





# مکانیک خاک

## آزمایشگاه جامع و کاربردی

(همراه با مثال و جدول‌های ثبت نتایج آزمایشگاهی)

Braja M. Das . Khaled Sobhan

ترجمه:

مهندس محمد امین محمد ابراهیمی  
(کارشناس ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک)

مهندس بهروز احمدپور  
(کارشناس ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک)

دکتر مسعود عامل‌سخی  
(هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی قم)

سرشناسه:	داس، برآجا ام، ۱۹۴۱ - م.
عنوان و نام پدیدآور:	Das, Braja M. مکانیک خاک؛ آزمایشگاه جامع و کاربردی / برآجا ام، داس، خالد سبحان؛ ترجمه محمدامین محمدابراهیمی، بهروز احمدپور، مسعود عامل سخی.
مشخصات نشر:	قم: دانشگاه صنعتی قم، انتشارات، ۱۴۰۴.
مشخصات ظاهری:	[۳۴۷] ص.
شابک:	978-622-87740-7-7
وضعیت فهرست نویسی:	فیبا
یادداشت:	عنوان اصلی: Soil mechanics : laboratory manual, 2016.
یادداشت:	این کتاب نخستین بار با عنوان " راهنمای آزمایشگاه مکانیک خاک" ترجمه اردشیر اطمینی توسط انتشارات جویبار در سال ۱۳۹۰ ترجمه و منتشر شده است.
عنوان دیگر:	راهنمای آزمایشگاه مکانیک خاک.
موضوع:	خاک -- مکانیک -- دستنامه‌های آزمایشگاهی Soil mechanics -- Laboratory manuals
شناسه افزوده:	سبحان، خالد
شناسه افزوده:	Sobhan, Khaled
شناسه افزوده:	محمدابراهیمی، محمدامین، ۱۳۷۵ - مترجم
شناسه افزوده:	احمدپور، بهروز، ۱۳۷۰ - مترجم
شناسه افزوده:	عامل سخی، مسعود، ۱۳۵۶ - مترجم
شناسه افزوده:	دانشگاه صنعتی قم، انتشارات
رده بندی کنگره:	TA۷۱۰/۵/ د۲
رده بندی دیویی:	۶۲۴/۱۵۱۳۶
شماره کتابشناسی ملی:	۱۰۱۷۱۷۸۶
اطلاعات رکورد کتابشناسی:	فیبا

عنوان کتاب: مکانیک خاک - آزمایشگاه جامع و کاربردی

نویسندگان: برآجا ام داس، خالد سبحان

مترجمین: محمدامین محمدابراهیمی، بهروز احمدپور، مسعود عامل سخی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی قم

چاپخانه و صحافی: هوشنگی

نوت چاپ: چاپ یکم، ۱۴۰۴

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۸۷۷۴۰-۷-۷

قیمت: ۴۵۰۰۰۰ ریال

پست الکترونیکی: [press@qut.ac.ir](mailto:press@qut.ac.ir)

پایگاه اینترنتی: [www.qut.ac.ir](http://www.qut.ac.ir)

انتشارات دانشگاه صنعتی قم: قم، جاده قدیم قم - تهران (بلوار خداکرم)، جنب هلال احمر، تلفن: ۰۲۵-۳۶۶۴۱۶۰۱



انتشارات دانشگاه صنعتی قم

## فهرست مطالب

پیشگفتار مولف.....	۱۷
پیشگفتار مترجمین.....	۱۹
<b>فصل ۱ کلیات آزمایش‌ها و تهیه گزارش آزمایشگاهی.....</b>	<b>۲۱</b>
۱-۱ مقدمه.....	۲۱
۲-۱ مروری بر محتوای کتاب.....	۲۱
۳-۱ استفاده صحیح از تجهیزات.....	۲۳
۴-۱ ثبت داده‌ها.....	۲۳
۵-۱ تهیه گزارش.....	۲۳
۶-۱ تهیه نمودارهای مناسب برای گزارش.....	۲۴
۷-۱ واحدها.....	۲۵
۸-۱ مروری بر روابط بین پارامترهای خاک.....	۲۵
<b>فصل ۲ تعیین میزان رطوبت.....</b>	<b>۲۹</b>
۱-۲ استاندارد.....	۲۹
۲-۲ مبانی.....	۲۹
۳-۲ تجهیزات مورد نیاز.....	۳۰
۴-۲ روش انجام.....	۳۰
۵-۲ محاسبات.....	۳۱
۶-۲ نتایج مورد انتظار.....	۳۱
۷-۲ منابع خطا.....	۳۱
۸-۲ ملاحظات کلی.....	۳۲
۹-۲ مثال.....	۳۴
۱۰-۲ گزارش آزمایشگاه.....	۳۴
<b>فصل ۳ چگالی ویژه دانه‌های جامد خاک.....</b>	<b>۳۵</b>
۱-۳ استاندارد آزمایش.....	۳۵
۲-۳ مبانی.....	۳۵
۳-۳ تجهیزات مورد نیاز.....	۳۶
۴-۳ روش انجام.....	۳۶
<b>3-5 محاسبات.....</b>	<b>۳۸</b>

۳۹	۶-۳ نتایج مورد انتظار.....
۴۰	۷-۳ منابع خطا.....
۴۱	۸-۳ ملاحظات کلی.....
۴۱	۹-۳ مثال.....
۴۲	۱۰-۳ گزارش آزمایشگاه.....
۴۳	<b>فصل ۴ حدود اتربرگ (حد روانی، خمیری و انقباض)</b> .....
۴۳	۱-۴ استاندارد.....
۴۳	۲-۴ مبانی.....
۴۴	۳-۴ تجهیزات مورد نیاز.....
۴۴	۱-۳-۴ آزمایش حد روانی (روش کاساگرانده).....
۴۵	۲-۳-۴ آزمایش حد روانی (روش سقوط مخروط).....
۴۶	۳-۳-۴ آزمایش حد خمیری.....
۴۷	۴-۴ روش انجام.....
۴۷	۱-۴-۴ آزمایش حد روانی (روش کاساگرانده).....
۴۹	۲-۴-۴ آزمایش حد روانی (روش سقوط مخروط).....
۵۰	۳-۴-۴ آزمایش حد خمیری.....
۵۱	۴-۴-۴ آزمایش حد انقباض.....
۵۳	۵-۴ محاسبات.....
۵۳	۱-۵-۴ آزمایش حد روانی.....
۵۳	۲-۵-۴ آزمایش حد خمیری.....
۵۳	۶-۴ نتایج مورد انتظار.....
۵۳	۷-۴ منابع خطا.....
۵۳	۸-۴ ملاحظات کلی.....
۵۴	۹-۴ مثال.....
۵۴	۱-۹-۴ آزمایش حد روانی (روش کاساگرانده).....
۵۵	۲-۹-۴ آزمایش حد روانی (روش سقوط مخروط).....
۵۶	۳-۹-۴ آزمایش حد خمیری.....
۵۷	<b>فصل ۵ دانه‌بندی خاک</b> .....
۵۷	۱-۵ استاندارد.....
۵۷	۲-۵ مبانی.....

