, SM و SC

رس: CH و CL

سیلیت: MH و ML

آلی: OH و OL

در میان گروه‌های معرفی شده برای خاک‌ها، سه گروه OL, MH و OH نسبتاً غیرمعمول است و دو خاک OL و OH به دلیل کارایی نداشتن در مصارف مهندسی، محور بحث در این کتاب نیست و جهت آشنایی بیشتر قرار داده شده است.  
در شکل ۶-۲ خلاصه‌ای از مطالب ذکر شده، آورده شده است.



شکل ۶-۲: دیاگرام طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس سیستم USCS

## ۶-۲) محاسبات

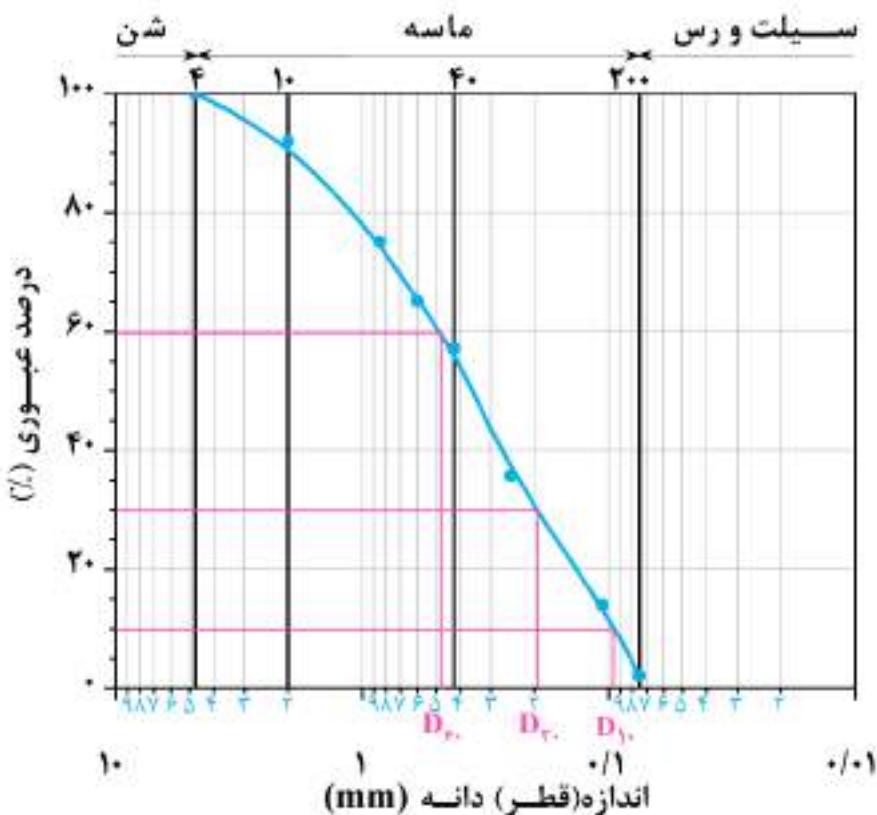
### ۱- تعیین درصد عبوری

مطابق آنچه در فصل چهارم بیان شد، برای قسمت باقیمانده بر روی الک شماره ۲۰۰، آزمایش دانه‌بندی با الک را انجام می‌دهیم و طبق جدول ۶-۲، مقدار درصد عبوری از هر الک را محاسبه می‌نماییم.

<sup>1</sup>. Silty<sup>2</sup>. Clayey<sup>3</sup>. Low-plasticity (lean)<sup>4</sup>. High-plasticity (fat)

۲- رسم منحنی

با این مطالب فصل سوم، برای خاک باقیمانده بر روی الک شماره ۲۰۰، منحنی تغییرات درصد عبوری، بر حسب لگاریتم اندازه قطر سوراخ الکها را بر روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی یا توسط نرم افزارهای ترسیمی کامپیوتری، رسم می کنیم. نمونه ای از این منحنی در شکل ۳-۶ نشان داده است.



### شکل ۶-۳: منحنی دانه‌بندی خاک

٣- تعیین نوع خاک

۱. تعیین درشتدانه یا ریزدانه بودن خاک: اگر ۵۰ درصد یا بیش از ۵۰ درصد خاک از الک شماره ۲۰۰۰ عبور کند، خاک ریزدانه و در غیر این صورت خاک درشتدانه است.
  ۲. تعیین حروف اول (نام گروه) و دوم برای خاک‌های ریزدانه: آزمایش حدود اتربرگ (فصل پنجم) را برای این خاک انجام می‌دهیم. مختصات LL و PI را روی نمودار پلاستیسیته (شکل ۶-۴) مشخص می‌کنیم. سپس با توجه به نمادهای نشان‌داده شده در نمودار، نوع خاک (نام گروه) مشخص می‌شود. برای تعیین حرف دوم، چنانچه مقدار LL خاک بیش از ۵۰٪ باشد، حرف دوم H (خاصیت پلاستیسیته بالا) و در غیر این صورت L (خاصیت پلاستیسیته کم) انتخاب می‌شود (که این قسمت را نیز می‌توان از نمودار شکل ۶-۶ مشخص نمود).
  ۳. تعیین حرف اول برای خاک‌های درشتدانه: ابتدا باید مشخص شود که خاک شن است یا ماسه. برای به دست آوردن درصد ماسه، درصد مانده روی الک ۲۰۰ را از درصد مانده روی الک ۴ (مقدار شن) کم می‌کنیم. حال با مقایسه این دو مقدار (درصد ماسه و درصد شن)، هر کدام که سهم بیشتری داشت، نوع خاک را مشخص می‌کند (شکل ۶-۵). در صورتی که مقدار شن و ماسه برابر شود، خاک را شن فرض می‌کنیم.

#### ۴. تعیین حرف دوم برای خاک‌های درشت‌دانه:

**الف) اگر درصد عبوری از الک ۲۰۰ مساوی یا کمتر از ۵٪ باشد:** نوع خاک از نوع شن یا ماسه تمیز

است. در این صورت، پارامترهای زیر باید محاسبه شود:

مقادیر  $D_{1.}$  (اندازه مؤثر)،  $D_{4.}$  و  $D_{3.}$  را تعیین می‌کنیم (از روی منحنی دانه‌بندی، قطر متناظر با درصد عبوری ۱۰، ۳۰ و ۶۰ را می‌خوانیم. پیش‌تر در فصل سوم نیز بیان شد که اندازه خوانده شده از نمودار مثلاً برای  $D_{1.}$  به این معناست که ۱۰ درصد از خاک از الک مشخص شده عبور کرده است یا به عبارت دیگر، ۱۰ درصد از خاک، قطری کوچک‌تر از قطر خوانده شده روی محور افقی نمودار دارد). سپس مقادیر ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب انحنا ( $C_c$ ) را همانند فصل چهارم، با استفاده از روابط زیر تعیین می‌کنیم:

$$C_u = \frac{D_{4.}}{D_{1.}} \quad (1-6)$$

$$C_c = \frac{(D_{3.})^2}{D_{4.} \times D_{1.}} \quad (2-6)$$

اگر مقادیر ضرایب یکنواختی و انحنای به دست آمده بین بازه‌های مشخص شده در روابط (۳-۶) تا (۶-۶) باشد، در این صورت خاک خوب دانه‌بندی شده و حرف دوم با W مشخص می‌شود و در غیر این صورت، خاک بد دانه‌بندی شده است و حرف دوم با P نشان داده خواهد شد.

#### برای خاک‌های شنی

$$C_u \geq 4 \quad (3-6)$$

$$1 \leq C_c \leq 3 \quad (4-6)$$

#### برای خاک‌های ماسه‌ای

$$C_u \geq 6 \quad (5-6)$$

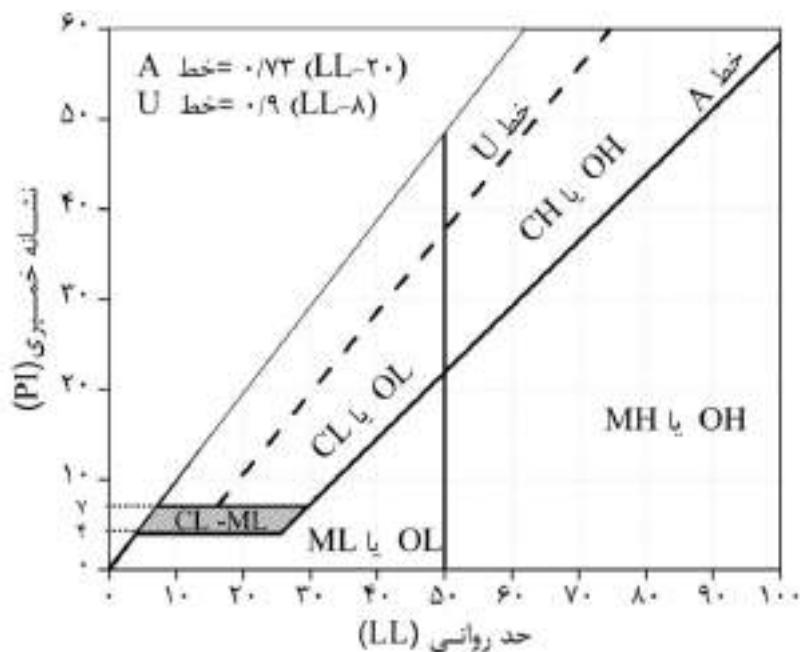
$$1 \leq C_c \leq 3 \quad (6-6)$$

**ب) اگر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بیشتر از ۱۲٪ باشد:** در این صورت نوع خاک از نوع درشت‌دانه همراه با ریزدانه است؛ برای تعیین حرف دوم (نام قسمت ریزدانه) خاک به مرحله ۲ رجوع کرده و همان روند را برای این قسمت از خاک نیز انجام می‌دهیم که فقط مشخص شود خاک رس است یا سلیت.

**ج) اگر درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ بیشتر از ۵٪ و مساوی و یا کمتر از ۱۲٪ باشد:** در این صورت خاک دو اسمی است؛ در این حالت به قسمت درشت‌دانه خاک به صورت مستقل نگاه کرده و همانند مرحله ۳ ابتدا تعیین می‌کنیم که خاک شن است یا ماسه، سپس همانند قسمت ۴-الف مشخص می‌کنیم که خاک خوب دانه‌بندی شده یا بد دانه‌بندی شده است. همچنین قسمت ریزدانه خاک را نیز به صورت جداگانه بررسی کرده و مانند مرحله ۲ فقط مشخص می‌کنیم که خاک رس است یا سلیت. درنهایت نام خاک، ترکیبی از قسمت درشت‌دانه و ریزدانه خواهد بود. به طور کلی نام خاک در این قسمت، یکی از موارد زیر به دست خواهد آمد:

*GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC*

*SW-SM SW-SC SP-SM SP-SC*

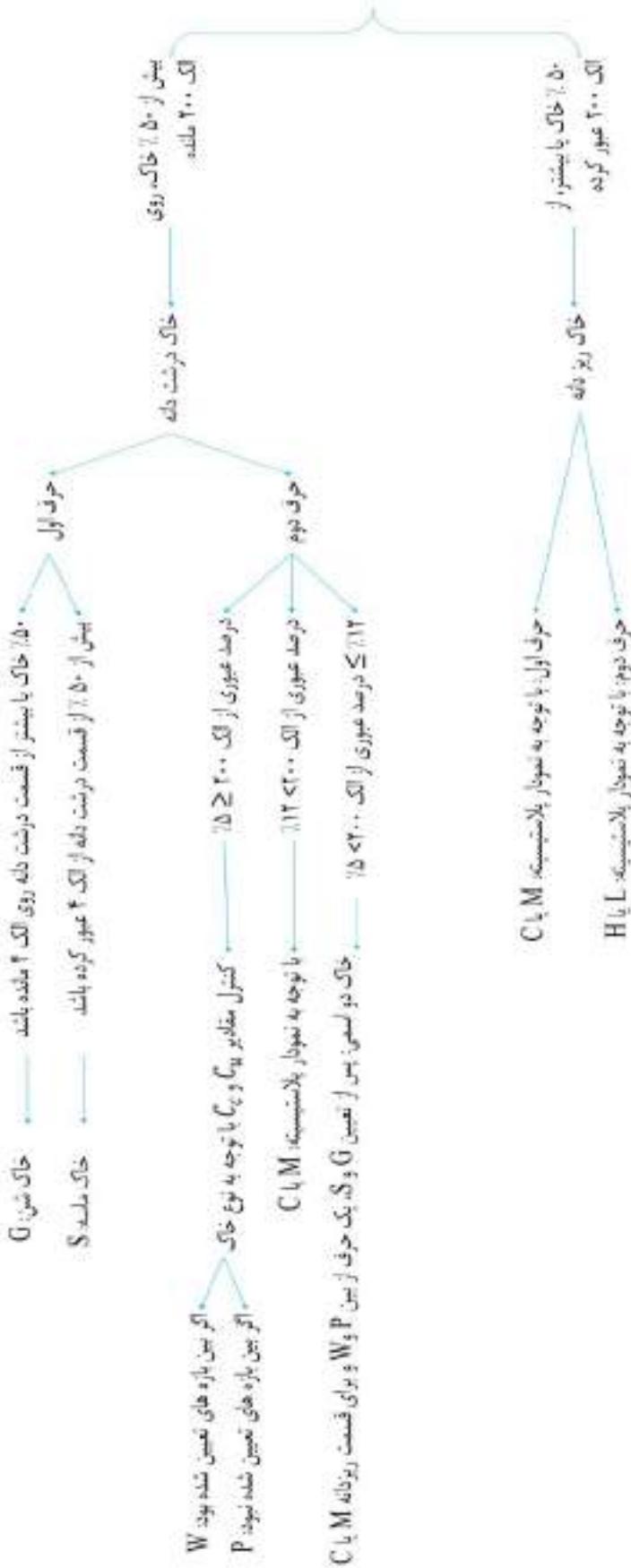


شکل ۶-۴: نمودار پلاستیسیته کاساگرانده



شکل ۶-۵: مرز بین شن و ماسه

خلاصه تمامی مطالب گفته شده در این قسمت، در شکل ۶-۶ آورده شده است.



شکل ۶-۴: خلاصه‌ای از مراحل طبقه‌بندی مهندسی خاک‌ها

در ادامه برای درک بهتر مطالب، مثال‌هایی از طبقه‌بندی خاک‌ها به روش متعدد قرار داده شده است.

### مثال ۱ - خاک ۱:

درصد عبوری از الک شماره ۴:	۹۸
درصد عبوری از الک شماره ۱۰:	۹۰
درصد عبوری از الک شماره ۴۰:	۷۶
درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰:	۳۴
حد روانی:	۳۸
حد خمیری:	۲۶

حل:

**با مراجعه به مرحله ۱:** درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ کمتر از ۵۰٪ است، پس خاک درشت‌دانه است.

**با مراجعه به مرحله ۳:** ابتدا باید مشخص شود که خاک شن است یا ماسه. درصد مانده روی الک شماره ۴، درصد شن است. در این صورت داریم:

$$100 - 98 = 2\%$$

برای محاسبه درصد ماسه که مقدار خاک بین الک شماره ۴ و ۲۰۰ است، ابتدا درصد مانده روی الک شماره ۲۰۰ را محاسبه می‌کنیم:

$$100 - 34 = 66\%$$

حال درصد شن را از این مقدار کم می‌کنیم تا درصد ماسه مشخص شود:

$$66 - 2 = 64\%$$

$$64 > 0.2$$

پس خاک ماسه است و حرف اول آن با S مشخص می‌شود.

**با مراجعه به مرحله ۴:** درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰، برابر با ۳۴٪ است. این مقدار بیش از ۱۲٪ است؛ پس به قسمت «ب» و بر طبق آن، به مرحله ۲ رجوع می‌نماییم. مقدار حد روانی (LL) برابر با ۳۸ است؛ مقدار شاخص خمیری (PI) برابر می‌شود با:

$$PI = LL - PL = 38 - 26 = 12$$

همچنین برای استفاده دقیق‌تر از نمودار پلاستیسیته شکل ۴-۶، می‌توان مقدار شاخص خمیری (PI) خطوط A و U را محاسبه نمود:

$$PI_A = \frac{0.73}{0.73} (38 - 20) = 13/14$$

$$PI_U = \frac{0.9}{0.9} (38 - 8) = 27$$

با توجه به مقادیر محاسبه شده، می‌توان گفت که مقدار شاخص خمیری (PI) خاک ۱، در زیر خط A قرار می‌گیرد. پس نوع خاک قسمت ریزدانه، از نوع سیلت (M) است.

پس درنهایت می‌توان گفت «خاک ۱» از نوع «ماسه سیلتدار» (SM) است.

### مثال ۲ - خاک ۲:

درصد عبوری از الک شماره ۴:	۱۰۰
درصد عبوری از الک شماره ۱۰:	۹۸
درصد عبوری از الک شماره ۴۰:	۸۶
درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰:	۵۸

حد روانی: ۴۹

حد خمیری: ۲۸

حل:

**با مراجعه به مرحله ۱:** در صد عبوری از الک شماره ۲۰۰ بیشتر از ۵۰٪ است، پس خاک ریزدانه است.

**با مراجعه به مرحله ۲:** مقدار شاخص خمیری (PI) برابر می‌شود با:

$$PI = LL - PL = ۴۹ - ۲۸ = ۲۱$$

همچنین برای استفاده دقیق‌تر از نمودار پلاستیسیته شکل ۶-۴، می‌توان مقدار شاخص خمیری (PI) خطوط A و U را محاسبه نمود:

$$PI_A = \frac{0.73}{(49 - 20)} = ۲۱/۱۷$$

$$PI_U = \frac{0.9}{(49 - 8)} = ۳۶/۹$$

با توجه به مقادیر محاسبه‌شده، می‌توان گفت که مقدار شاخص خمیری (PI) خاک ۲، در زیر خط A و شاخص روانی نیز در سمت چپ خط میانی نمودار پلاستیسیته قرار می‌گیرد. پس نوع خاک سیلت (M) با خاصیت پلاستیسیته کم (L) یا به عبارت دقیق‌تر ML است.

درنهایت می‌توان گفت «خاک ۲» از نوع «سیلت با خاصیت پلاستیسیته کم» (ML) است.

### ۶-۳) نکات کلی

۱- نام دیگر خاک‌های "CH"، "MH" و "CL" به ترتیب رس چاق<sup>۱</sup>، سیلت الاستیک<sup>۲</sup>، رس لاغر<sup>۳</sup> و سیلت لاغر<sup>۴</sup> است.

۲- همان‌طور که قبل ذکر شد، خاک‌هایی که نماد مشترکی در طبقه‌بندی USCS دارد، دارای خواص مهندسی مشابهی هستند. در جدول ۶-۱ انواع خاک‌ها در این سیستم و ویژگی‌های متفاوت‌شان ارائه شده است (دقیق‌تر کنید که ویژگی‌های ارائه‌شده در این جدول برخی از ویژگی‌های این خاک‌ها است).

جدول ۶-۱: انواع خاک‌ها بر اساس طبقه‌بندی USCS و ویژگی‌هایشان

نوع خاک	نوع خاک بر اساس سیستم USCS	پارامتر مورد نظر (ویژگی)
ریزدانه	ML, CL, CH	نفوذپذیری کم
بد دانه‌بندی شده	GP, SP	نفوذپذیری زیاد
خوب دانه‌بندی شده	GW, SW	مقاومت زیاد
شنی	GM, GP, GW	تراکم‌پذیری کم

۳- بد دانه‌بندی شدن و خوب دانه‌بندی شدن یک خاک الزاماً به معنای کارایی ضعیف و کارایی بهتر نیست؛ چه بسا در بسیاری از کارهای مهندسی از جمله طراحی فیلتر یک سد خاکی، خاک بد دانه‌بندی شده (با دانه‌بندی یکنواخت) بسیار مناسب‌تر از خاک خوب دانه‌بندی شده باشد.

۱. Fat clay  
۲. Elastic silt

۳. Lean clay  
۴. Lean silt



## فصل هفتم

(ASTM D2419-AASHTO T176) آزمایش هم‌ارز ماسه

## ۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

نسبت ماسه به ریزدانه‌ها (سیلت و رس) در خاک، یک عامل مهم در عملیات زئوتکنیکی و ساختمانی محسوب می‌شود؛ زیرا وجود مasse بیشتر در مقایسه با ریزدانه‌ها در خاک در زیرسازی راه‌ها و نیز در احداث سدهای خاکی، باعث پایین آمدن درصد آب بهینه و زودتر رسیدن خاک به حداکثر تراکم خود است. در آسفالت نیز درصد زیاد ریزدانه موجب مصرف بیشتر قیر و درنتیجه باعث سست شدن و وارفتن آسفالت زیر بارهای وارد شده می‌شود. همچنین مقدار ماسه در ساخت بن نیز بر مصرف آب، تراکم بتن و نفوذپذیری و مقاومت در برابر هوازدگی آن اثر خواهد داشت.

آزمایش همارز ماسه را می‌توان مکمل آزمایش دانه‌بندی دانست. هدف از این آزمایش، نشان‌دادن مقدار نسبی ذرات رس‌مانند یا ریزدانه‌های پلاستیک<sup>۱</sup> و یا گردوغبار در خاک‌های دانه‌ای و سنگ‌دانه‌های ریز<sup>۲</sup> عبوری از الک شماره ۴/۷۵ (میلی‌متر) در شرایط استاندارد است. اصطلاح «همارز ماسه»<sup>۳</sup> این مفهوم را بیان می‌کند که بیشتر خاک‌های دانه‌ای و سنگ‌دانه‌های ریز<sup>۴</sup>، مخلوطی از ذرات درشت مطلوب مانند شن و ماسه و خاک رس یا ریزدانه‌های پلاستیکی نامطلوب و گردوغبار است. مقدار همارز ماسه، نسبت ارتفاع ماسه به ارتفاع کل خاک در استوانه استاندارد برای یک حجم معین خاک است و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$SE(%) = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad (1-7)$$

$H_2$ : ارتفاع ماسه (in.)

$H_1$ : ارتفاع کل خاک (in.)

## ۲-۱) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- استوانه مدرج (شکل ۱-۷)
- ۲- سنبه فولادی نشانه‌دار<sup>۵</sup> (شکل ۲-۷)
- ۳- پیمانه فلزی<sup>۶</sup> (شکل ۳-۷)
- ۴- قیف (شکل ۴-۷)
- ۵- چوب‌پنبه پلاستیکی<sup>۷</sup> (شکل ۵-۷)
- ۶- محلول استوک<sup>۸</sup> یا محلول کلسیم کلرید تهیه شده برای آزمایش<sup>۹</sup> (شکل ۶-۷)
- ۷- بطری پلاستیکی (شکل ۷-۷)
- ۸- زمان‌سنج (ساعت یا کرنومتر) (شکل ۸-۷)
- ۹- الک شماره ۴ (شکل ۹-۷)
- ۱۰- دستگاه لرزاننده (شکل ۱۰-۷)
- ۱۱- لوله آبیاری<sup>۱۰</sup> و سیفون<sup>۱۱</sup> و گیره (شکل ۱۱-۷): این وسایل هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که بخواهیم محلول استوک ریخته شده درون گالون مخصوص را درون استوانه مدرج منتقل کنیم.
- ۱۲- ترازو (شکل ۱۲-۷)
- ۱۳- گرم‌کن (شکل ۱۳-۷)
- ۱۴- کاردک (شکل ۱۴-۷)

۱. Plastic fines

۲. Fine aggregates

۳. Sand Equivalent

<sup>۴</sup>. منظور از سنگ‌دانه‌های ریز، سنگ‌دانه‌های

عبوری از الک  $\frac{3}{8}$  اینچ (۹/۵ میلی‌متر) و مانده

روی الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) است.

۵. Weighted Foot Assembly

۶. Tinned-Metal Sample

Containers

۷. Solid Rubber Stopper

۸. Stock Solution

۹. Working Calcium Chloride

Solution

۱۰. Irrigator Tube

۱۱. Siphon

۱۵- جداساز نمونه<sup>۱</sup> (شکل ۱۵-۷)

۱۶- برس (شکل ۱۶-۷)

۱۷- دو عدد ظرف پهن (شکل ۱۷-۷)

۱۸- حوله

۱۹- پلاستیک<sup>۲</sup>

در شکل ۱۸-۷ مجموعه‌ای از وسایل تخصصی آزمایش همارز ماسه به صورت یک ست آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۷-۲: سنبه فولادی نشانه‌دار

شکل ۷-۱: استوانه مدرج

<sup>1</sup>. Universal sample splitter

<sup>2</sup>. Splitting cloth



شکل ۷-۴: قیف



شکل ۷-۳: پیمانه فلزی



شکل ۷-۶: محلول استوک



شکل ۷-۵: چوب پنبه پلاستیکی



شکل ۷-۸: زمان سنج



شکل ۷-۷: بطری پلاستیکی



(ب)



(الف)

شکل ۹-۷: الف) الک شماره ۴؛ ب) دریوش الک



شکل ۱۰-۷: انواع دستگاه‌های لرزاننده



شکل ۷-۱۲: ترازو



شکل ۷-۱۱: لوله آبیاری و سیفون و گیره



شکل ۷-۱۴: کاردک



شکل ۷-۱۳: گرم کن



شکل ۷-۱۶: برس



شکل ۷-۱۵: جداساز نمونه



شکل ۷-۷: ظرف پهن



شکل ۷-۸: ست آزمایشگاهی آزمایش همارز ماسه

### ۳-۷) روش انجام آزمایش

- ابتدا نمونه خاک را از دستگاه «جداساز نمونه» عبور می‌دهیم تا دانه‌های خیلی بزرگ (مشابه تکه سنگ) از نمونه جدا شده و دانه‌ها با اندازه قابل آزمایش، باقی بماند (شکل ۷-۹).



شکل ۱۹-۷: عبور نمونه خاک از دستگاه جداساز نمونه

- ۲- نمونه عبوری را در ظرف پهنه می‌ریزیم.
- ۳- نمونه مرحله ۲ را از الک شماره ۴ عبور می‌دهیم (شکل ۲۰-۷).



شکل ۲۰-۷: ریختن نمونه به داخل الک شماره ۴

تذکر: همچنین لازم است تا در این مرحله، کلوخه‌ها را (در صورت وجود)، با دست شکسته و پس از آن از الک عبور دهیم تا مطمئن شویم که تمام دانه‌های کوچک‌تر از الک شماره ۴، از آن عبور می‌کند (شکل ۲۱-۷).



شکل ۲۱-۷: شکستن کلوخه‌های خاک

۴- توسط برس، تمام خاک عبوری از الک مرحله ۳ را به ظرف پهن دیگری، منتقل می‌کنیم (شکل ۲۲-۷).



شکل ۲۲-۷: منتقل کردن خاک به درون ظرف پهن توسط برس

۵- با کمک ترازو، حدود ۰/۲۲ پوند (۱۰۰ گرم) از خاک مرحله ۴ را برمی‌داریم.

۶- در این مرحله لازم است تا نمونه با درصد رطوبت مناسب برای آزمایش آماده شود. برای این منظور، توسط بطری پلاستیکی به نمونه آب اضافه می‌کنیم (شکل ۲۳-۷) و آن را با دست، کاملاً مخلوط می‌نماییم (شکل ۲۴-۷).



شکل ۲۳-۷: افزودن آب به نمونه



شکل ۲۴-۷: مخلوط کردن نمونه و آب اضافه شده توسط دست

رطوبت مناسب رطوبتی است که در آن با فشردن نمونه مرطوب توسط دست (شکل ۲۵-۷)، شکل نمونه پس از بازکردن دست، حفظ می‌شود بدون این که شکسته شود (شکل ۲۶-۷).



شکل ۷-۲۵: برداشتن و فشردن نمونه توسط دست به منظور بررسی مقدار رطوبت نمونه



شکل ۷-۲۶: شکل حاصله از رطوبت مناسب نمونه پس از بازکردن دست

چنانچه نمونه پس از بازکردن دست، فرو بربزد<sup>۱</sup> (نمونه خیلی خشک) (شکل ۷-۲۷)، باید به آن مقداری آب اضافه کرده و دوباره آن را مخلوط کنیم و دوباره بررسی نماییم.



شکل ۷-۲۷: شکل به دست آمده از نمونه خیلی خشک ترک خورده پس از بازکردن دست

---

۱. Crumble

همچنین اگر درصد رطوبت نمونه بیش از مقدار مناسب آن باشد (نمونه خیلی مرطوب)، نمونه پس از باز کردن دست، به همان صورت باقی خواهد ماند، اما آب آزاد<sup>۱</sup> پدیدار خواهد شد (شکل ۷-۲۸). در این حالت نیز، باید نمونه را مدتی در گرم کن خشک کرده و آنقدر این مراحل را تکرار کنیم تا به مقدار رطوبت مناسب برسیم.



شکل ۷-۲۸: شکل به دست آمده از نمونه خیلی مرطوب و وجود آب آزاد پس از باز کردن دست

۷- پس از رسیدن به رطوبت مناسب، نمونه باید عمل آورده شود. برای این منظور، ظرف پهنه را به مدت ۱۵ دقیقه، بدون هیچ گونه دست خوردگی با حوله‌ای می‌پوشانیم؛ به طوری که حوله با نمونه خاک هیچ گونه تماسی نداشته باشد (شکل ۷-۲۹).



شکل ۷-۲۹: پوشاندن ظرف پهنه با حوله و تنظیم زمان برای مدت ۱۵ دقیقه

۱. Free water

۸- پس از گذشتن زمان ۱۵ دقیقه، نمونه را روی پلاستیک می‌ریزیم (شکل ۳۰-۷).

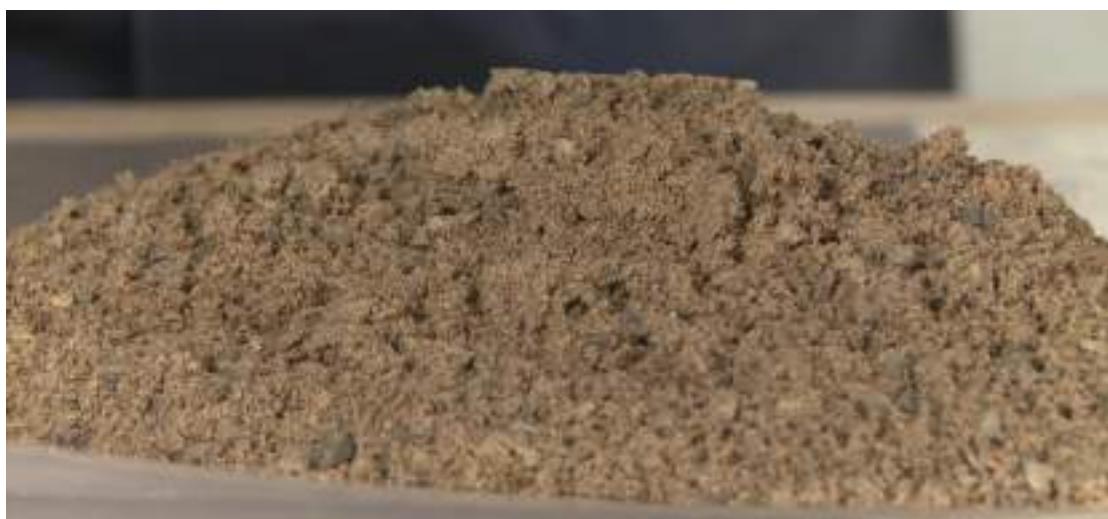


شکل ۷-۳۰: منتقل کردن نمونه به پلاستیک

۹- پلاستیک را به صورت قطری، از هر چهار گوش به سمت مرکز تا می‌کنیم تا تمام قسمت‌های خاک با هم مخلوط شود (شکل ۳۱-۷). این کار را به مدت یک دقیقه تکرار می‌کنیم تا خاک، همگن شود (شکل ۳۲-۷).



شکل ۷-۳۱: مخلوط کردن نمونه به صورت قطری



شکل ۷-۳۲: شکل حاصله پس از مخلوط کردن نمونه

۱۰- مطابق شکل‌های ۳۳-۷ و ۳۴-۷، پیمانه فلزی را از خاک مرحله ۹ پر کرده و سپس آن را با دست محکم فشار می‌دهیم (شکل ۳۵-۷) تا به وسیله تراکم، تمامی قسمت‌های پیمانه، از خاک پر شود (شکل ۳۶-۷).



شکل ۳۳-۷: پر کردن پیمانه



شکل ۳۴-۷: پر کردن پیمانه



شکل ۷-۳۵: فشردن نمونه با دست به منظور متراکم کردن آن



شکل ۷-۳۶: شکل حاصله پس از متراکم کردن نمونه

۱۱- سطح نمونه داخل پیمانه را توسط کاردک صاف می کنیم (شکل ۷-۳۷).



شکل ۳۷-۷: شکل حاصله پس از تراز کردن سطح نمونه

۱۲- نمونه مرحله ۱۱ را در گرم کن با دمای  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ، قرار می‌دهیم تا خشک شود.

۱۳- پس از خشک شدن، نمونه را از گرم کن خارج می‌کنیم و می‌گذاریم تا خنک شود.

۱۴- در این مرحله، باید محلول این آزمایش آمده شود. برای این کار مقدار  $85 \pm 5\text{ mL}$  از محلول کلیسیم کلرید را با مقدار  $3/8$  لیتر (یک گال<sup>۱</sup>) از آب مقطر یا آب دیونیزه مخلوط می‌کنیم (البته می‌توان به جای کلیسیم کلرید تهیه شده، از محلول استوک نیز استفاده کرد). در تمام طول آزمایش، دمای محلول تهیه شده، باید در حدود  $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$  ( $72 \pm 5^{\circ}\text{F}$ ) نگه داشته شود.

تذکر: بهتر است برای تهیه محلول، از آب لوله کشی استفاده نشود؛ زیرا به دلیل وجود املاح در این آب، نتیجه آزمایش، دستخوش خطأ می‌شود.

۱۵- اکنون، سیفون و لوله پلاستیکی و لوله آبیاری را سرهم می‌نماییم، سپس روی گالون نشان داده شده قرار می‌دهیم (شکل ۳۸-۷). گالن حاوی محلول تهیه شده در مرحله ۱۴ است.

<sup>1</sup>. Gal



شکل ۷-۳۸: قراردادن سیفون و لوله‌های مذکور بر روی درپوش گالن حاوی محلول تهیه شده در مرحله ۱۴

۱۶- گالن مرحله ۱۵ به همراه ملحقات آن را در ارتفاع  $102 \pm 3$  میلی‌متر) از استوانه مدرج، قرار می‌دهیم (شکل ۷-۳۹).

۱۷- استوانه مدرج را که از پایین به بالا تا عدد ۱۵ اینچ ( $381$  سانتی‌متر) مدرج شده است، تا علامت ۴ اینچ ( $1016$  سانتی‌متر) از محلول تهیه شده در مرحله ۱۴، پر می‌کنیم (شکل ۷-۳۹).



شکل ۷-۳۹: قراردادن گالن و ملحقات آن در ارتفاع مذکور و برداشتن گیره از لوله پلاستیکی و پر کردن استوانه به میزان ۴ لیتر

۱۸- قیف را بر روی استوانه مرحله ۱۷ گذاشته و نمونه مرحله ۱۳ را داخل آن می‌ریزیم (شکل ۴۰-۷).



شکل ۴۰-۷: قراردادن قیف بر روی استوانه و ریختن خاک به داخل استوانه

۱۹- پس از ریختن کامل نمونه داخل استوانه، استوانه را برداشته و چند ضربه به کف آن وارد می‌کنیم تا هوای موجود در مخلوط خارج شود (شکل ۴۱-۷).



۲۰- مخلوط مرحله ۱۹ را به مدت  $10 \pm 1$  دقیقه بدون هیچ‌گونه دستخوردگی می‌گذاریم تا خیس بخورد.

۲۱- با کمک چوب پنبه، دهانه استوانه را مسدود کرده (شکل ۴۲-۷) و با بر عکس کردن استوانه و تکان دادن جزئی همزمان آن توسط دست، مخلوط تهنشین شده را آزاد می کنیم تا برای قرار دادن در دستگاه لرزاننده آماده کنیم (شکل ۷-۴۳).



شکل ۷-۴۲: مسدود کردن دهانه استوانه توسط چوب پنبه



شکل ۷-۴۳: سروته کردن استوانه و تکان دادن دستی آن به منظور آزادسازی نمونه تهنشین شده

-۲۲- استوانه مرحله ۲۱ را به مدت  $45\pm 1$  ثانیه، داخل دستگاه ارتعاش‌دهنده قرار می‌دهیم تا تکان بخورد (شکل ۷-۴۴).



شکل ۷-۴۴: قرار دادن استوانه در دستگاه لرزاننده مکانیکی

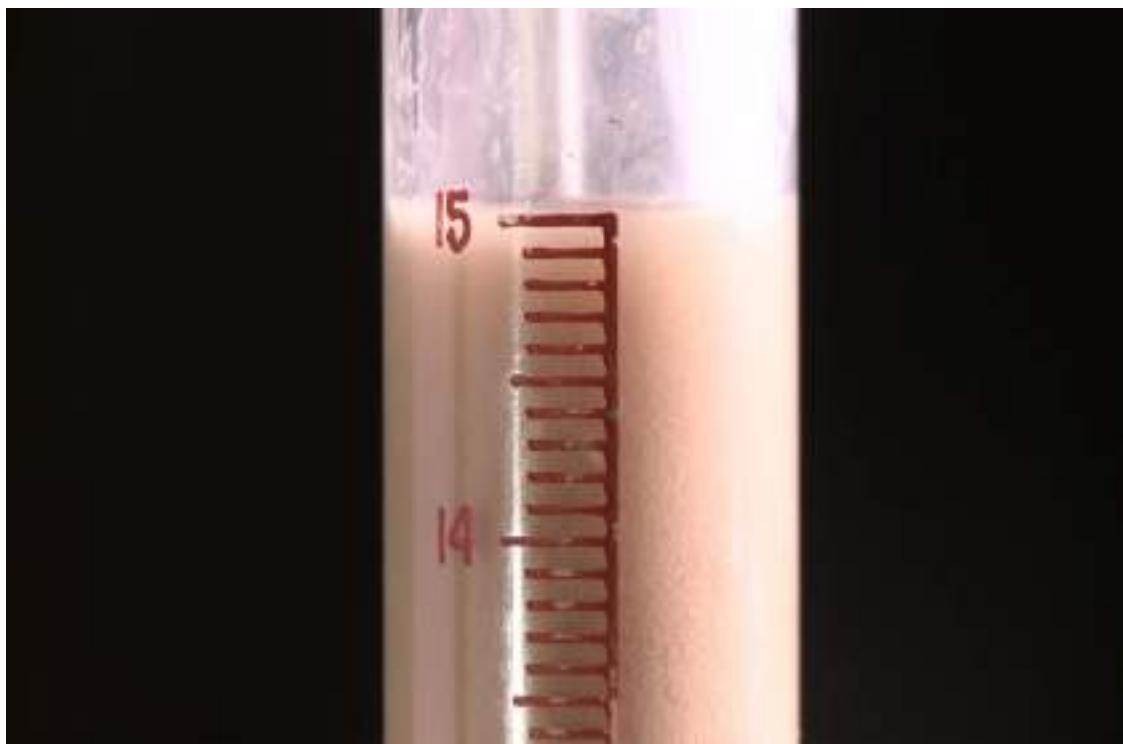
-۲۳- پس از گذشت زمان مزبور، دستگاه را خاموش کرده و استوانه را به طور عمودی روی میز ترازشده‌ای قرار می‌دهیم. در پیش استوانه را بر می‌داریم. با محلول تهیه شده در مرحله ۱۱، ابتدا قسمت بالایی استوانه را از نمونه خاک می‌شوییم (شکل ۷-۴۵) و سپس لوله آبیاری را به صورت ضربه‌های رفت و برگشتی و چرخشی، وارد مخلوط می‌کنیم (شکل ۷-۴۶) تا بخش ریزدانه خاک از قسمت درشت‌دانه جدا شود و این کار را تا پرشدن استوانه تا علامت ۱۵ اینچ (۳۸/۱ سانتی‌متر) ادامه می‌دهیم (شکل ۷-۴۷).



شکل ۷-۴۵: شستن قسمت بالایی استوانه



شکل ۷-۴۶: وارد کردن ضربه توسط لوله آبیاری و انتقال محلول تهیه شده در مرحله ۱۴ به مخلوط جهت جداسازی نمونه



شکل ۷-۴۷: پر کردن استوانه با محلول تهیه شده در مرحله ۱۴ تا علامت ۱۵ لیتر

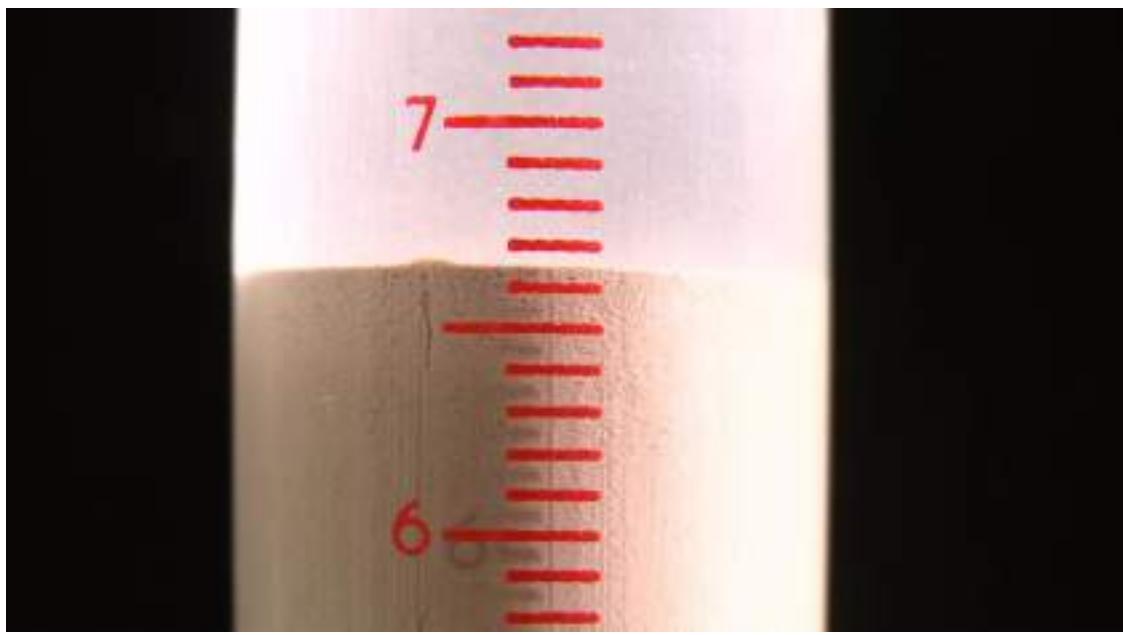
تذکر: اگر این مرحله به درستی انجام نشود، در انتهای آزمایش، مقداری ریزدانه تنهشین شده در مخلوط مشاهده خواهد شد که این حالت، در آزمایش خطای ایجاد می‌نماید (شکل ۷-۴۸).



شکل ۷-۴۸: نمونه‌ای از ته‌نشینی نامطلوب ذرات ریزدانه در بین قسمت‌های درشت‌دانه مخلوط

۲۴- نمونه مرحله ۲۳ را به مدت  $20 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$ ، بدون هیچ‌گونه دست‌خوردگی روی میز می‌گذاریم تا رسوبات رسی در مخلوط شناور شود.

۲۵- پس از سیری‌شدن زمان مذکور، بالاترین قسمت مخلوط ته‌نشین شده را می‌خوانیم (شکل ۷-۴۹). این قرائت، قرائت رس است ( $H_1$ ). به عنوان مثال، مقدار قرائت رس در شکل ۷-۴۹، برابر با  $6/7$  اینچ است.



شکل ۷-۴۹: قرائت قسمت بالایی نمونه ته‌نشین شده (قرائت رس)

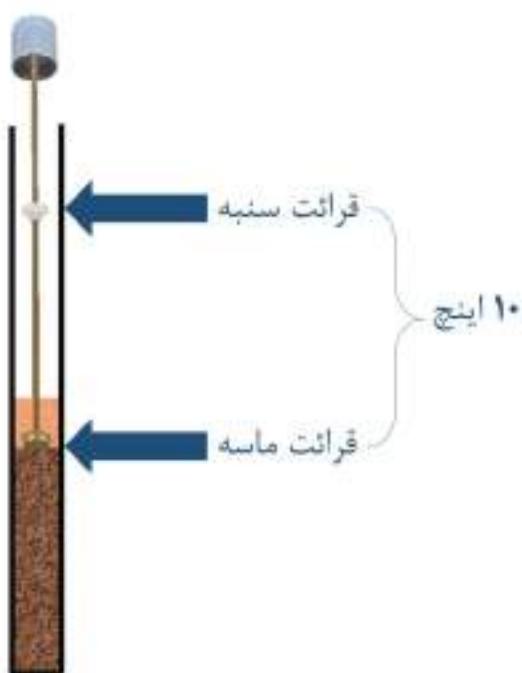
تذکر ۱: لازم به ذکر است که قرائت رس، ارتفاع رس نیست؛ بلکه ارتفاع کل خاک است که به اصطلاح در استانداردهای AASHTO و ASTM به این اسم شناخته شده است.

**تذکر ۲:** هنگام قرائت، چنانچه مرز واضحی بین نمونه خاک و قسمت شفاف آب وجود نداشته باشد، مدت زمان بیشتری نمونه را به صورت دستنخورده باقی می‌گذاریم تا این مرز مشاهده شود.

- ۲۶ پس از انجام مرحله ۲۵ که جدایی ماسه در ریزدانه‌ها کاملاً مشهود است، سنبه فولادی را به آرامی و بدون ایجاد اغتشاش در مخلوط، در استوانه پایین می‌بریم (۵۰-۷) و انتهای آن را روی سطح ماسه قرار می‌دهیم و دست خود را رها می‌کنیم تا انتهای سنبه روی ماسه بماند (شکل ۵۱-۷).

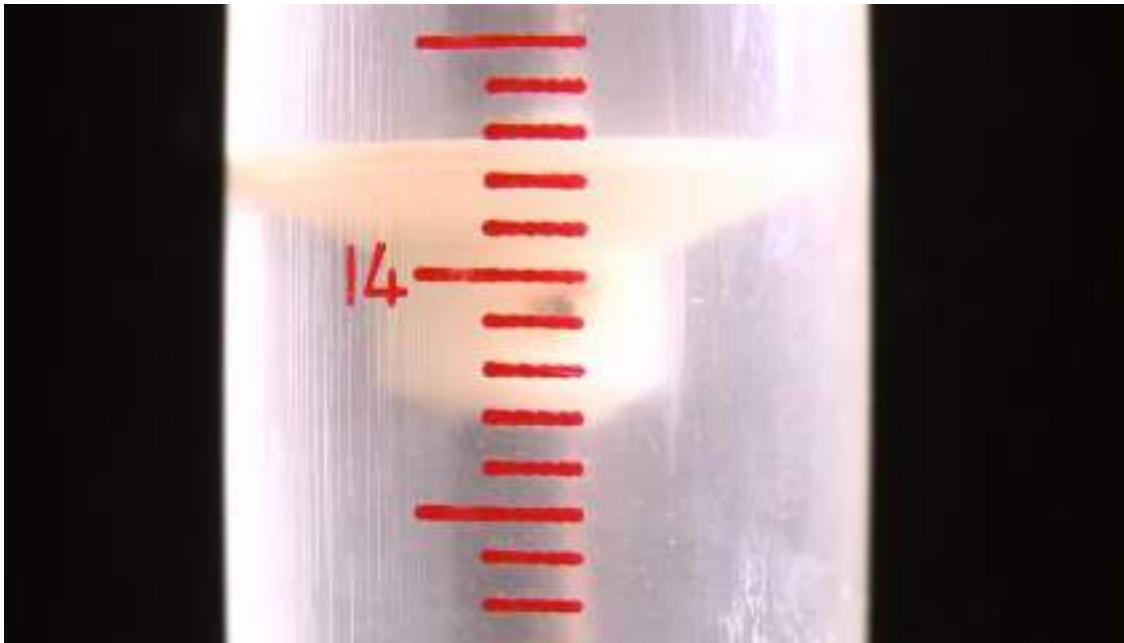


شکل ۵۰-۷: وارد نمودن سنبه فولادی به داخل مخلوط جهت قرائت ماسه



شکل ۵۱-۷: شکل شماتیک قرائت سنبه و قرائت ماسه

۲۷- حال، قسمت بالایی سنبه را قرائت می‌کنیم (قرائت سنبه) که این قرائت در هر دو شکل ۵۱-۷ و ۵۲-۷ مشخص است (H<sub>۳</sub>).



شکل ۵۲-۷: قرائت سنبه

۲۸- پس از قرائت سنبه، ۱۰ را از این مقدار کم می‌کنیم؛ تا قرائت ماسه مشخص شود (H<sub>۲</sub>). در این آزمایش، قرائت سنبه در شکل ۵۲-۷ برابر با  $\frac{14}{3}$  اینچ است که درنهایت مقدار قرائت ماسه برابر خواهد بود با  $\frac{4}{3}$  اینچ تذکر: ممکن است در مواقعي، برای قرائتهای رس و ماسه، نشانه بين دو عدد قرار گيرد. در اين صورت هميشه، عدد بالايي به عنوان معيار، در نظر گرفته خواهد شد. مثلاً فرض کنيد در قرائت رس، مخلوط در ارتفاع  $\frac{6}{63}$  اينچ قرار گرفته باشد؛ در اين حالت، عددی که به عنوان قرائت رس گزارش خواهد شد، عدد  $\frac{6}{7}$  اينچ خواهد بود.

۲۹- قرائت ماسه را تقسيم بر قرائت رس می‌کنیم. در آزمایش بالا، عدد  $\frac{4}{3}$  را بر  $\frac{6}{7}$  تقسيم می‌نماییم.

۳۰- عدد به دست آمده را در  $100$  ضرب می‌کنیم. در این آزمایش، به عدد  $\frac{64}{2}$  درصد می‌رسیم.

۳۱- حال برای گزارش مقدار همارز ماسه، هميشه اين عدد را به اولين عدد كامل بعدی می‌رسانيم و آن را گزارش می‌کنیم که در اين مثال  $65$  درصد است.

تذکر: دقت کنيد که عدد بعد از اعشار اصلاً اهميتي ندارد که  $2$  باشد يا  $9$ ، عدد گزارش شده همواره به سمت اولين عدد كامل بعد گرد می‌شود.

۳۲- اين آزمایش و مراحل تعبيين آن را حداقل سه بار تكرار می‌کنیم و ميانگين را به عنوان عدد نهايی گزارش می‌کنیم. تذکر: چنانچه پس از ميانگين گيري هم به عدد اعشاري رسيديم، همانند مرحله  $31$ ، به اولين عدد كامل بعد گرد می‌کنیم و آن را گزارش می‌نماییم.

#### (۴-۷) محاسبات

مقدار درصد يا ارزش ماسه به صورت زير تعبيين می‌شود:

۱- قرائت رس (مرحله  $25$ ) را يادداشت می‌کنیم (H<sub>۱</sub>).

۲- قرائت سنبه (مرحله  $27$ ) را يادداشت می‌نماییم (H<sub>۳</sub>).

۳- قرائت ماسه ( $H_{\gamma}$ ) را به روش زیر محاسبه می کنیم:

$$H_{\gamma} = H_{\gamma} - 1.0 \quad (2-7)$$

۴- حال مقدار همارز ماسه برابر می شود با:

$$SE(%) = \frac{H_{\gamma}}{H_{\gamma}} \times 100 \quad (3-7)$$

## جدول ۷-۱: آزمایش همارز ماسه

شماره نمونه: ۲۰۱ و ۳

نوع خاک:

محل نمونه‌گیری:

جرم نمونه: ۲۲/۰ پوند (۱۰۰ گرم)

درصد ماسه (SE) (%)	درصد ماسه اصلاح- نشده (%)	ارتفاع ماسه ( $H_2$ ) (in.)	قرائت سنبله ( $H_3$ ) (in.)	ارتفاع کل خاک ( $H_1$ ) (in.)	شماره آزمایش
۲۱	۲۰/۹	۲/۴	۱۲/۴	۱۱/۵	۱
۱۵	۱۴/۹	۱/۸	۱۱/۸	۱۲/۱	۲
۱۸	۱۸	۲/۱	۱۲/۱	۱۱/۷	۳

میانگین SE : ۱۸٪

## (۵) نکات کلی

- ۱- آزمایش همارز ماسه برای خاک‌هایی که مقدار ریزدانه‌شان کم باشد و امکان تعیین حالت خمیری آن‌ها به روش‌های موجود (حدود اتربرگ) فراهم نباشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول ۷-۲ حد مجاز ماسه در مصالح مختلف در کارهای ساختمانی نشان داده شده است.

## جدول ۷-۲: مقدار مجاز ماسه در مصالح مختلف

بتن آسفالتی	بتن	لایه زیر اساس	لایه اساس
۵۰٪	۷۵٪	۲۵٪	۳۰٪

- ۲- ارتباط بین مقادیر SE و نفوذپذیری خاک‌های مختلف، در جدول ۷-۳ آورده شده است.

## جدول ۷-۳: ضریب نفوذپذیری خاک‌ها بر اساس مقادیر همارز (درصد) ماسه

$k$ (cm/s)	SE (%)	
	نوع ریزدانه مخلوط خاک	
	رس کائولینیت	لای (سیلت)
$1 \times 10^{-3}$		۸۷
$8 \times 10^{-3}$	۴۰	
$8 \times 10^{-4}$		۷۵
$8 \times 10^{-4}$	۲۹	
$6 \times 10^{-5}$		۶۲
$3 \times 10^{-4}$	۲۴	
$4 \times 10^{-6}$		۵۰
$6 \times 10^{-4}$	۲۰	
$2 \times 10^{-4}$		۳۹
$3 \times 10^{-6}$	۱۸	

## فصل هشتم

(ASTM D7928, ASTM D422-Research papers) آزمایش ته‌نشینی

## ۱-۸) مقدمه و تئوری آزمایش

به طور کلی، تهنشینی<sup>۱</sup> زمانی رخ می‌دهد که ذرات یک سوسپانسیون<sup>۲</sup> بر روی هم انباشته شود. با جمع‌شدن رسوبات، ذرات و لخته‌ها<sup>۳</sup> در کنار هم قرار می‌گیرد و رسوبات خاکی را تشکیل می‌دهد. در این صورت، ماده موجود را می‌توان به عنوان یک خاک با ویژگی‌های توصیف شده توسط پارامترهای مرسوم تعریف کرد. مطالعه فرایند تهنشینی می‌تواند به مهندسان کمک کند تا ویژگی‌های تنفس - کرنش و هدايت هیدرولیکی (نفوذپذیری) یک رسوب خاک را به خوبی درک کنند. درک رفتار تهنشینی خاک ریزدانه نیز در بسیاری از کاربردهای مهندسی دیگر نظری تزریق<sup>۴</sup> مواد سیمانی، طراحی سدهای باطله معدن<sup>۵</sup>، تصفیه آب آلوده، تجزیه و تحلیل تأثیر فیلتراسیون گل حفاری بر روی پایداری گمانه، مطالعه برهم‌کنش بین شیرابه زباله و لاپراهای رسی<sup>۶</sup> در محل دفن زباله و تعیین خواص ژئوتکنیکی خاک‌های آبرفتی<sup>۷</sup> بسیار مهم است.

به دلیل جانشینی ایزومورف<sup>۸</sup>، ذرات رس معمولاً در محیط آبی بار منفی دارد. یک لایه دوگانه پراکنده<sup>۹</sup> مشکل از یون‌های باردار مثبت فراوان، بارهای منفی ذرات رس را خنثی می‌کند. در یک سیستم رسی الکتروولیت<sup>۱۰</sup>، چندین نوع نیروی جاذبه و دافعه در بین ذرات رس وجود دارد. دافعه لایه دوگانه نیرویی است که بین ذرات رس ایجاد می‌شود. هنگامی که دو ذره به یکدیگر نزدیک می‌شود، میزان نیروی دافعه به فاصله بین ذرات و ضخامت لایه دوگانه پراکنده بستگی دارد. همچنین، جاذبه الکترواستاتیکی<sup>۱۱</sup> نیروی دیگری است که بین لبه‌های دارای بار مثبت و وجههای بار منفی ذرات ایجاد می‌شود. این نوع نیرو سبب تشکیل ساختار لخته لبه - به - سطح<sup>۱۲</sup> سیستم خاک رس می‌شود. نیروی واندروالسی نیز یک نیروی جاذبه مهم در سیستم کلئوئیدی رسی به شمار می‌آید. توزیع اندازه دانه، غلظت آب - ذرات جامد، کانی‌های خاک رس و شیمی آب به میزان زیادی بر رفتار رسوبی خاک‌های ریزدانه اثر می‌گذارد. به عبارت دیگر، ساختار رسوب نهایی تا حد زیادی به این عوامل بستگی دارد. افزایش جزئی در غلظت یونی می‌تواند باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه پراکنده شود و درنتیجه هم نیروی جاذبه لبه - به - سطح و هم نیروی دافعه سطح - به - سطح<sup>۱۳</sup> ذرات را کاهش داده و نهایتاً ساختار لخته شده (لبه به لبه<sup>۱۴</sup>) را ایجاد کند؛ بنابراین، تغییر در قدرت یونی<sup>۱۵</sup> می‌تواند منجر به تغییر بزرگ در بافت خاک شود و درنتیجه، رفتار تهنشینی ذرات به طور قابل توجهی متفاوت خواهد شد. به طور کلی، اگر نیروی جاذبه به اندازه کافی بزرگ باشد، ذرات با هم برخورد می‌کند و با هم ترکیب می‌شود که این امر منجر به یک فرایند تهنشینی سریع و همگن می‌شود. از سوی دیگر، هنگامی که نیروی دافعه زیاد است، هر ذره با سرعت خاص خود تهنشین و درنتیجه منجر به رسوب آهسته و ناهمگن می‌شود.

بافت<sup>۱۶</sup> و ساختار رسوب تهنشین‌شونده می‌تواند بسته به نوع ذرات خاک به دو صورت پراکنده<sup>۱۷</sup> یا لخته شده<sup>۱۸</sup> ایجاد شود. هنگامی که ذرات خاک به شکل تهنشینی آزاد پراکنده تهنشین می‌شود، درشت‌ترین ذرات در لایه‌های پایین و ریزترین ذرات در بالا قرار می‌گیرد، اما هنگامی که ذرات لخته تشکیل می‌شود، توزیع یکنواخت ذرات خاک در سرتاسر رسوب رخ می‌دهد. این دو رسوبی که به طور متمایز تشکیل می‌شود، ویژگی‌های مهندسی متفاوتی را تولید می‌کند و به عبارت دیگر این تفاوت‌ها، عملکرد ویژگی‌های تهنشینی آن‌ها است.

۱. Sedimentation

۲. سوسپانسیون مخلوط ناهمگنی از یک مایع به همراه ذرات جامد به اندازه کافی بزرگ به حالت معلق است که درنهایت و پس از زمان طولانی، ذرات جامد آن تهنشین می‌شود؛ اما این محلول فقط در صورت تعليق ذرات حل شونده، سوسپانسیون نامیده می‌شود.

۳. Flocs

۴. Grouting

5. Mine tailing dams

6. Clay liners

7. Alluvial soils

8. Isomorphous

9. Diffuse double layer

۱۰. الکتروولیت به مواد شیمی‌یابی گفته

می‌شود که دارای یون آزاد باشد؛ بنابراین

این مواد در ترکیب با آب باعث هدایت

حریان الکتروولیت خواهد شد. از رایج ترین

الکتروولیت‌ها می‌توان به محلول‌های یونی

اشاره کرد. توجه داشته باشید که یون‌ها

علاوه بر محلول‌های نمکی، در محلول‌های

اسیدی و بازی نیز وجود دارد.

11. Electrostatic attraction

12. Edge-to-face

13. Face-to-face

14. Edge-to-edge

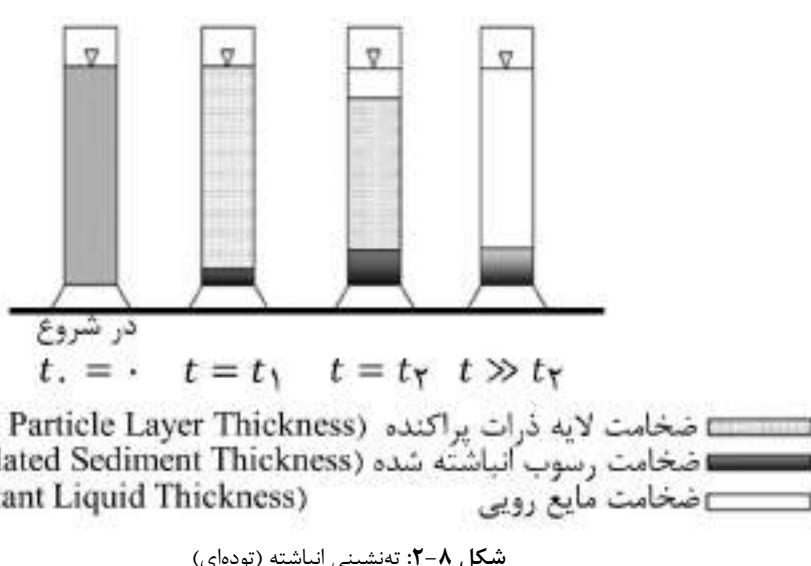
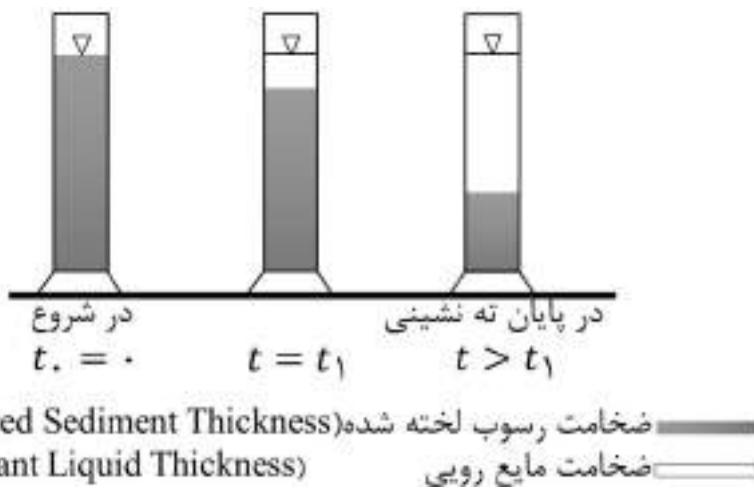
15. Ionic strength

16. Fabric

17. Dispersed

18. Flocculated

همان طور که در شکل‌های ۱-۸ نشان داده است، ضخامت تهنشینی سوسپانسیون‌ها می‌تواند توسط دو نوع رفتار مختلف تهنشینی در طول آزمایش تعیین شود: تهنشینی مجتمع گونه (لخته‌ای) و تهنشینی انباشت‌های<sup>۱</sup> (توده‌ای). برای نوع اول تهنشینی (لخته‌ای)، یک سطح مشترک واضحی بین رسوبات لخته‌شده و مایع رویی مشاهده می‌شود (شکل ۱-۸). در این حالت، ابتدا ذرات خاک شبکه‌ای را بین یکدیگر تشکیل داده و به دلیل ساختار متخلخل شبکه، به سرعت یکپارچه می‌شود؛ زیرا آب در حین تهنشین شدن به راحتی از لابه‌لای ذرات لخته‌شده خارج می‌شود. ضخامت لایه تهنشین شده به تدریج کاهش می‌یابد و با بررسی سطح مشترک خاک - مایع تعیین و با گذشت زمان قرائت می‌شود. نوع دوم تهنشینی زمانی رخ می‌دهد که ذرات انباشت‌های در انتهای استوانه مدرج جمع شده و روی آن لایه‌ای از ذرات پراکنده<sup>۲</sup> قرار می‌گیرد (شکل ۱-۸). در این نوع تهنشینی، ذرات انباشت‌های سریع‌تر از ذرات در حالت پیشین (لخته‌ای) تهنشین می‌شود و ذرات پراکنده زمان کافی برای تهنشین شدن آزاد را دارد. در این نوع تهنشینی، حرکت رو به بالای سطح مشترک بین ذرات انباشت‌های و پراکنده قابل مشاهده است و ضخامت ذرات انباشت‌های به عنوان ضخامت رسوب در طول آزمایش ثبت می‌شود.



<sup>1</sup>. Accumulation sedimentation

<sup>2</sup>. Diffused particles

آزمایش تهنشینی بر اساس استانداردهای ASTM D422 و ASTM D7928 و همچنین مطالعات پیشین انجام می‌شود. روند کلی انجام این آزمایش بدین صورت است که طی آن ابتدا دوغاب‌هایی از خاک‌های رسی تهیه می‌شود و سپس در ستون‌های تهنشینی استوانه‌ای ۱۰۰۰ میلی‌لیتری ریخته می‌شود. در ادامه به آن‌ها اجازه داده می‌شود تا تحت وزن خود تهنشین شود و نشست در سطح مشترک دوغاب رس و آب تمیز در طی آزمایش ثبت می‌شود. معمولاً دوغاب‌ها در ۴۸ ساعت اول به سرعت تهنشین می‌شود و بعد از گذشت حدود ۷ روز ثابت می‌شود.

#### ۲-۸) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- استوانه مدرج به حجم ۱۰۰۰ سی سی (شکل ۳-۸)
- ۲- ترازو (شکل ۴-۸)
- ۳- بطری پلاستیکی (شکل ۵-۸)
- ۴- ظرف تبخیر چینی (شکل ۶-۸)
- ۵- زمان‌سنج (شکل ۷-۸)
- ۶- درپوش
- ۷- آب مقطر



شکل ۴-۸: ترازو



شکل ۳-۳: استوانه مدرج به حجم ۱۰۰۰ سی سی



شکل ۸-۶: ظرف تبخیر چینی



شکل ۸-۵: بطری پلاستیکی



شکل ۸-۷: زمان سنج

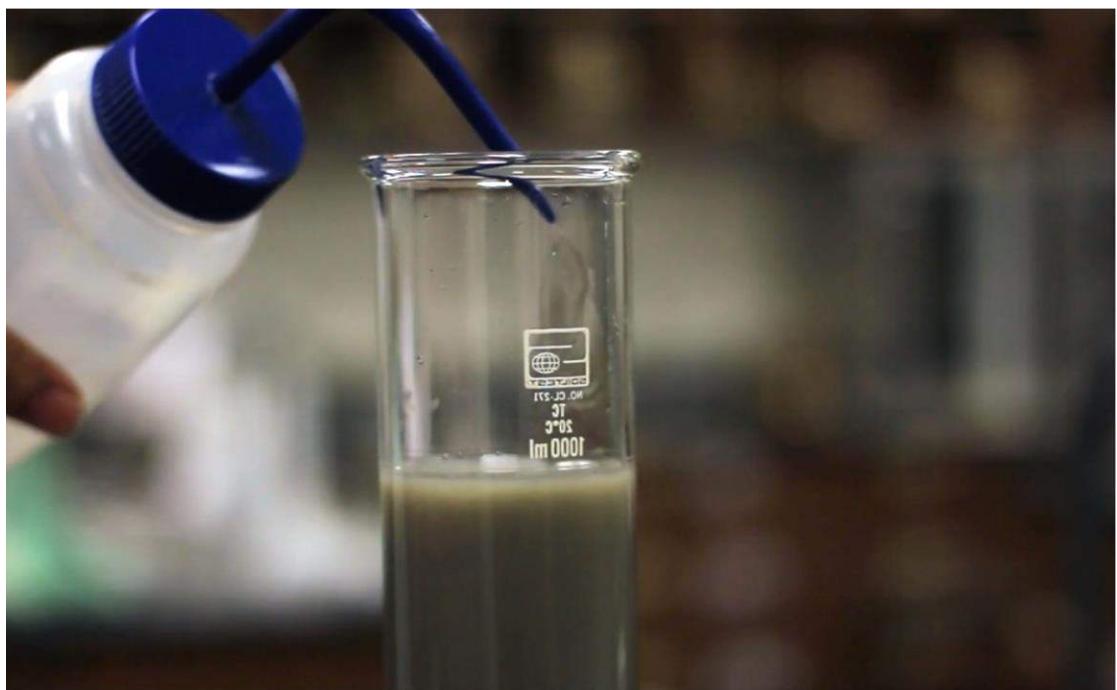
### ۳-۸) روش انجام آزمایش

۱- ۱۰۰ گرم از خاک رسی کاملاً خشک شده در گرم کن را تهیه می کنیم (شکل ۸-۸).



شکل ۸-۸: برداشتن ۱۰۰ گرم خاک خشک

۲- یک استوانه مدرج ۱۰۰۰ سی سی را برمی داریم و خاک وزن شده در مرحله ۱ را درون آن می ریزیم و سپس استوانه مدرج را تا علامت مخصوص ۱۰۰۰ سی سی با استفاده از بطری پلاستیکی از آب قطر پر می کنیم (شکل ۹-۸).



شکل ۹-۸: پر کردن استوانه حاوی نمونه با آب مقطر تا علامت ۱۰۰۰ سی سی

۳- یک درپوش پلاستیکی را در بالای استوانه مدرج قرار می دهیم و آن را محکم می کنیم. با تکان دادن استوانه به حالت رفت و برگشت، از بالا به پایین، چند مرتبه مخلوط آب و خاک را کاملاً هم می زنیم (شکل ۱۰-۸).



شکل ۱۰-۸: تکان دادن استوانه بسته شده با درپوش به صورت رفت و برگشت

- ۴- روند تکان دادن مخلوط خاک و آب درون استوانه مدرج تا ۲۴ ساعت چندین بار تکرار می‌شود تا از تعادل میان خاک و آب و همچنین ترکیب کامل آن‌ها اطمینان حاصل شود.
- ۵- پیش از انجام آزمایش، استوانه مدرج را برای آخرین بار به خوبی تکان و درنهایت آن را روی یک سطح صاف قرار می‌دهیم. سپس قرائت سطح مشترک بین لایه ته‌نشینی شده و مایع رویی را با کمک اعداد موجود روی استوانه مدرج در زمان‌های ۱، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه و ۱، ۲، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت انجام می‌دهیم.
- ۶- مدت زمان قرائت ته‌نشینی بسته به نوع خاک رس متفاوت است و لذا آن را تا جایی ادامه می‌دهیم که تغییری در میزان آن حاصل نشود (هر ۲۴ ساعت یکبار قرائت می‌شود). برای خاک‌های رسی با خاصیت پلاستیسیته بالا، زمان قرائت می‌تواند نهایتاً تا ۷ روز ادامه یابد.

#### ۴-۸ محاسبات

جدول داده‌ها و محاسبه پارامترها (با مراجعه به جدول ۸-۱):

- ۱- ستون اول جدول: در این ستون، زمان بر حسب دقیقه یادداشت می‌شود.
- ۲- ستون دوم جدول: این اعداد مربوط به قرائت‌های استوانه مدرج بر حسب میلی‌لیتر در زمان‌های مندرج در ستون اول است.
- ۳- ستون سوم جدول: اعداد این ستون میزان ته‌نشینی بر حسب میلی‌لیتر را تا زمان قرائت شده نشان می‌دهد که از تفريع قرائت اولیه (۱۰۰۰) با قرائت در همان زمان به دست می‌آید.

$$\text{قرائت تا زمان } t - 1000 = \text{میزان ته نشینی تا زمان } t \quad (8-1)$$

- ۴- ستون چهارم جدول: اعداد این ستون درصد ته‌نشینی را تا زمان قرائت شده نشان می‌دهد که از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\text{میزان ته نشینی تا زمان } t}{1000} \times 100 = \text{درصد ته نشینی تا زمان } t \quad (8-2)$$

## جدول ۱-۸: آزمایش تهنشینی

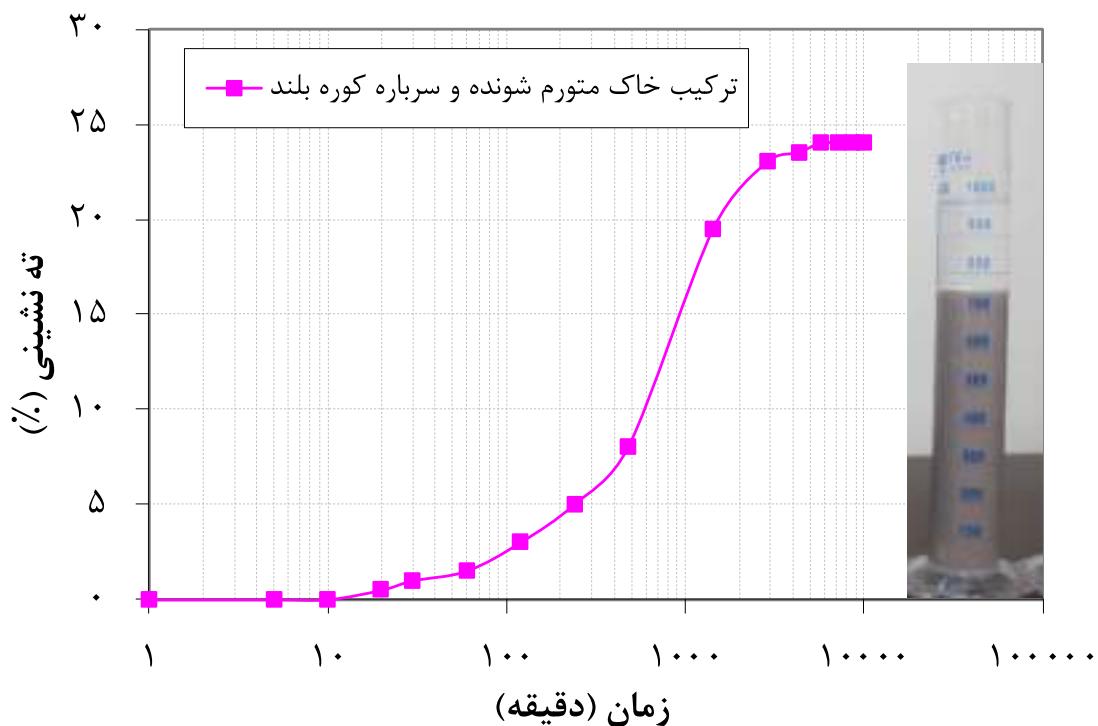
نوع خاک: رس متورم شونده به همراه ۲/۵ درصد سرباره کوره بلند  
 شماره نمونه: .....  
 محل نمونه‌گیری: .....  
 جرم نمونه خشک شده در گرم کن:  $M_s = 100 \text{ g}$   
 شخص نمونه‌گیری: ...../...../.....  
 تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

درصد تهنشینی (%) (۴)	میزان تهنشینی (mL) (۳)	قرائت (mL) (۲)	زمان (min) (۱)
.	.	۱۰۰	۱
.	.	۱۰۰	۵
.	.	۱۰۰	۱۰
۰/۵	۵	۹۹۵	۲۰
۱	۱۰	۹۹۰	۳۰
۱/۵	۱۵	۹۸۵	۶۰
۳	۳۰	۹۷۰	۱۲۰
۵	۵۰	۹۵۰	۲۴۰
۸	۸۰	۹۲۰	۴۸۰
۱۹/۵	۱۹۵	۸۰۵	۱۴۴۰
۲۳	۲۳۰	۷۷۰	۲۸۸۰
۲۳/۵	۲۳۵	۷۶۵	۴۳۲۰
۲۴	۲۴۰	۷۶۰	۵۷۶۰
۲۴	۲۴۰	۷۶۰	۷۲۰۰
۲۴	۲۴۰	۷۶۰	۸۶۴۰
۲۴	۲۴۰	۷۶۰	۱۰۰۸۰

## رسم منحنی و عکس از استوانه مدرج بعد از فرایند کامل تهنشینی

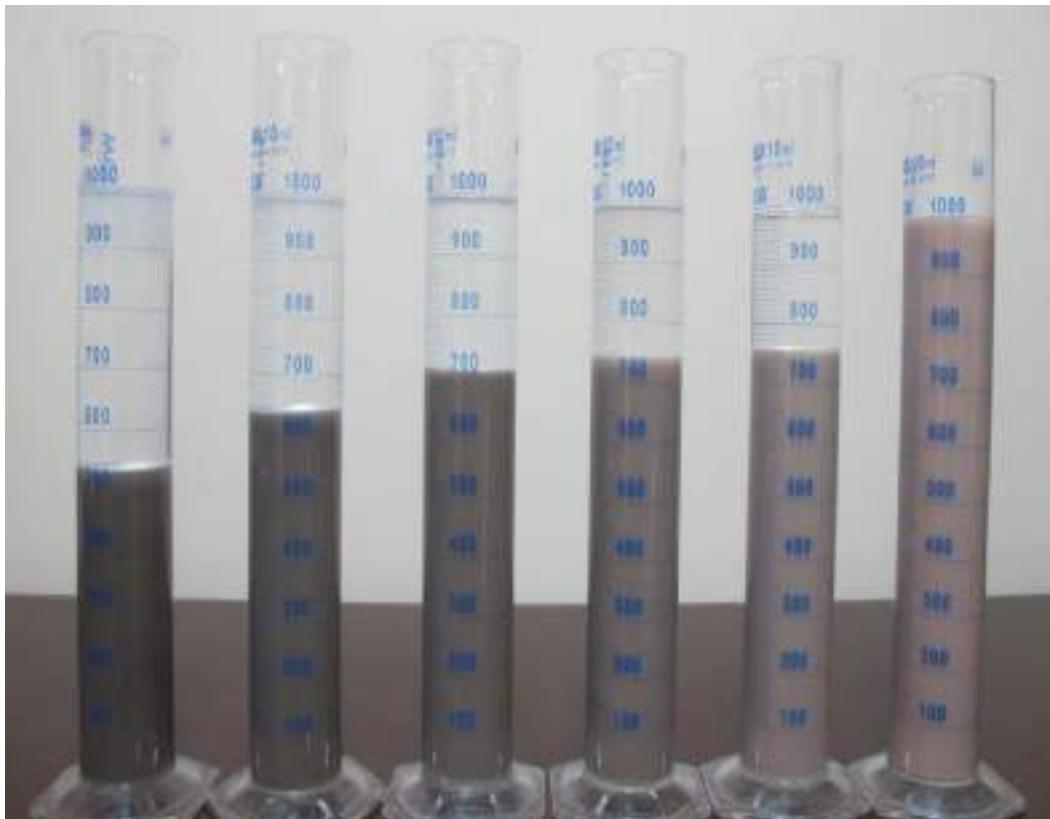
منحنی تغییرات درصد تهنشینی (ستون ۴ از جدول ۱-۸) بر حسب زمان (ستون ۱ از جدول ۱-۸) در مقیاس لگاریتمی را بر روی یک کاغذ نیمه‌لگاریتمی یا توسط نرم‌افزارهای ترسیمی کامپیوتری مانند اکسل<sup>۱</sup>، اوریجین<sup>۲</sup>... ترسیم می‌کنیم (شکل ۱-۸). همچنین می‌توان در انتهای آزمایش از استوانه مدرج به همراه محتویات آب و خاک درون آن که به طور کامل تهنشین شده است عکس‌برداری کرد و با مقایسه این تصاویر با یکدیگر، تفاوت‌های رفتاری خاک‌ها را با یکدیگر به صورت بصری مقایسه نمود.

<sup>1</sup>. Excel<sup>2</sup>. Origin



شکل ۱۱-۸: منحنی تغییرات درصد تهنه‌سینی بر حسب لگاریتم زمان

تذکر: آزمایش تهنه‌سینی را می‌توان برای درصدهای مختلف افزودنی در استوانه‌های مدرج مختلف به طور همزمان انجام داد و پس از انتهای آزمایش، از آن‌ها تصویربرداری کرد که بتوان از مقایسه آن‌ها با یکدیگر نتایج مقایسه‌ای بهتری را به دست آورد. شکل ۱۲-۸ نمایی از نتایج آزمایش تهنه‌سینی برای ترکیبات خاک متورم شونده به همراه درصدهای مختلف سرباره کوره بلند را نشان می‌دهد (از راست به چپ: ۰، ۵، ۲/۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سرباره). همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان سرباره، ساختار خاک تغییر می‌کند و از یک ساختار پراکنده برای خاک خالی، به ساختاری مجتمع تبدیل می‌شود.



شکل ۱۲-۸: نمایی از نتایج آزمایش تهنشینی برای ترکیبات خاک متورم شونده به همراه درصدهای مختلف افزودنی (از راست به چپ: ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سرباره کوره بلند)

#### ۵-۸) نکات کلی

- ۱- لازم به ذکر است که برای اطمینان بیشتر از تأثیر مواد افزودنی بر رفتار بسیار کوتاه‌مدت خاک، می‌توان از آزمایش‌های تهنشینی برای هر ترکیب استفاده نمود؛ به طوری که به جای بخش جامد خاک خالی، ترکیبی از خاک و ماده افزودنی را درون استوانه مدرج ریخته و سپس بقیه مراحل را می‌توان همانند آنچه ذکر شد، انجام داد.
- ۲- عوامل متعددی مانند درجه لخته‌سازی و میزان اندرکنش متقابل بین ذرات خاک در این آزمایش می‌تواند نوع تهنشینی را کنترل کند. همچنین وزن کل خاک یکی دیگر از عوامل کنترل کننده ویژگی‌های تهنشینی است؛ به طوری که هر چه وزن جامد کل بیشتر باشد، سرعت تهنشینی بیشتر می‌شود.
- ۳- این آزمایش روی خاک‌هایی با اندازه دانه‌های کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر انجام می‌شود. دانه‌های ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر، رس یا به اندازه رس است. بیشتر دانه‌های رسی کوچک‌تر از ۰/۰۰۱ میلی‌متر بوده و عدد ۰/۰۰۲ میلی‌متر حد بالای اندازه آن‌هاست.

## فصل نهم

### آزمایش تعیین نفوذ پذیری خاک‌های درشتدانه و ریزدانه

### (ASTM D2434) ثابت (1-۹) بخش اول: آزمایش نفوذپذیری با هد(انرژی)

#### ۱-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش

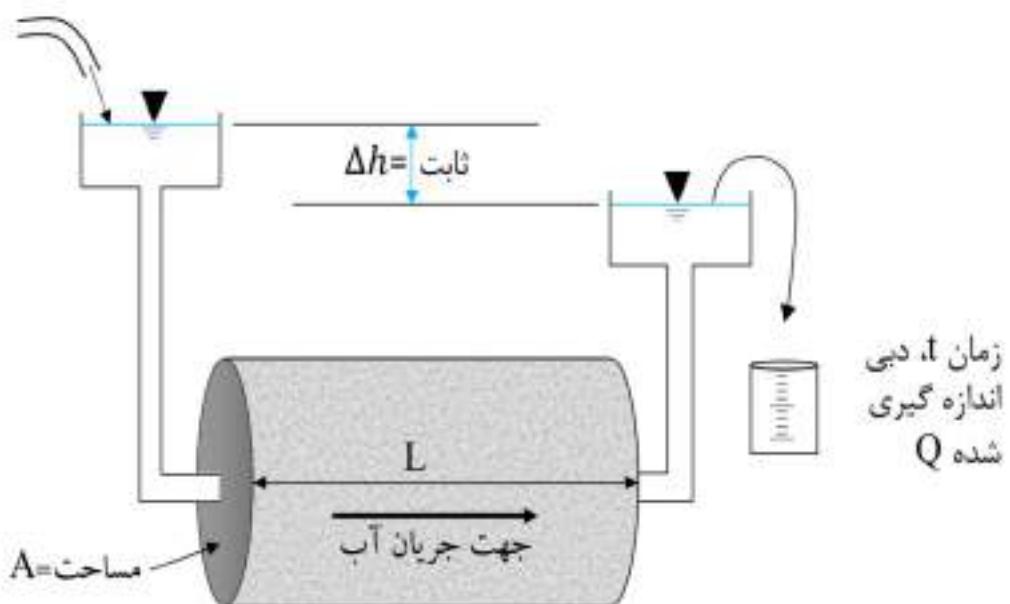
تعیین مقدار دبی عبوری آب زیرزمینی از مناطق با پتانسیل بیشتر به مناطق با پتانسیل کمتر از اهمیت بالایی برخوردار است. این اطلاعات در تخمین عملکرد لاینرهای دفن زباله<sup>۱</sup>، انتقال آب‌های زیرزمینی آلوده و سایر کاربردهای ژئوتکنیکی بسیار مفید است. برای تعیین مقدار دبی آب عبوری از طریق خاک، ضریب هدایت هیدرولیکی<sup>۲</sup> (معروف به ضریب نفوذپذیری<sup>۳</sup>) خاک باید برآورد شود.

