



# آزمایش‌های مکانیک خاک (دستورالعمل گام به گام)

دکتر محمودرضا عبدی

دانشیار دانشکده عمران

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی



شماره ۵۰۱

## شابک: 978-622-6655-75-0

[press.kntu.ac.ir](http://press.kntu.ac.ir)



ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

عنوان: آزمایش‌های مکانیک خاک (دستورالعمل گام به گام)

مؤلف: دکتر محمودرضا عبدی

نوبت چاپ: اول

تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۰

شمارگان: ۲۰۰ جلد

ویرایش: ویراستار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چاپ: دیرین نگار

صحافی: گرنامی

قیمت:

تمام حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی - شماره ۴۷۰ - انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲

میدان ونک - خیابان ولی عصر (عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - شماره ۲۶۲۶ - مرکز پخش و فروش انتشارات

تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: [press@kntu.ac.ir](mailto:press@kntu.ac.ir) - تارنما (فروش برخط): [press.kntu.ac.ir](http://press.kntu.ac.ir)

# فهرست مطالب

## فصل اول آزمایش آزمایشگاهی و گزارش نویسی

- ۱-۱- استفاده از تجهیزات ۱
- ۲-۱- برداشت اطلاعات ۱
- ۳-۱- تدوین گزارش ۲
- ۴-۱- اظهار نظر در خصوص نمودارها و جداول گزارش ۲
- ۵-۱- واحدها ۲
- ۶-۱- روش‌های استاندارد انجام آزمایش ۳

## فصل دوم آزمایش تعیین درصد رطوبت

- ۱-۲- مقدمه ۵
- ۲-۲- وسایل آزمایش ۶
- ۱-۲-۲- ظروف تعیین رطوبت ۶
- ۲-۲-۲- گرمخانه با کنترل دما ۶
- ۳-۲- روش انجام آزمایش ۶
- ۴-۲- محاسبات ۶
- ۵-۲- ملاحظات ۷

## فصل سوم چگالی ویژه

- ۱-۳- مقدمه ۹
- ۲-۳- وسایل آزمایش ۹
- ۳-۳- روش انجام آزمایش ۱۰
- ۴-۳- محاسبات ۱۱
- ۵-۳- ملاحظات ۱۲

## فصل چهارم آزمایش دانه‌بندی

- ۱-۴- مقدمه ۱۳

۱۴	۲-۴- وسایل آزمایش
۱۴	۳-۴- روش انجام آزمایش
۱۵	۴-۴- محاسبات
۱۶	۵-۴- ملاحظات
۱۷	۶-۴- گزارش
۱۹	<b>فصل پنجم آزمایش هیدرومتری</b>
۱۹	۱-۵- مقدمه
۲۳	۲-۵- وسایل آزمایش
۲۵	۳-۵- روش انجام آزمایش
۲۶	۴-۵- محاسبات
۲۷	۵-۵- نمودار
۲۹	<b>فصل ششم آزمایش حد روانی</b>
۲۹	۱-۶- مقدمه
۳۰	۲-۶- وسایل آزمایش
۳۲	۳-۶- نحوه‌ی انجام آزمایش
۳۴	۴-۶- محاسبات
۳۴	۵-۶- نمودار
۳۶	۶-۶- ملاحظات
۳۷	<b>فصل هفتم آزمایش حد خمیری</b>
۳۷	۱-۷- مقدمه
۳۷	۲-۷- وسایل آزمایش
۳۷	۳-۷- نحوه‌ی انجام آزمایش
۳۹	۴-۷- محاسبات
۳۹	۵-۷- ملاحظات
۴۱	<b>فصل هشتم آزمایش حد جمع‌شدگی</b>