۶۵	..... ۳-۵ تجهیزات مورد نیاز
۶۵	..... ۱-۳-۵ آزمایش دانه بندی با الک
۶۶	..... ۲-۳-۵ آزمایش هیدرومتری
۶۶	..... ۴-۵ روش انجام
۶۶	..... ۱-۴-۵ آزمایش دانه بندی با الک
۶۹	..... ۲-۴-۵ آزمایش هیدرومتری
۷۱	..... ۵-۵ محاسبات
۷۱	..... ۱-۵-۵ آزمایش دانه بندی با الک
۷۲	..... ۲-۵-۵ آزمایش هیدرومتری
۷۲	..... ۶-۵ نتایج مورد انتظار
۷۳	..... ۷-۵ منابع خطا
۷۳	..... ۸-۵ ملاحظات کلی
۷۵	..... ۹-۵ مثال
۷۵	..... ۱-۹-۵ آزمایش دانه بندی با الک
۷۶	..... ۲-۹-۵ آزمایش هیدرومتری
۷۹	..... <b>فصل ۶ طبقه بندی مهندسی خاک</b>
۷۹	..... ۱-۶ استاندارد
۷۹	..... ۲-۶ مبانی
۷۹	..... ۳-۶ سیستم طبقه بندی AASHTO
۸۰	..... ۴-۶ روش گام به گام برای طبقه بندی AASHTO
۸۰	..... ۱-۴-۶ تعیین گروه ها یا زیر گروه ها
۸۰	..... ۲-۴-۶ تعیین شاخص گروه
۸۱	..... ۳-۴-۶ طبقه بندی خاک
۸۲	..... ۵-۶ مثال
۸۲	..... ۱-۵-۶ مثال ۱
۸۳	..... ۶-۶ سیستم طبقه بندی متحد خاک (USCS)
۸۴	..... ۷-۶ روش گام به گام برای روش USCS
۸۷	..... ۸-۶ نام گروه خاک ها بر اساس سیستم USCS
۸۸	..... ۹-۶ مثال
۸۸	..... ۱-۹-۶ مثال ۲

فصل ۷ آزمایش تراکم پروکتور استاندارد ..... ۹۵

۱-۷ استاندارد ..... ۹۵

۲-۷ مبانی ..... ۹۵

۳-۷ تجهیزات مورد نیاز ..... ۹۷

۴-۷ روش انجام ..... ۹۸

۵-۷ محاسبات ..... ۱۰۰

۱-۵-۷ وزن مخصوص خشک و رطوبت در هنگام تراکم ..... ۱۰۰

۲-۵-۷ وزن مخصوص در هوای حفره‌ای صفر ..... ۱۰۰

۶-۷ نتایج مورد انتظار ..... ۱۰۱

۷-۷ منابع خطا ..... ۱۰۱

۸-۷ ملاحظات کلی ..... ۱۰۱

۱-۸-۷ واحدها ..... ۱۰۱

۲-۸-۷ تراکم نسبی ..... ۱۰۲

۳-۸-۷ خلاصه مشخصات آزمایش پروکتور ..... ۱۰۲

۴-۸-۷ روابط تجربی برای میزان رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر ..... ۱۰۳

۵-۸-۷ آزمایش پروکتور اصلاح شده ..... ۱۰۵

۹-۷ مثال ..... ۱۰۷

فصل ۸ تعیین وزن مخصوص در محل به روش مخروط ماسه ..... ۱۰۹

۱-۸ استاندارد آزمایش ..... ۱۰۹

۲-۸ مبانی ..... ۱۰۹

۳-۸ تجهیزات مورد نیاز ..... ۱۱۰

۴-۸ روش انجام - بخش آزمایشگاهی ..... ۱۱۰

۱-۴-۸ تعیین وزن مخصوص خشک ماسه اتاوا ۲۰-۳۰ ..... ۱۱۰

۲-۴-۸ کالیبره کردن مخروط ..... ۱۱۱

۳-۴-۸ آماده‌سازی برای بخش میدانی ..... ۱۱۱

۵-۸ روش انجام - بخش میدانی ..... ۱۱۲

۶-۸ محاسبات ..... ۱۱۳

۷-۸ نتایج مورد انتظار ..... ۱۱۴

۸-۸ منابع خطا ..... ۱۱۴

۹-۸ ملاحظات کلی ..... ۱۱۴

۱۱۶	.....	مثال ۱۰-۸
۱۱۷	.....	گزارش آزمایشگاه ۱۱-۸
۱۱۹	.....	<b>فصل ۹ چگالی خشک حداقل و حداکثر خاک دانه‌ای (ماسه)</b>
۱۱۹	.....	۱-۹ استاندارد آزمایش
۱۱۹	.....	۲-۹ مبانی
۱۲۰	.....	9-3 تجهیزات مورد نیاز
۱۲۲	.....	۴-۹ تعیین چگالی حداقل $\rho_{d(\min)}$ (ASTM 4254)
۱۲۲	.....	۱-۴-۹ روش انجام
۱۲۲	.....	۵-۹ محاسبات
۱۲۳	.....	۶-۹ مثال
۱۲۴	.....	۷-۹ تعیین چگالی حداقل $\rho_{d(\max)}$ (ASTM 4253)
۱۲۴	.....	۱-۷-۹ روش انجام
۱۲۵	.....	۸-۹ محاسبات
۱۲۶	.....	۹-۹ ملاحظات کلی
۱۲۷	.....	گزارش آزمایشگاه ۱۰-۹
۱۲۹	.....	<b>فصل ۱۰ آزمایش نفوذپذیری</b>
۱۲۹	.....	۱-۱۰ مقدمه
۱۲۹	.....	۲-۱۰ مبانی
۱۳۰	.....	۱-۲-۱۰ دستگاه نفوذپذیری با هد ثابت
۱۳۰	.....	۲-۲-۱۰ دستگاه نفوذپذیری با هد افتان
۱۳۰	.....	۳-۱۰ تجهیزات مورد نیاز
۱۳۰	.....	۱-۳-۱۰ هد ثابت
۱۳۱	.....	۱-۳-۱۰ هد افتان
۱۳۳	.....	۴-۱۰ روش انجام
۱۳۳	.....	۱-۴-۱۰ هد ثابت
۱۳۵	.....	۲-۴-۱۰ هد افتان
۱۳۵	.....	۵-۱۰ محاسبات
۱۳۵	.....	۱-۵-۱۰ هد ثابت
۱۳۷	.....	۲-۵-۱۰ هد افتان
۱۳۸	.....	۶-۱۰ نتایج مورد انتظار