ضریب نفوذپذیری را می‌توان در آزمایشگاه به دو روش زیر تعیین کرد:

الف) روش هد ثابت<sup>۴</sup> (برای خاک‌های درشت‌دانه)

ب) روش هد افتان<sup>۵</sup> (عموماً برای خاک‌های ریزدانه)

در این بخش، به معرفی آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت پرداخته خواهد شد. شمای کلی این آزمایش در شکل ۱-۹ نشان داده شده است.



شکل ۱-۹: جریان آب در خاک در شرایط هد ثابت

سرعت متوسط حرکت جریان آرام<sup>۶</sup> آب در طول خاک، بر اساس قانون دارسی<sup>۷</sup> به قرار زیر است:

$$v = k i \quad (1-9)$$

$v$  : سرعت تخلیه جریان آب ( $\frac{cm}{s}$  یا  $\frac{mm}{s}$ )  
 $k$  : ضریب نفوذپذیری ( $\frac{cm}{s}$  یا  $\frac{mm}{s}$ )

$i$  : گرادیان هیدرولیکی یا شیب آبی (بدون بعد)، برابر است با نسبت اختلاف هد ( $h$ ) به طول خاک ( $L$ )  
 مقدار دبی عبوری آبی که در واحد زمان از نمونه خاکی با سطح مقطع  $A$  می‌گذرد، بر اساس قانون دارسی به شرح زیر است:

۱. Landfill liners

۲. Hydraulic conductivity

۳. Permeability Coefficient

۴. Constant Head Test

۵. Falling Head Test

۶. Laminar flow

۷. Darcy's Law

$$Q = v A = k i A \quad (2-9)$$

$Q$  : مقدار دبی عبوری در واحد زمان ( $\frac{cm^3}{s}$  یا  $\frac{mm^3}{s}$ )  
 $A$  : سطح مقطع خاک ( $cm^2$  یا  $mm^2$ )

لازم به ذکر است که سرعت (v) ارائه شده در معادلات (۱-۹) و (۲-۹)، سرعت تخلیه جریان آب است که بر اساس سطح مقطع ناخالص محاسبه می‌شود. از آنجایی که آب فقط می‌تواند از طریق فضاهای منافذ به هم پیوسته جریان یابد، سرعت واقعی تراوش در خاک ( $v_s$ ) را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$v_s = \frac{v}{n} \quad (3-9)$$

$v_s$  : سرعت واقعی تراوش آب در خاک ( $\frac{cm}{s}$  یا  $\frac{mm}{s}$ )  
 $n$  : تخلخل خاک (بدون بعد)

مقدار ضریب نفوذپذیری ( $k$ ) در خاک‌های ماسه‌ای درشت، بین ۰/۰۱ تا ۱ سانتی‌متر بر ثانیه و در خاک‌های ماسه‌ای ریز، بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱ سانتی‌متر بر ثانیه است.

برخی از روابطی که بین  $k$  و  $e$  (نسبت تخلخل) در ماسه برقرار است عبارت است از:

$$k \propto e^r \quad (4-9)$$

$$k \propto \frac{e^r}{1 + e} \quad (5-9)$$

$$k \propto \frac{e^r}{1 + e} \quad (6-9)$$

برای انجام آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌های دست‌خورده، باید نمونه با نسبت تخلخل محل در آزمایشگاه ساخته شود.

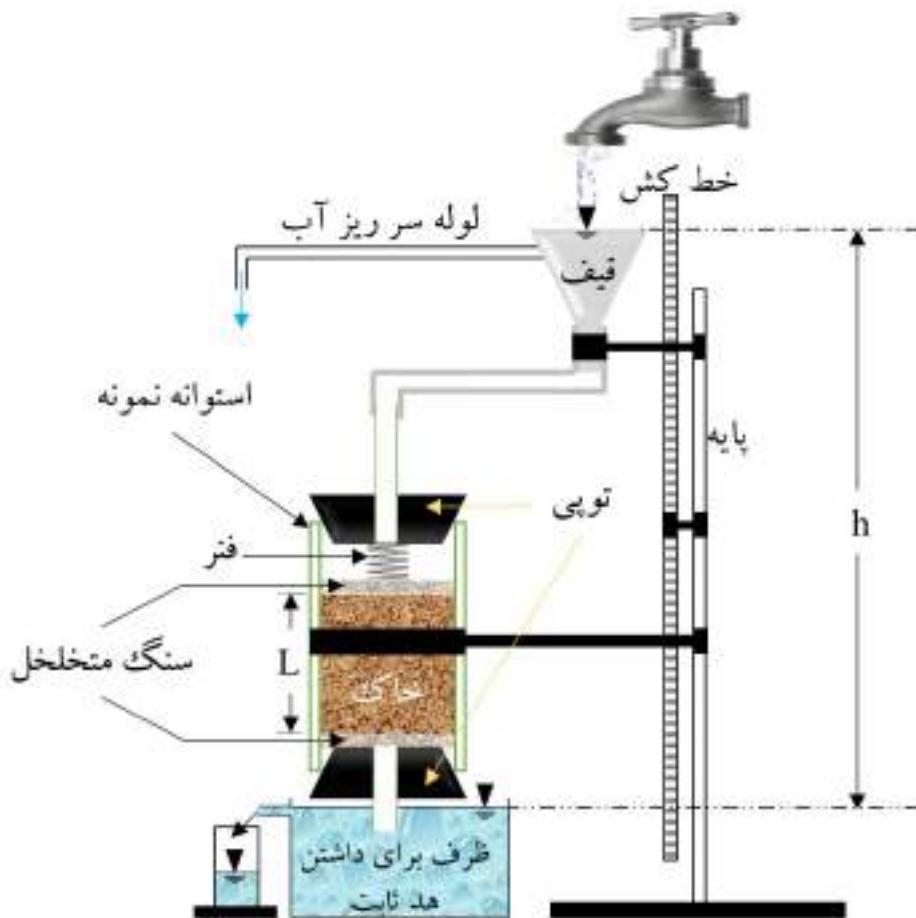
#### ۲-۱-۹) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- نمونه دست‌خورده از خاک مورد نظر (درشت‌دانه)
- ۲- دستگاه تعیین نفوذپذیری با هد ثابت
- ۳- استوانه مدرج (۵۰۰cc یا ۲۵۰cc)
- ۴- ترازو با دقیقه ۰/۱ گرم
- ۵- دماسنجه با دقیقه ۰/۱ درجه سانتی‌گراد
- ۶- لوله پلاستیکی
- ۷- زمان‌سنج (کرنومتر)

#### دستگاه آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت

چنانچه این دستگاه در آزمایشگاه موجود نباشد، می‌توان با هزینه اندکی این وسیله را ساخت. نمای شماتیک این دستگاه در شکل ۲-۹ نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، این دستگاه شامل یک استوانه پلاستیکی (برای قرار گرفتن نمونه خاک در آن)، دو سنگ متخلخل، دو توپی پلاستیکی، یک فنر، یک ظرف برای داشتن هد ثابت، قیف سر گشاد، پایه، خط‌کش، سه گیره و مقداری لوله پلاستیکی است. قطر داخلی استوانه پلاستیکی باید در حدود ۲/۵

اینج (۶۳/۵ میلی‌متر) باشد؛ زیرا معمولاً قطر سنگ متخلخل موجود در آزمایشگاه‌ها به این اندازه است. ارتفاع استوانه حاوی نمونه نیز باید در حدود ۱۲ اینچ (۳۰۴/۸ میلی‌متر) باشد.



شکل ۲-۹: شکل شماتیک دستگاه آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت به همراه جزئیات

#### ۳-۱-۹) روش انجام آزمایش

- ۱- جرم استوانه پلاستیکی که قرار است نمونه در آن ریخته شود، همراه سنگ‌های متخلخل، فنر و دو توپی پلاستیکی را اندازه می‌گیریم ( $M_1$ ).
- ۲- ابتدا سنگ متخلخل انتهایی را بدون فشار اضافی وارد استوانه می‌کنیم، سپس توپی پلاستیکی را با فشار از انتهای وارد استوانه کرده و انتهای آن را مسدود می‌نماییم.
- ۳- در این مرحله می‌توان نمونه دست‌نخورده قالب‌گیری شده به ارتفاع  $\frac{2}{3}$  ارتفاع استوانه را داخل استوانه قرار داد و آزمایش را انجام داد؛ یا می‌توان نمونه دست‌نخورده را با کمک قاشق در لایه‌های نازک، داخل استوانه ریخت تا طول نمونه به  $\frac{2}{3}$  ارتفاع استوانه برسد و سپس آن را با ارتعاش یا هر روش دیگری به مقدار تراکم محل رساند (تا شرایط نمونه دست‌نخورده برای نمونه دست‌نخورده ایجاد شود) و آزمایش را انجام داد.
- ۴- سنگ متخلخل فوقانی را وارد استوانه می‌کنیم تا ثابت روی نمونه قرار گیرد.
- ۵- در صورت لزوم، فنری را روی سنگ متخلخل فوقانی قرار می‌دهیم. وجود فنر روی سنگ متخلخل فوقانی برای آن است که حجم نمونه هیچ‌گونه افزایشی نیابد و درنتیجه، نسبت منافذ نمونه در طول آزمایش تغییر نکند. فنر در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.

- ۶- توبی پلاستیکی فوقانی را روی سنگ متخلخل فوقانی قرار می‌دهیم.
- ۷- جرم کل مجموعه در پایان مرحله ۶ را اندازه می‌گیریم ( $M_2$ ).
- ۸- طول نمونه متراکم شده را اندازه می‌گیریم ( $L$ ).
- ۹- کل مجموعه را بالای یک استوانه مدرج قرار می‌دهیم تا آب خروجی از داخل دستگاه آزمایش درون آن تخلیه شود (مانند شکل ۲-۹).
- ۱۰- آب از طریق قیفی که بالای دستگاه نفوذپذیری قرار دارد و یک لوله پلاستیکی متصل به قیف، وارد نمونه می‌شود و پس از عبور از نمونه وارد ظرف با هد ثابت<sup>۱</sup> که زیر دستگاه قرار دارد، می‌گردد. پس از مدتی، آب از خروجی ظرف با هد ثابت به بیرون می‌ریزد (مطابق شکل ۲-۹).
- تذکر: در طول آزمایش باید دقیق شود که آب از استوانه‌ای که نمونه داخل آن قرار دارد نشستی پیدا نکند و دستگاه آب بند باشد.
- ۱۱- سطح آب ورودی به داخل قیف نیز باید ثابت نگه داشته شود. وقتی سطح آب ثابت شد، در حدود ده دقیقه صبر می‌کنیم تا نمونه اشباع شود.
- تذکر: باید توجه شود که در لوله پلاستیکی که قیف را به استوانه نمونه وصل می‌کند، حباب‌ها وجود نداشته باشد که در صورت وجود باید آن‌ها را خارج کنیم.
- ۱۲- بعد از آنکه جریان آرام برقرار شد (اختلاف هد  $h$  ثابت شد)، مقدار حجم آبی ( $V_w$ ) که از ظرف زیر دستگاه وارد استوانه مدرج می‌شود و همچنین زمانی ( $t$ ) را که این مقدار حجم آب درون استوانه جمع می‌شود، به کمک زمان‌سنج اندازه گرفته و یادداشت می‌کنیم.
- ۱۳- سه بار مرحله ۱۲ را تکرار و زمان ( $t$ ) و حجم آب ( $V_w$ ) را برای هر یک یادداشت می‌کنیم. سپس میانگین حجم آب ( $V_w$ ) را محاسبه می‌کنیم.
- ۱۴- اختلاف هد ( $h$ ) را تغییر می‌دهیم و مراحل ۱۱، ۱۲ و ۱۳ را سه بار تکرار می‌کنیم.
- ۱۵- دمای آب ( $T$ ) را یادداشت می‌کنیم.

#### ۴-۱-۹ محاسبات

تعیین نسبت تخلخل نمونه متراکم  
چگالی خشک نمونه ( $\rho_d$ ) برابر است با:

$$\rho_d = \frac{M_1 - M_2}{\frac{\pi}{4} D^2 L} \quad (7-9)$$

$D$  : قطر نمونه

$L$  : طول نمونه

$\frac{\pi}{4} D^2 L$  : حجم استوانه

بنابراین، نتیجه این گونه محاسبه می‌شود:

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 \quad (8-9)$$

$G_s$  : وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک

$\rho_w$  : چگالی آب ( $g/cm^3$ )

<sup>1</sup>. Constant head chamber

تعیین مقدار  $k$ 

$$k = \frac{Q L}{A h} = \frac{V_w L}{A h t} \quad (9-9)$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (10-9)$$

تصحیح مقدار  $k$  بر اساس دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مقدار  $k$  را معمولاً برای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ارائه می‌کنند. اگر دمای آزمایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد نباشد، آن را به شکل زیر تصحیح می‌کنیم:

$$k_{T, ^\circ C} = k_{T=20, ^\circ C} \frac{\eta_{T, ^\circ C}}{\eta_{20, ^\circ C}} \quad (11-9)$$

$\eta_{T, ^\circ C}$  و  $\eta_{20, ^\circ C}$ : غلظت آب در دمای دلخواه  $T$  و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۱-۹ مقادیر  $\frac{\eta_{T, ^\circ C}}{\eta_{20, ^\circ C}}$  برای دماهای مختلف  $T$  (بر حسب درجه سانتی‌گراد) ارائه شده است.

جدول ۱-۹: مقادیر مختلف  $\frac{\eta_{T, ^\circ C}}{\eta_{20, ^\circ C}}$

$\frac{\eta_{T, ^\circ C}}{\eta_{20, ^\circ C}}$	دما $T$ (درجه سانتی‌گراد)	$\frac{\eta_{T, ^\circ C}}{\eta_{20, ^\circ C}}$	دما $T$ (درجه سانتی‌گراد)
۰/۹۳۱	۲۳	۱/۱۳۵	۱۵
۰/۹۱۰	۲۴	۱/۱۰۶	۱۶
۰/۸۸۹	۲۵	۱/۰۷۷	۱۷
۰/۸۶۹	۲۶	۱/۰۵۱	۱۸
۰/۸۵۰	۲۷	۱/۰۳۵	۱۹
۰/۸۳۲	۲۸	۱/۰۰۰	۲۰
۰/۸۱۴	۲۹	۰/۹۷۶	۲۱
۰/۷۹۷	۳۰	۰/۹۵۳	۲۲

نمونه‌ای از محاسبات آزمایش هد ثابت در جدول ۲-۹ و ۳-۹ نشان داده شده است.

جدول ۲-۹: آزمایش نفوذ‌پذیری با هد ثابت (تعیین نسبت تخلخل نمونه)

نوع خاک: ماسه یکنواخت	شماره نمونه:
محل نمونه‌گیری:	
طول نمونه: $L = ۱۳/۲\text{ cm}$	قطر نمونه: $D = ۶/۳۵\text{ cm}$
شخص نمونه‌گیری:	تاریخ نمونه‌گیری:

۴۱۸/۰۳	$V = \frac{\pi}{4} D^2 L (\text{cm}^3)$
۲/۶۶	چگالی دانه‌های جامد، $G_s$
۲۳۸/۴	جرم استوانه پلاستیکی + سنگ‌های متخلخل + فنر + دو توپی پلاستیکی، (g) (g)
۹۶۵/۳	جرم استوانه پلاستیکی + سنگ‌های متخلخل + فنر + دو توپی پلاستیکی + نمونه، (g) (g)
۱/۷۴	$\rho_d = \frac{M_2 - M_1}{V} (\text{g/cm}^3)$
۰/۰۵۳	نسبت تخلخل نمونه، $e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1$

جدول ۳-۹: آزمایش نفوذ‌پذیری با هد ثابت (تعیین ضریب نفوذ‌پذیری خاک)

۱	۲	۳	شماره آزمایش
۳۰۵	۳۷۵	۳۹۵	مقدار متوسط حجم آب، $V_w (\text{cm}^3)$
۶۰	۶۰	۶۰	مدت زمان جمع‌آوری آب، (s)
۲۵	۲۵	۲۵	دماه آب، ( $^{\circ}\text{C}$ )
۸۰	۷۰	۶۰	اختلاف هد، ( $h$ ) ( $\text{cm}$ )
۶/۳۵	۶/۳۵	۶/۳۵	قطر نمونه، ( $D$ ) ( $\text{cm}$ )
۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲	طول نمونه، ( $L$ ) ( $\text{cm}$ )
۳۱/۶۷	۳۱/۶۷	۳۱/۶۷	مساحت نمونه، ( $A = \frac{\pi}{4} D^2 (\text{cm}^2)$ )
۰/۰۳۴	۰/۰۳۷	۰/۰۳۵	ضریب نفوذ‌پذیری، ( $k = \frac{V_L}{A h t} (\text{cm/s})$ )
میانگین ضریب نفوذ‌پذیری ( $k$ ): $(k = ۰/۰۳۵ \text{ cm/s})$			
$k_{T, ^{\circ}\text{C}} = k_{T, ^{\circ}\text{C}} \frac{\eta_{T, ^{\circ}\text{C}}}{\eta_{T_0, ^{\circ}\text{C}}} = (0/035)(0/889) = 0/031 \text{ (cm/s)}$			

#### ۱-۵) نکات کلی

- ۱- قبل از آزمایش، باید تمام ذرات بزرگ‌تر از  $\frac{۳}{۴}$  اینچ، حذف شود. حداقل قطر مورد نیاز نمونه،  $D$ ، به حداکثر اندازه ذرات بخش عبوری از  $\frac{۳}{۴}$  اینچ و درصد مانده روی الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر) یا الک  $\frac{۳}{۸}$  اینچ بستگی دارد:
- اگر حداکثر اندازه ذرات بین ۲ میلی‌متر و  $\frac{۳}{۸}$  اینچ باشد و درصد مانده روی الک شماره ۱۰ کمتر از ۳۵٪ باشد،  $D$  باید بزرگ‌تر از ۳ اینچ باشد.
  - اگر حداکثر اندازه ذرات بین ۲ میلی‌متر و  $\frac{۳}{۸}$  اینچ باشد و درصد مانده روی الک شماره ۱۰ بیشتر از ۳۵٪ باشد،  $D$  باید بزرگ‌تر از  $4/5$  اینچ باشد.
  - اگر حداکثر اندازه ذرات بین  $\frac{۳}{۸}$  اینچ و  $\frac{۳}{۴}$  اینچ باشد و درصد مانده روی الک  $\frac{۳}{۸}$  اینچ کمتر از ۳۵٪ باشد،  $D$  باید بزرگ‌تر از ۶ اینچ باشد.
  - اگر حداکثر اندازه ذرات بین  $\frac{۳}{۸}$  اینچ و  $\frac{۳}{۴}$  اینچ باشد و درصد مانده روی الک  $\frac{۳}{۸}$  اینچ بیشتر از ۳۵٪ باشد،  $D$  باید بزرگ‌تر از ۹ اینچ باشد.
- ۲- به منظور تخمین اولیه از ضریب نفوذ‌پذیری خاک‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت، می‌توان از رابطه هازن (۱۸۹۵) بهره جست.

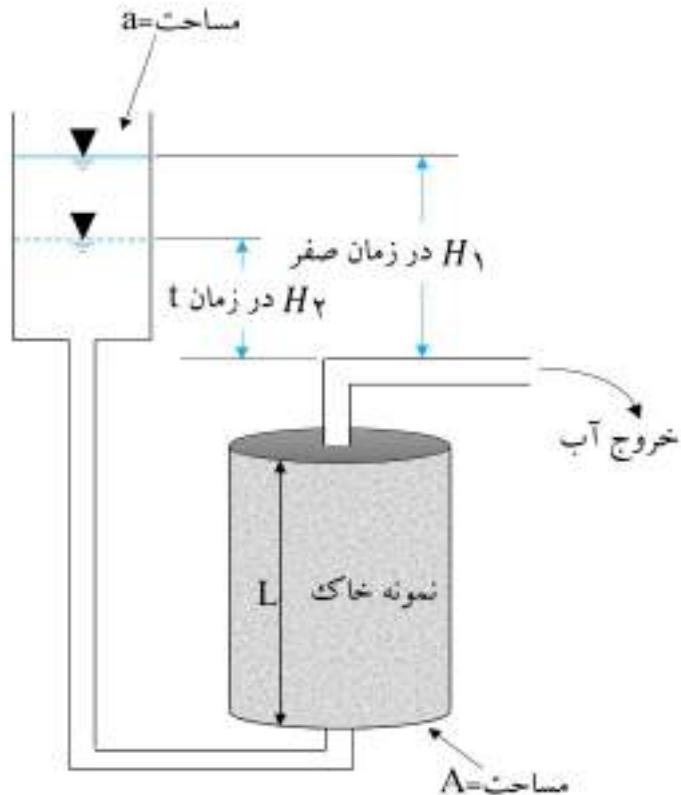
$$k = 0/01 \times D^2 \quad (12-9)$$

## (ASTM D5084) بخش دوم: آزمایش نفوذپذیری با هد (انرژی) افتان (متغیر)

## (۱-۲-۹) مقدمه و تئوری آزمایش

در قسمت قبل، روش انجام آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت برای خاک‌های درشت‌دانه (ASTM D2434) به‌طور مفصل تعریف شد. در این بخش، به بررسی آزمایش با هد متغیر<sup>۱</sup> پرداخته می‌شود که به کمک آن می‌توان ضریب نفوذپذیری خاک‌های ریز‌دانه را اندازه‌گیری نمود.

این آزمایش نسبت به آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت، ساده‌تر است؛ نخست آنکه برای ثابت نگهداشتن سطح آب در مخزن ورودی به منبع آب نیاز ندارد و دوم آنکه اندازه‌گیری حجم جریان ضروری نیست. نمای شماتیک آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر در شکل ۳-۹ نشان داده شده است که شامل یک نفوذسنج دیواره ثابت<sup>۲</sup> با سطح مقطع A و یک منبع تغذیه با سطح مقطع a است. با اندازه‌گیری هد در ابتدای آزمایش ( $H_1$ ) و در پایان آزمایش ( $H_2$ )، پس از دوره نفوذ<sup>۳</sup> t، می‌توان k را محاسبه نمود.



شکل ۳-۹: جریان آب در خاک، در آزمایش هد متغیر

## (۲-۲-۹) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- نمونه دست‌نخورده از خاک مورد نظر (ریز‌دانه)

۲- دستگاه تعیین نفوذپذیری با هد متغیر

۳- ترازو با دقت ۰/۱ گرم

۴- دماستج

۵- لوله پلاستیکی

۶- زمان‌سنج (کرنومتر)

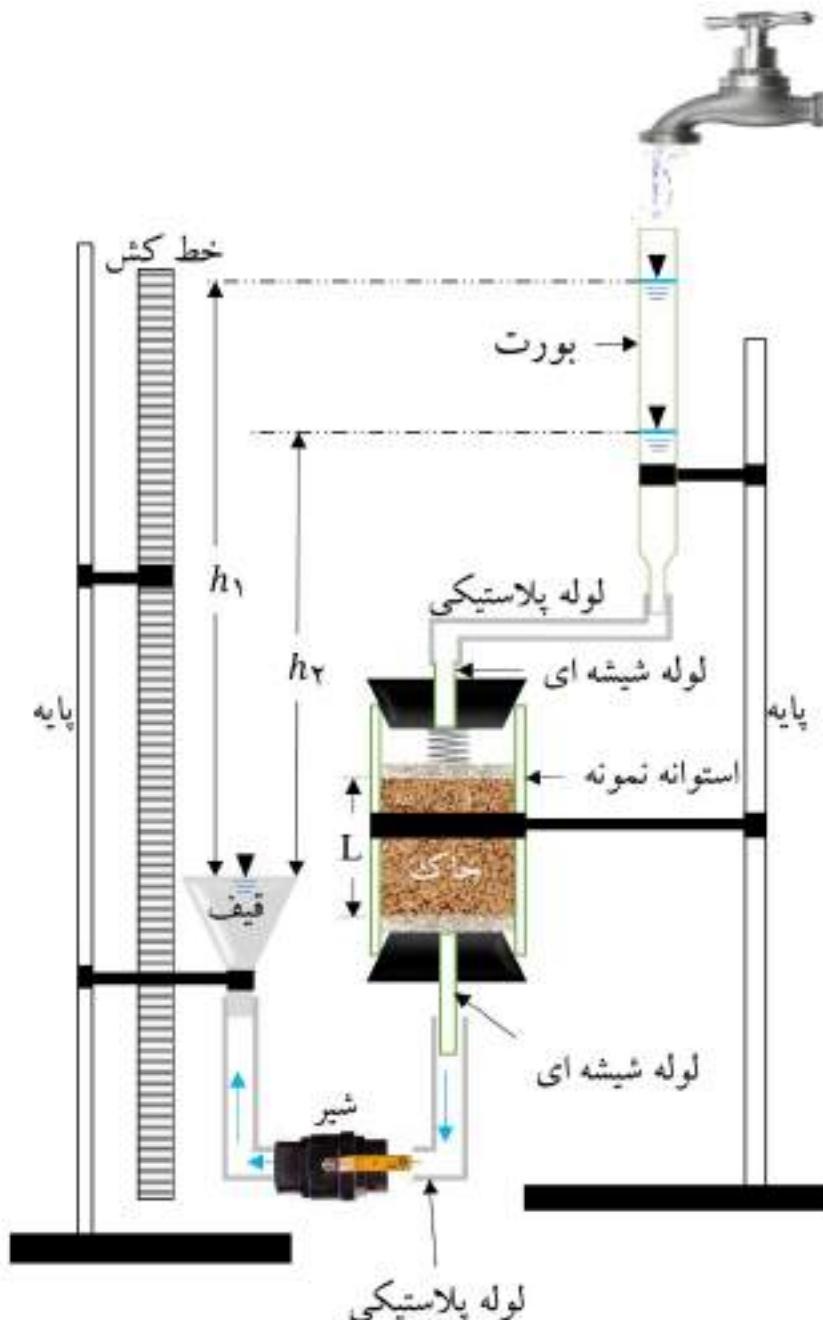
۱. Falling Head Test

2. Fixed-wall permeameter

3. Permeation period

### دستگاه آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر

تصویر شماتیک این دستگاه و شرایط آزمایش با جزئیات در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. دستگاه این آزمایش نیز مانند آزمایش قبل (هد ثابت)، شامل یک استوانه است که از قسمت فوقانی به کمک یک لوله پلاستیکی به بورت<sup>۱</sup> وصل شده است. استوانه و بورت توسط یک پایه، به صورت قائم نگه داشته شده است. انتهای استوانه نیز به کمک لوله پلاستیکی دیگری به یک قیف پلاستیکی متصل است. خط کش و قیف با یک گیره به پایه دیگر متصل شده است تا به صورت قائم قرار گیرد.



شکل ۴-۹: شکل شماتیک دستگاه آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر به همراه جزئیات

<sup>1</sup>. Burette

### ۳-۲-۹) روش انجام آزمایش

- ۱- جرم استوانه پلاستیکی که قرار است نمونه در آن ریخته شود به همراه سنگ‌های متخلخل، فر و دو توپی پلاستیکی را اندازه می‌گیریم ( $M_1$ ).
- ۲- ابتدا سنگ متخلخل انتهایی را بدون فشار اضافی وارد استوانه می‌کنیم؛ سپس توپی پلاستیکی را با فشار از انتهایها وارد استوانه کرده و انتهای آن را مسدود می‌نماییم.
- ۳- در این مرحله می‌توان نمونه دستنخورده قالب‌گیری شده به ارتفاع  $\frac{1}{3}$  ارتفاع استوانه را داخل استوانه قرار داد و آزمایش را انجام داد؛ یا می‌توان نمونه دستخورده را با کمک قاشق در لایه‌های نازک به داخل استوانه ریخت تا طول نمونه به حدود  $\frac{2}{3}$  ارتفاع استوانه برسد و سپس آن را با ارتعاش یا هر روش دیگری به مقدار تراکم محل رساند (تا شرایط نمونه دستنخورده برای نمونه دستخورده ایجاد شود) و آزمایش را انجام داد.
- ۴- سنگ متخلخل فوقانی را وارد استوانه می‌کنیم تا ثابت روی نمونه قرار گیرد.
- ۵- در صورت لزوم فنری را روی سنگ متخلخل بالایی قرار می‌دهیم. وجود فنر روی سنگ متخلخل بالایی برای آن است که حجم نمونه هیچ‌گونه افزایشی نیابد و درنتیجه، نسبت منافذ نمونه در طول آزمایش تغییر نکند. فنر در شکل ۹ نشان داده شده است.
- ۶- توپی پلاستیکی بالایی را روی سنگ متخلخل بالایی قرار می‌دهیم.
- ۷- جرم کل مجموعه را در پایان مرحله ۶ اندازه می‌گیریم ( $M_2$ ).
- ۸- طول نمونه متراکم شده را اندازه می‌گیریم ( $L$ ).
- ۹- کل مجموعه را بالای یک ظرف قرار می‌دهیم تا آب خروجی از داخل دستگاه آزمایش درون آن تخلیه شود (مانند شکل ۹-۹).
- ۱۰- جریان آب از طریق بورت وارد لوله پلاستیکی و پس از عبور از نمونه خاک، وارد لوله پلاستیکی پایینی و سپس وارد قیف می‌شود. در این مرحله باید استوانه دستگاه به دقت بررسی شود تا نشت نداشته باشد و حباب‌های هوا نیز باید از نمونه خارج شود (این عمل توسط بازکردن شیری که روی دستگاه قرار دارد، میسر است).
- ۱۱- در این مرحله باید نمونه به طور کامل اشباع شود که برای این منظور مدتی صبر می‌کنیم تا قیف پر شده و آب از آن سرریز شود.
- ۱۲- توسط شیر تعبیه شده روی لوله پلاستیکی بین انتهای نمونه و قیف، جریان آب از داخل نمونه را متوقف می‌کنیم.
- ۱۳- با توجه به شکل، اختلاف هد ( $h_1$ ) را اندازه می‌گیریم. لازم به ذکر است نباید داخل بورت هیچ آبی اضافه شود.
- ۱۴- شیر را بازکرده و آب از طریق بورت وارد نمونه و سپس وارد قیف می‌شود. مدت زمانی ( $t$ ) را که در آن اختلاف هد از  $h_1$  به  $h_2$  می‌رسد با توجه به شکل یادداشت می‌کنیم. جریان آب را دوباره با بستن شیر متوقف می‌کنیم.
- ۱۵- آزمایش را سه بار تکرار می‌کنیم که در هر مرحله باید مقادیر  $h_1$  و  $h_2$  تغییر کند.
- ۱۶- دمای آب (T) را بحسب درجه سانتی‌گراد یادداشت می‌کنیم.

### ۴-۲-۹) محاسبات

مقدار ضریب نفوذپذیری از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$k = \frac{aL}{2/3 \cdot 0^3} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (13-9)$$

A : سطح مقطع نمونه

a : سطح مقطع داخلی بورت (در ابتدای آزمایش، این مساحت توسط کولیس اندازه‌گیری می‌شود) همانند آزمایش هد ثابت، در آزمایش هد افتان نیز مقدار k را معمولاً برای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ارائه می‌کنند. اگر دمای انجام آزمایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد نباشد، آن را به شکل زیر تصحیح می‌کنیم:

$$k_{\gamma, \circ C} = k_{T, \circ C} \frac{\eta_{T, \circ C}}{\eta_{\gamma, \circ C}} \quad (14-9)$$

نمونه محاسبات آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر در جدول ۴-۹ و ۵-۹ ارائه شده است.

جدول ۴-۹: آزمایش نفوذپذیری با هد افتان (تعیین نسبت تخلخل نمونه)

شماره نمونه:	نوع خاک: ماسه یکنواخت
محل نمونه‌گیری:	
قطر نمونه: $D = 6/35 \text{ cm}$	طول نمونه: $L = 13/2 \text{ cm}$
تاریخ نمونه‌گیری:	شخص نمونه‌گیر:

۴۱۸/۰۳	$V = \frac{\pi}{4} D^2 L (\text{cm}^3)$
۲/۶۶	چگالی دانه‌های جامد، $G_s$
۲۳۸/۴	جرم استوانه پلاستیکی + سنگ‌های متخلخل + فنر + دو توپی پلاستیکی، $M_1 (\text{g})$
۹۶۵/۳	جرم استوانه پلاستیکی + سنگ‌های متخلخل + فنر + دو توپی پلاستیکی + نمونه، $M_2 (\text{g})$
۱/۷۴	$\rho_d = \frac{M_2 - M_1}{V} (\text{g/cm}^3)$
۰/۵۳	$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d}$ نسبت تخلخل نمونه، ۱ -

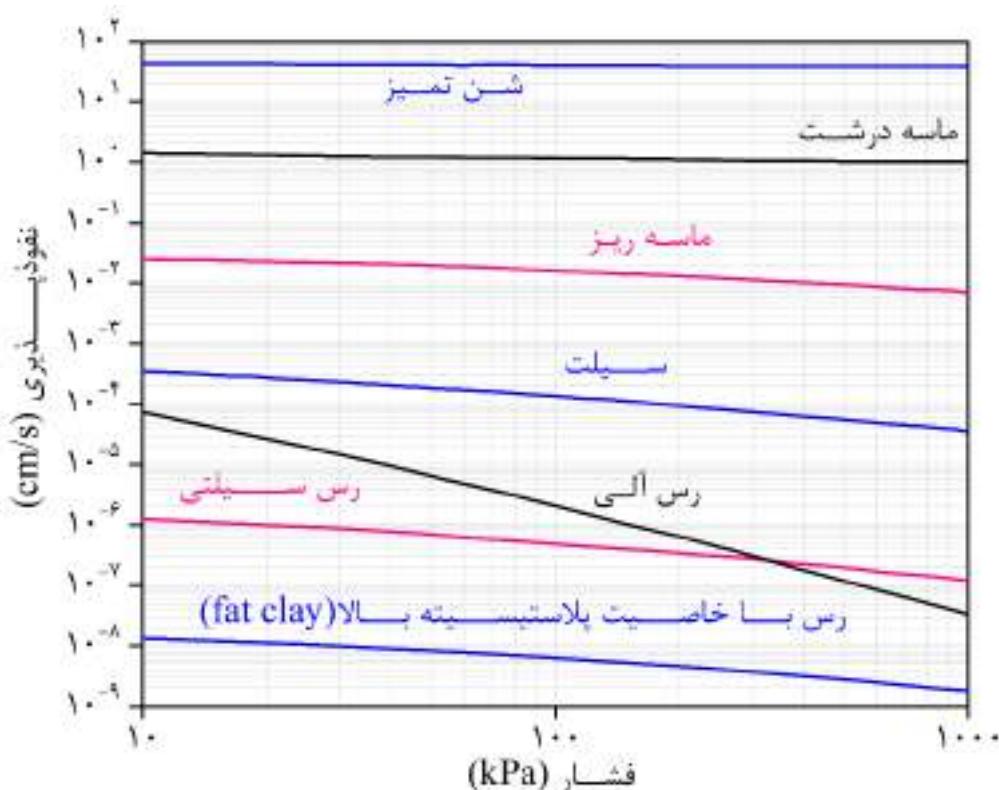
جدول ۵-۹: آزمایش نفوذپذیری با هد افتان (تعیین ضریب نفوذپذیری خاک)

۳	۲	۱	شماره آزمایش
۶/۳۵	۶/۳۵	۶/۳۵	(cm) $D$
۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲	(cm) $L$
۳۱/۶۷	۳۱/۶۷	۳۱/۶۷	(cm <sup>2</sup> ) $A$
۶۵	۷۶	۸۵	$h_1$ (cm)
۲۰	۲۰	۲۴	$h_2$ (cm)
۱۴/۴	۱۵/۳	۱۵/۴	(s) $t$
۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	۰/۰۳۶	$k = \frac{aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)
•/۰۳۷ (cm/s) : (k)			میانگین ضریب نفوذپذیری
$k_{\gamma, \circ C} = k_{T, \circ C} \frac{\eta_{T, \circ C}}{\eta_{\gamma, \circ C}} = (•/۰۳۷)(•/۰۸۸۹) = •/۰۳۳$ (cm/s)			

#### ۵-۲-۹) نکات کلی

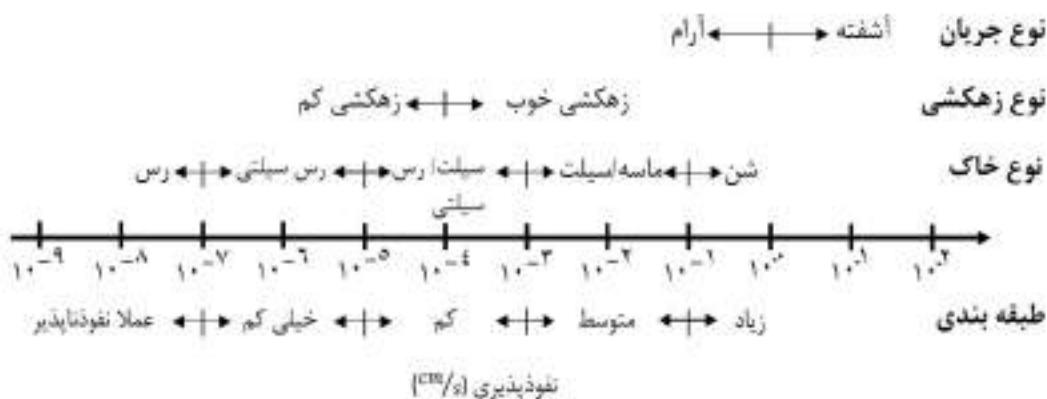
- در بیشتر موارد، آزمایش‌های نفوذپذیری با هد ثابت یا هد متغیر در آزمایشگاه بدون سربار انجام می‌شود. در واقعیت، تنش مؤثر قابل توجهی روی خاک به دلیل بار اضافی و بارهای اعمال شده در سطح زمین وجود دارد؛ بنابراین، دانستن تأثیر اضافه‌بار اعمال شده بر نفوذپذیری مفید است. سیدگرن<sup>۱</sup> (۱۹۶۷) برای این منظور، تغییرات ضریب نفوذپذیری با فشار سربار را برای خاک‌های مختلف به صورت نمودار نشان داده شده در شکل ۵-۹ ارائه کرد.

<sup>1</sup>. Cedegren



شکل ۵-۹: تغییر نفوذپذیری با سریار (اقتباس شده از سیدگرن ۱۹۶۷)

۲- شکل ۶-۹ می‌تواند به عنوان یک راهنمای برای نوع جریان (آرام یا آشفته) و ویژگی‌های زهکشی (خوب یا کم زهکشی شده) گروه‌های اصلی خاک‌ها و محدوده مقادیر نفوذپذیری آن‌ها باشد. همچنین در این شکل، یک طبقه‌بندی ساده برای خاک‌ها بر اساس نفوذپذیری آن‌ها به عنوان پیشنهادی از سوی ترزاقی و پک<sup>۱</sup> (۱۹۶۷) نیز نشان داده شده است.



شکل ۶-۹: مقادیر متداول نفوذپذیری در خاک‌های مختلف و طبقه‌بندی‌های خاک‌ها بر این اساس

<sup>1</sup>. Peck

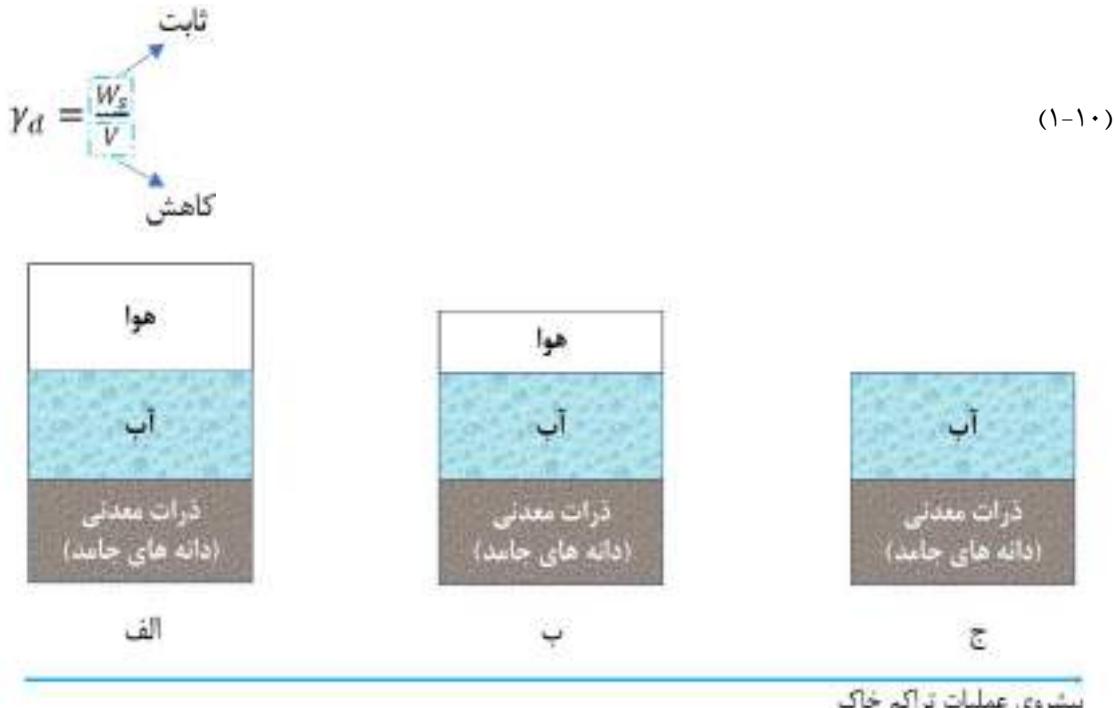
## فصل دهم

آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد و اصلاح شده

## (AASHTO T99, ASTM D698) استاندارد (پروکتور) آزمایش تراکم

## ۱-۱-۱۰ مقدمه و تئوری آزمایش

تراکم خاک، عملیاتی است که در آن با استفاده از انرژی منتقل شده به یک توده خاک، هوای موجود در سیستم سه‌فازی خاک بیرون رانده شده و وزن مخصوص خشک خاک افزایش می‌یابد. افزایش وزن مخصوص خشک خاک در اثر تراکم و خروج هوا به‌این‌علت است که حجم کل خاک (مخرج کسر وزن مخصوص خشک) کاهش می‌یابد؛ در حالی که وزن دانه‌های جامد خاک (صورت کسر وزن مخصوص خشک) ثابت و بدون تغییر است (رابطه ۱-۱۰ و شکل ۱-۱۰).



شکل ۱-۱۰: مراحل تراکم خاک: (الف) شروع تراکم؛ (ب) پس از متراکم کردن؛ (ج) مطلوب‌ترین حالت تراکم (خاک اشباع)

در اجرای بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی از جمله سدهای خاکی، سازه‌های نگهبان، لاینرهای دفن زباله<sup>۱</sup>، فرودگاه‌ها، لایه اساس بزرگراه<sup>۲</sup> و زیراساس و خاکریزها، خاک را متراکم می‌کنند تا خواص مهندسی آن بهبود یابد. خواص مهندسی خاک‌ها عبارت است از مقاومت برشی، تراکم‌پذیری و هدایت هیدرولیکی. اثرات مطلوب تراکم عبارت است از:

- ۱- افزایش مقاومت خاک
- ۲- افزایش ظرفیت باربری
- ۳- کاهش نشت (تراکم‌پذیری کمتر)
- ۴- کاهش جریان آب از خاک (ترواش آب)
- ۵- کاهش تورم (انبساط) و رمبندگی<sup>۳</sup> (انقباض) خاک
- ۶- افزایش پایداری خاک
- ۷- کاهش خسارت سرمادگی

با این حال، تراکم نامناسب می‌تواند منجر به موارد زیر شود:

- ۱- گسیختگی سازه‌ای<sup>۴</sup> ناشی از نشت‌های کلی و تفاضلی بیش از حد

<sup>1</sup>. Landfill liners

<sup>2</sup>. Highway base courses

<sup>3</sup>. Collapse

<sup>4</sup>. Structural distress

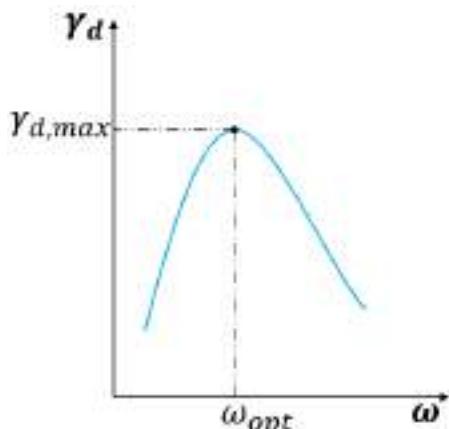
-۲- ترک خوردگی روسازی در لایه‌های اساس و زیراساس

-۳- آسیب‌های سازه‌ای به سازه‌های مدفون، لوله‌های آب و فاضلاب و مجرای تأسیسات

-۴- فرسایش خاک

برای پیش‌بینی عملکرد خاک متراکم شده و ایجاد معیارهای ساخت مناسب تراکم در آزمایشگاه با استفاده از روش‌های استاندارد انجام می‌شود.

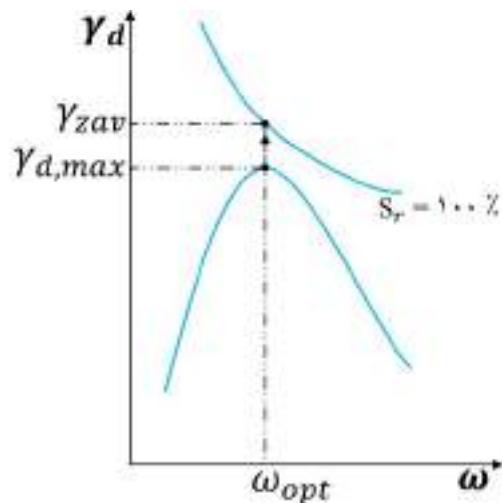
هنگام متراکم کردن خاک، وجود مقدار کمی آب (رطوبت)، باعث بهبود در عملیات تراکم می‌شود؛ زیرا در این حالت، آب موجود با قرارگرفتن در اطراف ذرات خاک، اصطکاک بین دانه‌ها را کاهش می‌دهد و به‌اصطلاح نقش روغن کاری را ایفا می‌کند؛ اما در رطوبت‌های بالا، آب، با پرکردن فضای خالی باعث کاهش انتقال انرژی اعمالی به ذرات خاک می‌شود. از این‌رو، از اهداف اصلی آزمایش تراکم، به دست آوردن رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) و وزن مخصوص نظیر آن ( $\gamma_{d,max}$ ) است (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰: منحنی تغییرات وزن مخصوص خشک بر حسب رطوبت در آزمایش تراکم

مطلوب‌ترین حالت تراکم هنگامی است که تمام هوای موجود در خاک خارج و خاک اشباع شود. در این حالت وزن مخصوص خاک، وزن مخصوص هوای صفر<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و با  $\gamma_{zav}$  نشان داده می‌شود (شکل ۳-۱۰)، اما از آنجایی که رسیدن به این حالت با عملیات تراکم دشوار و تا حدی غیرممکن است، در عمل پارامتر وزن مخصوص حداقل ( $\gamma_{d,max}$ ) که از آزمایش تراکم به دست می‌آید، مبنای محاسبات رئوتکنیکی قرار می‌گیرد.

<sup>1</sup>. Zero Air Voids

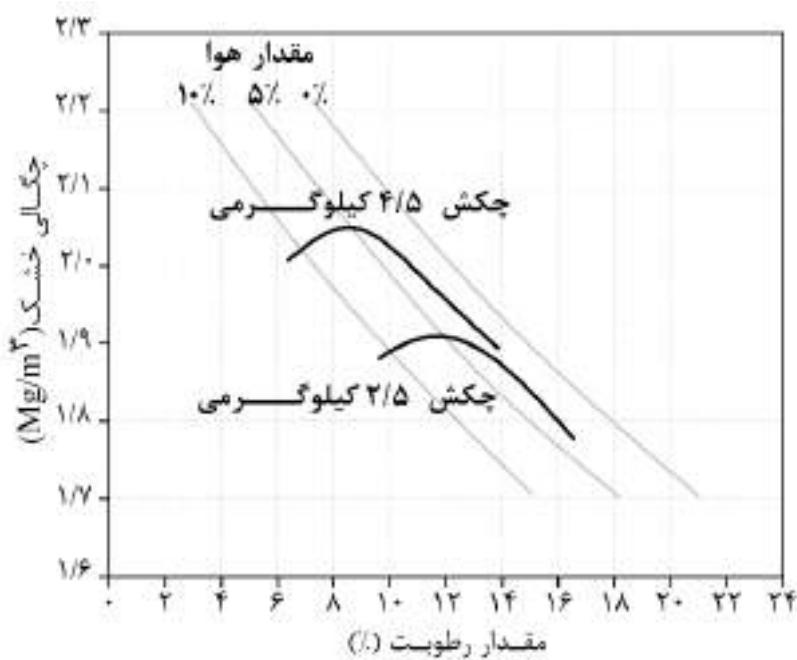


شکل ۳-۱۰: منحنی هوای صفر

## عوامل مؤثر بر منحنی تراکم خاک

## ۱- انرژی تراکم

اگر برای یک نوع خاک مشخص، انرژی تراکم افزایش یابد، به این معناست که کار بیشتری صورت گرفته است؛ درنتیجه در رطوبت بهینه کمتر به وزن مخصوص خشک حداکثری بزرگتری خواهیم رسید (شکل ۴-۱۰)، اما باید توجه داشت که افزایش انرژی تراکم تا یک مقدار مشخص بر عملیات تراکم تأثیرگذار است و پس از آن، وزن مخصوص خشک حداکثر ثابت باقی می‌ماند.

شکل ۴-۱۰: اثر افزایش انرژی تراکم بر روی منحنی تراکم (کریگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)

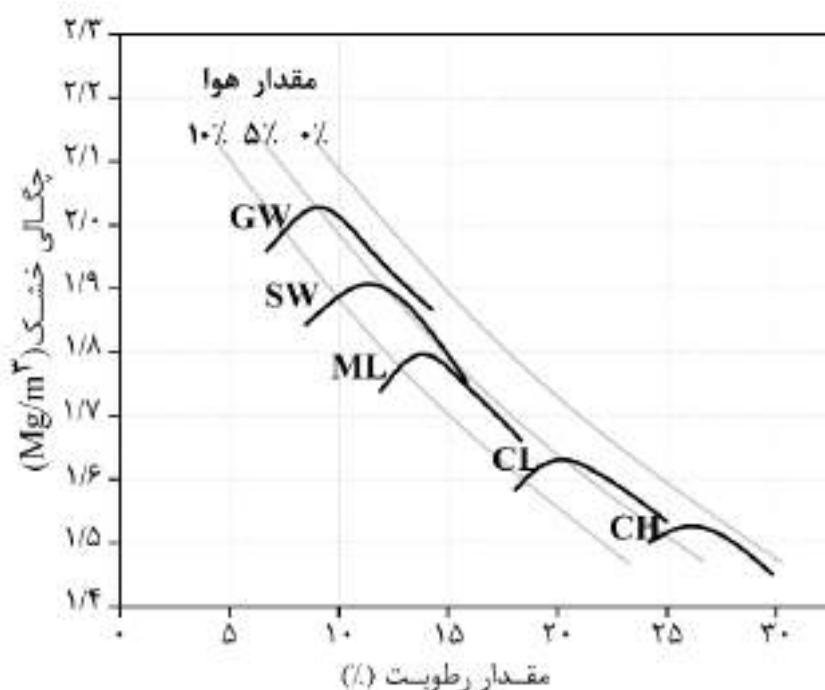
برای آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد که در ادامه توضیح داده خواهد شد، انرژی تراکم برابر خواهد بود با:

<sup>1</sup>. Craig

$$\text{سه لایه} \times 25 \text{ ضربه در هر لایه} \times 5/5 \text{ پوند} \times 1 \text{ فوت در هر ضربه} = \frac{\frac{1}{3} ft^3}{\text{مقدار انرژی}} \\ = 12375 \frac{ft \cdot lb}{ft^3} = 593 \frac{kJ}{m^3}$$
(۲-۱۰)

## ۲- نوع خاک

در خاک‌های ریزدانه به دلیل سطح جانبی بیشتری که نسبت به خاک‌های درشت‌دانه دارد، برای آغشته کردن ذرات خاک و کاهش اصطکاک بین دانه‌ها، نیاز به رطوبت بیشتری است که این افزایش رطوبت سبب پرکردن فضای خالی بین ذرات و درنتیجه کاهش عمل تراکم می‌شود؛ بنابراین مشخص می‌شود که تراکم خاک‌های درشت‌دانه بهتر از خاک‌های ریزدانه است (شکل ۵-۱۰).



شکل ۵-۱۰: منحنی تراکم انواع مختلف خاک (کریگ ۲۰۰۴)

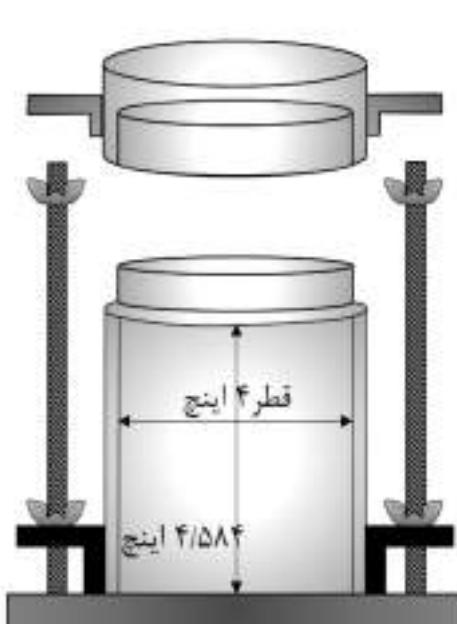
## ۲-۱-۱۰) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- قالب تراکم (شکل ۶-۱۰)
- ۲- چکش پروکتور استاندارد (۵/۵ پوند معادل با ۲۴/۵ نیوتن) (شکل ۷-۱۰)
- ۳- ظرف پهن جهت مخلوط کردن نمونه با آب (شکل ۸-۱۰)
- ۴- دستگاه خارج کردن نمونه<sup>۱</sup> از قالب تراکم (شکل ۹-۱۰)
- ۵- تیغه فلزی بالبه صاف (لبه صاف کن)
- ۶- الک شماره ۴ (شکل ۱۰-۱۰)
- ۷- بطربی پلاستیکی (شکل ۱۱-۱۰)
- ۸- ترازو با دقیق ۰/۰۱ گرم (شکل ۱۲-۱۰)
- ۹- ترازو با دقیق ۰/۱ گرم (شکل ۱۳-۱۰)

<sup>1</sup>. Proctor Specimen Extruder

۱۰- ظرف تعیین درصد رطوبت (شکل ۱۴-۱۰)

(۱۵-۱۰) گرم کن (شکل ۱۵-۱۰)

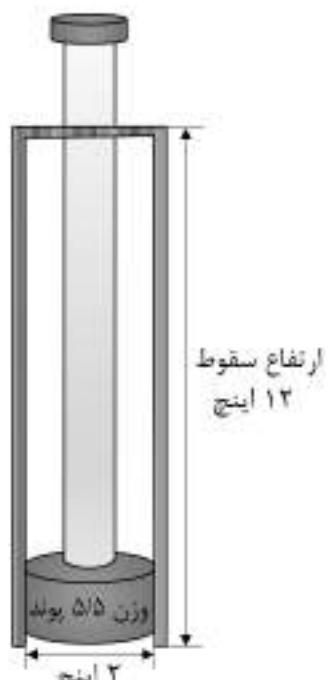


(ب)



(الف)

شکل ۱۰-۶: قالب تراکم آزمایش پروکتور استاندارد: (الف) شکل واقعی؛ (ب) شکل شماتیک



(ب)



(الف)

شکل ۷-۱۰: چکش تراکم آزمایش پروکتور استاندارد: (الف) شکل واقعی؛ (ب) شکل شماتیک



شکل ۹-۱۰: دستگاه خارج کردن نمونه از قالب تراکم



شکل ۸-۱۰: ظرف پهن جهت مخلوط کردن نمونه با آب



شکل ۱۱-۱۰: بطری پلاستیکی



شکل ۱۰-۱۰: الک شماره ۴



شکل ۱۳-۱۰: ترازو با دقیق ۰/۱ گرم



شکل ۱۲-۱۰: ترازو با دقیق ۰/۰۱ گرم



شکل ۱۵-۱۰: گرم کن



شکل ۱۴-۱۰: ظرف تعیین درصد رطوبت

### قالب و چکش تراکم (پروکتور) استاندارد

شکل های ۱۰-۶ و ۱۰-۷ به ترتیب قالب تراکم پروکتور استاندارد به قطر ۴ اینچ (۱۰۱/۶ میلی متر) و ارتفاع ۴/۵۸۴ اینچ (۱۱۶/۴ میلی متر) و چکش تراکم را نشان می دهد. قالب بر روی یک صفحه مسطح قرار می گیرد و یک حلقه اضافی به بالای قالب وصل می شود. حجم داخلی قالب  $\frac{1}{3}$  فوت مکعب (۹۴۳/۹ سانتی متر مکعب) است. چکش تراکم نیز به هنگام تراکم از ارتفاع ۱۲ اینچ (۳۰۴/۸ میلی متر) رها می شود.

### ۱-۳) روش انجام آزمایش

- ۱- مقدار ۴/۵ کیلوگرم (تقرباً ۱۰ پوند) از خاک مورد نظر را برداشته و در محیط بیرون قرار می دهیم تا خشک شود؛ سپس در صورت وجود کلوخه در خاک، آن را با دست یا چکش می شکنیم.
- ۲- خاک را از الک شماره ۴ عبور داده و آن را در یک ظرف بزرگ قرار می دهیم. مقدار خاک موجود درون ظرف باید حداقل ۲/۷ کیلوگرم (تقرباً ۶ پوند) باشد.
- ۳- مقداری آب به نمونه خاک اضافه می کنیم و آن را کاملاً مخلوط می کنیم؛ به طوری که درصد رطوبت آن به حدود ۵٪ برسد.
- ۴- جرم قالب پروکتور + صفحه کف (بدون حلقه اضافی در بالا) را بر حسب کیلوگرم تعیین می کنیم ( $M_1$ ). همچنین بهتر است ارتفاع و قطر قالب را نیز با کولیس اندازه گیری کنیم تا حجم به دست آمده را با حجم استاندارد و فرض شده برای قالب مقایسه کنیم. همان طور که بیان شد، حجم داخلی قالب باید حدوداً  $\frac{1}{3}$  فوت مکعب (۹۴۳/۹ سانتی متر مکعب) باشد.
- ۵- حلقه اضافی را به بالای قالب متصل می کنیم.
- ۶- خاک مرطوب را در سه لایه تقریباً مساوی داخل قالب می ریزیم. هر لایه باید به وسیله ۲۵ ضربه چکش پروکتور استاندارد، قبل از اینکه لایه بعدی داخل قالب ریخته شود، به صورت یکنواخت متراکم شود. تراکم باید به صورتی باشد که تمام قسمت های نمونه تحت اثر ضربه چکش قرار بگیرد و پس از اتمام هر لایه، باید سطح نسبتاً صافی حاصل شود (شکل ۱۰-۱۶).



شکل ۱۶-۱۰: مراحل تراکم هر لایه خاک: (الف) ضربه چکش به تمامی قسمت‌های نمونه؛ ب) شکل حاصله پس از اتمام هر لایه

توجه: لایه‌های سستی که داخل قالب ریخته می‌شود باید به اندازه‌ای باشد که پس از تراکم سه لایه، مقداری خاک از انتهای حلقه اضافی متصل به بالای قالب تراکم بالاتر بایستد. نمونه‌ای از تکمیل آخرین لایه تراکم در شکل ۱۷-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۱۰: اتمام اجرای آخرین لایه تراکم و باز کردن حلقه بالایی

- ۷- حلقه اضافی بالایی را از قالب باز کرده و مراقبت‌های لازم را در این هنگام برای نشکستن و بیرون نریختن خاک متراکم داخل قالب به عمل می‌آوریم (شکل ۱۷-۱۰).
- ۸- با استفاده از تیغه فلزی (لبه‌صفکن) موجود، آخرین لایه را صاف و خاک اضافی را حذف می‌کنیم تا سطح نمونه، همتراز بالای قالب شود (شکل ۱۸-۱۰).



(ب)



(الف)

شكل ۱۸-۱۰: (الف) صاف کردن آخرین لایه نمونه توسط تیغه فلزی؛ ب) شکل نهایی

۹- اطراف قالب تراکم را تمیز و مجموع جرم قالب + صفحه کف + خاک مرطوب متراکم شده در قالب را تعیین می‌کنیم  $(M_2)$ .

۱۰- صفحه کف را از قالب جدا می‌کنیم و با استفاده از دستگاه شکل ۹-۱۰، خاک متراکم شده استوانه‌ای شکل را از داخل قالب بیرون می‌آوریم (شکل ۱۹-۱۰). دقیق کنید که این کار می‌تواند توسط اعمال ضربات چکش به بدنه قالب نیز انجام شود.



(ب)



(الف)

شكل ۱۹-۱۰: (الف) خارج کردن نمونه از داخل قالب توسط دستگاه؛ ب) شکل نهایی

۱۱- ظرف تعیین رطوبت را برمی‌داریم و جرم آن را اندازه می‌گیریم  $(M_3)$ .

۱۲- از قسمت میانی خاک بیرون کشیده شده در مرحله ۱۰، یک نمونه جهت تعیین درصد رطوبت برداشته (شکل ۱۰-۲۰)، در ظرف مخصوص قرار می‌دهیم و جرم آن را یادداشت می‌کنیم ( $M_4$ ).



شکل ۱۰-۲۰: نمونه‌گیری از خاک متراکم شده جهت تعیین درصد رطوبت

۱۳- ظرف تعیین رطوبت را همراه خاک مرطوب، به مدت ۲۴ ساعت در گرم کن قرار می‌دهیم تا خشک شود.

۱۴- مقدار باقیمانده خاک متراکم شده را به سیله دست از هم جدا کرده و با بقیه خاک مرطوب باقیمانده در ظرف بزرگ مخلوط می‌کنیم. به خاک داخل ظرف، آب اضافه می‌کنیم تا حدی که درصد رطوبت به مقدار  $1/5$  تا  $2\%$  افزایش یابد و سپس آب و خاک را کاملاً مخلوط می‌کنیم.

۱۵- مراحل ۶ تا ۱۴ را تکرار می‌کنیم. در این آزمایش‌ها، مجموع جرم قالب + صفحه کف + خاک مرطوب ( $M_5$ ) ابتدا با افزایش درصد رطوبت افزایش و سپس کاهش خواهد یافت. آزمایش را آنقدر ادامه می‌دهیم تا حداقل دو مرتبه متوالی اعداد به دست آمده کاهش را نشان دهد.

۱۶- پس از گذشت ۲۴ ساعت، جرم خاک‌های خشکی که در مرحله ۱۳ در گرم کن قرار دادیم را اندازه می‌گیریم ( $M_5$ ).

#### ۴-۱-۱۰) محاسبات

##### منحنی تراکم

نمونه‌ای از محاسبات مربوط به آزمایش پروکتور برای به دست آوردن منحنی تراکم در جدول ۱-۱۰ نشان داده شده است. با مراجعه به این جدول:

۱- در سطر اول از جدول: جرم قالب پروکتور + صفحه کف بدون حلقه اضافی در بالا ( $M_1$ ) تعیین می‌شود (از مرحله ۴ آزمایش).

۲- در سطر دوم از جدول: مجموع جرم قالب + صفحه کف + خاک مرطوب ( $M_2$ ) تعیین می‌شود (از مرحله ۹ آزمایش).

۳- در سطر سوم از جدول: جرم خاک مرطوب متراکم شده ( $M_2 - M_1$ ) محاسبه می‌شود (سطر دوم منهای سطر اول از جدول).

۴- در سطر چهارم از جدول: وزن مخصوص مرطوب برای هر آزمایش انجام شده برابر است با:

$$\gamma = \frac{\text{وزن خاک مرطوب متراکم شده (نیوتن)}}{\text{حجم قالب (سانتیمتر مکعب)}} \times 10^3 = \frac{(M_2 - M_1)g}{943/9} \times 10^3 \\ = 10/39 (M_2 - M_1) kN/m^3$$

$g$ : شتاب گرانش (مقدار آن برابر  $9/81 m/s^2$  در نظر گرفته شده است)

تذکر: همان طور که پیش تر گفته شد، بهتر است ارتفاع و قطر (حجم) قالب قبل از انجام آزمایش با کولیس اندازه گیری شود و حجم بدست آمده به عنوان حجم دقیق قالب در محاسبات بالا منظور شود.

۵- در سطر پنجم از جدول: شماره ظروف تعیین رطوبت نوشته می شود.

۶- در سطر ششم از جدول: جرم ظرف تعیین رطوبت ( $M_3$ ) را یادداشت می کنیم (از مرحله ۱۱ آزمایش).

۷- در سطر هفتم از جدول: جرم ظرف تعیین رطوبت همراه خاک مرطوب ( $M_4$ ) را یادداشت می کنیم (از مرحله ۱۲ آزمایش).

۸- در سطر هشتم از جدول: جرم ظرف تعیین رطوبت همراه خاک خشک ( $M_5$ ) را یادداشت می کنیم (از مرحله ۱۶ آزمایش).

۹- در سطر نهم از جدول: درصد رطوبت برابر است با:

$$\omega(%) = \frac{M_4 - M_5}{M_5 - M_1} \times 100 \quad (4-10)$$

۱۰- در سطر دهم از جدول: وزن مخصوص خشک برابر است با:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{\omega(%)}{100}} = \frac{\text{سطر چهارم}}{\text{سطر نهم}} \quad (5-10)$$

### منحنی هوای صفر

پیش از این در رابطه با منحنی هوای صفر، توضیحاتی در قسمت مقدمه ارائه گردید. مقدار وزن مخصوص خشک در حالتی که هیچ گونه هوایی در نمونه وجود نداشته باشد از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\gamma_{d,max} = \gamma_{zav} = \frac{\gamma_w}{\frac{\omega(%)}{100} + \frac{1}{G_s}} \quad (6-10)$$

$\gamma_{zav}$ : وزن مخصوص هوای صفر

$\gamma_w$ : وزن مخصوص آب

$\omega$ : درصد رطوبت

$G_s$ : چگالی ویژه دانه های جامد خاک

مقادیر  $\gamma_w$  و  $G_s$  معلوم است. برای  $\omega$  نیز مقادیری فرض می شود و  $\gamma_{zav}$  بر این اساس محاسبه خواهد شد. به عنوان مثال، در جدول ۱۰-۲ نمونه ای از محاسبات مقادیر  $\gamma_{zav}$  برای خاک گزارش شده در جدول ۱۰-۱ آورده شده است.

### رسم منحنی های تراکم و هوای صفر

منحنی تغییرات  $\gamma_d$  نسبت به  $\omega$  را بر اساس محاسبات بالا ترسیم می کنیم. این کار برای منحنی تراکم با اتصال نقاط و ایجاد یک منحنی زنگوله ای شکل انجام می شود. نقطه حداکثر منحنی روی محور قائم، حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت نظیر این نقطه نیز درصد رطوبت بهینه است. مقادیر بدست آمده برای منحنی هوای صفر نیز در کنار منحنی  $\omega - \gamma_d$  برای همان آزمایش رسم می شود. در شکل ۲۱-۱۰ منحنی های مربوط به داده های جداول ۱۰-۱ و ۱۰-۲ ترسیم شده است.

## جدول ۱۰-۱: آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد (به دست آوردن منحنی تراکم خاک)

شماره نمونه: ۲

نوع خاک: سیلت رس دار قهوه‌ای روشن

محل نمونه‌گیری:

تعداد لایه‌ها: ۳	تعداد ضریب در هر لایه: ۲۵	وزن چکش: ۲/۵ kg	حجم قالب: ۹۴۳/۹ cm <sup>3</sup>
تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....			شخص نمونه‌گیری: ...../...../.....

۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره آزمایش
۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۶۹	-۱ جرم قالب، $M_1$ (kg)
۶/۵۶	۶/۵۸	۶/۶۴	۶/۵۹	۶/۵۴	۶/۴۴	-۲ جرم قالب + نمونه مرطوب، $M_T$ (kg)
۱/۸۷	۱/۸۹	۱/۹۵	۱/۹۰	۱/۸۵	۱/۷۵	-۳ جرم رطوبت خاک، $M_T - M_1$ (kg)
۱۹/۴۳	۱۹/۶۴	۲۰/۲۶	۱۹/۷۴	۱۹/۲۲	۱۸/۱۸	-۴ وزن مخصوص مرطوب خاک، $\gamma = ۱۰/۳۹ (M_T - M_1) (kN/m^3)$
۵۰۴	۲۰۶	۲۴۲	۲۲۲	۲۱۲	۲۰۲	-۵ شماره ظرف تعیین رطوبت
۴۰/۸	۵۴/۸	۵۴/۰	۵۳/۳	۵۳/۳	۵۴/۰	-۶ جرم ظرف تعیین رطوبت، $M_\gamma$ (g)
۲۴۳/۰	۴۲۲/۸	۴۹۰/۰	۴۳۹/۰	۳۵۴/۰	۲۵۳/۰	-۷ جرم ظرف تعیین رطوبت + خاک مرطوب، $M_\gamma$ (g)
۲۱۱/۱	۳۷۴/۷	۴۴۱/۵	۴۰۱/۰	۳۲۶/۰	۲۳۷/۰	-۸ جرم ظرف تعیین رطوبت + خاک خشک، $M_d$ (g)
۱۸/۸	۱۵/۰	۱۲/۵	۱۰/۹	۱۰/۳	۸/۷	-۹ درصد رطوبت، $\omega(\%) = \frac{M_\gamma - M_d}{M_d} \times ۱۰۰$
۱۶/۴	۱۷/۱	۱۸/۰	۱۷/۸	۱۷/۴	۱۶/۷	-۱۰ وزن مخصوص خشک، $\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{\omega(\%)}{۱۰۰}} (kN/m^3)$

## جدول ۱۰-۲: آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد (به دست آوردن منحنی هوای صفر بر اساس رابطه ۶-۱۰)

شماره نمونه: ۲

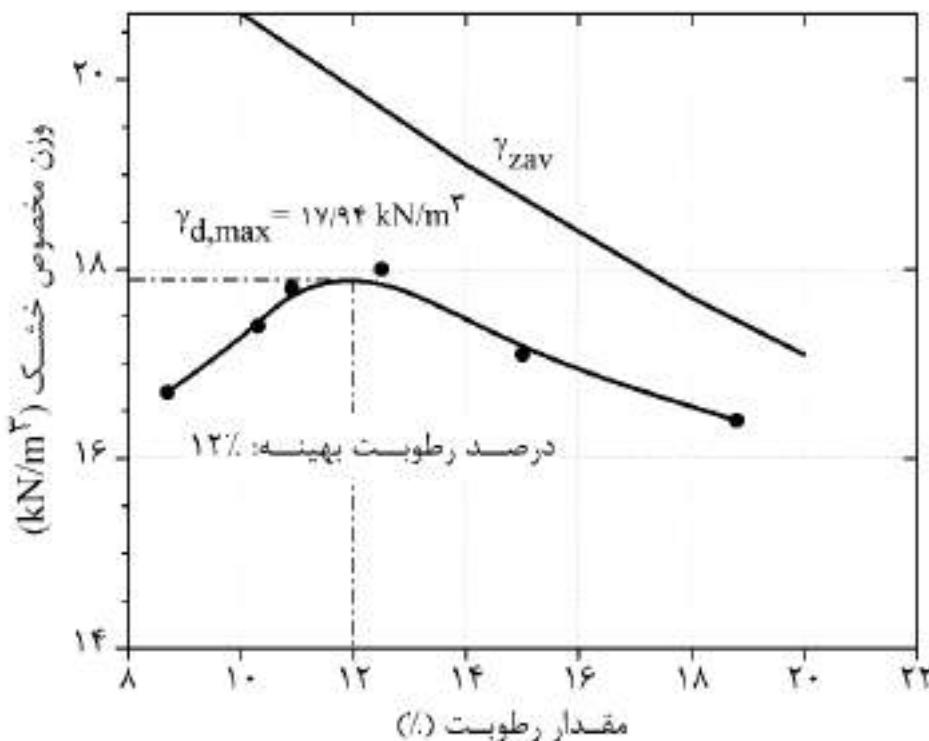
نوع خاک: سیلت رس دار قهوه‌ای روشن

محل نمونه‌گیری:

تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

شخص نمونه‌گیری: ...../...../.....

وزن مخصوص هوای صفر $\gamma_{zav}$ (kN/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص آب $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	درصد رطوبت فرض شده $\omega(\%)$	چگالی ویژه دانه‌های جامد، $G_s$
۲۰/۷	۹/۸۱	۱۰	۲/۶۸
۱۹/۹	۹/۸۱	۱۲	۲/۶۸
۱۹/۱	۹/۸۱	۱۴	۲/۶۸
۱۸/۴	۹/۸۱	۱۶	۲/۶۸
۱۷/۷	۹/۸۱	۱۸	۲/۶۸
۱۷/۱	۹/۸۱	۲۰	۲/۶۸



شکل ۲۱-۱۰: منحنی های تراکم و هوای صفر: تغییرات وزن مخصوص خشک بر حسب مقدار رطوبت بر اساس داده های جداول ۱-۱۰ و ۲-۱۰

#### ۱-۱-۵) نکات کلی

۱- همان طور که توضیح داده شد، وزن مخصوص خشک حداکثر را می توان با استفاده از آزمایش تراکم استاندارد تعیین کرد، اما در عمل گاهی نمی توانیم یا نمی خواهیم با صرفه هزینه به این مقدار از تراکم برسیم. بدیهی است که در این گونه موارد، وزن مخصوص خشک حداکثر و اجرایی با یکدیگر متفاوت خواهد بود که این تفاوت توسط پارامتری به نام تراکم نسبی<sup>۱</sup> به صورت زیر تعریف می شود:

$$RC (\%) = \frac{\gamma_d \text{ اجرایی}}{\gamma_{d,max} \text{ آزمایشگاه}} \times 100 \quad (7-10)$$

۲- تراکم خاک های چسبنده بر ساختار<sup>۲</sup>، نفوذ پذیری، مشخصات تحکیمی و پارامترهای مقاومتی آنها اثر می گذارد.  
۳- برای یک خاک مشخص، هیچ بخشی از منحنی  $\omega - \gamma_d$  منحنی هوای صفر را قطع نخواهد کرد.  
۴- در ASTM D698 موصیه می شود زمانی که خاک خشک با آب ترکیب می شود برای رسیدن به رطوبت مورد نظر، مخلوط باید حداقل ۱۶ ساعت قبل از تراکم، در محیط درسته (داخل پلاستیک) مانده و هیدراته شود. هیدراتاسیون کامل مهم است و زمان هیدراتاسیون ناکافی ممکن است منجر به نتایج اشتباه و منحنی تراکم ضعیف شود؛ بنابراین باید نمونه های خاک را قبل از انجام عملیات تراکم، در رطوبت مورد نظر آماده نمود.

۵- در مرحله ۱۴ از آزمایش، هنگام متراکم کردن چندین نمونه برای تعریف کامل منحنی تراکم، استفاده از خاک جدید در هر مرتبه تکرار آزمایش نیز مهم است. اگر یک نمونه متراکم خرد شده، دوباره هیدراته و برای بار دوم متراکم شود،  $\gamma_d$  کمی بالا می رود.

۶- در این بخش، حجم قالب تراکم، ۹۴۳/۹ سانتی متر مکعب ( $\frac{1}{3}$  فوت مکعب) و تعداد ضربات ۲۵ در نظر گرفته شد. این مقادیر معمولاً برای خاک های ریزدانه ای که از الک شماره ۴ می گذرد، استفاده می شود. با این حال، ASTM و

۱. Relative Compaction (RC)

۲. Structure

چهار روش مختلف برای هر آزمایش پیشنهاد داده‌اند که اندازهٔ قالب، تعداد ضربات در هر لایه و اندازهٔ حداکثر دانه‌ها در هر کدام تغییر می‌کند. خلاصهٔ این روش‌ها در جدول‌های ۳-۱۰ و ۴-۱۰ آورده شده است.

جدول ۳-۱۰: خلاصه مشخصات آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد با روش‌های مختلف برحسب واحدهای انگلیسی

D	روش C	روش B	روش A	توضیحات
۱	۱	۱	۱	حجم قالب ( $ft^3$ )
۱۲/۳۳	۳۰	۱۲/۳۳	۳۰	
۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	ارتفاع قالب (in.)
۶	۴	۶	۴	قطر قالب (in.)
۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	وزن چکش (lb.)
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	ارتفاع سقوط چکش (in.)
۳	۳	۳	۳	تعداد لایه‌های خاک
۵۶	۲۵	۵۶	۲۵	تعداد ضربات در هر لایه
۳/۴ اینج	۳/۴ اینج	شماره ۴	شماره ۴	آزمایش روی خاک‌های عبوری از الک

جدول ۴-۱۰: خلاصه مشخصات آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد با روش‌های مختلف برحسب واحدهای متريک<sup>۱</sup>

D	روش C	روش B	روش A	توضیحات
۲۱۲۴/۳	۹۴۳/۹	۲۱۲۴/۳	۹۴۳/۹	حجم قالب ( $cm^3$ )
۱۱/۶	۱۱/۶	۱۱/۶	۱۱/۶	ارتفاع قالب (cm)
۱۵/۲	۱۰/۲	۱۵/۲	۱۰/۲	قطر قالب (cm)
۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	وزن چکش (kg)
۳۰/۵	۳۰/۵	۳۰/۵	۳۰/۵	ارتفاع سقوط چکش (cm)
۳	۳	۳	۳	تعداد لایه‌های خاک
۵۶	۲۵	۵۶	۲۵	تعداد ضربات در هر لایه
۳/۴ اينج	۳/۴ اينج	شماره ۴	شماره ۴	آزمایش روی خاک‌های عبوری از الک

<sup>۱</sup>. در سیستم متريک، واحد طول، متر و واحد جرم، گرم است؛ اما در اين فصل به دليل کارايی بهتر، از پيشوندهای اين واحد (سانتي و كيلو) برای اندازه‌گيری طول و جرم استفاده شده است.

**(۲-۱۰) بخش دوم: آزمایش تراکم (پروکتور) اصلاح شده (AASHTO T180, ASTM D1557)**

**۱-۲-۱۰) مقدمه و تئوری آزمایش**

در بخش قبل توضیح داده شد که افزایش انرژی تراکم رابطه مستقیمی با افزایش وزن مخصوص خشک حداقل خواهد داشت. آزمایش تراکم (پروکتور) اصلاح شده یک روش استاندارد برای تراکم خاک با انرژی بیشتر است. در این آزمایش انرژی تراکم برابر است با:

$$56250 \cdot \frac{ft \cdot lb}{ft^3} = 2694 \frac{kJ}{m^3} \quad (۸-۱۰)$$

**۲-۲-۱۰) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش**

به جز چکش، تمامی وسایل مورد نیاز برای این آزمایش، همانند بخش قبل است. چکش مورد نیاز برای این آزمایش دارای وزنی معادل با ۱۰ پوند (۴/۵ کیلوگرم) و ارتفاع سقوط ۱۸ اینچ (۴۵/۷ سانتی‌متر) است. جهت مقایسه، تصاویر چکش آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده در شکل ۲۲-۱۰ آورده شده است.



شکل ۲۲-۱۰: چکش‌های آزمایش تراکم: آزمایش پروکتور استاندارد (شکل سمت راست) و آزمایش پروکتور اصلاح شده (شکل سمت چپ)

**۳-۲-۱۰) روش انجام آزمایش**

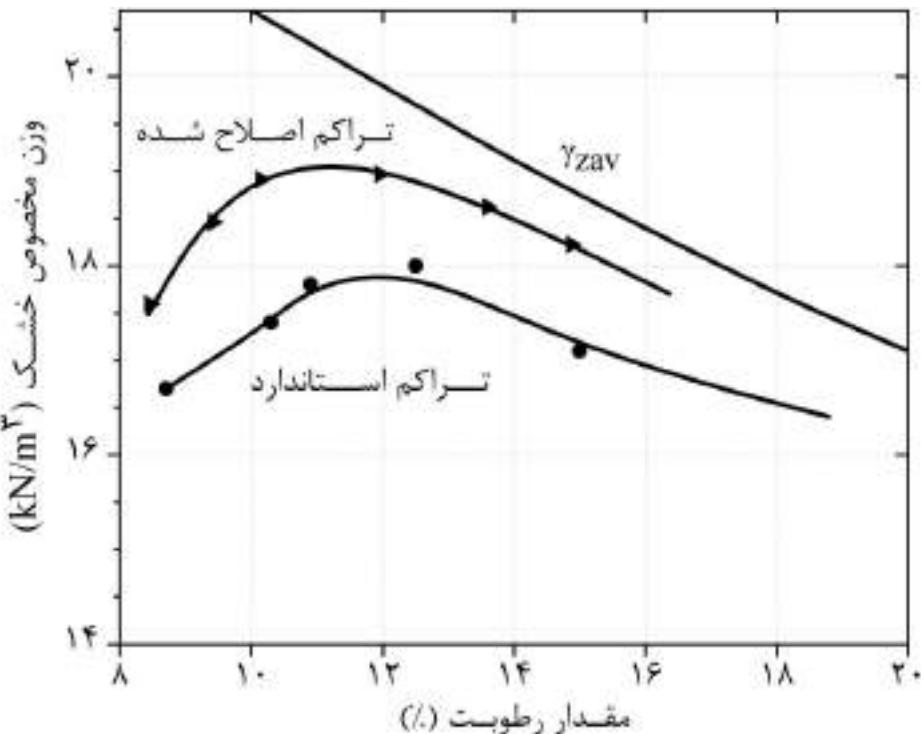
به جز مرحله ۶، تمامی مراحل این آزمایش بر اساس آزمایش بخش قبل، عیناً تکرار می‌شود.  
۶- در این مرحله، خاک باید در ۵ لایه مساوی ریخته و هر بار توسط ۲۵ ضربه چکش ۱۰ پوندی (۴/۵ کیلوگرمی) متراکم شود.

**۴-۲-۱۰) محاسبات**

تمامی مراحل بخش قبل، عیناً تکرار می‌شود.

## ۵-۲-۱۰) نکات کلی

- ۱- نتایج آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد از بخش قبل و نتایج مربوط به آزمایش تراکم اصلاح شده از این بخش، در شکل ۲۳-۱۰ ارائه شده است. از نمودار حاصل می‌توان دریافت: «با افزایش انرژی تراکم، می‌توان در رطوبت کمتر، به مقدار وزن مخصوص خشک بیشتر دست یافت.»



شکل ۲۳-۱۰: مقایسه نتایج آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد و اصلاح شده

۲- همانند آزمایش تراکم استاندارد، در ASTM D1557 نیز توصیه می‌شود زمانی که خاک خشک با آب ترکیب می‌شود، برای رسیدن به رطوبت مورد نظر، مخلوط باید حداقل ۱۶ ساعت قبل از تراکم، در محیط دربسته (داخل پلاستیک) بماند تا هیدراته شود. هیدراتاسیون کامل مهم است و زمان هیدراتاسیون ناکافی ممکن است منجر به نتایج اشتباه و منحنی تراکم ضعیف شود؛ بنابراین باید نمونه‌های خاک را قبل از انجام عملیات تراکم، در رطوبت مورد نظر آماده نمود.