۴۱	۸-۱- مقدمه
۴۱	۸-۲- وسایل مورد نیاز
۴۱	۸-۲- وسایل مورد نیاز
۴۲	۸-۳- نحوه‌ی انجام آزمایش
۴۳	۸-۴- محاسبات
۴۴	۸-۵- ملاحظات
۴۵	۸-۶- منابع ایجاد اشتباه
۴۷	<b>فصل نهم آزمایش نفوذپذیری بار ثابت در ماسه</b>
۴۷	۹-۱- مقدمه
۴۹	۹-۲- وسایل مورد نیاز
۴۹	۹-۳- دستگاه سنجش نفوذپذیری
۵۰	۹-۴- نحوه‌ی انجام آزمایش
۵۰	۹-۵- محاسبات
۵۱	۹-۶- ملاحظات
۵۳	<b>فصل دهم آزمایش سنجش نفوذپذیری به روش بار افتان در ماسه</b>
۵۳	۱۰-۱- مقدمه
۵۳	۱۰-۲- وسایل مورد نیاز
۵۳	۱۰-۳- دستگاه سنجش نفوذپذیری بار افتان
۵۳	۱۰-۴- نحوه‌ی انجام آزمایش
۵۴	۱۰-۵- محاسبات
۵۷	<b>فصل یازدهم آزمایش تراکم استاندارد پروکتور</b>
۵۷	۱۱-۱- مقدمه
۶۰	۱۱-۲- وسایل مورد نیاز
۶۱	۱۱-۳- قالب و چکش تراکم پروکتور
۶۱	۱۱-۴- نحوه‌ی انجام آزمایش
۶۲	۱۱-۵- محاسبات
۶۲	۱۱-۶- رسم نمودار تراکم

۶۲	۷-۱۱- منحنی صفر درصد هوا
۶۳	۸-۱۱- ملاحظات
۶۵	<b>فصل دوازدهم آزمایش تراکم اصلاح شده</b>
۶۵	۱-۱۲- مقدمه
۶۵	۲-۱۲- وسایل آزمایش
۶۶	۳-۱۲- نحوه‌ی انجام آزمایش
۶۶	۴-۱۲- محاسبات، نمودار و منحنی صفر درصد هوا
۶۶	۵-۱۲- ملاحظات
۶۹	<b>فصل سیزدهم تعیین دانسیته‌ی صحرائی به روش مخروط ماسه</b>
۶۹	۱-۱۳- مقدمه
۶۹	۲-۱۳- وسایل مورد نیاز
۷۰	۳-۱۳- نحوه‌ی انجام آزمایش
۷۰	۱-۳-۱۳- بخش آزمایشگاهی
۷۱	۲-۳-۱۳- بخش صحرائی
۷۱	۴-۱۳- محاسبات
۷۲	۵-۱۳- ملاحظات
۷۲	۶-۱۳- تراکم سنج اتمی
۷۵	<b>فصل چهاردهم آزمایش برش مستقیم</b>
۷۵	۱-۱۴- مقدمه
۷۷	۲-۱۴- وسایل آزمایش
۷۸	۳-۱۴- روش انجام آزمایش
۸۰	۴-۱۴- محاسبات
۸۰	۵-۱۴- رسم نمودار
۸۳	۶-۱۴- ملاحظات
۸۳	۷-۱۴- گزارش
۸۵	<b>فصل پانزدهم آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده</b>
۸۵	۱-۱۵- مقدمه

۸۶	۱۵-۲- وسایل مورد نیاز
۸۶	۱۵-۳- دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده
۸۷	۱۵-۴- نحوه‌ی آزمایش
۸۸	۱۵-۵- محاسبات
۸۹	۱۵-۶- نمودار
۸۹	۱۵-۷- ملاحظات
۹۳	<b>فصل شانزدهم آزمایش تحکیم</b>
۹۳	۱۶-۱- مقدمه
۹۵	۱۶-۲- وسایل مورد نیاز
۹۶	۱۶-۳- نکاتی در خصوص دستگاه تحکیم
۹۶	۱۶-۴- نحوه‌ی انجام آزمایش
۹۷	۱۶-۵- محاسبات و رسم نمودار
۱۰۴	۱۶-۶- ملاحظات
۱۰۴	۱۶-۷- گزارش
۱۰۷	<b>فصل هفدهم آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی ماسه</b>
۱۰۷	۱۷-۱- مقدمه
۱۰۷	۱۷-۲- اساس آزمایش سه محوری فشاری
۱۰۸	۱۷-۳- انواع آزمایش‌های سه محوری
۱۰۸	۱۷-۳-۱- آزمایش سه محوری تحکیم نیافته-زهکشی نشده
۱۰۸	۱۷-۳-۲- آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده
۱۰۸	۱۷-۳-۳- آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده
۱۰۸	۱۷-۴- مقایسه‌ی آزمایش سه محوری و برش مستقیم
۱۰۹	۱۷-۵- روش انجام آزمایش
۱۱۱	۱۷-۶- محاسبات
۱۱۱	۱۷-۷- گزارش
۱۱۳	<b>فصل هجدهم آزمایش‌های سه محوری روی رس‌ها</b>
۱۱۳	۱۸-۱- مقدمه