۱۳۸	۷-۱۰ منابع خطا
۱۳۸	۸-۱۰ ملاحظات کلی
۱۴۱	۹-۱۰ مثال
۱۴۱	۱-۹-۱۰ هد ثابت
۱۴۲	۲-۹-۱۰ هد افتان
۱۴۵	<b>فصل ۱۱ آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه</b>
۱۴۵	۱-۱۱ استاندارد
۱۴۵	۲-۱۱ مبانی
۱۴۶	۳-۱۱ تجهیزات مورد نیاز
۱۴۶	۴-۱۱ روش انجام
۱۵۰	۵-۱۱ محاسبات
۱۵۲	۶-۱۱ نتایج مورد انتظار
۱۵۲	۷-۱۱ منابع خطا
۱۵۲	۸-۱۱ ملاحظات کلی
۱۵۵	11-9 مثال
۱۵۷	<b>فصل ۱۲ آزمایش تک محوری</b>
۱۵۷	۱-۱۲ استاندارد
۱۵۷	۲-۱۲ مبانی
۱۶۱	۳-۱۲ تجهیزات مورد نیاز
۱۶۱	۴-۱۲ روش انجام
۱۶۲	۵-۱۲ محاسبات
۱۶۴	۶-۱۲ نتایج مورد انتظار
۱۶۴	۷-۱۲ منابع خطا
۱۶۴	۸-۱۲ ملاحظات کلی
۱۶۸	۹-۱۲ مثال
۱۶۹	<b>فصل ۱۳ آزمایش تحکیم</b>
۱۶۹	۱-۱۳ استاندارد آزمایش
۱۶۹	۲-۱۳ مبانی
۱۶۹	۳-۱۳ تجهیزات مورد نیاز
۱۷۰	۴-۱۳ دستگاه آزمایش تحکیم

۱۷۱	..... ۵-۱۳ روش انجام
۱۷۴	..... ۶-۱۳ محاسبات و نمودارها
۱۸۰	..... ۷-۱۳ مثال
۱۸۲	..... ۸-۱۳ ملاحظات کلی
۱۸۴	..... ۹-۱۳ گزارش آزمایشگاه
۱۸۷	..... <b>فصل ۱۴ آزمایش سه محوری</b>
۱۸۷	..... ۱-۱۴ استاندارد آزمایش
۱۸۷	..... ۲-۱۴ آزمایش سه محوری تحکیم‌یافته زهکشی نشده
۱۸۷	..... ۱-۲-۱۴ مبانی
۱۸۸	..... ۲-۲-۱۴ تجهیزات مورد نیاز
۱۸۹	..... ۳-۲-۱۴ تنظیمات آزمایش سه‌محوری
۱۹۰	..... ۴-۲-۱۴ نمونه سه‌محوری
۱۹۱	..... ۵-۲-۱۴ قرار دادن نمونه در سلول سه محوری
۱۹۲	..... ۶-۲-۱۴ روش انجام
۱۹۳	..... ۷-۲-۱۴ محاسبات
۱۹۴	..... ۸-۲-۱۴ نمودارها
۱۹۵	..... ۹-۲-۱۴ مثال
۱۹۷	..... ۱۰-۲-۱۴ ملاحظات کلی
۱۹۸	..... ۱۱-۲-۱۴ گزارش آزمایشگاه
۱۹۸	..... ۳-۱۴ آزمایش سه محوری تحکیم‌یافته زهکشی نشده روی خاک چسبنده
۱۹۸	..... ۱-۳-۱۴ مبانی
۱۹۹	..... ۲-۳-۱۴ تجهیزات مورد نیاز
۱۹۹	..... ۳-۳-۱۴ تنظیم آزمایش سه‌محوری و آماده‌سازی و قرار دادن نمونه
۱۹۹	..... ۴-۳-۱۴ روش انجام
۲۰۰	..... ۵-۳-۱۴ محاسبات و نمودارها
۲۰۳	..... ۶-۳-۱۴ ملاحظات کلی
۲۰۴	..... ۷-۳-۱۴ مثال
۲۰۷	..... ۸-۳-۱۴ گزارش آزمایشگاه
۲۰۷	..... ۴-۱۴ آزمایش سه محوری تحکیم‌یافته زهکشی‌شده روی ماسه‌ها
۲۰۷	..... ۱-۴-۱۴ مبانی

۲۰۸	تجهیزات مورد نیاز	۲-۴-۱۴
۲۰۸	تنظیمات آزمایش سه محوری و آماده سازی و قرار دادن نمونه	۳-۴-۱۴
۲۰۸	آماده سازی نمونه	۴-۴-۱۴
۲۱۰	اشباع کردن نمونه	۵-۴-۱۴
۲۱۱	روش انجام	۶-۴-۱۴
۲۱۳	محاسبات	۷-۴-۱۴
۲۱۴	نمودارها	۸-۴-۱۴
۲۱۵	ملاحظات کلی	۹-۴-۱۴
۲۱۶	گزارش آزمایشگاه	۱۰-۴-۱۴
۲۱۷	مثال	۱۱-۴-۱۴
۲۲۱	<b>فصل ۱۵ آزمایش مدول برجهنگی برای خاک های چسبنده و دانه ای</b>	
۲۲۱	استاندارد	۱-۱۵
۲۲۱	مبانی	۲-۱۵
۲۲۳	تجهیزات مورد نیاز	۳-۱۵
۲۲۳	روش انجام	۴-۱۵
۲۲۳	تعیین مدول برجهنگی برای بستر رسی	۱-۴-۱۵
۲۲۷	تعیین مدول برجهنگی برای بستر دانه ای	۲-۴-۱۵
۲۲۹	محاسبات	۵-۱۵
۲۲۹	بستر رسی	۱-۵-۱۵
۲۳۱	بستر دانه ای	۲-۵-۱۵
۲۳۲	نتایج مورد انتظار	۶-۱۵
۲۳۳	منابع خطا	۷-۱۵
۲۳۳	ملاحظات کلی	۸-۱۵
۲۳۴	مثال	۹-۱۵
۲۳۴	روی بستر رسی	۱-۹-۱۵
۲۳۵	روی بستر دانه ای	۲-۹-۱۵
۲۳۷	<b>فصل ۱۶ نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برای خاک های متراکم شده در آزمایشگاه</b>	
۲۳۷	استاندارد	۱-۱۶
۲۳۷	مبانی	۲-۱۶
۲۳۸	تجهیزات مورد نیاز	۳-۱۶