۳- مشابه آزمایش تراکم استاندارد، چهار روش مختلف توسط ASTM و AASHTO برای آزمایش تراکم اصلاح شده هم ارائه شده است که خلاصه آن‌ها در جداول ۲۳-۱۰ و ۲۲-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰-۵: خلاصه مشخصات آزمایش تراکم (پروکتور) اصلاح شده با روش‌های مختلف بر حسب واحدهای انگلیسی

توضیحات	روش A	روش B	روش C	روش D
حجم قالب ( $ft^3$ )	۱	۱	۳۰	۱۳/۳۳
ارتفاع قالب (in.)	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
قطر قالب (in.)	۴	۶	۴	۶
وزن چکش (lb.)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
ارتفاع سقوط چکش (in.)	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
تعداد لایه‌های خاک	۵	۵	۵	۵
تعداد ضربات در هر لایه	۲۵	۵۶	۲۵	۲۵
آزمایش روی خاک‌های عبوری از الک	شماره ۴	شماره ۴	۳/۴ ایج	۴ ایج

جدول ۱۰-۶: خلاصه مشخصات آزمایش تراکم (پروکتور) اصلاح شده با روش‌های مختلف بر حسب واحدهای متريک

D روش	C روش	B روش	A روش	توضیحات
۲۱۲۴/۳	۹۴۳/۹	۲۱۲۴/۳	۹۴۳/۹	حجم قالب ( $cm^3$ )
۱۱/۶	۱۱/۶	۱۱/۶	۱۱/۶	ارتفاع قالب (cm)
۱۵/۲	۱۰/۲	۱۵/۲	۱۰/۲	قطر قالب (cm)
۴/۵	۴/۵	۴/۵	۴/۵	وزن چکش (kg)
۴۵/۷	۴۵/۷	۴۵/۷	۴۵/۷	ارتفاع سقوط چکش (cm)
۵	۵	۵	۵	تعداد لایه‌های خاک
۵۶	۲۵	۵۶	۲۵	تعداد ضربات در هر لایه
۳/۴ اینچ	۳/۴ اینچ	شماره ۴	شماره ۴	آزمایش روی خاک‌های عبوری از الک

## فصل یازدهم

آزمایش تعیین دانسیته نسبی خاک‌های دانه‌ای (ASTM D4254)  
(وزن مخصوص خشک و نسبت تخلخل ماکسیمم و مینیمم)

### ۱-۱۱) مقدمه و تئوری آزمایش

در مورد خاک‌های دانه‌ای غیرچسبنده مانند ماسه‌ها و شن‌ها، نسبت تخلخل خاک نشان‌دهنده میزان تراکم آن در محل است. بر همین اساس، مهندسین ژئوتکنیک مفهوم دانسیته نسبی<sup>۱</sup> خاک‌های دانه‌ای ( $D_r$ ) را برای تعیین میزان تراکم آن‌ها تعریف کرده‌اند. دانسیته نسبی با رابطه زیر ارائه می‌شود و مقدار آن را به درصد بیان می‌کنند:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (۱۱-۱)$$

$e_{max}$ : نسبت تخلخل حداکثر خاک (در سست‌ترین حالت)

$e_{min}$ : نسبت تخلخل حداقل خاک (در متراکم‌ترین حالت)

$e$ : نسبت تخلخل طبیعی خاک

دامنه تغییرات  $D_r$  از مقدار صفر برای خاک دانه‌ای بسیار سست تا مقدار ۱۰۰ برای همان خاک در حالت بسیار متراکم است. علماً به دلیل مشکل بودن تعیین نسبت تخلخل خاک در محل، از رابطه زیر برای تعیین دانسیته نسبی استفاده می‌کنند:

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d,min}}{\gamma_{d,max} - \gamma_{d,min}} \times \frac{\gamma_{d,max}}{\gamma_d} \quad (۲-۱۱)$$

$\gamma_{d,max}$ : وزن مخصوص خشک خاک در متراکم‌ترین حالت (معادل  $e_{min}$ )

$\gamma_{d,min}$ : وزن مخصوص خشک خاک در سست‌ترین حالت (معادل  $e_{max}$ )

$\gamma_d$ : وزن مخصوص خاک در محل (معادل  $e$ )

### ۲-۱۱) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- قالب تراکم استاندارد (شکل ۱-۱۱)

۲- کولیس (شکل ۲-۱۱)

۳- ترازو با دقیق ۰/۰۱ گرم (شکل ۳-۱۱)

۴- قیف (شکل ۴-۱۱)

۵- سینی (شکل ۵-۱۱)

۶- لبه‌صاف کن یا خط‌کش فلزی (شکل ۶-۱۱)

۷- تشت پلاستیکی (شکل ۷-۱۱)

۸- دستگاه ارتعاش مکانیکی (شکل ۸-۱۱)

۹- وزنه (شکل ۹-۱۱)

۱۰- ظرف فلزی (شکل ۱۰-۱۱)

۱۱- گرم‌کن (شکل ۱۱-۱۱)

۱۲- بطری پلاستیکی همراه با آب (شکل ۱۲-۱۱)

۱. Relative Density



شکل ۱۱-۲: کولیس



شکل ۱۱-۱: قالب تراکم استاندارد



شکل ۱۱-۴: قیف



شکل ۱۱-۳: ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم



شکل ۱۱-۶: لبه‌صف کن (خط‌کش فلزی)



شکل ۱۱-۵: سینی



شکل ۱۱-۸: دستگاه ارتعاش مکانیکی



شکل ۱۱-۷: تشت پلاستیکی



شکل ۱۱-۱۰: ظرف فلزی



شکل ۱۱-۹: وزنه



شکل ۱۱-۱۲: بطری پلاستیکی



شکل ۱۱-۱۱: گرم کن

### ۱۱-۳) روش انجام آزمایش

- ۱- مقداری خاک دانه‌ای خشک (مانند ماسه) به عنوان نمونه آزمایش از محل تهیه می‌کنیم.
- ۲- قالب تراکم را (بدون حلقه اضافی بالایی) به علاوه صفحه کف در حالت خالی وزن و جرم آن را یادداشت می‌کنیم ( $M_1$ ). همچنین با استفاده از کولیس ارتفاع و قطر این قالب را اندازه‌گیری می‌کنیم.
- ۳- قالب را داخل سینی می‌گذاریم. ماسه را از طریق قیف با فاصله نزدیک نسبت به کف قالب تراکم و با حالت دایره‌ای به آرامی و بدون هیچ لرزشی، در قالب ریخته تا داخل آن کاملاً پر شده و مقداری از ماسه از لبه قالب بالاتر باشد. هنگام ریختن خاک روی قالب باید توجه کرد که همیشه فاصله انتهای لوله قیف تا کف قالب ماسه ریخته شده حدود

۲/۵ سانتی‌متر باشد (شکل ۱۳-۱۱). مقدار اضافی خاک را با لبه‌صفاف کن (خطکش فلزی) بدون ایجاد ارتعاش و لرزش، بر می‌داریم تا سطح خاک صاف و با لبه قالب همتراز شود (شکل ۱۴-۱۱).



شکل ۱۳-۱۱: ریختن ماسه داخل قالب از طریق قیف



شکل ۱۴-۱۱: صاف کردن سطح ماسه با لبه‌صفاف کن (خطکش فلزی)

۴- اطراف قالب و صفحه کف را به دقت تمیز می کنیم تا ماسه ای روی آن ها باقی نماند (شکل ۱۵-۱۱).



شکل ۱۵-۱۱: ماسه به همراه قالب پس از تمیز کردن اطراف قالب و صفحه کف

۵- قالب (همراه صفحه کف) و خاک داخل آن را به دقت وزن و جرم آن را یادداشت می کنیم ( $M_2$ ).

۶- مراحل ۱ تا ۵ را دست کم سه بار، تکرار می کنیم.

۷- در مرحله بعدی آزمایش، کل خاک موجود را داخل تشت پلاستیکی می ریزیم.

۸- به تشت پلاستیکی آب اضافه می کنیم؛ تا جایی که خاک کاملاً غرقاب شده و یک لایه آب آزاد بالای خاک باقی بماند

(شکل ۱۶-۱۱).



شکل ۱۶-۱۱: غرقاب کردن خاک در آب داخل تشت پلاستیکی

۹- قالب (همراه صفحه کف و حلقه بالایی) را داخل سینی می‌گذاریم و مجموعه را روی صفحه دستگاه ارتعاش مکانیکی قرار می‌دهیم (شکل ۱۷-۱۱).



شکل ۱۷-۱۱: قراردادن قالب و سینی زیرین روی صفحه دستگاه ارتعاش مکانیکی

۱۰- خاک اشباع را در پنج لایه داخل قالب می‌ریزیم. بعد از ریختن هر لایه، ابتدا قالب به مدت ۵ تا ۸ دقیقه تحت ارتعاش قرار می‌گیرد. سپس وزنه (حداقل وزن آن ۱۲ کیلوگرم یا در حدود ۲۵ پوند باشد) را روی سطح خاک قرار می‌دهیم و مجدداً به مدت ۵ تا ۸ دقیقه تحت ارتعاش قرار می‌دهیم.

تذکر ۱: قالب در طی ۵ تا ۸ دقیقه روی دستگاه یاد شده، با فرکانس ۲۶۰۰ دور در دقیقه و دامنه ۰/۲۵ اینچ (۰/۶۳۵ سانتی‌متر)، تحت ارتعاش قرار می‌گیرد.

تذکر ۲: در بسیاری از موارد، کل ۵ لایه را یکجا داخل قالب ریخته (شکل ۱۸-۱۱) و کل خاک را یک بار بدون سربار (شکل ۱۹-۱۱) و بار دیگر با سربار (وزنه)، (شکل ۱۱-۲۰) هر کدام به مدت ۵ تا ۸ دقیقه تحت ارتعاش قرار می‌دهیم. در این صورت حین ارتعاش و پس از نشست نیاز است در زمان‌های مختلف به قالب خاک اضافه شود (شکل ۱۱-۲۱).

تذکر ۳: در برخی موارد به جای استفاده از دستگاه ارتعاش مکانیکی، با ۲۵ ضربه یک چکش پلاستیکی که به طور یکنواخت در اطراف قالب نواخته می‌شود، می‌توان نمونه خاک داخل قالب را متراکم کرد. با این وجود، استفاده از دستگاه ارتعاش مکانیکی مرسوم‌تر است.



شکل ۱۸-۱۱: قالب پُرشده از خاک اشباع



شکل ۱۹-۱۱: ارتعاش قالب روی میز ارتعاش مکانیکی بدون سربار



شکل ۲۰-۱۱: ارتعاش قالب روی میز ارتعاش مکانیکی با سربار



شکل ۲۱-۱۱: اضافه کردن خاک به قالب، حین ارتعاش روی میز ارتعاش مکانیکی

۱۱- سربار را از روی خاک داخل قالب برمی‌داریم (شکل ۱۱-۲۲).



شکل ۲۲-۱۱: نمونه خاک پس از ارتعاش

۱۲- پس از متراکم کردن خاک، باید مقداری از آن از لبه قالب بالاتر بماند. به کمک لبه‌صفافکن (خطکش فلزی) مقدار اضافی را برمی‌داریم و سطح خاک را صاف می‌کنیم (شکل ۱۱-۲۳). سپس خاک اطراف قالب را با آب تمیز می‌کنیم.



شکل ۲۳-۱۱: صاف کردن سطح خاک با استفاده از لبه صاف کن

۱۳- جرم ظرف فلزی را اندازه گیری می کنیم ( $M_۳$ ).

۱۴- خاک متراکم مرحله ۱۲ را با استفاده از آب از داخل قالب به داخل ظرف فلزی منتقل می کنیم (شکل ۲۴-۱۱).



شکل ۲۴-۱۱: انتقال خاک متراکم شده به ظرف فلزی

۱۵- خاک را داخل گرم کن قرار داده و پس از ۲۴ ساعت، جرم خاک را همراه ظرف اندازه می گیریم ( $M_۴$ ).

۱۶- مراحل ۷ تا ۱۵ را نیز دست کم سه بار تکرار می کنیم.

#### ۱۱-۴) محاسبات

نمونه‌ای از محاسبه‌های مربوط به آزمایش تعیین دانسیته نسبی خاک‌های دانه‌ای در جدول ۱-۱۱ ارائه شده است. بر اساس این جدول داریم:

۱- وزن مخصوص خشک دست کم برای هر آزمایش برابر است با (ردیف ۴ جدول):

$$\gamma_{d,min} = \frac{\text{وزن خاک سست}}{\text{حجم قالب}} = \frac{(M_2 - M_1)g}{V} = 10/39(M_2 - M_1) kN/m^3 \quad (۳-۱۱)$$

g: شتاب گرانش (مقدار آن برابر  $9.81 m/s^2$  در نظر گرفته شده است)

۲- وزن مخصوص خشک حداقل برای هر آزمایش برابر است با (ردیف ۵ جدول):

$$\gamma_{d,max} = \frac{\text{وزن خشک خاک متراکم}}{\text{حجم قالب}} = \frac{(M_2 - M_1)g}{V} = 10/39(M_2 - M_1) kN/m^3 \quad (۴-۱۱)$$

۳- با داشتن مقدار چگالی دانه‌های جامد خاک ( $G_s$ ) یا با تخمین معقول آن<sup>۱</sup>، نسبت تخلخل حداقل خاک برابر است با:

$$e_{max} = \frac{G_s \times \gamma_w}{\gamma_{d,min}} - 1 \quad (۵-۱۱)$$

(توجه شود که مقدار  $\gamma_w$  برابر با  $9.81 (kN/m^3)$  و با توجه به اینکه خاک دانه‌ای است، مقدار  $G_s$  در این آزمایش برابر با  $2/65$  در نظر گرفته شده است).

۴- با داشتن مقدار چگالی دانه‌های جامد خاک ( $G_s$ ) یا با تخمین معقول آن، نسبت تخلخل حداقل خاک برابر است با:

$$e_{min} = \frac{G_s \times \gamma_w}{\gamma_{d,max}} - 1 \quad (۶-۱۱)$$

۵- وزن مخصوص خشک طبیعی خاک در محل نیز به روش‌های ذکرشده در فصل دوازدهم (دانسیته در محل) قابل تعیین است.

۶- دانسیته نسبی خاک با استفاده از فرمول‌های ۱-۱۱ یا ۲-۱۱ محاسبه می‌گردد.

<sup>۱</sup>: برای تخمین معقول مقدار  $G_s$ ، به جدول ۱-۳ از فصل سوم رجوع کنید.

جدول ۱۱-۱: آزمایش تعیین دانسیته نسبی خاک‌های دانه‌ای

نوع خاک: .....  
 شماره نمونه: .....  
 محل نمونه‌گیری: .....  
 وزن مخصوص خشک خاک در محل:  $\gamma_d = 16/98 \text{ kN/m}^3$   
 تعداد لایه‌ها: ۵  
 حجم قالب:  $943/9 \text{ cm}^3$   
 تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....  
 شخص نمونه‌گیری: .....

			شماره آزمایش
۳	۲	۱	
۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۶۹	۱- جرم قالب، $M_1(\text{kg})$
۶/۲۶	۶/۲۵	۶/۲۵	۲- جرم قالب + خاک سست، $M_2(\text{kg})$
۶/۴۴	۶/۴۰	۶/۴۵	۳- جرم قالب + خاک متراکم، $M_3(\text{kg})$
۱۶/۳۱	۱۶/۲۰	۱۶/۲۰	۴- وزن مخصوص خشک حداقل، $\gamma_{d,min} = 10/39 (M_2 - M_1) (\text{kN/m}^3)$
۱۸/۱۸	۱۷/۷۷	۱۸/۲۹	۵- وزن مخصوص خشک حداکثر، $\gamma_{d,max} = 10/39 (M_3 - M_1) (\text{kN/m}^3)$
۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۶۰	۶- نسبت تخلخل حداکثر، ۱ $e_{max} = \frac{G_s \times \gamma_w}{\gamma_{d,min}} - 1$
۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۴۲	۷- نسبت تخلخل حداقل، ۱ $e_{min} = \frac{G_s \times \gamma_w}{\gamma_{d,max}} - 1$

میانگین وزن مخصوص خشک حداقل: ۱۶/۲۴

میانگین وزن مخصوص خشک حداکثر: ۱۸/۰۸

میانگین نسبت تخلخل حداکثر: ۰/۶۰

میانگین نسبت تخلخل حداقل: ۰/۴۴

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d,min}}{\gamma_{d,max} - \gamma_{d,min}} \times \frac{\gamma_{d,max}}{\gamma_d} = \frac{16/98 - 16/24}{18/08 - 16/24} \times \frac{18/08}{16/98} = 0/43 = 43\%$$

### ۱۱-۵) نکات کلی

- اصطلاح دانسیته یا تراکم نسبی در مورد خاک‌های چسبنده مفهوم مشخصی ندارد و برای این‌گونه خاک‌ها معمولاً از اصطلاحات و تعابیر نرم، متوسط، سفت و سخت استفاده می‌شود.
- معمولاً مقدار  $e_{max}$  اکثر خاک‌های دانه‌ای بین ۰/۷ تا ۱/۲ و مقدار  $e_{min}$  این خاک‌ها بین ۰/۰ تا ۰/۷ است.
- قیفی که برای ریختن ماسه داخل قالب استفاده می‌شود دارای لوله‌ای به قطر  $\frac{1}{2}$  اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) بوده و ارتفاع متوسط ماسه که از این لوله داخل قالب می‌ریزد باید در حدود یک اینچ (۲۵/۴ میلی‌متر) باشد.
- کیفیت خاک با توجه به دانسیته نسبی آن در جدول زیر آمده است:

جدول ۱۱-۲: تعریف کیفی خاک‌های دانه‌ای بر اساس دانسیته نسبی آن‌ها

کیفیت خاک	$D_r(\%)$
خیلی سست	۰-۱۵
سست	۱۵-۵۰
متوسط	۵۰-۷۰
متراکم	۷۰-۸۵
خیلی متراکم	۸۵-۱۰۰

## فصل دوازدهم

### آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل

**(ASTM D1556-<sup>۱</sup>) بخش اول: آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل (مخروط ماسه)**  
**(AASHTO T191<sup>۲</sup>)**

**۱-۱-۱) مقدمه و تئوری آزمایش**

طی عملیات تراکم خاک در محل، لازم است گاهی اوقات وزن مخصوص خشک خاک کنترل و با مقدار تعیین شده توسط مشاور مقایسه شود. روش های مختلفی برای تعیین وزن مخصوص خاک در محل (صحراء) وجود دارد؛ از جمله روش مخروط ماسه<sup>۳</sup>، روش بالون لاستیکی<sup>۴</sup> و استفاده از روش دانسیته هسته ای<sup>۵</sup>. ساده ترین و متداول ترین روش برای این منظور، استفاده از آزمایش مخروط ماسه است که در این فصل توضیح داده خواهد شد.

در این روش، در محل مورد نظر گودالی به صورت دستی حفر و مصالح حفاری شده را خارج می کنیم. سپس گودال را با ماسه کالیبره شده پر می کنیم تا از این طریق حجم گودال را اندازه گیری کنیم. وزن مخصوص مرطوب خاک محل، از تقسیم وزن مصالح خارج شده از گودال به حجم گودال به دست می آید. همچنین درصد رطوبت مصالح خارج شده از گودال نیز محاسبه و با استفاده از آن و وزن مخصوص مرطوب، وزن مخصوص خشک خاک محل محاسبه می شود.

**۱-۱-۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش**

۱- مخروط ماسه که مرکب از بطری شیشه ای یا پلاستیکی به حجم یک گالن ( $3860\text{ cm}^3 \approx$ ) و یک مخروط فلزی متصل به آن است. (شکل ۱-۱۲)

۲- سینی با سوراخ استاندارد (شکل ۲-۱۲)

۳- وسایل حفر و کندن یک چال کوچک در محل (صحراء) (شکل ۳-۱۲). این وسایل شامل چکش<sup>۶</sup>، کیسه پلاستیکی جهت جمع آوری نمونه ها به منظور تعیین رطوبتشان در آزمایشگاه، دما سنج جیبی<sup>۷</sup> جهت چک کردن دمای محل و آزمایشگاه، برس جهت تمیز کردن الک خاک های ریزدانه، اسکنه (قلم درز)<sup>۸</sup> جهت حفر نمونه های خاک و همچنین فاشق است.

۴- ترازو (شکل ۴-۱۲)

۵- ماسه استاندارد مانند ماسه اتاوا  $20-30$

۶- قالب تراکم (پروکتور) بدون حلقه (شکل ۵-۱۲)

۷- لبه صاف کن فلزی (شکل ۶-۱۲)

۸- ظرف فلزی بزرگ همراه درب (شکل ۷-۱۲)

۹- گرم کن (شکل ۸-۱۲)

۱۰- سینی (شکل ۹-۱۲)

۱. Sand Cone

۲. Rubber Balloon Method

۳. Nuclear Density Method

۴. Rubber Mallet

۵. Pocket Dial Thermometer,

$25^\circ - 125^\circ\text{F}$

۶. Chisel



شکل ۱۲-۲: سینی با سوراخ استاندارد



شکل ۱۲-۱: مخروط ماسه



شکل ۱۲-۳: وسایل حفر و کندن یک چال کوچک در محل (صحراء)



شکل ۱۲-۵: قالب تراکم (پروکتور) بدون حلقه



شکل ۱۲-۴: ترازو



شکل ۱۲-۷: ظرف فلزی بزرگ همراه درب

شکل ۱۲-۸: لبه صاف کن (خط کش فلزی)



شکل ۱۲-۹: سینی



شکل ۱۲-۱۰: گرم کن

### ۳-۱-۱۲) روش انجام آزمایش کار در آزمایشگاه

پیش از هر چیز لازم است تا در آزمایشگاه، مasse اتاوا (هر ماسه‌ای که به عنوان مبنای انتخاب کردہ‌ایم) و مخروط ماسه را کالیبره کنیم.

#### کالیبره کردن ماسه اتاوا (مبنای)

۱- در این مرحله، ابتدا درون بطری مخروط ماسه را از ماسه اتاوا (مبنای) پر می‌کنیم (شکل ۱۰-۱۲).



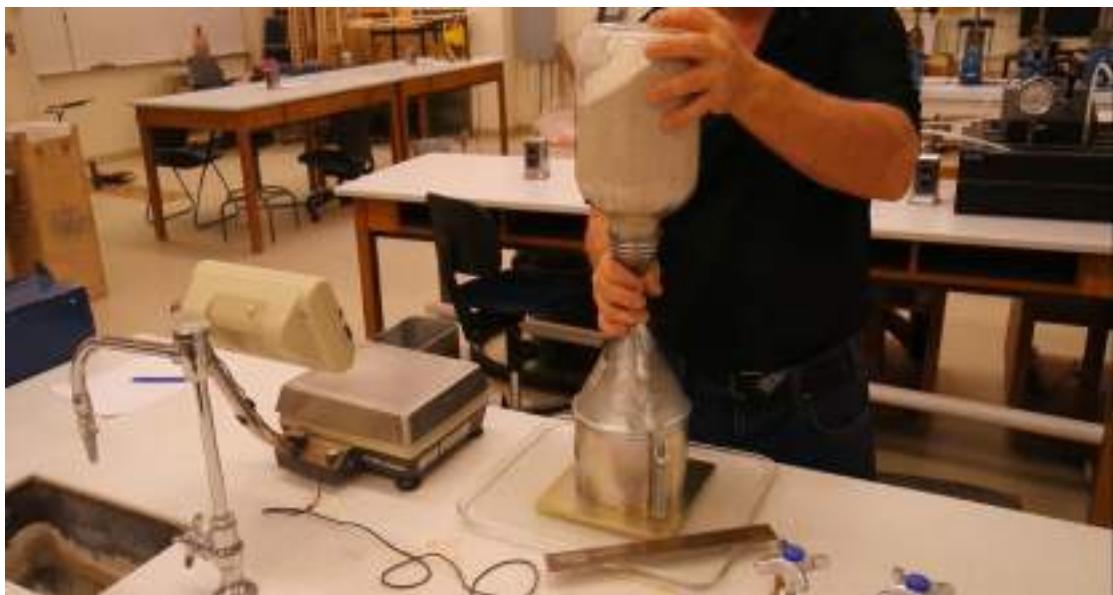
شکل ۱۰-۱۲: پر کردن بطری مخروط ماسه از ماسه اتاوا (مبنا)

۲- همانند شکل ۱۱-۱۲، جرم قالب تراکم (بدون درب آن) را پیش از آنکه خاکی به آن اضافه شود، اندازه می‌گیریم و یادداشت می‌کنیم (M.).



شکل ۱۱-۱۲: اندازه‌گیری جرم قالب تراکم بدون خاک توسط ترازو

۳- قالب را درون سینی می‌گذاریم و مخروط ماسه را روی قالب قرار می‌دهیم (شکل ۱۲-۱۲).



شکل ۱۲-۱۲: قرار دادن مخروط ماسه روی قالب تراکم

۴- شیر مخروط ماسه را باز می‌کنیم تا قالب پر شود (شکل ۱۳-۱۲). تا حد امکان بهتر است ماسه با همان شرایطی (نحوه انتقال، ارتفاع ریخته، ...) که قرار است در محل به داخل گودال ریخته شود، در آزمایشگاه به داخل قالب تراکم ریخته شود. از ارتعاش و هر نوع متراکم شدن ماسه‌ای که به داخل قالب می‌ریزد، باید اجتناب شود. در این صورت اطمینان حاصل می‌کنیم که وزن مخصوص ماسه ریخته شده در قالب تراکم و ماسه ریخته شده در گودال، تقریباً برابر است.



شکل ۱۳-۱۲: باز کردن شیر مخروط ماسه و پر کردن قالب تراکم

۵- وقتی قالب کاملاً پر شد، شیر مخروط ماسه را می‌بندیم و آن را از روی قالب بر می‌داریم (شکل ۱۴-۱۲).



شکل ۱۴-۱۲: باز کردن شیر مخروط ماسه و پر کردن قالب تراکم

۶- مقدار اضافی ماسه را از لبه قالب با لبه صاف کن فلزی برداشته و اطراف قالب را تمیز می‌کنیم (شکل ۱۵-۱۲). سپس جرم ماسه و قالب را اندازه می‌گیریم ( $M_1$ ). اکنون جرم مasse درون قالب را از تفاضل جرم‌های  $M_1$  و به دست می‌آوریم ( $M_2$ ).



شکل ۱۵-۱۲: صاف کردن سطح ماسه و تمیز کردن اطراف قالب

### کالیبره کردن مخروط ماسه

۷- اکنون باید جرم ماسه‌ای را که برای پر کردن مخروط لازم است، تعیین کنیم. برای تعیین آن، بطری یک گالنی را باز دیگر از مasse اتاوا پر می‌کنیم. مطابق شکل ۱۶-۱۲، جرم بطری + مخروط + ماسه را اندازه می‌گیریم ( $M_3$ ).



شکل ۱۲-۱۶: تعیین جرم بطری به همراه مخروط و ماسه درون آن

۸- شیر مخروط متصل به بطری را می‌بندیم. سینی دستگاه مخروط ماسه را روی سینی دیگری، همان‌طور که در شکل ۱۲-۱۶ مشخص است، قرار می‌دهیم و بطری و مخروط متصل به آن را به صورت برعکس روی این سینی می‌گذاریم؛ به‌طوری‌که دهانه گشاد (قاعده) مخروط روی سوراخ وسط سینی قرار گیرد. اکنون شیر مخروط را باز می‌کنیم و اجزاء می‌دهیم ماسه از داخل بطری به تدریج، داخل مخروط حرکت کرده و آن را پر کند. وقتی مخروط از ماسه پر شد، جریان ماسه از بطری به سمت مخروط متوقف خواهد شد (شکل ۱۷-۱۲).



شکل ۱۷-۱۲: باز کردن شیر مخروط ماسه و پر شدن مخروط آن

۹- اکنون شیر مخروط را بسته و بطری و مخروط متصل به آن را از روی سینی برمی‌داریم و جرم آن را یادداشت می‌کنیم (شکل ۱۸-۱۲) ( $M_4$ ).



شکل ۱۸-۱۲: برداشتن مخروط ماسه و اندازه‌گیری جرم آن توسط ترازو

- ۱۰- جرم ظرف فلزی بزرگ (بدون درب) را اندازه می‌گیریم ( $M_5$ ).
- ۱۱- قبل از حرکت به سمت محل (کارگاه - صحراء)، بطری یک گالنی را (در حالی که مخروط به آن متصل است) از ماسه پر می‌کنیم و شیر مخروط را بسته و جرم بطری + مخروط + ماسه را تعیین می‌کنیم ( $M_6$ ).

### کار در محل (صحراء)

- ۱۲- اکنون با بطری و مخروط متصل به آن (پر از ماسه اتاوا)، سینی با سوراخ مشخص، ابزار حفر و ظرف فلزی بزرگ و درب آن (پلاستیک)، به سمت محل حرکت می‌کنیم.
- ۱۳- سینی را روی سطح زمین محل قرار می‌دهیم (شکل ۱۹-۱۲).



شکل ۱۹-۱۲: قراردادن سینی روی محل مورد نظر

۱۴- با استفاده از ابزار حفر، در وسط سوراخ سینی، چال را داخل زمین حفر می‌کنیم (شکل ۲۰-۱۲). حجم این چال از تفاوت و اختلاف حجم ماسه داخل بطری و حجم مخروط باید کمتر باشد. حجم چالی که باید حفاری شود به حداقل اندازه‌های خاک بستگی دارد. عمق خاک باید به گونه‌ای باشد که نمونه‌ای که از خاک برداشته می‌شود نماینده شرایط خاک منطقه مورد نظر باشد. در مواردی که این آزمایش برای کنترل عملیات خاکریزی انجام می‌شود، عمق چال باید در حدود ضخامت یک لایه اجرایی یا بیشتر باشد.



شکل ۲۰-۱۲: کنندن چاله بهمنظور نمونه‌گیری

۱۵- تمامی خاک کنده شده را از جال خارج کرده و در داخل ظرف فلزی بزرگ می‌ریزیم (شکل ۲۱-۱۲) و درب آن را بلا فاصله برای جلوگیری از کاهش رطوبت خاک می‌بندیم، دقیق شود سینی از جایش تکان نخورد.



شکل ۲۱-۱۲: ریختن نمونه داخل ظرف فلزی بزرگ جهت انتقال به آزمایشگاه

۱۶- بطری حاوی ماسه و مخروط متصل به آن را به صورت برعکس روی سینی در محل سوراخ آن قرار می‌دهیم. شیر مخروط را باز می‌کنیم. در این حالت، ماسه از داخل بطری به داخل مخروط و همچنین چال حفر شده در زمین سرازیر می‌شود (شکل ۲۲-۱۲). وقتی حرکت ماسه متوقف شد، شیر مخروط را بسته و بطری و مخروط را از روی سینی بر می‌داریم (شکل ۲۳-۱۲).



شکل ۲۲-۱۲: قرار دادن مخروط ماسه روی سینی مخصوص آن



شکل ۲۳-۱۲: بستن شیر مخروط ماسه و برداشتن آن

۱۷- تمام وسایل را به آزمایشگاه برمی‌گردانیم و جرم ظرف فلزی بزرگ (بدون درب) + خاک مرطوب مربوط به چال را اندازه می‌گیریم (شکل ۲۴-۱۲) ( $M_7$ ).



شکل ۲۴-۱۲: اندازه گیری جرم ظرف و خاک مرطوب

۱۸- سپس جرم بطری + مخروط + مasse باقیمانده را تعیین می‌کنیم (شکل ۲۵-۱۲) ( $M_8$ ).



شکل ۲۵-۱۲: اندازه گیری جرم مخروط ماسه همراه مasse باقیمانده درون آن

۱۹- ظرف فلزی بزرگ (بدون درب) و خاک مرطوب درون آن را داخل گرم کن گذاشته تا خشک شود و جرم خاک ثابت بماند. سپس جرم ظرف + خاک خشک شده در گرم کن را به دست می‌آوریم ( $M_9$ ).

#### ۴-۱۲) محاسبات

۱- وزن مخصوص خشک مasse اتاوا به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\gamma_{d(\text{mass})} = \frac{M_7 \times g}{V_1} \quad (1-12)$$

(mass)  $\gamma_d$ : وزن مخصوص خشک مasse اتاوا (مبنا)

$$\text{حجم قالب پروکتور} = ۹۴۳/۹ \text{ cm}^3 \quad V_1$$

تذکر: بهتر است ارتفاع و قطر (حجم) قالب قبل از انجام آزمایش با کولیس اندازه‌گیری شده و حجم به دست آمده به عنوان حجم دقیق قالب در محاسبات بالا منظور شود.

۲- جرم مasse لازم برای پر کردن مخروط به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$M_c = M_7 - M_4 \quad (2-12)$$

۳- درصد رطوبت خاک در محل به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$w(\%) = \frac{M_7 - M_9}{M_9 - M_5} \times 100 \quad (3-12)$$

۴- وزن مخصوص مرطوب خاک در محل به قرار زیر است:

$$\gamma = \frac{\text{وزن خاک مرطوب داخل چال}}{\text{حجم چال}} \quad (4-12)$$

$$\text{حجم چال} = (M_7 - M_5) \quad (5-12)$$

$$\gamma_{d(\text{mass})} = \frac{(M_6 - M_8 - M_c) \times g}{\text{حجم چال}} \quad (6-12)$$

۵- وزن مخصوص خشک خاک در محل برابر است با:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (7-12)$$

نمونه‌ای از محاسبات انجام شده در آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل (آزمایش مخروط مasse) در جدول ۱۲-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۱۲: نمونه محاسبات آزمایش تعیین وزن مخصوص صحرایی (در محل) - روش مخروط ماسه

کالیبره کردن وزن مخصوص ماسه اتاوا	
۱/۵۰۱	$M_v (kg)$ جرم ماسه داخل قالب.
۹۴۳/۹	$V_1 (cm^3)$ حجم قالب.
۱۵/۵۹	$\gamma_d (masse) (kN/m^3) = \frac{M_v \times g}{V_1} \times 10^{-3}$
کالیبره کردن مخروط	
۶/۸۸	جرم بطری + مخروط + ماسه (قبل از استفاده)، $M_v (kg)$
۶/۳۹	جرم بطری + مخروط + ماسه (بعد از استفاده)، $M_f (kg)$
۰/۴۹	جرم ماسه لازم برای پر کردن مخروط، $M_c = M_v - M_f (kg)$
نتایج به دست آمده از ادامه آزمایش در محل	
۶/۹۹	جرم بطری + مخروط + ماسه (قبل از استفاده)، $M_v (kg)$
۵/۳۳	جرم بطری + مخروط + ماسه (بعد از استفاده)، $M_f (kg)$
۰/۰۰۰۷	حجم چال، $(m^3) = \frac{(M_v - M_f - M_c) \times g}{\gamma_d (masse)} \times 10^{-3}$
۰/۳۷	جرم ظرف فلزی بزرگ (بدون درب)، $M_d (kg)$
۱/۷۸	جرم ظرف فلزی بزرگ (بدون درب) + خاک مرطوب، $M_v (kg)$
۱/۶۶	جرم ظرف فلزی بزرگ (بدون درب) + خاک خشک، $M_f (kg)$
۱/۴۱	جرم خاک مرطوب، $(M_v - M_d) (kg)$
۱۹/۷۶	وزن مخصوص خاک مرطوب در محل، $\gamma (kN/m^3) = \frac{\text{وزن خاک مرطوب داخل چال}}{\text{حجم چال}} \times 10^{-3}$
۹/۳۰	درصد رطوبت خاک در محل، $w(\%) = \frac{M_v - M_f}{M_f - M_d} \times 100$
۱۸/۰۸	وزن مخصوص خشک خاک در محل، $\gamma_d (kN/m^3) = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$

## ۱-۱۲(۵) نکات کلی

۱- همان طور که بیان شد، دست کم دو روش دیگر برای تعیین وزن مخصوص خاک در محل وجود دارد:

(الف) روش بالون (بادکنک) لاستیکی (ASTM D2167)

(ب) روش دانسیته سنج هسته ای

روش اول شبیه به روش مخروط ماسه است. در این روش نیز در خاک چند چال حفر کرده و وزن مخصوص مرطوب و درصد رطوبت خاک تعیین می شود. با این تفاوت که حجم چال در این روش با قراردادن یک بالون (بادکنک) لاستیکی در داخل چال و پر کردن آن با آب تحت فشار (به نحوی که حجم یا وزن آب وارد شده به چال قابل تعیین شدن باشد) مستقیماً اندازه گیری می شود.

روش دوم در بخش دوم این فصل عنوان خواهد شد.

۲- این آزمایش را می توان برای تعیین وزن مخصوص خاک هایی که بزرگ ترین اندازه دانه های آنها از ۳۸ میلی متر بزرگ تر نباشد استفاده کرد. همچنین اندازه حفرات طبیعی خاک نباید به اندازه های بزرگ باشد که دانه های ماسه داخل آنها نفوذ کند. خاک مورد نظر باید چسبندگی کافی داشته باشد تا بتوان در آن بدون تغییر شکل و دست خوردگی

گودالی به صورت دستی حفر کرد؛ بنابراین این روش برای خاک‌های آلی، خاک‌های اشباع یا با پلاستیسیته بالا که حین حفاری فشرده شده و تغییر شکل داده است و همچنین خاک‌های دانه‌ای سیمانته شده (که امکان حفر گودالی با دیوارهای پایدار در آن وجود ندارد)، مناسب نیست.

## ۲-۱۲) بخش دوم: آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل (دانسیته هسته‌ای) (ASTM D2922-AASHTO T310)

### ۱-۲-۱۲) مقدمه و تئوری آزمایش

آزمایش دانسیته هسته‌ای از جمله آزمایش‌های صحرایی است که در پروژه‌های بزرگ توسط بسیاری از پیمانکاران، مهندسان و بخش‌های بزرگراه برای کنترل تراکم خاک، سنگ‌دانه، بتن و آسفالت کامل و همچنین برای تعیین وزن مخصوص خشک خاک و مخلوط خاک و سنگ استفاده می‌شود. این روش را هم داخل چال، هم روی سطح زمین می‌توان انجام داد. دستگاه آزمایش دانسیته هسته‌ای، وزن خاک مرطوب در واحد حجم، همچنین وزن آب موجود در حجم واحد خاک را اندازه می‌گیرد. وزن مخصوص خشک خاک متراکم شده با کم کردن وزن آب از وزن مخصوص مرطوب خاک به دست می‌آید.

برای تعیین چگالی، دو مدل آزمایش در دسترس است: پسپراکنده<sup>۱</sup> و انتقال مستقیم<sup>۲</sup> (شکل ۲۶-۱۲). اپراتور بسته به نوع ماده و ضخامت لایه مورد آزمایش، مدل آزمایش را انتخاب می‌کند. در ادامه، هر کدام از روش‌ها به تفکیک توضیح داده خواهند شد.

### روش پسپراکنده

این روش یک روش سریع و غیر مخرب است. گیج دستگاه که دارای منبع گاما و آشکارسازها است، روی سطح ماده آزمایش قرار می‌گیرد. پرتوهای گاما وارد ماده آزمایش شده و آنهایی که از مواد پراکنده می‌شود و به آشکارسازها می‌رسد، شمرده می‌شود. این روش بیشتر برای تعیین چگالی روی لایه‌های آسفالت و بتن با ضخامت تقریباً <sup>۴</sup> اینچ استفاده می‌شود.

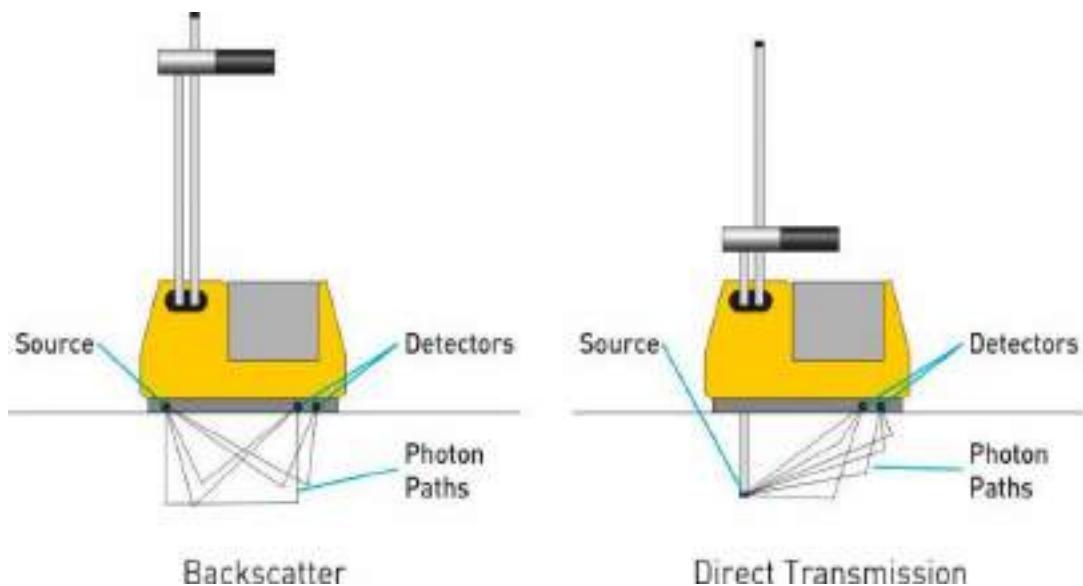
### روش انتقال مستقیم

منبع گاما با قراردادن در یک سوراخ دسترسی در یک عمق خاص داخل مادة آزمایش قرار می‌گیرد. پرتوهای گاما از طریق مواد مورد آزمایش، به آشکارسازهای واقع در گیج منتقل می‌شود. سپس چگالی متوسط بین منبع گاما و آشکارسازها پس از گذشت زمان <sup>۱۵</sup> ثانیه، یک دقیقه و یا <sup>۴</sup> دقیقه تعیین می‌شود. خطاهای ناشی از ناهمواری سطح و ترکیب شیمیایی ماده آزمایش به میزان زیادی کاهش و دقت گیج بهبود می‌یابد. انتقال مستقیم برای آزمایش بالابرهاي خاک<sup>۳</sup>، سنگ‌دانه، آسفالت و بتن تا عمق <sup>۱۲</sup> اینچ استفاده می‌شود.

<sup>1</sup>. Backscatter

<sup>2</sup>. Direct transmission

<sup>3</sup>. Lifts of Soil



شکل ۲۶-۱۲: سازوکار استفاده از گیج دانسیته هسته‌ای

به علت دارا بودن مواد رادیواکتیو، پیش از کار با این دستگاه لازم است تا مدرک اینمنی در برابر مواد رادیواکتیو کسب شود تا هنگام کار با این دستگاه، اینمنی خود و دیگران تأمین شود.

#### ۲-۲-۱۲) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- گیج دانسیته هسته‌ای<sup>۱</sup> (شکل ۲۷-۱۲): منبع گاما<sup>۲</sup> و آشکارسازها<sup>۳</sup> داخل گیج مذکور تعییه شده است. این گیج توسط کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای<sup>۴</sup> کنترل می‌شود. به منظور حفظ اینمنی، زمانی که از این گیج استفاده نمی‌شود، باید حتماً منبع گاما‌ای آن قفل شود و سپس در جعبه مخصوص خود، به صورت قفل شده، درون اتاق قفل شده قرار گیرد.
- ۲- جعبه مخصوص گیج دانسیته هسته‌ای (شکل ۲۸-۱۲)
- ۳- صفحه خراش‌دهنده<sup>۵</sup> (شکل ۲۹-۱۲)
- ۴- میله حفاری<sup>۶</sup> (شکل ۳۰-۱۲)
- ۵- چکش مخصوص به وزن ۴ پوند (شکل ۳۱-۱۲)
- ۶- بلوک استاندارد<sup>۷</sup> (شکل ۳۲-۱۲)
- ۷- ابزار استخراج<sup>۸</sup> (شکل ۳۳-۱۲)

۱. Nuclear Density Gauge  
۲. Gamma Source  
۳. Detectors

۴. Nuclear Regulatory Commission  
۵. Scraper Plate

۶. Drill Rod  
۷. Standard Block  
۸. Extractor Tool



شکل ۲۷-۱۲: گیج دانسیته هسته‌ای



شکل ۲۸-۱۲: جعبه مخصوص گیج دانسیته هسته‌ای



شکل ۳۰-۱۲: میله حفاری

شکل ۲۹-۱۲: صفحه خراش‌دهنده



شکل ۳۲-۱۲: بلوک استاندارد

شکل ۳۱-۱۲: چکش مخصوص



شکل ۳۲-۱۲: ابزار استخراج

### ۳-۲-۱۲) روش انجام آزمایش

۱- ابتدا بلوک استاندارد را روی سطح زمین قرار می‌دهیم (شکل ۳۴-۱۲). سپس گیج دستگاه را روی آن قرار می‌دهیم و با اندازه‌گیری دانسیته بلوک، پس از گذشت یک دقیقه، نتایج را ثبت می‌کنیم (شکل ۳۵-۱۲).



شکل ۳۴-۱۲: قرار دادن بلوک استاندارد روی سطح زمین



شکل ۳۵-۱۲: اندازه‌گیری دانسیته بلوک استاندارد در محل

۲- بهتر است سطح مورد نظر (سطحی که قرار است گیج دستگاه را روی آن قسمت قرار دهیم) را به کمک صفحهٔ خراش‌دهنده تراز کنیم (شکل ۳۶-۱۲).



شکل ۳۶-۱۲: تراز کردن محل مورد نظر توسط صفحهٔ خراش‌دهنده

۳- اکنون صفحهٔ خراش‌دهنده را روی سطح مورد نظر قرار می‌دهیم و میلهٔ حفاری را وارد سوراخ صفحهٔ مذکور می‌نماییم (شکل ۳۷-۱۲).



شکل ۳۷-۱۲: تراز کردن محل مورد نظر توسط صفحهٔ خراش‌دهنده

۴- با چکش، به میله حفاری مورد نظر ضربه می‌زنیم تا وارد زمین شود (شکل ۳۸-۱۲).



شکل ۳۸-۱۲: ضربه زدن به میله مذکور به منظور داخل شدن به زمین

۵- اکنون، صفحه و میله حفاری را از زمین بر می‌داریم (شکل ۳۹-۱۲).



شکل ۳۹-۱۲: برداشتن صفحه خراش‌دهنده و میله حفاری

۶- میله دستگاه را در سوراخ ایجاد شده روی زمین وارد می‌کنیم (شکل ۴۰-۱۲).



شکل ۴۰-۱۲: وارد کردن میله دستگاه به زمین

۷- دستگاه را روشن می‌کنیم و پس از گذشت یک دقیقه، نتایج را یادداشت می‌نماییم (شکل ۴۱-۱۲).



شکل ۴۱-۱۲: ثبت نتایج دستگاه پس از گذشت یک دقیقه

تذکرہ: سازوکار دستگاه به این صورت است که بخشی از امواج ساطع شده از دستگاه، پس از برخورد به مواد باز می‌گردد و سطح زیرین دستگاه را داغ می‌کند. هرچه میزان امواج بازگشته بیشتر باشد، دانسیتۀ خاک کمتر است و برعکس.

#### ۴-۲-۱۲) محاسبات

جدول ۴-۱۲: نتایج تجزیه و تحلیل آماری - آزمایش‌های دانسیتۀ هسته‌ای

روش انتقال مستقیم				دقت تک اپراتور <sup>۱</sup>	
محدودۀ قابل قبول دو نتیجه (kg/m <sup>3</sup> )	انحراف معیار (kg/m <sup>3</sup> )	میانگین (kg/m <sup>3</sup> )	نوع خاک		
۱۵/۱	۵/۴	۱۸۳۷	CL		
۱۱/۹	۴/۳	۱۹۳۷	SP		
۲۰/۵	۷/۴	۲۰۸۴	ML		
روش پس‌پراکنده				دقت چند آزمایشگاهی <sup>۲</sup>	
محدودۀ قابل قبول دو نتیجه (kg/m <sup>3</sup> )	انحراف معیار (kg/m <sup>3</sup> )	میانگین (kg/m <sup>3</sup> )	نوع خاک		
۵۴/۳	۱۹/۴	۱۹۹۶	ML		
روش انتقال مستقیم					
محدودۀ قابل قبول دو نتیجه (kg/m <sup>3</sup> )	انحراف معیار (kg/m <sup>3</sup> )	میانگین (kg/m <sup>3</sup> )	نوع خاک		
۲۹/۸	۱۰/۶	۱۸۳۷	CL		
۳۰/۶	۱۰/۹	۱۹۳۷	SP		
۳۴/۴	۱۲/۲	۲۰۸۴	ML		
روش پس‌پراکنده					
محدودۀ قابل قبول دو نتیجه (kg/m <sup>3</sup> )	انحراف معیار (kg/m <sup>3</sup> )	میانگین (kg/m <sup>3</sup> )	نوع خاک		
۱۰/۷	۳۸/۱	۱۹۹۶	ML		

#### ۴-۲-۱۲) نکات کلی

- همان‌طور که عنوان شد، درون گیج این دستگاه از ماده رادیواکتیو استفاده شده است. درنتیجه باید هنگام استفاده از این دستگاه لباس‌های مخصوصی به تن نمود. این لباس‌ها میزان مواد رادیواکتیو ساطع شده هنگام استفاده از این دستگاه را اندازه‌گیری می‌کند. اگرچه میزان مواد رادیواکتیو ساطع شده از این دستگاه‌ها در حالت استاندارد بسیار کم است و نیاز به نگرانی در این مورد نیست، اما لازم است تا جوانب احتیاط رعایت شود.
- چنانچه به هر دلیلی محفظه رادیواکتیو درون دستگاه توسط شما بشکند، کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای، شما را از کار برکنار خواهد نمود. پس لازم است هنگام استفاده از این دستگاه، نکات ایمنی رعایت شود.

<sup>1</sup>. Single Operator Precision

<sup>2</sup>. Multi-laboratory Precision

فصل سیزدهم  
آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا  
(AASHTO T236, ASTM D3080)

### (۱-۱۳) مقدمه و تئوری آزمایش

این آزمایش که توسط شخصی به نام پورتر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۶ پیشنهاد شد، متداول‌ترین روش تعیین مقاومت نسبی خاک‌ها در راهسازی است. در سال‌های بعد، این روش کامل‌تر شد تا اینکه در سال ۱۹۴۰ توسط گروه مهندسین و سپس در سال ۱۹۶۱ توسط انجمن آزمایش و مصالح آمریکا (ASTM) به عنوان یک روش استاندارد تعیین مقاومت خاک‌ها مورد قبول قرار گرفت. در حال حاضر نیز این آزمایش با وجود داشتن نقاط ضعف فراوان، همچنان متداول‌ترین روش برای ارزیابی طرفیت باربری خاک بستر روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها و همچنین تعیین طرفیت باربری مصالح سنگی است. مقدار نسبت باربری کالیفرنیا (CBR<sup>۲</sup>) در پی‌سازی برای بیان کیفیت نسبی خاک زیر پی و در راهسازی، برای انکاس مقاومت برشی خاک و تحمل آن در برابر بارهای ترافیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. به صورت دقیق‌تر، در راهسازی از عدد CBR به عنوان شاخصی برای تخمین مقاومت مصالح روسازی، اساس و زیر اساس جاده‌ها و فرودگاه‌ها استفاده می‌شود؛ البته باید به این نکته توجه داشت که این روش برای خاک‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر از ۲۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

طبق تعریف، CBR یک خاک، نسبت نیروی لازم برای فروبردن پیستونی به شکل معین و با سرعت معین و به عمق معین در خاک مورد آزمایش، به نیروی لازم برای فروبردن همان پیستون و با همان سرعت و به همان عمق در مصالح استاندارد است.

$$CBR = \frac{P_{2/5}}{(P_{2/5})_S} \times 100 \quad (1-13)$$

$P_{2/5}$  : بار یا فشار مربوط به ۲/۵ میلی‌متر (۱/۰ اینچ) نفوذ پیستون استاندارد در مصالح مورد آزمایش

$(P_{2/5})_S$  : بار یا فشار مربوط به ۲/۵ میلی‌متر (۱/۰ اینچ) نفوذ پیستون استاندارد در مصالح استاندارد

مصالح استاندارد سنگ شکسته، استانداردی است که بار و فشار لازم برای فروبردن پیستون آزمایش CBR در آن، برابر مقادیر داده‌شده در جدول ۱-۱۳ است.

جدول ۱-۱۳: فشار لازم برای نفوذ پیستون CBR در سنگ شکسته استاندارد

فشار لازم $kg/cm^2$	فشار لازم $lb/in^2$	بار لازم برای نفوذ پیستون (lb)	میزان نفوذ پیستون (mm)	میزان نفوذ پیستون (in)
۷۰	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۲/۵	۰/۱
۱۰۵	۱۵۰۰	۴۵۰۰	۵	۰/۲
۱۳۴	۱۹۰۰	۵۷۰۰	۷/۵	۰/۳
۱۶۲	۲۳۰۰	۶۹۰۰	۱۰	۰/۴
۱۸۳	۲۶۰۰	۷۸۰۰	۱۲/۵	۰/۵

این آزمایش هم روی نمونه‌های خشک، هم در حالت اشباع انجام می‌شود. آزمایش روی نمونه‌های اشباع از آن جهت حائز اهمیت است که:

- مشخص می‌شود که در اثر اشباع شدن تا چه حد از مقاومت خاک کاسته می‌شود.

- مشخص می‌شود که آیا نمونه خاک دارای قابلیت تورم است یا خیر و اگر مستعد تورم است، این مقدار تا چه اندازه است.

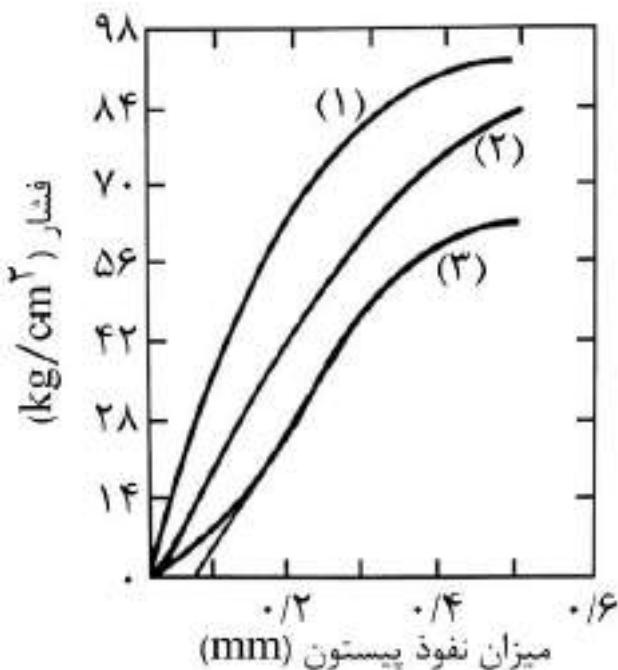
در این آزمایش، منحنی فشار بر حسب نفوذ پیستون رسم می‌شود و از روی آن، پارامترهای لازم برای محاسبه CBR خوانده می‌شود.

<sup>1</sup>. Porter

<sup>2</sup>. California Bearing Ratio

### تصحیح نتایج آزمایش CBR

گاهی ممکن است که به علت وجود نقطه عطف و یا به علت خطای ناشی از ناهموار بودن سطح نمونه خاک در محل تماس با پیستون، لازم باشد که منحنی فشار بر حسب مقدار نفوذ پیستون تصحیح شود (شکل ۱-۱۳). در این صورت، تعیین CBR خاک باید پس از تصحیح منحنی فشار - مقدار نفوذ پیستون انجام شود. نحوه تصحیح، همان‌طور که در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده است، تعیین مبدأ جدید محورهای مختصات و انتقال مبدأ به این نقطه است. منحنی (۱) در این شکل صحیح بوده و لزومی به تصحیح آن نیست؛ در حالی که منحنی‌های (۲) و (۳) باید اصلاح شود. منحنی (۲) دارای یک شکستگی کوچک در قسمت ابتدایی است که ناشی از ناهمواری سطح نمونه خاک در محل تماس با پیستون است. برای تصحیح این خطأ، باید قسمت مستقیم منحنی را ادامه داد تا محور افقی را در نقطه‌ای قطع کند. این نقطه، محل جدید مبدأ مختصات است و محاسبات باید در محورهای مختصات جدید انجام شود. منحنی (۳) دارای یک نقطه عطف است که باید تصحیح شود. نحوه تصحیح به این ترتیب است که باید روی منحنی از نقطه‌ای که دارای بیشترین شبی است خطی مماس بر منحنی رسم شود تا محور افقی را در نقطه‌ای قطع کند. این نقطه، محل جدید مبدأ مختصات است و محاسبات مربوط به تعیین CBR باید بر اساس این مختصات جدید انجام شود.



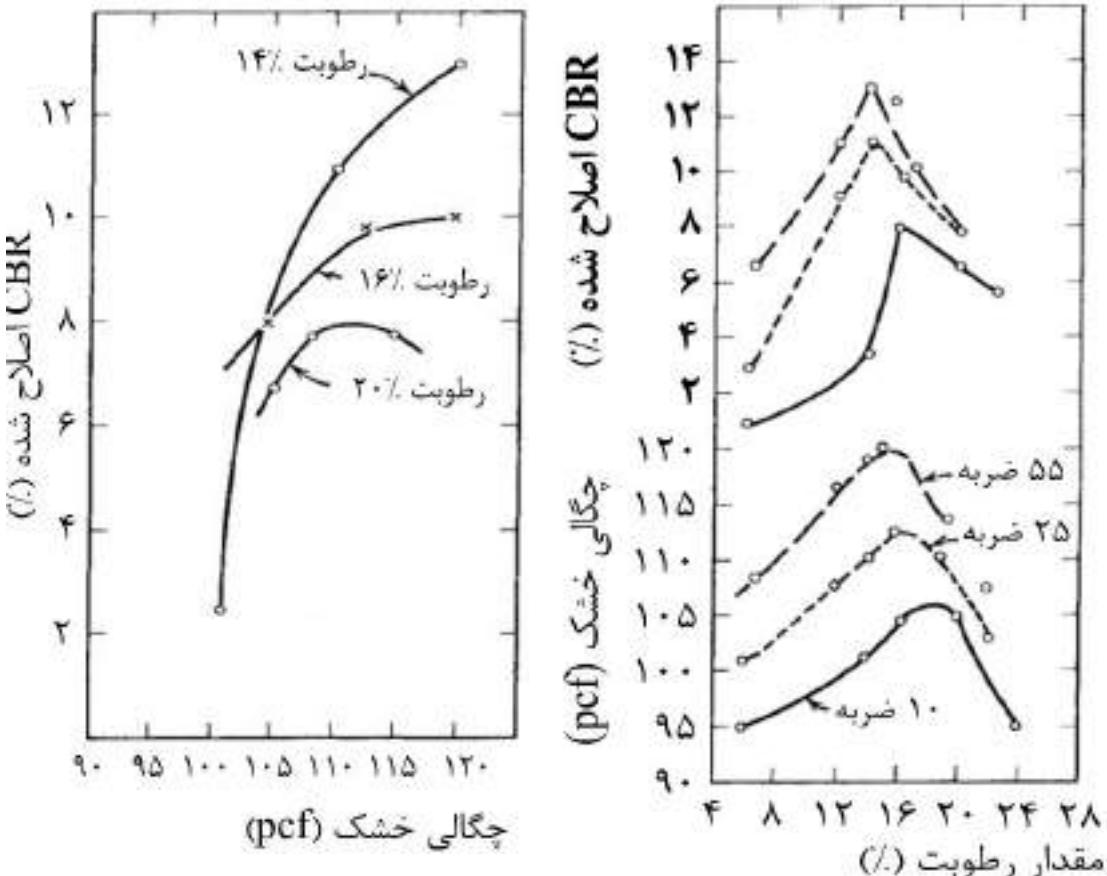
شکل ۱-۱۳: تصحیح نتایج منحنی CBR (طباطبایی ۱۳۸۹)

### عوامل مؤثر بر CBR

عدد به دست آمده از این آزمایش تابع عوامل زیر است:

- **جنس:** CBR خاک‌های درشت‌دانه از CBR خاک‌های ریز‌دانه بزرگ‌تر است.
- **میزان رطوبت:** رطوبت، تأثیر منفی بر CBR خاک‌ها (خصوص خاک‌های ریز‌دانه) دارد و با افزایش میزان رطوبت خاک از CBR آن کاسته می‌شود (شکل ۲-۱۳).
- **وزن مخصوص خاک:** هر اندازه خاکی بیشتر کوبیده و متراکم شده باشد، CBR آن بیشتر خواهد بود (شکل ۱-۲).

- نحوه انجام آزمایش: روش انجام آزمایش CBR نیز بر CBR خاک‌ها تأثیر دارد. در مورد خاک‌های درشت‌دانه که دارای قابلیت تورم چشمگیری نیست، وجود سربار در مرحله‌ای که نمونه خاک برای اشباع شدن داخل آب قرار می‌گیرد تأثیر چندانی ندارد. در حالی که وجود همین سربار در مرحله بارگذاری برای تعیین CBR فوق العاده اهمیت دارد و عدم وجود سربار باعث می‌شود که CBR به دست‌آمده کمتر از مقدار واقعی آن باشد.



شکل ۲-۱۳: منحنی‌های تراکم و نتایج CBR خاک‌های رس لای دار (یودر<sup>۱</sup> ۱۹۷۵)

### ۲-۱۳) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- قالب تراکم: با ارتفاع ۷ اینچ (۱۷/۵ سانتی‌متر) و قطر ۶ اینچ (۱۵ سانتی‌متر) و شامل حلقه بالایی و یک دیسک پایینی (شکل ۳-۱۳)
- ۲- چکش تراکم (۴/۵ کیلوگرم یا ۱۰ پوند) (شکل ۴-۱۳)
- ۳- دستگاه جابجایی سنج برای اندازه‌گیری مقدار نفوذ پیستون در خاک (با دقیق ۰/۰۰۱ اینچ) (شکل ۵-۱۳)
- ۴- وسیله اعمال فشار (هیدرولیکی یا مکانیکی) برای فروبردن پیستونی به سطح مقطع ۳ اینچ مربع (۱۹/۳۵ سانتی‌متر مربع) در خاک (شکل ۶-۱۳)
- ۵- وزنه‌های اعمال سربار<sup>۲</sup> (شکل ۷-۱۳)

<sup>1</sup>. Yoder (1975), Principles of pavement design

<sup>2</sup>. این وزنه‌ها به دو صورت O شکل (Slotted weight) و U شکل (Annular metal weight) موجود است. هر دو وزنه دارای جرمی معادل ۲/۵ کیلوگرم و قطر ۱۴۷ میلی‌متر و قطر سوراخ مرکزی ۵۳ میلی‌متر است.

- ۶- پیستون فولادی به قطر ۱/۹۵ اینچ و سطح مقطع ۳ اینچ مربع (۱۹/۳۵ سانتیمتر مربع) (شکل ۸-۱۳)
- ۷- صفحه فلزی آبکش ته قالب به قطر ۶ اینچ (۱۵ سانتیمتر) با میله مربوطه (شکل ۹-۱۳)
- ۸- کاغذ صافی ضخیم به قطر ۶ اینچ (۱۵ سانتیمتر) (شکل ۱۰-۱۳)
- ۹- الک شماره  $\frac{3}{4}$  اینچ (شکل ۱۱-۱۳) و الک شماره ۴
- ۱۰- سینی بزرگ (شکل ۱۲-۱۳)
- ۱۱- زمان سنج (کرنومتر) (شکل ۱۳-۱۳)
- ۱۲- جک هیدرولیکی یا مکانیکی برای خارج کردن نمونه خاک از قالب تراکم (شکل ۱۴-۱۳)
- ۱۳- لبه صاف کن (خط کش فلزی) (شکل ۱۵-۱۳)
- ۱۴- ترازو بدقت ۰/۰۱ گرم (شکل های ۱۶-۱۳)
- ۱۵- دیسک فلزی فاصله گذار<sup>۱</sup> (شکل ۱۷-۱۳)
- ۱۶- بطری پلاستیکی حاوی آب (شکل ۱۸-۱۳)
- ۱۷- ظرف فلزی بزرگ (شکل ۱۹-۱۳)
- ۱۸- کاردک (شکل ۲۰-۱۳)
- ۱۹- چکش (شکل ۲۱-۱۳)
- ۲۰- برس (شکل ۲۲-۱۳)
- ۲۱- گرم کن (شکل ۲۳-۱۳)
- ۲۲- ظرف های تعیین رطوبت (شکل ۲۴-۱۳)
- ۲۳- کولیس (شکل ۲۵-۱۳)
- چنانچه آزمایش برای حالت اشباع انجام شود، نیاز است تا وسایل زیر نیز برای آزمایش تهیه شود:
- ۲۴- چسب آکواریوم (شکل ۲۶-۱۳)
- ۲۵- وزن بالایی مخصوص جهت گذاشتن روی خاک پیش از قرار دادن سربارهای موجود (شکل ۲۷-۱۳)
- ۲۶- ظرف بزرگ پلاستیکی (شکل ۲۸-۱۳)

---

<sup>1</sup>. Metal spacer disc



شکل ۱۳-۴: چکش تراکم



شکل ۱۳-۳: قالب تراکم



شکل ۱۳-۵: دستگاه جابجای سنج



شکل ۱۳-۶: وسیله اعمال فشار



شکل ۱۳-۷: وزنهای اعمال سربار



شکل ۹-۱۳: صفحه فلزی آبکش ته قالب



شکل ۱۰-۱۳: پیستون فولادی

شکل ۱۱-۱۳: الک شماره  $\frac{۳}{۴}$  اینج

شکل ۱۲-۱۳: کاغذ صافی ضخیم



شکل ۱۳-۱۳: زمان سنج (کرنومتر)



شکل ۱۴-۱۳: سینی بزرگ



شکل ۱۴-۱۳: جک هیدرولیکی



شکل ۱۴-۱۶: ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم

شکل ۱۴-۱۵: لبه صاف کن



شکل ۱۴-۱۸: بطری پلاستیکی

شکل ۱۴-۱۷: دیسک فاصله‌گذار فلزی



شکل ۲۰-۱۳: کاردک



شکل ۱۹-۱۳: ظرف بزرگ فلزی



شکل ۲۲-۱۳: برس



شکل ۲۱-۱۳: چکش



شکل ۲۴-۱۳: ظرفهای تعیین رطوبت



شکل ۲۳-۱۳: گرم کن



شکل ۲۵-۱۳: کولیس دیجیتالی



شکل ۲۷-۱۳: وزنه بالایی مخصوص



شکل ۲۶-۱۳: چسب آکواریوم



شکل ۲۸-۱۳: ظرف بزرگ پلاستیکی

### ۳-۱۳) روش انجام آزمایش

۱- ابعاد قالب تراکم، شامل ارتفاع و قطر آن را توسط کولیس اندازه‌گیری می‌کنیم (شکل‌های ۲۹-۱۳ و ۳۰-۱۳).



شکل ۲۹-۱۳: اندازه‌گیری قطر قالب تراکم توسط کولیس



شکل ۳۰-۱۳: اندازه‌گیری ارتفاع قالب تراکم توسط کولیس

۲- سطح داخلی قالب را چرب و بدون حلقه بالایی جرم قالب خالی تراکم را تعیین می‌کنیم ( $M_1$ ) (شکل ۳۱-۱۳).



شکل ۳۱-۱۳: اندازه‌گیری جرم قالب تراکم

۳- پیش از هر چیز لازم است تا خاک را آماده کنیم. ابتدا مقدار مشخصی از آن را درون سینی بزرگ منتقل می‌کنیم. سپس توسط چکش، کلوخه‌های موجود در آن را می‌شکنیم (شکل ۳۲-۱۳).



شکل ۳۲-۱۳: شکستن کلوخه‌های موجود در خاک توسط چکش

۴- از خاک آماده شده در مرحله قبل، حدود ۱۳/۲۵ پوند (۶ کیلوگرم) خاک ریزتر از الک شماره  $\frac{3}{4}$  اینچ و خاک به جا مانده روی الک شماره ۴ را انتخاب می‌کنیم.

۵- خاک مرحله ۴ را با مقداری آب مخلوط می‌کنیم تا به رطوبت مورد نظر (بهینه) دست یابیم (شکل‌های ۳۳-۱۳ و ۳۴).



شکل ۳۳-۱۳: افزودن آب به خاک موجود در سینی



شکل ۳۴-۱۳: مخلوط کردن آب افزوده شده با خاک موجود در سینی

۶- قالب را روی صفحه کف (صفحه مربوط به قالب تراکم که فاقد هرگونه سوراخی است) قرار داده و دیسک فلزی فاصله‌گذار را داخل آن قرار می‌دهیم تا ارتفاع داخل قالب به ۵ اینچ برسد. روی دیسک نیز کاغذ صافی را قرار می‌دهیم (شکل ۳۵-۱۳).



شکل ۳۵-۱۳: قرار دادن دیسک در کف قالب تراکم و کاغذ صافی روی دیسک

۷- خاک را به روش های ذکر شده در استاندارد ASTM (جدول ۳-۱۳ در بخش نکات کلی) متراکم می کنیم (شکل های ۳۶-۱۳ و ۳۷-۱۳). متراکم کردن و ساخت نمونه کاملاً مشابه آزمایش تراکم است.



شکل ۳۶-۱۳: ریختن خاک داخل قالب تراکم



شکل ۳۷-۱۳: متراکم کردن خاک در داخل قالب تراکم

۸- حلقه اضافی بالای قالب را برداشته (شکل ۳۸-۱۳) و با لبه صاف کن (خط کش فلزی) سطح نمونه را صاف کرده (شکل ۱۳-۳۹) و در صورت وجود ناهمواری در سطح نمونه، آن را با دانه های خاک پر می کنیم.



شکل ۳۸-۱۳: سطح خاک پس از برداشتن حلقه بالایی قالب تراکم



شکل ۳۹-۱۳: صاف کردن سطح خاک توسط لبه صاف کن

## ۹- اطراف قالب تراکم را توسط برس تمیز می کنیم (شکل ۴۰-۱۳).



شکل ۴۰-۱۳: تمیز کردن اطراف قالب تراکم توسط برس

۱۰- در این مرحله، جرم قالب را با خاک داخل آن می سنجیم ( $M_2$ ). اکنون با توجه به مرحله ۲ می توان وزن مخصوص مرتبط خاک را تعیین کرد (۷).

۱۱- کاغذ صافی را روی صفحه سوراخ دار قرار می دهیم و سپس قالب را از صفحه کف جدا می کنیم و با احتیاط آن را روی کاغذ صافی قرار داده شده روی صفحه سوراخ دار می گذاریم و درنهایت، پیچ های اتصال را محکم می کنیم.

۱۲- وزن حلقوی و نعل اسپی شکل (مانند حروف O و U انگلیسی) را روی سطح نمونه قرار می دهیم (وزن این سربارها از ۱۰ پوند (۴/۵ کیلوگرم) نباید کمتر باشد) (شکل ۴۱-۱۳)



شکل ۴۱-۱۳: قرار دادن وزن حلقوی سطح نمونه

تذکر: به منظور سهولت در حمل و نقل، می توان ابتدا وزن حلقوی را روی نمونه گذاشت و سپس قالب را همراه این سربار درون دستگاه گذاشت و سپس وزن نعل اسپی را روی آن قرار داد.

۱۳- قالب را با سربارها روی دستگاه و وسیله اعمال فشار قرار داده (شکل ۴۲-۱۳) و پیستون را از میان سربارهای مرحله ۱۳ عبور داده و روی سطح خاک به طور مماس قرار می دهیم (شکل ۴۳-۱۳).



شکل ۱۳-۴۲: قرار دادن قالب همراه سربارهای آن در دستگاه



شکل ۱۳-۴۳: مماس کردن پیستون روی نمونه خاک

۱۴- عقربه‌های مدرج سنجش نیرو (هر درجه آن معادل  $0/0001$  اینچ) و نفوذ پیستون یا جابجایی سنج (هر درجه معادل  $0/001$  اینچ) را صفر می‌کنیم.

۱۵- وسیله اعمال فشار را به کار انداخته و به نحوی بارگذاری می‌کنیم که هر  $25$  درجه نفوذ ( $0/025$  اینچ)،  $30$  ثانیه طول بکشد. در برابر هر  $25$  درجه نفوذ، مقدار نیرو را از عقربه مدرج سنجش آن می‌خوانیم و یادداشت می‌کنیم

(بدهی است مقادیر خوانده شده از این عقره مدرج باید در ضریب کالیبراسیون حلقه آن،  $F$ ، ضرب تا به نیرو تبدیل شود). این عمل را آنقدر ادامه می دهیم تا مقدار نفوذ پیستون به  $5/5$  اینچ برسد (پنج دور عقره جابجایی سنج).

۱۶- پس از نفوذ پیستون به میزان  $5/5$  اینچ، آزمایش را متوقف کرده و قالب را از زیر دستگاه خارج و خاک را از داخل قالب به کمک جک بیرون آورده و از بالا (شکل ۴۴-۱۳) و پایین آن دو نمونه تهیه و درصد رطوبت آنها را به دست می آوریم ( $W_1$ ).



شکل ۴۴-۱۳: تهیه نمونه جهت تعیین درصد رطوبت خاک پس از نفوذ سنبه

#### ۴-۱۳) محاسبات

۱- وزن مخصوص مرطوب خاک برابر است با:

$$\gamma = \frac{\text{وزن خاک مرطوب}}{\text{حجم قالب (سانتیمتر مکعب)}} = \frac{(M_2 - M_1)g}{V} \quad (2-13)$$

۲- وزن مخصوص خشک نمونه ( $\gamma_d$ ) باتوجه به رابطه زیر قابل تعیین است:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w_1(\%)}{100}} \quad (3-13)$$

۳- منحنی تغییرات فشار ( $\frac{lb}{in^2}$ ) را نسبت به نفوذ پیستون ( $i$  in.) ترسیم می کنیم. این کار با اتصال نقاط به دست آمده و ایجاد یک منحنی پیوسته به هم، حاصل می شود (شکل ۴۵-۱۳).

۴- نسبت باربری کالیفرنیا به صورت زیر تعیین می شود:

$$CBR_{(i)} = \frac{\text{بار استفاده شده برای } i \text{ اینچ نفوذ}}{\text{بار استاندارد برای } i \text{ اینچ نفوذ}} \times 100 \quad (4-13)$$

$$(N_{(i)}) = \text{بار استفاده شده در آزمایش برای } i \text{ اینچ نفوذ} \left( \text{تصحیح نشده} \right) \quad (5-13)$$

$i$ : نفوذ پیستون (in.)

$N_{(i)}$ : عدد خوانده شده از عقره سنجش نیرو برای  $i$  اینچ نفوذ سنبه (برحسب  $10^{-4}$  اینچ)

$F$ : ضریب کالیبراسیون حلقه ( $\frac{lb}{درجه}$ )

تذکر: مقدار نفوذ پیستون برابر با  $100 \times 0.2$  است.

تذکر: بار استفاده شده در آزمایش در رابطه  $(13-4)$ ، باید پس از رسم منحنی تصحیح شود.

۵- از روی منحنی حاصل از مرحله قبل، برای مقادیر  $100 \times 0.2$  اینچ نفوذ پیستون مقدار فشارهای وارد شده را به دست می‌آوریم. سپس با ضرب آنها در مقدار سطح مقطع پیستون (برحسب اینچ مربع)، مقدار نیروی مربوط را تعیین و برای محاسبه عدد CBR استفاده می‌کنیم.

تذکر: معمولاً هنگام تعیین عدد CBR آن را برای نفوذ  $100 \times 0.2$  اینچ محاسبه می‌کنند؛ ولی اگر مقدار CBR مربوط به نفوذ  $100 \times 0.2$  اینچ نفوذ بیشتر از نفوذ  $100 \times 0.2$  اینچ به دست آید آزمایش باید تکرار شود.

### تصحیح منحنی

پس از رسم منحنی ممکن است این منحنی در ابتدای آن به صورت خطی نباشد. در این صورت در قسمت مستقیم منحنی خطی بر آن مماس می‌کنیم تا این خط محور افقی را قطع کند. فاصله نقطه تلاقی تا مبدأ مختصات مقدار نفوذ لازم برای نفوذ پیستون را نشان می‌دهد؛ درنتیجه محل تلاقی را مبدأ مختصات جدید انتخاب کرده و تمام مقادیر نفوذ مندرج در جدول ۲-۱۳ یا شکل ۴۵-۱۳ باید از مبدأ مختصات جدید اندازه‌گیری و جدا شود و بر اساس مقدار نفوذ  $100 \times 0.2$  اینچ تصحیح شده، بارهای (فشارهای) استفاده شده در آزمایش (بارهای تصحیح شده) تعیین شود. منحنی تصحیح شده در شکل ۴۶-۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱۳: آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

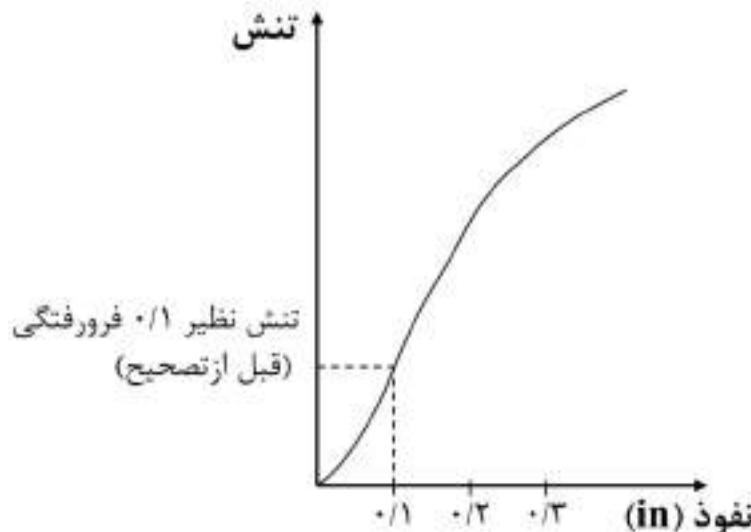
نوع خاک:.....	شماره نمونه:.....
محل نمونه‌گیری:.....	
حجم قالب: $\frac{1}{3} ft^3$	وزن چکش: $10 lb$
تعداد لایه‌ها: ۵	تعداد ضربه در هر لایه: ۵۶
ضریب کالیبراسیون حلقه بارگذاری: $F = \frac{lb}{درجه}$	چگالی ویژه: $G_s = 2.68$
شخص نمونه‌گیری:.....	تاریخ نمونه‌گیری:...../...../.....

مقدار نفوذ پیستون (in) (۱)	مقدار نفوذ پیستون (mm) (۲)	بار (lb) (۳)
.	.	.
۰/۰۲۵	۰/۶۳	۶۹/۸۷
۰/۰۵	۱/۲۵	۱۲۲/۹۳
۰/۰۷۵	۱/۸۸	۱۶۹/۵۱
۰/۱	۲/۵	۲۱۳/۵۱
۰/۱۲۵	۳/۱۲	۲۵۲/۳۳
۰/۱۵	۳/۷۵	۲۸۹/۲۱
۰/۱۷۵	۴/۲۸	۳۲۴/۷۹
۰/۲	۵	۳۵۶/۴۹
۰/۳	۷/۵	۴۴۶/۴۳
۰/۴	۱۰	۵۳۵/۷۱
۰/۵	۱۲/۵	۶۱۷/۸۷

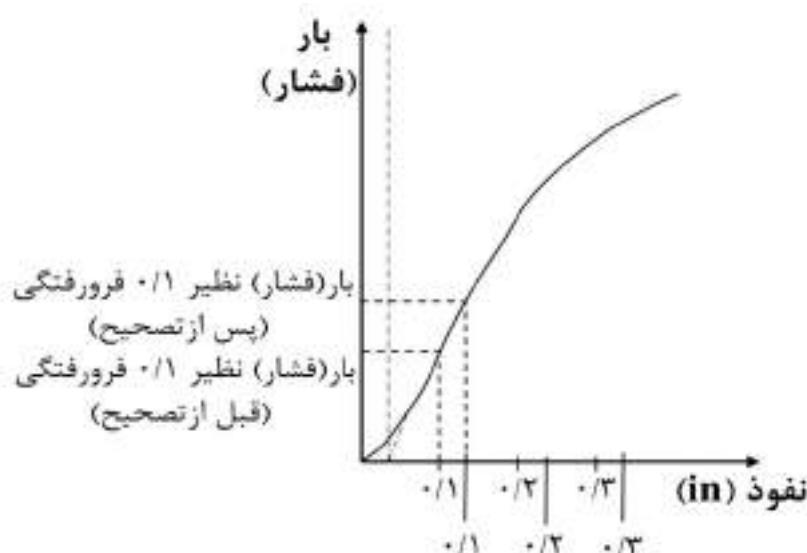
$$(CBR = \frac{213/51}{300} \times 100 = 7\%) \text{ اینچ نفوذ}$$

$$(CBR = \frac{356/49}{450} \times 100 = 7.92\%) \text{ اینچ نفوذ}$$

به دلیل آنکه  $CBR_{(0.1)} > CBR_{(0.2)}$ , لذا آزمایش باید تکرار شود.



شکل ۱۳-۴۵: منحنی تغییرات مقدار نفوذ پیستون - فشار تصحیح نشده



شکل ۱۳-۴۶: منحنی تغییرات مقدار نفوذ پیستون - فشار تصحیح شده

### ۱۳-۵) نکات کلی

- ۱- عدد CBR یکی از عواملی است که در تعیین ضخامت لایه روسازی راه استفاده می‌شود.
- ۲- برای کوبیدن خاک در این آزمایش از ۲ روش استفاده می‌کنند که در جدول ۱۳-۳ آورده شده است.

جدول ۱۳-۳: روش کوبیدن و تراکم خاک بسته به نوع خاک و بر اساس استاندارد ASTM

توضیحات	خاک ریزدانه	خاک درشتدانه	D-698 B	D-698 B
تعداد ضربات چکش			۵۶	۵۶
تعداد لایه			۳	۳
وزن چکش (پوند)			۵/۵	۵/۵

۳- می‌توان این آزمایش را در محل نیز انجام داد (شکل ۴۷-۱۳). در چنین حالتی باید خاک در شرایط عادی قرار داشته و در اثر تابش آفتاب یا نفوذ آب زیاد و غیر عادی حالت طبیعی خود را از دست نداده باشد. به کمک این آزمایش و به کمک یک نمونه اشباع می‌توان میزان تورم خاک داخل قالب را با توجه به سریارهای (وزنهای) روی خاک تعیین کرد که خواننده برای اطلاعات بیشتر در این زمینه به منابع موجود ارجاع داده می‌شود.



شکل ۴۷-۱۳: انجام آزمایش CBR در محل

۴- با توجه به جدول ۴-۱۳ می‌توان بر اساس مقدار CBR پایداری زمین زیر پی را ارزیابی کرد. هرچه CBR بزرگ‌تر باشد، می‌توان به زمین بار بیشتری وارد کرد.

جدول ۴-۱۳: بررسی پایداری زمین زیر پی بر اساس مقدار CBR

پایداری زمین زیر پی	خاک طبقه‌بندی (روش آشتو)	CBR(%)
خیلی بد	A-6 , A-7	۲-۵
بد	A-5	۶-۱۰
متوسط	A-3 , A-4	۱۱-۲۰
خوب	A-1-b , A-2-6 , A-2-7	۲۱-۴۰
عالی	A-1-a , A-2-5 , A-2-6	۴۱-۷۰
بسیار عالی	A-1-a , A-2-4	۷۱-۱۰۰

۵- در صورتی که آزمایش CBR در حالت اشباع انجام شود باید پس از مرحله ساختن نمونه در قالب، آن را به مدت ۴ روز درون آب قرار داد.

**فصل چهاردهم**  
**(AASHTO T216, ASTM D2435) آزمایش تحکیم**

### ۱-۱۴) مقدمه و تئوری آزمایش

همه خاک‌ها، تحت بارهای وارد شده نشست می‌کند که به تبع آن باعث می‌شود تا سازه‌هایی که روی آن‌ها یا درون آن‌ها قرار گرفته است نیز نشست کند. اگر نشست تا حد قابل تحمل محدود نشود، ممکن است با وجود سالم ماندن خود سازه، استفاده مورد نظر از آن‌ها مختل شود و عمر مفید آن نیز کاهش یابد. سازه‌ها ممکن است به طور یکنواخت یا غیریکنواخت نشست کند. حالت دوم نشست تفاضلی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و اغلب در نظر گرفتن آن در طراحی بسیار مهم است.