۱۱۳	۱۸-۲- وسایل مورد نیاز
۱۱۵	۱۸-۳- نمونه آزمایش سه محوری
۱۱۵	۱۸-۴- استقرار نمونه در محفظه‌ی سه محوری
۱۱۷	۱۸-۵- آزمایش تحکیم نیافته-زهکشی نشده
۱۱۷	۱۸-۶- محاسبات
۱۱۸	۱۸-۷- رسم نمودار
۱۱۸	۱۸-۸- ملاحظات
۱۱۹	۱۸-۹- آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده
۱۲۲	۱۸-۱۰- محاسبات و رسم نمودار
۱۲۶	۱۸-۱۱- ملاحظات
۱۲۷	<b>فصل نوزدهم آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا</b>
۱۲۷	۱۹-۱- اهداف
۱۲۷	۱۹-۲- اصول پایه
۱۲۷	۱۹-۳- وسایل مورد نیاز
۱۲۸	۱۹-۴- آماده‌سازی نمونه
۱۲۸	۱۹-۵- روش آزمایش
۱۲۸	۱۹-۶- اشباع کردن
۱۲۹	۱۹-۷- روش اشباع کردن نمونه
۱۲۹	۱۹-۸- روش بارگذاری
۱۲۹	۱۹-۱-۸- وسایل مورد نیاز
۱۳۰	۱۹-۲-۸- روش انجام آزمایش
۱۳۱	۱۹-۹- محاسبات و رسم نمودار
۱۳۱	۱۹-۱-۹- محاسبه‌ی سی. بی. آر.
۱۳۲	۱۹-۲-۹- محاسبه‌ی دانسیته
۱۳۲	۱۹-۱۰- گزارش
۱۳۵	<b>فصل بیستم آزمایش‌های آزمایشگاهی سنجش واگرایی</b>
۱۳	۲۰-۱- مقدمه

۱۳۵	۲۰-۲- خصوصیات شیمیایی رس‌های واگرا
۱۳۶	۲۰-۳- خصوصیات مکانیکی رس‌های واگرا
۱۳۶	۲۰-۴- منشاء رس‌های واگرا
۱۳۷	۲۰-۵- جوشش و فرسایش درونی
۱۳۷	۲۰-۵-۱- جوشش
۱۳۷	۲۰-۵-۲- فرسایش درونی
۱۳۷	۲۰-۵-۳- سافوژیون
۱۳۷	۲۰-۶- مشکلات مهندسی مرتبط با واگرایی رس‌ها
۱۳۷	۲۰-۶-۱- مقدمه
۱۳۸	۲۰-۶-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی واگرایی
۱۳۸	۲۰-۶-۲-۱- آزمایش کرامب
۱۳۹	۲۰-۶-۲-۲- آزمایش هیدرومتری دوگانه
۱۴۰	۲۰-۶-۲-۳- آزمایش پین هول
۱۴۲	۲۰-۷- آزمایش شیمیایی برای تعیین درصد سدیم
۱۴۳	۲۰-۷-۲- تفسیر نتایج
۱۴۵	<b>فصل بیست و یکم آزمایش رمبندگی</b>
۱۴۵	۲۱-۱- تعریف
۱۴۵	۲۱-۱-۱- شاخص رمبندگی (I <sub>c</sub> )
۱۴۵	۲۱-۱-۲- پتانسیل رمبندگی (I <sub>c</sub> )
۱۴۶	۲۱-۴- خلاصه‌ی روش آزمایش
۱۴۷	۲۱-۵- اهمیت و کاربرد
۱۴۷	۲۱-۶- وسایل
۱۴۸	۲۱-۷- آماده‌سازی نمونه
۱۴۸	۲۱-۸- کالیبراسیون
۱۴۸	۲۱-۹- پارامترهای خاک
۱۴۸	۲۱-۱۰- روش آزمایش
۱۴۹	۲۱-۱۱- گزارش