۲۳۹	۴-۱۶ روش انجام
۲۳۹	۱-۴-۱۶ آماده‌سازی و تنظیم نمونه
۲۴۰	۲-۴-۱۶ مراحل کلی آماده‌سازی نمونه
۲۴۱	۳-۴-۱۶ آزمایش نفوذ (Penetration Test)
۲۴۳	۵-۱۶ محاسبات
۲۴۵	۶-۱۶ نتایج مورد انتظار
۲۴۶	۷-۱۶ منابع خطا
۲۴۶	۸-۱۶ ملاحظات کلی
۲۴۷	۹-۱۶ مثال
۲۴۹	<b>فصل ۱۷ آزمایش ارزش ماسه‌ای (هم‌ارز ماسه)</b>
۲۴۹	۱-۱۷ استاندارد
۲۴۹	۲-۱۷ مبانی
۲۴۹	۳-۱۷ تجهیزات مورد نیاز
۲۵۰	۴-۱۷ روش انجام
۲۵۱	۵-۱۷ محاسبات
۲۵۱	۶-۱۷ نتایج مورد انتظار
۲۵۱	۷-۱۷ منابع خطا
۲۵۱	۸-۱۷ ملاحظات کلی
۲۵۲	۹-۱۷ مثال
۲۵۳	<b>فصل ۱۸ آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)</b>
۲۵۳	۱-۱۸ استاندارد
۲۵۳	۲-۱۸ مبانی
۲۵۳	۳-۱۸ تجهیزات مورد نیاز
۲۵۴	۴-۱۸ روش انجام
۲۵۴	۵-۱۸ محاسبات
۲۵۶	۶-۱۸ نتایج مورد انتظار
۲۵۶	۷-۱۸ منابع خطا
۲۵۶	۸-۱۸ ملاحظات کلی
۲۵۷	۹-۱۸ مثال
۲۵۸	۱۰-۱۸ هم‌بستگی‌های آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

۲۶۵	فصل ۱۹ آزمایش بارگذاری صفحه (PLT).....
۲۶۵	۱-۱۹ استاندارد.....
۲۶۵	۲-۱۹ مبانی.....
۲۶۶	۳-۱۹ تجهیزات مورد نیاز.....
۲۶۶	۴-۱۹ روش انجام.....
۲۶۸	۵-۱۹ محاسبات.....
۲۶۸	۶-۱۹ نتایج مورد انتظار.....
۲۶۹	۷-۱۹ منابع خطا.....
۲۷۰	۸-۱۹ ملاحظات کلی.....
۲۷۰	۹-۱۹ مثال.....
۲۷۳	فصل ۲۰ آزمایش دانسیته در محل.....
۲۷۳	۱-۲۰ استاندارد.....
۲۷۳	۲-۲۰ مبانی.....
۲۷۴	۳-۲۰ تجهیزات مورد نیاز.....
۲۷۴	۱-۳-۲۰ روش مخروط ماسه (Sand Cone Method).....
۲۷۵	۲-۳-۲۰ روش بالن لاستیکی (Rubber Balloon Method).....
۲۷۵	۳-۳-۲۰ روش هسته‌ای (Nuclear Density Method).....
۲۷۵	۴-۲۰ روش انجام.....
۲۷۶	۵-۲۰ محاسبات.....
۲۷۷	۶-۲۰ نتایج مورد انتظار.....
۲۷۷	۷-۲۰ منابع خطا.....
۲۷۸	۸-۲۰ ملاحظات کلی.....
۲۷۸	۹-۲۰ مثال.....
۲۸۱	فصل ۲۱ آزمایش برش پره.....
۲۸۱	۱-۲۱ استاندارد.....
۲۸۱	۲-۲۱ مبانی.....
۲۸۳	۳-۲۱ تجهیزات مورد نیاز.....
۲۸۶	۴-۲۱ روش انجام.....
۲۸۸	۵-۲۱ محاسبات.....
۲۸۹	۶-۲۱ نتایج مورد انتظار.....

۲۸۹	۷-۲۱ منابع خطا.....
۲۸۹	۸-۲۱ ملاحظات کلی.....
۲۸۹	۹-۲۱ مثال.....
۲۹۳	<b>فصل ۲۲ آزمایش نفوذ مخروط (CPT).....</b>
۲۹۳	.....
۲۹۳	۱-۲۲ استاندارد.....
۲۹۳	۲-۲۲ مبانی.....
۲۹۴	۱-۲-۲۲ محدودیت‌های آزمایش.....
۲۹۴	۳-۲۲ تجهیزات مورد نیاز.....
۲۹۵	۴-۲۲ روش انجام.....
۲۹۵	۱-۴-۲۲ نفوذسنج مخروطی.....
۲۹۵	۲-۴-۲۲ نفوذسنج مخروطی - اصطکاکی.....
۲۹۵	۳-۴-۲۲ نفوذسنج الکتریکی.....
۲۹۶	۴-۴-۲۲ تفاوت آزمایش‌های نفوذ مخروط دینامیکی و استاتیکی.....
۲۹۸	۵-۲۲ محاسبات.....
۲۹۸	۶-۲۲ نتایج مورد انتظار.....
۲۹۹	۷-۲۲ منابع خطا.....
۲۹۹	۸-۲۲ ملاحظات کلی.....
۳۰۲	۹-۲۲ مثال.....
۳۰۳	۱۰-۲۲ هم‌بستگی‌های آزمایش نفوذ مخروط (CPT).....
۳۰۸	پیوست: جدول‌های ثبت داده‌های آزمایشگاهی.....
۳۴۱	فهرست مراجع.....



## پیشگفتار مولف

از اوایل دهه ۱۹۴۰، مطالعه مکانیک خاک در سراسر جهان پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته است. به طور کلی یک دوره در مکانیک خاک برای دانشجویان کارشناسی در برنامه‌های چهار ساله مهندسی عمران الزامی است. این دوره شامل درس‌های کلاسی همراه با یک بخش آزمایشگاهی است. هدف از بخش آزمایشگاهی آشنا ساختن دانشجویان با ویژگی‌های خاک‌ها و رفتار آن‌ها تحت تنش از طریق آزمایش‌های عملی است. تجربه عملی قوی در آزمایشگاه مکانیک خاک، همراه با نظارت شخصی و پرشور استاد، برای این که دانشجویان اهمیت این حوزه از مهندسی عمران را درک کنند، ضروری است. این کتاب از طریق تجربیات شخصی نویسندگان که هم شامل تدریس کلاسی دوره‌ها و هم ارائه بخش‌های آزمایشگاهی در طول سال‌ها بوده، تدوین شده است. این کتاب که به عنوان مکمل کتاب درسی مکانیک خاک برای جلسات ارائه این درس در کلاس و یا آزمایشگاه مکانیک خاک قابل استفاده است.