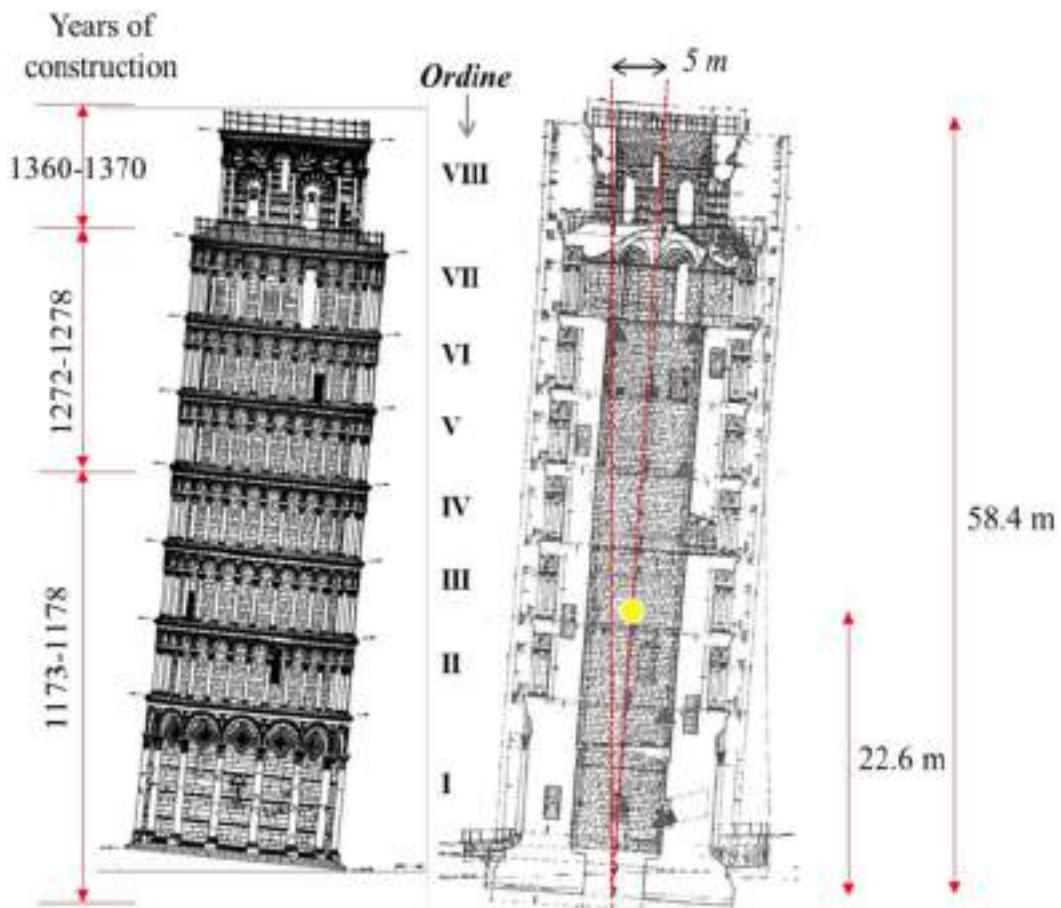
برج کج پیزا نمونه کلاسیک از نشست تفاضلی است (شکل‌های ۱-۱۴ و ۲-۱۴). ساخت برج در سال ۱۱۷۳ آغاز شد و در پایان سال ۱۱۷۸ که دو سوم برج تکمیل شده بود، کج شد. از آن زمان به بعد، برج به صورت تفاضلی نشست کرده است. شالوده برج در حدود ۳ متر در بستره از شن و ماسه سیلتی قرار گرفته است که زیر آن ۳۰ متر خاک رس نرم روی رسوبی از ماسه قرار گرفته است. یک لایه ماسه به ضخامت تقریبی ۵ متر خاک رس را قطع می‌کند. با اینکه ساختار برج به صورت دست‌نخورده است، اما عملکرد آن به دلیل نشست تفاضلی مختل شده است.



شکل ۱-۱۴: برج کج پیزا

---

<sup>1</sup>. Differential Settlement



شکل ۳-۱۴: مقطع برج با نشان دادن محل مرکز جرم در سمت راست تصویر و همچین نمای جانبی برج پیزا با ذکر سال‌های ساخت و تعریف سطوح در سمت چپ تصویر

نشست کلی خاک معمولاً از سه بخش تشکیل شده است:

۱- فشرده‌سازی آنی یا الاستیک<sup>۱</sup>: که در اثر تغییر شکل الاستیک خاک خشک و خاک‌های مرطوب و اشباع مستقیماً پس از اعمال بار و بدون تغییر در میزان رطوبت ایجاد می‌شود. محاسبات نشست الاستیک به طور کلی بر اساس معادلات پیشنهاد شده در متون فنی به دست می‌آید و بزرگی آن به مشخصات و انعطاف‌پذیری فونداسیون و پارامترهای الاستیک خاک بستگی دارد.

۲- تحکیم اولیه<sup>۲</sup>: به معنی تغییر حجمی است که در اثر خروج آب از منافذ و انتقال تنش از فشار آب منفذی اضافی به ذرات یک خاک ریزدانه ایجاد می‌شود.

۳- فشرده‌سازی ثانویه<sup>۳</sup> یا تحکیم ثانویه<sup>۴</sup>: به معنی تغییر حجمی است که در اثر تنظیم بافت (ساختمان داخلی) خاک پس از تکمیل تحکیم اولیه ایجاد می‌شود.

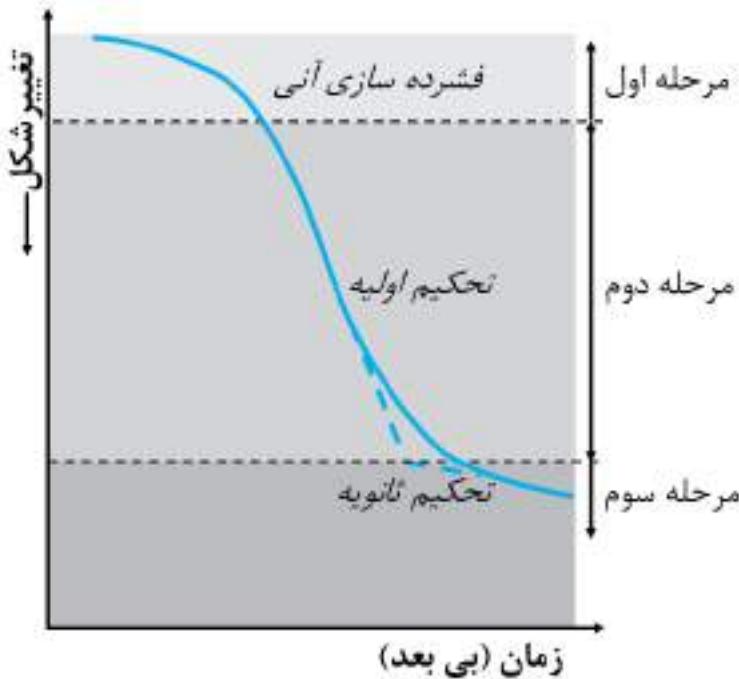
شکل کلی نمودار تغییر شکل خاک در اثر گذشت زمان، برای یک افزایش بار معین، در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. در این نمودار، سه مرحله متمایز برای نشست خاک که در بالا توضیح داده شد مشاهده می‌شود.

<sup>1</sup>. Immediate or Elastic compression

<sup>2</sup>. Primary consolidation

<sup>3</sup>. Secondary compression

<sup>4</sup>. Secondary consolidation



شکل ۱۴-۳: نمودار تغییر شکل - زمان در طول فرایند نشست خاک برای یک افزایش بار معین

ما در ادامه این فصل، به مقوله «تحکیم اولیه» می‌پردازیم. هنگامی که لایه‌ای از خاک ریزدانه تراکم‌پذیر اشباع (مانند CL و CH) در معرض افزایش تنش قرار می‌گیرد، فشار آب منفذی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و در همان ابتدای کار نیز مقداری نشست الاستیک اتفاق می‌افتد که بسته به نوع فونداسیون می‌توان آن را از روابط مقرر محاسبه نمود، اما این افزایش تنش، در درازمدت، منجر به زهکشی آب (کاهش فشار آب منفذی اضافی) و درنتیجه کاهش نسبت تخلخل خاک می‌شود (بر اساس رابطه ۱-۱۴) که این امر با نشست لایه خاک همراه است؛ بنابراین، تغییر حجم مرتبط در خاک رس ممکن است مدت طولانی پس از نشست الاستیک ادامه یابد. این نشست، نشست تحکیمی نامیده می‌شود. نشست ناشی از تحکیم در خاک‌های ریزدانه معمولاً چندین برابر بیشتر از نشست الاستیک است؛ از این‌رو برای خاک‌های ریزدانه غالباً از محاسبه نشست الاستیک صرف‌نظر می‌شود. در خاک‌های ماسه‌ای و شنی برخلاف خاک‌های ریزدانه، به علت نفوذپذیری بالا، زهکشی ناشی از افزایش فشار آب منفذی، بلافاصله رخ می‌دهد. درنتیجه برای خاک‌های درشت‌دانه، معمولاً نشست الاستیک بیشتر از نشست تحکیمی است.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-14)$$

کاهش  
ثابت

#### مکانیسم روند تحکیم خاک

تغییر شکل وابسته به زمان خاک رس اشباع را می‌توان با درنظر گرفتن یک مدل ساده که از یک استوانه با یک فنر (نماد خاک) در مرکز آن تشکیل شده، درک کرد. یک استوانه مانند شکل ۱۴-۴ در نظر بگیرید؛ به طوری که سطح مقطع داخلی استوانه برابر با A باشد. استوانه پر از آب است و دارای یک پیستون و سوپاپ ضد آب بدون اصطکاک است که در قسمت (الف) شکل ۱۴-۴ نشان داده شده است. در این زمان، اگر یکبار P را روی پیستون قرار دهیم (قسمت (ب) شکل

۴-۱۴) و شیر را بسته نگه داریم، کل بار توسط آب داخل استوانه تحمل می‌شود؛ زیرا آب تراکم‌ناپذیر است و در این حالت، فتر هیچ تغییر شکلی نخواهد داشت. فشار هیدرولاستاتیک اضافی در این زمان برابر است با:

$$\Delta u = \frac{P}{A} \quad (۲-۱۴)$$

این مقدار را می‌توان در فشارسنج متصل به استوانه مشاهده کرد. به‌طور کلی می‌توان نوشت:

$$P = P_s + P_w \quad (۳-۱۴)$$

که در رابطه بالا،  $P_s$  بار تحمل شده توسط فنر و  $P_w$  باری است که توسط آب تحمل می‌شود.  
از بحث قبل، می‌توان دریافت که وقتی شیر پس از قرار دادن بار  $P$  هنوز بسته است، داریم:

$$P = P_w \quad \text{و} \quad P_s = 0 \quad (۴-۱۴)$$

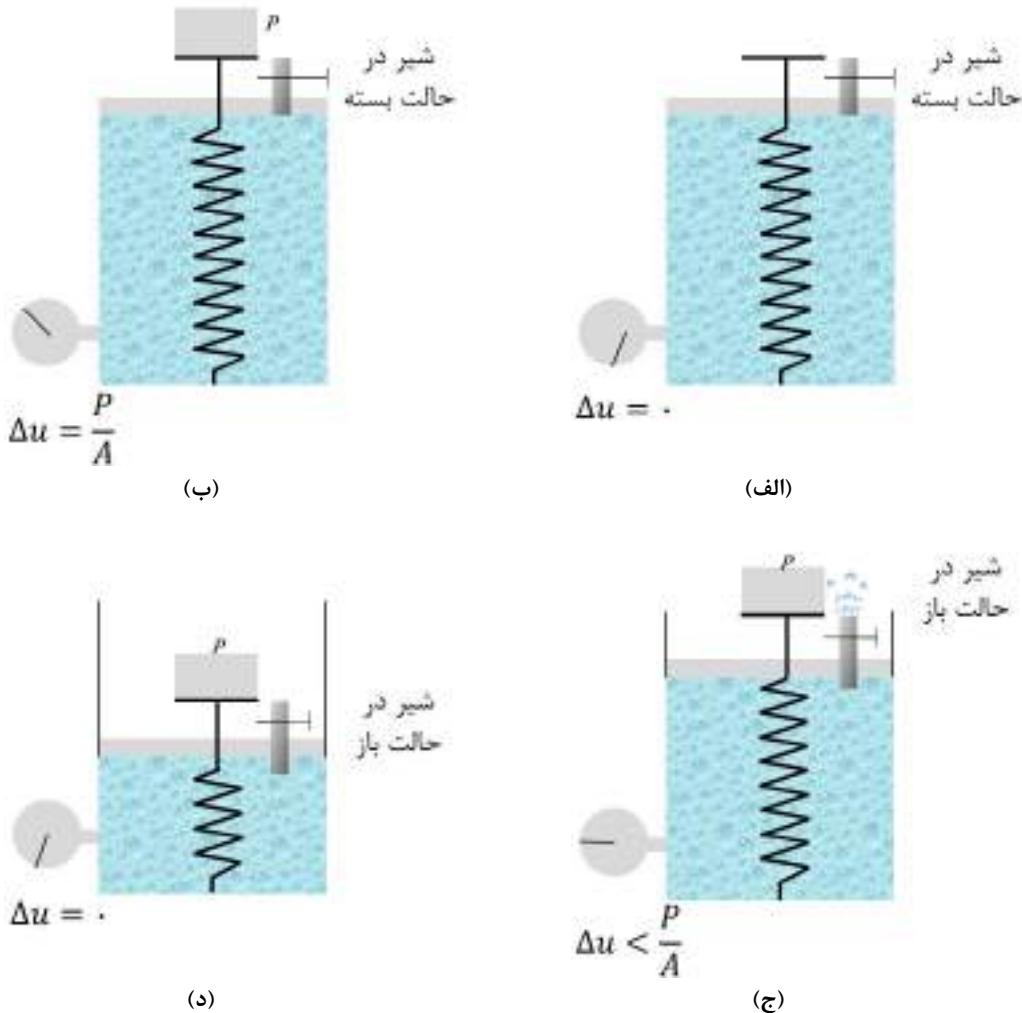
اکنون اگر دریچه باز شود، آب به بیرون جریان می‌یابد (قسمت (ج) شکل ۴-۱۴). این جریان با کاهش فشار هیدرولاستاتیک اضافی و افزایش فشردگی فتر همراه خواهد بود. در کل زمان فشردگی فنر معادله (۳-۱۴) برقرار است.  
با این حال خواهیم داشت:

$$P > P_w \quad P_s > 0 \quad (\Delta u < \frac{P}{A}) \quad (۵-۱۴)$$

همان‌طور که در قسمت (د) شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است، پس از مدتی فشار هیدرولاستاتیک اضافی صفر می‌شود و سیستم به حالت تعادل می‌رسد. حال می‌توان نوشت:

$$P_w = 0 \quad \text{و} \quad P = P_s \quad (۶-۱۴)$$

و مجدداً معادله (۳-۱۴) برقرار است.



شکل ۴-۱۴: مدل استوانه - فن برای شبیه‌سازی تحکیم خاکها

با درنظرگرفتن این موضوع، می‌توانیم تغییر شکل یک لایه رسی اشباع را که در معرض افزایش تنش قرار دارد، تجزیه و تحلیل کنیم (قسمت (الف) شکل ۴-۱۴). لایه‌ای از خاک رس اشباع با ضخامت  $H$  را در نظر بگیرید که بین دو لایه ماسه‌ای محصور شده است و در معرض افزایش لحظه‌ای تنش کل  $\Delta\sigma$  قرار می‌گیرد. این تنش کل افزایشی به آب منفذی و مواد جامد خاک منتقل می‌شود. این بدان معنی است که تنش کل،  $\Delta\sigma = \Delta\sigma'$ ، به نسبت تنش مؤثر و فشار آب منفذی تقریباً برابر است. رفتار تغییر تنش مؤثر شبیه به فن در شکل ۴-۱۴ و رفتار تغییر فشار آب منفذی مشابه با فشار هیدرواستاتیک اضافی در شکل ۴-۱۴ خواهد بود. از اصل تنش مؤثر در مکانیک خاک می‌دانیم:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (7-14)$$

که در این رابطه،  $\Delta\sigma'$  مقدار افزایش تنش مؤثر و  $\Delta u$  مقدار افزایش فشار آب منفذی است. از آنجایی که خاک رس، نفوذپذیری بسیار کمی دارد و آب در مقایسه با اسکلت خاک، تراکم‌ناپذیر است، در زمان  $t = t_0$ ، کل تنش افزایشی  $\Delta\sigma$  در تمام اعماق، توسط آب تحمل می‌شود، یعنی  $\Delta\sigma = \Delta u$  (قسمت (ب) شکل ۵-۱۴).

و هیچ تنشی توسط اسکلت خاک تحمل نمی‌شود که این بدان معناست که تغییرات تنش مؤثر برابر صفر است ( $\Delta\sigma' = 0$ ).

پس از اعمال تنش افزایشی  $\Delta\sigma$  به لایه رسی، آب در فضاهای خالی شروع به فشرده شدن می‌کند و از هر دو جهت، از طریق لایه‌های ماسه، تخلیه می‌شود. با این فرایند، فشار آب منفذی اضافی که در هر عمقی از لایه رسی ایجاد شده است، به تدریج کاهش می‌یابد و تنش اعمال شده به ذرات خاک منتقل می‌شود (تنش مؤثر افزایش می‌یابد؛ بنابراین، در زمان  $t < \infty$  خواهیم داشت:

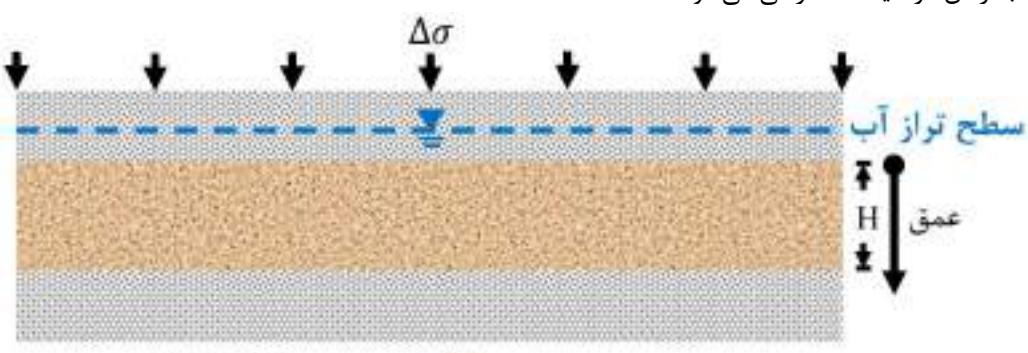
$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (\Delta\sigma' > 0, \Delta u < \Delta\sigma) \quad (8-14)$$

بالین حال، بسته به حداقل فاصله مسیر زهکشی تا لایه ماسه بالایی یا پایینی، بزرگی  $\Delta\sigma'$  و  $\Delta u$  در اعمق مختلف تغییر خواهد کرد (قسمت (ج) شکل (۵-۱۴)).

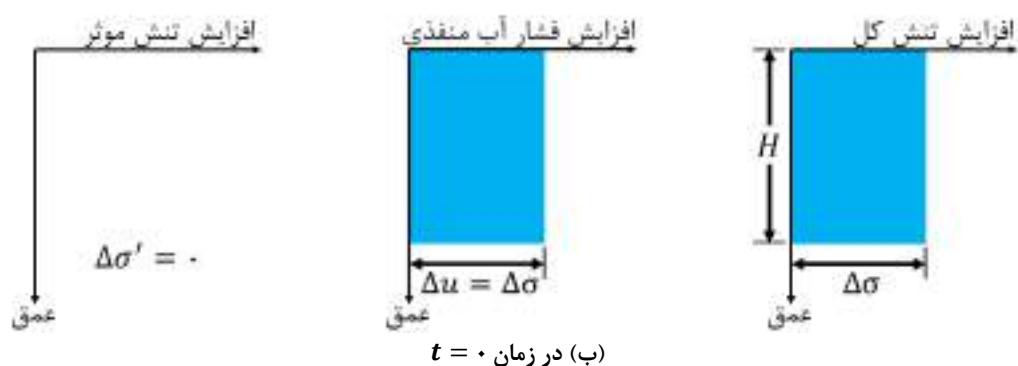
از نظر تئوری، در زمان  $t = \infty$  کل فشار آب منفذی اضافی تمام نقاط لایه رسی، با زهکشی از بین می‌رود؛ بنابراین  $\Delta u = \Delta\sigma$  خواهد شد. اکنون کل افزایش تنش  $\Delta\sigma$  توسط ساختار خاک تحمل می‌شود (قسمت (د) شکل (۵-۱۴)). از این‌رو:

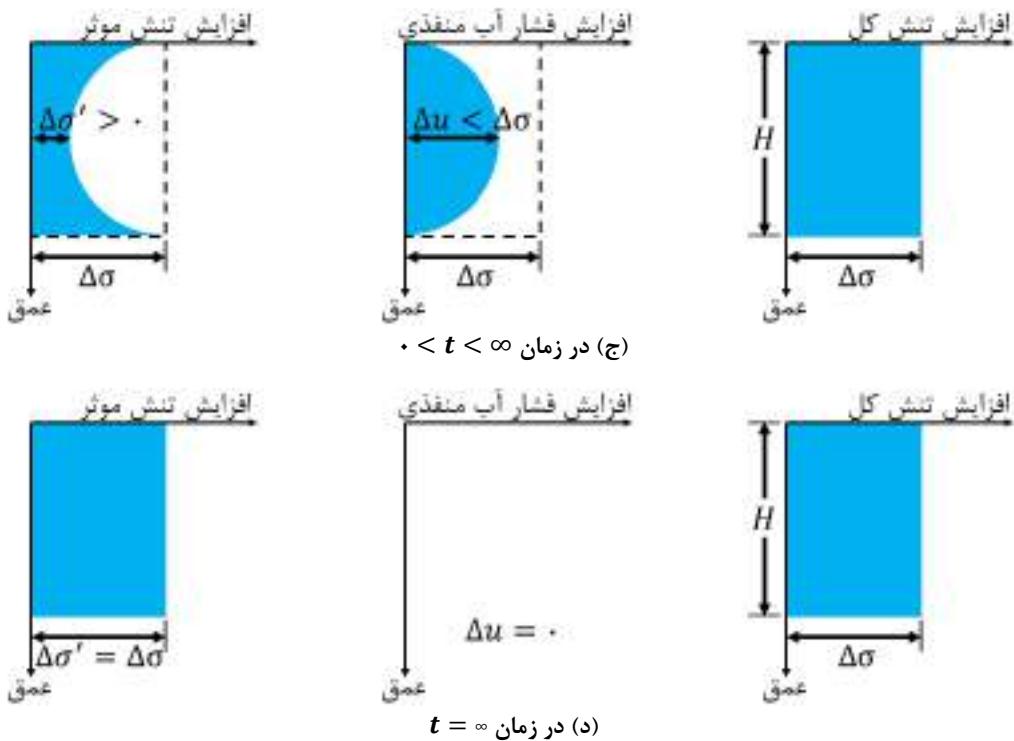
$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' \quad (9-14)$$

این فرایند تدریجی زهکشی تحت اعمال بار اضافی و انتقال فشار آب منفذی اضافی به تنش مؤثر، باعث نشست وابسته به زمان در لایه خاک رسی می‌شود.



(الف)

(ب) در زمان  $t = 0$



شکل ۶-۱۴: تغییرات تنش کل، فشار آب منفذی و تنش مؤثر در یک لایه رسی با شرایط زهکشی در بالا و پایین درنتیجه افزایش تنش کل

### تئوری تحکیم یک بعدی

تئوری تحکیم یک بعدی، اولین بار توسط ترزاقی (۱۹۲۵) ارائه شد. فرضیات اساسی در استخراج معادلات ریاضی این تئوری به شرح زیر است:

۱- لایه خاک رس همگن است.

۲- لایه خاک رس اشباع است.

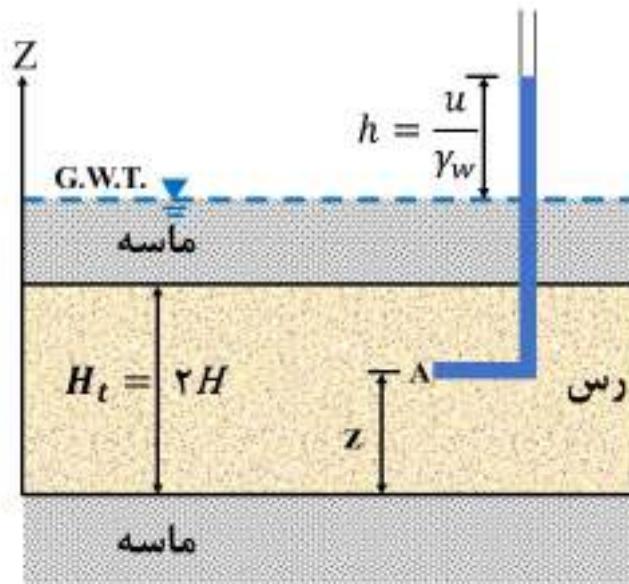
۳- فشردگی لایه خاک تنها به دلیل خروج آب است (آب تراکم ناپذیر است).

۴- قانون دارسی معتبر است (جریان آرام است).

۵- تغییر شکل خاک فقط در جهت اعمال بار اتفاق میفتد.

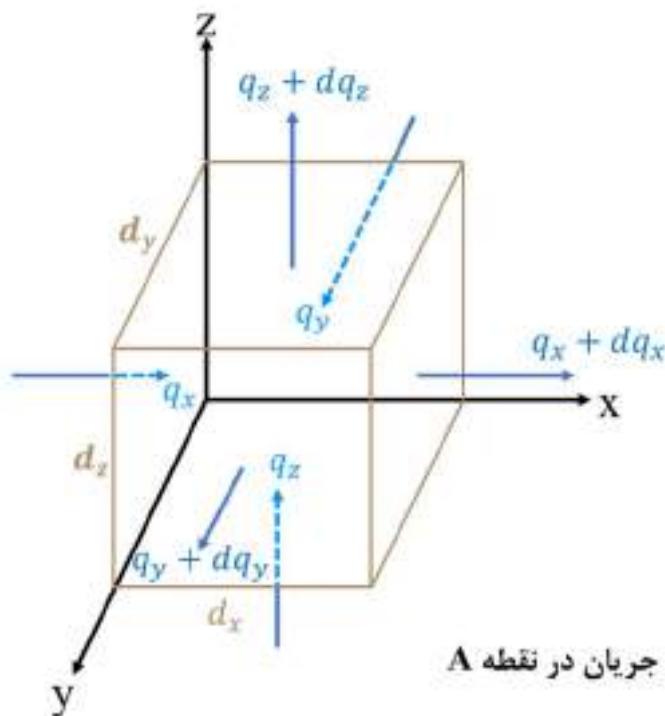
۶- پارامترهای تحکیم در پروسه تحکیم ثابت است.

با درنظرداشتن فرضیات بالا، یک لایه خاک رس با ضخامت  $H_t$  مطابق شکل ۶-۱۴ در نظر بگیرید. این لایه رسی، بین دو لایه ماسه‌ای با نفوذپذیری بالا قرار دارد. هنگامی که خاک رس تحت افزایش تنش عمودی  $\Delta\sigma$  قرار می‌گیرد، فشار آب منفذی در هر نقطه A به میزان  $u$  افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴-۶: لایه خاک رس در حال تحکیم

اکنون، همانند شکل ۱۴-۷، المانی از توده خاک را با حجم  $dx \cdot dy \cdot dz$  در نقطه A در نظر بگیرید. جریان‌هایی را که در جهات x, y و z وارد المان خاک می‌شود، می‌توان از قانون دارسی به صورت زیر به دست آورد (معادلات ۱۰-۱۴ تا ۱۴-۱۲):



شکل ۱۴-۷: جریان در المان خاک

$$q_x = k_x i_x A_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} dy dz \quad (10-14)$$

$$q_y = k_y i_y A_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y} dx dz \quad (11-14)$$

$$q_z = k_z i_z A_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} dx dy \quad (12-14)$$

که در این معادلات،  $q_x$ ،  $q_y$  و  $q_z$  جریان‌هایی است که به ترتیب در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  وارد المان خاک می‌شود؛  $k_x$ ،  $k_y$  و  $k_z$  به ترتیب ضرایب نفوذپذیری در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  است و  $h$  نیز هد هیدرولیکی در نقطه  $A$  است. جریان‌هایی که در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  از المان خاک خارج می‌شود نیز از معادلات زیر به دست می‌آید (معادلات ۱۳-۱۴ تا ۱۵-۱۴):

$$q_x + dq_x = k_x (i_x + di_x) A_x = k_x \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial^x h}{\partial x^x} dx \right) dy dz \quad (13-14)$$

$$q_y + dq_y = k_y \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial^y h}{\partial y^y} dy \right) dx dz \quad (14-14)$$

$$q_z + dq_z = k_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial^z h}{\partial z^z} dz \right) dx dy \quad (15-14)$$

در حالت تحکیم یکبعدی، جریان آب به داخل و خارج المان خاک فقط در یک جهت یعنی در جهت  $z$  است. این بدان معناست که  $q_x$ ،  $q_y$  و  $dq_y$  در شکل ۷-۱۴ برابر با صفر است (معادلات ۱۰-۱۴، ۱۱-۱۴، ۱۲-۱۴ و ۱۴-۱۴)؛ درنتیجه مقدار جریان ورودی و خروجی المان خاک را می‌توان به ترتیب با معادلات ۱۲-۱۴ و ۱۵-۱۴ به دست آورد؛ بنابراین داریم:

$$(q_z + dq_z) - q_z = \frac{\partial V}{\partial t} = \text{نرخ تغییر حجم المان خاک} \quad (16-14)$$

که در رابطه ۱۶-۱۴، مقدار حجم ( $V$ ) برابر است با:

$$V = dx dy dz \quad (17-14)$$

اکنون سمت راست معادلات ۱۲-۱۴ و ۱۵-۱۴ را از یکدیگر کم می‌کنیم و در سمت چپ معادله ۱۶-۱۴ جایگذاری می‌کنیم. در این صورت خواهیم داشت:

$$k \frac{\partial^z h}{\partial z^z} dz dx dy = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (18-14)$$

که در رابطه ۱۸-۱۴،  $k$  ضریب نفوذپذیری خاک است (همان مقدار  $k_z$  در معادلات ۱۲-۱۴ و ۱۵-۱۴).

از طرفی داریم:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} \quad (19-14)$$

در معادله ۱۹-۱۴،  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب است. با جایگزینی رابطه ۱۹-۱۴ در معادله ۱۸-۱۴ و مرتب‌سازی مجدد، خواهیم داشت:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{dx dy dz} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (20-14)$$

در طول تحکیم، میزان تغییر حجم توده خاک در اصل همان تغییر حجم فضای خالی آن است؛ بنابراین:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V_v}{\partial t} \quad (21-14)$$

که در رابطه فوق،  $V_v$  حجم فضای خالی در المان خاک است. همچنین می‌دانیم:

$$V_v = e V_s \quad (22-14)$$

در معادله ۲۲-۱۴،  $V_s$  حجم مواد جامد خاک در المان خاک (این مقدار ثابت است) و  $e$  نسبت تخلخل است؛ بنابراین:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = V_s \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{V}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{dx dy dz}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (23-14)$$

با جایگزینی رابطه فوق در معادله ۲۰-۱۴، خواهیم داشت:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (24-14)$$

تغییر در نسبت تخلخل،  $\partial e / \partial t$ ، به دلیل افزایش تنش مؤثر است. با فرض اینکه این تغییرات به صورت خطی با هم مرتبط است، داریم:

$$\partial e = -a_v \partial(\Delta\sigma') \quad (25-14)$$

در معادله ۲۵-۱۴، ضریب تراکم پذیری خاک است. همچنین می‌توان افزود که افزایش تنش مؤثر به دلیل کاهش فشار آب منفذی اضافی،  $\partial u$ ، است. از این‌رو:

$$\partial e = a_v \partial u \quad (26-14)$$

با ترکیب معادلات ۲۴-۱۴ و ۲۶-۱۴، خواهیم داشت:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u}{\partial t} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (27-14)$$

مقدار  $m_v$  در رابطه فوق، برابر است با:

$$m_v = \frac{a_v}{1+e} = \text{ضریب قابلیت فشردگی حجمی} \quad (28-14)$$

همچنین، می‌توان معادله ۲۷-۱۴ را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (29-14)$$

که در این صورت مقدار  $C_v$  در معادله فوق برابر است با:

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} = \text{ضریب تحکیم} \quad (30-14)$$

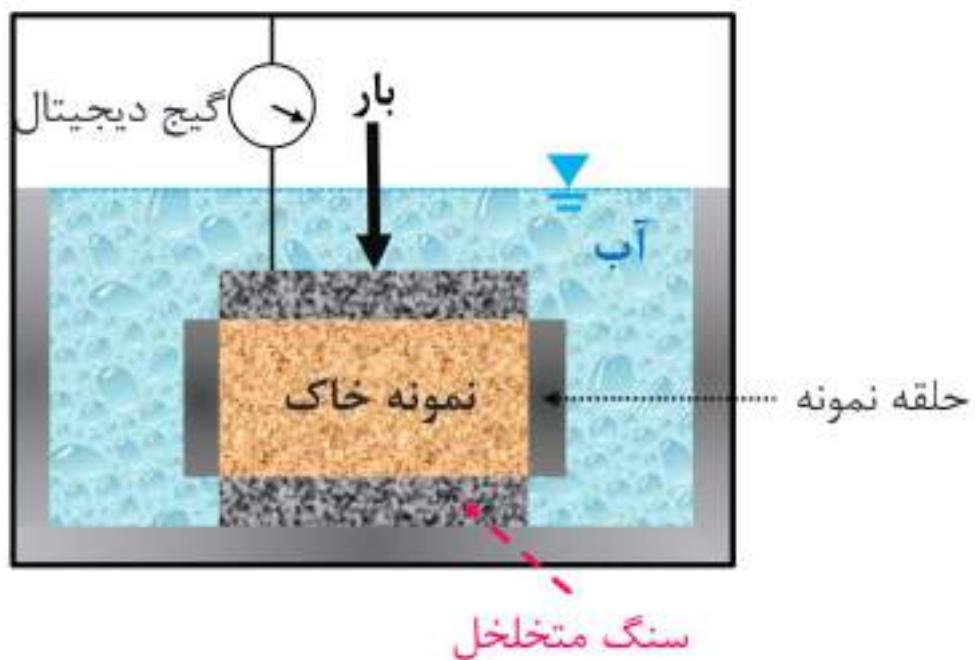
معادله ۲۹-۱۴، معادله دیفرانسیل تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی است و با شرایط مرزی مناسب، قابل حل است.

### آزمایش تحکیم یک بعدی

آزمایش تحکیم یک بعدی، اولین بار توسط ترزاقی پیشنهاد شد. این آزمایش در یک دستگاه تحکیم‌سنج<sup>۱</sup> (ادومتر<sup>۲</sup>) انجام می‌شود. شماتیک کلی دستگاه ادومتر در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده است. شکل ۹-۱۴ یک سلول دستگاه ادومتر را نشان می‌دهد. سنگ‌های متخلخل، در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرد. نمونه‌ها معمولاً دارای قطر ۶۴ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) و ضخامت ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) است. از طریق یک بازوی اهرمی، بار روی نمونه اعمال شده و تغییر شکل عمودی توسط یک گیج میکرومتری اندازه‌گیری می‌شود. در طول آزمایش، نمونه زیر آب و در شرایط کاملاً اشباع نگهداری می‌شود. در هر مرتبه افزایش تنش، بار معمولاً ۲۴ ساعت روی نمونه نگه داشته می‌شود (مدت زمان بارگذاری). پس از آن، معمولاً مقدار بار و فشار ناشی از آن دو برابر شده و اندازه‌گیری تغییر ارتفاع ادامه می‌یابد. در پایان آزمایش، وزن خشک نمونه آزمایش تعیین می‌شود.

<sup>1</sup>. Consolidometer

<sup>2</sup>. Oedometer



شکل ۸-۱۴: شماتیک کلی دستگاه ادومتر



شکل ۹-۱۴: سلول دستگاه ادومتر

**نمودار نسبت تخلخل - لگاریتم تنش مؤثر در یک سیکل بارگذاری**  
پس از اینکه نمودار تغییر شکل - زمان برای بارهای مختلف در آزمایشگاه به دست آمد، لازم است تغییر در نسبت تخلخل نمونه در طول آزمایش با تنش وارد شده مطالعه شود. در زیر یک روش گامبهگام برای انجام این کار بیان می‌شود:

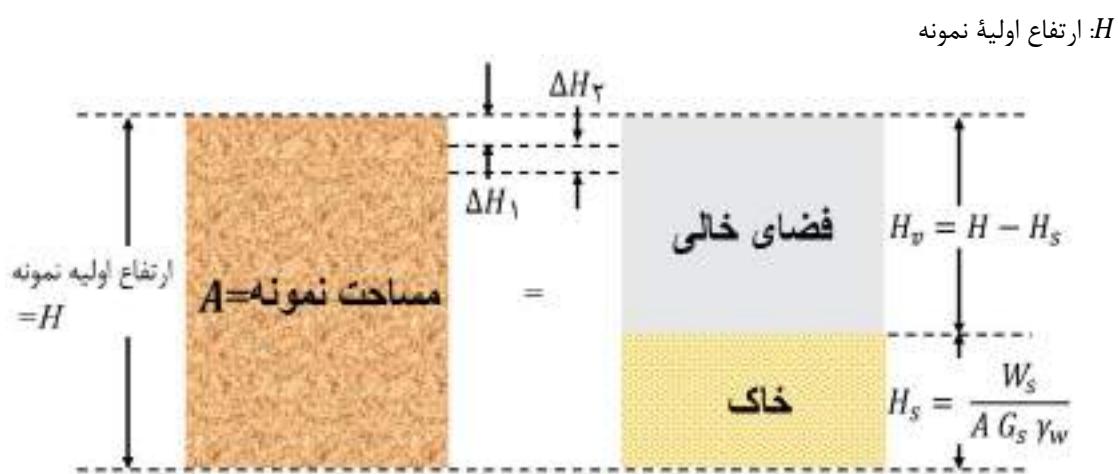
**مرحله ۱: محاسبه ارتفاع دانه‌های جامد ( $H_s$ ) در نمونه خاک (شکل ۱۰-۱۴) با استفاده از معادله زیر:**

$$H_s = \frac{W_s}{A G_s \gamma_w} = \frac{M_s}{A G_s \rho_w} \quad (31-14)$$

وزن خشک نمونه:  $W_s$   
 جرم خشک نمونه:  $M_s$   
 مساحت نمونه:  $A$   
 چگالی و وزن دانه‌های جامد خاک:  $G_s$   
 وزن مخصوص آب:  $\gamma_w$   
 چگالی آب:  $\rho_w$

مرحله ۲: محاسبه ارتفاع اولیه فضاهای خالی با استفاده از معادله زیر:

$$H_v = H - H_s \quad (32-14)$$



شکل ۱۰-۱۴: تغییر ارتفاع نمونه در آزمایش تحکیم یکبعدی

مرحله ۳: محاسبه نسبت تخلخل اولیه ( $e_v$ ) نمونه با استفاده از معادله زیر:

$$e_v = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v A}{H_s A} = \frac{H_v}{H_s} \quad (33-14)$$

مرحله ۴: برای اولین مرحله بارگذاری، یعنی  $\sigma_1$  (کل بار در واحد سطح نمونه) که باعث تغییر شکل  $\Delta H_1$  می‌شود، تغییر نسبت تخلخل برابر می‌شود با:

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s} \quad (34-14)$$

( $\Delta H_1$  از روی خوانش اولیه و نهایی گیج تغییر ارتفاع به دست می‌آید.)

تذکرہ: توجہ به این نکته ضروری است که در پایان این مرحله از تحکیم، تنش کل  $\sigma$  برابر با تنش مؤثر  $\sigma'$  است.

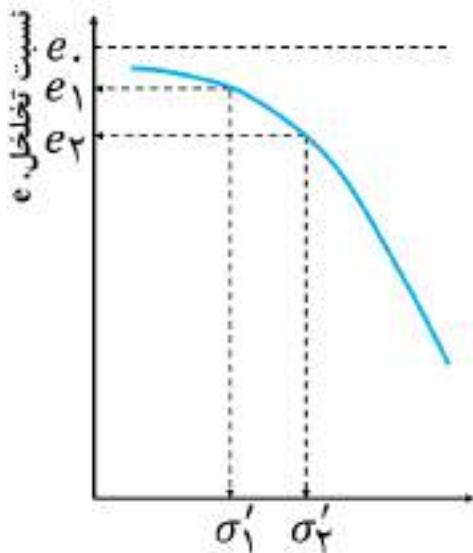
مرحله ۵: نسبت تخلخل جدید پس از تحکیم ناشی از افزایش تنش برابر است با:

$$e_1 = e_{\cdot} - \Delta e_1 \quad (35-14)$$

برای بارگذاری بعدی،  $\sigma_2$  (تذکرہ:  $\sigma_2$  برابر است با بار تجمعی در واحد سطح نمونه) که باعث تغییر شکل اضافی  $\Delta H_2$  می‌شود، نسبت تخلخل در پایان تحکیم می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s} \quad (36-14)$$

در این زمان،  $\sigma_2$  برابر است با تنش مؤثر  $\sigma'_2$ . به روش مشابهی می‌توان نسبت‌های تخلخل در پایان تحکیم را برای تمام افزایش بارها به دست آورد. در پایان تحکیم، تنش مؤثر  $\sigma'$  و نسبت‌های تخلخل مربوطه ( $e$ ، بر روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی رسم می‌شود (همچنین در این راستا می‌توان از نرم‌افزارهای کامپیوتری مانند اکسل و اوریجین کمک گرفت). روند متداول چنین نموداری در شکل ۱۱-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۱۴: نمودار متداول  $e$  بر حسب  $\log \sigma'$

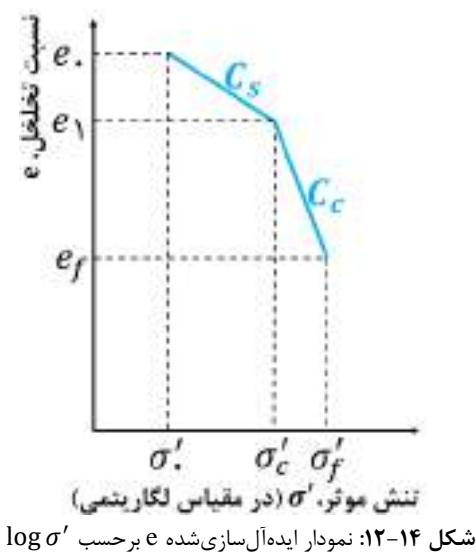
رس‌های عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته در یک سیکل بارگذاری با دقت در شکل ۱۱-۱۴ می‌توان دریافت که در بخش بالایی این نمودار، یک قسمت با شیب کم وجود دارد که تا حدودی منحنی است و به دنبال آن یک قسمت با شیب تند وجود دارد که می‌توان گفت تقریباً خطی است؛ به عبارت دیگر می‌توان اذعان نمود که در این قسمت، یک رابطه خطی بین نسبت تخلخل‌ها با  $\log \sigma'$  برقرار است. این پدیده را می‌توان به صورت زیر توضیح داد:

خاک رس از جمله خاک‌هایی است که تاریخچه تنش را در خود ذخیره می‌کند. برای درک بهتر این مطلب، زمینی پوشیده از برف را در نظر بگیرید. اکنون تصور کنید که یک بچه با پای خود، ردپایی را روی برف به جا می‌گذارد و برف را اندکی فشرده می‌کند. حال اگر یک انسان بالغ، روی این جای پا، پا بگذارد قطعاً جای بزرگ‌تری را روی برف به جا خواهد گذاشت و برف را نیز طبیعتاً بیشتر فشرده خواهد نمود، اما اگر عکس این قضیه رخ دهد، یعنی اگر ابتدا یک انسان بالغ روی زمین فاقد ردپا، اثری از خود بر جای گذارد، پس از آن، کودک نمی‌تواند تغییر شکل بیشتری را در همان ناحیه ایجاد کند.

همانند مثال بالا، می‌توان خاک‌های رس را در نظر گرفت. خاک رسی که در یک عمق مشخص از زمین قرار دارد، تحت تنش‌های مؤثری که بر اساس سربار خاک به آن وارد می‌شود، قرار دارد ( $\gamma' h = \sigma'$ )؛ حال اگر این خاک به آزمایشگاه آورده شود و تحت تنش مؤثری، کمتر از حالت طبیعی خود قرار بگیرد ( $\sigma' < \sigma'_c$ ) قطعاً تغییر شکل کمتری نیز خواهد داشت (در قسمت کم‌شیب نمودار شکل ۱۱-۱۴ قرار دارد) که در این حالت می‌گوییم **خاک پیش-تحکیم یافته<sup>۱</sup>** است (همانند اینکه ابتدا انسان بالغ روی برف اثر بگذارد و سپس کودک)؛ اما اگر سربار اعمالی، تنش مؤثری بیشتر از تنش مؤثر سابق خاک به آن وارد کند، خاک تغییر شکل زیادی خواهد داشت (در قسمت پرشیب نمودار شکل ۱۴-۱۴ قرار خواهد گرفت) که در این صورت، به آن **خاک عادی تحکیم یافته<sup>۲</sup>** خواهیم گفت.

روند بالا مربوط به یک سیکل بارگذاری است که در آن خاک می‌تواند عادی تحکیم یافته یا پیش تحکیم یافته باشد. منحنی تحکیم شکل ۱۱-۱۴ را به صورت ایده‌آل می‌توان دوخطی فرض کرد که در این صورت به فرم شکل ۱۲-۱۴ در خواهد آمد.

**تذکر:** دقت شود که منحنی شکل ۱۱-۱۴ و شکل ۱۲-۱۴ مربوط به زمانی است که خاک در ابتدا، پیش تحکیم یافته است و آنقدر مقدار تنش مؤثر افزایش می‌یابد تا به حالت عادی تحکیم یافته برسد.



شکل ۱۲-۱۴: نمودار ایده‌آل سازی شده e بر حسب

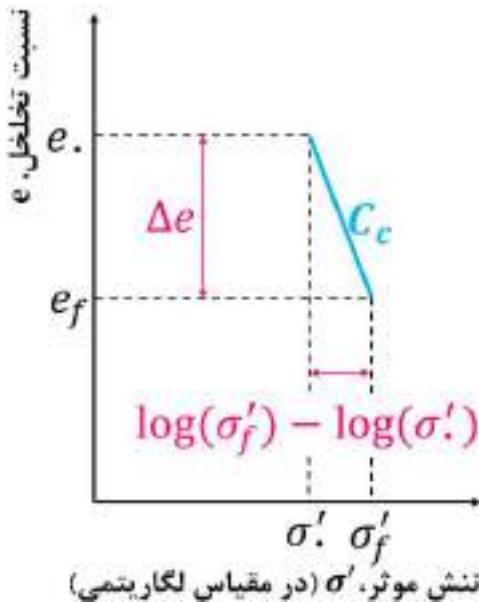
۱. Overconsolidated

۲. Normally consolidated

اکنون، حالت‌های مختلف خاک و مقدار نشست در هر حالت را بررسی می‌کنیم:

- خاک از ابتدا تا انتهای بارگذاری از نوع عادی تحکیم یافته باشد: در این حالت، شیب خط را با  $C_c$  نشان می‌دهند و به آن ضریب فشردنگی<sup>۱</sup> می‌گویند. همچنین، نمودار نسبت تخلخل بر حسب لگاریتم تنش مؤثر نیز به صورت شکل ۱۴-۱۳ در خواهد آمد که در این صورت مقدار نشست خاک برابر است با:

$$\Delta H = \frac{H}{1+e} C_c \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_!} \right) \quad (37-14)$$



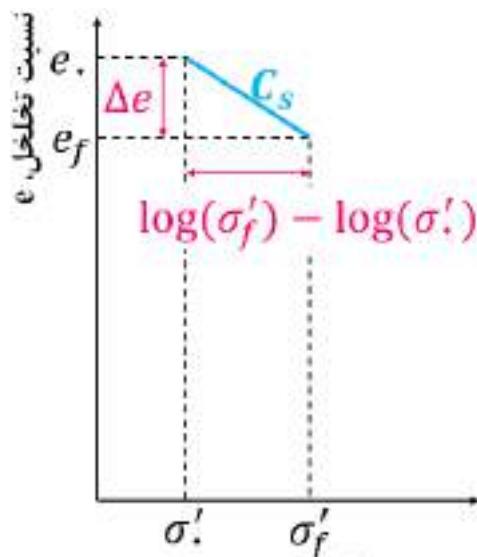
شکل ۱۴-۱۳: نمودار ایده‌آل سازی شده  $e$  بر حسب  $\log \sigma'$  برای خاکی که از ابتدا تا انتهای بارگذاری عادی تحکیم یافته باشد.

- خاک از ابتدا تا انتهای بارگذاری از نوع پیش‌تحکیم یافته باشد: در این حالت، شیب خط را با  $C_s$  نشان داده می‌شود و به آن ضریب تورم<sup>۲</sup> می‌گویند. نمودار نسبت تخلخل بر حسب لگاریتم تنش مؤثر در این حالت به صورت شکل ۱۴-۱۴ خواهد بود و مقدار نشست خاک از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta H = \frac{H}{1+e} C_s \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_!} \right) \quad (38-14)$$

۱. Coefficient of Compression

۲. Coefficient of Swelling

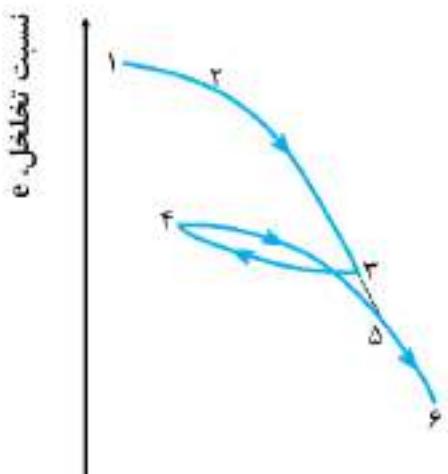
تنش مؤثر،  $\sigma'$  (در مقیاس لگاریتمی)

شکل ۱۴-۱۴: نمودار ایده‌آل‌سازی شده  $e$  بر حسب  $\sigma'$  برای خاکی که از ابتداء تا انتهای بارگذاری پیش‌تحکیم‌یافته باشد

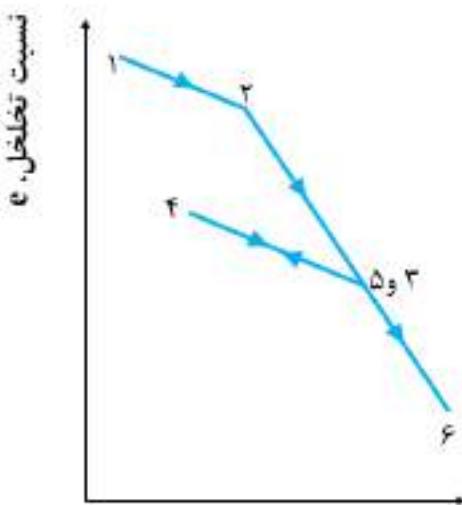
- خاک در ابتدای بارگذاری پیش‌تحکیم‌یافته باشد، اما تنش مؤثر آن قدر افزایش یابد که خاک عادی-تحکیم‌یافته شود: در این صورت نمودار نسبت تخلخل بر حسب لگاریتم تنش مؤثر، همانند شکل ۱۱-۱۴ خواهد بود و مقدار نشست از مجموع نشست قسمت‌های پیش‌تحکیم‌یافته و عادی-تحکیم‌یافته به دست خواهد آمد که در این صورت خواهیم داشت:

$$\Delta H = \frac{H_0}{1 + e_0} (C_s \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0}\right) + C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c}\right)) \quad (39-14)$$

نمودار نسبت تخلخل - لگاریتم تنش مؤثر در حالت بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد اگر در آزمایش تحکیم، یک خاک پیش‌تحکیم‌یافته ابتداء بارگذاری شود، سپس باربرداری شده و درنهایت مجدداً بارگذاری شود، نمودار نسبت تخلخل - لگاریتم تنش مؤثر به صورت شکل ۱۵-۱۴ در خواهد آمد. این نمودار را نیز به صورت ایده‌آل به شکل ۱۶-۱۴ در می‌آورند تا محاسبات آن ساده‌تر شود.

تنش موثر،  $\sigma'$  (در مقیاس لگاریتمی)

شکل ۱۵-۱۴: نمودار  $e$  بر حسب  $\log \sigma'$  در حالت بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد

تنش موثر،  $\sigma'$  (در مقیاس لگاریتمی)

شکل ۱۶-۱۴: نمودار ایده‌آل‌سازی شده  $e$  بر حسب  $\log \sigma'$  در حالت بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد

در شکل ۱۶-۱۴، شیب خط باربرداری و بارگذاری مجدد با  $C_r$  نشان داده می‌شود که به آن ضریب بارگذاری مجدد<sup>۱</sup> گویند. این شیب برابر با مقدار  $C_s$  است.

#### درجه تحکیم متوسط (U)

در ابتدای این فصل به این نکته اشاره شد که خاک رس اشباع در درازمدت تحکیم می‌یابد، پس می‌توان دریافت که عامل زمان در این فرایند نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. برای اینکه متوجه شویم که در یک لایه رسی چه میزان از تحکیم رخ داده است از عاملی به نام درجه تحکیم متوسط استفاده می‌شود. درجه تحکیم متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود:

<sup>1</sup>. Coefficient of Recompression

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{e_0 - e_t}{e_0 - e_f} \quad (40-14)$$

$\Delta H_t$ : نشست پس از گذشت زمان  $t$

$\Delta H_\infty$ : نشست در پایان تحکیم

$e_0$ : نسبت تخلخل اولیه

$e_t$ : نسبت تخلخل پس از گذشت زمان  $t$

$e_f$ : نسبت تخلخل در پایان تحکیم

معمولًاً مقدار درجه تحکیم را به صورت درصد گزارش می‌کنند.

### فاکتور زمان ( $T_v$ )

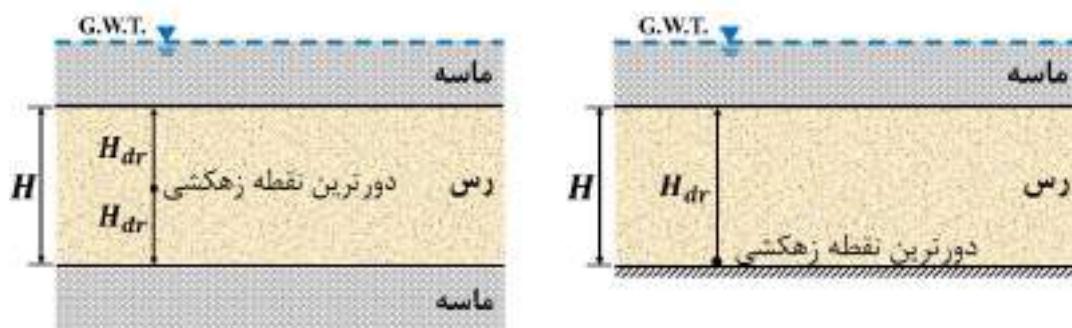
معادله ۲۹-۱۴، معادله دیفرانسیل تئوری تحکیم یک بعدی ترزاوی است که با حل این معادله، یک فاکتور زمان  $T_v$  یعنی

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}} \quad (41-14)$$

$C_v$ : ضریب تحکیم

$H_{dr}$ : حداکثر مسافت زهکشی در لایه رس

برای محاسبه حداکثر مسافت زهکشی، باید به این نکته دقت کنیم که آب از چه جهت‌هایی می‌تواند از لایه رس مورد نظر خارج شود. به شکل‌های ۱۷-۱۴ و ۱۸-۱۴ توجه کنید. در شکل ۱۷-۱۴، آب تنها از یک سمت می‌تواند زهکشی شود که به این حالت **زهکشی یک‌طرفه** گفته می‌شود و مقدار  $H_{dr}$  در این حالت برابر است با ضخامت کل لایه رس یعنی  $H$ ؛ اما در شکل ۱۸-۱۴، آب می‌تواند از دو سمت زهکشی شود که به این حالت **زهکشی دوطرفه** می‌گویند که در آن مقدار  $H_{dr}$  برابر می‌شود با نصف ضخامت کل لایه رس یعنی  $\frac{H}{2}$ .



شکل ۱۸-۱۴: زهکشی دوطرفه

شکل ۱۷-۱۴: زهکشی یک‌طرفه

می‌توان فاکتور زمان به دست آمده از رابطه بالا را با استفاده از روابط زیر به درجه تحکیم متوسط مرتبط نمود:

$$0\% < U \leq 60\% \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{100} \right)^2 \quad (42-14)$$

$$U > 60\% \quad T_v = 1/781 - 0/933 \log (100 - U\%) \quad (43-14)$$

#### محاسبه ضریب تحکیم ( $C_v$ )

به طور کلی با افزایش حد روانی خاک، ضریب تحکیم ( $C_v$ ) کاهش می‌یابد. برای تعیین  $C_v$  از آزمایش تحکیم یک بعدی و یک افزایش بار معین روی یک نمونه، معمولاً از دو روش گرافیکی استفاده می‌شود. اولین روش، روش لگاریتم زمان است که توسط کاساگرانده و فادوم<sup>۱</sup> (۱۹۴۰) پیشنهاد و دیگری، روش جذر زمان است که توسط تیلور<sup>۲</sup> (۱۹۴۲) ارائه شده است.

#### ۱- روش لگاریتم زمان (روش کاساگرانده)

در آزمایش تحکیم، برای یک بارگذاری افزایشی معین، تغییر شکل نمونه برحسب لگاریتم زمان در شکل ۱۹-۱۴ نشان داده شده است. برای محاسبه مقدار  $C_v$  در این روش، مراحل زیر را طی می‌کنیم:

﴿ مرحله اول: بخش‌های خطی تحکیم‌های اولیه (وسط نمودار) و ثانویه (انتهای نمودار) را امتداد می‌دهیم تا یکدیگر را در نقطه A قطع کند (برای درک بهتر، بار دیگر شکل ۳-۱۴ را مشاهده کنید). مختصات A در شکل ۱۹-۱۹ با  $d_{1..}$  نشان داده شده است؛ یعنی تغییر شکل در پایان ۱۰۰٪ تحکیم اولیه. ۱۹-۱۹

﴿ مرحله دوم: در این مرحله باید قسمت اولیه نمودار تصحیح شود؛ به این ترتیب که ابتدا در زمان  $t_1$ ، نقطه‌ای مانند B را نزدیک قسمت بالایی سهمی انتخاب می‌کنیم ( $U < 60\%$ ). اکنون لازم است تا زمان  $t_2$  را روی نمودار مشخص کنیم؛ به طوری که  $t_2 = 4t_1$ . فاصله عمودی بین  $t_1$  و  $t_2$  در شکل ۱۹-۱۴ با x نشان داده شده است.

﴿ مرحله سوم: خط افقی DE را طوری رسم می‌کنیم که فاصله عمودی BD برابر با x باشد. تغییر شکل مربوط به خط DE را با  $d_5$  نشان می‌دهیم؛ یعنی تغییر شکل در صفر درصد تحکیم (شروع تحکیم).

﴿ مرحله چهارم: با مشخص شدن  $d_5$ ، مقدار  $d_{1..}$  را از رابطه زیر به دست می‌آوریم:

$$d_5 = \frac{d_{1..} + d_{1..}}{2} \quad (44-14)$$

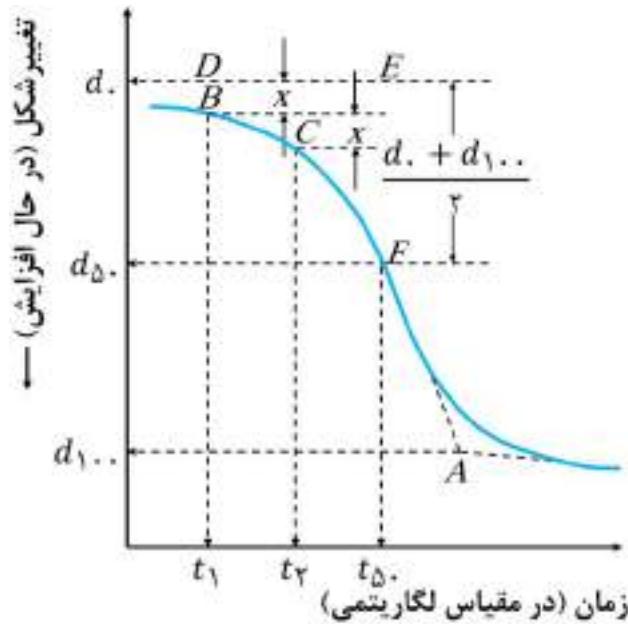
مقدار  $d_5$  را روی منحنی تغییر شکل پیدا می‌کنیم که نقطه F در نمودار است. زمان متناظر با این نقطه همان  $t_5$  است؛ یعنی زمانی که ۵۰ درصد تحکیم رخ داده است.

﴿ مرحله پنجم: با استفاده از معادله ۴۲-۱۴، مقدار  $T_v$  را در  $U = 50\%$  محاسبه می‌کنیم ( $T_v \cong 0/197$ ). اکنون با جایگذاری  $T_v$  در معادله ۴۱-۱۴ خواهیم داشت:

$$C_v = \frac{0/197 H_{dr}}{t_5} \quad (45-14)$$

<sup>1</sup>. Casagrande and Fadum

<sup>2</sup>. Taylor



شکل ۱۹-۱۴: روش لگاریتم زمان برای تعیین ضریب تحکیم

**۲- روش جذر زمان (روش تیلور)**

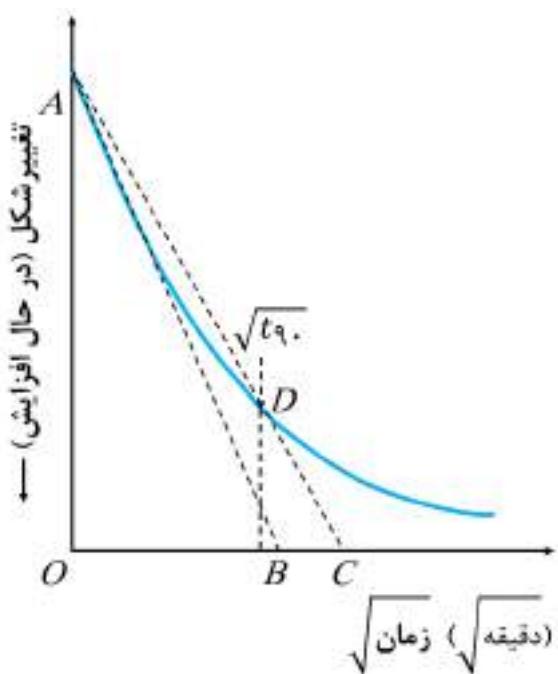
در روش جذر زمان، نمودار تغییر شکل برحسب جذر زمان را برای بارگذاری افزایشی رسم می‌کنیم (شکل ۲۰-۱۴). برای به دست آوردن ضریب تحکیم در این روش، لازم است تا مراحل زیر طی شود:

﴿ مرحله اول: بهترین خط مستقیم را در قسمت اولیه منحنی، رسم می‌کنیم. این خط در شکل ۲۰-۱۴ با AB نشان داده شده است.﴾

﴿ مرحله دوم: یک خط مانند خط AC را طوری رسم می‌کنیم که  $\frac{OC}{OB} = \sqrt{\frac{t_2}{t_1}}$  باشد. خط AC، منحنی آبیرنگ موجود در شکل ۲۰-۱۴ را در نقطه‌ای مانند D قطع می‌کند. زمان متناظر با این نقطه همان  $\sqrt{t_2}$  است.

﴿ مرحله سوم: برای  $90\%$  تحکیم، مقدار  $T_v$  برابر است با  $0.848$  (با جایگذاری مقدار  $90\% = U$  در معادله ۱۴-۴۱ خواهیم داشت: اکنون با جایگذاری  $T_v$  در معادله ۱۴-۴۲ خواهیم داشت:

$$C_v = \frac{0.848 H_{dr}}{t_2} \quad (14-46)$$



شکل ۲۰-۱۴: روش جذر زمان برای تعیین ضریب تحکیم

#### ۲-۱۴) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- دستگاه تحکیم (شکل‌های ۲۱-۱۴ و ۲۲-۱۴)
- ۲- کاردک (شکل ۲۳-۱۴)
- ۳- ترازو با دقیقه ۰/۰۱ گرم (شکل ۲۴-۱۴)
- ۴- ساعت (کرنومتر) (شکل ۲۵-۱۴)
- ۵- ظرف تعیین رطوبت (شکل ۲۶-۱۴)
- ۶- گرم کن (شکل ۲۷-۱۴)
- ۷- کولیس (شکل ۲۸-۱۴)
- ۸- دستگاه هیدرولیکی خارج کردن نمونه‌های دستنخورده از نمونه‌گیر (شکل ۲۹-۱۴)
- ۹- حلقة فلزی به همراه پیچ‌های موجود روی آن و ملحقات دستگاه تحکیم (شکل ۳۰-۱۴)
- ۱۰- بطری پلاستیکی (شکل ۳۱-۱۴)
- ۱۱- کاغذ صافی (شکل ۳۲-۱۴)
- ۱۲- تراز (شکل ۳۳-۱۴)



شکل ۲۱-۱۴: دستگاه آزمایش تحکیم یکبعدی (بار مرده)



شکل ۲۲-۱۴: نوع اتوماتیک دستگاه آزمایش تحکیم یکبعدی



شکل ۲۳-۱۴: کاردک



شکل ۲۵-۱۴: کرنومتر



شکل ۲۴-۱۴: ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم



شکل ۲۷-۱۴: گرم کن



شکل ۲۶-۱۴: ظروف تعیین رطوبت



شکل ۲۸-۱۴: کولیس



شکل ۲۹-۱۴: دستگاه هیدرولیکی خارج کردن نمونه‌های دستنخورده از نمونه‌گیر



شکل ۳۰-۱۴: حلقه فلزی و ملحقات دستگاه تحکیم



شکل ۳۲-۱۴: کاغذ صافی



شکل ۳۱-۱۴: بطری پلاستیکی



شکل ۳۳-۱۴: تراز

### دستگاه آزمایش تحکیم

دستگاه تحکیم دارای یک تحکیم‌سنج و وسیله اعمال نیروست. تحکیم‌سنج به دو صورت موجود است:

الف- با حلقه متحرک<sup>۱</sup> (قسمت (الف) شکل ۳۴-۱۴)

ب- با حلقه ثابت<sup>۲</sup> (قسمت (ب) شکل ۳۴-۱۴)

نوع حلقه متحرک معمولاً از یک حلقه برنجی تشکیل شده است که نمونه خاک داخل آن قرار می‌گیرد. یک سنگ متخلخل در بالا و دیگری در پائین نمونه قرار داده می‌شود. نمونه خاک داخل حلقه را همراه این دو سنگ متخلخل روی صفحه پایه قرار می‌دهند. حلقه پلاستیکی که دور نمونه قرار می‌گیرد، در شیاری که روی صفحه پایه تعییه شده است جا می‌افتد. بار به کمک کلاهک بارگذاری که روی سنگ متخلخل بالایی قرار داده شده است، به نمونه اعمال می‌شود. در تحکیم‌سنج‌هایی که حلقه در آن‌ها ثابت است، همان اجزا وجود دارد؛ از جمله صفحه پایه توخالی، دو سنگ متخلخل و حلقه برنجی برای قرارگیری نمونه. همچنین در این نوع تحکیم‌سنج، حلقه‌ای فلزی وجود دارد که روی صفحه پایه متصل شده و محکم می‌شود. حلقه برنجی دور نمونه خاک داخل این حلقه فلزی قرار می‌گیرد. لوله‌ای را به بدنه صفحه پایه وصل می‌کنیم که از آن برای تعیین نفوذپذیری خاک استفاده می‌شود.

راهنمای شکل ۳۴-۱۴

a- حلقه برنجی

b- سنگ متخلخل

c- صفحه پایه

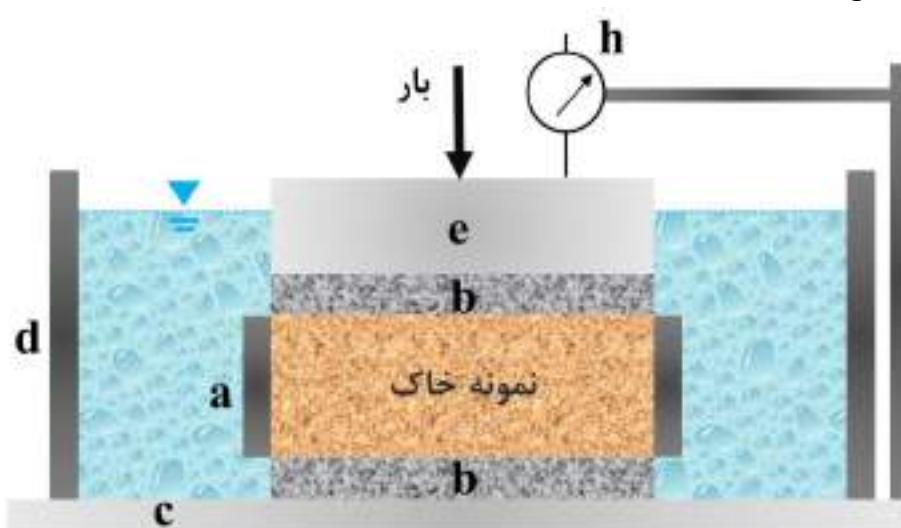
d- حلقه پلاستیکی

e- کلاهک بارگذاری

f- حلقه فلزی

g- لوله

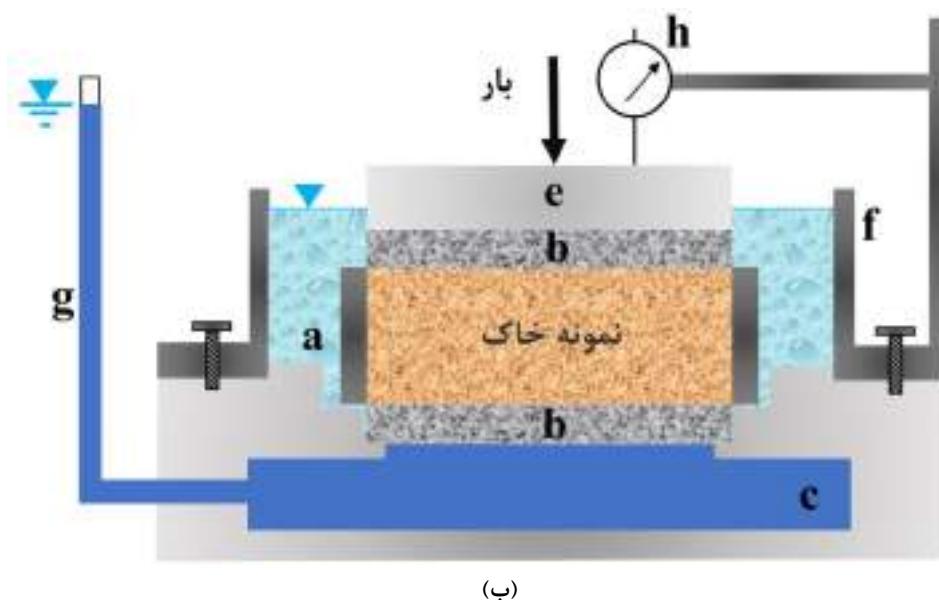
h- گیج (عقربه مدرج)



(الف)

<sup>1</sup>. floating ring consolidometer

<sup>2</sup>. fixed ring consolidometer

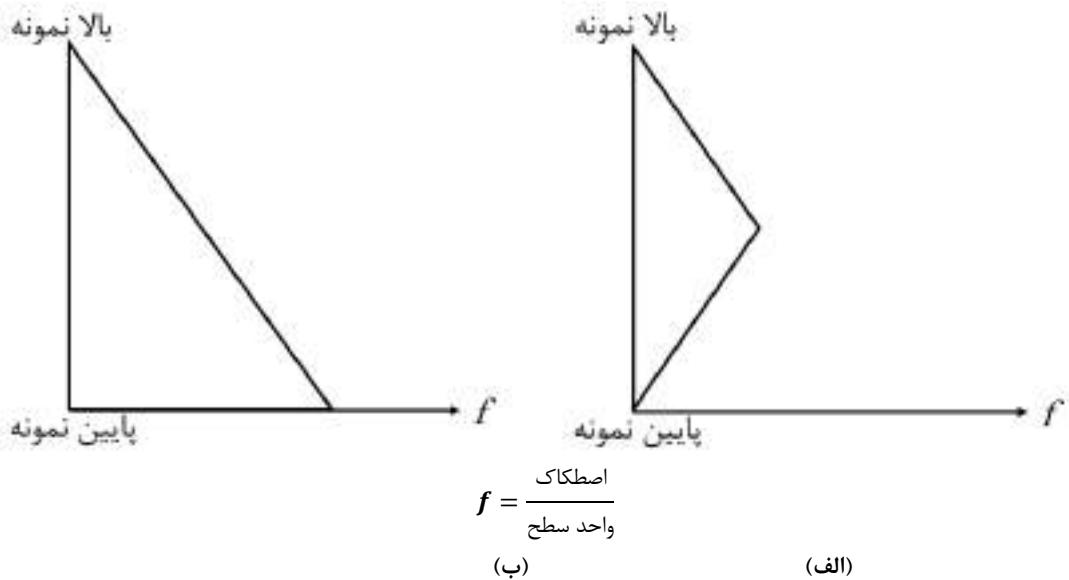


شکل ۳۴-۱۴: تصویر شماتیک (الف) تحکیم‌سنج با حلقة متحرک؛ (ب) تحکیم‌سنج با حلقة ثابت

مشخصات قسمت اعمال نیروی دستگاه تحکیم و گیج اندازه‌گیری تغییر ارتفاع نمونه، بسته به کارخانه سازنده آن فرق می‌کند. شکل ۳۵-۱۴ یک نوع از آن را نشان می‌دهد. وقتی در طی آزمایش تحکیم، بار به نمونه خاک وارد می‌شود، اصطکاک ایجاد شده بین محیط داخل حلقه برنجی و محیط جانبی نمونه برای دو نوع تحکیم‌سنج ذکر شده متفاوت است. این موضوع در شکل ۳۶-۱۴ نشان داده است. در بیشتر موارد، اصطکاک جانبی در حدود ۱۰٪ بار اعمال شده است و معمولاً در تحلیل‌ها از آن صرف نظر می‌شود.



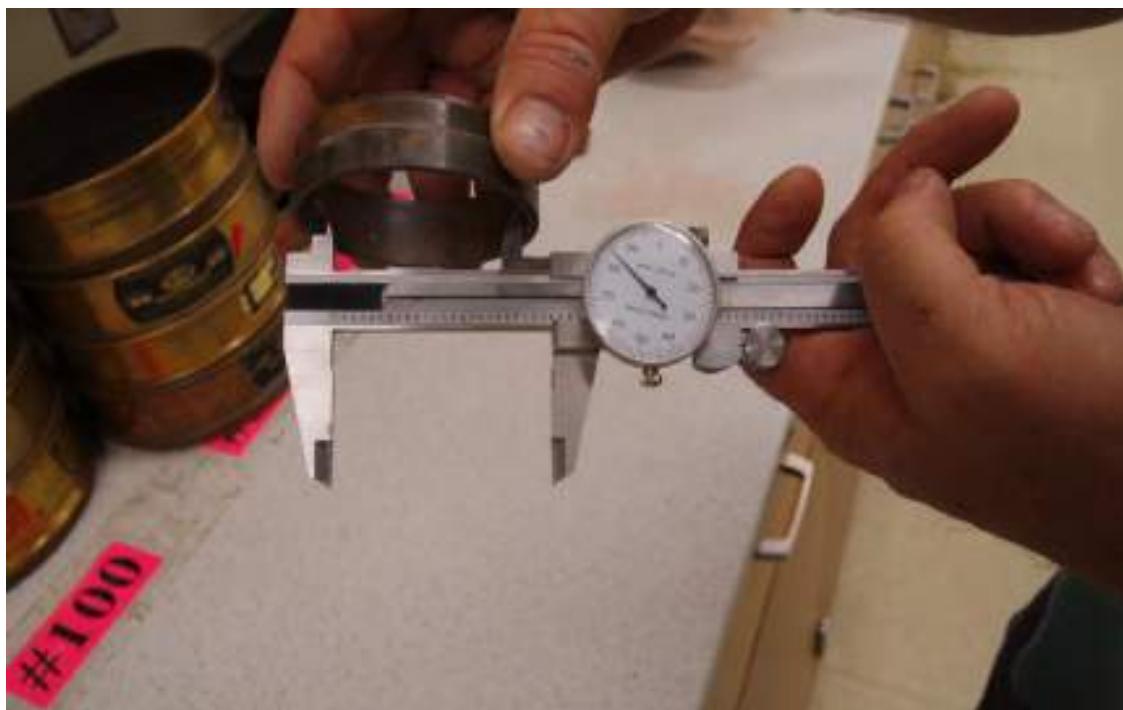
شکل ۳۵-۱۴: دستگاه تحکیم حین آزمایش



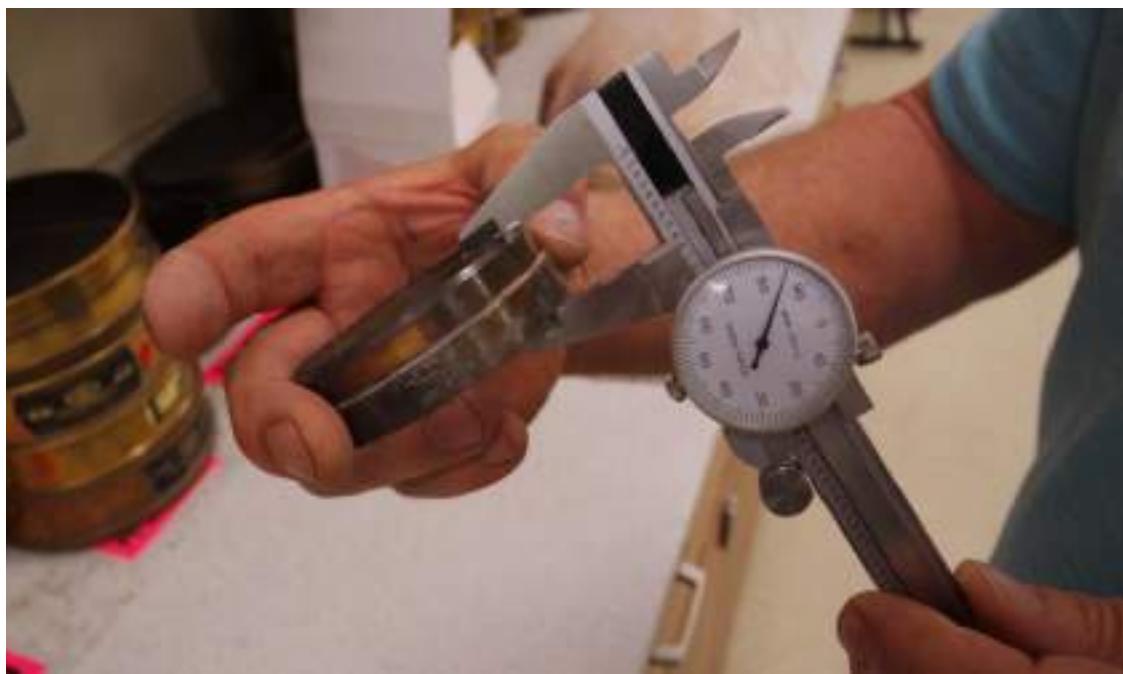
شکل ۱۴-۳۶: تغییرات اصطکاک بین خاک-حلقه در واحد سطح برای (الف) تحکیم سنج با حلقه متحرک؛ (ب) تحکیم سنج با حلقة ثابت

۱۴-۳) روش انجام آزمایش

۱- ابتداء قطر وارتفاع حلقة برنجي دستگاه تحکیم را توسط کولیس اندازه می‌گیریم (شکل‌های ۳۷-۱۴ و ۳۸-۱۴).



شکل ۱۴-۳۷: اندازه‌گیری قطر حلقه برنجی توسط کولیس



شکل ۳۸-۱۴: اندازه‌گیری ارتفاع حلقه برنجی توسط کولیس

- ۲- جرم حلقه برنجی را اندازه می‌گیریم ( $M_1$ ).
- ۳- نمونه خاک را برای آزمایش آماده می‌کنیم؛ به این ترتیب که اطراف (شکل ۳۹-۱۴)، بالا (شکل ۴۰-۱۴) و پایین نمونه را می‌بریم تا اندازه قالب شود و در این نواحی، یک سطح مستطیح حاصل شود. نمونه مذبور را از نمونه طبیعی دست‌خوردهای که به کمک لوله جدار نازک شلبی از محل به دست آمده است، اختخاب و جدا می‌کنیم. قطر لوله نمونه‌گیر شلبی باید در حدود  $\frac{1}{4}$  الی  $\frac{1}{2}$  اینچ ( $6/35$  تا  $12/7$  میلی‌متر) از قطر نمونه لازم برای انجام آزمایش، بیشتر باشد.

تذکر: در آزمایشگاه برای آموزش روش انجام آزمایش، از نمونه دست‌خورده و بازسازی شده استفاده می‌شود.



شکل ۳۹-۱۴: بریدن اطراف نمونه



شکل ۱۴-۴۰: بریدن قسمت بالایی خاک به منظور ایجاد یک سطح مسطح

- ۴- مقداری از خاک اضافی را که هنگام جدا کردن نمونه آزمایش از نمونه به دست آمده از محل، به جا مانده است در ظرف تعیین رطوبت ریخته و درصد رطوبت خاک را تعیین می کنیم.
- ۵- مقداری دیگر از خاک اضافی مرحله ۴ را نیز برای تعیین چگالی ویژه خاک ( $G_s$ ) کنار می گذاریم.
- ۶- جرم حلقه برنجی و نمونه خاک را یادداشت می کنیم ( $M_2$ ). دقیق شود که در این مرحله، جرم حلقه برنجی را همانند شکل اندازه می گیریم (شکل ۱۴-۴۱).



شکل ۱۴-۴۱: اندازه گیری جرم حلقه برنجی و نمونه خاک

۷- سنگ متخلخل پایینی را (که روی صفحه پایه تحکیم‌سنج قرار می‌گیرد) از آب اشباع می‌کنیم (شکل ۴۲-۱۴). در برخی موارد، برای خروج کلیه حباب‌های هوا، سنگ‌های متخلخل را می‌جوشانیم.



شکل ۴۲-۱۴: اشباع کردن سنگ متخلخل با قرار دادن آن داخل ظرف آب

۸- سنگ متخلخل را داخل سلول دستگاه تحکیم و روی صفحه پایه قرار می‌دهیم (شکل ۴۳-۱۴).



شکل ۴۳-۱۴: قرار دادن سنگ متخلخل داخل سلول دستگاه تحکیم

۹- کاغذ صافی را همانند سنگ متخلخل، با قرار دادن در ظرف آب، اشباع می‌کنیم و سپس آن را داخل دستگاه تحکیم قرار می‌دهیم (شکل ۴۴-۱۴).



شکل ۴۴-۱۴: قرار دادن کاغذ صافی داخل سلول دستگاه تحکیم

تذکر: باید کاغذ صافی به گونه‌ای که در شکل ۴۴-۱۴ آورده شده است، روی سنگ متخلخل قرار گیرد تا هیچ‌گونه حباب هوایی ایجاد نشود. برای از بین بردن حباب هوای ایجادشده در این مرحله، روی کاغذ صافی را همانند شکل ۱۴-۴۵ به کمک انگشت دست صاف می‌کنیم. وضعیت نهایی این مرحله در شکل ۴۶-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۴۵: صاف کردن کاغذ صافی داخل سلول دستگاه تحکیم و از بین بردن حباب‌های هوایی ایجادشده



شکل ۴۶-۱۴: وضعیت نهایی کاغذ صافی داخل سلوول دستگاه تحکیم

۱۰- نمونه خاک را که داخل حلقه قرار دارد، روی کاغذ صافی مزبور قرار می‌دهیم (شکل‌های ۴۷-۱۴ و ۴۸-۱۴).