۱۵۱	<b>فصل بیست و دوم آزمایش نفوذپذیری موئینگی افقی</b>
۱۵۱	۱-۲۲- مقدمه
۱۵۲	۲-۲۲- مراحل انجام آزمایش
۱۵۵	<b>فصل بیست و سوم آزمایش تعیین pH</b>
۱۵۵	۱-۲۳- مقدمه
۱۵۵	۲-۲۳- وسایل مورد نیاز
۱۵۶	۳-۲۳- روش انجام آزمایش
۱۵۶	۱-۳-۲۳- تعیین pH آب
۱۵۶	۲-۳-۲۳- تعیین pH نمونه‌های خاک
۱۵۷	<b>پیوست الف جداول تبدیل واحدها</b>
۱۶۳	<b>پیوست ب جداول طبقه‌بندی مهندسی خاک‌ها</b>
۱۶۳	ب-۱- مقدمه
۱۶۳	ب-۲- سیستم طبقه‌بندی یونیفاید
۱۶۴	ب-۲-۱- روش قدم به قدم برای استفاده از سیستم طبقه‌بندی یونیفاید
۱۷۲	ب-۲- سیستم طبقه‌بندی آشتو
۱۷۲	ب-۲-۱- روش قدم به قدم برای طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس سیستم AASHTO
۱۷۳	ب-۲-۲- ملاحظات
۱۷۷	<b>پیوست ج جداول خصوصیات تقریبی خاک‌ها</b>
۱۷۷	ج-۱- آزمایش‌های خاک
۱۷۷	ج-۲- شاخص خمیری

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: (a) ارائه‌ی نتایج آزمایش تراکم به صورت نامناسب، (b) ارائه‌ی نتایج آزمایش تراکم به صورت مناسب‌تر. ۳
- شکل ۱-۳: وسایل آزمایش تعیین چگالی ( $G_s$ ). ۱۱
- شکل ۱-۴: سری الک‌ها ۱۴
- شکل ۲-۴: منحنی دانه‌بندی برای محاسبات جدول ۳-۴ ۱۸
- شکل ۱-۵: هیدرومتر معلق در محلول آب-خاک ۲۰
- شکل ۲-۵: نمودار قرائت هیدرومتر نسبت به طول مؤثر ۲۱
- شکل ۴-۵: وسایل مورد نیاز آزمایش هیدرومتر. ۲۵
- شکل ۵-۵: مراحل انجام آزمایش هیدرومتری. ۲۷
- شکل ۶-۵: تغییرات  $a$  نسبت به  $G_s$  (معادله ۷-۵). ۲۷
- شکل ۷-۵: تغییرات درصد عبوری نسبت به اندازه‌ی ذرات از نتایج جدول ۴-۵. ۲۸
- شکل ۱-۶: شکل شماتیک تغییر حالت (حدود اثربرگ) خاک رس. ۳۱
- شکل ۲-۶: وسایل مورد نیاز به منظور تعیین حد روانی یک خاک چسبنده. ۳۱
- شکل ۳-۶: شکل شماتیک (a)، دستگاه تعیین حد روانی (b) وسیله‌ی شیار زدن. ۳۲
- شکل ۴-۶: شکل شماتیک خمیر در فنجان برنجی در (a) شروع آزمایش و (b) پایان آزمایش. ۳۳
- شکل ۵-۶: نمودار تغییرات  $w$  نسبت به  $N$ . ۳۵
- شکل ۱-۷: وسایل و نحوه‌ی انجام آزمایش حد خمیری. ۳۸
- شکل ۱-۸: تعریف حد انقباض. ۴۱
- شکل ۲-۸: وسایل آزمایش حد انقباض. ۴۲