در ایالات متحده و همچنین در بسیاری از کشورهای دیگر در سراسر جهان، استانداردهای تعیین‌شده برای آزمون‌های آزمایشگاهی توسط انجمن آزمایش و مصالح آمریکا (ASTM) به عنوان راهنما استفاده می‌شود. روند آزمایش‌ها در این کتاب با برخی تغییرات جزئی نزدیک به روند ارائه شده توسط ASTM می‌باشد. آزمایش حد روانی - روش سقوط مخروط (فصل ۴) و آزمایش نفوذپذیری با هد افتان در ماسه (فصل ۱۰) استانداردهای ASTM ندارند. «آزمایش مدول برجهندگی در خاک‌های چسبنده و دانه‌ای» که در فصل ۱۵ شرح داده شده است، بر اساس دستورالعمل‌های AASHTO است. رویه‌ها و تجهیزات شرح داده‌شده در کتاب تقریباً متداول هستند. برای برخی آزمایش‌ها، مانند نفوذپذیری، برش مستقیم و تک محوری، تجهیزات موجود در یک آزمایشگاه خاص ممکن است کمی متفاوت باشد. در این موارد استاد باید دانشجویان را با نحوه عملکرد تجهیزات آشنا کند. تجهیزات آزمایش سه‌محوری پرهزینه است و تنوع زیادی دارد. به همین دلیل تنها دستورالعمل‌های کلی برای آزمایش‌های سه‌محوری ارائه شده است. دانشجویان در یک دوره مقدماتی مکانیک خاک بسته به نوع سیستم آموزشی حدود ۱۰ تا ۱۴ جلسه آزمایشگاهی دارند. مدت زمان هر جلسه ۳ ساعت است. با توجه به این نکات و همچنین مفروضات اولیه‌ای که این کتاب بر اساس آن‌ها توسعه یافته است، چندین آزمایش آزمایشگاهی دیگر که ممکن است برای کار تحصیلات تکمیلی و یا تحقیق مفید باشند، گنجانده نشده‌اند.

هر رویه آزمایشگاهی موجود در این کتاب شامل نمونه محاسبات و نمودار است. جداول اضافی برای هر آزمایش برای استفاده کاربران در آزمایشگاه فراهم شده است. کتاب اولیه در تابستان ۱۹۸۱ منتشر شد و حق نشر آن در ۱۹۸۲ توسط Engineering Press ثبت گردید. در این ویرایش که ویرایش دهم کتاب است، خالد سبحان از دانشگاه فلوریدای آتلانتیک به عنوان نویسنده کمکی اضافه شده است.

براجا ام داس

Henderson, Nevada

خالد سبحان

Boca Raton, Florida



## پیشگفتار مترجمین

شناسایی خاک‌ها برای پروژه‌های عمرانی اهمیت بسیار زیادی دارد و پایه بخش مطالعات محسوب می‌شود. بدون داشتن اطلاعات ژئوتکنیکی منطقه، بهترین طراحی‌ها نیز می‌توانند دچار مشکل شوند. برداشتن قدم‌های صحیح مستلزم داشتن اطلاعات کافی است و در پروژه‌های عمرانی نیز همین امر صادق است. کتاب‌های متعددی در زمینه آزمایش‌های ژئوتکنیکی وجود دارد. آن‌چه که مترجمین و تدوین‌کنندگان این اثر را بر آن داشت که کتابی دیگر بر این مجموعه اضافه کنند وجود کتاب ارزشمند پراجا ام داس در زمینه آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک بوده است. ایشان در زمینه ژئوتکنیک در دنیا و ایران فرد بسیار شناخته شده‌ای هستند که همواره کتاب‌های ایشان مورد استقبال بوده است. همان‌طور که انتظار می‌رود کتاب آزمایش‌های آزمایشگاهی ایشان به ویژه در ویرایش جدید نیز کتابی بسیار درخور توجه است. از سوی دیگر تدوین‌کنندگان این اثر برای غنای بیشتر این کتاب، علاوه بر ترجمه این اثر ارزشمند، مثال‌هایی حل شده را نیز به کتاب افزودند. همچنین همان‌طور که اشاره گردید کتاب انگلیسی مذکور صرفاً به آزمایش‌های آزمایشگاهی پرداخته است که در ترجمه این اثر به افزودن چندین آزمایش صحرایی متداول و مهم که در ایران بیشتر مورد توجه است پرداخته شده است تا برای متخصصین ایرانی دارای کاربرد بیش‌تری باشد. از آن‌جا که هر اثر علمی دارای معایب و اشکال‌هایی می‌باشد، مترجمین و تدوین‌کنندگان این کتاب پذیرای نقدهای متخصصین محترم جهت ارتقای این اثر در چاپ‌های بعدی می‌باشند. امید است کتاب حاضر مورد توجه شرکت‌های مهندسی مشاور، شرکت‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک و نیز دانشگاه‌ها و موسسات آموزشی و پژوهشی قرار گیرد. در انتها بر خود لازم می‌دانیم از زحمات مسئولین محترم انتشارات دانشگاه صنعتی قم که امکان چاپ این اثر را فراهم نمودند کمال سپاس و تشکر را داشته باشیم. همچنین از جناب آقای مهندس مسعود فری‌پور که برخی از اطلاعات مورد نیاز در خصوص خروجی آزمایش برش پره در عمل را در اختیار قرار دادند سپاس‌گزاری می‌نماییم.

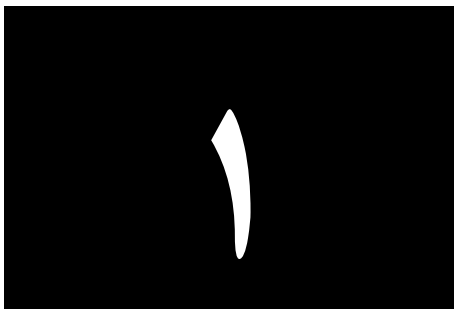
محمدامین محمدابراهیمی

بهروز احمدپور

مسعود عامل‌سخی

بهار ۱۴۰۴





# کلیات آزمایش‌ها و تهیه گزارش آزمایشگاهی

## ۱-۱ مقدمه

خاک به عنوان یک مصالح طبیعی در حالت دست نخورده یا به صورت متراکم وجود دارد. مهندسی ژئوتکنیک دانش درک و پیش‌بینی رفتار خاک است. مانند سایر مصالح ساختمانی، خاک دارای خواص مکانیکی مربوط به مقاومت، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری و ... است. انجام صحیح آزمایش‌های خاک‌ها برای تعیین ویژگی‌ها و مشخصات آن‌ها، بخش جدایی‌ناپذیری از طراحی و ساخت پی‌ها، بهسازی خاک‌ها و کنترل کیفیت عملیات تراکم خاک است. باید به این نکته توجه داشت که خاک‌ها در حالت طبیعی اغلب درجه بالایی از عدم یکنواختی را نشان می‌دهند. خواص فیزیکی یک خاک می‌تواند تا حد زیادی حتی در چند صد متر فاصله نسبت به هم تغییر کند. معادلات بنیادی نظری و تجربی که در مکانیک خاک توسعه می‌یابند، تنها زمانی به درستی در عمل استفاده خواهند شد که پارامترهای فیزیکی استفاده‌شده در این معادلات به‌درستی در آزمایشگاه ارزیابی شوند. کمی کردن این ویژگی‌ها مهم است. کمی کردن مشخصات مکانیکی خاک در آزمایشگاه با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی استاندارد انجام می‌شود. بنابراین یادگیری نحوه انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی خاک‌ها نقش مهمی در حرفه مهندسی ژئوتکنیک دارد.