شکل ۴۷-۱۴: قرار دادن نمونه روی کاغذ صافی در سلوول دستگاه تحکیم از نمای جانبی



شکل ۴۸-۱۴: قرار دادن نمونه روی کاغذ صافی در سلول دستگاه تحکیم از نمای بالایی

۱۱- کاغذ صافی اشباع دیگری را روی نمونه مرحله ۱۰ قرار می‌دهیم (شکل ۴۹-۱۴).



شکل ۴۹-۱۴: قرار دادن کاغذ صافی بالایی روی نمونه داخل سلول دستگاه تحکیم

۱۲- سنگ متخلخل بالایی را روی کاغذ صافی و نمونه داخل حلقه می‌گذاریم (شکل ۱۴-۵۰).



شکل ۱۴-۵۰: قرار دادن سنگ متخلخل بالایی روی کاغذ صافی داخل سلول دستگاه تحکیم

۱۳- حلقه فلزی را روی میله‌های مربوط به صفحه پایه تحکیم‌سنج قرار می‌دهیم (شکل ۱۴-۵۱).



شکل ۱۴-۵۱: قرار دادن حلقه بالایی داخل سلول دستگاه تحکیم روی سنگ متخلخل

تذکر: دقت شود که در این مرحله، تمامی لایه‌ها دوباره چک می‌شود تا در مرکز سلول قرار گرفته باشد و چنانچه غیر این باشد، آن‌ها را اصلاح (شکل ۱۴-۵۲) و سپس حلقه فلزی را روی مجموعه سوار می‌کنیم.



شکل ۱۴-۵۲: قرار دادن تمامی لایه‌ها در مرکز سلول دستگاه

۱۴- پیچ‌های حلقة فلزی را می‌بندیم (شکل ۱۴-۵۳).



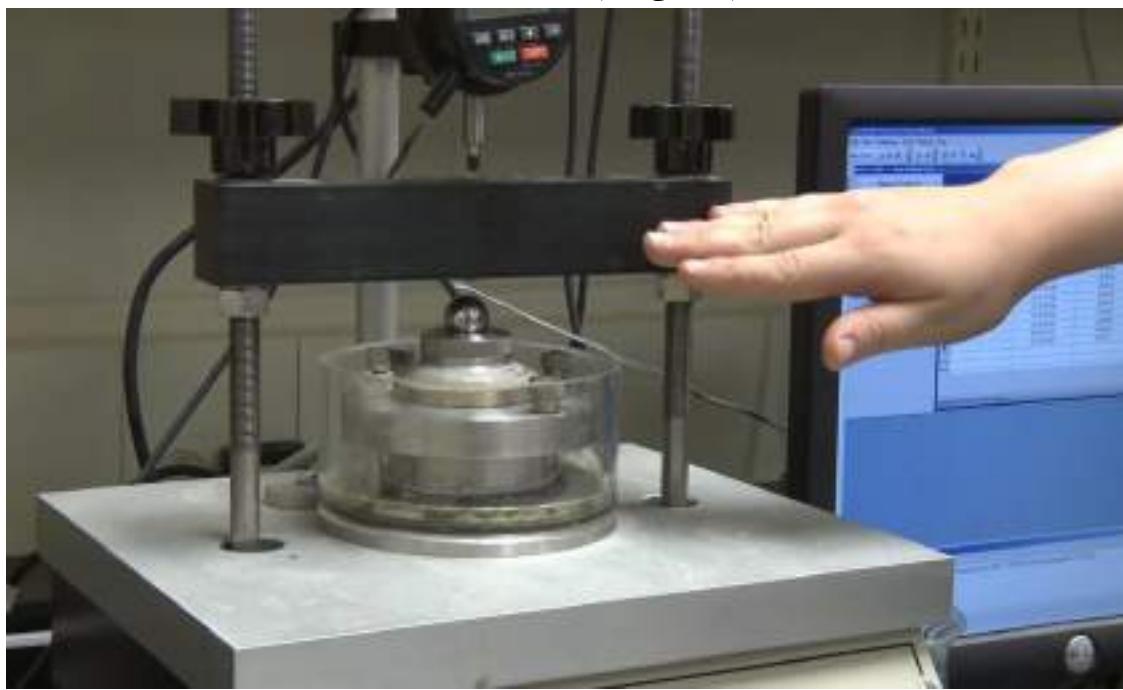
شکل ۱۴-۵۳: بستن پیچ‌های حلقة فلزی

۱۵- کلاهک بارگذاری را روی مجموعه مرحله ۱۴ قرار می‌دهیم (شکل ۵۴-۱۴).



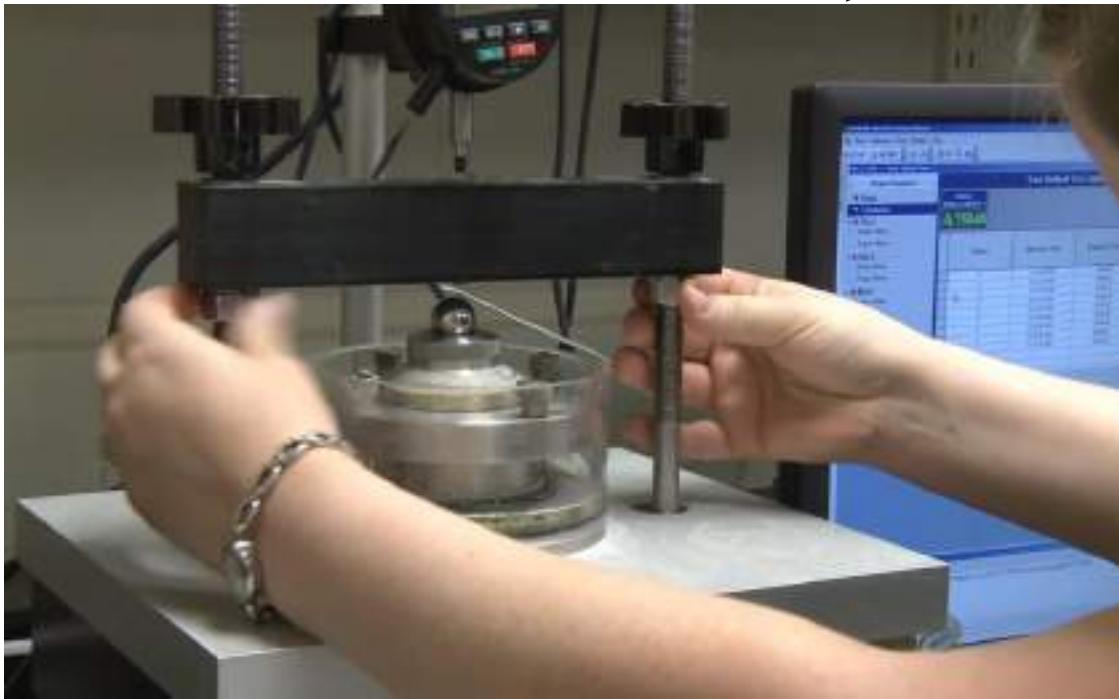
شکل ۵۴-۱۴: قرار دادن کلاهک بارگذاری

۱۶- اکنون سلول را در قاب دستگاه تحکیم قرار می‌دهیم (شکل ۵۵-۱۴).



شکل ۵۵-۱۴: قرار دادن سلول در قاب دستگاه تحکیم

۱۷- به منظور آمادگی دستگاه برای اعمال بار، در این مرحله پیچ‌های میله افقی (میله مشکی افقی شکل ۱۴-۵۶) را باز می‌کنیم تا میله روی گوی نشان‌داده شده در شکل قرار بگیرد (شکل ۱۴-۵۶).



شکل ۱۴-۵۶: باز کردن میله افقی توسط باز کردن پیچ‌های نشان‌داده شده در دو سمت دستگاه

۱۸- پس از تنظیم میله افقی، پیچ‌های بالایی دستگاه را می‌بندیم (شکل ۱۴-۵۷).



شکل ۱۴-۵۷: بستن پیچ‌های بالایی دستگاه

۱۹- برای اطمینان از اینکه میله کاملاً به صورت افقی قرار گرفته باشد، از تراز کمک می‌گیریم (شکل ۱۴-۵۸) و در صورت افقی نبودن میله، بار دیگر پیچ‌ها را تنظیم می‌کنیم (شکل ۱۴-۵۹).



شکل ۱۴-۵۸: چک کردن افقی بودن میله افقی توسط تراز



شکل ۱۴-۵۹: تراز کردن میله افقی توسط تنظیم دوباره پیچ‌ها

۲۰- اکنون داخل سلول تحکیم سنج را از آب پر می‌کنیم (شکل ۱۴-۶۰) تا نمونه خاک در آب غوطه‌ور شود و اشباع باقی بماند. حتماً باید در این مرحله بررسی کنیم که آب، قسمت بالایی سنگ متخلخل را پوشانده باشد (شکل ۱۴-۶۱).



شکل ۶۰-۱۴: اضافه کردن آب



شکل ۶۱-۱۴: بررسی کردن اینکه آب قسمت بالای سنگ متخلخل را پوشانده باشد

۲۱- برای اعمال بار، دستگیره دستگاه را به آرامی می‌چرخانیم تا به مقدار بار مورد نظر بررسیم (شکل ۶۲-۱۴). در این حالت فشار ( $p$ ) روی نمونه باید  $\frac{1}{3} \text{ton}/ft^2$  ( $53/63 \text{kN}/m^2$ ) باشد. در زمان‌های صفر،  $0/25$ ،  $1/25$ ،  $4/25$ ،  $6/25$ ،  $9/25$ ،  $12/25$ ،  $120/25$ ،  $240/25$ ،  $480/25$  و  $1440/25$  دقیقه (۲۴ ساعت)، گیج قائم را می‌خوانیم و اعداد خوانده شده را یادداشت می‌کنیم.

**تذکر:** برای دستگاه‌های غیردیجیتال، اعمال بارگذاری از طریق اضافه کردن وزنه‌ها محقق می‌شود.



شکل ۶۲-۱۴: اعمال بارگذاری

۲۲- روز بعد، بار نمونه را افزایش می‌دهیم به نحوی که فشار روی آن  $107/25 \text{ kN/m}^3$  و  $1 \text{ ton/ft}^2$  شود (دو برابر حالت قبل). در زمان‌های ذکرشده در مرحله ۲۱، اعداد گیج را می‌خوانیم.

تذکرہ: در تمام مراحل این آزمایش، همواره  $1 = \frac{\Delta p}{p}$  است؛ که در آن  $\Delta p$  افزایش فشار و  $p$  فشار قبل از افزایش آن است.

۲۳- مرحله ۲۲ را برای حالتی که فشار  $214/50 \text{ kN/m}^3$  و  $2 \text{ ton/ft}^2$  آن  $429/01 \text{ kN/m}^3$  و  $4 \text{ ton/ft}^2$  باشد تکرار می‌کنیم.

۲۴- در انتهای آزمایش، نمونه را از داخل حلقه برمی‌داریم و در صد رطوبت آن را تعیین می‌کنیم.

#### (۴-۱۴) محاسبات

روش انجام محاسبات که مربوط به نتایج آزمایش تحقیم روی خاک رس است، در ادامه و با توجه به جداول ۱-۱۴ و ۱۴-۲ و شکل‌های موجود در این قسمت توضیح داده می‌شود.

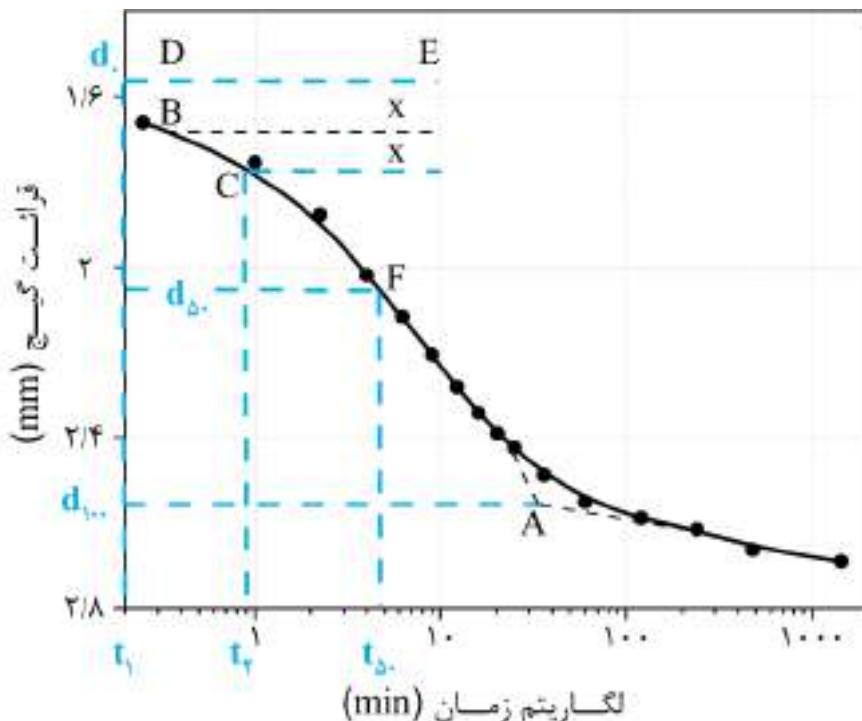
۱- اطلاعات به دست آمده مربوط به زمان و قرائت‌های گیج را جمع‌آوری و در جدول مربوطه ثبت می‌کنیم. جدول ۱۴-۱، نتایج افزایش فشار از  $14-1 \text{ kN/m}^3$  به  $214/50 \text{ kN/m}^3$  و  $p + \Delta p = 429/01 \text{ kN/m}^3$  را نشان می‌دهد.

۲- در قسمت مقدمه این فصل، تئوری روش‌های جذر زمان و لگاریتم زمان، برای تعیین ضریب تحقیم معروفی شد. در این قسمت، با توجه به مراحل ذکرشده در قسمت مقدمه، این محاسبات انجام می‌شود.

#### استفاده از روش لگاریتم زمان

ابتدا با توجه به نتایج موجود در جدول ۱-۱۴، نمودار قرائت گیج قائم را نسبت به تغییرات زمان (در مقیاس لگاریتمی) رسم می‌کنیم. این نمودار در شکل ۶۳-۱۴ نشان داده شده است. با مراجعه به توضیحات ارائه شده در قسمت مقدمه، بخش‌های خط مستقیم تحقیم‌های اولیه و ثانویه را امتداد می‌دهیم تا یکدیگر را در نقطه A قطع کند (قرائت گیج مربوط به این نقطه را  $d_{1..} \text{ می‌نامیم}.$ ). اکنون در قسمت اولیه نمودار شکل ۶۳-۱۴، نقطه B را انتخاب می‌کنیم ( $U < 60\%$ ). سپس، نقطه C مربوط به زمان  $t_2$  را طوری مشخص می‌کنیم که  $t_2 = 4t_1$ . فاصله عمودی بین  $t_1$  و  $t_2$  در شکل ۶۳-۱۴، با X نشان داده شده است. خط افقی DE را به فاصله عمودی X از خط BD رسم می‌کنیم. تغییر شکل مربوط به

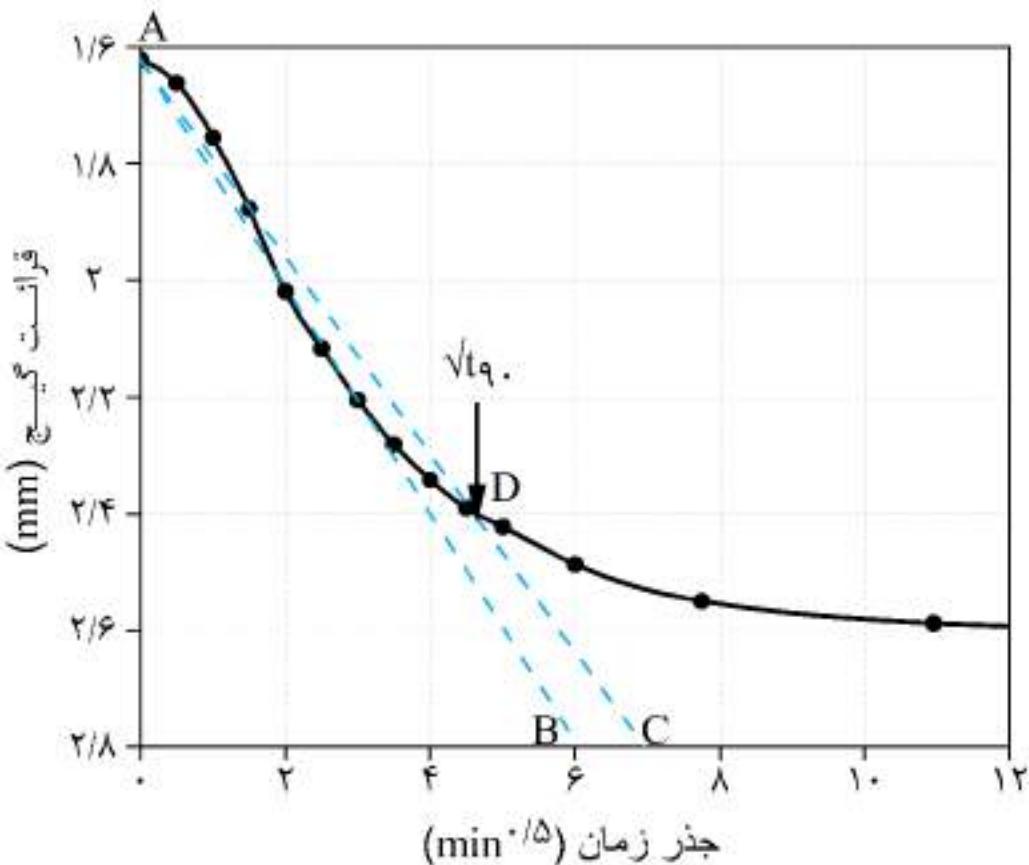
خط DE را با  $d$  نشان می‌دهیم. مقدار  $d_5$  را بر اساس معادله ۴۴-۱۴ روی منحنی تغییر شکل پیدا می‌کنیم ( نقطه F). زمان متناظر با این نقطه همان  $t_5 = 14/9 \text{ min}$  است. در شکل ۶۳-۱۴ ادامه محاسبات این بخش برای به دست آوردن ضریب تحکیم در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.



شکل ۶۳-۱۴؛ منحنی تغییرات قرائت گیج قائم، نسبت به لگاریتم زمان، برای نتایج مندرج در جدول ۱۴-۱ (روش لگاریتم زمان)

#### استفاده از روش جذر زمان

ابتدا با توجه به نتایج موجود در جدول ۱۴-۱، نمودار قرائت گیج قائم را نسبت به جذر زمان رسم می‌کنیم. این نمودار در شکل ۶۴-۱۴ نشان داده شده است. سپس با توجه به توضیحات قسمت مقدمه، خط AB و سپس خط AC را رسم می‌کنیم. محل تقاطع خط AC با منحنی در شکل ۶۴-۱۴ با نقطه D نشان داده شده است. زمان متناظر با این نقطه همان  $\sqrt{t_9}$  است که در این محاسبات براساس شکل مذکور،  $4/75$  است. در این صورت مقدار  $t_9$  برابر است با  $4/75^2$ . ادامه محاسبات این بخش برای به دست آوردن ضریب تحکیم در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱۴-۱۴: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم، نسبت به جذر زمان، برای نتایج مندرج در جدول ۱-۱۴ (روش جذر زمان)

- ۳- اطلاعات به دست آمده برای افزایش فشارهای مختلف را در ستون های ۱، ۲، ۸ و ۹ جدول ۲-۱۴ وارد می کنیم.
- ستون های ۱ و ۲ از جدولی مانند جدول ۱-۱۴ به دست می آید و ستون های ۸ و ۹ بر اساس مرحله ۲ به دست می آید.
- ۴- ضخامت بخش جامد نمونه داخل قالب را با توجه به جدول ۲-۱۴ به دست می آوریم:

$$H_s = \frac{W_s}{\left(\frac{\pi}{4} D^2\right) G_s \gamma_w} \quad (47-14)$$

: ضخامت بخش جامد خاک  $H_s$

: وزن بخش جامد خاک  $W_s$

: قطر نمونه  $D$

: چگالی ویژه دانه های جامد خاک  $G_s$

: وزن مخصوص آب  $\gamma_w$

- ۵- در جدول ۲-۱۴، تغییرات ضخامت نمونه ( $\Delta H$ ) در اثر افزایش بار از مقدار  $p$  به  $p + \Delta p$  (ستون ۳) را تعیین می کنیم.
- به عنوان مثال:

$$p = 53/63 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{قرائت گیج} = 0.719 \text{ mm}$$

$$p + \Delta p = 107/25 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{قرائت گیج} = 0.904 \text{ mm}$$

بنابراین داریم:

$$\Delta H = 0.904 - 0.719 = 0.185 \text{ mm}$$

۶- ضخامت نهایی نمونه  $H_{t(f)}$  در انتهای تحکیم ناشی از یک افزایش بار معین را تعیین می‌کنیم (ستون ۴ در جدول ۱۴-۲). به عنوان مثال در جدول ۲-۱۴،  $H_{t(f)} = ۵۳/۶۳ \text{ kN/m}^3$  در  $p = ۵۳/۶۳ \text{ kN/m}^3$  برابر با  $p = ۱۰/۷/۲۵ \text{ kN/m}^3$  است. لذا  $H_{t(f)} = ۱۰/۷/۲۵ \text{ kN/m}^3$  تا  $۵۳/۶۳ \text{ kN/m}^3$  برابر با  $p = ۱۰/۷/۲۵ \text{ kN/m}^3$  است با:

$$H_{t(f)} = ۲۵/۱۸۹ - ۰/۱۸۵ = ۲۵/۰۰۴ \text{ mm}$$

۷- ضخامت منافذ ( $H_v$ ) در نمونه، در انتهای تحکیم در اثر یک بار مشخص مانند  $p$  به قرار زیر است (ستون ۵ در جدول ۱۴-۲):

$$H_v = H_{t(f)} - H_s \quad (۴۸-۱۴)$$

۸- نسبت تخلخل نهایی در انتهای تحکیم برای هر بارگذاری مانند  $p$  به صورت زیر به دست می‌آید (ستون ۶ در جدول ۱۴-۲):

$$e = \frac{H_v}{H_s} \quad (۴۹-۱۴)$$

۹- ضخامت متوسط نمونه را ( $H_{t(av)}$ ) در طی تحکیم برای هر افزایش بار تعیین می‌کنیم (ستون ۷ در جدول ۲-۱۴).

۱۰- در روش لگاریتم زمان، ضریب تحکیم (ستون ۱۱ در جدول ۲-۱۴) را برای  $t_5$  (ستون ۹) به صورت زیر تعیین می‌کنیم.

$$C_v = \frac{۰/۱۹۷ H_{t(av)}}{۴ t_5} \quad (۵۰-۱۴)$$

به عنوان مثال، برای افزایش بار از  $p = ۱۰/۷/۲۵ \text{ kN/m}^3$  تا  $p = ۵۳/۶۳ \text{ kN/m}^3$  مقادیر زیر را داریم:  
 $H_{t(av)} = ۲۵/۰/۹۸ \text{ mm}$  و  $t_5 = ۵۶ \text{ s}$

لذا ضریب تحکیم برابر می‌شود با:

$$C_v = \frac{۰/۱۹۷ (۲۵/۰/۹۸)}{۴ \times ۵۶} = ۵/۵۴ \times 10^{-۷} \text{ m}^3/\text{s} \quad (۵۱-۱۴)$$

۱۱- در روش جذر زمان، ضریب تحکیم (ستون ۱۰ جدول ۲-۱۴) را برای  $t_9$  (ستون ۸) به صورت زیر تعیین می‌کنیم.

$$C_v = \frac{۰/۸۴۸ H_{t(av)}}{۴ t_9} \quad (۵۲-۱۴)$$

به عنوان مثال، برای افزایش بار از  $p = ۱۰/۷/۲۵ \text{ kN/m}^3$  تا  $p = ۵۳/۶۳ \text{ kN/m}^3$  مقادیر زیر را داریم:  
 $H_{t(av)} = ۲۵/۰/۹۸ \text{ mm}$  و  $t_9 = ۳۰.8 \text{ s}$

بنابراین ضریب تحکیم در این حالت برابر می‌شود با:

$$C_v = \frac{0.848 (25/0.98)^3}{4 \times 30.8} = 4/35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (53-14)$$

۱۲- اکنون منحنی نسبت تخلخل نهایی بر حسب لگاریتم فشار (ستون ۶ نسبت به ستون ۱ در جدول ۲-۱۴) را رسم می‌کنیم. به عنوان نمونه، نتایج مندرج در جدول ۲-۱۴ در شکل ۶۵-۱۴ رسم شده است.  
تذکر: منحنی در قسمت اولیه انحنا داشته و سپس شکل خطی پیدا می‌کند.

۱۳- شاخص فشردگی ( $C_c$ )، یعنی شیب قسمت خطی (عادی تحکیم یافته) منحنی  $p - \log p$  (مرحله ۱۲) را به دست می‌آوریم. با توجه به شکل ۶۵-۱۴ داریم:

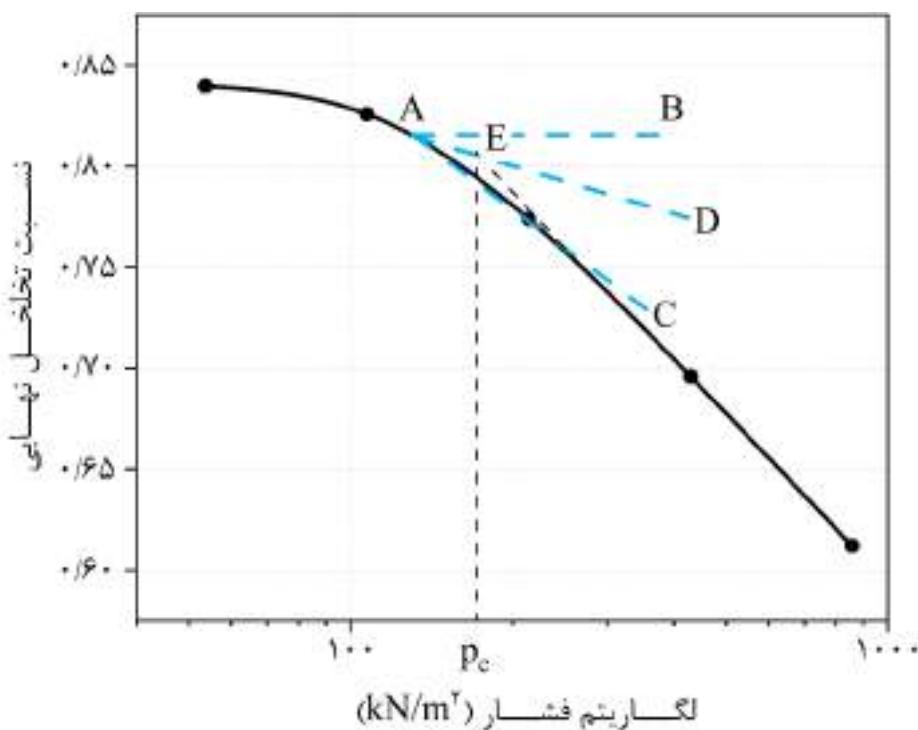
$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{p_2}{p_1}} = \frac{0.696 - 0.612}{\log \frac{858/0.1}{429/0.1}} = 0.28 \quad (54-14)$$

۱۴- فشار پیش تحکیمی ( $p_c$ ) را با روش کاساگرانده تعیین می‌کنیم. برای تعیین فشار پیش تحکیمی، ابتدا نقطه A روی منحنی شکل ۶۵-۱۴ را که دارای کمترین شعاع انحنایست، تعیین می‌کنیم. سپس خط AB را به صورت افقی و آنگاه خط AC را مماس بر منحنی رسم می‌کنیم. اکنون نیمساز زاویه BAC را رسم کرده (خط AD) و قسمت خطی انتهای منحنی را ادامه می‌دهیم تا نیمساز زاویه یعنی خط AD را در نقطه E قطع کند. تصویر E روی محور افقی همان فشار پیش تحکیمی است. در شکل ۶۵-۱۴،  $kN/m^2 = P_c = 171/60$

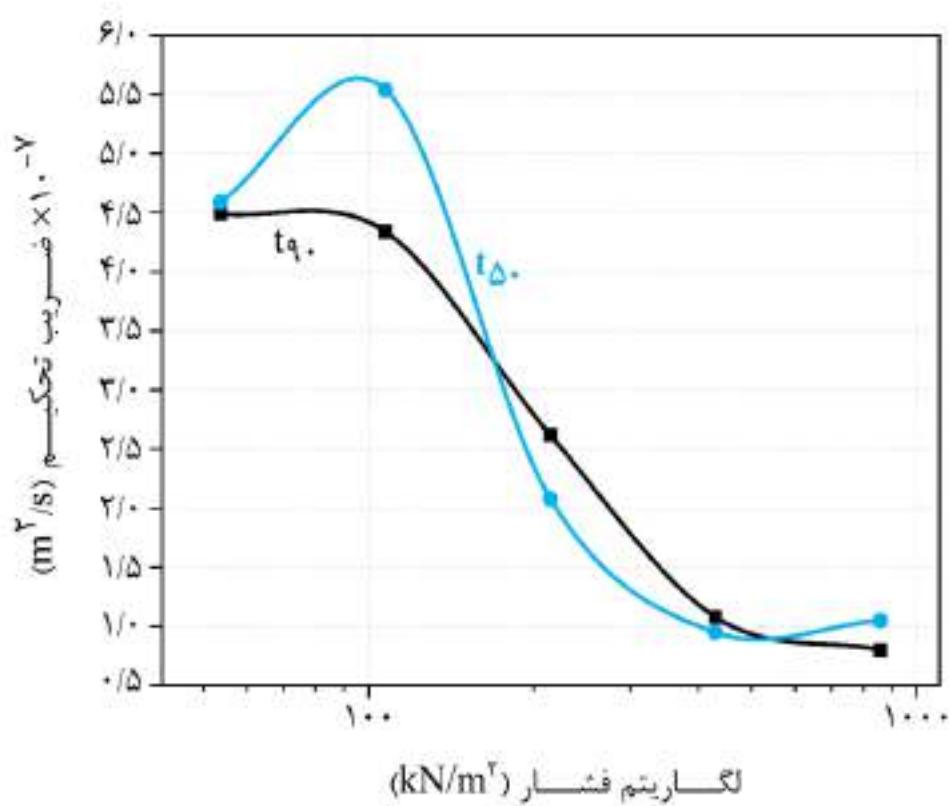
۱۵- پس از محاسبه مقدار فشار پیش تحکیمی، همان طور که در قسمت مقدمه این فصل و شکل ۱۴-۱۴ توضیح داده شد، می‌توانیم مقدار ضریب تورم یا  $C_s$  را نیز محاسبه کنیم که در این صورت داریم:

$$C_s = \frac{e_s - e_c}{\log \frac{p_c}{p_s}} = \frac{0.84 - 0.81}{\log \frac{171/60}{53/63}} = 0.059 \quad (55-14)$$

۱۶- در محورهای مختصات نیمه لگاریتمی، منحنی تغییرات مقادیر  $C_v$  بر حسب لگاریتم فشار را رسم می‌کنیم (ستون ۱۰ و ۱۱ از جدول ۲-۱۴). به عنوان مثال، نتایج به دست آمده در جدول ۲-۱۴، در شکل ۶۶-۱۴ رسم شده است.  
تذکر: مقادیر  $C_v$  بر اساس مقادیر متوسط  $p$  یعنی  $\frac{p_1 + p_2}{2}$  یا به عبارت دیگر بر حسب میانگین فشارها، رسم شده است.



شکل ۱۴-۶۵: منحنی تغییرات  $e - \log p$  برای نتایج مندرج در جدول ۲-۱۴ به منظور محاسبه فشار پیش تحکیمی



شکل ۱۴-۶۶: منحنی تغییرات  $C_v - \log p$  برای نتایج مندرج در جدول ۲-۱۴

## جدول ۱-۱۴: آزمایش تحکیم

زمان بر حسب فرائت ارتفاع (قائم)

نوع خاک: خاک رس قهقهه‌ای روشن

 محل نمونه‌گیری: سامیت درایو<sup>۱</sup>

شخص نمونه‌گیری: ...../...../.....

فشار روی نمونه: ۳۸۳/۰.۴ kN/m<sup>۲</sup>

فرائت گیج قائم (mm)	$(min)^{\frac{1}{2}} \sqrt{t}$	زمان بعد از اعمال بار (min)
۱/۶۲۱	.	.
۱/۶۶۱	۰/۵	۰/۲۵
۱/۷۵۵	۱	۱
۱/۸۷۷	۱/۵	۲/۲۵
۲/۰۱۹	۲	۴
۲/۱۱۶	۲/۵	۶/۲۵
۲/۲۰۵	۳	۹
۲/۲۸۱	۳/۵	۱۲/۲۵
۲/۳۴۲	۴	۱۶
۲/۳۹۰	۴/۵	۲۰/۲۵
۲/۴۲۳	۵	۲۵
۲/۴۸۷	۶	۳۶
۲/۵۵۰	۷/۷۵	۶۰
۲/۵۸۸	۱۰/۹۵	۱۲۰
۲/۶۱۴	۱۵/۴۹	۲۴۰
۲/۶۶۲	۲۱/۹۱	۴۸۰
۲/۶۹۰	۳۷/۹۵	۱۴۴۰

<sup>1</sup>. Summit Drive

$C_v \times 10^{-v} (m^r/s)$	(S)	زمان	ضخامت متوسط در طی $H_{t(av)} \times 10^{-r} (m)$	نسبت تخلخل	ضخامت منفذ، $H_v \times 10^{-r} (m)$	ضخامت نهایی نمونه، $H_{t(f)} \times 10^{-r} (m)$	تغییر ضخامت نمونه $\times 10^{-3} (m)$	قراءت نهایی گیج $\times 10^{-3} (m)$	فشار، $p(kN/m^r)$
۴/۴۹	۴/۰۹	۳۰۲	۵۷/۸	۲۵/۲۹۶	۰/۸۴	۱۱/۴۹۹	۲۵/۱/۸۹	۰/۷۱۹	۵۱/۶۳
۴/۳۴	۵/۰۴	۳۰۸	۵۶	۲۵/۰/۹۸	۰/۸۲۴	۱۱/۳۱۲	۲۵/۰/۰۴	۰/۹۰۴	۱۰/۷/۲۵
۲/۶۲	۲/۰۸	۴۹۲	۱۴۴	۲۴/۶۴۶	۰/۷۷۴	۱۰/۵۹۷	۲۴/۲۸۷	۰/۱۶۲	۲۱۴/۱۷.
۱/۰۸	۱/۹۵	۱۱۰۲	۲۹۴	۲۳/۷۵۴	۰/۶۹۰	۹/۵۲۸	۲۳/۲/۱۸	۱/۶۹	۲۱۴/۱.
۱/۸۰	۱/۰۸	۱۳۵۴	۲۶۰	۲۲/۶۴۲	۰/۶۱۲	۲۲/۰/۶۲	۲۲/۰/۶۲	۱/۱۵۶	۴۲۹/۰۱
									۱/۸/۴۶
									۱/۸/۱۰۱

جدول ۱۴-۲: آزمایش تحریک  
نسبت تخلخل - فشار و محاسبه ضربی تحریک  
 محل نمونه گیری: سامانه درایو

ارتفاع قسمت حامد،  $G_s$  in  $H_{t(f)}$  از  $16/774$  وزن خشک نمونه:  $16/774$  از  $16/774$  در انتهای آزمایش:  $16/774$  از  $16/774$  ارتفاع اولیه نمونه ( $H_{t(i)}$ ) in  $16/54$  cm (۰/۵۴ cm) در صد رطوبت، در شروع آزمایش:  $16/774$  از  $16/774$  قطر نمونه:  $2/5$  in (۵/۳۵ cm)

نوع خاک: خاک رس قهقهای روشن  
دراصد رطوبت، در شروع آزمایش:  $16/774$  از  $16/774$

### ۱۴-۵) نکات کلی

۱- مقدار ضریب فشردگی،  $C_c$ ، از خاکی به خاک دیگر متفاوت است. روابط تجربی زیادی برای تخمین  $C_c$  در انواع مختلف خاک‌ها ارائه شده است. در جدول زیر، فهرستی از برخی از این روابط آمده است.

جدول ۱۴-۳: خلاصه‌ای از روابط تجربی برای تخمین  $C_c$  در انواع مختلف خاک‌ها

نوع خاک	رابطه
رس بازسازی شده	$C_c = 0.007(LL - \gamma)$
رس دست‌تخرورده	$C_c = 0.009(LL - 10)$
تمام رس‌ها	$C_c = 0.015(e_r - 0.27)$
رس بوزیلی	$C_c = 0.0046(LL - 9)$
رس شیکاگو	$C_c = 0.208e_r + 0.0083$

تذکر: در جدول بالا،  $e_r$  نسبت تخلخل خاک در محل و  $LL$  حد روانی خاک است.

۲- ضریب قابلیت فشردگی حجمی ( $m_v$ ) نشان‌دهنده نرمی خاک رس است؛ بنابراین عکس آن ( $\frac{1}{m_v}$ ) نشان‌دهنده سختی خاک رس است و به آن «مدول سختی» می‌گویند.



## فصل پانزدهم

آزمایش تورم و فشار تورم (ASTM D4546)

### ۱-۱۵) مقدمه و تئوری آزمایش

این آزمایش برای اندازه‌گیری یک بعدی تورم ناشی از خیس شدن نمونه‌های بازسازی شده انجام می‌شود و شرایط محیطی برای خاک‌های فشرده را شبیه‌سازی می‌کند. اندازه‌گیری میزان فشار تورم (حداقل تنش عمودی مورد نیاز برای جلوگیری از تورم) و تورم آزاد (درصد تورم تحت فشار ۱ کیلو پاسکال یا ۲۰ پوند بر فوت مربع) از نتایج این آزمایش است. داده‌های به دست آمده از این آزمایش می‌تواند برای تخمین بالا زدگی یا نشت در حالت یک بعدی روی سطح زمین (در مجاورت رطوبت کامل) مورد استفاده قرار گیرد.

### ۲-۱۵) وسائل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- دستگاه تحکیم (شکل‌های ۱-۱۵ و ۲-۱۵)
- ۲- کاردک (شکل ۳-۱۵)
- ۳- ترازو با دقیق ۰/۰۱ گرم (شکل ۴-۱۵)
- ۴- ساعت (کرنومتر) (شکل ۵-۱۵)
- ۵- ظرف تعیین رطوبت (شکل ۶-۱۵)
- ۶- گرم کن (شکل ۷-۱۵)
- ۷- کولیس (شکل ۸-۱۵)
- ۸- حلقة فلزی همراه پیچ‌های موجود روی آن و ملحقات دستگاه تحکیم (شکل ۹-۱۵)
- ۹- بطری پلاستیکی (شکل ۱۰-۱۵)
- ۱۰- کاغذ صافی (شکل ۱۱-۱۵)
- ۱۱- تراز (شکل ۱۲-۱۵)
- ۱۲- وزنه معادل با بار ۱ کیلو پاسکال (شکل ۱۳-۱۵)



شکل ۱-۱۵: دستگاه آزمایش تحکیم یک بعدی (بار مرده)



شکل ۲-۱۵: نوع اتوماتیک دستگاه آزمایش تحکیم یکبعدی



شکل ۳-۱۵: کاردک



شکل ۱۵-۵: کرنومتر



شکل ۱۵-۴: ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم



شکل ۱۵-۷: گرم کن



شکل ۱۵-۶: ظروف تعیین رطوبت



شکل ۱۵-۸: کولیس



شکل ۹-۱۵: حلقه فلزی و ملحقات دستگاه تحکیم



شکل ۱۰-۱۵: کاغذ صافی



شکل ۱۱-۱۵: بطری پلاستیکی



شکل ۱۲-۱۵: تراز



شکل ۱۳-۱۵: وزنه معادل با یک کیلو پاسکال

### ۳-۱۵) روش انجام آزمایش

۱- ابتدا قطر و ارتفاع حلقه برنجی دستگاه تحکیم را توسط کولیس اندازه می‌گیریم (شکل‌های ۱۴-۱۵ و ۱۵-۱۵).



شکل ۱۴-۱۵: اندازه‌گیری قطر حلقه برنجی توسط کولیس



شکل ۱۵-۱۵: اندازه‌گیری ارتفاع حلقه برنجی توسط کولیس

۲- بر اساس ابعاد قالب رینگ دستگاه، نمونه خاک را با توجه به رطوبت بهینه و دانسیته ماسکیمم (و یا رطوبت و دانسیته از پیش تعیین شده) برای آزمایش آماده می‌کنیم؛ باید توجه داشت که نمونه‌ها باید حداقل قطر ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) و حداقل ارتفاع ۲۰ میلی‌متر (۰/۸ اینچ) داشته باشد. ارتفاع نمونه و قطر قالب باید حداقل با دقت ۰/۰۲۵ میلی‌متر (۰/۰۰۱ اینچ) اندازه‌گیری شود. همچنین، ارتفاع نمونه باید حداقل ۶ برابر بزرگ‌تر از بزرگ‌ترین اندازه ذرات داخل نمونه باشد.

**تذکر:** از آنجایی که قالب‌های آزمایشگاهی معمولاً اندازه کوچکی دارد، برای آماده‌سازی نمونه، خاک را از الک ۴/۷۵ میلی‌متری (شماره ۴) یا الک ۲ میلی‌متری (شماره ۱۰) عبور می‌دهیم و با خاک عبوری نمونه‌سازی انجام می‌شود. ذرات درشتی که روی این الک‌ها قرار می‌گیرد، «اندازه بزرگ<sup>۱</sup>» نامیده می‌شود.

۳- سپس روند قرارگیری نمونه در دستگاه را همان گونه که در آزمایش تحکیم بیان شد، طی مراحل ۷ تا ۱۹ انجام می‌دهیم. پس از طی این مراحل، قالب حاوی نمونه را درون دستگاه قرار می‌دهیم. باید توجه داشت که برای اندازه‌گیری تورم آزاد نمونه‌ها نیاز است که قبل از قرار دادن ساعت انديکاتور برای قرائت تورم نمونه، یک وزنه روی آن قرار داده شود که باري معادل ۱ کیلو پاسکال (۲۰ پوند بر فوت مربع) به نمونه وارد نماید. سپس ساعت انديکاتور را روی آن به نحوی قرار می‌دهیم که عقربه آن روی صفر تنظیم شود و سپس پیچ پشت آن را محکم می‌بندیم (شکل ۱۵-۱۶).

۱. Oversize



شکل ۱۶-۱۵: دستگاه تورم آماده آزمایش با قرارگیری نمونه وزنه معادل ۱ کیلو پاسکال روی آن

تذکر: برای ایجاد سطوح تنش مختلف روی نمونه، می‌توان قبل از انجام آزمایش تورم، میزان بار وارد بر نمونه را به تدریج افزایش داد. ترتیب این بارگذاری می‌تواند به صورت ۱، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال باشد. مقادیر تنش باید به گونه‌ای انتخاب شود که نمایانگر عمق موجود نظر خاک در پروژه باشد. لازم به ذکر است که فشار عمودی در یک عمق معین برابر است با مجموع فشار خاک‌های موجود روی آن، به اضافه تنش‌های ناشی از بارهای سازه‌ای. همچنین برای جلوگیری از خشک شدن نمونه‌ها، لازم است که تنش روی نمونه در فواصل ۵ تا ۱۰ دقیقه افزایش داده شود و زمان بارگذاری کلی از یک ساعت فراتر نرود. درنهایت میزان فشرده‌گی مشاهده شده در هر مرحله را یادداشت می‌نماییم.

۴- پس از ثبت مقدار فشرده‌گی، داخل قالب حاوی نمونه را با آب پر می‌کنیم و تغییر شکل را در فواصل زمانی ۰، ۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه و سپس ۱، ۲، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت و به همین ترتیب (معمولًاً ۲۴ تا ۷۲ ساعت) یادداشت می‌کنیم. به عبارت دیگر، این قرائت‌ها را تا زمانی ادامه می‌دهیم که تغییرات حجمی تورم اولیه کامل شود و تغییرات در خواندن تغییر شکل برای فاز تورم بسیار کم شود. درنهایت بعد از اتمام تورم، مقدار نهایی تورم ناشی از خیس شدن را ثبت می‌کنیم (شکل ۱۷-۱۵).

تذکر: لازم به ذکر است که در این مرحله، آزمایش تورم تمام شده است و بقیه مراحل برای به دست آوردن فشار تورم (در صورت تمایل) انجام می‌شود.

۵- برای انجام آزمایش فشار تورم روی نمونه تورم یافته، کافیست تا مراحل ۲۱ تا ۲۴ از آزمایش تحکیم که پیشتر بیان شد، انجام شود. باید توجه داشت که عمل بارگذاری را تا جایی ادامه می‌دهیم که ارتفاع نمونه به میزان اولیه خود بازگردد. به عبارت دیگر، تمام میزان تغییراتی که در کرنش نمونه اتفاق افتاده است، در ساعت اندیکاتور باید به طور برعکس حرکت کرده و به قرائت اولیه در لحظه شروع آزمایش تورم برسد (شکل ۱۸-۱۵).



شکل ۱۸-۱۵: ساعت اندیکاتور در انتهای آزمایش فشار تورم  
(بازگشت عقربه ها روی صفر)



شکل ۱۷-۱۵: ساعت اندیکاتور در انتهای آزمایش تورم و ابتدای آزمایش فشار تورم

#### ۴-۱۵) محاسبات

۱- اگر درصد ذرات اندازه‌بزرگ قابل توجه باشد (بیش از ۵ درصد درشت‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر)، تصحیح اندازه‌بزرگ مطابق با روابط ۱-۱۵ و ۲-۱۵ را می‌توان برای محاسبه میزان آب و چگالی خشک بخش ذرات ریز در آماده‌سازی نمونه مورد استفاده قرار داد.

$$w_f = \frac{(w_t - w_c \cdot P_c)}{(1 - P_c)} \quad (1-15)$$

$$\rho_{df} = \frac{(1 - P_c) \cdot G_c \cdot \rho_{dt} \cdot \rho_w}{(G_c \cdot \rho_w - P_c \cdot \rho_{dt})} \quad (2-15)$$

$w_f$ : میزان آب بخش ریز مورد استفاده در نمونه‌های ساخته شده

$w_t$ : میزان آب کل خاک

$w_c$ : میزان آب بخش اندازه‌بزرگ

$P_c$ : بخش مواد بزرگ‌تر بر حسب جرم خشک

$\rho_{df}$ : دانسیته خشک بخش ریز خاک ( $Mg/m^3$  یا  $g/cm^3$ )

$\rho_{dt}$ : دانسیته خشک کل خاک ( $Mg/m^3$  یا  $g/cm^3$ )

$\rho_w$ : دانسیته آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ( $Mg/m^3$  یا  $g/cm^3$ )

$G_c$ : چگالی ویژه بالک<sup>۱</sup> بخش اندازه‌بزرگ

درصد بخش اندازه‌بزرگ،  $P_c$ ، در معادله‌های بالا، نسبت جرم خشک بخش اندازه‌بزرگ به کل جرم خشک است.

۲- از ارتفاع نمونه، قطر، جرم، میزان آب و وزن مخصوص دانه‌های جامد اندازه‌گیری شده، چگالی اولیه، چگالی خشک اولیه و درجه اشباع اولیه برای هر نمونه با فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

۱. Bulk specific gravity

$$\rho_1 = \frac{M}{V} \quad (3-15)$$

$$\rho_{d1} = \frac{\rho_1}{1 + w_1} \quad (4-15)$$

$$S_1 = \frac{1 + w_1 \times G_s \times \rho_{d1}}{G_s \rho_w - \rho_{d1}} \quad (5-15)$$

$M$ : وزن نمونه (g)  
 $V$ : حجم نمونه ( $\text{cm}^3$ )  
 $\rho_1$ : دانسیته بالک یا تر ( $\text{Mg/m}^3$  یا  $\text{g/cm}^3$ )  
 $\rho_{d1}$ : دانسیته خشک ( $\text{Mg/m}^3$  یا  $\text{g/cm}^3$ )  
 $w_1$ : میزان رطوبت اولیه  
 $S_1$ : درجه اشباع اولیه  
 $\rho_w$ : دانسیته آب در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد ( $\text{Mg/m}^3$  یا  $\text{g/cm}^3$ )  
 $G_s$ : چگالی دانه های جامد نمونه ساخته شده  
۳- درجه اشباع نهایی از طریق روابط زیر محاسبه می شود:

$$h_1 = h - \Delta h_1 \quad (6-15)$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h_2 \quad (7-15)$$

$$\rho_{d2} = \rho_{d1} \frac{h}{h_2} \quad (8-15)$$

$$S_2 = \frac{1 + w_2 \times G_s \times \rho_{d2}}{G_s \rho_w - \rho_{d2}} \quad (9-15)$$

$h$ : ارتفاع اولیه نمونه (mm)  
 $\Delta h_1$ : میزان فشردنی نمونه بعد از اعمال تنش و پیش از خیس شدن نمونه (mm)  
 $h_1$ : ارتفاع نمونه پیش از خیس شدن (mm)  
 $\Delta h_2$ : میزان تغییر ارتفاع نمونه بعد از خیس شدن (mm)  
 $h_2$ : ارتفاع نهایی نمونه بعد از خیس شدن (mm)  
 $\rho_{d2}$ : دانسیته خشک نهایی ( $\text{Mg/m}^3$  یا  $\text{g/cm}^3$ )  
 $S_2$ : درجه اشباع نهایی  
 $w_2$ : میزان آب نهایی

تذکرہ: به طور معمول، درجات اشباع کمتر از ۱۰۰٪ خواهد بود؛ زیرا غوطه ور شدن نمونه در آزمایشگاه باعث اشباع ۱۰۰٪ خاک غیر اشباع نمی شود.

۴- کرنش تورم (درصد تورم) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon_s = \frac{1 + \Delta h_2}{h_1} \quad (10-15)$$

$\varepsilon_s$ : کرنش تورم (%)

**جدول ۱۵-۱: آزمایش تورم**  
زمان بر حسب قرائت ارتفاع (قائم)

نوع خاک: خاک رسی متورم شونده

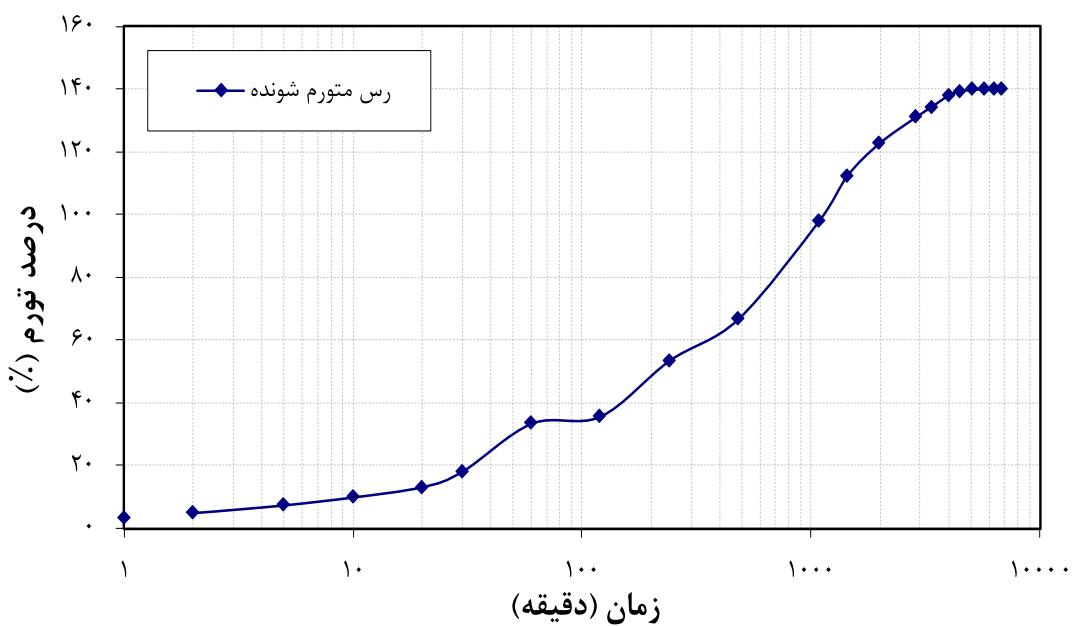
محل نمونه‌گیری: دانشگاه گیلان

تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

شخص نمونه‌گیر: .....

فشار روی نمونه: ۱ kN/m<sup>2</sup>

درصد تورم (%)	قرائت گیج قائم (mm)	زمان بعد از اعمال بار (min)
.	.	.
۲	۰/۴	۰/۵
۳/۵	۰/۷	۱
۵	۱	۲
۷/۵	۱/۵	۴
۹/۲۵	۱/۸۵	۸
۱۱/۵	۲/۳	۱۵
۱۸/۲۵	۲/۶۵	۳۰
۳۳/۵	۶/۷	۶۰
۳۵/۷۵	۷/۱۵	۱۲۰
۵۳/۵	۱۰/۷	۲۴۰
۶۶/۷۵	۱۳/۳۵	۴۸۰
۱۱۲/۵	۲۲/۵۰	۱۴۴۰
۱۳۱/۲۵	۲۶/۲۵	۲۸۸۰
۱۳۹/۲۵	۲۷/۸۵	۴۳۲۰
۱۴۰	۲۸/۰۰	۵۷۶۰
۱۴۰	۲۸/۰۰	۷۲۰۰



شکل ۱۵-۱۵: نمودار درصد تورم رس متورم شونده بر حسب زمان

### ۵-۱۵) نکات کلی

- ۱- تغییرات طول یا قطر نمونه هنگام انجام آزمایش تورم، باید بیش از ۵٪ باشد. حجم نمونه اولیه و نهایی باید با دقت ۰/۰۰۱ سانتی متر مکعب (۰/۰۰۱ اینچ مکعب) محاسبه شود.
- ۲- برای خاکهایی که دارای بیش از ۴۰ درصد ذرات بزرگتر از الک ۴/۷۵ میلی متر (شماره ۴) است، به دلیل محدودیت در دقت معادلات تصحیح ذرات اندازه بزرگ در روابط ۱-۱۵ و ۲-۱۵، انجام آزمایش در قالب‌های بزرگ ضروری است.
- ۳- نمونه‌های بازسازی شده باید با استفاده از ذرات ریز خاک (بدون ذرات بزرگ) تهیه شود و باید شرایط محیط را از نظر میزان آب، چگالی خشک و روش تراکم داشته باشد. چگالی مورد نظر را می‌توان با کنترل جرم و حجم به دست آورد. خاک را می‌توان در لایه‌های مختلف در رینگ قالب قرار داد و با توجه به حجم از پیش تعیین شده برای هر لایه، فشرده کرد. نمونه باید حداقل دو لایه داشته باشد و بیشترین ضخامت هر لایه ۱۵ میلی متر (۰/۶ اینچ) باشد. باید توجه کرد که سطح خاک قرارداده شده در هر لایه درون رینگ قالب، باید قبل از قرار گرفتن و مترکم شدن لایه بعدی خراشیده شود.
- ۴- هر گونه تفاوت بین ترکیبات شیمیایی آب در محل پروژه و آب مورد استفاده در آزمایش‌های آزمایشگاهی ممکن است بر میزان تورم تأثیر بگذارد.

## فصل شانزدهم

آزمایش برش مستقیم(AASHTO T236, ASTM D3080)

## ۱-۱۶) مقدمه و تئوری آزمایش

## معیار گسیختگی موهر-کلمب

مقاومت برشی خاک، بیانگر استحکام داخلی ذرات یک توده خاک در برابر شکست و لغزش در امتداد هر صفحه داخل آن است. این مقاومت با مقاومت فشاری یا کششی سایر مواد مهندسی متفاوت است و بر حسب دو پارامتر خاک اندازه‌گیری می‌شود: جاذبه بین ذرات یا چسبندگی ( $c$ )، مقاومت در برابر لغزش بین ذرات که زاویه اصطکاک داخلی ( $\varphi$ ) نامیده می‌شود. شکست ذرات، مقاومت در برابر لغزش و عوامل دیگر، به طور ضمنی در این دو پارامتر گنجانده شده است. در سال ۱۹۰۰، موهر معیاری را جهت ارزیابی مقاومت خاک‌های مختلف ارائه داد. معادله مقاومت برشی موهر-کلمب بر حسب تنش کل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \varphi \quad (1-16)$$

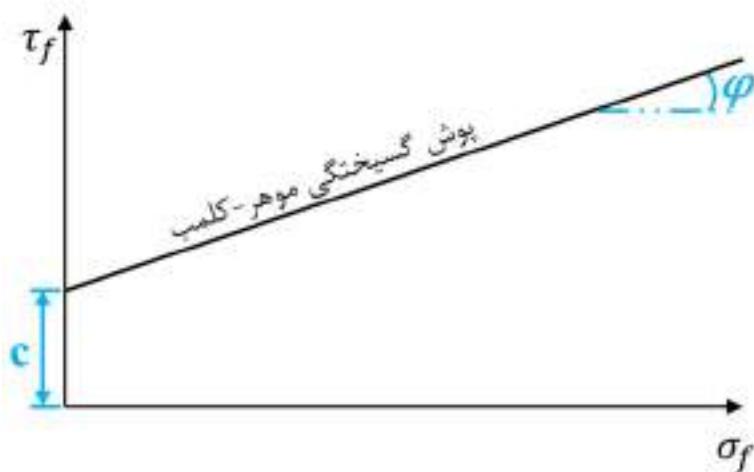
رابطه ۱-۱۶ بر حسب تنش مؤثر به شکل زیر بیان می‌آید:

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \varphi' \quad (2-16)$$

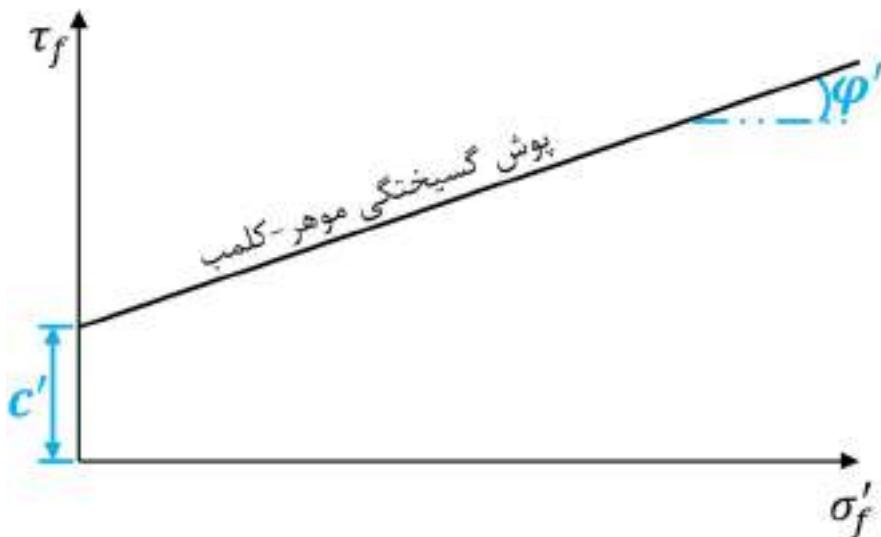
- $\tau_f$ : تنش برشی خاک در حالت گسیختگی
- $\sigma_f$ : تنش کل قائم خاک در حالت گسیختگی
- $\sigma'_f$ : تنش مؤثر قائم خاک در حالت گسیختگی ( $\sigma'_f = \sigma_f - u$ )
- $\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک (در حالت تنش کل)
- $\varphi'$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک (در حالت تنش مؤثر)
- $c$ : چسبندگی خاک (در حالت تنش کل)
- $c'$ : چسبندگی خاک (در حالت تنش مؤثر)

## پوش گسیختگی موهر-کلمب

در روابط ۱-۱۶ و ۲-۱۶ معیار گسیختگی موهر-کلمب معرفی گردید. چسبندگی و زاویه اصطکاک، متغیرهای این روابط است؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که این معیار، همان‌طور که در شکل‌های ۱-۱۶ و ۲-۱۶ نشان داده شده است، در فضای  $\tau_f - \sigma_f$  یا  $\tau_f - \sigma'_f$  به صورت خطی به ترتیب با عرض از مبدأ  $c$  و  $c'$  و شیب  $\varphi$  و  $\varphi'$  خواهد بود.



شکل ۱-۱۶: معیار گسیختگی موهر-کلمب در حالت تنش کل



شکل ۲-۱۶: معیار گسیختگی موهر-کلمب در حالت تنش مؤثر

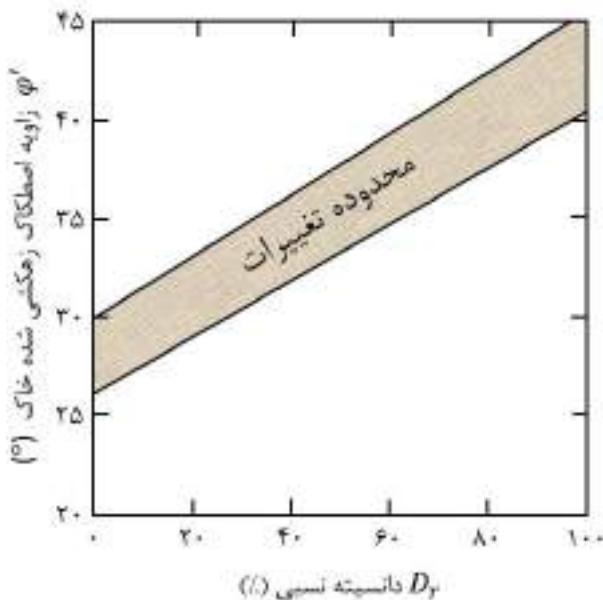
مقدار  $c'$  برای شن و ماسه و سیلت معدنی<sup>۱</sup> برابر با صفر است. در رس‌های عادی تحکیم‌یافته نیز مقدار  $c'$  تقریباً برابر با صفر است. رس‌های پیش‌تحکیم‌یافته، دارای مقادیر  $c'$  بزرگ‌تر از صفر است. زاویه اصطکاک  $\varphi'$  را زاویه اصطکاک زهکشی‌شده نیز می‌نامند. مقادیر معمول  $\varphi'$  برای برخی از خاک‌های دانه‌ای در جدول ۱-۱۶ آورده شده است.

جدول ۱-۱۶: مقادیر معمول زاویه اصطکاک داخلی زهکشی‌شده برای ماسه و سیلت

$\varphi'$ بر حسب درجه	نوع خاک
۲۷-۳۰	ماسه گردگوشه <sup>۲</sup> سست
۳۰-۳۵	ماسه گردگوشه با تراکم متوسط
۳۵-۳۸	ماسه گردگوشه متراکم
۳۰-۳۵	ماسه تیزگوشه <sup>۳</sup> سست
۳۵-۴۰	ماسه تیزگوشه با تراکم متوسط
۴۰-۴۵	ماسه تیزگوشه متراکم
۳۴-۴۸	شن با مقداری ماسه
۲۶-۳۵	سیلت

در ماسه‌ها، زاویه اصطکاک داخلی زهکشی‌شده خاک ( $\varphi'$ ) به طور کلی تابع دانسیته نسبی یا تراکم ماسه، اندازه، شکل و توزیع دانه‌ها در توده خاک است. برای یک خاک شنی یا ماسه‌ای مشخص، افزایش نسبت تخلخل (به عبارت دیگر کاهش در دانسیته نسبی یا تراکم) منجر به کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود. همچنین، برای یک نسبت تخلخل معین، با افزایش تیزگوشه بودن دانه‌ها<sup>۴</sup>، زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد. محدوده تغییرات کلی زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای نسبت به دانسیته نسبی در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است.

<sup>1</sup>. inorganic silt<sup>2</sup>. Rounded grains Sand<sup>3</sup>. Angular grains<sup>4</sup>. Angularity of soil particles

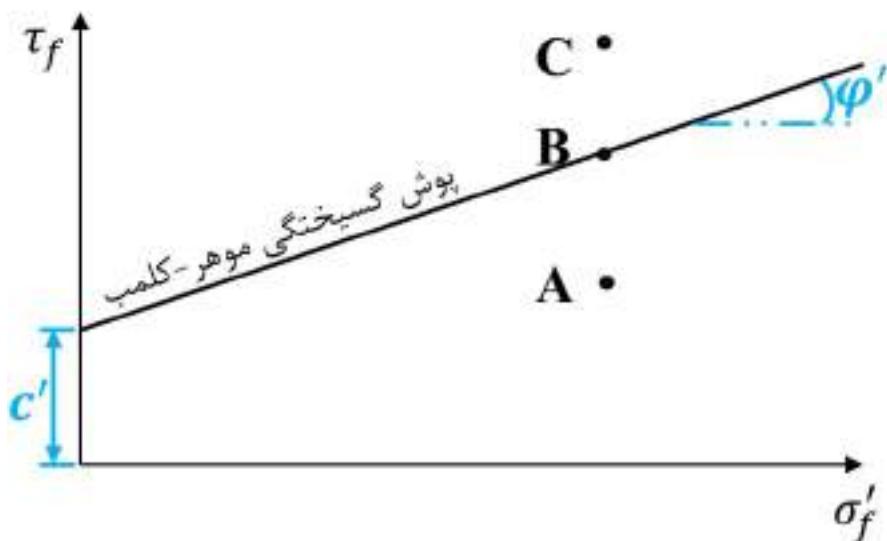


شکل ۳-۱۶: محدوده تغییرات زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده ماسه نسبت به دانسیته نسبی آن

تذکر: لازم به ذکر است که ماسه‌های سیمانی شده در محل ممکن است مقداری چسبندگی ( $C'$ ) نیز داشته باشد.

حالات مختلف تنش برای یک خاک بر اساس معیار موهر-کلمب در شکل ۴-۱۶، حالت‌های مختلفی که می‌تواند بر اساس معیار موهر-کولمب برای یک خاک مشخص رخ دهد، نشان داده شده است:

- « نقطه A: چنانچه شرایط تنش‌های وارد شده بر یک توده خاک این نقطه را نشان دهد، گسیختگی در خاک رخ نخواهد داد.
- « نقطه B: چنانچه شرایط تنش‌های وارد شده بر یک توده خاک این نقطه را نشان دهد، خاک در آستانه گسیختگی قرار دارد.
- « نقطه C: وقوع یک چنین حالتی در یک خاک غیرممکن است؛ زیرا خاک پیش از رسیدن به این نقطه گسیخته شده و در صورتی که این نقطه را در محاسبات خود به دست آوردید، باید محاسبات از ابتدا دوباره چک شود.



شکل ۴-۱۶: حالت‌های مختلف تنش برای یک خاک مشخص بر اساس معیار موهر-کلمب

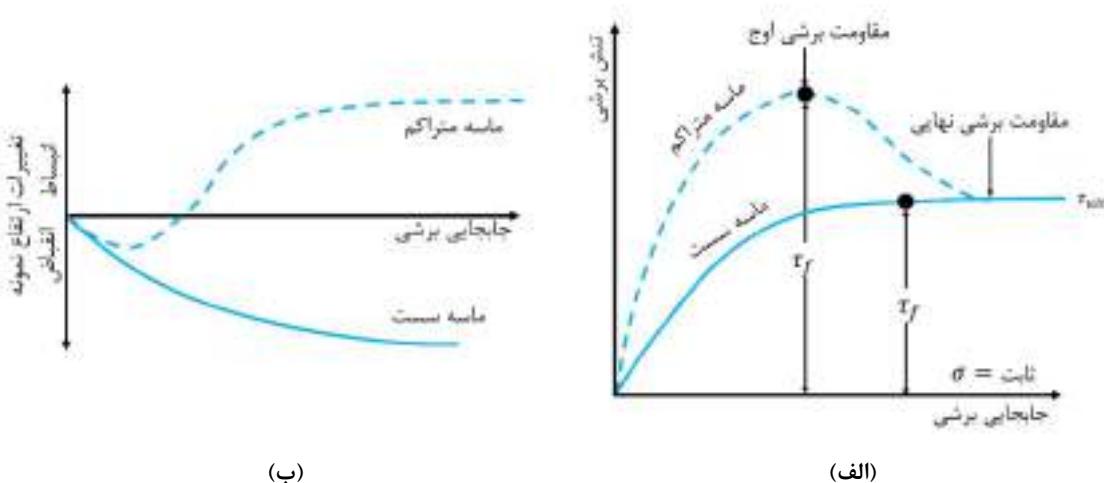
#### تفسیر نمودارهای تنش-کرنش

در آزمایش برش مستقیم، نمونه‌ای که بین دو جعبه بالایی و پایینی دستگاه قرار می‌گیرد، در تنش‌های نرمال ثابت، تحت بارگذاری برشی قرار گرفته تا به گسیختگی برسد. این آزمایش معمولاً ۲ تا ۳ بار با تنش‌های نرمال مختلف انجام می‌شود که در هر بار انجام آزمایش، معمولاً نمودارهای تغییرات تنش برشی و تغییر ارتفاع نمونه در برابر جابجایی برشی رسم می‌گردد. شکل ۴-۱۶ نمودارهای متداول به دست آمده از آزمایش برش مستقیم شامل تغییرات تنش برشی و تغییر ارتفاع نمونه در برابر جابجایی برشی برای ماسه‌های سست و متراکم خشک را نشان می‌دهد. این مشاهدات از یک آزمایش جابجایی کنترل به دست آمده است (در قسمت‌های بعد، مفهوم آزمایش جابجایی کنترل توضیح داده خواهد شد). با مشاهده تغییرات تنش برشی مقاوم<sup>۱</sup> با تغییر مکان برشی می‌توان دریافت:

- الف- در ماسه سست، تنش برشی مقاوم با جابجایی برشی افزایش می‌یابد تا زمانی که به تنش برشی گسیختگی ( $\tau_f$ ) برسیم. پس از آن، تنش برشی برای هر گونه افزایش بیشتر در جابجایی برشی، تقریباً ثابت می‌ماند.
- ب- در ماسه متراکم، تنش برشی مقاوم با جابجایی برشی افزایش می‌یابد تا زمانی که به تنش گسیختگی ( $\tau_f$ ) برسیم. مقدار  $\tau_f$  مقاومت برشی اوج<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. پس از رسیدن به تنش گسیختگی، تنش برشی به تدریج با افزایش جابجایی برشی کاهش می‌یابد تا درنهایت به مقدار ثابتی به نام مقاومت برشی نهایی<sup>۳</sup> یا پسماند<sup>۴</sup> برسد.

<sup>1</sup>. resisting shear stress  
<sup>2</sup>. peak shear strength

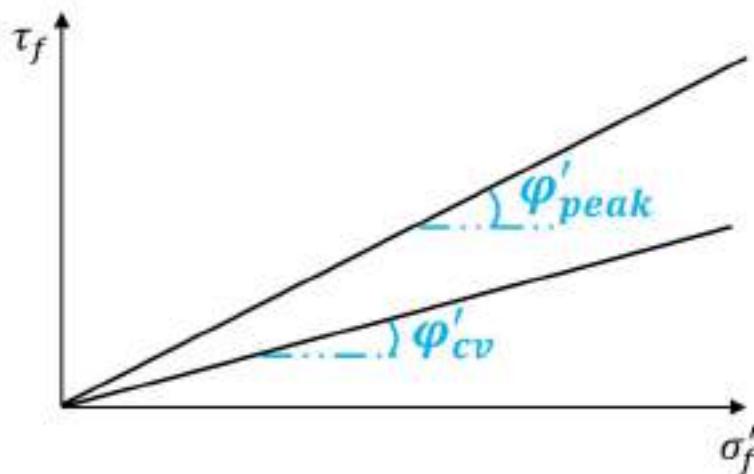
<sup>3</sup>. ultimate shear strength  
<sup>4</sup>. residual



شکل ۱۶-۵: نمودار تنش برشی و تغییر ارتفاع نمونه در برابر جابجایی برشی برای ماسه خشک سست و متراکم (آزمایش برش مستقیم)

#### به دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی

در قسمت (الف) شکل ۱۶-۵، مقاومت برشی اوج و نهایی ماسه متراکم مشخص شد. برای هر کدام از این مقاومت‌ها می‌توان یک پوش گسیختگی رسم نمود. بدینهی است که با داشتن دو نقطه از یک خط، می‌توان معادله آن را نوشت، اما به دلیل خطاهایی که در آزمایش‌های اجتناب‌ناپذیر است، توصیه می‌شود که دست کم سه آزمایش روی یک خاک صورت گیرد تا معیار گسیختگی را بتوان با برازش خطی از این سه نقطه رسم نمود. اگر این سه نقطه، در حالت مقاومت برشی اوج از آزمایش خوانده شود، در آن صورت شبیه خط موهر-کلمب برابر با  $\varphi'_{peak}$  خواهد بود و در صورتی که سه نقطه خوانده شده از آزمایش در حالت مقاومت نهایی باشد، آنگاه شبیه خط موهر-کلمب برابر با  $\varphi'_{cv}$  است (شکل ۱۶-۶).

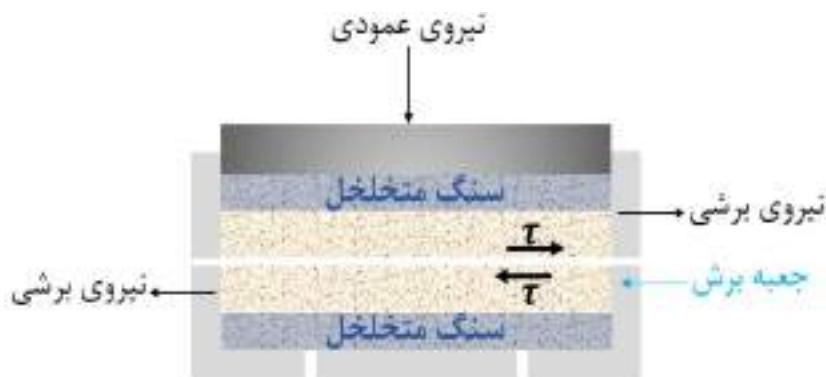


شکل ۱۶-۶: پوش‌های گسیختگی موهر-کلمب در حالت‌های مقاومت برشی اوج و نهایی

#### انجام آزمایش برش مستقیم در آزمایشگاه

آزمایش برش مستقیم از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین انواع آزمایش‌های برشی خاک است. آزمایش برش مستقیم برای تعیین نسبتاً سریع مقاومت برشی تحکیم‌یافته زهکشی شده یک خاک مناسب است؛ زیرا مسیرهای زهکشی (از طریق نمونه آزمایش) کوتاه است و به فشار آب منفذی اضافی اجازه می‌دهد تا سریع‌تر از سایر آزمایش‌های زهکشی شده از بین برود.

این آزمایش را می‌توان روی هر نوع خاکی و روی نمونه‌های دستنخورده<sup>۱</sup>، بازسازی شده<sup>۲</sup> و ساخته شده<sup>۳</sup> انجام داد. با این حال، محدودیتی در حداکثر اندازه ذرات وجود دارد که در ادامه شرح داده خواهد شد. شماتیک کلی آرایش دستگاه آزمایش برش مستقیم در شکل ۷-۱۶ نشان داده شده است. تجهیزات این آزمایش شامل یک جعبه برشی فلزی است که نمونه خاک در آن قرار می‌گیرد. نمونه‌های خاک بر اساس شکل جعبه برش انتخاب شده ممکن است در پلان مربع (شکل ۸-۱۶) یا دایره‌ای (شکل ۹-۱۶) باشد. حداقل قطر نمونه برای نمونه‌های دایره‌ای یا حداقل عرض برای نمونه‌های مربعی، باید ۲ اینچ (۵۰ میلی‌متر) یا ۱۰ برابر حداکثر قطر اندازه ذرات (هر کدام بزرگ‌تر بود) باشد. حداقل ضخامت اولیه نمونه باید ۰/۵ اینچ (۱۳ میلی‌متر) باشد؛ اما در هیچ صورتی نباید کمتر از ۶ برابر حداکثر قطر ذرات باشد. حداقل نسبت قطر نمونه به ضخامت (برای نمونه‌های دایره‌ای) یا نسبت عرض به ضخامت (برای نمونه‌های مربعی) باید ۲:۱ باشد.



شکل ۷-۱۶: شماتیک کلی آرایش دستگاه آزمایش برش مستقیم



شکل ۸-۱۶: نمونه‌ای از جعبه برش مربعی و تجهیزات

۱. Intact

۲. Remolded

۳. Reconstituted



شکل ۹-۱۶: نمونه‌ای از جعبه برش دایره‌ای و تجهیزات

در آزمایش برش مستقیم، توزیع تنش‌های برشی و جابجایی‌ها داخل نمونه به‌طور غیر یکنواخت صورت می‌گیرد. همچنین در این آزمایش جابجایی برشی اندازه‌گیری می‌شود، ولی کرنش برشی تعریف نمی‌شود؛ بنابراین، روابط تنش-کرنش یا هر کمیت مرتبط مانند مدول برشی را نمی‌توان از این آزمایش تعیین کرد. بسته به تجهیزات، آزمایش برش مستقیم می‌تواند به صورت تنش‌کنترل و یا جایجایی‌کنترل انجام شود. در آزمایش‌های تنش‌کنترل، تنش برشی با نرخ کنترل شده و ثابت به نمونه اعمال شده تا خاک به گسیختگی برسد. شکست در امتداد صفحه شکاف جعبه برشی (صفحه افقی) رخ می‌دهد. پس از اعمال هر بار افزایشی، جابجایی برشی نیمه بالایی جعبه توسط یک جابجایی‌سنجد افقی اندازه-گیری می‌شود. تغییر در ارتفاع نمونه (و درنتیجه تغییر حجم نمونه) در طول آزمایش را می‌توان از قرائت‌های یک گیج جابجایی‌سنجد که حرکت عمودی صفحه بارگیری بالایی را اندازه‌گیری می‌کند، به دست آورد. در آزمایش‌های جایجایی-کنترل، نرخ کنترل شده و ثابتی از جابجایی برشی، توسط موتوری که از طریق چرخ‌دنده‌ها عمل می‌کند، به نصف جعبه اعمال می‌شود. نرخ ثابت جابجایی برشی توسط یک جابجایی‌سنجد افقی نشان داده می‌شود. نیروی برشی بسیج شده خاک مربوط به هر جابجایی برشی مشخص را می‌توان با یک حلقة ثابت افقی (نیروسنجد یا سلول بار) اندازه‌گیری کرد. تغییر حجم نمونه در طول آزمایش به روشهای مشابه با آزمایش‌های تنش‌کنترل به دست می‌آید.

مزیت آزمایش‌های جایجایی‌کنترل این است که در مورد ماسه متراکم، حداکثر مقاومت برشی<sup>۱</sup> (هنگام شکست) و همچنین مقاومت برشی نهایی<sup>۲</sup> ( نقطه‌ای پس از شکست) قابل مشاهده و ترسیم است؛ اما در آزمایش‌های تنش‌کنترل، فقط می‌توان حداکثر مقاومت برشی را مشاهده و رسم کرد. توجه داشته باشید که حداکثر مقاومت برشی در آزمایش‌های تنش‌کنترل را می‌توان فقط تقریب زد، زیرا شکست در سطح تنش، جایی بین افزایش بار پیش‌فرض و افزایش بار شکست رخ می‌دهد. با این وجود، در مقایسه با آزمایش‌های جایجایی‌کنترل، می‌توان گفت که آزمایش‌های تنش‌کنترل شرایط میدان واقعی تنش را بهتر مدل‌سازی می‌کنند. با این حال، با توجه به مزیت‌های بسیار زیاد آزمایش‌های جایجایی‌کنترل نسبت به آزمایش‌های تنش‌کنترل، در این فصل نحوه انجام آزمایش‌های جایجایی‌کنترل و تفسیر نتایج آن‌ها به تفصیل شرح داده می‌شود.

<sup>1</sup>. Maximum shear strength<sup>2</sup>. Residual shear strength

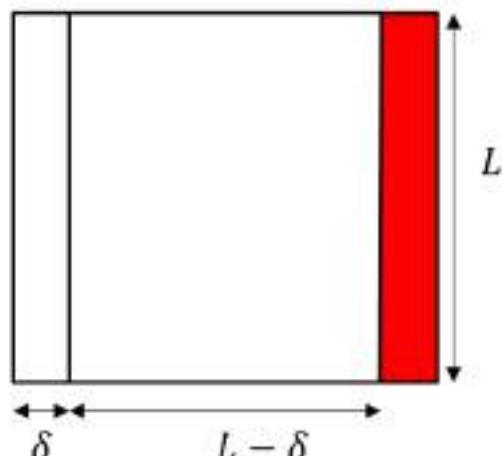
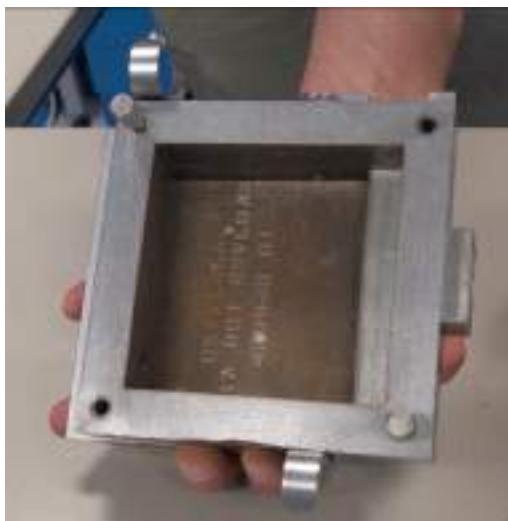
**تذکر:** آزمایش برش مستقیم غالباً روی ماسه‌ها انجام می‌شود؛ اما می‌توان آن را روی رس‌های عادی تحریک‌یافته و همچنین روی رس‌های تثبیت‌شده با درصد مواد افزودنی کم نیز انجام داد. درصورتی که رس پیش تحریک‌یافته باشد و یا درصد تثبیت آن بالا باشد، این آزمایش روی نمونه‌های مذکور قابل انجام نیست و دستگاه دچار بلندشدن در مراحل اولیه آزمایش خواهد شد.