- شکل ۸-۳: نمونه‌ی غوطه‌ور در جیوه. ۴۳
- شکل ۹-۱: دستگاه سنجش نفوذپذیری. ۴۹
- شکل ۹-۲: نمودار  $\frac{\eta_T}{\eta_{20}} \frac{^\circ C}{^\circ C}$  نسبت به دمای آب. ۵۲
- شکل ۱۰-۱: شکل شماتیک دستگاه سنجش نفوذپذیری به روش بار افتان. ۵۴
- شکل ۱۱-۱: وسایل مورد نیاز آزمایش تراکم. ۶۱
- شکل ۱۱-۲: (a) شکل قالب تراکم پروکتور و (b) چکش استاندارد پروکتور به صورت شماتیک. ۶۱
- شکل ۱۱-۳: نمودار تراکم. ۶۳
- شکل ۱۲-۱: قالب‌ها و چکش‌های مورد استفاده برای آزمایش‌های تراکم استاندارد و اصلاح شده. ۶۵
- شکل ۱۲-۲: نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده انجام شده بر روی نمونه‌ی خاکی. ۶۶
- شکل ۱۳-۱: وسایل مورد نیاز تعیین دانستیه‌ی صحرائی. ۷۰
- شکل ۱۳-۲: تراکم سنج اتمی. ۷۴
- شکل ۱۴-۱: محدوده‌ی تغییرات  $\phi$  ماسه نسبت به  $D_r$ . ۷۶
- شکل ۱۴-۲: دستگاه برش مستقیم. ۷۸
- شکل ۱۴-۳: جعبه‌ی برش به صورت شماتیک. ۷۸
- شکل ۱۴-۴: نمودار تغییرات  $\tau$  و  $\sigma$  به جایی قائم نسبت به جایی افقی. ۸۲
- شکل ۱۴-۵: نمودار  $\tau$  نسبت به  $\sigma_n$ . ۸۲
- شکل ۱۵-۱: آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده. ۸۶
- شکل ۱۵-۲: دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده. ۸۷
- شکل ۱۵-۳: یک نمونه پس از گسیختگی. ۸۸
- شکل ۱۶-۱: مدل تحکیم یک بعدی. ۹۴
- شکل ۱۶-۲: دستگاه ادمتر (تحکیم یک بعدی). ۹۶
- شکل ۱۶-۳: نمودار تغییر ضخامت ( $\delta_n$ ) نسبت به زمان (t) در روش جذر زمان. ۱۰۱

- شکل ۱۶-۴: نمودار تغییر ضخامت ( $\delta_{H1}$ ) نسبت به زمان (t) در روش لگاریتم زمان. ۱۰۱
- شکل ۱۶-۵: تغییرات نسبت تخلخل (ارتفاع نمونه) نسبت به فشار. ۱۰۴
- شکل ۱۸-۱: دستگاه سه محوری به صورت شماتیک. ۱۱۵
- شکل ۱۸-۲: نحوه‌ی قراردادن غشاء لاستیکی. ۱۱۷
- شکل ۱۸-۳: نمودار  $\Delta\sigma$  نسبت به کرنش محوری. ۱۲۱
- شکل ۱۸-۴: (a) دایره موهر، و (b) نحوه‌ی تغییرات پوش گسیختگی با درجه اشباع (آزمایش UU). ۱۲۱
- شکل ۱۸-۵: تغییرات  $\Delta\sigma$ ،  $\Delta u$  و  $\bar{A}$  نسبت به کرنش محوری. ۱۲۶
- شکل ۱۸-۶: دواير موهر و پوش گسیختگی. ۱۲۶
- شکل ۱۹-۱: دستگاه و متعلقات آزمایش سی.بی.آر. ۱۳۰
- شکل ۱۹-۲: نتایج معمول آزمایش CBR. ۱۳۳
- شکل ۲۰-۱: فرسایش ناشی از واگرایی. ۱۳۵
- شکل ۲۰-۲: (الف) فرسایش بیرونی، (ب) فرسایش درونی. ۱۳۸
- شکل ۲۰-۳: آزمایش کرامب. ۱۳۹
- شکل ۲۰-۴: نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه. ۱۴۰
- شکل ۲۰-۵: آزمایش پین هول. ۱۴۱
- شکل ۲۰-۶: سیلندر حاوی نمونه و نمونه پس از آزمایش. ۱۴۲
- شکل ۲۰-۷: تغییرات درصد سدیم نسبت به نمک‌های حل شده. ۱۴۴
- شکل ۲۱-۱: رفتار خاک رمبنده. ۱۴۵
- شکل ۲۱-۲: نمونه‌ای از رفتار خاک رمبنده تحت آزمایش تحکیم. ۱۵۰
- شکل ۲۲-۱: فلسفه‌ی آزمایش موئینگی افقی. ۱۵۱
- شکل ۲۲-۲: آزمایش موئینگی افقی. ۱۵۳