## ۲-۱ مروری بر محتوای کتاب

هدف اصلی این کتاب آشنایی با آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی پرکاربرد در ژئوتکنیک و معرفی روش‌های انجام آزمون‌ها، استانداردهای مربوطه و اصطلاحات آن به همراه مثال‌هایی از نحوه انجام محاسبات مربوط به نتایج می‌باشد. فرآیند تمام آزمایش‌های شرح‌داده‌شده در این کتاب مطابق با انجمن آزمایش‌ها و مصالح آمریکا (ASTM) بوده و برای هر آزمون استاندارد ملی ایران نیز اشاره شده است. آشنایی با این استانداردها برای درک، تفسیر و به کارگیری صحیح نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با استفاده از روش استاندارد بسیار مهم است. شماره استاندارد هر آزمونی که در این کتاب توضیح داده شده، در جدول ۱-۱ به طور خلاصه آمده است.



جدول ۱-۱. عناوین آزمایش‌های کتاب

فصل	نام آزمایش	استاندارد ASTM	استاندارد AASHTO	استاندارد ایران ISIRI
۲	تعیین میزان رطوبت	D2216	T265	7883
۳	چگالی ویژه دانه‌های جامد خاک	D854	T100	1686
۴	حدود اتربرگ	D4318	T89-90	11708-12
۵	دانه‌بندی خاک	D422 D1140		4977
۶	طبقه‌بندی مهندسی خاک	D-3282		7827
۷	آزمایش تراکم پروکتور استاندارد	D698	T99	668
۸	تعیین وزن مخصوص در محل به روش مخروط ماسه	D1556	T191	1636
۹	چگالی خشک حداقل و حداکثر خاک دانه‌ای (ماسه)	D4253 D4254	T238 T239	
۱۰	آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت و هد افتان در ماسه	D2434	T215	11708-11
۱۱	آزمایش برش مستقیم روی ماسه	D3080	T236	11708-10
۱۲	آزمایش تک محوری	D2166	T208	11708-7
۱۳	آزمایش تحکیم	D2435	T216	6932
۱۴	آزمایش سه محوری	D2850 D4767 D7181	T296 T297 T298	11708-8 11708-9 8448
۱۵	آزمایش مدول برجهندگی برای خاک‌های چسبنده و دانه‌ای		T307-99	
۱۶	نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برای خاک‌های متراکم شده در آزمایشگاه	D1883	T193	1159
۱۷	آزمایش ارزش ماسه‌ای (هم‌ارز ماسه)	D2419	T176	1685
۱۸	آزمایش نفوذ استاندارد	D1586	T206	8446
۱۹	آزمایش بارگذاری صفحه	D1194	T222	18653
۲۰	وزن مخصوص در محل	D1556 D2167 D6938	T191	1636
۲۱	آزمایش برش پره	D2573 D4648	T223	20355
۲۲	آزمایش نفوذ مخروط	D3441		12305-12

هر فصل در این کتاب به یک آزمایش را می‌پردازد. فصل‌های ۲ تا ۱۷ به آزمون‌های آزمایشگاهی و فصل‌های ۱۸ تا ۲۲ به آزمون‌های

صحرائی متداول اختصاص دارد. هر فصل به طور کلی شامل بخش‌های زیر است:

بخش ۱ - معرفی استانداردهای مربوطه



بخش ۲ - مبانی و هدف آزمایش

بخش ۳ - تجهیزات و مصالح

بخش ۴ - روش انجام

بخش ۵ - محاسبات

بخش ۶ - نتایج مورد انتظار

بخش ۷ - منابع احتمالی خطا

بخش ۸ - ملاحظات کلی

بخش ۹ - مثال

نمونه برگه‌های ثبت داده آزمایشگاهی در پیوست انتهایی کتاب آمده است که هم برای کارهای اجرایی و هم برای اهداف آموزشی قابل استفاده هستند.

### ۳-۱ استفاده صحیح از تجهیزات

تجهیزات آزمایشگاهی و صحرایی معمولاً گران قیمت هستند همچنین برای دستیابی به نتایج دقیق آزمایش، تجهیزات باید به درستی نگهداری شوند. کالیبراسیون برخی تجهیزات، مانند ترازوها، باید در زمان‌های تعیین شده انجام شود. همواره بایستی از تمیز بودن تمام تجهیزات و دستگاه‌ها قبل و بعد از استفاده اطمینان حاصل گردد. نتایج بهتر زمانی به دست خواهد آمد که تجهیزات مورد استفاده تمیز باشد، بنابراین همیشه تجهیزات به گونه‌ای نگهداری کنید که گویی متعلق به خودتان است.

### ۴-۱ ثبت داده‌ها

در هر آزمایش بهترین کار این است که پس از انجام آزمایش بی‌درنگ تمام داده‌ها را در جدول مناسبی ثبت کنید. اغلب یادداشت‌های سریع بر روی کاغذهای چرک نویس ممکن است بعداً ناخوانا یا حتی گم شوند که این می‌تواند منجر به تکرار آزمایش یا به دست آوردن نتایج نادرست شود.

### ۵-۱ تهیه گزارش

هر گزارش باید شامل موارد زیر باشد:

۱. صفحه عنوان: این صفحه باید شامل عنوان آزمایش، نام و تاریخی که آزمایش در آن انجام شده است، باشد.

۲. پس از صفحه عنوان، موارد زیر باید در متن گزارش گنجانده شود:

الف) هدف آزمایش

ب) تجهیزات مورد استفاده

پ) یک دیاگرام شماتیک از تجهیزات اصلی مورد استفاده

ت) توضیح مختصری از روش و فرآیند آزمایش

۳. نتایج: این بخش باید شامل برگه داده‌ها، محاسبات نمونه و نمودارهای لازم باشد.

۴. نتیجه‌گیری: در بخش نتیجه‌گیری باید در مورد دقت روش آزمایش بحث شود و هرگونه منبع احتمالی خطا نیز ذکر شود.