### مساحت اصلاح شده

در طول آزمایش برش مستقیم، نیروی برشی و تغییر شکل‌های قائم و افقی اندازه‌گیری می‌شود. تنش برشی و تنش قائم معمولاً از تقسیم به ترتیب نیروهای برشی و قائم بر مساحت اصلاح شده به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱۰-۱۶ نشان داده شده است، مساحت اصلاح شده به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$A_c = L(L - \delta) \quad (3-16)$$

به عبارت دیگر می‌توان گفت مساحت اصلاح شده، مساحت خاک در قسمت فصل مشترک صفحات بالایی و پایینی جعبه برش است که وقتی این صفحات نسبت به یکدیگر حرکت می‌کند، تحت بار قائم و برشی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰-۱۶: مساحت اصلاح شده

### ۲-۱۶) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- دستگاه آزمایش برش مستقیم (جابجایی کنترل) (شکل‌های ۱۱-۱۶ و ۱۲-۱۶)
- ۲- جعبه برش مستقیم (شکل ۱۳-۱۶): لازم به ذکر است همان‌طور که در قسمت مقدمه اشاره شد، این جعبه می‌تواند در پلان به صورت مربعی یا دایره‌ای باشد. جنس این جعبه می‌تواند از فولاد ضد زنگ، برنز و یا آلومینیوم باشد.
- ۳- صفحات پایه<sup>۱</sup> یا نگهدارنده<sup>۲</sup> (شکل ۱۴-۱۶)
- ۴- سنگ‌های متخلخل<sup>۳</sup> (شکل ۱۵-۱۶)
- ۵- صفحات سوراخ دار یا شبکه‌بندی شده<sup>۴</sup> (شکل ۱۶-۱۶)
- ۶- صفحه بارگذاری<sup>۵</sup> (شکل ۱۷-۱۶)
- ۷- ترازو با دقت ۰/۱ گرم (شکل ۱۸-۱۶)

۱. Base plates

۲. Retaining plates

۳. Porous plates

۴. Perforated or solid grid plates

۵. Loading pad

۸- ظرف فلزی (شکل ۱۹-۱۶)

۹- دسته هاون یا کوبه (برای متراکم کردن ماسه در جعبه برش مستقیم) (شکل ۲۰-۱۶)

۱۰- قاشق (شکل ۲۱-۱۶)

۱۱- کاردک (شکل ۲۲-۱۶)

۱۲- کولیس دیجیتالی (شکل ۲۳-۱۶)

در شکل ۲۴-۱۶، ترتیب قرار گرفتن لایه‌های مختلف درون جعبه برش نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۱۶: نمونه‌ای از دستگاه برش مستقیم



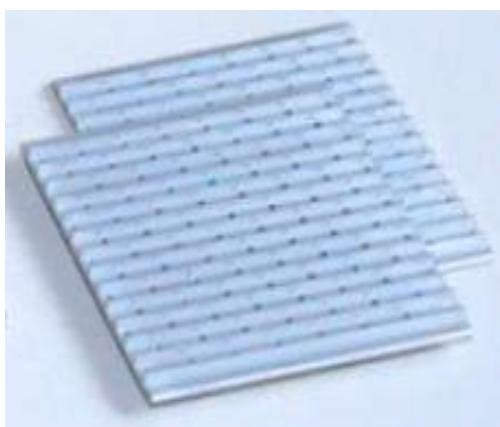
شکل ۱۶-۱۶: دستگاه آزمایش برش مستقیم مکانیکی



شکل ۱۶-۱۴: صفحه پایه یا نگهدارنده



شکل ۱۶-۱۳: جعبه دستگاه برش مستقیم مربعی



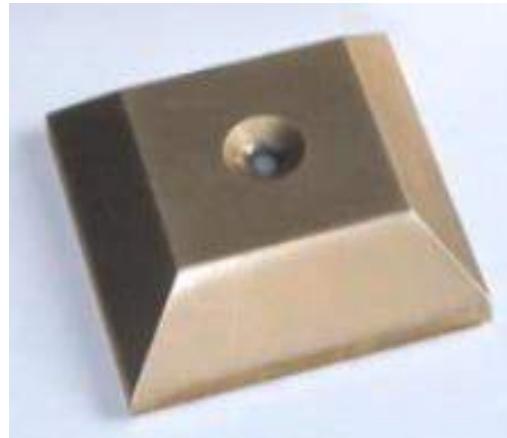
شکل ۱۶-۱۶: صفحات سوراخ دار



شکل ۱۶-۱۵: سنگ‌های متخلخل



شکل ۱۸-۱۶: ترازو با دقت ۰/۱ گرم



شکل ۱۷-۱۶: صفحه بارگذاری



شکل ۲۰-۱۶: هاون



شکل ۱۹-۱۶: ظرف فلزی



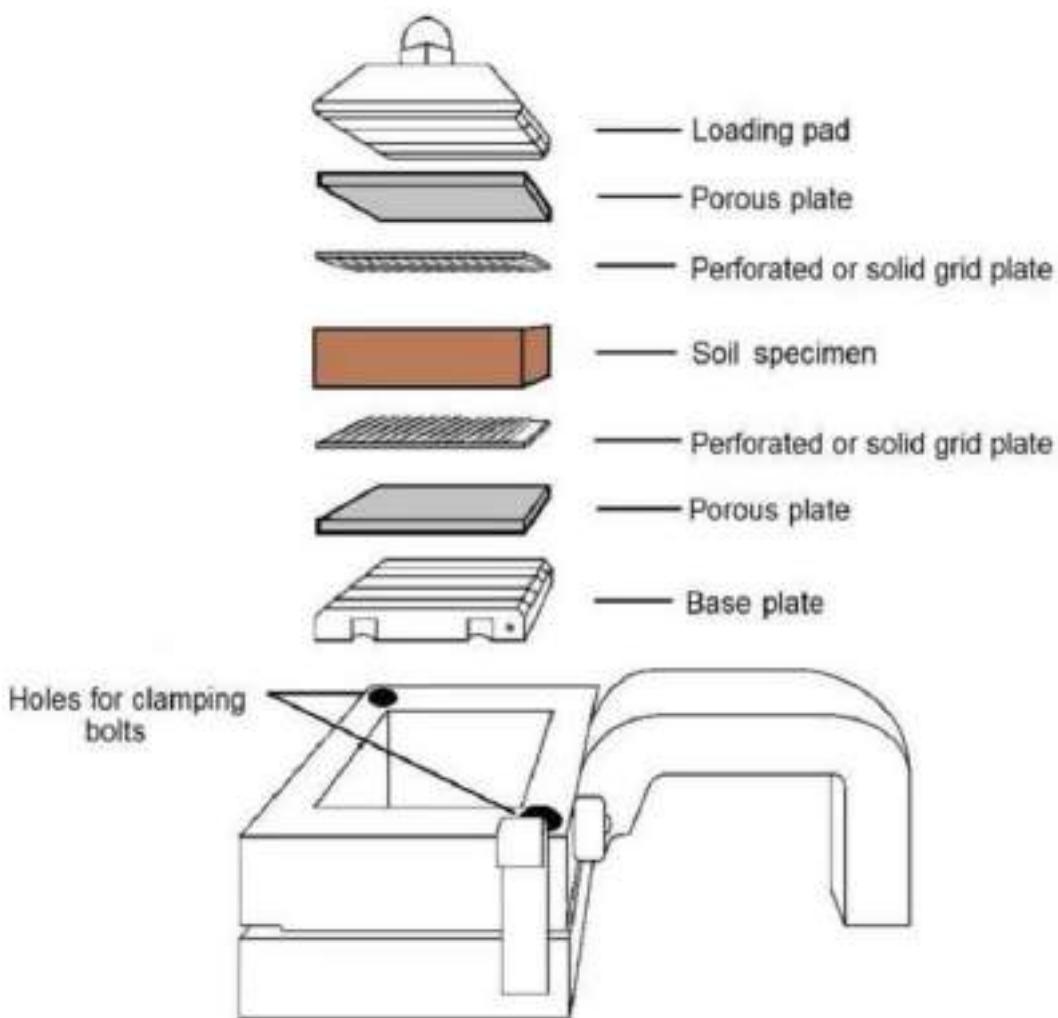
شکل ۲۲-۱۶: کاردک



شکل ۲۱-۱۶: قاشق



شکل ۲۳-۱۶: کولیس دیجیتالی



شکل ۲۴-۱۶: ترتیب قرار گرفتن لایه‌های مختلف درون جعبه برش

#### دستگاه آزمایش برش مستقیم

شکل‌های ۱۱-۱۶ و ۱۲-۱۶ انواع گوناگون دستگاه آزمایش برش مستقیم را نشان می‌دهد. این دستگاه شامل یک جعبه برش مستقیم است که از دو قسمت (قسمت بالا و پایین) تشکیل یافته و نمونه خاک در داخل آن قرار می‌گیرد، دو گیج یا عقربه مدرج (یکی برای جابجایی افقی و دیگری برای جابجایی قائم) برای اندازه‌گیری تغییر شکل خاک هنگام آزمایش و یک میله دو شاخه برای اعمال نیروی قائم به نمونه در این دستگاه تعییه شده است. نیروی افقی به وسیله یک موتور

و جعبه‌دنده به قسمت بالایی جعبه برش اعمال می‌شود و این نیرو توسط یک گیج نیروسنجه قابل مشاهده است. در آزمایش برش مستقیم از نوع جابجایی کنترل، سرعت حرکت نیمة بالایی جعبه برش را می‌توان کنترل کرد. شکل ۲۵-۱۶ تصویر شماتیک جعبه برش را نشان می‌دهد. جعبه برش به دو نیمة بالایی و پایینی تقسیم شده است. نیمه‌های بالایی و پایینی جعبه برش، به وسیله چهار پیچ قائم می‌تواند به یکدیگر متصل شود. یک کلاهک مخصوص بارگذاری وجود دارد که از بالای جعبه برش روی نمونه داخل جعبه قرار گرفته و باعث می‌شود نیروی وارد شده به طور یکنواخت به نمونه وارد شود. چهار پیچ قائم و دو پیچ افقی روی نیمة بالای جعبه برش وجود دارد.

راهنمای شکل ۲۵-۱۶

- نیمة بالای جعبه برش

- نیمة پایینی جعبه برش

- کلاهک بارگذاری

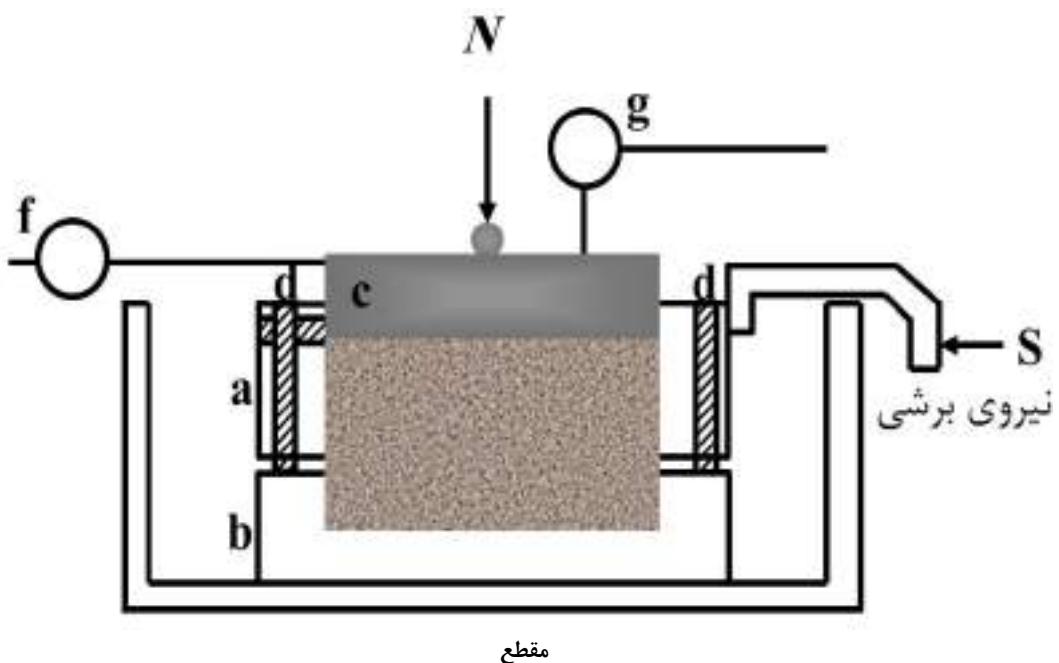
- پیچ قائم

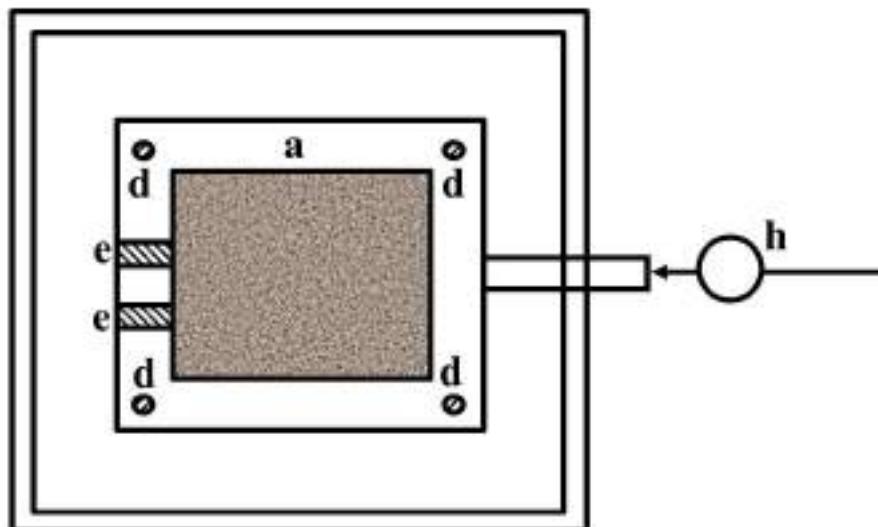
- پیچ افقی

- گیج (عقربه مدرج) جابجایی افقی

- گیج (عقربه مدرج) جابجایی قائم

- گیج (عقربه مدرج) نیروسنجه





پلان

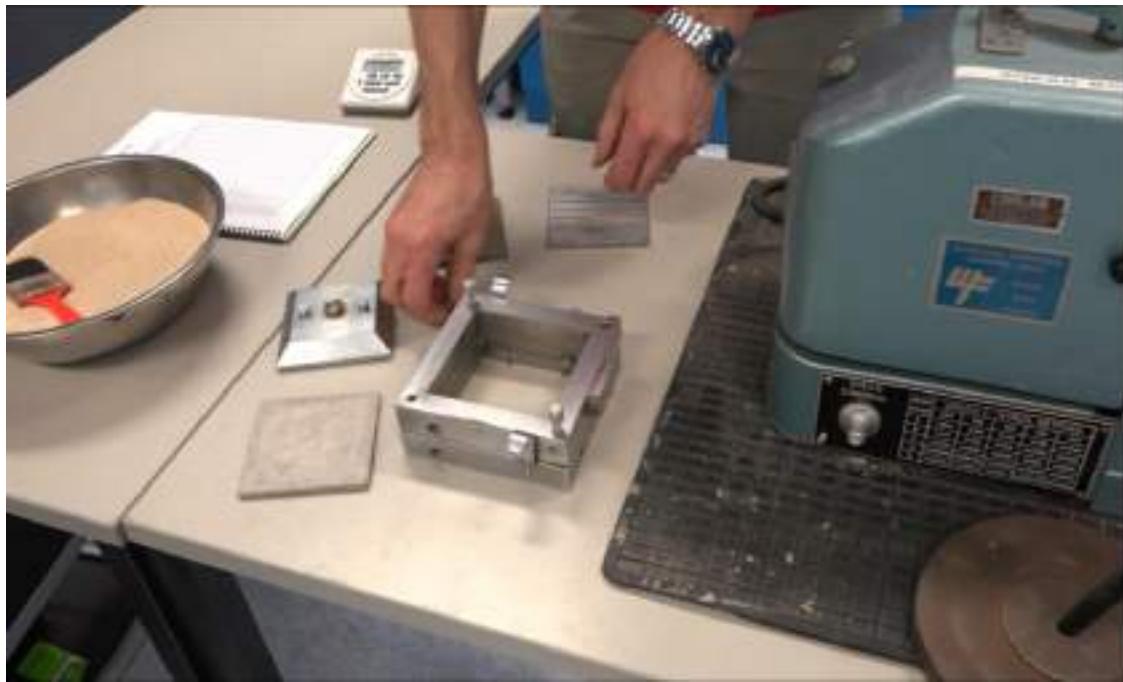
شکل ۲۵-۱۶: شکل شماتیک جعبه آزمایش برش مستقیم

### ۳-۱۶) روش انجام آزمایش

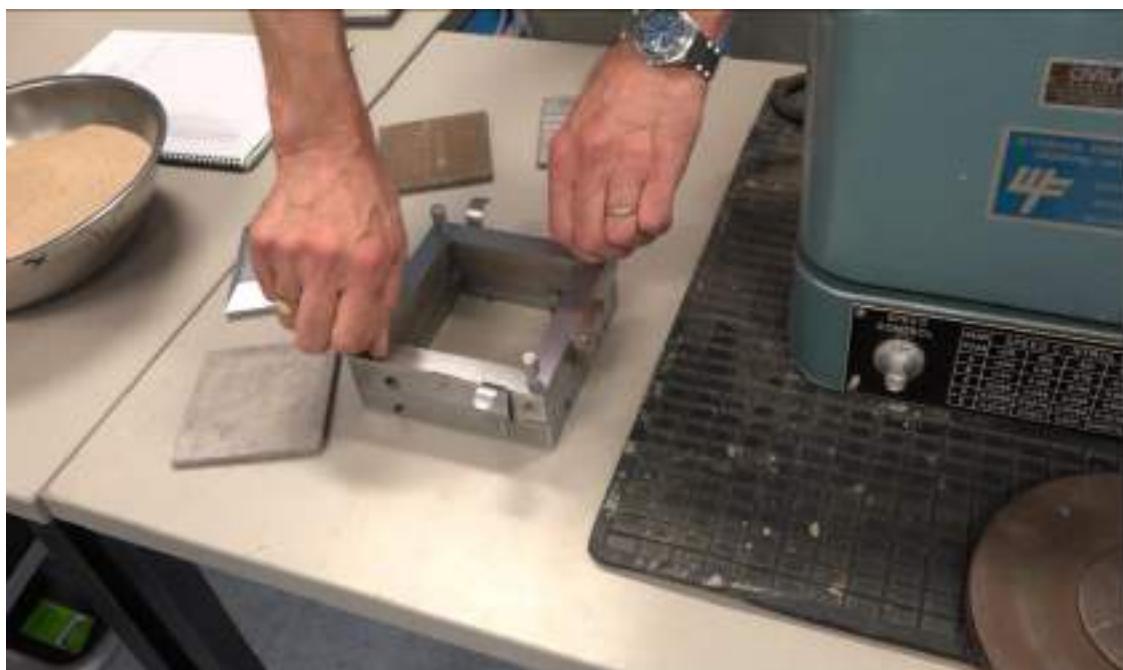
۱- ابتدا با فرض ساخت نمونه با یک تخلخل و دانسیته مشخص در یک حجم معین، جرم مقدار ماسه خشک مورد نیاز ( $M$ ) را تعیین کرده و آن را داخل ظرف فلزی میریزیم. دو قسمت بالایی و پایینی جعبه برش (شکل ۲۶-۱۶) را روی هم قرار می‌دهیم (شکل ۲۷-۱۶) و پس از آن، پیچ‌های قائم را در جای خود قرار داده و پیچ می‌دهیم تا دو نیمه جعبه برش به یکدیگر وصل شود و حرکت افقی نسبت به هم نداشته باشد (شکل ۲۸-۱۶).



شکل ۲۶-۱۶: قطعات بالای و پایینی جعبه برش مستقیم



شکل ۲۷-۱۶: قرار دادن دو قسمت جعبه برش مستقیم روی هم



شکل ۲۸-۱۶: سفت کردن پیچ‌ها روی جعبه برش مستقیم

۲- صفحه پایه را درون جعبه برش قرار می‌دهیم. دقیق کنید که صفحه پایه باید به گونه‌ای قرار گیرد که شیارهای آن موازی با جهت برش باشد (شکل‌های ۲۹-۱۶ و ۳۰-۱۶).



شکل ۳۹-۱۶: صفحه پایه یا نگهدارنده باید به گونه‌ای قرار گیرد که شیارهای آن موازی با جهت برش باشد



شکل ۳۰-۱۶: قرار دادن صفحه پایه درون جعبه برش مستقیم

۳- سنگ متخلخل پایینی را درون جعبه برش قرار می‌دهیم (شکل ۳۱-۱۶).



شکل ۳۱-۱۶: قرار دادن سنگ متخلخل درون جعبه برش مستقیم

تذکرہ: همان طور کہ در شکل ۲۴-۱۶ نشان داده شده است، در برخی موارد پس از قرار دادن سنگ متخلخل در مرحله ۳، صفحہ سوراخ دار در جهت عمود بر برش، داخل جعبه برش قرار داده می‌شود.

۴- ابعاد نمونه را که شامل طول  $L$  و ارتفاع  $H$  است، اندازه می‌گیریم.  $H$ . را ارتفاع از بالای سنگ متخلخل (در مواردی، صفحہ سوراخ دار) تا بالای جعبه برش در نظر می‌گیریم. طبق استاندارد، قسمت بالایی نمونه باید حدود  $\frac{1}{4}$  اینچ ( $6/4$  میلی‌متر) از بالای جعبه برش فاصله داشته باشد؛ بنابراین، ارتفاع نمونه خاک ( $H$ ) درنهایت برابر خواهد بود با:

$$H(\text{mm}) = H.(\text{mm}) - 6/4 \quad (4-16)$$

۵- جعبه برش را درون دستگاه برش قرار می‌دهیم (شکل ۳۲-۱۶).



شکل ۳۲-۱۶: قرار دادن جعبه برش درون دستگاه برش مستقیم

۶- پیچ‌های افقی دستگاه برش مستقیم را می‌بندیم (شکل ۳۳-۱۶).



شکل ۳۳-۱۶: بستن پیچ‌های افقی دستگاه برش مستقیم

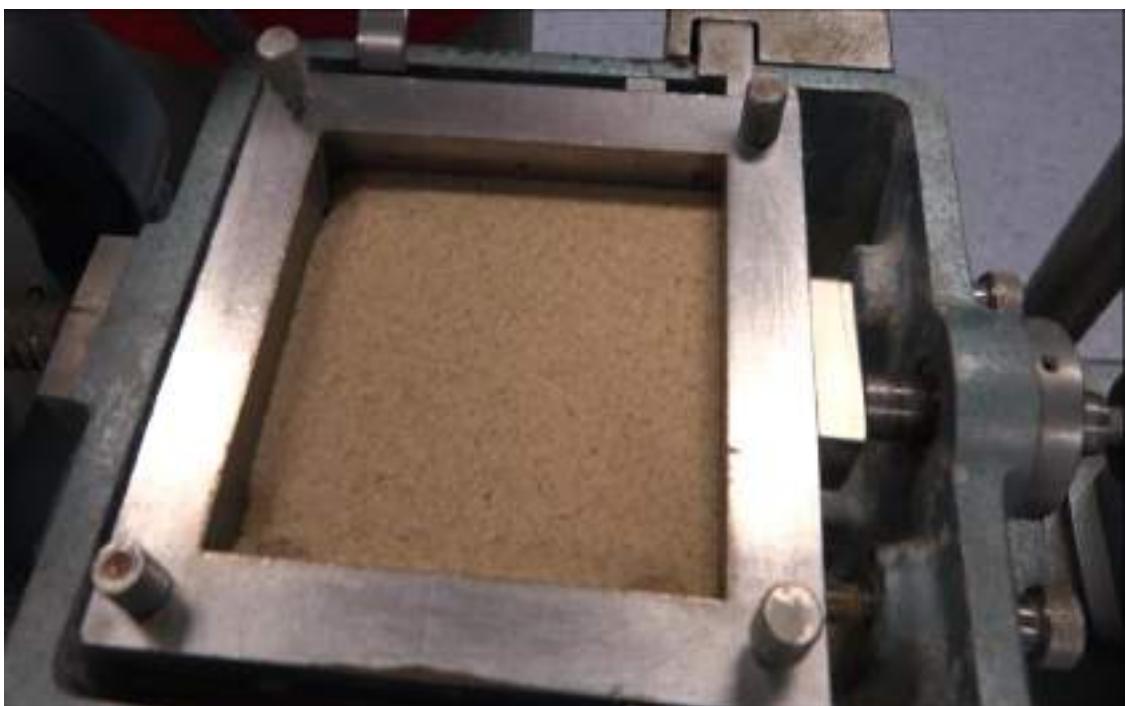
۷- جعبه برش را از خاک وزن شده در مرحله ۱ در لایه‌های کوچک (معمولًاً در سه لایه می‌ریزیم و سطح آن را توسط کاردک صاف می‌کنیم) پر کرده (شکل ۳۴-۱۶) و به کمک هاون هر لایه را متراکم می‌کنیم (معمولًاً هر لایه را توسط ۲۵ ضربه متراکم می‌کنیم تا به ارتفاع مورد نظر برای رسیدن به یک دانسیته مشخص بررسیم) (شکل ۳۵-۱۶). همان‌طور که اشاره شد، قسمت بالایی نمونه خاک باید حدود  $6/4$  میلی‌متر از بالای جعبه برش فاصله داشته باشد (شکل ۳۶-۱۶).



شکل ۳۴-۱۶: ریختن ماسه درون جعبه برش



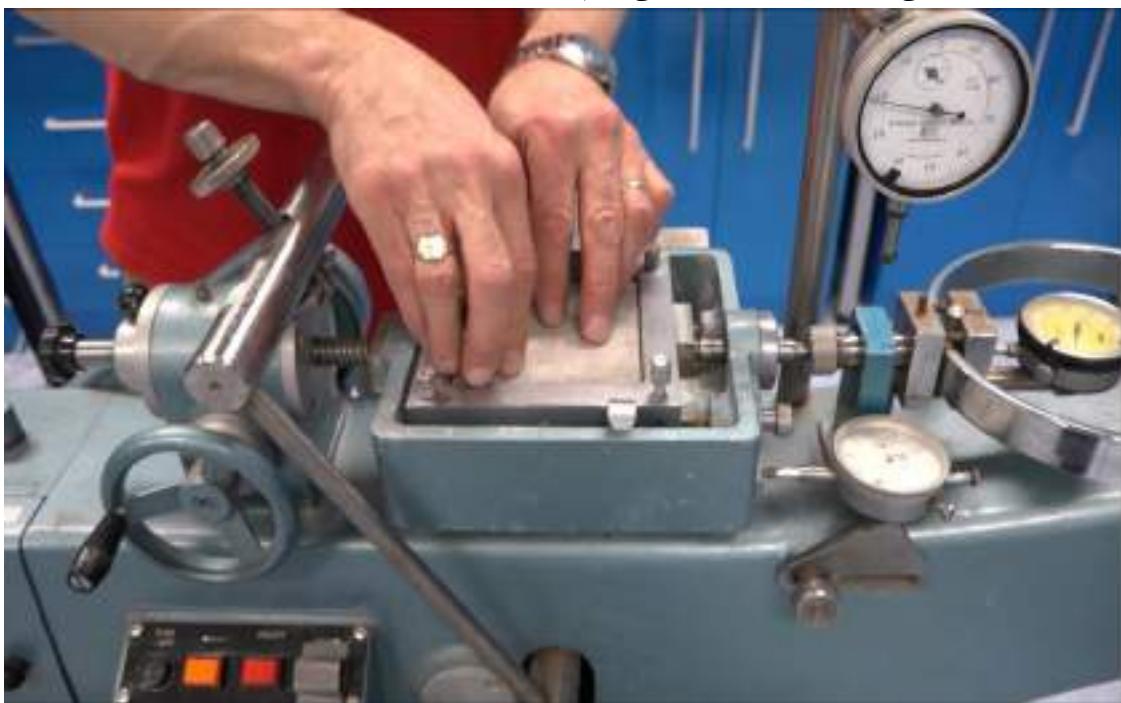
شکل ۱۶-۳۵: متراکم کردن هر لایه از خاک به وسیله هاون



شکل ۱۶-۳۶: لایه نهایی ماسه در جعبه برش پس از متراکم کردن به وسیله هاون

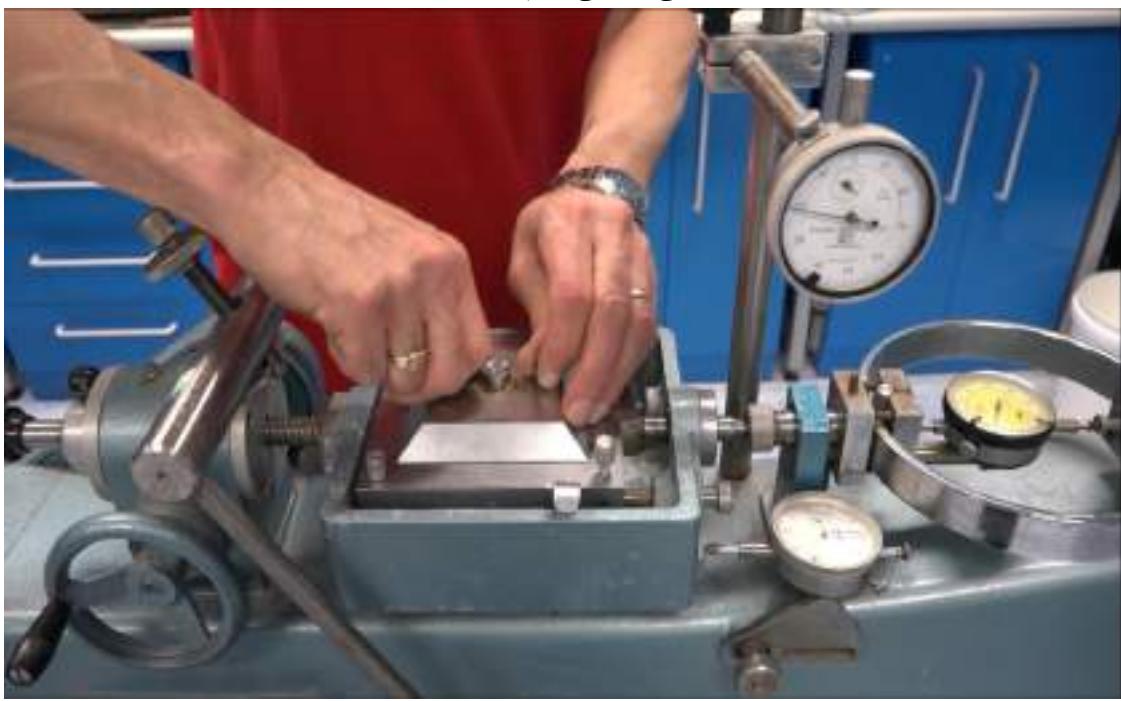
**تذکر:** همانند شکل ۲۴-۱۶ اگر در مرحله ۳، صفحه سوراخدار پایینی را قرار دادید، اکنون می‌بایست صفحه سوراخدار بالایی را روی نمونه خاک قرار دهید.

۸- سنگ متخلخل بالایی را روی نمونه خاک قرار می‌دهیم (شکل ۳۷-۱۶).



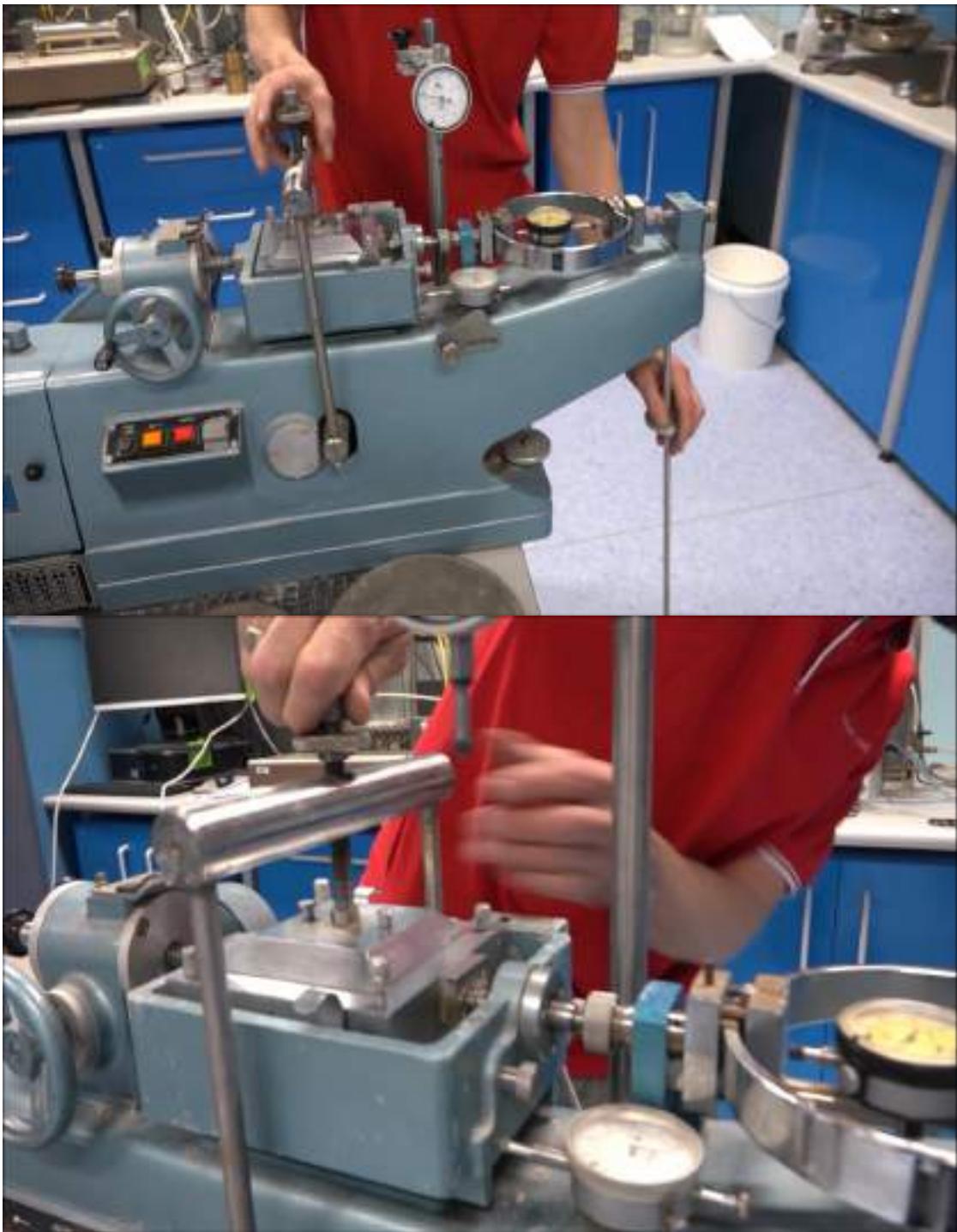
شکل ۳۷-۱۶: قرار دادن سنگ متخلخل روی نمونه خاک

۹- کلاهک بارگذاری را روی سنگ متخلخل بالایی قرار می‌دهیم (شکل ۳۸-۱۶).



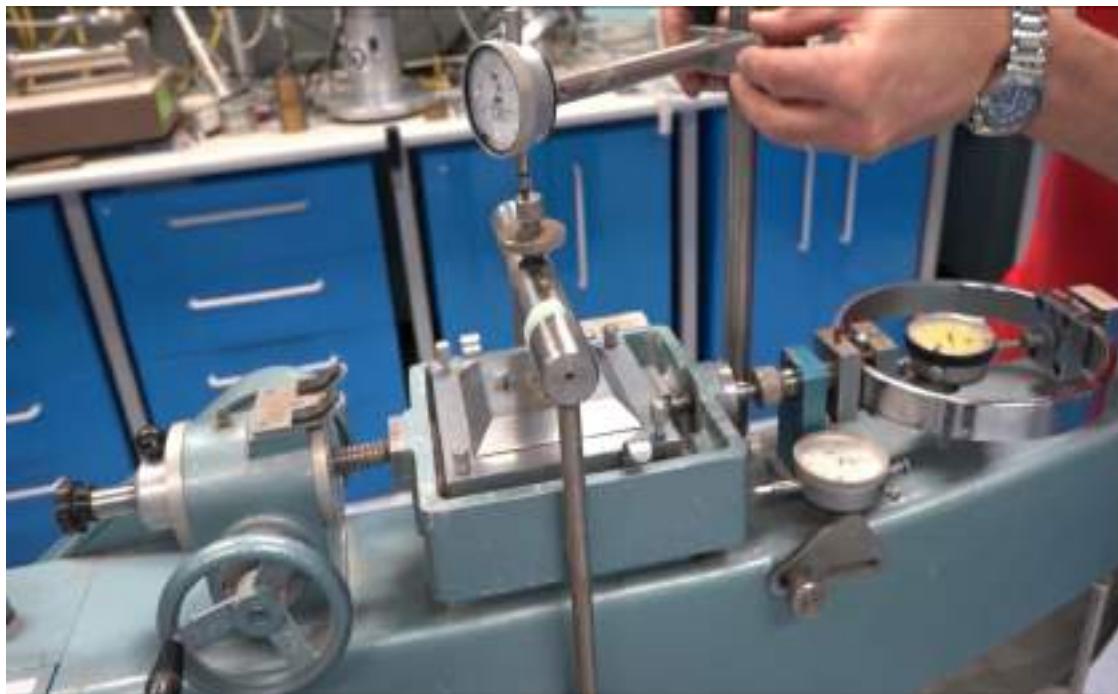
شکل ۳۸-۱۶: قرار دادن کلاهک بارگذاری روی جعبه برش

- ۱۰- قاب بار قائم را روی صفحه بارگذاری جعبه برش قرار می‌دهیم بهطوری که کاملاً عمود بر جعبه برش باشد (شکل ۱۶-۳۹).



شکل ۱۶-۳۹: قرار دادن قاب بار قائم روی صفحه بارگذاری جعبه برش

۱۱- به منظور ثبت حرکت قائم دستگاه، باید گیج تغییرات جابجایی قائم را به صورت عمود روی قاب بارگذاری قائم قرار دهیم (شکل ۴۰-۱۶).



شکل ۴۰-۱۶: قرار دادن گیج ثبت جابجایی قائم روی قاب بارگذاری قائم

۱۲- پیچ‌های مربوط به گیج نیروسنجه را تنظیم و سپس سفت می‌کنیم (شکل ۴۱-۱۶).



شکل ۴۱-۱۶: تنظیم کردن و سفت کردن پیچ‌های گیج نیروسنجه

۱۳- اکنون لازم است تا پیچهای مربوط به گیج ثبت تغییرات جابجایی افقی را تنظیم و سفت کنیم (شکل ۴۲-۱۶).



شکل ۴۲-۱۶: سفت کردن و تنظیم کردن پیچهای مربوط به گیج ثبت جابجایی افقی

۱۴- در این مرحله لازم است تا با چرخاندن گیج ثبت جابجایی افقی، عدد آن را روی صفر تنظیم کنیم (شکل ۴۳-۱۶).



شکل ۴۳-۱۶: تنظیم کردن گیج ثبت تغییرات افقی بر روی عدد صفر

۱۵- دو پیچ مربوط به جعبه برش نشان داده شده در شکل ۴۴-۱۶ را باز می کنیم و دو پیچ دیگر را با چرخش مناسب تا نیمه شل می کنیم تا مانع برش نشود، در عین حال یکپارچگی دستگاه را حفظ کند.



شکل ۴۴-۱۶: باز کردن پیچ های جعبه برش

۱۶- اکنون بار قائم (N) مورد نظر را روی نمونه اعمال می کنیم که این امر با قرار دادن وزنه روی کفة میله دوشاخه صورت می گیرد. قسمت عرضی میله دوشاخه روی کلاهک بارگذاری قرار می گیرد که این کلاهک نیز به نوبه خود روی نمونه قرار دارد و بار به کمک آن به نمونه اعمال می شود و در همین حالت تغییرات جابجایی قائم نیز ثبت می شود.



شکل ۴۵-۱۶: قرار دادن وزنه روی میله دوشاخه و ثبت تغییرات جابجایی قائم دستگاه

۱۷- اکنون گیج جابجایی قائم را نیز با چرخاندن، روی صفر تنظیم می‌کنیم (شکل ۱۶-۴۶).



شکل ۱۶-۴۶: تنظیم کردن گیج ثبت تغییرات جابجایی قائم روی عدد صفر

۱۸- دستگاه برش مستقیم را روشن می‌کنیم (شکل ۱۶-۴۷).



شکل ۱۶-۴۷: روشن کردن دستگاه برش مستقیم

۱۹- سرعت تغییر مکان برشی دستگاه باید بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵۴ میلی‌متر در دقیقه باشد. برای هر ده درجه تغییر مکان در گیج افقی، اعداد روی گیج قائم که تغییر مکان قائم را نشان می‌دهد و گیج حلقه (درواقع نیروی افقی  $s$  را اندازه می‌گیرد) را خوانده و یادداشت می‌کنیم. این کار را آنقدر ادامه می‌دهیم تا یکی از حالات زیر اتفاق بیفتد:

- الف- شاخص گیج حلقه بارگذاری به مقدار حداقلی برسد و سپس بازگردد.
- ب- شاخص گیج حلقه بارگذاری به مقدار حداقلی برسد و سپس ثابت باقی بماند.

۲۰- مراحل ۱ تا ۱۸ را حداقل دوبار دیگر نیز تکرار می‌کنیم. در هر آزمایش، وزن مخصوص خشک تراکم نمونه ماسه‌ای باید مانند همان نمونه اول (مراحل ۱ و ۷) باشد. در هر آزمایش جدید باید نیروی  $N$  دو برابر آزمایش قبل در نظر گرفته شود.

#### ۴-۱۶) محاسبات

۱- اعداد گیج‌های جابجایی افقی و قائم و حلقة بارگذاری هنگام انجام آزمایش خوانده می‌شود (ستون‌های ۱ و ۴ و ۵ در جدول ۲-۱۶).

تذکر: علامت (+) در جدول به معنای تورم و اتساع است.

۲- تنش مؤثر قائم ( $\sigma'$ ) روی نمونه را برای هر مرحله تعیین می‌کنیم (ستون ۳ در جدول ۲-۱۶):

$$\sigma' = \frac{N}{(B - \delta) \times L} \quad (5-16)$$

که در این رابطه،  $\delta$  جابجایی افقی قرائت شده در هر مرحله است.

۳- برای هر قرائت گیج‌های افقی و قائم، نیروی برشی را محاسبه می‌کنیم. نیروی برشی ( $S$ )، حاصل ضرب ستون ۵ (قرائت حلقة بارگذاری) در ستون ۶ (ضریب کالیبراسیون حلقة بارگذاری) است که به صورت تبدیل واحد متريک در ستون ۷ نوشته شده است.

تذکر: ضریب کالیبراسیون حلقة بارگذاری معمولاً روی حلقة نوشته شده است.

۴- تنش برشی را در هر مرحله به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\tau = \frac{S}{(B - \delta) \times L} = \frac{\text{ستون ۷}}{\text{ستون ۴} \times L} \times 10^4 \quad (6-16)$$

جدول ۱۶-۲: نمونه‌ای از محاسبات آزمایش برش مستقیم

شماره نمونه: ۲

نوع خاک: خاک ماسه یکنواخت

محل نمونه‌گیری: آگوناوت سیرکل

بار قائم، N: ۲۵/۴۰ kg

نسبت تخلخل، e: ۰/۵۹۷

تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

شخص نمونه‌گیری: .....

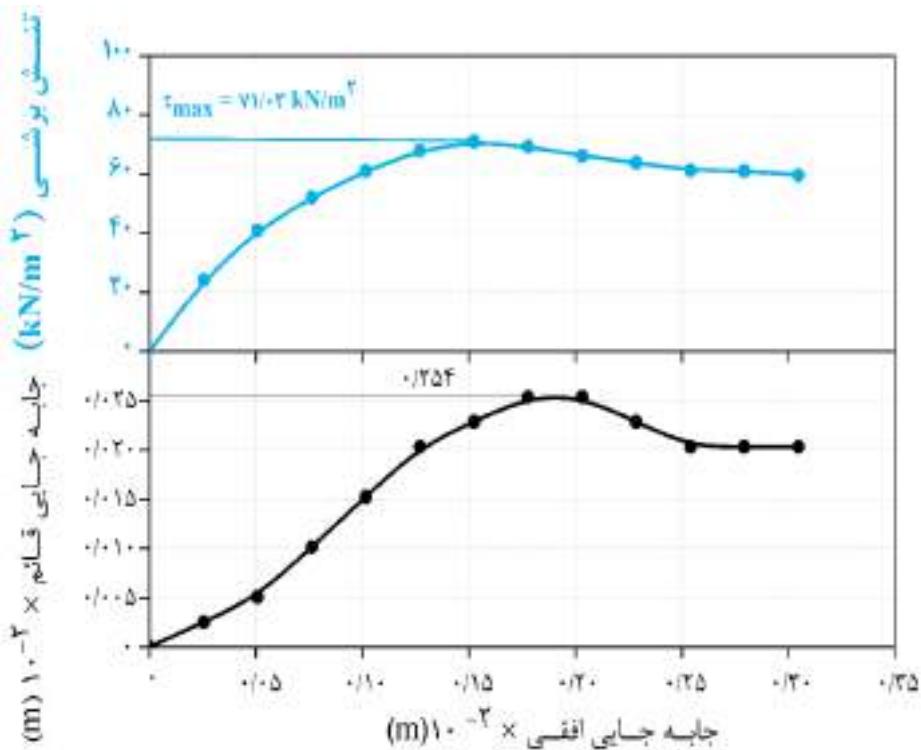
مقدار طول اصلاح شدہ، $B - \delta$ (cm)	جانبه‌جایی افقی، (cm)	تنش قائم، $\sigma'$ (kN/m <sup>2</sup> )	جانبه‌جایی، قائم، (cm)	تعداد درجات گیج حلقه اعمال نیرو (درجه)	ضریب کالیبراسیون حلقه اعمال نیرو، (lb/درجہ)	نیروی برشی، S (kN)	تنش برشی، $\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
۵/۰۸	۰	۹۶/۵۵۵	۰	۰/۳۱	۰	۰	۰
۵/۰۵	۰/۰۲۵۴	۹۷/۱۲۹	۰/۰۰۲۵۴	۴۵	۰/۳۱	۰/۰۶۲۱	۲۴/۲۱
۵/۰۳	۰/۰۵۱۵	۹۷/۵۱۵	۰/۰۰۵۰۸	۷۶	۰/۳۱	۰/۱۰۴۸	۴۱/۰۱
۵	۰/۱۰۰	۹۸/۱۰۰	۰/۰۱۰۱۶	۹۵	۰/۳۱	۰/۱۳۲۴	۵۲/۱۳
۴/۹۸	۰/۱۰۱۶	۹۸/۴۹۴	۰/۰۱۵۲۴	۱۱۲	۰/۳۱	۰/۱۵۴۴	۶۱/۰۳
۴/۹۵	۰/۱۲۷	۹۹/۰۹۱	۰/۰۲۰۳۲	۱۲۴	۰/۳۱	۰/۱۷۱۰	۶۸
۴/۹۳	۰/۱۵۲۴	۹۹/۴۹۳	۰/۰۲۲۸۶	۱۲۹	۰/۳۱	۰/۱۷۷۹	۷۱/۰۳
۴/۹۰	۰/۱۷۷۸	۱۰۰/۱۰۲	۰/۰۲۵۴	۱۲۵	۰/۳۱	۰/۱۷۲۴	۶۹/۲۶
۴/۸۸	۰/۲۰۳۲	۱۰۰/۵۱۲	۰/۰۲۵۴	۱۱۹	۰/۳۱	۰/۱۶۴۱	۶۶/۱۹
۴/۸۵	۰/۲۲۸۶	۱۰۱/۱۳۴	۰/۰۲۰۳۲	۱۱۴	۰/۳۱	۰/۱۵۷۲	۶۳/۸۰
۴/۸۳	۰/۲۵۴	۱۰۱/۵۵۳	۰/۰۲۰۳۲	۱۰۹	۰/۳۱	۰/۱۵۰۳	۶۱/۲۶
۴/۸۰	۰/۲۷۹۴	۱۰۲/۱۸۸	۰/۰۲۰۳۲	۱۰۸	۰/۳۱	۰/۱۴۸۹	۶۱/۰۶
۴/۷۸	۰/۳۰۴۸	۱۰۲/۶۱۵	۰/۰۲۰۳۲	۱۰۵	۰/۳۱	۰/۱۴۴۸	۵۹/۶۳

## رسم منحنی

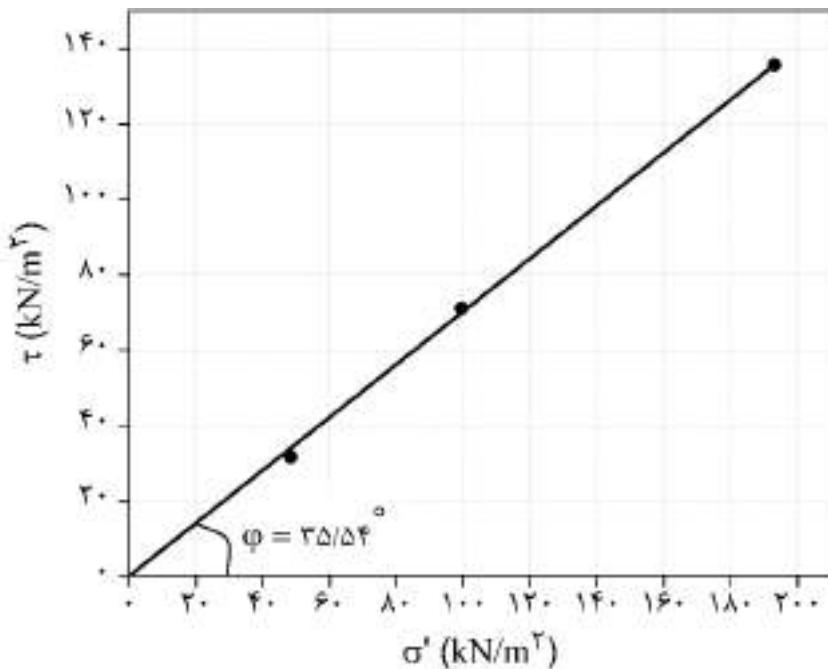
۱- به ازای هر تنش قائم اعمال شده (هر آزمایش برش مستقیم)، منحنی تغییرات  $\tau$  (ستون ۸) را نسبت به تغییر مکان افقی (ستون ۱) مطابق شکل ۴۸-۱۶ برای نتایج جدول ۱۶-۲ ترسیم می‌کنیم. در قسمت پایین همان صفحه‌ای که این منحنی را ترسیم کرده‌ایم و با همان مقیاس افقی، منحنی تغییرات تغییر مکان قائم (ستون ۴) را نسبت به تغییر مکان افقی (ستون ۱) نیز رسم می‌کنیم. اکنون تنش برشی در حالت گسیختگی را از هر منحنی  $\tau$  بر حسب تغییر مکان افقی به دست می‌آوریم (مانند شکل ۴۸-۱۶). به ازای هر  $\sigma'$  (حداقل سه مقدار) منحنی‌های مذکور رسم خواهد شد.

۲- نقاط گسیختگی آزمایش‌های انجام شده را روی منحنی مقاومت برشی ( $\tau$ ) بر حسب تنش قائم ( $\sigma'$ ) قرار داده و بهترین خط را از نقاط مذکور عبور می‌دهیم. این منحنی برای نمونه ماسه‌ای که چسبندگی ندارد، یک خط مستقیم است که از مبدأ مختصات می‌گذرد. این چنین منحنی‌ای برای ماسه‌ای که نتایج مربوط به آن در جدول ۱۶-۲ درج شده است در شکل ۴۹-۱۶ نشان داده شده است. زاویه اصطکاک خاک، شیب این خط مستقیم است.

$$\varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_f}{\sigma'_f}\right) \quad (7-16)$$



شکل ۴۸-۱۶: تغییرات تنش برشی و تغییر مکان قائم نسبت به تغییر مکان افقی برای آزمایش برش مستقیم انجام شده روی نمونه ماسه‌ای که نتایج آن در جدول ۲-۱۶ آمده است

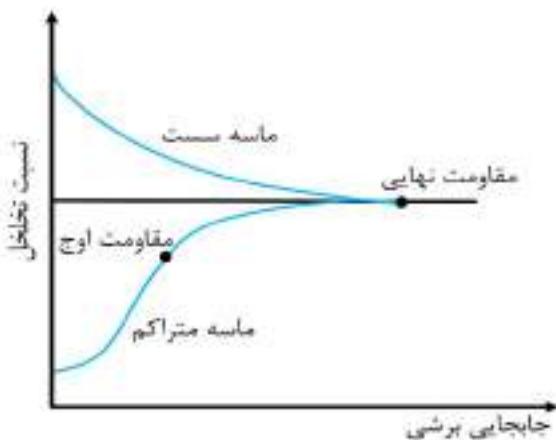


شکل ۴۹-۱۶: تغییرات  $\tau$  نسبت به  $\sigma'$  برای ماسه مورد آزمایش

تذکر: نتایج مربوط به آزمایش با تنש‌های قائم  $\sigma' = 48/26.3 \text{ (kN/m}^2)$  و  $\sigma' = 193/52.6 \text{ (kN/m}^2)$  در جدول ۱۶-۲ نیامده است.

### ۵-۱۶) نکات کلی

- ۱- شرایط آزمایش، از جمله تنש قائم و مقدار رطوبت، باید بر اساس شرایط محل مورد بررسی انتخاب شود.
- ۲- از آنجایی که ارتفاع نمونه در طول اعمال نیروی برشی تغییر می‌کند (همان‌طور که در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است)، بدیهی است که نسبت تخلخل ماسه تغییر کند (حداقل در مجاورت شکاف جعبه برشی). شکل ۵۰-۱۶ ماهیت تغییر نسبت تخلخل را برای ماسه‌های سست و متراکم با جابجایی برشی نشان می‌دهد. در جابجایی برشی بزرگ، نسبت تخلخل‌های ماسه‌های سست و متراکم عملاً یکسان می‌شود و به این نسبت تخلخل، اصطلاحاً نسبت تخلخل بحرانی می‌گویند.



شکل ۵۰-۱۶: تغییرات نسبت تخلخل نمونه خاک با جابجایی برشی

## فصل هفدهم

آزمایش تکمحوری (مقاومت فشاری محصورنشده)

(AASHTO T: 208-90, ASTM D-2166)

### ۱-۱۷) مقدمه و تئوری آزمایش

مکانیسم مقاومت برشی در خاک‌های چسبنده، بسیار پیچیده‌تر از خاک‌های دانه‌ای است. خاک‌های دانه‌ای از ذراتی تشکیل شده است که به علت اندازه و شکلشان، دارای سطح مخصوص کوچکی است و درنتیجه در آن‌ها رفتار نیروهای جرمی، مانند وزن، بیشتر از نیروهای سطحی کنترل کننده است، اما ذرات خاک چسبنده به علت شکل و اندازه‌ای که دارد (غلب پولکی شکل است)، دارای سطح مخصوص زیادی بوده و درنتیجه، رفتارشان بیشتر تابع نیروهای سطحی است تا نیروهای جرمی. مقاومت برشی خاک‌های چسبنده از دو قسمت مقاومت اصطکاکی و مقاومت چسبنده‌گی تشکیل می‌شود. مقاومت اصطکاکی تابع نیروهای وزنی است که اغلب در خاک‌های دانه‌ای به چشم می‌خورد و مقاومت چسبنده‌گی تابع نیروهای سطحی است. البته رفتار دقیق نیروهای سطحی که باعث چسبنده‌گی می‌شود، هنوز ناشناخته است. باید توجه داشت که چسبنده‌گی خاک یک پارامتر ثابت نیست، بلکه تابعی از بار منتقل شده توسط سازه خاک، بارهای بین-دانه‌ای و چگونگی انجام آزمایش است. در حالتی که هیچ بار جانبی‌ای بر نمونه وارد نشود، چسبنده‌گی به عنوان مقاومت برشی خاک مطرح می‌گردد.

مقاومت برشی خاک بر اساس رابطه موهر-کلمب (پوش گسیختگی موهر-کلمب) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \varphi \quad (1-17)$$

$\tau_f$ : تنش برشی خاک در حالت گسیختگی

$c$ : چسبنده‌گی خاک

$\sigma_f$ : تنش قائم خاک در حالت گسیختگی

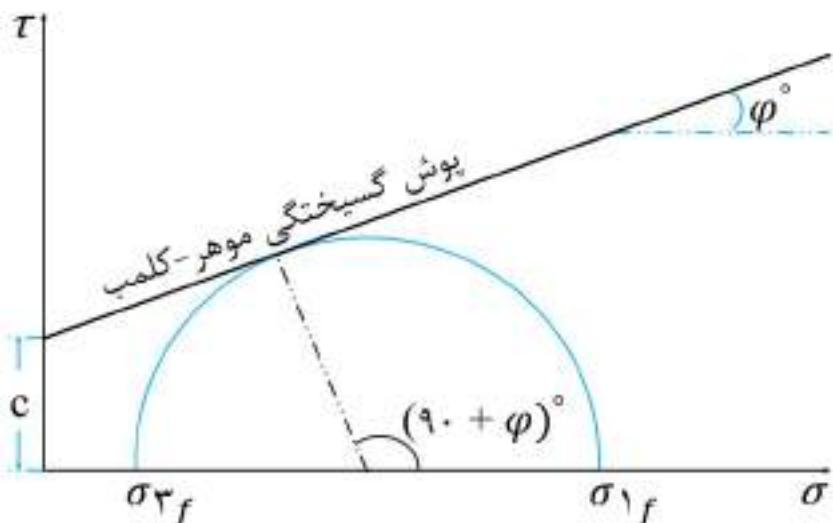
$\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک

که در این حالت، رابطه تنش‌های اصلی در لحظه گسیختگی به صورت زیر است (شکل ۱-۱۷):

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan(45 + \frac{\varphi}{2}) \quad (2-17)$$

$\sigma$ : تنش اصلی بزرگ‌تر خاک در حالت گسیختگی

$\sigma_{3f}$ : تنش اصلی کوچک‌تر خاک در حالت گسیختگی

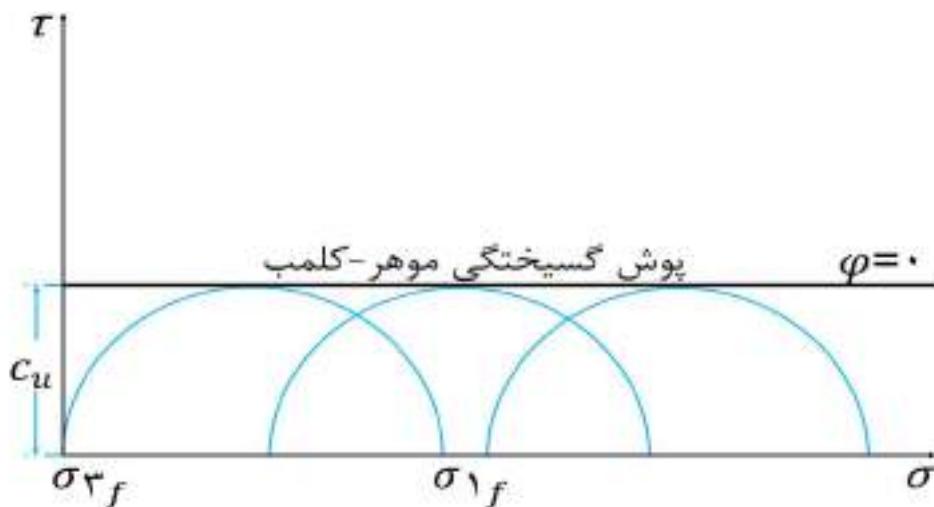


شکل ۱-۱۷: پوش گسیختگی موهر-کلمب و تنش‌های اصلی در حالت گسیختگی

رابطه (۱-۱۷) برای خاک رس اشباع در حالت زهکشی نشده ( شرایط  $\sigma = \varphi_u$  ) پس از ساده شدن، به صورت رابطه زیر قابل بازنویسی است:

$$\tau_f = c_u \quad (3-17)$$

$c_u$ : چسبندگی زهکشی نشده ( مقاومت برشی زهکشی نشده ) خاک رس اشباع  
بر اساس رابطه (۳-۱۷) می توان دریافت که در آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده برای خاک رس چسبندگی، پوش گسیختگی موهر-کلمب ( شکل ۱-۱ )، به صورت افقی درمی آید و در این حالت شعاع دوایر موهر ثابت و برابر با  $c_u$  می شود ( شکل ۲-۱۷ ). از این رو می توان برای محاسبه چسبندگی زهکشی نشده رس اشباع، از آزمایش فشاری محصور نشده ( تکمحوری ) استفاده نمود.



شکل ۲-۱۷: پوش گسیختگی موهر-کلمب برای رس زهکشی نشده

در آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری که در واقع حالت ساده شده ای از آزمایش سه محوری زهکشی نشده است، نمونه استوانه ای شکل از خاک، بدون هیچ گونه تنیش جانبی ( $\sigma_3 = 0$ )، در شرایط کرنش کنترل تا رسیدن به گسیختگی تحت بار محوری ( $\sigma_1$ ) قرار می گیرد ( شکل ۳-۱۷ ). سپس با ترسیم نمودار تنیش-کرنش و قرائت نقطه حد اکثری نمودار، مقدار مقاومت فشاری تکمحوری نمونه در لحظه گسیختگی محاسبه می شود.

مقدار مقاومت فشاری تکمحوری ( $q_u$ ) با ساده شدن رابطه (۲-۱۷) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\sigma_{1f} = q_u = \cdot + 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4-17)$$

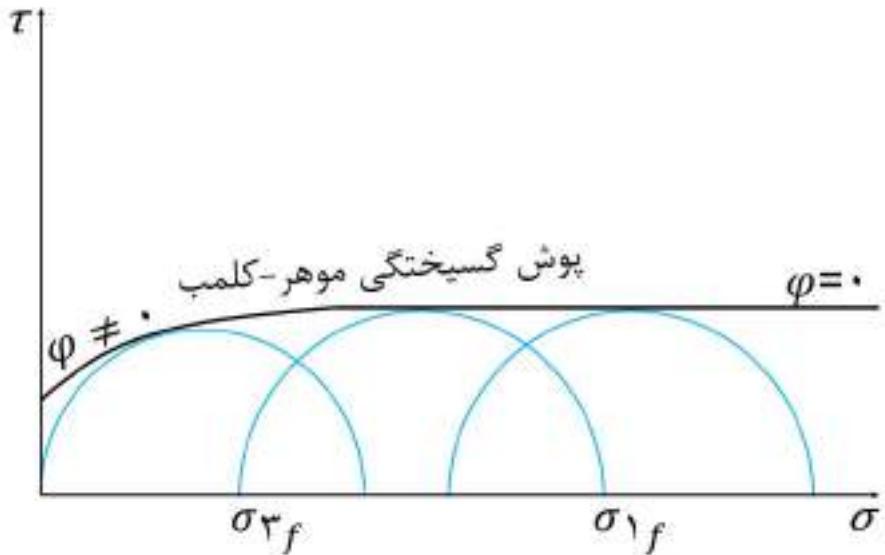


شکل ۱۷-۳: شرایط انجام آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری

- رابطه (۴-۱۷) در حالتی که نمونه مورد استفاده در آزمایش تکمحوری از نوع رس اشباع باشد مقدار  $c_u$  و  $\phi = 0$  (به صورت زیر در خواهد آمد):

$$q_u = 2c_u \quad (4-17)$$

- حال اگر نمونه اشباع نباشد یا ترکدار باشد، در این صورت در ابتدای آزمایش  $\phi \neq 0$  است و پوش گسیختگی نسبت به افق با زاویه  $\theta_f$  قرار می‌گیرد. درنتیجه  $\frac{q_u}{2} < c_u$  می‌شود (شکل ۱۷-۴). در این حالت بهمنظور تعیین مقدار  $c_u$  به زاویه صفحه گسیختگی با افق ( $\theta_f$ ) نیاز است که به صورت چشمی در آزمایشگاه اندازه گیری می‌شود. لازم به ذکر است که در بیشتر موارد، آزمایش روی نمونه‌های غیراشباع انجام می‌شود و مقدار  $c_u$  برابر با  $\frac{q_u}{2}$  فرض شده و گزارش می‌گردد.



شکل ۱۷-۴: پوش گسیختگی موهر-کلمب برای رس غیراشباع یا ترکدار زهکشی نشده

آزمایش تک محوری یک روش سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده خاک‌های چسبنده و خاک‌هایی است که مقاومت خود را پس از حذف فشار همه‌جانبه حفظ می‌کند؛ مانند رس‌ها و خاک‌های سیمانته شده.<sup>۱</sup> از این‌رو به دلیل پایدار نبودن خاک‌های سیلتی، ماسه‌ای یا خاک‌های کلوخه‌ای و ترک‌خورده و پیت‌ها<sup>۲</sup>، این آزمایش را نمی‌توان برای این نوع از خاک‌ها انجام داد. شرایط تنیش جانبی صفر (کم) در رسوبات جوان و در اعمق کم رخ می‌دهد، بنابراین در طراحی پی‌های سطحی واقع بر نهشته‌های رس اشباع جوان، معمولاً از پارامتر مقاومت برشی زهکشی نشده ( $C_u$ ) به دست آمده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخصوص نشده<sup>۳</sup> می‌توان بهره جست. نمونه‌ها در این آزمایش بسته به شرایط مورد نظر طراح، می‌تواند از نوع نمونه‌های دست‌نخورده، بازسازی شده یا ساخته شده در آزمایشگاه با درصد تراکم و رطوبت مورد نظر باشد. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری تک محوری در خاک‌های رسی اشباع، با افزایش درصد رطوبت خاک، کاهش می‌یابد. در خاک‌های رسی غیر اشباع، حتی اگر وزن مخصوص خشک خاک ثابت باقی بماند، این مقاومت با افزایش درجه اشباع خاک اندکی کاهش می‌یابد.

## ۲-۱۷) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- ۱- دستگاه آزمایش مقاومت فشاری مخصوص نشده (شکل ۵-۱۷)
- ۲- نمونه‌های بازسازی شده و لوازم جانبی آن یا نمونه‌های دست‌نخورده<sup>۴</sup> (نمونه‌های لوله شلبی<sup>۵</sup> (شکل ۶-۱۷) یا نمونه‌های کنده شده بلوکی<sup>۶</sup> (شکل ۷-۱۷))
- ۳- برای نمونه‌های دست‌نخورده: دستگاه هیدرولیکی خارج کردن نمونه از نمونه‌گیر<sup>۷</sup> (شکل ۸-۱۷) یا ابزار برش<sup>۸</sup> برای بریدن نمونه‌های دست‌نخورده
- ۴- برای نمونه‌های بازسازی شده: دستگاه تراکم و لوازم جانبی آن (شکل ۹-۱۷)
- ۵- دستگاه جابه‌جایی سنج (LVDT<sup>۹</sup>) با قابلیت اندازه‌گیری تغییر شکل تا ۰٪ طول نمونه آزمایش (شکل ۱۰-۱۷)
- ۶- خط کش
- ۷- ترازو با دقیق ۰/۰۱ گرم
- ۸- گرم کن
- ۹- ظرف تبخیر چینی

## دستگاه آزمایش فشاری مخصوص نشده

روش متداول در انجام این آزمایش، روش کرنش کنترل است؛ یعنی با اعمال کرنش‌های مختلف در گام‌های مشخص، میزان تنیش خوانده می‌شود تا زمانی که مقدار کرنش به مقدار معینی برسد؛ مثلاً ۰٪. در شکل ۵-۱۷ نمونه‌هایی از دستگاه تک محوری نشان داده شده است. قسمت‌های اصلی این دستگاه شامل دو صفحه (دو فک) اعمال بار در بالا و پایین است. حلقة بالایی دستگاه توسط میله‌ای رزو شده و به یک تیر عرضی متصل شده است. خود این تیر عرضی به دو پایه فلزی، متکی است. فک و صفحه زیرین، قادر به حرکت در راستای قائم در جهت بالا و پایین است.

<sup>1</sup>. Cemented soils

<sup>2</sup>. Peat soils

<sup>3</sup>. Unconfined compressive strength

<sup>4</sup>. Undisturbed soil sample

<sup>5</sup>. Shelby tube samples

<sup>6</sup>. Block carved samples

<sup>7</sup>. Hydraulic sample extruder

<sup>8</sup>. Soil trimming tools

<sup>9</sup>. Linear Variable Differential Transformer



شکل ۱۷-۵: نمونه‌هایی از دستگاه آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده (تکمحوری)



شکل ۱۷-۶: ایجاد نمونه‌های بلوکی برای برداشت نمونه‌های دست-نخورد

شکل ۱۷-۷: لوله‌های جدار نازک شلبي



شکل ۸-۱۷: دستگاه هیدرولیکی خارج کردن نمونه‌های دستنخورد ۵ از نمونه‌گیر



شکل ۹-۱۷: دستگاه تراکم و ملحقات آن



شکل ۱۰-۱۷: دستگاه جابه‌جایی سنج (LVDT)

### ۳-۱۷) روش انجام آزمایش ضوابط و نکات مربوط به ابعاد نمونه‌ها

نمونه استوانه‌ای خاک باید دارای نسبت  $\frac{\text{ارتفاع}}{\text{قطر}} < 2$  باشد. طبق استاندارد می‌توان قطر نمونه‌ها را  $1/4$  اینچ ( $35/56$  میلی‌متر) و ارتفاع آن‌ها را  $3/5$  اینچ ( $88/9$  میلی‌متر) در نظر گرفت (دقیق‌تر کنید که بیشتر در تست‌های آزمایشگاهی، قطر نمونه‌ها را  $35$  میلی‌متر و ارتفاع آن‌ها را  $70$  میلی‌متر در نظر می‌گیریم). همچنین لازم به ذکر است که قطر نمونه‌ها باید حداقل  $1/3$  اینچ ( $30$  میلی‌متر) باشد و اندازه بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه آزمایشی نیز باید کوچک‌تر از  $\frac{1}{6}$  قطر نمونه باشد. چنانچه قطر نمونه‌ها  $2/8$  اینچ ( $72$  میلی‌متر) یا بزرگ‌تر باشد، اندازه بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه باید کوچک‌تر از  $\frac{1}{8}$  قطر نمونه باشد. برای نمونه‌های دست‌نخورده، به دلیل اینکه نمی‌توان قبیل از آزمایش این کنترل‌ها را انجام داد، چنانچه پس از آزمایش مشخص شود که دانه‌هایی با قطر بزرگ‌تر از مقدار مجاز در نمونه آزمایش موجود بوده، باید این مطلب در قسمت توضیحات گزارش ژئوتکنیک ذکر شود.

#### تهیه نمونه‌ها

**الف - نمونه‌های دست‌نخورده:** نمونه‌های تهیه‌شده در این مرحله باید با مقطع دایره‌ای و دارای دو انتهای کاملاً صاف و عمود بر محور نمونه باشد. از این‌رو، ابتدا باید با احتیاط نمونه را توسط «دستگاه خارج‌کردن نمونه از نمونه‌گیر» از نمونه‌گیر خارج کرد و پس از آن باید دقت شود تا نمونه‌ها هنگام حمل، دچار هیچ‌گونه دست‌نخوردگی، ترک، تغییر شکل یا تغییر رطوبت نشود. نمونه‌هایی که از نمونه‌گیرهای جدار نازک خارج می‌شود را می‌توان پس از صاف کردن ابتدا و انتهای نمونه، بدون اصلاح دیگری، برای آزمایش به کار برد. در صورت لزوم به تراشیدن نمونه‌ها، باید دقت زیادی شود تا نمونه‌ها در این حالت نیز دچار هیچ‌گونه دست‌نخوردگی نشود. چنانچه هنگام تراشیدن نمونه‌ها، دانه‌هایی از سطح تراشیده شده آن‌ها کنده شود و به واسطه آن، فرورفتگی‌هایی در سطح نمونه ایجاد شود، این فرورفتگی‌ها را باید با استفاده از خاک‌های حاصل از تراش بعد از ورز دادن کافی پر کرد. مقداری از باقیمانده‌های خاک برای تعیین درصد رطوبت در جعبه مخصوص نگهداری می‌شود. برای حفظ رطوبت موجود در نمونه‌ها باید نمونه‌ها را در اتاقی با قابلیت کنترل رطوبت نگهداری نمود.

**ب- نمونه‌های بازسازی شده:** نمونه‌های بازسازی شده را می‌توان از نمونه‌های دستنخوردهای که به هر دلیل خراب شده است یا نمونه‌های دستنخورده تهیه نمود. در مواردی که نمونه‌ها از نوع نمونه‌های دستنخورده خراب شده باشد، جهت حفظ رطوبت نمونه‌ها، آن‌ها را درون یک کیسه نازک پلاستیکی قرار می‌دهیم و توسط انگشت ورز می‌دهیم تا نمونه‌ها به صورت کاملاً یکنواخت درآید. هنگام ورز دادن باید دقت شود که هوایی داخل نمونه محبوس نشود. برای به دست آوردن چگالی یکنواخت در نمونه‌های بازسازی شده، باید به نسبت فضای خالی مشابه نمونه دستنخورده و حفظ مقدار رطوبت طبیعی خاک دقت شود.

**ج- نمونه‌های ساخته شده:** این نمونه‌ها با تراکم و درصد رطوبت مورد نظر طراح، در قالب با استفاده از تراکم استاتیکی (شکل ۹-۱۷) یا با روش دستی ساخته می‌شود. تجربه نشان داده است که تراکم و آماده کردن نمونه‌ها و به دست آوردن نتایج قابل قبول در حالتی که درصد اشباع بیش از ۹۰ درصد مد نظر باشد، مشکل خواهد بود.

### مراحل انجام آزمایش

۱- نمونه‌ای برای آزمایش تهیه می‌کنیم، در صورت استفاده از نمونه‌های دستنخورده در این آزمایش، این نمونه‌ها باید به ابعاد مناسب برای انجام آزمایش برش داده شود. در کارهای آزمایشگاهی، نمونه‌هایی با درصد رطوبت‌های مختلف با استفاده از دستگاه تراکم استاتیکی تهیه می‌شود.

**تذکر:** همچنین می‌توان به جای استفاده از دستگاه تراکم استاتیکی، با روش دستی نیز مخلوط خاک و آب را درون قالب متراکم نمود.

۲- قطر و ارتفاع نمونه را اندازه گرفته و جرم آن را نیز به دست می‌آوریم.

۳- نمونه را دقیقاً وسط دو فک دستگاه قرار می‌دهیم. اگر راستای نمونه عمود بر دو فک بالایی و پایینی دستگاه نباشد، خیلی زود منحنی تنش - کرنش به حالت افقی خود نزدیک می‌شود. فک فوقانی را با دقت روی سطح فوقانی نمونه مماس می‌کنیم. سپس عقربه مدرج اندازه گیری بار متصل به حلقه را روی صفر تنظیم می‌کنیم. یک عقربه مدرج (هر درجه این عقربه برابر با  $0.001$  میلی‌متر) حرکت قائم است) دیگر نیز برای اندازه گیری جایه‌جایی رو به بالای فک تحتانی دستگاه (برای ثبت مقدار فشرده شدن نمونه یا به عبارتی کرنش نمونه هنگام آزمایش) باید به آن متصل شود. این عقربه که همان جایه‌جایی سنج است، نیز باید در ابتدای آزمایش روی صفر قرار داده شود.

**تذکر:** در برخی از آزمایش‌های به جای دستگاه جایه‌جایی سنج از ساعت اندیکاتور استفاده می‌شود.

۴- دستگاه را روش می‌کنیم و بارهای وارد شده (قرائت‌های عقربه مدرج متصل به حلقه) و تغییر شکل‌های نمونه را ثبت و یادداشت می‌کنیم. در طی اعمال بار، میزان کرنش قائم باید به نحوی تنظیم شود که بین  $0.5\%$  تا  $2\%$  در هر دقیقه باشد. در مراحل اولیه آزمایش، معمولاً قرائت‌ها به ازای هر  $0.1$  میلی‌متر) تغییر شکل نمونه انجام می‌شود ولی در مراحل بعدی، این قرائت‌ها می‌تواند برای زمانی که منحنی بار-تغییر شکل شروع به نزول می‌کند به ازای هر  $0.02$  میلی‌متر) تغییر شکل نمونه، انجام پذیرد.

۵- قرائت‌ها ادامه می‌یابد تا زمانی که یکی از حالات زیر رخدید و در این صورت دستگاه متوقف می‌شود:

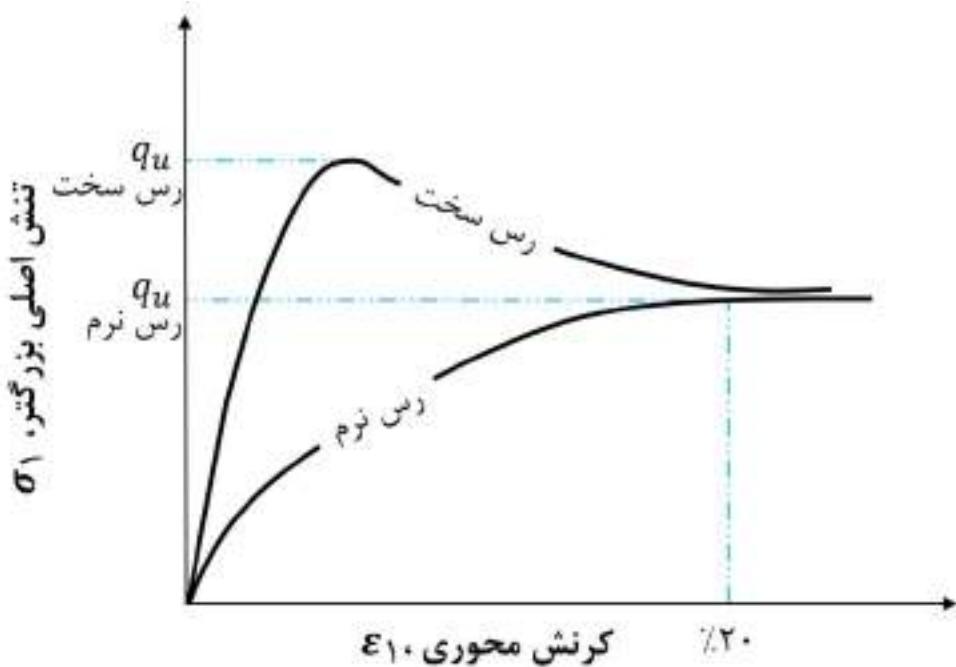
الف- بار به نقطه اوج برسد و سپس کاهش یابد.

ب- بار به مقدار حداکثری برسد و بعد از آن تقریباً ثابت باقی بماند (بعد از آنکه بار به مقدار اوج رسید، حدود ۵ قرائت ثابت انجام شود).

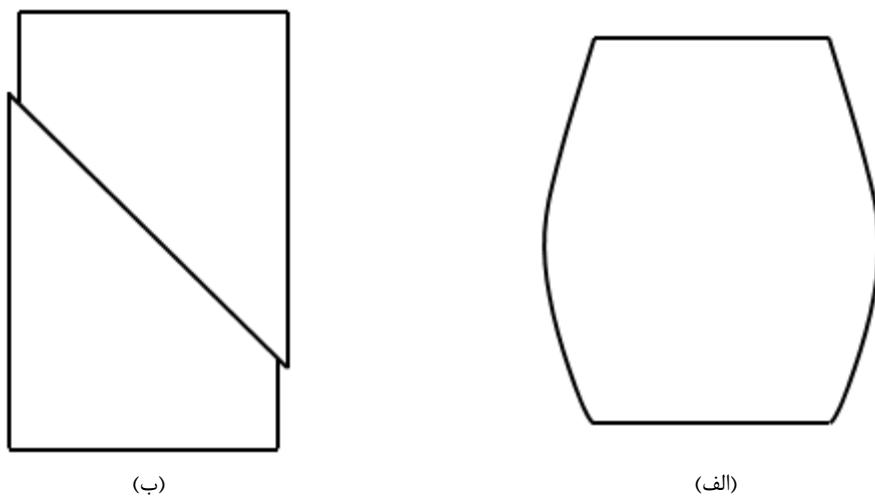
ج- تغییر شکل نمونه قبل از رسیدن به نقطه اوج معادل  $20\%$  کرنش نمونه باشد. این حالت در رس‌های نرم اتفاق می‌فتند (شکل ۱۱-۱۷). بسته به سفتی و نرمی رس، اکثر نمونه‌های مورد آزمایش پس از گسیختگی،

به صورت شماتیک به یکی از صورت‌های شکل ۱۲-۱۷ درمی‌آید. همچنین شکل ۱۳-۱۷ یک نمونه واقعی از یک خاک را تحت آزمایش تکمحوری نشان می‌دهد.

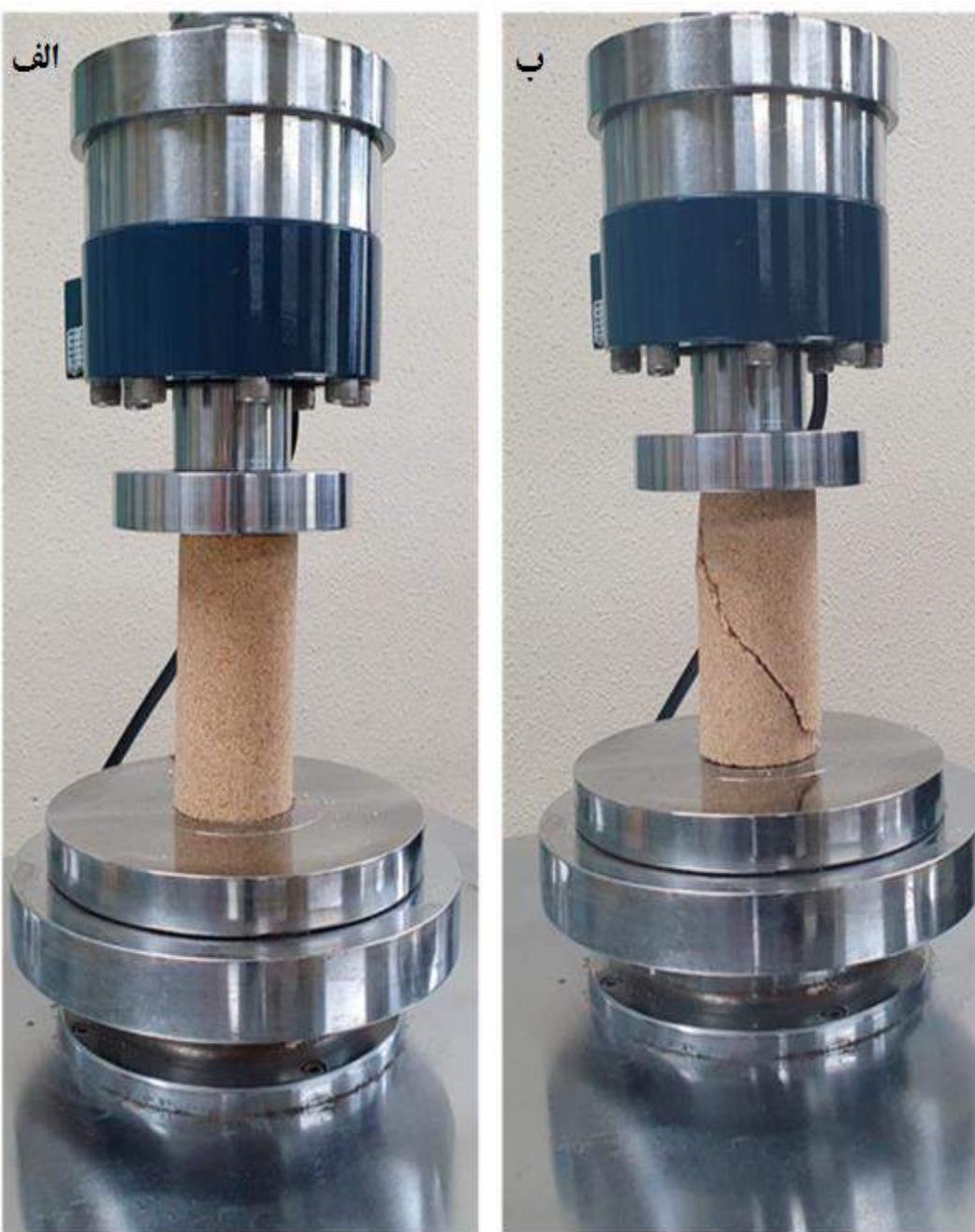
تذکرہ: لازم به ذکر است که مقدار تغییر شکل نهایی مجاز برای نمونه می‌تواند متفاوت باشد. برخی مراجع این مقدار را معادل ۱۵٪ و برخی دیگر معادل ۱۰٪ در نظر گرفته‌اند.



شکل ۱۲-۱۷: تغییرات تنش اصلی بزرگتر در مقابل کرنش محوری برای خاک‌های رسی سخت و نرم



شکل ۱۲-۱۷: ظاهر معمول نمونه‌ها پس از گسیختگی در آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده: (الف) نمونه نرم‌تر؛ (ب) نمونه سخت‌تر



شکل ۳-۱۷: نمونه‌ای از یک خاک تحت آزمایش تک محوری: (الف) نمونه در ابتدای بارگذاری؛ (ب) نمونه پس از گسیختگی

- ۶- با پایین بردن فک تحتانی دستگاه، بار را از روی نمونه حذف می‌کنیم.
- ۷- نمونه را از بین دو فک خارج می‌کنیم.
- ۸- شکل گسیختگی در نمونه را با دست روی کاغذی رسم یا از آن عکسی تهیه می‌کنیم و همچنین زاویه ترک با افق را اندازه می‌گیریم.
- ۹- نمونه را بلافارسله داخل ظرف تبخیر چینی قرار داده و درصد رطوبت آن را پس از خشک کردن در گرمکن به دست می‌آوریم.