## ۶-۱ تهیه‌ی نمودارهای مناسب برای گزارش

نمودارها و جداول باید تا حد امکان به صورت واضح و منظم تهیه شوند. همواره واحدها را ذکر کنید. نمودارها باید در اندازه مناسب

تهیه شده و به درستی نام گذاری شوند. یک نمودار قابل قبول باید تمام معیارهای زیر را برآورده کند:

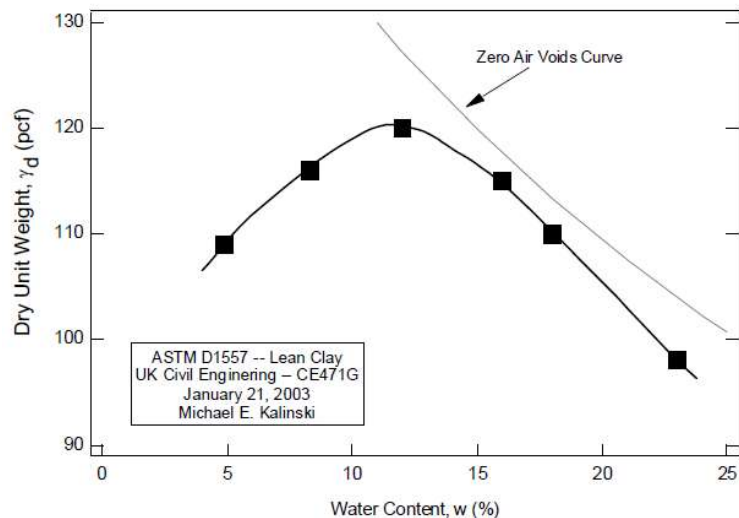
- عنوانی که آزمایش انجام شده و داده‌های ارائه شده را توصیف کند
- تاریخ و نام تهیه کننده
- محورهای اصلی با فواصل منطقی
- استفاده از مقیاس مناسب (لگاریتمی یا خطی)
- نام گذاری محورها و ذکر واحدها
- داده‌هایی که بیشتر فضای نمودار را در بر می‌گیرند

نمونه‌ای از نمودارهای قابل قبول و غیرقابل قبول در شکل‌های ۱-۱ و ۲-۱ نشان داده شده است.

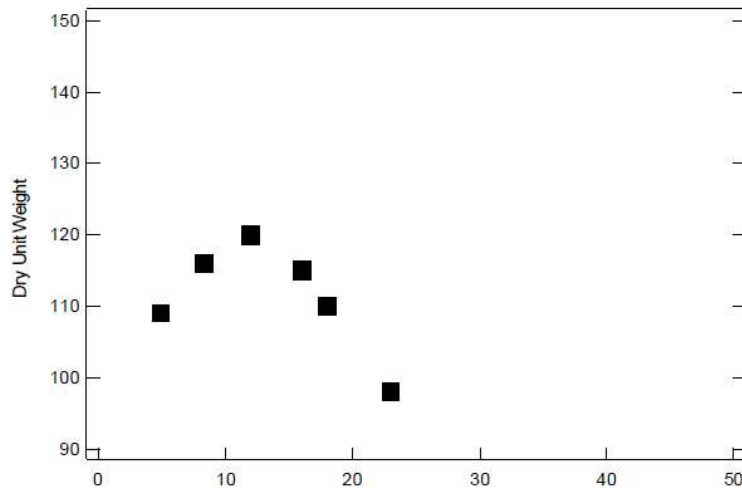
نرم افزارهای تجاری، در صورت استفاده صحیح، ابزار بسیار مفیدی برای نمایش گرافیکی داده‌ها هستند. هنگام استفاده از این

نرم افزارها، در اعمال قابلیت‌های خودکار برازش منحنی دقت کنید. اگر از قابلیت برازش منحنی اتوماتیک استفاده می‌کنید، باید همیشه

برازش منحنی را با روند مورد انتظار مقایسه کنید.



شکل ۱-۱. نمونه‌ای از نمودار قابل قبول



شکل ۲-۱. نمونه‌ای از نمودار غیر قابل قبول (نام‌گذاری محورها ناقص، واحدها ذکر نشده، عنوان نمودار وجود ندارد و داده‌ها فضای نمودار را پر نمی‌کنند)

## ۷-۱ واحدها

در صورتی که نیاز باشد نتایج آزمایش‌ها را در یک سیستم واحد مشخص SI یا انگلیسی بیان کنید ممکن است برای ارائه‌ی گزارش تبدیل واحدها مورد نیاز باشد. برخی از ضرایب تبدیل واحدها از انگلیسی به SI و برعکس در جدول ۲-۱ آمده است.

## ۸-۱ مروری بر روابط بین پارامترهای خاک

در این کتاب برای محاسبه‌ی پارامترهای مختلف ممکن است نیاز به روابط وزنی - حجمی خاک باشد که در این بخش به طور خلاصه به عنوان راهنما گنجانده شده است. در جدول ۳-۱ رابطه‌های وزنی - حجمی پایه و در جدول ۴-۱ روابط بین وزن مخصوص‌ها آمده است.



جدول ۱-۲. ضریب تبدیل واحدها

کمیت	تبدیل واحد سیستم انگلیسی به SI		تبدیل واحد سیستم SI به انگلیسی	
	English	SI	SI	English
طول Length	1 in.	25.4 mm	1 mm	0.03937 in.
	1 ft	0.3048 m	1 m	3.281 ft
مساحت Area	1 in <sup>2</sup>	6.4516 × 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>	1 cm <sup>2</sup>	0.155 in <sup>2</sup>
		6.4516 cm <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1550 in <sup>2</sup>
	1 ft <sup>2</sup>	929 × 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>		10.76 ft <sup>2</sup>
حجم Volume	1 in <sup>3</sup>	16.387 cm <sup>3</sup>	1 cm <sup>3</sup>	0.061 in <sup>3</sup>
	1 ft <sup>3</sup>	0.028317 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	35.315 ft <sup>3</sup>
سرعت Velocity	1 ft/s	304.8 mm/s	1 cm/s	1.969 ft/min
	1 ft/min	0.00508 m/s		1034643.6 ft/year
نیرو - Force	1 lb	4.448 N	1 N	0.22482 lb
تنش Stress	1 lb/in <sup>2</sup>	6.9 kN/m <sup>2</sup>	1 kN/m <sup>2</sup>	0.145 lb/in <sup>2</sup>
	1 lb/ft <sup>2</sup>	47.88 N/m <sup>2</sup>		2.089 × 10 <sup>2</sup> lb/ft <sup>2</sup>
وزن مخصوص Unit Weight	1 lb/ft <sup>3</sup>	157.06 N/m <sup>3</sup>	1 kN/m <sup>3</sup>	6.367 lb/ft <sup>3</sup>
ضریب تحکیم Coefficient of Consolidation	1 in <sup>2</sup> /s	6.452 cm <sup>2</sup> /s	1 cm <sup>2</sup> /s	0.155 in <sup>2</sup> /s
	1 ft <sup>2</sup> /s	929.03 cm <sup>2</sup> /s		2.883 × 10 <sup>3</sup> ft <sup>2</sup> /month
جرم Mass	1 lb	0.4536 kg	1 kg	2.2046 lb
	1 kip	4.448 kN	1 kN	0.2248 kip

جدول ۱-۳. روابط وزنی - حجمی پایه در خاکها

رابطه	پارامتر
$\gamma = \frac{W}{V}$	وزن مخصوص کل
$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$	وزن مخصوص خشک
$\omega = \frac{W_w}{W_s}$	میزان رطوبت
$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$	وزن مخصوص آب
$G_s = \frac{W_s}{\gamma_w V_s}$	چگالی دانه‌های جامد
$e = \frac{V_v}{V_s}$	نسبت تخلخل
$n = \frac{V_v}{V}$	تخلخل
$S = \frac{V_w}{V_v}$	درجه‌ی اشباع

جدول ۱-۴. شکل‌های مختلف روابط  $\gamma$ ،  $\gamma_d$  و  $\gamma_{sat}$ 

وزن مخصوص مرطوب ( $\gamma$ )		وزن مخصوص خشک ( $\gamma_d$ )		وزن مخصوص اشباع ( $\gamma_{sat}$ )	
پارامتر	رابطه	پارامتر	رابطه	پارامتر	رابطه
$w, G_s, e$	$\frac{(1+w)G_s\gamma_w}{1+e}$	$\gamma, w$	$\frac{\gamma}{1+w}$	$G_s, e$	$\frac{(G_s+e)\gamma_w}{1+e}$
$S, G_s, e$	$\frac{(G_s+Se)\gamma_w}{1+e}$	$G_s, e$	$\frac{G_s\gamma_w}{1+e}$	$G_s, n$	$[(1-n)G_s+n]\gamma_w$
$w, G_s, S$	$\frac{(1+w)G_s\gamma_w}{1+\frac{wG_s}{S}}$	$G_s, n$	$G_s\gamma_w(1-n)$	$G_s, w_{sat}$	$\left(\frac{1+w_{sat}}{1+w_{sat}G_s}\right)G_s\gamma_w$
$w, G_s, n$	$G_s\gamma_w(1-n)(1+w)$	$G_s, w, S$	$\frac{G_s\gamma_w}{1+\left(\frac{wG_s}{S}\right)}$	$e, w_{sat}$	$\left(\frac{e}{w_{sat}}\right)\left(\frac{1+w_{sat}}{1+e}\right)\gamma_w$
$S, G_s, n$	$G_s\gamma_w(1-n)+nS\gamma_w$	$e, w, S$	$\frac{eS\gamma_w}{(1+e)w}$	$n, w_{sat}$	$n\left(\frac{1+w_{sat}}{w_{sat}}\right)\gamma_w$
		$\gamma_{sat}, e$	$\gamma_{sat}-\frac{e\gamma_w}{1+e}$	$\gamma_d, e$	$\gamma_d+\left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$
		$\gamma_{sat}, n$	$\gamma_{sat}-n\gamma_w$	$\gamma_d, n$	$\gamma_d+n\gamma_w$
		$\gamma_{sat}, G_s$	$\frac{(\gamma_{sat}-\gamma_w)G_s}{(G_s-1)}$	$\gamma_d, S$	$\left(1-\frac{1}{G_s}\right)\gamma_d+\gamma_w$
				$\gamma_d, w_{sat}$	$\gamma_d(1+w_{sat})$



## تعیین میزان رطوبت

### ۱-۲ استاندارد

ASTM D2216: استاندارد روش آزمایش برای تعیین میزان آب (رطوبت) خاک و سنگ در آزمایشگاه بر اساس جرم  
 AASHTO T255: تعیین آزمایشگاهی میزان رطوبت خاکها  
 ISIRI 7883: خاک - تعیین درصد رطوبت - روش آزمون

### ۲-۲ مبانی

این آزمایش شامل اندازه‌گیری میزان رطوبت (آب) موجود در خاک است، که با اندازه‌گیری وزن آبی که از طریق خشک کردن یک نمونه خاک مرطوب به دست می‌آید انجام می‌شود. اندازه‌گیری میزان رطوبت عمدتاً برای انجام محاسبات وزنی - حجمی در خاک‌ها به کار می‌رود. این آزمایش در مورد خاک‌های رسی به دلیل انبساط و انقباض آن و همچنین داشتن میزان رطوبت بالا و فضای خالی کوچک بین ذرات بسیار مهم است و به عنوان یک معیار برای تعیین ویژگی‌های انقباض-انبساط و مقاومت خاک‌های چسبنده استفاده می‌شود، که در آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری مشخص می‌گردد. در بیش‌تر آزمون‌های آزمایشگاهی در مکانیک خاک نیاز به تعیین میزان رطوبت می‌باشد.

جرم حجم مشخصی از خاک مرطوب برابر با مجموع جرم ذرات جامد خاک ( $M_s$ ) و جرم آب موجود در خاک ( $M_w$ ) است. میزان رطوبت ( $w$ ) معمولاً به صورت درصد و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (1-2)$$



میزان رطوبت معمولاً با دو رقم معنادار بیان می‌شود (مثلاً ۱۲٪، ۲/۹٪ و ...). میزان رطوبت می‌تواند از چند درصد برای ماسه‌های خشک تا بیش از ۱۰۰٪ برای خاک‌های بسیار خمیری متغیر باشد. حتی خاک‌هایی که به‌نظر خشک می‌رسند، مقداری رطوبت دارند.

## ۳-۲ تجهیزات مورد نیاز

۱. نمونه از خاک مرطوب
۲. ترازوی دقیق (شکل ۱-۲). دقت ترازوی مورد استفاده در جدول ۱-۲ (ASTM, 2010) آمده است
۳. گرمخانه که بر روی  $5 \pm 110^\circ\text{C}$  درجه تنظیم شده باشد (شکل ۲-۲). باید از دماهای بالاتر خودداری شود تا از سوختن مواد آلی در خاک جلوگیری شود
۴. سه عدد ظرف رطوبت مقاوم در برابر حرارت. ظروف رطوبت در اندازه‌های مختلف موجود هستند (برای نمونه، قطر ۲ in (۵۰/۸ mm) و ارتفاع ۲/۵ in (۲۲/۲ mm)، قطر ۳/۵ in (۸۸/۹ mm) و ارتفاع ۲ in (۵۰/۵ mm) (شکل ۱-۲) و مازیک دائمی برای علامت‌گذاری روی ظروف



شکل ۲-۲ - گرمخانه



شکل ۱-۲ - ترازو و ظروف رطوبت

جدول ۱-۲. دقت مورد نیاز ترازو براساس پیشینه‌ی اندازه ذرات خاک

دقت ترازو (g)	پیشینه اندازه ذرات خاک
۰/۰۱	۰/۴۲۵
۰/۰۱	۲/۰
۰/۱	۴/۷۵
۰/۱	۹/۵
۱	۱۹/۰
۱۰	۳۷/۵
۱۰	۷۵/۰

## ۴-۲ روش انجام

۱. جرم ظرف رطوبت خالی به همراه درپوش آن ( $M_c$ ) را تعیین کرده و همچنین شماره آن را ثبت نمایید.
۲. نمونه‌ای از خاک مرطوب تهیه شده را در ظرف قرار دهید. درب ظرف را ببندید تا از دست رفتن رطوبت جلوگیری شود.
۳. جرم مجموع ظرف در بسته و خاک مرطوب ( $M_{cws}$ ) را تعیین کنید.