## (۴-۱۷) محاسبات

با توجه به جدول ۱-۱۷:

۱- کرنش قائم ( $\epsilon$ ) نمونه را از طریق رابطه زیر محاسبه می‌کنیم (ستون ۲ در جدول ۱-۱۷):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6-17)$$

 $\Delta L$ : تغییر شکل نمونه در راستای قائم $L$ : ارتفاع اولیه نمونه

۲- بار قائم وارد بر نمونه را محاسبه می‌کنیم (ستون ۴ در جدول ۱-۱۷):

$$\text{ضریب کالیبراسیون حلقه} \times \text{قرائت‌های عقربه مدرج متصل به حلقه} (\text{ستون ۳}) = \text{بار قائم وارد شده} \quad (7-17)$$

۳- سطح مقطع اصلاح شده نمونه ( $A_c$ ) در هر مرحله را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم (ستون ۵ در جدول ۱-۱۷):

$$A_c = \frac{A}{1 - \epsilon} \quad (8-17)$$

A: سطح مقطع اولیه نمونه در ابتدای آزمایش  $(\frac{\pi D^4}{4})$ 

D: قطر اولیه نمونه در ابتدای آزمایش

۴- مقدار تنش ( $\sigma$ ) روی نمونه را محاسبه می‌کنیم (ستون ۶ در جدول ۱-۱۷):

$$\sigma \left( \frac{kN}{m^2} \right) = \frac{(N) \text{ بار قائم وارد}}{A_c (mm^2)} \times 1000 = \frac{\text{ستون ۴}}{\text{ستون ۵}} \times 1000 \quad (9-17)$$

## رسم منحنی

منحنی تغییرات تنش (ستون ۶ جدول ۱-۱۷) را نسبت به کرنش (ستون ۲ جدول ۱-۱۷) رسم می‌نماییم. تنش نقطه اوج را از روی منحنی تعیین می‌کنیم. این مقدار همان مقاومت فشاری مخصوص نشده است ( $q_u$ ). چنانچه قبل از رسیدن به تنش نقطه اوج، کرنش نمونه ۲۰٪ شود، در این صورت تنش متناظر با این کرنش را به عنوان  $q_u$  در نظر می‌گیریم. نمونه‌ای از این محاسبات و نمودار تنش-کرنش ذکرشده در قسمت‌های پیشین، در جدول ۱-۱۷ و شکل ۱۴-۱۷ ارائه شده است.

## جدول ۱-۱۷: آزمایش فشاری محصور نشده (تک محوری)

شماره نمونه: ۳

نوع خاک: خاک رس قهوه‌ای روش

محل نمونه‌گیری: بلوار ترینیتی

وزن مرطوب نمونه: ۱۴۹/۸ g درصد رطوبت: ۱۲٪

ضریب کالیبراسیون حلقه: یک درجه = ۰/۲۶۴ پوند

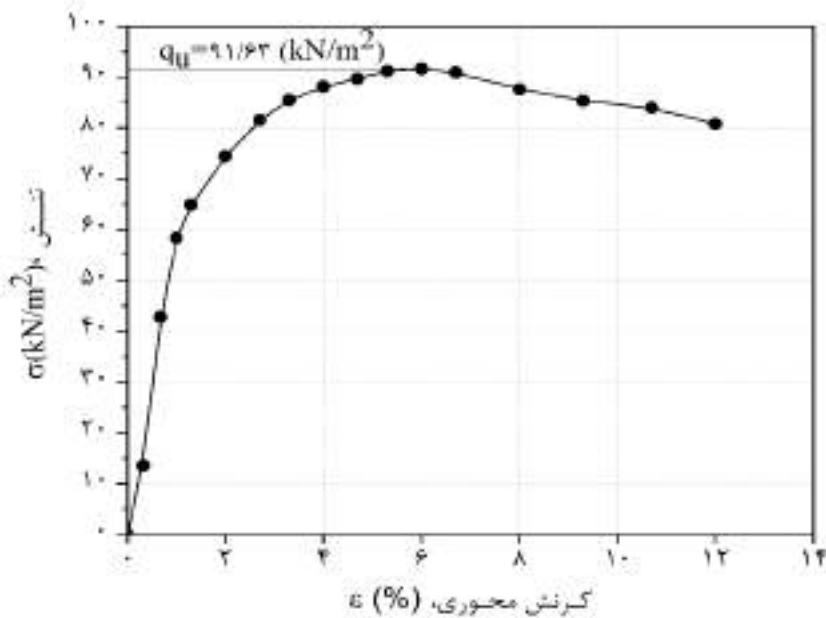
شخص نمونه‌گیری:

طول نمونه، L: ۷۶/۲ mm قطر نمونه، D: ۳۶/۳۲ mm

$$A_c = \frac{\pi}{4} D^2 = 1036/0.5 \text{ mm}^2$$

تاریخ نمونه‌گیری: ...../...../.....

تنش، $q$ (kN/m <sup>2</sup> ) (۶)	سطح مقطع اصلاح- شدہ ( $A_c = \frac{A}{1-\varepsilon}$ ) (mm <sup>2</sup> ) (۵)	ستون = ۳ بار کالیبراسیون ضریب حلقه (۴)	قرائت عقریه مدرج حلقه (تعداد درجات) (۳)	کرنش قائم $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ (۲)	تغییر شکل نمونه $\Delta l$ = (mm) (۱)
•	1036/0.5	•	•	•	•
۱۳/۵۶	۱۰۳۹/۴۸	۱۴/۰۹۲	۱۲	۰/۰۰۳۳	۰/۲۵۴
۴۲/۷۸	۱۰۴۳/۰۴	۴۴/۶۲۵	۳۸	۰/۰۰۶۷	۰/۵۰۸
۵۸/۳۵	۱۰۴۶/۵۲	۶۱/۰۶۵	۵۲	۰/۰۱	۰/۷۶۲
۶۴/۸۹	۱۰۴۹/۷۰	۶۸/۱۱۱	۵۸	۰/۰۱۳	۱/۰۱۶
۷۴/۴۲	۱۰۵۷/۱۹	۷۸/۶۸۰	۶۷	۰/۰۲	۱/۵۲۴
۸۱/۶۱	۱۰۶۴/۸۰	۸۶/۹۰۰	۷۴	۰/۰۲۷	۲/۰۳۲
۸۵/۴۹	۱۰۷۱/۴۱	۹۱/۵۹۸	۷۸	۰/۰۳۳	۲/۵۴
۸۸/۱۴	۱۰۷۹/۲۲	۹۵/۱۲۱	۸۱	۰/۰۴	۳/۰۴۸
۸۹/۶۶	۱۰۸۷/۱۵	۹۷/۴۶۹	۸۳	۰/۰۴۷	۳/۵۵۶
۹۱/۲۴	۱۰۹۴/۰۳	۹۹/۸۱۸	۸۵	۰/۰۵۳	۴/۰۶۴
۹۱/۶۳	۱۱۰۲/۱۸	۱۰۰/۹۹۲	۸۶	۰/۰۶	۴/۵۷۲
۹۰/۹۵	۱۱۱۰/۴۵	۱۰۰/۹۹۲	۸۶	۰/۰۶۷	۵/۰۸
۸۷/۵۹	۱۱۲۶/۱۴	۹۸/۶۴۴	۸۴	۰/۰۸	۶/۰۹۶
۸۵/۳۳	۱۱۴۲/۲۸	۹۷/۴۶۹	۸۳	۰/۰۹۳	۷/۱۱۲
۸۴/۰۱	۱۱۶۰/۱۹	۹۷/۴۶۹	۸۲	۰/۱۰۷	۸/۱۲۸
۸۰/۷۹	۱۱۷۷/۳۳	۹۵/۱۲۱	۸۱	۰/۱۲	۹/۱۴۴



شکل ۱۴-۱۷: تغییرات تنش محوری بر حسب کرنش محوری بر اساس اعداد مندرج در جدول ۱-۱۷

همان‌طور که پیش‌تر در قسمت مقدمه بیان گردید، مقدار  $c_u$  برابر با نصف مقدار  $q_u$  است؛ پس در این صورت با توجه به شکل ۱۴-۱۷ داریم:

$$c_u = \frac{q_u}{2} = \frac{91/63}{2} = 45/815 \text{ (kN/m²)} \quad (10-17)$$

#### ۱۴-۱۷) نکات کلی

- ۱- در تعیین مقاومت تکمحوری بهتر است این آزمایش برای دو یا سه نمونه تکرار شود و مقدار متوسط به عنوان مقاومت تکمحوری ( $q_u$ ) گزارش شود.
- ۲- دو مزیت این آزمایش نسبت به آزمایش برش مستقیم این است که نخست تنش‌ها و کرنش‌ها به شکل یکنواخت در نمونه منتشر می‌شود و دیگر اینکه سطح شکست در ضعیفترین صفحه خاک رس اتفاق می‌فتد و به عبارت دیگر سطح شکست به نمونه دیکته نمی‌شود.
- ۳- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده تخمینی برای مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک‌های ریزدانه ارائه می‌دهد که توضیح می‌دهد یک خاک ریزدانه چگونه تحت شرایط بارگذاری کوتاه‌مدت (سریع) که فشار آب منفذی اضافی فرست زهکشی‌شدن را ندارد، رفتار می‌کند. از این روش بیشتر برای ارزیابی ظرفیت باربری خاک در حالت زهکشی-نشده استفاده می‌شود. با این حال، در بیشتر موارد لازم است تا تخمینی از مقاومت برشی در شرایط درازمدت که فشار آب منفذی اضافی از بین می‌رود نیز در اختیار طراح قرار گیرد که یک مثال رایج در این موارد، ارزیابی پایداری شیروانی‌های خاکی در درازمدت است. در این شرایط، برآورد پارامترهای مقاومتی زهکشی‌شده خاک با استفاده از آزمایش مقاومت سه‌محوری (ASTM D4767) ضروری است.
- ۴- این آزمایش هیچ‌گاه نمی‌تواند جایگزینی برای آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده (ASTM D2850) باشد.
- ۵- نمونه‌های خاکی که ساختار ترک‌خورده داشته باشد (لس‌ها یا رس‌های بسیار ضعیف) یا نمونه‌هایی که حاوی مقدار قابل توجهی سیلت یا ماسه باشد، در آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده مقاومت بیشتری نسبت به این

- آزمایش خواهد داشت. همچنین مقاومت به دست آمده برای نمونه‌های غیر اشباع در این آزمایش و آزمایش تحکیم-نیافته زهکشی نشده یکسان نیست.

۶- مقدار  $q_u$  تقریب خوبی از میزان قوام<sup>۱</sup> خاک چسبنده ارائه می‌دهد:

جدول ۲-۱۷: قوام متناظر با بازه تغییرات  $q_u$  در سیستم انگلیسی

$q_u$ ( $lb/ft^2$ )	قوام
۰-۵۰۰	بسیار نرم
۵۰۰-۱۰۰۰	نرم
۱۰۰۰-۲۰۰۰	متوسط
۲۰۰۰-۴۰۰۰	soft
۴۰۰۰-۸۰۰۰	بسیار سفت

جدول ۲-۱۷: قوام متناظر با بازه تغییرات  $q_u$  در سیستم SI

$q_u$ ( $kN/m^2 = kPa$ )	قوام
۰-۲۴	بسیار نرم
۲۴-۴۸	نرم
۴۸-۹۶	متوسط
۹۶-۱۹۲	soft
۱۹۲-۳۸۳	بسیار سفت

۷- در بیشتر موارد مقاومت فشاری خاک‌های رسی که به صورت طبیعی رسوب کرده است<sup>۳</sup>، پس از بازسازی و حتی بدون هیچ‌گونه تغییر در درصد رطوبتشان، به شدت کاهش می‌یابد. این موضوع را حساسیت<sup>۴</sup> خاک‌های رسی نامند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_t = \frac{\text{نمونه دست نخورد}}{\text{نمونه بازسازی شده}} \quad (17-11)$$

حساسیت بیشتر خاک‌های رس بین ۱ الی ۸ است؛ اما این پارامتر برای رس‌های دریابی که درجه فلوکولاسیونشان<sup>۵</sup> (درجه تجمعشان) بالاست بین ۱۰ تا ۸۰ متغیر است. بر اساس مقادیر  $t_c$  رس‌ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

جدول ۲-۱۷: دسته‌بندی متناظر با مقدار حساسیت خاک‌های رسی

توضیح	حساسیت، $S_t$
کمی حساس	۱-۲
نیمه حساس	۲-۴
بسیار حساس	۴-۸
کمی روان <sup>۶</sup>	۸-۱۶
نیمه روان	۱۶-۳۲
بسیار روان	۳۲-۶۴
کاملاً روان	> ۶۴

۱. Consistency

۲. واحد اصلی تنفس (فشار) در سیستم SI، پاسکال است. در این قسمت، به دلیل خوانایی بهتر، از واحد کیلوپاسکال استفاده شده است.

۳. Naturally deposited clayey soils

۴. Sensitivity

۵. Flocculation

۶. Slightly quick



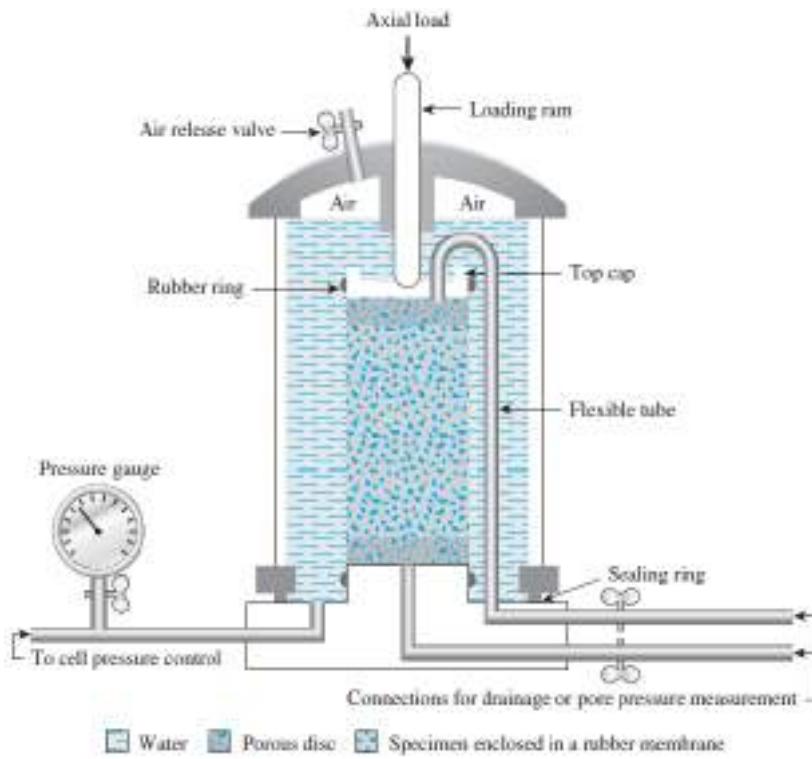
## فصل هجدهم

(آزمایش سه محوری (ASTM D7181, ASTM D4767, ASTM D2850)

### ۱-۱۸) مقدمه و تئوری آزمایش

#### آزمایش سه محوری

آزمایش سه محوری یکی از مطمئن‌ترین روش‌های موجود برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک است. این آزمایش به طور گسترده‌ای در تحقیقات و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش سه محوری در شکل ۱۸-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۸: دستگاه آزمایش سه محوری

در این آزمایش، معمولاً از یک نمونه خاک با قطر حدود ۳۶ میلی‌متر (۴/۱ اینچ) و طول ۷۶ میلی‌متر (۳ اینچ) استفاده می‌شود. نمونه توسط یک غشاء‌ی لاستیکی نازک محصور می‌شود و داخل یک محفظه استوانه‌ای پلاستیکی قرار می‌گیرد که معمولاً با آب پر شده است. نمونه توسط سیال داخل محفظه تحت یک فشار همه‌جانبه<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد (توجه: گاهی از هوا به عنوان سیال اطراف نمونه استفاده می‌شود). برای ایجاد شکست برشی در نمونه، باید تنش محوری (تنش انحرافی<sup>۲</sup>) را از طریق یک میله بارگذاری عمودی<sup>۳</sup> اعمال کرد. این تنش را می‌توان به یکی از دو روش زیر اعمال کرد:

- اعمال بارهای مرده توسط وزنهای موجود یا فشار هیدرولیک در فواصل زمانی<sup>۴</sup> مساوی تا زمانی که نمونه گسیخته شود (تغییر شکل محوری نمونه حاصل از بار اعمال شده از طریق میله بارگذاری، توسط یک جابجایی- سنج اندازه‌گیری می‌شود). در این صورت، آزمایش تنش-کنترل است.
- اعمال تغییر شکل محوری با سرعت ثابت با استفاده از پرس بارگیری دندهای یا هیدرولیک. در این صورت، آزمایش کرش-کنترل است. بار محوری اعمال شده توسط میله بارگذاری در اثر تغییر شکل محوری مشخص شده توسط یک سلول بار متصل به میله، اندازه‌گیری می‌شود.

1. confining pressure  
2. deviator stress

3. vertical loading ram  
4. increments

اتصالاتی برای اعمال زهکشی از داخل یا به خارج نمونه، یا اندازه‌گیری فشار آب منفذی (طبق شرایط آزمایش) در دستگاه آزمایش سه‌محوری تعییه شده است. به طور کلی سه نوع آزمایش سه‌محوری مطابق جدول ۱-۱۸ انجام می‌شود:

جدول ۱-۱۸: انواع مختلف آزمایش‌های سه‌محوری		
پارامترهای قابل محاسبه	شماره استاندارد	نوع آزمایش
$\varphi' \text{ و } c'$	ASTM D7181	۱- آزمایش تحکیم‌یافته-زهکشی شده (آزمایش CD)
$\varphi' \text{ و } c' \text{ و } c$	ASTM D4767	۲- آزمایش تحکیم‌یافته-زهکشی نشده (آزمایش CU)
$(\varphi = 0) \text{ و } c_u$	ASTM D2850	۳- آزمایش تحکیم‌نیافته-زهکشی نشده (آزمایش UU)

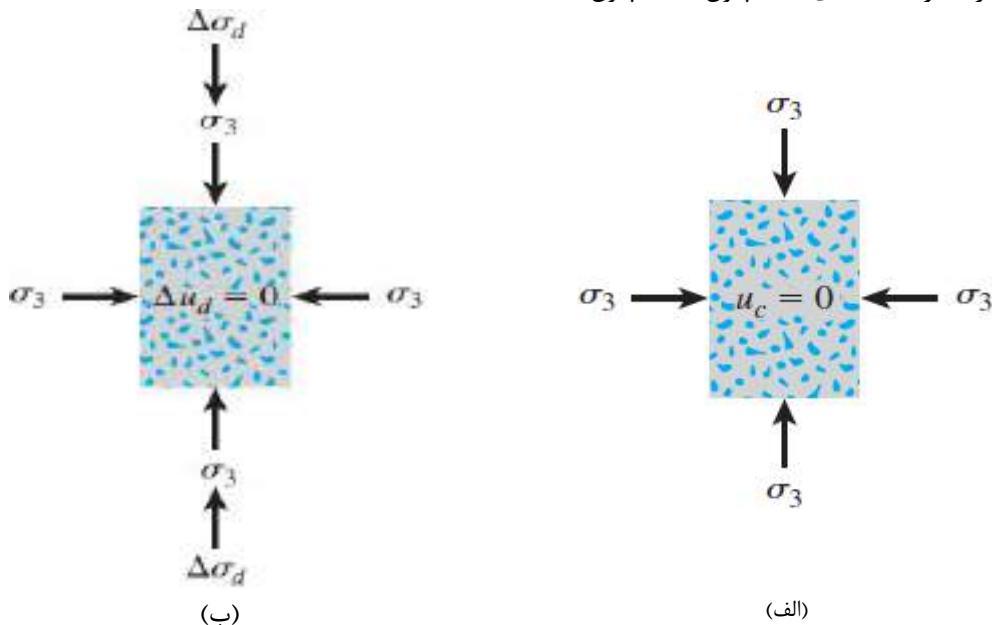
روش انجام هریک از آزمایش‌های بالا و نتایج حاصل از آن در خاک‌های اشباع در بخش‌های مختلف در ادامه توضیح داده شده است.

#### آزمایش تحکیم‌یافته-زهکشی شده (آزمایش CD)

در آزمایش CD، نمونه اشباع شده خاک، ابتدا تحت فشار همه‌جانبه  $\sigma_3$  قرار می‌گیرد (قسمت (الف) شکل ۲-۱۸). با اعمال فشار همه‌جانبه، فشار آب منفذی نمونه به میزان  $u_c$  افزایش می‌باید (اگر از زهکشی آب جلوگیری شود). این افزایش فشار آب حفره‌ای را می‌توان توسط پارامتر  $B$  به صورت زیر بیان نمود:

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3} \quad (1-18)$$

پارامتر فشار آب منفذی اسکمپتون (اسکمپتون<sup>۱</sup>، ۱۹۵۴)  $B$ :



شکل ۲-۱۸: آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته-زهکشی شده: (الف) نمونه تحت فشار همه‌جانبه؛ (ب) اعمال تنفس انحرافی برای خاک‌های نرم اشباع،  $B$  تقریباً برابر با ۱ است. با این حال، برای خاک‌های سفت اشباع، مقدار  $B$  می‌تواند کمتر از ۱ باشد. بلک و لی<sup>۲</sup> (۱۹۷۳) مقادیر نظری  $B$  را برای خاک‌های مختلف اشباع ارائه کردند. این مقادیر در جدول ۲-۱۸ فهرست شده است.

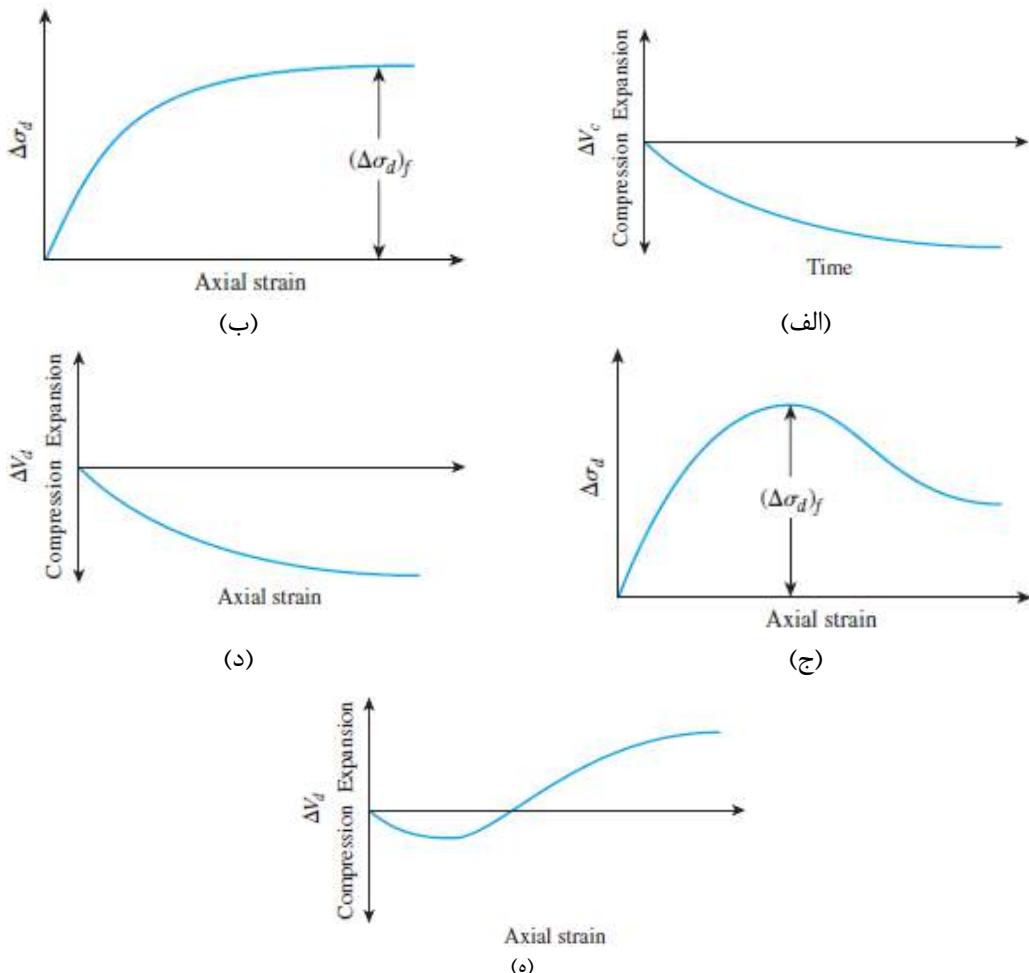
<sup>1</sup>. Skempton

<sup>2</sup>. Black and Lee

جدول ۳-۱۸: مقادیر نظری B برای خاک‌های اشباع مختلف

مقدار نظری پارامتر B اسکمپتون	نوع خاک
۰/۹۹۹۸	خاک رس عادی تحکیم‌یافته
۰/۹۹۸۸	خاک رس نرم پیش تحکیم‌یافته کم <sup>۱</sup> و سیلت
۰/۹۸۷۷	خاک رس سخت پیش تحکیم‌یافته <sup>۲</sup> و ماسه
۰/۹۱۳۰	خاک ماسه‌ای بسیار متراکم و رس سخت در فشار همه‌جانبه بالا

حال اگر شیرهای زهکشی باز شود، فشار آب منفذی اضافی از بین می‌رود و درنتیجه نمونه تحکیم می‌یابد. با گذشت زمان،  $u_c$  برابر با صفر خواهد شد. در خاک اشباع، تغییر در حجم نمونه ( $\Delta V_c$ ) که در طول تحکیم اتفاق می‌افتد را می‌توان از حجم آب منفذی زهکشی شده به دست آورد (قسمت (الف) شکل ۳-۱۸). پس از تحکیم، تنش انحرافی،  $\Delta \sigma_d$  روی نمونه بسیار آهسته افزایش می‌یابد (قسمت (ب) شکل ۳-۱۸) و شیرهای زهکشی در این مرحله نیز باز نگه داشته می‌شود و سرعت آهسته اعمال تنش انحرافی اجازه می‌دهد تا فشار آب منفذی که درنتیجه این تغییرات ایجاد می‌شود، به طور کامل از بین برود ( $u_c = 0$ ).



شکل ۳-۱۸: آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته-zechشی شده: (الف) تغییر حجم نمونه ناشی از فشار همه‌جانبه محفظه؛ (ب) نمودار تنش انحرافی در برابر کرنش در جهت عمودی برای شن و ماسه سست و رس عادی تحکیم‌یافته؛ (ج) نمودار تنش انحرافی در برابر کرنش در جهت عمودی برای ماسه متراکم و خاک رس پیش تحکیم‌یافته؛ (د) تغییر حجم در شن و ماسه سست و رس عادی تحکیم‌یافته در طول اعمال تنش انحرافی؛ (ه) تغییر حجم در ماسه متراکم و خاک رس پیش تحکیم‌یافته در طول اعمال تنش انحرافی

۱. Lightly overconsolidated soft clays

۲. Overconsolidated stiff clays

نمودار متداول تغییر تنش انحرافی در برابر کرنش در ماسه سست و رس عادی تحریکیم یافته در قسمت (ب) شکل ۱۸-۳ نشان داده شده است. در قسمت (ج) شکل ۱۸-۳ نمودار مشابهی را برای ماسه متراکم و خاک رس پیش تحریکیم یافته نشان می‌دهد. تغییر حجم،  $\Delta V_d$ ، نمونه‌ها که به دلیل اعمال تنش انحرافی در خاک‌های مختلف رخ می‌دهد نیز در قسمت‌های (د) و (ه) شکل ۱۸-۳ نشان داده شده است.

از آنجا که فشار آب منفذی ایجاد شده در طول آزمایش به طور کامل از بین می‌رود، داریم:

$$\sigma_3' = \sigma_1' \quad (2-18)$$

۹

$$\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1 = \sigma_1' \quad (3-18)$$

در آزمایش سه محوری،  $\sigma_1'$  تنש مؤثر بزرگ‌تر<sup>۱</sup> در گسیختگی و  $\sigma_3'$  تنش مؤثر کوچک‌تر<sup>۲</sup> در زمان گسیختگی است. چندین آزمایش روی نمونه‌های مشابه را می‌توان با تغییر فشار همه جانبه انجام داد. با تنش‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر در زمان گسیختگی هر آزمایش، می‌توان دوابیر موهر را رسم کرد و پوش‌های گسیختگی<sup>۳</sup> را به دست آورد. شکل ۴-۱۸ نوعی پوش گسیختگی تنش مؤثر را که از آزمایش انجام شده روی ماسه و رس عادی تحریکیم یافته به دست آمده است، نشان می‌دهد. مختصات نقطه مماس پوش گسیختگی با دایره مور (نقطه A) تنش‌های (نرمال و برشی) روی صفحه شکست آن نمونه آزمایش را نشان می‌دهد.

برای خاک رس عادی تحریکیم یافته، با مراجعه به شکل ۴-۱۸ داریم:

$$\sin \varphi' = \frac{AO'}{OO'} \quad (4-18)$$

یا

$$\sin \varphi' = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}} \quad (5-18)$$

که در این صورت خواهیم داشت:

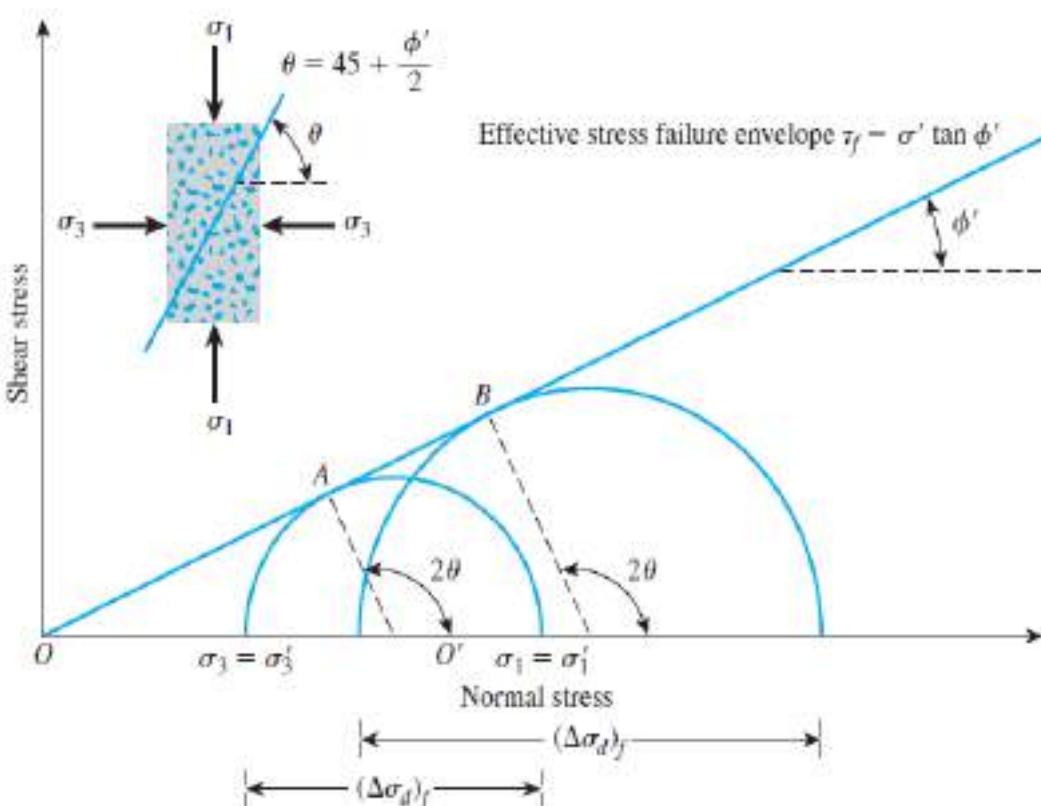
$$\varphi' = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \quad (6-18)$$

همچنانی، همان‌طور که در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است، صفحه شکست با زاویه  $\theta = 45 + \frac{\varphi'}{2}$  نسبت به صفحه اصلی متمایل خواهد شد.

<sup>1</sup>. major principal effective stress

<sup>2</sup>. minor principal effective stress

<sup>3</sup>. failure envelopes



شکل ۴-۱۸: پوش گسیختگی تنش مؤثر حاصل از آزمایش‌های زهکشی شده روی ماسه و رس عادی تحکیم‌یافته

پیش‌تحکیم‌یافته‌گی زمانی رخ می‌دهد که یک خاک رس در ابتدا تحت فشار همه‌جانبه  $\sigma_c' (= \sigma'_c)$  تحکیم یابد و سپس با کاهش فشار همه‌جانبه به مقدار  $\sigma_3' (= \sigma'_3)$  نمونه متورم شود. پوش گسیختگی به دست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده این نوع از خاک‌های رس پیش‌تحکیم‌یافته، دو شاخه مجزا را نشان می‌دهد (ab و bc در شکل ۴-۱۸). قسمت ab دارای شیب کمتر با عرض از مبدأ چسبندگی است و معادله مقاومت برشی این شاخه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (7-18)$$

بخش bc از پوش گسیختگی مربوط به قسمت عادی تحکیم‌یافته خاک است و از معادله  $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$  پیروی می‌کند.

اگر نتایج آزمایش سه‌محوری دو نمونه خاک پیش‌تحکیم‌یافته موجود باشد، مقادیر  $\phi'$  و  $c'$  را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد. بر اساس معادله ۷-۱۸ که از مکانیک خاک به خاطر داریم، برای نمونه ۱ به معادله ۹-۱۸ می‌رسیم:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 45 + \frac{\phi'}{2} (+ 2c \tan (45 + \frac{\phi'}{2})) \quad (8-18)$$

$$(\sigma'_1)_1 = (\sigma'_3)_1 \tan^2 45 + \frac{\phi'_1}{2} (+ 2c'_1 \tan (45 + \frac{\phi'_1}{2})) \quad (9-18)$$

و برای نمونه ۲ داریم:

$$(\sigma'_1)_2 = (\sigma'_3)_2 \tan^2 45 + \frac{\phi'_2}{2} (+ 2c'_2 \tan (45 + \frac{\phi'_2}{2})) \quad (10-18)$$

یا:

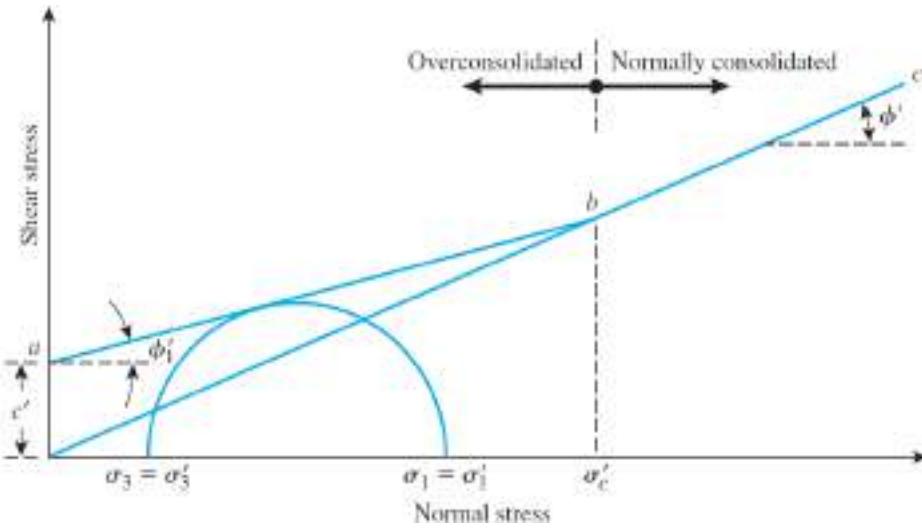
$$(\sigma'_1)_1 - (\sigma'_1)_2 = [(\sigma'_1)_1 - (\sigma'_1)_2] \tan^{\gamma} (45 + \frac{\phi'_1}{\gamma}) \quad (11-18)$$

که در این صورت خواهیم داشت:

$$\phi'_1 = \gamma \left\{ \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(\sigma'_1)_1 - (\sigma'_1)_2}{(\sigma'_1)_1 - (\sigma'_1)_2}} \right] - 45 \right\} \quad (12-18)$$

پس از محاسبه مقدار  $\phi'$ ، می توانیم  $c'$  را به صورت زیر به دست آوریم:

$$c' = \frac{(\sigma'_1)_2 - (\sigma'_1)_1 \tan^{\gamma} (45 + \frac{\phi'_1}{\gamma})}{\gamma \tan (45 + \frac{\phi'_1}{\gamma})} \quad (13-18)$$



شکل ۱۸: پوش گسیختگی تنش مؤثر برای خاک رس پیش تحکیم یافته

آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده روی خاک رسی ممکن است چندین روز طول بکشد تا تکمیل شود، زیرا تنش انحرافی باید بسیار آهسته اعمال شود تا بتوان از زهکشی نمونه خاک اطمینان حاصل نمود. به دلیل زمان بر بودن، انجام این نوع آزمایش سه محوری غیرمعمول است.

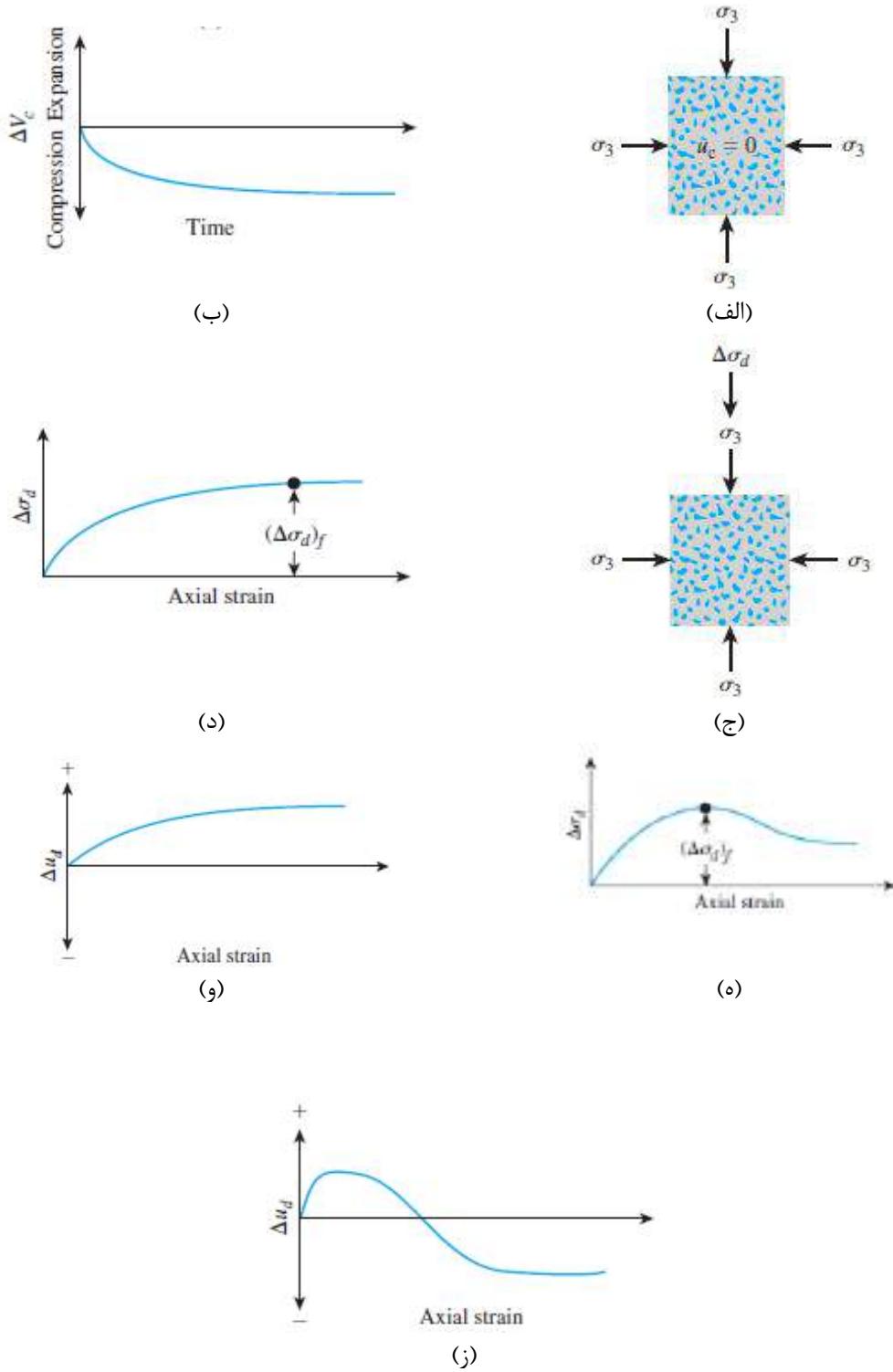
#### آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده (آزمایش CU)

آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده رایج‌ترین نوع آزمایش سه محوری است. در این آزمایش، نمونه خاک اشباع شده ابتدا توسط یک فشار همه جانبه،  $\sigma_3$ ، تحکیم می‌یابد (قسمت‌های (الف) و (ب) شکل ۱۸-۶). پس از اینکه فشار آب منفذی ایجاد شده هنگام اعمال فشار همه جانبه محو گردید، تنش انحرافی،  $\Delta\sigma_d$ ، روی نمونه افزایش می‌یابد تا باعث شکست برخی شود (قسمت (ج) شکل ۱۸-۶). در این مرحله از آزمایش، شیر زهکشی بسته نگه داشته می‌شود. به دلیل اینکه اجازه زهکشی به نمونه داده نشده است، فشار آب منفذی،  $\Delta u_d$  افزایش می‌یابد. در طول آزمایش، مقادیر  $\Delta\sigma_d$  و  $\Delta u_d$  اندازه‌گیری می‌شود. افزایش فشار آب منفذی،  $\Delta u_d$ ، را می‌توان به صورت بی‌بعدی به صورت زیر بیان کرد:

$$\bar{A} = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_d} \quad (14-18)$$

$\bar{A}$ : پارامتر فشار آب منفذی اسکمپتون (اسکمپتون، ۱۹۵۴)  
الگوهای کلی تغییرات  $\Delta u_d$  و  $\Delta\sigma_d$  با کرنش محوری برای خاک‌های شنی و رسی در قسمت‌های (د) و (ز) شکل ۱۸-۶ نشان داده شده است. در شن و ماسه شل و رس عادی تحکیم یافته، فشار آب منفذی با کرنش افزایش می‌یابد. در

ماسه متراکم و خاک رس پیش تحکیم یافته، فشار آب منفذی با کرنش تا حد معینی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد و منفی می‌شود (با توجه به فشار اتمسفر). این کاهش به دلیل تمایل خاک به اتساع است.



شکل ۶-۱۸: آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده: (الف) نمونه تحت فشار همه جانبی؛ (ب) تغییر حجم در نمونه ناشی از فشار همه جانبی؛ (ج) اعمال تنش انحرافی؛ (د) تنش انحرافی در برابر کرنش محوری برای شن و ماسه سست و رس عادی تحکیم یافته؛ (ه) تنش انحرافی در برابر کرنش محوری برای ماسه متراکم و خاک رس پیش تحکیم یافته (و) تغییرات فشار آب منفذی با کرنش محوری برای شن و ماسه شل و رس عادی تحکیم یافته؛ (ز) تغییرات فشار آب منفذی با کرنش محوری برای ماسه متراکم و خاک رس پیش تحکیم یافته

بر خلاف آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده، تنش‌های اصلی کل و مؤثر در آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده یکسان نیست. به دلیل آنکه فشار آب منفذی هنگام شکست در این آزمایش اندازه‌گیری می‌شود، تنش‌های اصلی به قرار زیر است:

$$\text{تنش کل اصلی بزرگ‌تر هنگام شکست} \quad \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1 \quad (15-18)$$

$$\text{تنش مؤثر اصلی بزرگ‌تر هنگام شکست} \quad \sigma_1 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_1 \quad (16-18)$$

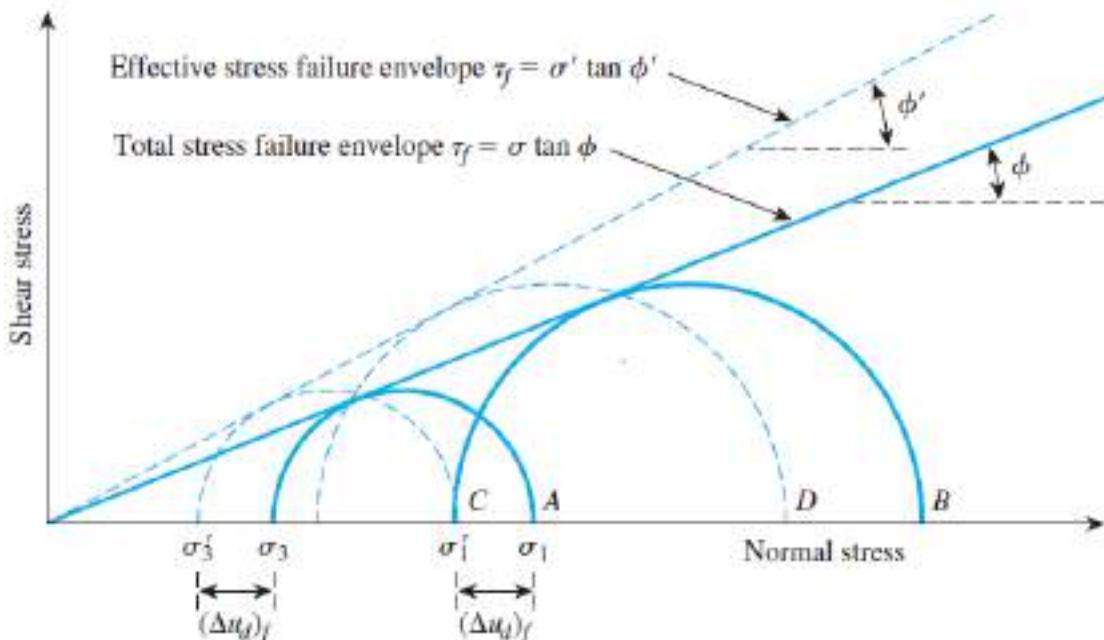
$$\text{تنش کل اصلی کوچک‌تر هنگام شکست} \quad \sigma_3 \quad (17-18)$$

$$\text{تنش مؤثر اصلی کوچک‌تر هنگام شکست} \quad \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma'_3 \quad (18-18)$$

در این معادلات،  $(\Delta\sigma_d)_f$  فشار آب منفذی هنگام شکست است. با ساده کردن معادلات ۱۵-۱۸ تا ۱۸-۱۸ خواهیم داشت:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (19-18)$$

برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی ممکن است آزمایش‌هایی روی چندین نمونه مشابه با فشارهای همه‌جانبه متفاوت انجام شود. شکل ۷-۱۸ تنش کل و مؤثر دوایر هنگام شکست را نشان می‌دهد که از آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده در شن و ماسه و خاک رس عادی تحکیم یافته به دست می‌آید. لازم به ذکر است که A و B دو دایره موهر تنش کل است که از آزمایش به دست می‌آید. C و D دوایر تنش مؤثر است که به ترتیب با دایره‌های تنش کل A و B مطابقت دارد. قطر دوایر A و C یکسان است. به طور مشابه، قطر دوایر B و D نیز یکسان است.



شکل ۷-۱۸: پوش گسیختگی تنش کل و مؤثر برای آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده (توجه: در شکل فرض شده است که هیچ فشار برگشتی اعمال نمی‌شود)

در شکل ۷-۱۸، پوش گسیختگی تنش کل را می‌توان با رسم خطی به دست آورد که بر تمام دوایر موهر تنش کل مماس می‌شود. برای ماسه و رس‌های عادی تحریکیم یافته، این یک خط تقریباً مستقیم خواهد بود که از مبدأ می‌گذرد و با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi \quad (20-18)$$

$\sigma$ : تنش کل

$\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی در حالت تنش کل  
معادله ۲۰-۱۸ به ندرت برای ملاحظات عملی استفاده می‌شود. مشابه معادله نوشته شده برای شن و ماسه و خاک رس عادی تحریکیم یافته، می‌توانیم بنویسیم:

$$\varphi = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \right) \quad (21-18)$$

۹

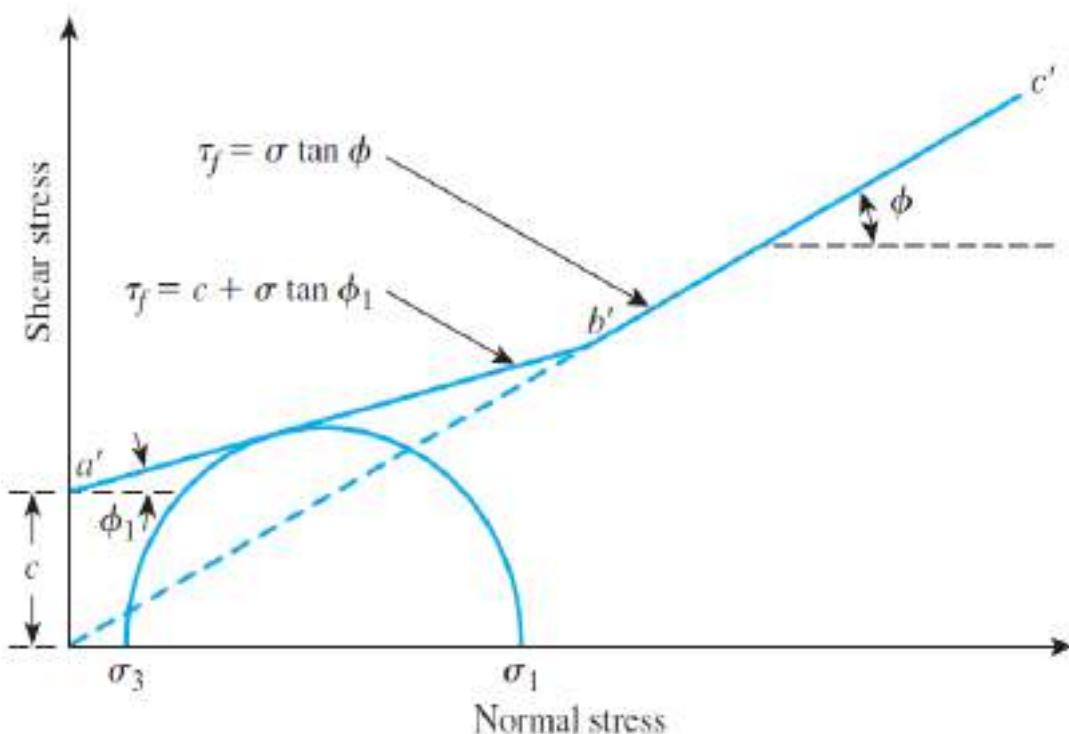
$$\begin{aligned} \varphi' &= \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_2}{\sigma'_1 + \sigma'_2} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{[\sigma_1 - (\Delta\sigma_d)_f] - [\sigma_2 - (\Delta\sigma_d)_f]}{[\sigma_1 - (\Delta\sigma_d)_f] + [\sigma_2 - (\Delta\sigma_d)_f]} \right) \\ &= \sin^{-1} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2 - 2(\Delta\sigma_d)_f} \right) \end{aligned} \quad (22-18)$$

دوباره با مراجعه به شکل ۷-۱۸، مشاهده می‌شود که پوش گسیختگی بر همه دوایر موهر تنش مؤثر مماس است و با معادله  $\tau_f = \sigma' \tan \varphi'$  بیان می‌شود، که همان معادله‌ای است که از آزمایش‌های تحریکیم یافته-زهکشی شده به دست آمده است (نگاه کنید به شکل ۴-۱۸).

در خاک‌های رس پیش تحریکیم یافته، پوش گسیختگی تنش کل به دست آمده از آزمایش‌های تحریکیم یافته-زهکشی نشده، شکلی همانند آنچه در تصویر ۸-۱۸ نشان داده شده است را به خود می‌گیرد. معادله خط مستقیم ab برابر است با:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi_1 \quad (23-18)$$

همچنین با توجه به شکل ۸-۱۸ می‌توان گفت خط مستقیم  $b'c'$  نیز از معادله ۲۰-۱۸ پیروی می‌کند. (شکل ۱۸-۱۸). پوش گسیختگی تنش مؤثر که از دوایر موهر تنش مؤثر ترسیم شده است مشابه شکل ۵-۱۸ است.



شکل ۸-۱۸: پوش گسیختگی تنش کل به دست آمده از آزمایش‌های تحکیم‌یافته-زهکشی‌نشده در خاک رس پیش‌تحکیم‌یافته

آزمایش‌های تحکیم‌یافته-زهکشی‌شده روی خاک‌های رسی، زمان زیادی می‌خواهد؛ به همین دلیل، آزمایش‌های تحکیم‌یافته-زهکشی‌نشده را می‌توان روی چنین خاک‌هایی با اندازه‌گیری فشار منفذی برای به دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی زهکشی شده، انجام داد. از آنجایی که در این آزمایش‌ها هنگام اعمال تنش انحرافی اجازه زهکشی داده نمی‌شود، می‌توان آن‌ها را به سرعت انجام داد.

پارامتر فشار آب منفذی اسکمپتون  $\bar{A}$  در معادله ۱۴-۱۸ تعریف شد. در حالت گسیختگی، پارامتر  $\bar{A}$  را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\bar{A} = \bar{A}_f = \frac{(\Delta u_d)_f}{(\Delta \sigma_d)_f} \quad (24-18)$$

محدوده کلی مقادیر  $\bar{A}_f$  در اکثر خاک‌های رسی به شرح زیر است:

برای خاک‌های رس عادی تحکیم‌یافته: بین ۰/۵ تا ۱

برای خاک‌های رس پیش‌تحکیم‌یافته: بین -۰/۵ تا ۰

### آزمایش تحکیم‌نیافته-زهکشی‌نشده (آزمایش UU)

در آزمایش‌های تحکیم‌نیافته-زهکشی‌نشده، زهکشی در طول اعمال فشار همه‌جانبه  $\sigma_3$  مجاز نیست. همچنین هنگام اعمال تنش انحرافی تا هنگام گسیختگی،  $\Delta\sigma_d$  نیز به نمونه اجازه زهکشی داده نمی‌شود. از آنجایی که زهکشی در هیچ مرحله‌ای مجاز نیست، این آزمایش را می‌توان به سرعت انجام داد. به دلیل اعمال فشار همه‌جانبه  $\sigma_3$ ، فشار آب منفذی در نمونه خاک به میزان  $u_c$  افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر در فشار آب منفذی ( $\Delta u_d$ ) به دلیل اعمال تنش انحرافی رخ خواهد داد. از این‌رو، در هر مرحله از اعمال تنش انحرافی، فشار آب منفذی کل  $u$  در نمونه را می‌توان به صورت زیر عنوان نمود:

$$u = u_c + \Delta u_d \quad (25-18)$$

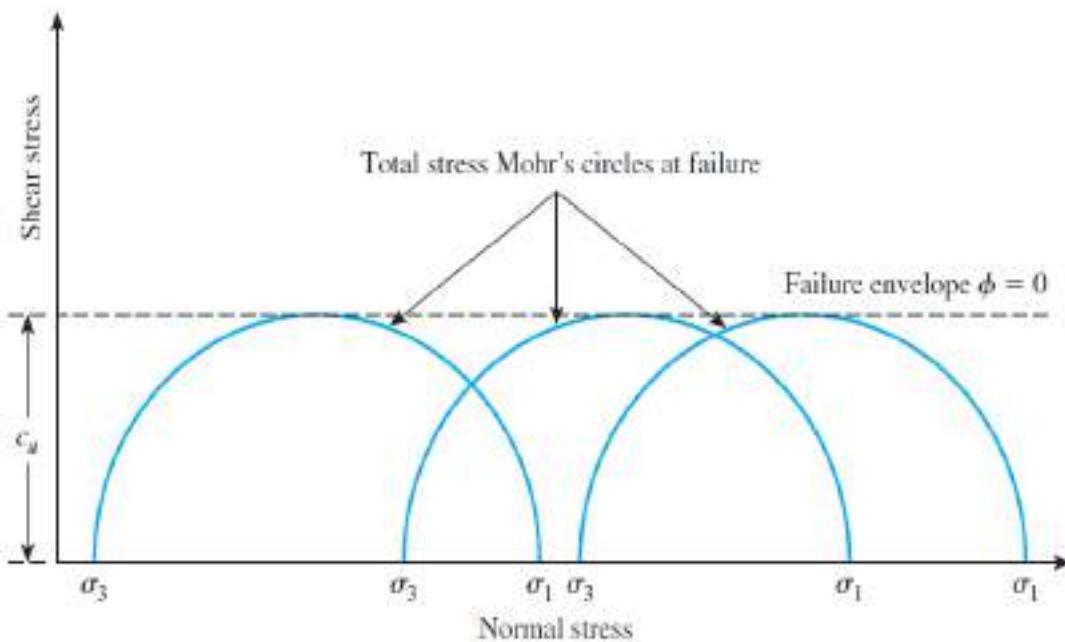
بر اساس معادلات ۱-۱۸ و ۱۴-۱۸،  $\Delta u_d = \bar{A} \Delta \sigma_d$  و  $u_c = B\sigma_3$  بنابراین داریم:

$$u = B\sigma_3 + \bar{A} \Delta \sigma_d = B\sigma_3 + \bar{A}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (26-18)$$

این آزمایش معمولاً روی نمونه‌های رسی انجام می‌شود. تنش انحرافی هنگام گسیختگی ( $\Delta \sigma_d$ )، بدون توجه به فشار همه‌جانبه، عمل یکسان است. این ویژگی در شکل ۹-۱۸ نشان داده شده است. پوش گسیختگی تنش کل دوایر موهر در این حالت به یک خط افقی تبدیل می‌شود و از این‌رو می‌توان دریافت که بر اساس این خط،  $\varphi = 0$  است. پس داریم:

$$\tau_f = c = c_u \quad (27-18)$$

$c_u$ : مقاومت برشی زهکشی‌نشده که برابر با شعاع دوایر موهر شکل ۹-۱۸ است  
دقت شود که  $\varphi = 0$  فقط برای خاک رس و سیلت اشباع معتبر است.



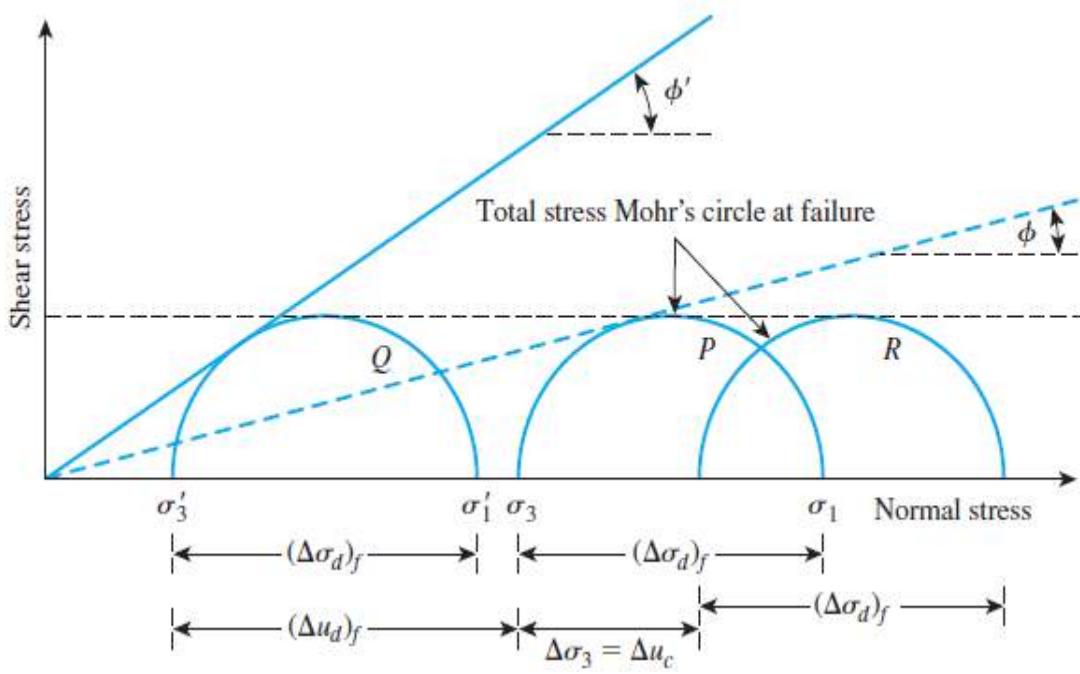
شکل ۹-۱۸: پوش گسیختگی بدست آمده از آزمایش‌های سه محوری تحکیم‌نیافته- زهکشی‌نشده روی خاک چسبنده اشباع

دلیل یکسان بودن مقدار  $\Delta \sigma_d$  بدون توجه به فشار همه‌جانبه را می‌توان به صورت زیر توضیح داد:  
اگر یک نمونه خاک رس (شماره ۱) در فشار همه‌جانبه  $\sigma_3$ ، تحکیم یابد و سپس بدون زهکشی گسیخته شود، شرایط تنش کل هنگام گسیختگی را می‌توان با دایره موهر P شکل ۱۰-۱۸ نشان داد. فشار آب منفذی ایجاد شده در نمونه، هنگام گسیختگی برابر با  $(\Delta u_d)_f$  است؛ بنابراین، تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر مؤثر هنگام گسیختگی به ترتیب عبارت است از:

$$\sigma'_1 = [\sigma_3 + (\Delta \sigma_d)_f] - (\Delta u_d)_f = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f \quad (28-18)$$

$$\sigma'_r = \sigma_r - (\Delta u_d)_f \quad (29-18)$$

دایره موهر تنש مؤثر است که با تنش‌های اصلی قبلی ترسیم شده است. توجه داشته باشید که قطر دایره های Q و R یکسان است.



اکنون خاک رس مشابه دیگری را در نظر بگیرید (شماره ۲) که تحت فشار همه جانبه  $\sigma_3'$  با فشار آب منفذی اولیه برابر با صفر، تحکیم یافته است. اگر فشار همه جانبه بدون زهکشی  $\Delta\sigma_3$  افزایش یابد، فشار آب منفذی به مقدار  $\Delta u_c$  افزایش می‌یابد. برای خاک‌های اشباع تحت تنش‌های همسان، افزایش فشار آب منفذی برابر با افزایش تنش کل است، بنابراین  $\Delta u_c = \Delta\sigma_3$  (B). در این زمان، فشار همه جانبه مؤثر برابر با  $\sigma_r + \Delta\sigma_3 - \Delta u_c = \sigma_r + \Delta\sigma_3$  است. این همان فشار همه جانبه مؤثر نمونه ۱ قبل از اعمال تنش انحرافی است؛ بنابراین، اگر نمونه ۲ با افزایش تنش محوری، به گسیختگی برسد، باید در همان تنش انحرافی  $f$  ( $\Delta\sigma_d$ ) گسیخته شود که برای نمونه ۱ به دست آمد. دایره موهر تنش کل هنگام گسیختگی، R خواهد بود (شکل ۲۹-۱۸). افزایش فشار آب منفذ اضافه ناشی از اعمال  $(\Delta\sigma_d)_f$ ،  $(\Delta u_d)_f$  (خواهد بود).

هنگام گسیختگی، تنش اصلی کوچک‌تر مؤثر برابر است با:

$$[(\sigma_r + \Delta\sigma_r)] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] = \sigma_r - (\Delta u_d)_f = \sigma'_r \quad (30-18)$$

و تنش اصلی بزرگ‌تر مؤثر هنگام گسیختگی برابر است با:

$$[\sigma_r + \Delta\sigma_r + (\Delta\sigma_d)_f] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] = [\sigma_r + (\Delta\sigma_d)_f] - (\Delta u_d)_f = \sigma_r - (\Delta u_d)_f = \sigma'_r \quad (31-18)$$

بنابراین، دایره موهر تنش مؤثر همچنان Q خواهد بود، زیرا مقاومت تابعی از تنش مؤثر است. توجه داشته باشید که قطر دایر P، Q و R همگی یکسان است. هر مقدار  $\Delta\sigma_3$  می‌تواند برای آزمایش نمونه ۲ انتخاب شود. در هر صورت،

تنش انحرافی ( $\Delta\sigma_d$ ) برای ایجاد گسیختگی تا زمانی که خاک در هر دو مرحله آزمایش اشباع و کاملاً زهکشی نشده بود، یکسان بود.

## ۲-۱۸) وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش

- سلول سه محوری (شکل ۱۱-۱۸)
  - وسیله اعمال نیروی محوری - شرایط کرنش کنترل (شکل ۱۲-۱۸)
  - نمونه اصلاح کن (شکل ۱۳-۱۸)
  - اره سیمی (شکل ۱۴-۱۸) و یا کاتر بسیار تیز
  - گرم کن (شکل ۱۵-۱۸)
  - منبع ایجاد خلا (شکل ۱۶-۱۸)
  - کولیس (شکل ۱۷-۱۸)
  - ظرف تبخیر چینی (شکل ۱۸-۱۸)
  - غشاء پلاستیکی (شکل ۱۹-۱۸)
  - کشنده غشاء<sup>۱</sup> (شکل ۲۰-۱۸)
  - سنگ متخلخل (شکل ۲۱-۱۸)
  - کلاهک بارگذاری (شکل ۲۲-۱۸)
  - اورینگ<sup>۲</sup> (شکل ۲۳-۱۸)
  - ابزاری جهت نصب اورینگ در قسمت های ابتدایی و انتهایی غشاء پلاستیکی (شکل ۲۴-۱۸)
  - نمونه های بازسازی شده و لوازم جانبی آن یا نمونه های دست نخورده<sup>۳</sup> (نمونه های لوله شلی<sup>۴</sup> (شکل ۲۵-۱۸) یا نمونه های کنده شده بلوکی<sup>۵</sup> (شکل ۲۶-۱۸))
  - برای نمونه های دست نخورده: دستگاه هیدرولیکی خارج کردن نمونه از نمونه گیر<sup>۶</sup> (شکل ۲۶-۱۸) یا ابزار برش<sup>۷</sup> برای بریدن نمونه های دست نخورده
  - برای نمونه های بازسازی شده: دستگاه تراکم هاروارد و لوازم جانبی آن (شکل ۲۸-۱۸)
  - استوانه اصلاح کننده نمونه<sup>۸</sup> به همراه کاتر تیز (شکل ۲۹-۱۸): همان طور که در شکل ۱۳-۱۸ نشان داده شده است. می توانیم نمونه را در این وسیله اصلاح کنیم اما در زمان هایی که دسترسی به این ابزار ممکن نیست، می توانیم ابتدا و انتهای نمونه های رسی را با قرار دادن و سفت کردن در این قالب و بریدن توسط کاتر، اصلاح نماییم.
  - نوار پای<sup>۹</sup>: از این وسیله برای اندازه گیری قطر نمونه استوانه ای، جهت افزایش دقت، استفاده می شود (شکل ۱۸-۳۰).
  - ظرف فلزی بزرگ جهت قرار دادن نمونه خاک
  - کاردک
  - سنسور اندازه گیری فشار آب منفذی
  - کاغذ صافی
  - گربس سیلیکن
- در شکل ۱۸-۳۰ تصویر شماتیک یک سلول سه محوری نشان داده است که به طور کلی شامل یک صفحه پایه در پایین، یک استوانه شیشه ای و یک صفحه در بالا است. روی صفحه پایه، یک صفحه متصل است و یک سنگ متخلخل

۱. Membrane stretcher

۲. O-ring

۳. Undisturbed soil sample

۴. Shelby tube samples

۵. Block carved samples

۶. Hydraulic sample extruder

۷. Soil trimming tools

۸. Cylindrical trimming device

۹. Pi tape

روی این صفحه قرار دارد. روی سنگ، نمونه خاک قرار می‌گیرد. یک سنگ متخلخل و صفحه‌ای دیگر بالای نمونه قرار دارد. نمونه داخل یک غشاء پلاستیکی نازک محصور است. یک سری لوله‌های ورودی و خروجی جهت اشباع‌سازی نمونه و فراهم نمودن امکان زهکشی آب، داخل صفحه پایه وجود دارد. تعدادی شیر به این لوله‌ها وصل است تا راههای ارتباطی فوق را در صورت لزوم بسته یا باز کند. در صفحه پایه یک سوراخ وجود دارد که از آن آب یا گلیسیرین در زمان لازم می‌تواند به داخل سلول وارد شود. یک فشار هیدرواستاتیکی ( $\sigma_3$ ) از طریق سیال موجود در سلول به نمونه اعمال می‌شود.

یک تنش فشاری اضافی ( $\Delta\sigma$ ) را با استفاده از یک پیستون می‌توان به بالای نمونه وارد کرد. سلول سه محوری را روی میز وسیله اعمال فشار در حالت کنترل کرنش قرار می‌دهیم. قسمت فوقانی پیستون سلول سه محوری به یک حلقه بارگذاری متصل می‌شود. حلقه بارگذاری به یک تیر عرضی (افقی) که خود به دو پایه فلزی وصل است متصل می‌شود. میز دستگاه اعمال فشار می‌تواند با یک سرعت دلخواه بالا یا پایین رفته و به این وسیله، سلول سه محوری نیز بالا یا پایین رود. هنگام اعمال فشار، بار وارد شده بر نمونه از روی گیج حلقه بارگذاری و تغییر شکل نمونه از روی گیج قائم دیگری (یک درجه =  $1 / 0.0254$  میلی‌متر) به دست می‌آید. از طریق یک بورت یا دستگاه اندازه‌گیری فشار آب منفذی که به نمونه خاک مرتبط می‌شود، به ترتیب تغییر حجم نمونه با فشار آب منفذی اضافی را حین آزمایش تعیین می‌کنند.



شکل ۱۲-۱۸: دستگاه اعمال نیروی محوری

شکل ۱۱-۱۸: سلول سه محوری



شکل ۱۳-۱۸: نمونه اصلاح کن



شکل ۱۴-۱۸: اره سیمی



شکل ۱۵-۱۸: گرم کن



شکل ۱۶-۱۸: منبع ایجاد خلا

شکل ۱۷-۱۸: کولیس



شکل ۱۸-۱۸: غشاء پلاستیکی



شکل ۱۸-۱۸: ظرف تبخير چینی



شکل ۲۱-۱۸: سنگ متخلخل



شکل ۲۰-۱۸: کشنه غشاء



شکل ۲۳-۱۸: اورینگ



شکل ۲۲-۱۸: کلاهک بارگذاری



شکل ۲۵-۱۸: لوله‌های جدار نازک شلبي



شکل ۲۴-۱۸: ابزاری جهت نصب اوريينگ



شکل ۲۷-۱۸: دستگاه هيدروليكي خارج کردن نمونه‌های دست-نخورد از نمونه‌گير



شکل ۲۶-۱۸: ايجاد نمونه‌های بلوکي برای برداشت نمونه‌های دست-نخورد



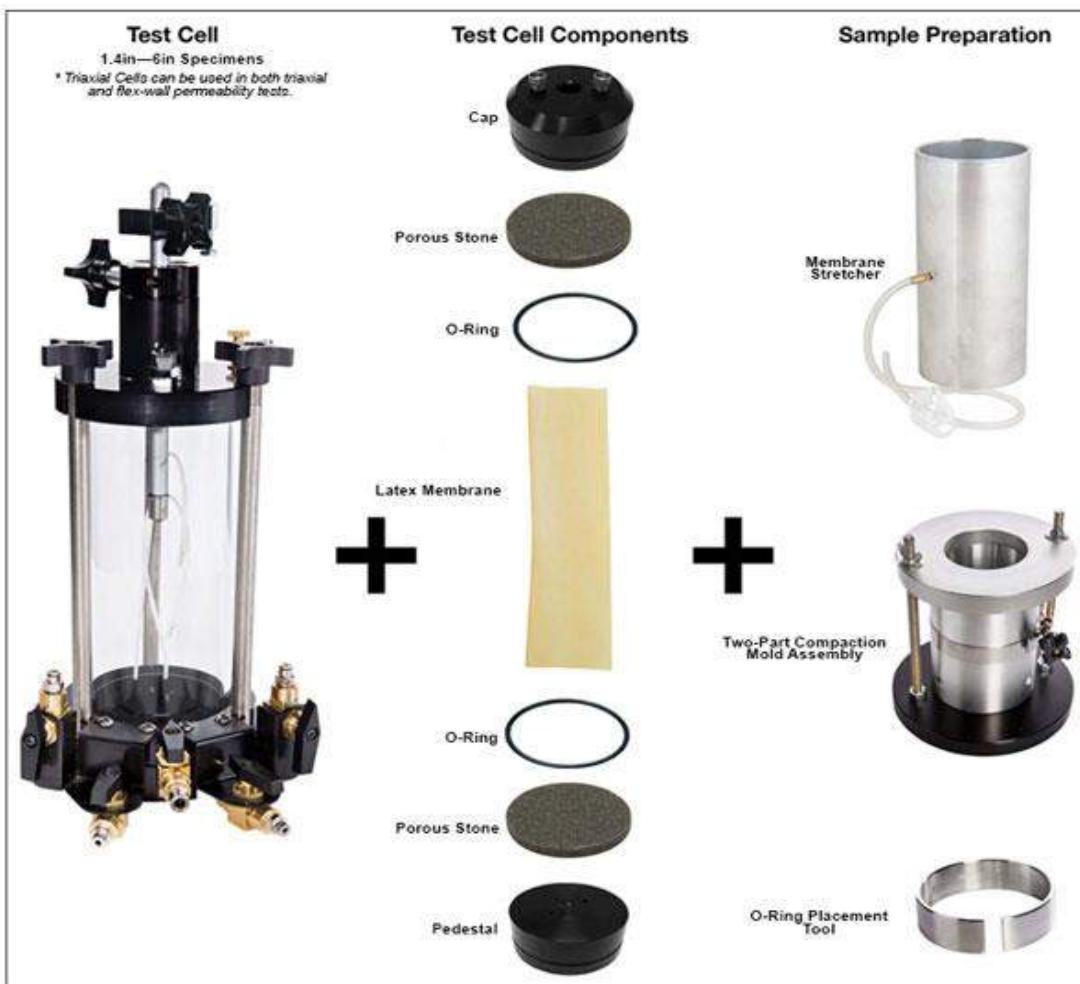
شکل ۱۸-۲۹: استوانه اصلاح کننده نمونه



شکل ۱۸-۲۸: دستگاه تراکم هاروارد و ملحقات آن



شکل ۱۸-۳۰: نوار پای



شکل ۳۱-۱۸: قطعات کلی مربوط به انجام آزمایش‌های سه‌محوری

### ۳-۱۸) روش انجام آزمایش ضوابط و نکات مربوط به ابعاد نمونه‌ها

نمونه‌ها باید به صورت استوانه‌ای و دارای حداقل قطر ۳۳ میلی‌متر (۱/۳ اینچ) باشد. نسبت متوسط ارتفاع به قطر متوسط باید بین ۲ تا ۲/۵ باشد. یک اندازه‌گیری فردی ارتفاع یا قطر نباید از میانگین بیش از ۲ درصد متفاوت باشد. بزرگ‌ترین اندازه‌ذره باید کوچک‌تر از  $\frac{1}{4}$  قطر نمونه باشد. اگر پس از پایان آزمایش، بر اساس آنچه می‌بینیم، مشخص شود که ذرات بزرگی وجود دارد، این اطلاعات باید در گزارش داده‌های آزمایش قید شود.

#### تهیه نمونه‌های رسی

**الف - نمونه‌های دست‌نخوردی:** نمونه‌های تهیه شده در این مرحله باید با مقطع دایره‌ای و دارای دو انتهای کاملاً صاف و عمود بر محور نمونه باشد. از این‌رو، ابتدا باید با احتیاط نمونه را به وسیله «دستگاه خارج کردن نمونه از نمونه‌گیر» از نمونه‌گیر خارج کرد و پس از آن باید دقت شود تا نمونه‌ها حین حمل، دچار هیچ‌گونه دست-خوردگی، ترک، تغییر شکل یا تغییر رطوبت نشود. نمونه‌هایی که از نمونه‌گیرهای جدار نازک خارج می‌شود را می‌توان پس از صاف کردن ابتدا و انتهای نمونه، بدون اصلاح دیگری، برای آزمایش به کار برد. در صورت لزوم به تراشیدن نمونه‌ها، باید دقت زیادی شود تا نمونه‌ها در این حالت نیز دچار هیچ‌گونه دست‌خوردگی نشود. چنانچه حین تراشیدن نمونه‌ها، دانه‌هایی از سطح تراشیده شده آن‌ها کنده شود و به واسطه آن، فرورفتگی‌هایی

در سطح نمونه ایجاد شود، این فرورفتگی‌ها را باید با استفاده از خاک‌های حاصل از تراش بعد از ورز دادن کافی پر کرد. مقداری از باقیمانده‌های خاک برای تعیین درصد رطوبت در جعبه مخصوص نگهداری می‌شود. برای حفظ رطوبت موجود در نمونه‌ها باید نمونه‌ها را در اتاقی با قابلیت کنترل رطوبت نگهداری نمود.

**ب- نمونه‌های بازسازی شده:** نمونه‌های بازسازی شده را می‌توان از نمونه‌های دستنخوردهای که به هر دلیل خراب شده است یا نمونه‌های دستنخورده تهیه نمود. در مواردی که نمونه‌ها از نوع نمونه‌های دستنخورده خراب شده باشد، جهت حفظ رطوبت نمونه‌ها، آن‌ها را درون یک کیسه نازک پلاستیکی قرار می‌دهیم و بهوسیله انگشت ورز می‌دهیم تا نمونه‌ها به صورت کاملاً یکنواخت درآید. هنگام ورز دادن باید دقت شود که هوایی داخل نمونه محبوس نشود. برای به دست آوردن چگالی یکنواخت در نمونه‌های بازسازی شده، باید به نسبت فضای خالی مشابه نمونه دستنخورده و حفظ مقدار رطوبت طبیعی خاک دقت شود.

**ج- نمونه‌های ساخته شده:** این نمونه‌ها با تراکم و درصد رطوبت مورد نظر طراح، در قالب با استفاده از تراکم استاتیکی (شکل ۳۲-۱۸) یا با روش دستی ساخته می‌شود. تجربه نشان داده است که تراکم و آماده کردن نمونه‌ها و به دست آوردن نتایج قابل قبول در حالتی که درصد اشباع بیش از ۹۰ درصد مد نظر باشد، مشکل خواهد بود.

در آزمایش‌هایی که روی نمونه‌های طبیعی دستنخورده خاک که به کمک لوله نمونه‌گیر جدار نازک (شلبی) تهیه شده است به کمک یک نمونه اصلاح کن می‌توان نمونه‌ای با ابعاد دلخواه را به وجود آورد. برحسب اینکه چه نوع سلولی در اختیار باشد برای استفاده آموزشی از نمونه بازسازی شده در وسیله تراکم هاروارد می‌توان استفاده کرد. بعد از اینکه نمونه تهیه شد، طول (L.) و قطر (D.) آن را به دست می‌آوریم. اندازه‌گیری طول نمونه باید چهار بار و هر بار با ۹۰ درجه چرخش نسبت به دفعه پیش انجام شود. متوسط این چهار عدد برابر با  $L$ . خواهد بود. برای اندازه‌گیری قطر، با استفاده از یک کولیس چهار بار در بالا، چهار بار در وسط و چهار بار در پایین نمونه، قطر آن اندازه‌گیری می‌شود. متوسط این دوازده اندازه‌گیری برابر است با  $D$ .

#### آماده‌سازی نمونه‌های رسی پیش از قرار دادن در سلول دستگاه سه‌محوری

۱- ابتدا پلاستیک اطراف نمونه را با احتیاط باز می‌کنیم (شکل ۳۲-۱۸)



شکل ۳۲-۱۸: باز کردن پلاستیک اطراف نمونه

۲- استوانه اصلاح‌کننده نمونه را با احتیاط در اطراف نمونه قرار می‌دهیم (شکل ۳۳-۱۸).



شکل ۳۳-۱۸: قرار دادن استوانه اصلاح‌کننده نمونه در اطراف نمونه

۳- نمونه را اندکی از لبه استوانه اصلاح‌کننده فاصله می‌دهیم تا امکان ایجاد برش و تراز کردن سطح مورد نظر فراهم شود (شکل ۳۴-۱۸).



شکل ۳۴-۱۸: فاصله دادن نمونه از لبه استوانه اصلاح‌کننده

۴- پیچ استوانه را پس از تنظیم، سفت می کنیم (شکل ۳۵-۱۸).



شکل ۳۵-۱۸: سفت کردن پیچ استوانه اصلاح کننده

۵- از اطراف دایره توسط کاتر و به صورت محیطی، شروع به تراشیدن لبه ها می کنیم (شکل ۳۶-۱۸) تا زمانی که دور تادر نمونه صاف شود. باید دقیق شود در ابتدای کار، هیچ گاه به صورت قطری نمونه را برش ندهیم، زیرا نمونه در این زمان، بسیار مستعد خرابی است.



شکل ۳۶-۱۸: تراشیدن دور تادر سطح نمونه با کاتر تیز

۶- پس از تراشیدن دور تادر نمونه، اکنون می توانیم قسمت های میانی آن را نیز به صورت قطری برش دهیم تا سطح صاف حاصل شود (شکل های ۳۷-۱۸ و ۳۸-۱۸).

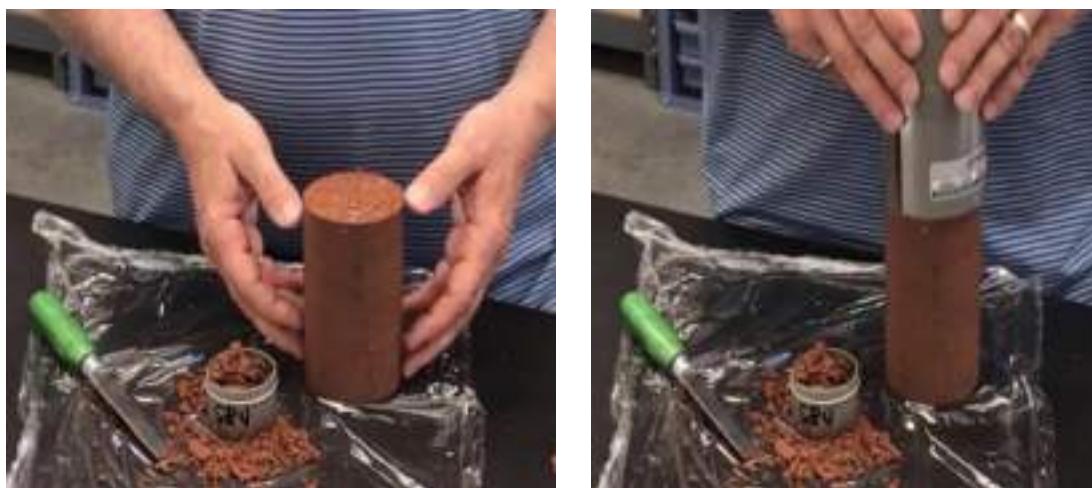


شکل ۳۷-۱۸: بریدن قسمت میانی نمونه به صورت قطری



شکل ۳۸-۱۸: سطح صاف نهایی به دست آمده

- ۷- تمامی مراحل ۳ تا ۶ را برای جهت دیگر نیز تکرار می کنیم.
- ۸- پیچ استوانه اصلاح کننده را باز کرده و آن را با دقت از بالای نمونه خارج می کنیم (شکل ۳۹-۱۸).



شکل ۳۹-۱۸: خارج کردن استوانه اصلاح کننده و نمونه پس از اصلاح

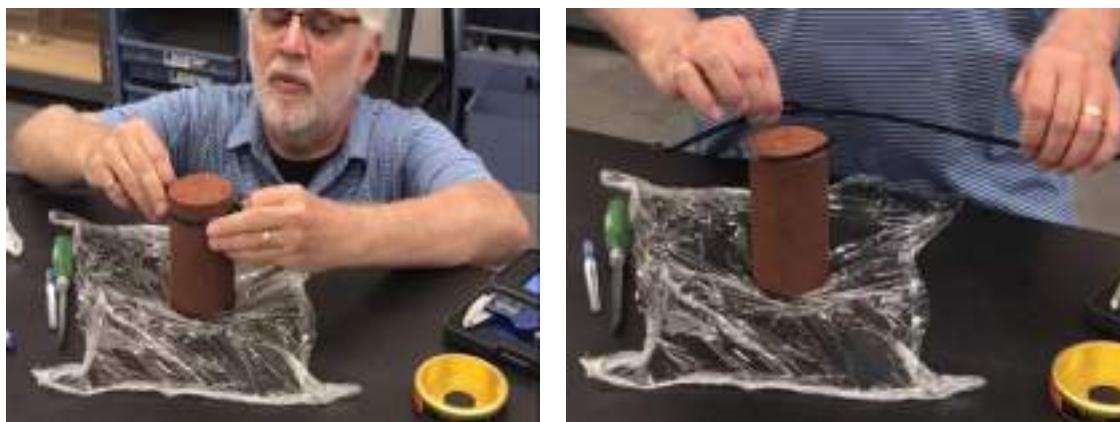
- ۹- سه نمونه از خاک تراشیده شده را درون ظرف تعیین رطوبت می ریزیم و میانگین رطوبت به دست آمده از آن ها را یادداشت می کنیم.
- ۱۰- توسط کولیس و طبق نکاتی که در قسمت تهیه نمونه های رسی گفته شد، ارتفاع نمونه موجود را اندازه گیری می کنیم (شکل ۴۰-۱۸).



شکل ۴۰-۱۸: اندازه‌گیری ارتفاع نمونه توسط کولیس

۱۱- طبق نکاتی که در قسمت تهیه نمونه‌های رسی گفته شد و با استفاده از نوار پای، قطر نمونه را اندازه می‌گیریم (شکل ۴۱-۱۸).

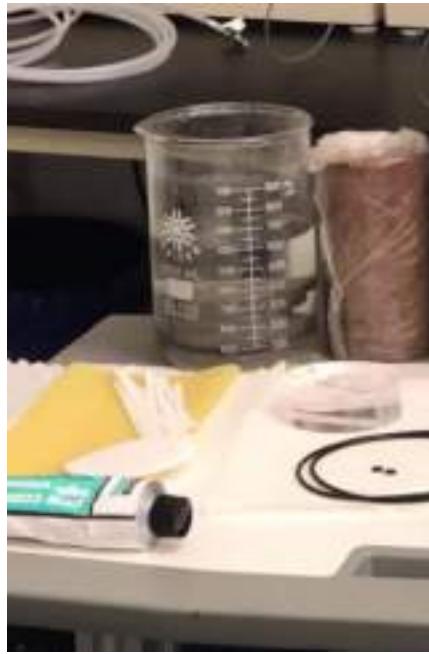
تذکر: می‌توانستیم به وسیله کولیس نیز این عدد را محاسبه نماییم، اما استفاده از نوار پای، دقت محاسبات را افزایش می‌دهد. این نوار درواقع یک متر مخصوص است که توسط اعداد درج شده روی آن می‌توانیم قطر نمونه‌های استوانه‌ای را اندازه‌گیری نماییم.



شکل ۴۱-۱۸: اندازه‌گیری قطر نمونه توسط نوار پای

#### قرار دادن نمونه‌های رسی در سلول دستگاه سه محوری

۱- دو سنگ متخلخل مورد استفاده در نمونه را به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش فرار می‌دهیم و سپس به آن اجازه می‌دهیم تا در دمای اتاق خنک شود (شکل ۴۲-۱۸).



شکل ۴۲-۱۸: قرار دادن سنگ‌های متخلخل در دمای اتاق جهت سرد شدن

۲- لوله‌های مرتبط با دستگاه سه‌محوری را سفت می‌کنیم (شکل ۴۳-۱۸).



شکل ۴۳-۱۸: سفت کردن لوله‌های دستگاه سه‌محوری

۳- لوله‌های متصل به صفحه پایه سلول سه‌محوری را از هوا خالی می‌کنیم به این صورت که شیرهای آب را باز می‌کنیم تا آب روی کلاهک پایینی دستگاه پدیدار شود (شکل ۴۴-۱۸).



شکل ۴۴-۱۸: خالی کردن هوای لوله‌های دستگاه توسط عبور دادن جریان آب

۴- پس از اطمینان از خروج هوا، شیرهای آب را می‌بندیم (شکل ۴۵-۱۸).



شکل ۴۵-۱۸: قطع جریان آب

۵- سنگ متخلخل پایینی (در حالتی که مرطوب است) را روی صفحه کف قرار می‌دهیم (شکل ۴۶-۱۸).



شکل ۴۶-۱۸: قرار دادن سنگ متخلخل روی کلاهک پایینی

۶- کاغذ صافی را ابتدا در آب فرومی‌بریم تا اشباع گردد و سپس روی سنگ متخلخل قرار می‌دهیم (شکل ۴۷-۱۸).



شکل ۴۷-۱۸: قرار دادن کاغذ صافی روی سنگ متخلخل

۷- نمونه را روی کاغذ صافی قرار می‌دهیم (شکل ۴۸-۱۸).



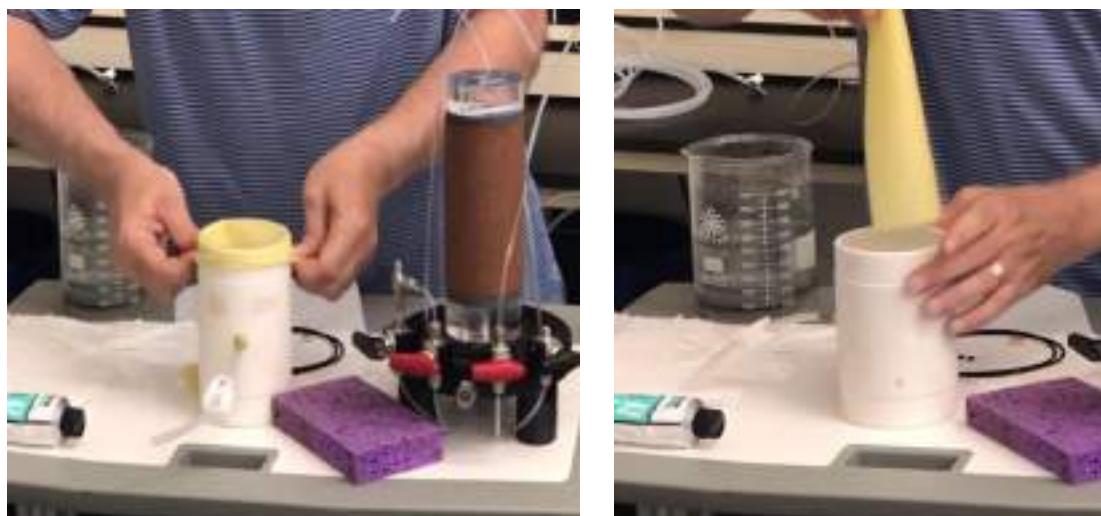
شکل ۴۸-۱۸: قرار دادن نمونه روی کاغذ صافی

- ۸- بار دیگر، برای قسمت بالایی نیز کاغذ صافی را در آب فرو برد و آن را روی نمونه قرار می‌دهیم.
- ۹- سنگ متخلخل بالایی را نیز روی کاغذ صافی قرار می‌دهیم.
- ۱۰- کلاهک بالایی را روی سنگ متخلخل بالایی قرار می‌دهیم (شکل ۴۹-۱۸).



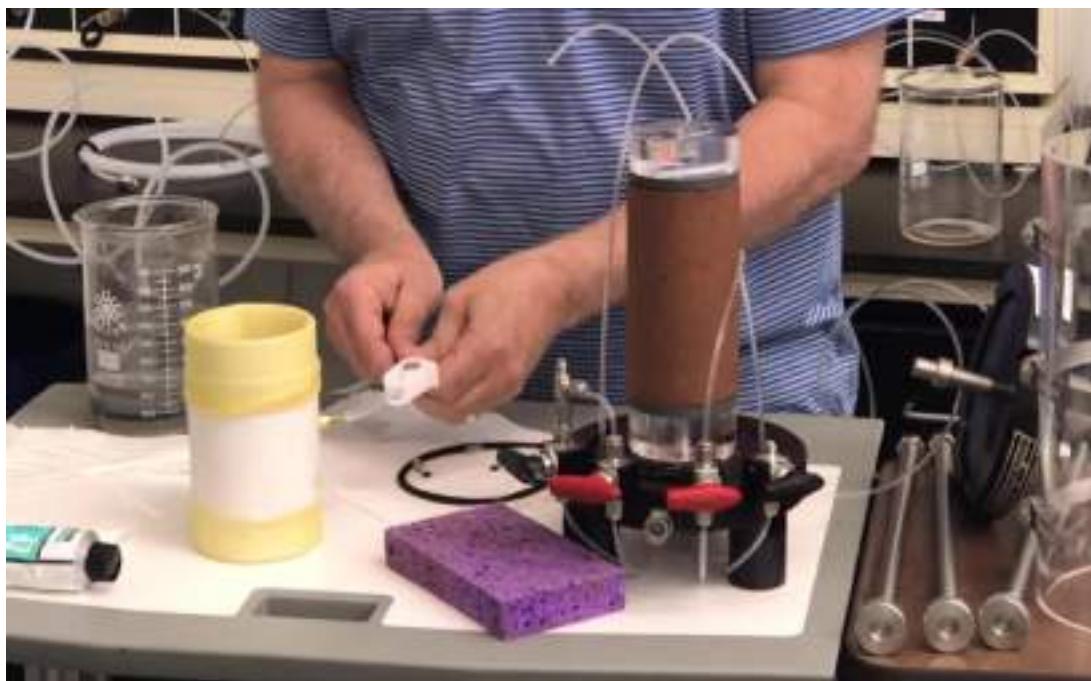
شکل ۴۹-۱۸: قرار دادن کلاهک بالایی بر روی

- ۱۱- غشاء پلاستیکی نازک با اندازه مناسب را داخل قالب غشاء قرار می‌دهیم و لبه‌های غشاء را روی قالب غشاء برمی‌گردانیم. (شکل ۵۰-۱۸).

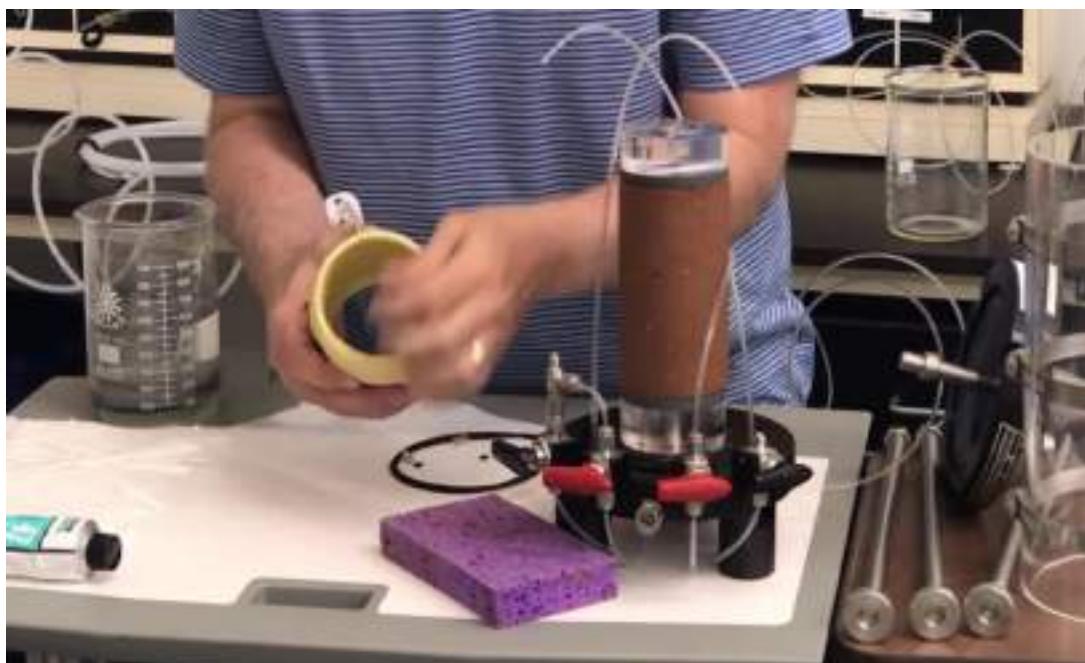


شکل ۵۰-۱۸: قرار دادن غشاء پلاستیکی داخل قالب غشاء

- ۱۲- کشنده یا قالب غشاء که یک لوله برنجی با قطر داخلی حدود  $\frac{1}{4}$  اینچ (تقرباً ۶ میلی‌متر) بزرگ‌تر از قطر نمونه است را برمی‌داریم و آن را به منبع ایجاد خلا (پمپ مکنده) وصل می‌کنیم (شکل ۵۱-۱۸). سپس پمپ مکنده را روشن می‌کنیم. این امر باعث می‌شود تا غشاء به سطح داخلی لوله برنجی کاملاً بچسبد (شکل ۵۲-۱۸) پس از پایان این مرحله، سوپاپ مرتبط را می‌بندیم تا هوا به درون غشاء وارد نشود.



شکل ۵۱-۱۸: وصل کردن قالب غشاء به پمپ خلاً



شکل ۵۲-۱۸: شکل نهایی غشاء پس از حذف خلاً درون آن

- کاغذ صافی نواری را درون آب فرومی‌بریم (شکل ۵۳-۱۸) و سپس آن را در اطراف نمونه قرار می‌دهیم (شکل ۱۸-۱۳). (۵۴)

تذکر: این کاغذ در بیشتر آزمایش‌ها استفاده نمی‌شود؛ اما وجود آن سبب آسان‌سازی زهکشی می‌شود.

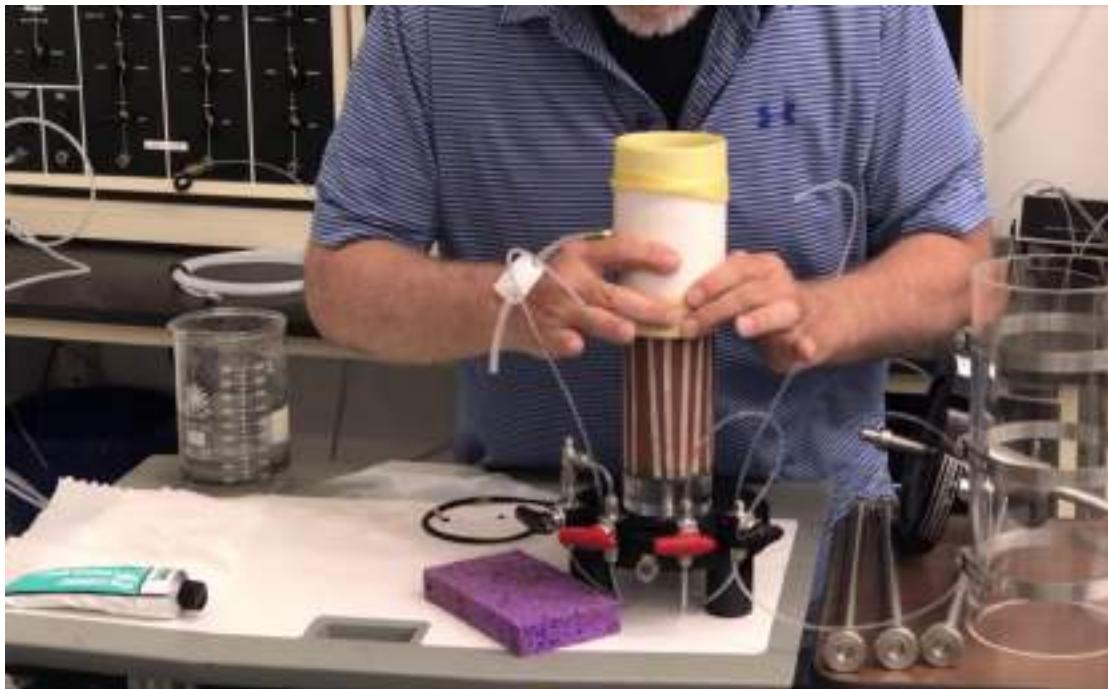


شکل ۱۸-۵۳: فروبردن کاغذ صافی نواری درون آب جهت اشباع‌سازی



شکل ۱۸-۵۴: قرار دادن کاغذ صافی نواری روی نمونه

۱۴- اکنون قالب غشاء را همراه غشای درون آن، وارد نمونه می‌نماییم (شکل ۱۸-۵۵)



شکل ۱۸-۵۵: قرار دادن کاغذ صافی نواری بر روی نمونه

۱۵- اکنون سوپاپ قالب غشاء را بازمی‌نماییم تا غشاء کاملاً به بدنه نمونه بچسبد. دو لبه برگشته غشاء روی قالب غشاء را به حالت اولیه بر می‌گردانیم (شکل ۱۸-۵۶).

تذکرہ: برای هوابندی نمونه بهتر است قبل از کشیدن لبه‌های غشاء به اطراف دو صفحه کف و بالایی، مقداری روغن سیلیکون دور این صفحه‌ها مالیده شود.



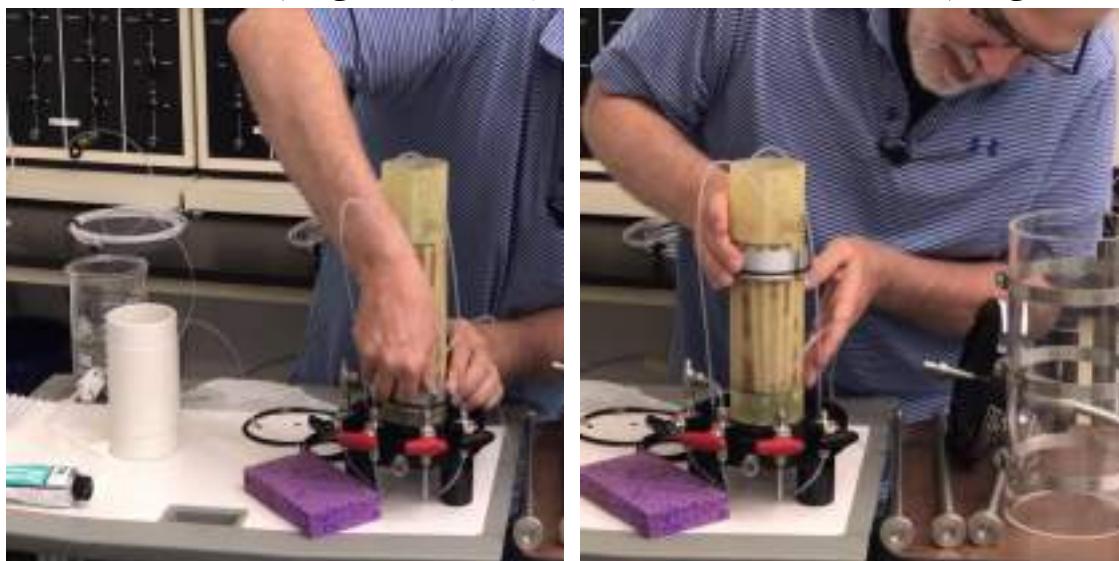
شکل ۱۸-۵۶: قرار دادن غشاء روی نمونه

۱۶- اورینگ‌های نمونه را روی ابزار مخصوص آن قرار می‌دهیم (شکل ۵۷-۱۸).



شکل ۵۷-۱۸: قرار دادن اورینگ روی ابزار مخصوص آن جهت انتقال آن به دور نمونه

۱۷- اطراف پدستال پایین و کلاهک بالایی را به گریس سیلیکن آغشته می‌کنیم. اورینگ مرحله پیش را همراه ابزار آن، وارد نمونه می‌نماییم (شکل ۵۸-۱۸). اورینگ‌ها را روی غشاء و پدستال پایین سُر می‌دهیم.



شکل ۵۸-۱۸: انتقال اورینگ داخل نمونه

- ۱۸- بار دیگر مراحل ۱۶ و ۱۷ را برای نصب اورینگ دوم در قسمت انتهایی نمونه و دو اورینگ بالایی تکرار می‌نماییم.  
 ۱۹- قسمت اضافی بالای غشاء را برمی‌گردانیم (شکل ۱۸-۵۹).



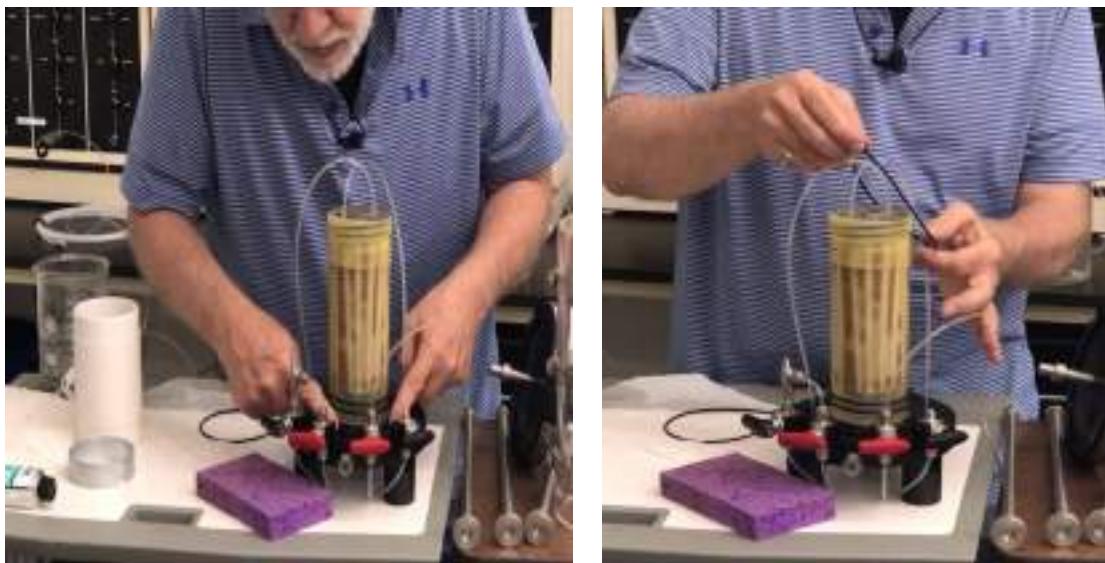
شکل ۱۸-۵۹: برگرداندن قسمت اضافی بالای غشاء

- ۲۰- لوله زهکشی را به صفحه بالایی کلاهک دستگاه سه محوری وصل می‌کنیم (شکل ۱۸-۶۰).



شکل ۱۸-۶۰: نصب لوله‌های زهکشی به قسمت بالایی کلاهک دستگاه

۲۱- اورینگ مربوط به دستگاه را در محل مخصوص به آن، قرار می‌دهیم (شکل ۶۱-۱۸).



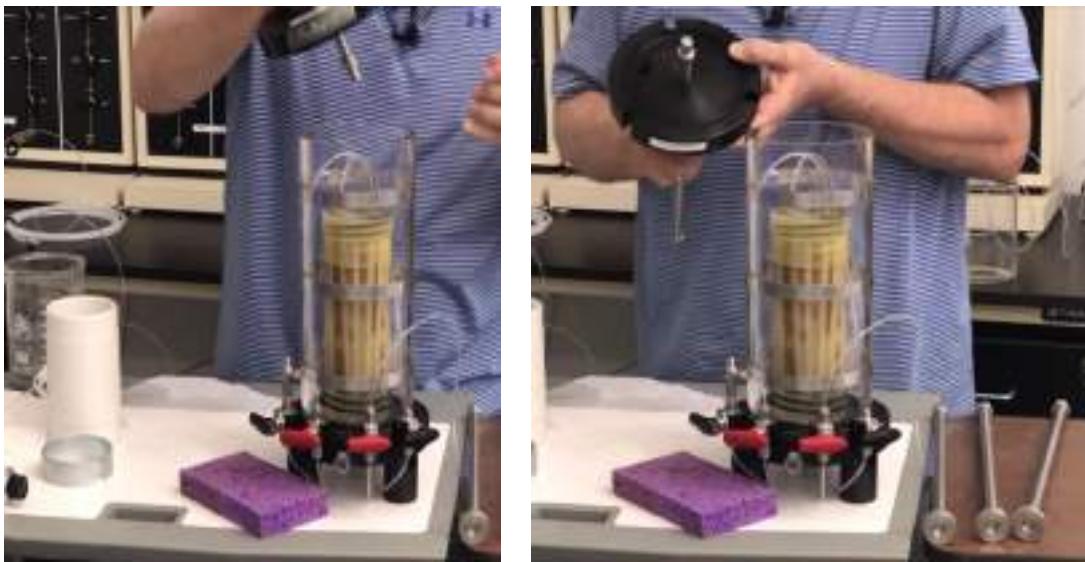
شکل ۶۱-۱۸: نصب لوله‌های زهکشی به قسمت فوقانی کلاهک دستگاه

۲۲- استوانه شفاف و قسمت بالای سلول سه محوری را روی صفحه پایه سلول قرار می‌دهیم تا دستگاه کاملاً آماده شود (شکل ۶۲-۱۸).



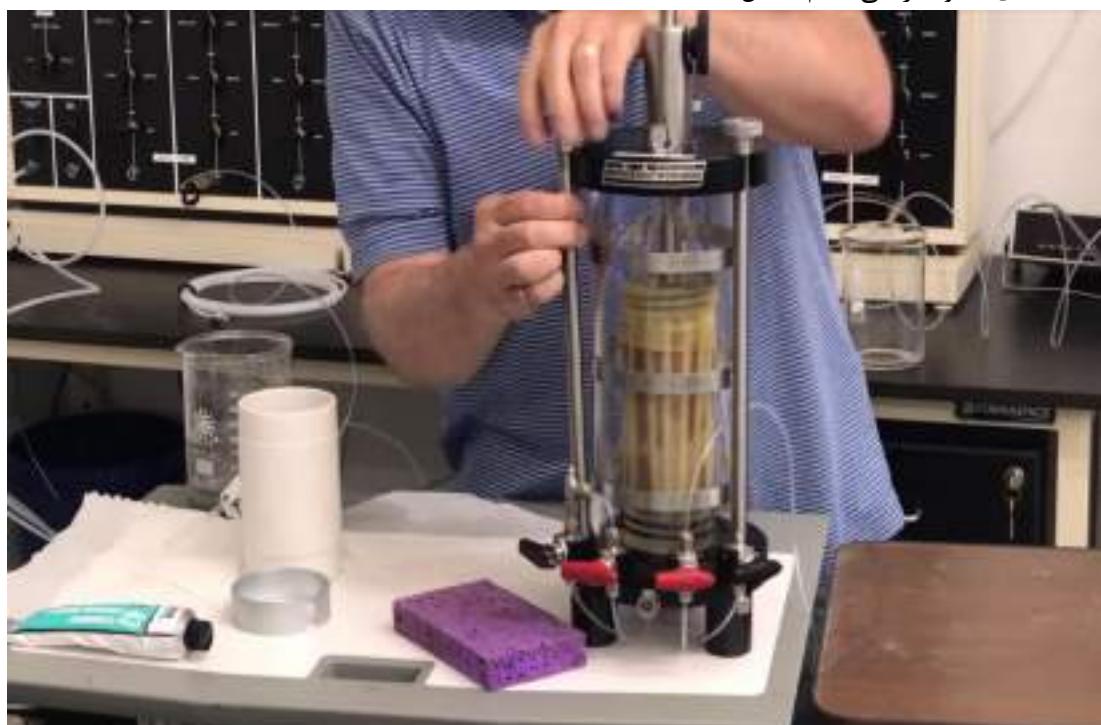
شکل ۶۲-۱۸: قرار دادن استوانه شفاف روی سلول سه محوری

۲۳- قسمت بالایی استوانه را روی آن قرار می‌دهیم (شکل ۶۳-۱۸).



شکل ۶۳-۱۸: قرار دادن قسمت بالایی استوانه

۲۴- میله‌های استوانه را می‌بندیم (شکل ۶۴-۱۸).



شکل ۶۴-۱۸: بستن میله‌های استوانه

۲۴- سلول را از آب پر می‌کنیم.

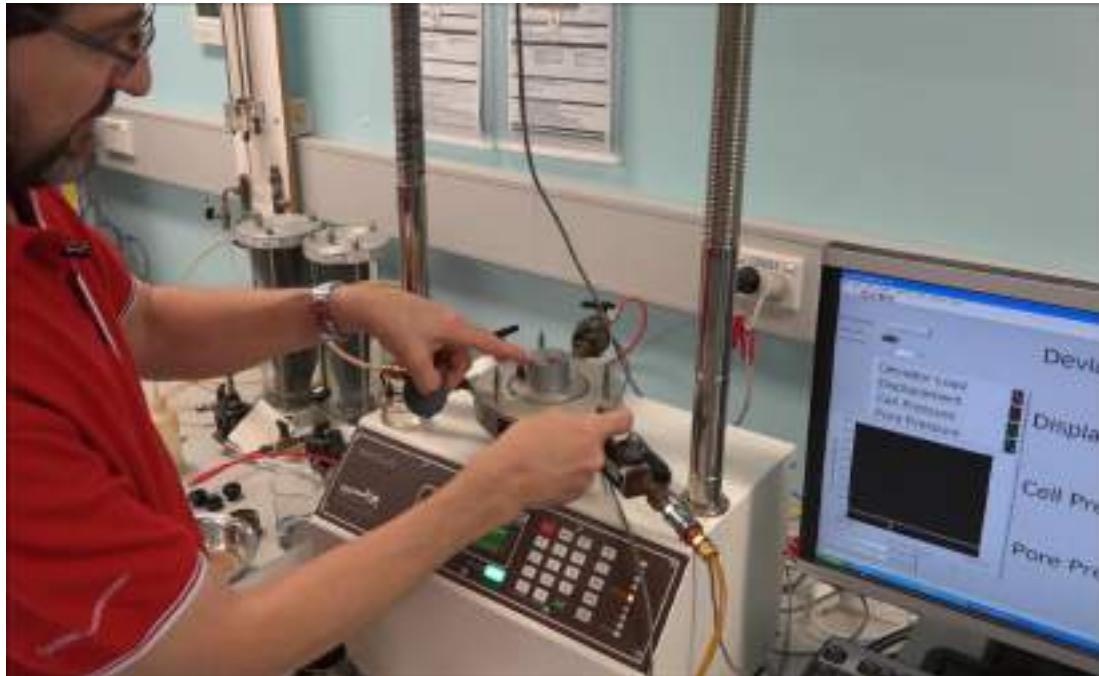
۲۵- با عبور گاز کربن دی اکسید و آب بدون هوا از داخل نمونه، به فرایند اشباع‌سازی آن کمک می‌کنیم. هر کدام از این مراحل حدود ۱ تا ۳ ساعت زمان می‌برد.

تذکر: حین این مرحله، لوله زهکش بالای نمونه را باید باز گذاشت تا هوا از داخل نمونه خارج شود. فرایند اشباع‌سازی نمونه‌های رسی نسبتاً طولانی خواهد بود.

**تذکر:** اگر اشباع کردن نمونه لازم نباشد (مانند آزمایش تحکیم‌نیافته - زهکشی‌نشده)، به جای سنگ متخلخل بالا و پایین نمونه، می‌توان از سنگ بدون تخلخل استفاده کرد.

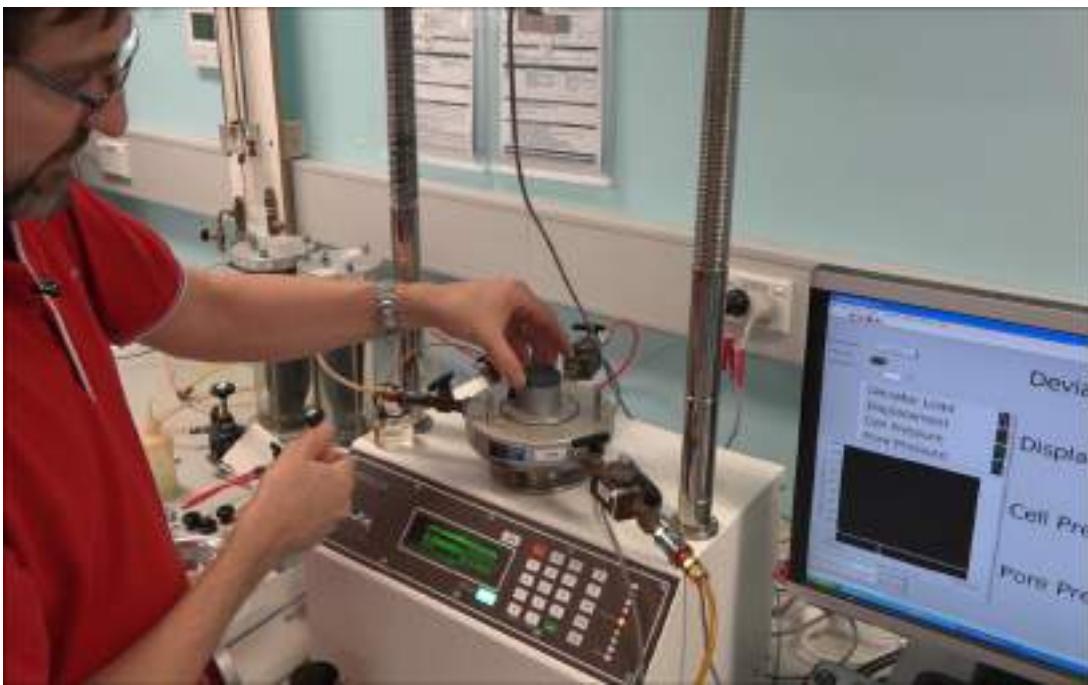
#### قرار دادن نمونه‌های ماسه‌ای در سلول دستگاه سه محوری

- ۱- دو سنگ متخلخل مورد استفاده در نمونه را به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش قرار می‌دهیم و سپس به آن‌ها اجازه می‌دهیم تا در دمای اتاق خنک شود.
- ۲- لوله‌های مرتبط با دستگاه سه محوری را سفت می‌کنیم.
- ۳- لوله‌های متصل به صفحه پایه سلول سه محوری را از هوا خالی می‌کنیم. به این صورت که شیرهای آب را باز می‌کنیم تا آب روی کلاهک پایینی دستگاه پدیدار شود (شکل ۱۸-۶۵). پس از اطمینان از خروج هوا، شیرهای آب را می‌بندیم.



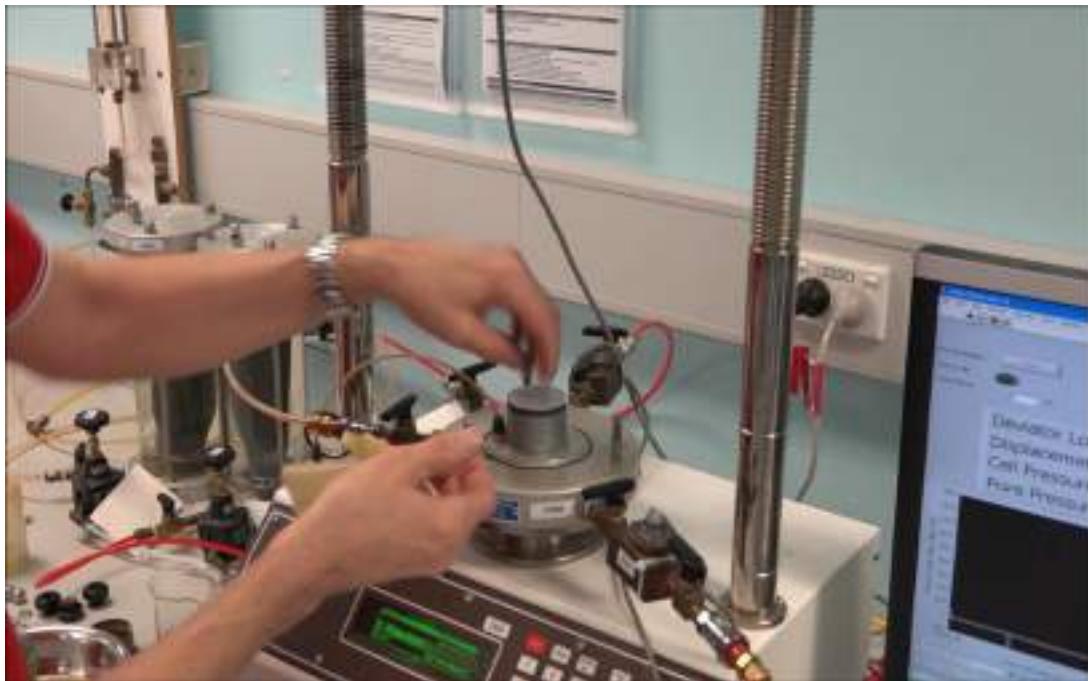
شکل ۱۸-۶۵: خالی کردن هوا از لوله‌های دستگاه توسط عبور دادن جریان آب

۴- سنگ متخلخل پایینی (در حالتی که مرطوب است) را روی صفحه کف قرار می‌دهیم (شکل ۱۸-۶۶).



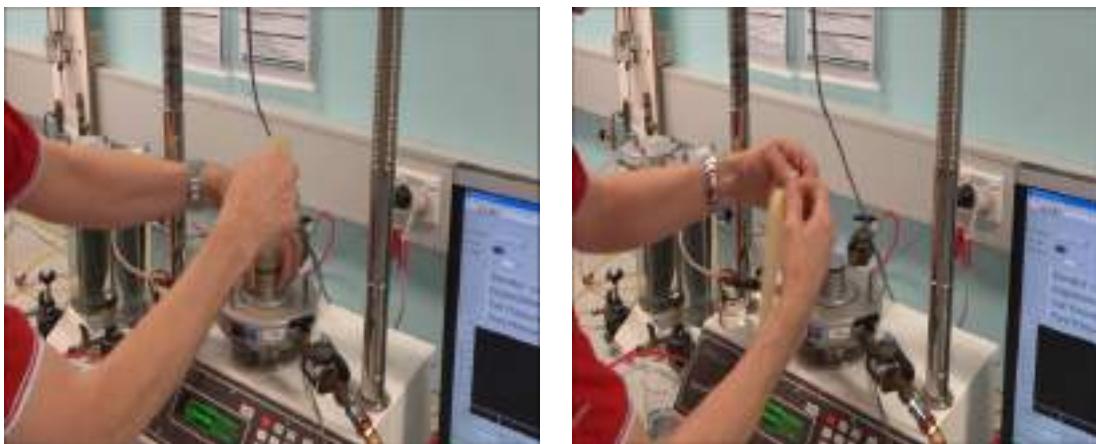
شکل ۱۸-۶۶: قرار دادن سنگ متخلخل روی کلاهک پایینی

۵- کاغذ صافی را روی سنگ متخلخل قرار می‌دهیم (شکل ۱۸-۶۷).



شکل ۱۸-۶۷: قرار دادن کاغذ صافی روی سنگ متخلخل

۶- غشاء را روی کاغذ صافی قرار می‌دهیم (شکل ۶۸-۱۸).



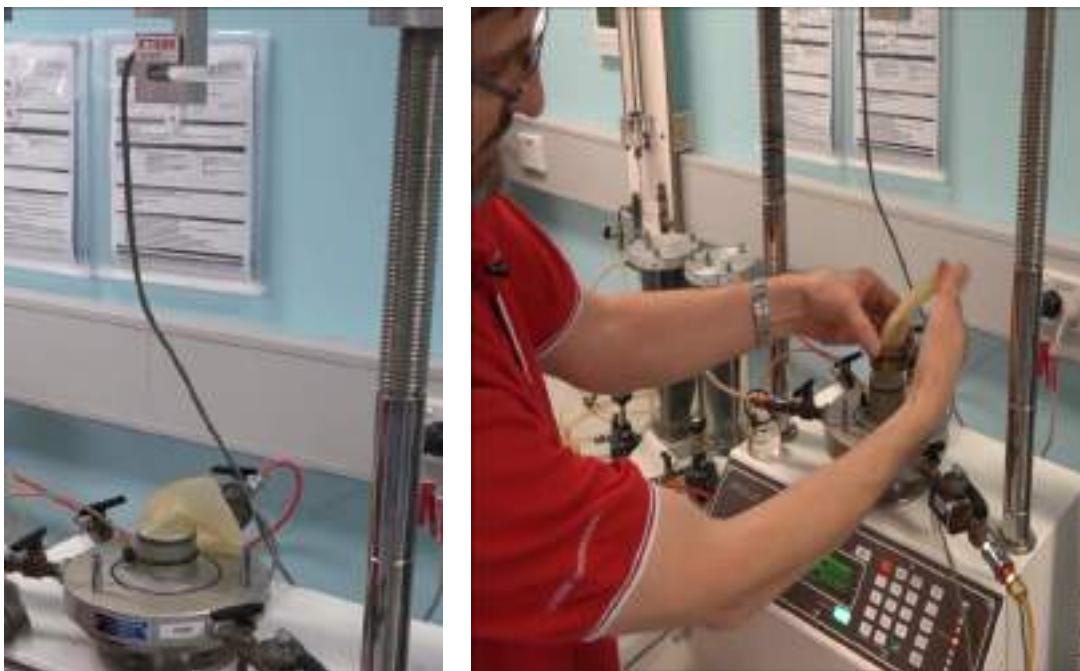
شکل ۶۸-۱۸: قرار دادن نمونه روی کاغذ صافی

۷- اورینگ‌های نمونه را روی ابزار مخصوص آن قرار می‌دهیم (شکل ۶۹-۱۸).



شکل ۶۹-۱۸: قرار دادن اورینگ روی ابزار مخصوص آن جهت انتقال آن به دور نمونه

۸- اورینگ مرحله پیش را همراه ابزار آن، وارد غشاء می‌نماییم (شکل ۷۰-۱۸).



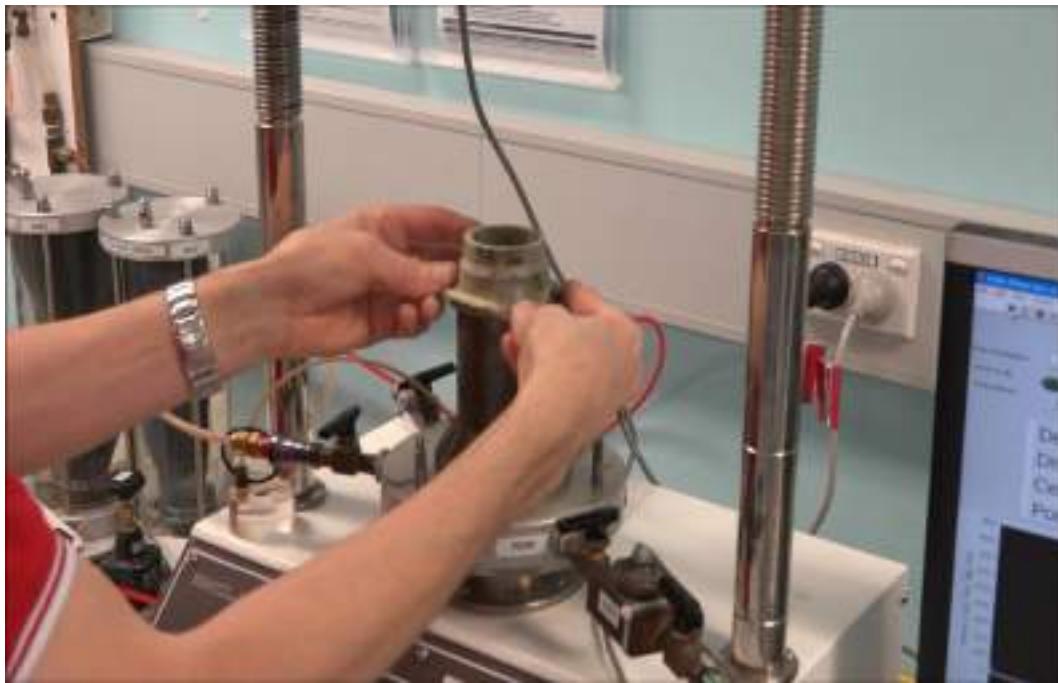
شکل ۷۰-۱۸: انتقال اورینگ داخل غشاء

۹- اکنون قالب غشاء را وارد غشاء می‌کنیم (شکل ۷۱-۱۸).



شکل ۷۱-۱۸: انتقال قالب غشاء به اطراف غشاء

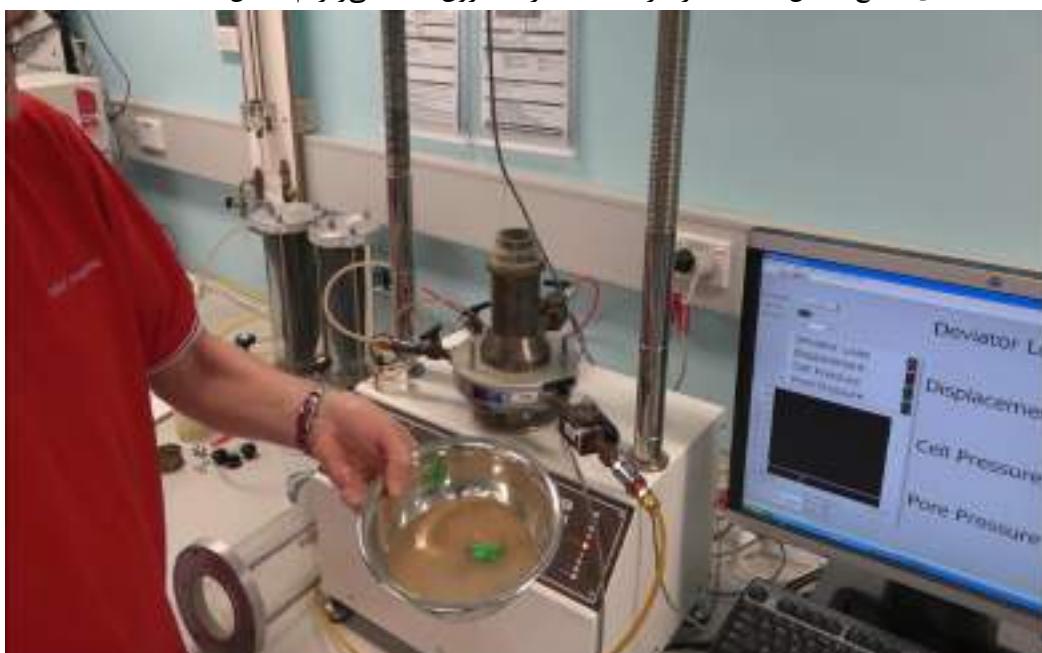
۱۰- لبه اضافی غشاء را روی نمونه برمی‌گردانیم (شکل ۷۲-۱۸).



شکل ۷۲-۱۸: برگرداندن لبه اضافی غشاء روی غشاء

۱۱- مانند نمونه‌های رسی، در این حالت نیز غشاء را به پمپ خالٌ متصل می‌نماییم.

۱۲- خاک ماسه‌ای اشباع (شکل ۷۳-۱۸) را در یک لایه نازک، درون غشاء می‌ریزیم (شکل ۷۴-۱۸).



شکل ۷۳-۱۸: خاک ماسه اشباع



شکل ۱۸-۷۴: ریختن یک لایه خاک ماسه اشباع داخل غشاء

۱۳- اکنون توسط ضربه، خاک ماسه ریخته شده درون قالب را متراکم می کنیم (شکل ۱۸-۷۵).



شکل ۱۸-۷۵: متراکم کردن ماسه ریخته شده در مرحله قبل

۱۴- مراحل ۱۳ تا ۱۴ را آن قدر ادامه می دهیم تا خاک به مقدار ارتفاع مورد نظر برسد.

۱۵- کاغذ صافی را روی نمونه ساخته شده قرار می دهیم (شکل ۱۸-۷۶).



شکل ۷۶-۱۸: قرار دادن کاغذ صافی بر روی نمونه

۱۶- سنگ متخلخل را روی کاغذ صافی قرار می‌دهیم (شکل ۷۷-۱۸).



شکل ۷۷-۱۸: قرار دادن سنگ متخلخل روی کاغذ صافی

۱۷- کلاهک بالایی را روی سنگ متخلخل بالایی قرار می‌دهیم (شکل ۱۸-۷۸).



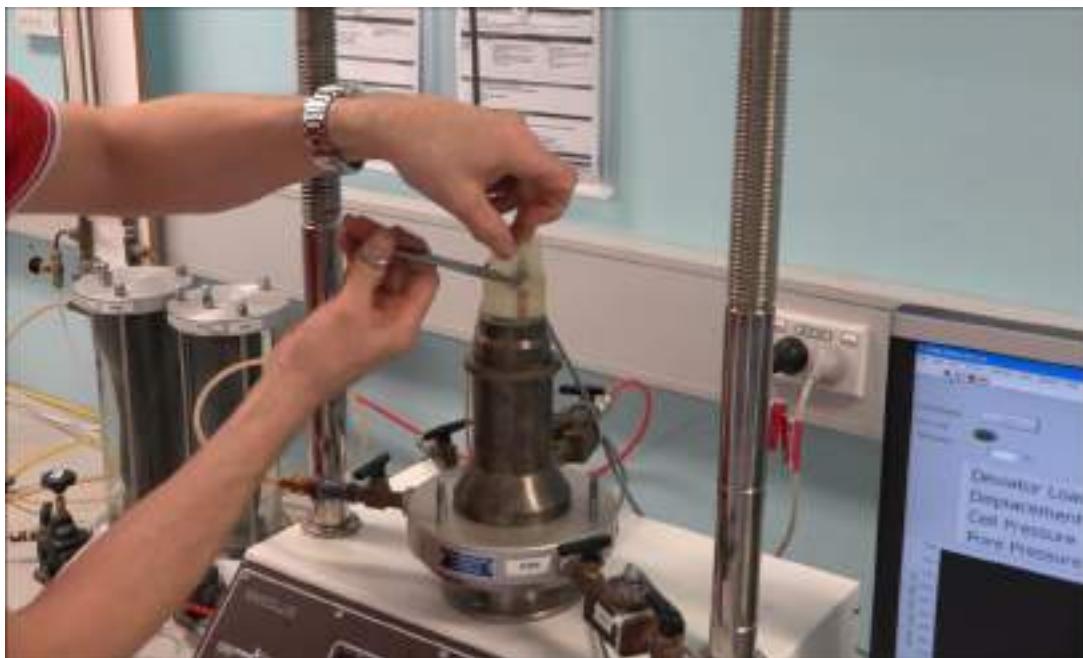
شکل ۱۸-۷۸: قرار دادن کلاهک بالایی روی نمونه

۱۸- لبه‌های غشاء را روی قالب غشاء برمی‌گردانیم. (شکل ۱۸-۷۹).



شکل ۱۸-۷۹: قرار دادن غشاء پلاستیکی داخل قالب غشاء

۱۹- قسمت اضافی غشاء را با کمک قیچی جدا می کنیم (شکل ۱۸-۸۰).

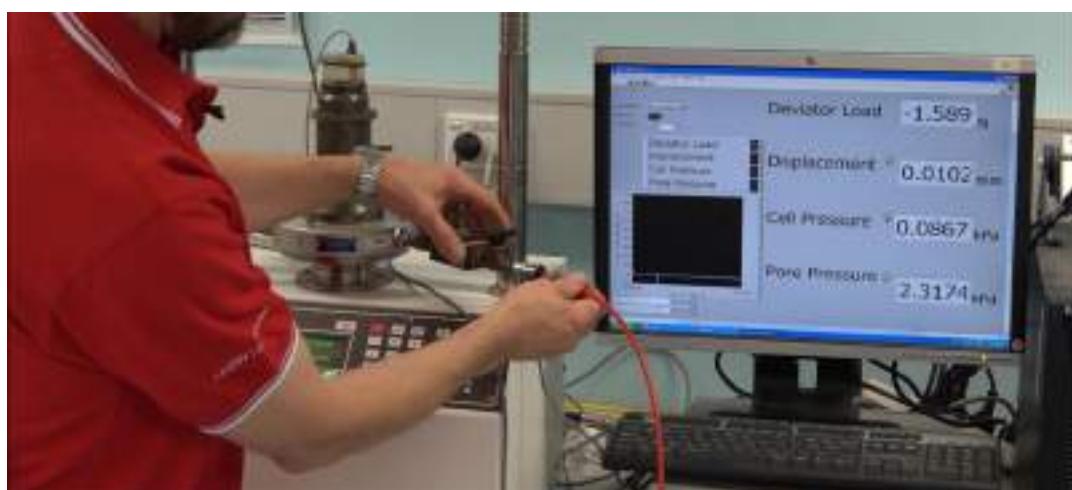


شکل ۱۸-۸۰: جدا کردن قسمت اضافی غشاء

۲۰- همانند نمونه‌های رسی، پمپ خلأ را جدا می کنیم تا غشاء به نمونه بچسبد.

۲۱- اورینگ قسمت بالایی را نیز همانند قسمت فوقانی، جایگذاری می کنیم.

۲۲- این بار پمپ خلأ را داخل نمونه و صل می کنیم تا پس از برداشتن قالب، نمونه ماسه‌ای از هم نپاشد (شکل ۱۸-۸۱).



شکل ۱۸-۸۱: اتصال پمپ خلأ

۲۳- قالب غشاء را برمی داریم.

۲۴- سلول دستگاه را جایگذاری می کنیم و میله‌های آن را می بندیم.

### مراحل انجام آزمایش تحکیم‌نیافته- زهکشی نشده

- ۱- پیستون بالای سلول سه‌محوری را روی صفحه بالایی نمونه بدون آنکه فشاری به آن وارد کند، قرار می‌دهیم (شکل ۸۲-۱۸).



شکل ۸۲-۱۸: قرار دادن پیستون

- ۲- اشباع‌سازی نمونه: برای اشباع کردن نمونه معمولاً از پس‌فشار (فشار وارد شده داخل نمونه) استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا تنفس همه جانبه مشخصی (مثلًا ۵۰ کیلو پاسکال) به نمونه وارد می‌کنیم. پس پس‌فشاری (مثلًا ۴۰ کیلو پاسکال) کمتر از فشار سلول به داخل نمونه اعمال می‌کنیم. پس از زمانی مشخص که به آب اجازه داده شد به نمونه وارد شود (شکل ۸۳-۱۸)، شیر زهکشی را می‌بندیم و فشار سلول را به مقدار مشخصی (مثلًا ۵۰ کیلو پاسکال) افزایش می‌دهیم (به ۱۰۰ کیلو پاسکال می‌رسد). در این لحظه، میزان افزایش فشار آب حفره‌ای و پارامتر B را اندازه‌گیری می‌کنیم. این مراحل را به صورت گام‌به‌گام تکرار می‌کنیم تا به مقدار B مورد نظر (حدوداً ۹۵٪) برسیم. در این صورت می‌گوییم که نمونه اشباع شده است.



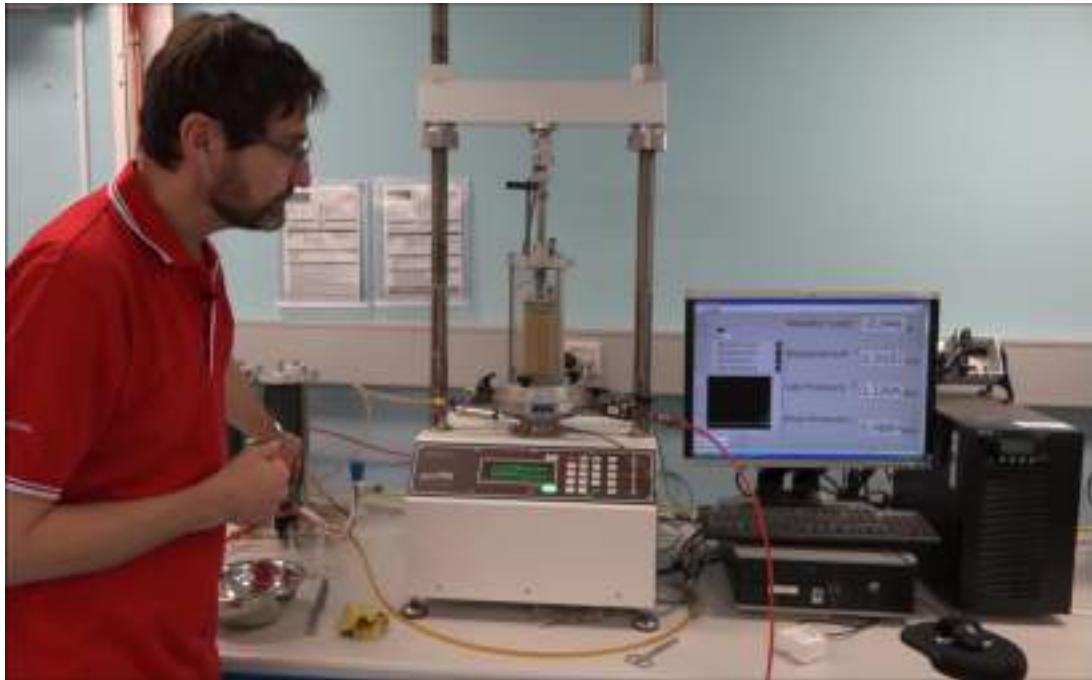
شکل ۸۳-۱۸: پر کردن آب جهت اشباع‌سازی نمونه

۳- در این مرحله، یک فشار هیدرولاستاتیکی،  $5_۳$ ، از طریق سیال داخل سلول به نمونه اعمال می‌کنیم. تذکر: تمام لوله‌های زهکش ورودی و خروجی در این حالت باید بسته باشد (شکل ۸۴-۱۸). درنتیجه از نمونه، آبی خارج و یا به آن داخل نمی‌شود.



شکل ۸۴-۱۸: بستن شیر آب

۴- تماس پیستون، صفحه بالایی و نمونه را کنترل می‌کنیم تا به طور مناسب تماس برقرار باشد. عقره گیج حلقة بارگذاری و گیج اندازه‌گیری نشست قائم نمونه را روی صفحه می‌گذاریم. دستگاه را برای مخصوص داشتن نشستی با سرعت  $۰\% /۵$  در دقیقه تنظیم و سپس آن را روشن می‌کنیم (شکل ۸۵-۱۸).



شکل ۸۵-۱۸: روشن کردن دستگاه و اعمال بار

- ۵- به ازای هر درجه نشت و متراکم شدن نمونه ( $10\% / 254$  میلی‌متر)، گیج حلقه بارگذاری را می‌خوانیم. این فاصله قرائت را می‌توان به ازای  $20\% / 508$  میلی‌متر) نشت انجام داد و حتی پس از اینکه سرعت افزایش بار کاهش یافت می‌توان آن را بیشتر هم کرد. قرائت‌ها از گیج حلقه بارگذاری تا مقدار حداثتی افزایش یافته و سپس احتمالاً این مقدادر کاهش می‌یابد تا تقریباً ثابت شود.
- ۶- پس از پایان آزمایش، دستگاه اعمال فشار را روی دکمه معکوس می‌گذاریم و سلول سه‌محوری را پایین می‌آوریم و سپس دستگاه را خاموش می‌کنیم. فشار سلول را رها کرده (اگر با کمپرسور اعمال شده، کمپرسور را خاموش می‌کنیم) و آب را از سلول سه‌محوری خارج و سپس نمونه را خارج و درصد رطوبت آن را تعیین می‌کنیم.

#### مراحل انجام آزمایش تحکیم‌یافته - زهکشی نشده

- ۱- نمونه را مطابق مراحل گفته شده در آزمایش قبل اشباع می‌کنیم و پیستون را به حالت مماس روی صفحه فوقانی قرار می‌دهیم.
- ۲- فشار هیدرواستاتیکی  $5_2$  را از طریق سیال به نمونه اعمال می‌کنیم.
- ۳- اعمال فشار  $5_3$  باعث افزایش فشار آب منفذی نمونه خواهد شد. برای تحکیم نمونه، لوله‌های زهکشی را که به نمونه ارتباط دارد به یک بورت مدرج وصل می‌کنیم و شیر لوله‌ها را باز نگه می‌داریم. زمانی که سطح آب در بورت ثابت ماند، نشان‌دهنده این موضوع است که تحکیم کامل شده است. برای یک نمونه اشباع، حجم نمونه هنگام تحکیم برابر با حجم آب خارج شده از نمونه یا جمع شده در بورت است. حجم آب خارج شده را یادداشت می‌کنیم ( $\Delta V$ ).
- ۴- مماس بودن پیستون و صفحه فوقانی را کنترل کرده و گیج حلقه بارگذاری و گیج مربوط به اندازه‌گیری تغییر شکل محوری نمونه را صفر می‌کنیم.
- ۵- شیرهای زهکشی را می‌بندیم.
- ۶- دستگاه اعمال فشار را برای ایجاد کرنشی با سرعت  $5\% / 0.05$  در دقیقه تنظیم و سپس آن را روشن می‌کنیم. زمانی که نیروی محوری روی نمونه افزایش می‌یابد، فشار آب منفذی در نمونه نیز افزایش می‌یابد. قرائت‌های گیج حلقه بارگذاری و فشار آب منفذی اضافی مربوط به این قرائت‌ها را در نمونه برای هر تغییر شکل محوری به میزان  $10\%$

اینج (۰/۲۵۴ میلی‌متر) یا کمتر، یادداشت می‌کنیم. گیج حلقه بارگذاری تا مقدار حداکثری افزایش و سپس کاهش می‌یابد یا تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بعد از اینکه گیج حلقه بارگذاری به حداکثر مقدار خود رسید، ۴ تا ۵ قرائت دیگر بعد از آن را نیز می‌خوانیم.

- ۷- بعد از تمام شدن آزمایش، دکمه معکوس دستگاه را روشن می‌کنیم تا پیستون بالا برود؛ سپس سلول سه‌محوری را پایین می‌آوریم و دستگاه را خاموش می‌کنیم. فشار سلول (۵۳) را رها و آب را از داخل سلول سه‌محوری خارج می‌کنیم.
- ۸- نمونه را از داخل سلول خارج و درصد رطوبت آن را تعیین می‌کنیم.
- ۹- همین آزمایش را روی یک یا دو نمونه مشابه تکرار می‌کنیم. در هر آزمایش مقدار ۵۳ متفاوت است.

#### مراحل انجام آزمایش تحکیم‌یافته - زهکشی شده

- ۱- نمونه را مطابق مراحل گفته شده در آزمایش قبل، اشباع می‌کنیم و پیستون را به حالت مماس روی صفحه فوکانی قرار می‌دهیم.
- ۲- فشار هیدروليستاتيکي ۵۳ را از طریق سیال به نمونه اعمال می‌کنیم.
- ۳- اعمال فشار ۵۳ باعث افزایش فشار آب منفذی نمونه خواهد شد. برای تحکیم نمونه، لوله‌های زهکشی که به نمونه ارتباط دارد را به یک بورت مدرج وصل می‌کنیم و شیر لوله‌ها را باز نگه می‌داریم. زمانی که سطح آب در بورت ثابت ماند، نشان‌دهنده این موضوع است که تحکیم کامل شده است. برای یک نمونه اشباع، حجم نمونه هنگام تحکیم برابر با حجم آب خارج شده از نمونه یا جمع شده در بورت است. حجم آب خارج شده را یادداشت می‌کنیم ( $\Delta V$ ).
- ۴- مماس بودن پیستون و صفحه فوکانی را کنترل و گیج حلقه بارگذاری و گیج مربوط به اندازه‌گیری تغییر شکل محوی نمونه را صفر می‌کنیم.
- ۵- همانند مرحله تحکیم، شیرهای زهکشی را باز نگه می‌داریم. دستگاه اعمال فشار را برای ایجاد کرنشی با سرعت ۵٪ در دقیقه تنظیم و سپس آن را روشن می‌کنیم. زمانی که نیروی محوی روی نمونه افزایش می‌یابد، با خارج شدن آب از نمونه، نمونه تغییر حجم می‌دهد که توسط بورت اندازه‌گیری می‌شود. قرائت‌های گیج حلقه بارگذاری و بورت را در نمونه برای هر تغییر شکل محوی به میزان ۱۰/۰ اینچ (۰/۲۵۴ میلی‌متر) یا کمتر، یادداشت می‌کنیم. گیج حلقه بارگذاری تا مقدار حداکثری افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد یا تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بعد از اینکه گیج حلقه بارگذاری به حداکثر مقدار خود رسید ۴ تا ۵ قرائت دیگر بعد از آن را نیز می‌خوانیم.
- ۶- بعد از تمام شدن آزمایش، دکمه معکوس دستگاه را روشن می‌کنیم تا پیستون بالا برود؛ سپس سلول سه‌محوری را پایین می‌آوریم و دستگاه را خاموش می‌کنیم. فشار سلول (۵۳) را رها و آب را از داخل سلول سه‌محوری خارج می‌کنیم.
- ۷- نمونه را از داخل سلول خارج و درصد رطوبت آن را تعیین می‌کنیم.
- ۸- همین آزمایش را روی یک یا دو نمونه مشابه تکرار می‌کنیم. در هر آزمایش مقدار ۵۳ متفاوت است.

#### (۴-۱۸) محاسبات

##### آزمایش تحکیم‌یافته - زهکشی نشده

با توجه به جدول‌های ۳-۱۸ که نتایج انجام آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکشی نشده روی یک نمونه رس قهوه‌ای تیره سیلتدار در آن‌ها درج شده است، مراحل محاسبات را می‌توان توضیح داد.

- ۱- سطح اولیه نمونه (جدول ۳-۱۸) را محاسبه می‌کنیم.

$$A_{\cdot} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (32-18)$$

- حجم نمونه را بعد از تحکیم (مرحله ۳) به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$V_{\cdot} = \frac{\pi D^{\frac{1}{4}}}{4} L. \quad (33-18)$$

- طول ( $L_c$ ) و سطح مقطع ( $A_c$ ) نمونه را بعد از تحکیم مطابق روابط زیر محاسبه می‌کنیم:

$$L_c = L \cdot \left( \frac{V_c}{V_{\cdot}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (34-18)$$

$$A_c = A \cdot \left( \frac{V_c}{V_{\cdot}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (35-18)$$

- کرنش محوری را مطابق زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_c} \quad (36-18)$$

$\Delta L$ : تغییر شکل محوری

- نیروی وارد شده پیستون روی نمونه (ستون ۴ جدول ۳-۱۸) را مطابق زیر تعیین می‌کنیم:

$$P = (\text{ضریب کالیبراسیون حلقه}) (\text{قرائت گیج حلقه بارگذاری}) \quad (37-18)$$

- سطح مقطع تصحیح شده (A) نمونه را (ستون ۵ جدول ۳-۱۸) مطابق فرمول زیر محاسبه می‌کنیم:

$$A = \frac{A_{\cdot}}{1-\varepsilon} \quad (38-18)$$

- تفاضل تنش (تنش پیستون)  $\Delta\sigma$  (ستون ۶ جدول ۳-۱۸) را مطابق فرمول زیر به دست می‌آوریم:

$$\Delta\sigma = \frac{P}{A} \quad (39-18)$$

- پارامتر (ضریب) فشار آب منفذی،  $\bar{A}$  را تعیین می‌کنیم:

$$\bar{A} = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma} \quad (40-18)$$

- منحنی‌های زیر را رسم می‌کنیم:

الف -  $\Delta\sigma$  بر حسب  $\varepsilon$  (%)

ب -  $\Delta u$  بر حسب  $\varepsilon$  (%)

ج -  $\bar{A}$  بر حسب  $\varepsilon$  (%)

به عنوان مثال، نتایج محاسبات مندرج در جدول ۳-۱۸ رسم شده است.

۱۰- از روی منحنی تغییرات  $\Delta\sigma$  نسبت به  $\varepsilon$  (%) حداقل مقدار  $\Delta\sigma_f = \Delta\sigma_f$  و مقادیر مربوط به آن برای  $A_f = A_f$  را تعیین می‌کنیم.

از شکل ۴-۱۸،  $\Delta\sigma_f = ۳۱۶ kN/m^2$  در  $\varepsilon = ۰.۸/۲$  و در همان کرنش  $\Delta u_f = ۱۷۷ kN/m^2$  و  $\bar{A} = \bar{A}$  به دست می‌آید.

۱۱- تنش‌های اصلی مؤثر بزرگ‌تر و کوچک‌تر را در زمان گسیختگی پیدا می‌کنیم:

$$\sigma_{\cdot} - \Delta u_f = \sigma'_{\cdot} \quad \text{تنش اصلی مؤثر کوچک‌تر در زمان گسیختگی} \quad (41-18)$$

$$(\sigma_{\cdot} + \Delta\sigma_f) - \Delta u_f = \sigma'_{\cdot} \quad \text{تنش اصلی مؤثر بزرگ‌تر در زمان گسیختگی} \quad (42-18)$$

برای آزمایش انجام شده روی گراندیت<sup>۱</sup> بازسازی شده که نتایج آن در جدول ۳-۱۸ مندرج است خواهیم داشت:

$$\sigma'_t = ۳۹۲ - ۱۷۷ = ۲۱۵ \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_c = (۳۹۲ + ۳۱۶) - ۱۷۷ = ۵۳۱ \text{ kN/m}^2$$

۱۲ - مقادیر  $\sigma'_c$  و  $\sigma'_t$  را برای تمام نمونه های آزمایش شده مشخص و دایره موهرب را برای هریک رسم می کنیم. پوش گسیختگی که مماس بر دوایر موهرب است را نیز رسم می کنیم. معادله پوش گسیختگی با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (۴۳-۱۸)$$

مقادیر  $c'$  و  $\varphi'$  به وسیله پوش گسیختگی به دست می آید.

شکل ۳-۱۸ دوایر موهرب را برای آزمایش انجام شده که نتایج آن در جدول ۳-۱۸ است مندرج است، نشان می دهد (تذکر: نتایج مربوط به دایره موهرب شماره ۲ در جدول ۳-۱۸ ذکر نشده است). بهترین مماس مشترک را روی این دوایر موهرب رسم می کنیم. برای پوش گسیختگی، عرض از مبدأ و شیب به ترتیب برابر است با  $c' = ۰$  و  $\varphi' = ۲۵^\circ$ ; بنابراین:

$$\tau = \sigma' \tan ۲۵ \quad (۴۴-۱۸)$$

---

<sup>1</sup>. Grundite

## جدول ۱۸-۳: آزمایش سه محوری تحکیم‌بافته - زهکشی نشده

شماره نمونه:

نوع خاک: خاک گراندیت بازسازی شده

محل نمونه‌گیری:

ضریب کالیبراسیون حلقة بارگذاری: درجه/ $N$ 

## شروع آزمایش

درصد رطوبت (شروع آزمایش): ۳۵٪/۳۵

قطر اولیه نمونه،  $D$ : ۳۵/۷ mmحجم اولیه نمونه،  $V$ :  $A \cdot L$ :  $76/2 \text{ cm}^2$ 

بعد از تحکیم نمونه اشباع در سلول سه محوری

فشار سلول سه محوری،  $\sigma_2$ : ۳۹۲ kN/m<sup>2</sup>حجم نمونه بعد از تحکیم،  $V_c$ :  $64/6 \text{ cm}^3$ طول نمونه بعد از تحکیم،  $L_c$ :  $76/12 \text{ mm}$ 

شخص نمونه‌گیری:

طول نمونه اولیه،  $L$ : ۷۶/۲ mm

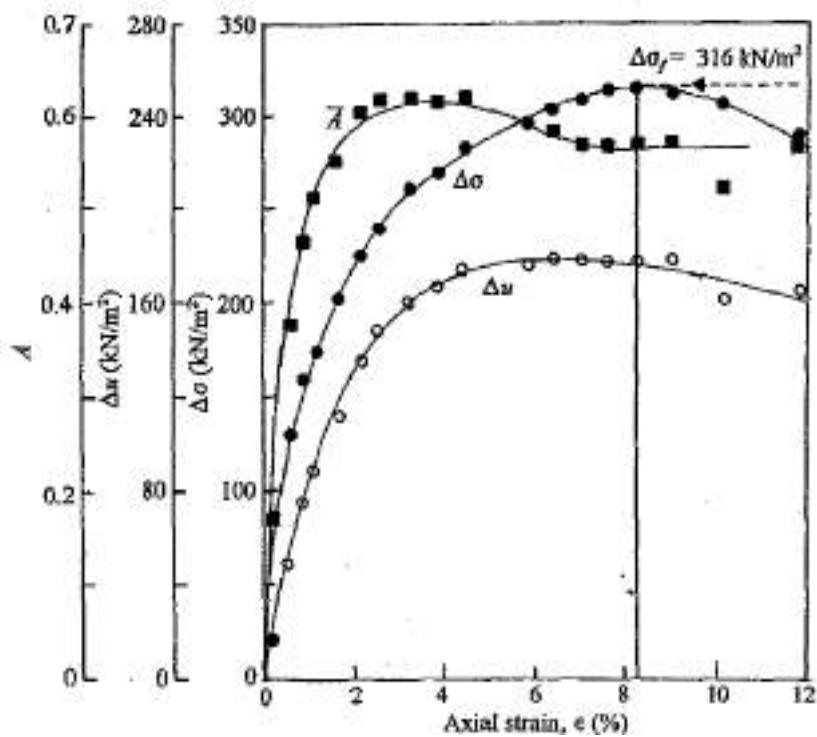
$$10 \text{ cm}^3 : A = \frac{\pi}{4} D^2$$

سطح مقطع اولیه نمونه،  $A$ :خروج آب از نمونه در طی تحکیم نمونه،  $\Delta V$ :  $11/6 \text{ cm}^3$ 

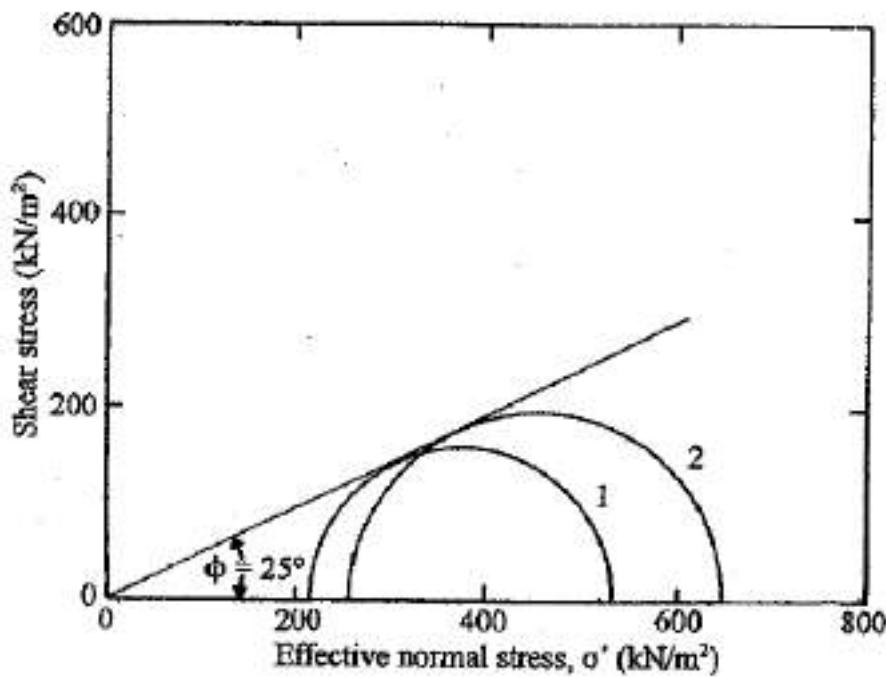
$$10 \text{ cm}^3 : A_c = \frac{\pi}{4} \left( \frac{64/6}{76/2} \right)^2$$

تاریخ نمونه‌گیری:

$\bar{A}$	فشار آب منفذی، اضافی، $\Delta u(kN/m^3)$	تفاضل تنش، $\Delta \sigma(kN/m^3)$	سطح مقطع تصحیح شده، $A(\text{cm}^3)$	بار پیستون	قرائت گیج حلقة بارگذاری (تعداد درجات)	کرنش قائم، $\epsilon = \frac{\Delta L}{L} (\%)$	تغییر شکل نمونه، $\Delta L (\text{in})$
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
+	+	+	۸/۹۶	+	۰	۰	۰
۰/۱۶۴	۲۹۴	۱۷/۹	۸/۹۸	۱۶/۷	۱۵	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۶
۰/۳۷۸	۴۹/۵	۱۲۹/۶	۹/۰۱	۱۱۶/۷۷	۱۰۹	۰/۰۰۵۳	۰/۰۱۵
۰/۴۶۶	۷۴/۵۶	۱۵۹/۹۹	۹/۰۴	۱۴۴/۶۳	۱۳۵	۰/۰۰۸۵	۰/۰۲۴
۰/۵۱۴	۹۸/۲۷	۱۷۳/۸۲	۹/۰۶	۱۵۷/۴۸	۱۴۷	۰/۰۱۰۶	۰/۰۳۰
۰/۵۵۳	۱۱۱/۸۳	۲۰۲/۲۶	۹/۱۱	۱۸۴/۲۶	۱۷۲	۰/۰۱۵۸	۰/۰۴۵
۰/۶۰۲	۱۳۵/۳۸	۲۲۴/۸	۹/۱۵	۲۰۵/۶۹	۱۹۲	۰/۰۲۱۱	۰/۰۶۰
۰/۶۲۰	۱۴۸/۱۳	۲۳۸/۹۸	۹/۱۹	۲۱۹/۶۲	۲۰۵	۰/۰۲۵۴	۰/۰۷۲
۰/۶۱۸	۱۶۰/۸۸	۲۶۰/۵۸	۹/۲۵	۲۴۱/۰۴	۲۲۵	۰/۰۳۱۷	۰/۰۹۰
۰/۶۲۸	۱۶۸/۷۵	۲۷۱/۵۷	۹/۳۱	۲۵۷/۸۳	۲۳۶	۰/۰۳۸۰	۰/۱۰۸
۰/۶۲۲	۱۷۵/۶	۲۸۲/۴	۹/۳۷	۲۶۴/۶۱	۲۴۷	۰/۰۴۳۷	۰/۱۲۴
۰/۵۹۲	۱۷۶/۵۸	۲۹۸/۲	۹/۵۲	۲۸۳/۸۹	۲۶۵	۰/۰۵۹۲	۰/۱۶۸
۰/۵۸۴	۱۷۶/۵۸	۳۰۲/۲۵	۹/۵۷	۲۸۹/۲۵	۲۷۰	۰/۰۶۳۴	۰/۱۸۰
۰/۵۷۰	۱۷۶/۵۸	۳۰۹/۲۶	۹/۶۳	۲۹۷/۸۲	۲۷۸	۰/۰۶۹۷	۰/۱۹۸
۰/۵۶۳	۱۷۶/۵۸	۳۱۳/۶۶	۹/۷	۳۰۴/۲۵	۲۸۴	۰/۰۷۶۱	۰/۲۱۶
۰/۵۶۱	۱۷۶/۵۸	۳۱۵/۰۲	۹/۷۶	۳۰۷/۴۶	۲۸۷	۰/۰۸۲۴	۰/۲۳۴
۰/۵۶۴	۱۷۶/۵۸	۳۱۳/۲۲	۹/۸۵	۳۰۸/۵۳	۲۸۸	۰/۰۹۰۵	۰/۲۵۷
۰/۵۲۳	۱۶۰/۸۸	۳۰۷/۶۲	۹/۹۶	۳۰۶/۳۹	۲۸۶	۰/۱۰۰۷	۰/۲۸۶
۰/۵۶۵	۱۶۳/۸۲	۳۸۹/۹۷	۱۰/۱۶	۲۹۴/۶۱	۲۷۵	۰/۱۱۸۳	۰/۳۳۵



شکل ۳-۱۸: منحنی تغییرات  $\Delta u$ ،  $\Delta \sigma$  و  $\bar{A}$  نسبت به کرنش محوری برای نتایج آزمایش مندرج در جداول ۳-۱۸



شکل ۳-۱۸: دایره موهر تنش مؤثر برای نمونه خاک بازسازی شده بر اساس نتایج جدول ۳-۱۸

### ۱۸-۵) نکات کلی

۱- برای خاک‌های رسی اشباع، آزمایش فشاری ساده (تکمحوری یا محصور نشده) (فصل هفدهم) - حالت خاص از آزمایش UU که قبلاً گفته شد- انجام می‌شود. برای آزمایش فشاری ساده  $c = 0.5$ . البته کیفیت نتایج به دست آمده از آزمایش UU بهتر است.

۲- برای خاک عادی تحکیم‌یافته،  $c = 0$ ، برای خاک‌های پیش‌تحکیم‌یافته  $c > 0$ .

۳- نمونه تعییرات مقادیر  $\bar{A}$  در زمان گسیختگی برای خاک‌های رسی در زیر ارائه شده است:

جدول ۱۸-۴: مقادیر  $\bar{A}$  در زمان گسیختگی برای خاک‌های رسی

نوع خاک	$\bar{A}$ در زمان گسیختگی
رس با حساسیت زیاد	$0.75 \rightarrow 1/5$
رس عادی تحکیم‌یافته	$0.5 \rightarrow 1$
رس پیش‌تحکیم‌یافته	$-0.5 \rightarrow 0$
رس ماسه‌ای متراکم شده	$0.5 \rightarrow 0.75$

## منابع

۱. آزمایشگاه مکانیک خاک / ترجمه [و تأليف] محمدحسن بازیار، حسین صالحزاده. [ویراست ۲]. مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران؛ شماره ۱۸۳. سال ۱۳۸۲.
۲. دستور کار آزمایش‌های مکانیک خاک / تأليف: دکتر محمدمهردی احمدی، مهندس صادق قوامی جمال. مرکز انتشارات دانشگاه صنعتی شریف؛ دانشکده مهندسی عمران. سال ۱۳۹۳.
۳. آزمایشگاه مکانیک خاک / تأليف: دکتر امیر حمیدی. مرکز انتشارات دانشگاه تربیت‌معلم؛ دانشکده فنی و مهندسی. سال ۱۳۹۰.
4. Ameratunga, J. Sivakugan, N. & Das, B. M. (2016). Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering.
5. American Society for Testing and Materials, 1991 Annual Book of ASTM Standards-Vol. 04.08, Philadelphia, PA, 1991.
6. ASTM D422 (2007). Standard test method for Particle-Size Analysis of Soils. West Conshohocken, Pennsylvania. ASTM Book of Standards.
7. ASTM, D 4546 (2014). Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils. ASTM Book of Standards.
8. ASTM D7928 (2017). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. ASTM Book of Standards.
9. Atterberg, A. «Ober die Physikalische Budenuntersuchung, and tiber die Plastizitdt der Tone,» Internationale Mitteilungen far Bodenkunde, Vol. 1,1911.
10. Budhu, M. (2011). Soil mechanics and foundations (No. 1, pp. 1-xvi). Wiley.
11. Casagrande, A. and Fadum, R. E. "Notes on Soil Testing for Engineering Purposes, "Engineering Publication No. 8, Harvard University Graduate School, 1940.
12. Casagrande, A. "Determination of Preconsolidation Load and Its Practical Significance.«Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, 1936, pp. 60-64.
13. Craig, R. F. (2004). Craig's soil mechanics. CRC press.
14. Das, B. M. & Das, B. M. (2019). Advanced soil mechanics (Vol. 270). New York: Taylor & Francis.
15. Das, B. M. (2010). Principles of geotechnical engineering. Cengage learning.
16. Das, B. M. Principles of Geotechnical Engineering, 2nd Edition, PWS Engineering, Boston, 1990.
17. Das, B. M. (2002). Soil mechanics laboratory manual
18. Kalinski, M. E. (2011). Soil mechanics: lab manual (No. Ed. 2). John Wiley & Sons.
19. Kaya, A. Ören, A. H. & Yükselen, Y. (2006). Settling of kaolinite in different aqueous environment. Marine Georesources and Geotechnology, 24(3), 203-218.
20. Li, W. Yi, Y. & Puppala, A. J. (2022). Comparing carbide sludge-ground granulated blastfurnace slag and ordinary Portland cement: Different findings from binder paste and stabilized clay slurry. Construction and Building Materials, 321, 126382.
21. Mir, B. A. (2021). Manual of geotechnical laboratory soil testing. CRC Press.
22. Ouhadi, V. R. Yong, R. N. Amiri, M. & Ouhadi, M. H. (2014). Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. Applied Clay Science, 95, 111-118.
23. Proctor, R. R. "Design and Construction of Rolled Earth Dams , "Engineering News-Record, August 31, September 7, September 21, and September 18, 1933.
24. Rendon-Herrero, O. «Universal Compression Index Equation» Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, Vol.106, No. GTII, 1980, pp. 1179-1200.
25. Taylor, D. W. «Research on the Consolidation of Clays», Serial No. 82 .Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1942.
26. Transportation Officials. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993 (Vol. 1). Aashto
27. Waterways Experiment Station, «Simplification of the Liquid Limit Test Procedure »Technical Memorandum No. 3-286,1949.
28. Zhang, F. Pei, X. & Yan, X. (2018). Physicochemical and mechanical properties of lime-treated loess. Geotechnical and Geological Engineering, 36, 685-696.

---

**University of Guilan Press**

---

## **Soil Mechanics Laboratory**

**By:**

**Meghdad Payan, Ph. D  
Mozhdeh Moshfeghnia Tochae, M. Sc  
Mahdi Salimi, M. Sc**