- ۱۵۳ شکل ۲۲-۳: نمودار تغییرات  $x^2$  نسبت به  $t$ .
- ۱۵۵ شکل ۲۳-۱: تصویر pH متر همراه با مقیاس pH.
- ۱۶۶ شکل ب-۱: نمودار پلاستیسیته برای خاک‌های ریزدانه.
- ۱۷۶ شکل ب-۲: نمودار پلاستیسیته طبق سیستم طبقه‌بندی AASHTO.

## نشانه‌های اختصاری

حرف	مشخصات	حرف	مشخصات	حرف	مشخصات
$\omega$	درصد رطوبت	A	عدد فعالیت	SL	حد جمع شدگی
$G_s$	چگالی	q	دبی	PI	شاخص خمیری
$Y_s$	وزن مخصوص ذرات خاک	i	گرادیان هیدرولیکی	N	تعداد ضربات
$Y_w$	وزن مخصوص آب	e	نسبت تخلخل	$F_1$	شاخص جریان
T	دما	$Y_d$	وزن مخصوص خشک	$\epsilon_v$	کرنش حجمی
$R_n$	درصد باقیمانده‌ی روی	$\rho_d$	دانسیته‌ی خشک	$\epsilon_a$	کرنش محوری
$D_{10}$	قطر موثر	$\rho_w$	دانسیته‌ی آب	$t_{50}$	زمان ۵۰٪ تحکیم
$D_{30}$	قطر ۳۰٪ وزنی	$Y_b$	وزن مخصوص کل	$H_s$	ارتفاع ذرات جامد
$D_{60}$	قطر ۶۰٪ وزنی	Dr	تراکم نسبی	$\Delta P$	افزایش فشار
$C_u$	ضریب یکنواختی	$\sigma_n$	تنش قائم	$P_0$	فشار اولیه
$C_c$	ضریب انحناء	$\tau$	مقاومت برشی	$T_v$	ضریب بدون بعد
k	ضریب نفوذپذیری	$P_v$	نیروی قائم	$C_v$	ضریب تحکیم
V	سرعت ته‌نشینی	$P_h$	نیروی برشی	$\sigma_1$	تنش اصلی بزرگ‌تر
$\mu$	لزوجت	C	چسبندگی	$\sigma_3$	تنش اصلی کوچک
D	قطر ذرات	$\phi$	زاویه‌ی اصطکاک	$\bar{A}$	ضریب فشار منفذی
L	طول موثر	$C_u$	چسبندگی زهکشی	n	پوکی
t	دما	$C_d$	چسبندگی زهکشی	$h_c$	ارتفاع موئینگی
$C_T$	تصحیح مربوط به دما	$\epsilon$	کرنش	$V_s$	سرعت تراوش
R	قرائت هیدرومتر	$A^\circ$	سطح مقطع اولیه	$C_c$	شاخص فشردگی
$R_{ep}$	قرائت تصحیح شده	$A_c$	مساحت تصحیح شده	$C_s$	شاخص تورم
a	ضریب وابسته به چگالی	$S_t$	حساسیت	$\sigma_p$	فشار پیش تحکیمی
$W_s$	وزن خشک ذرات	$\sigma$	تنش کل	$I_c$	پتانسیل رمبندگی
$P_T$	درصد عبوری	$\acute{\sigma}$	تنش موثر	$I_e$	شاخص رمبندگی
LL	حد روانی	u	اضافه فشار آب حفره	$S_r$	درجه‌ی اشباع
PL	حد خمیری	$t_{90}$	زمان ۹۰٪ تحکیم	$E_s$	ضریب ارتجاعی

## پیشگفتار

با توجه به رشد و توسعه روز افزون جوامع بشری، نیاز به اجرای پروژه‌های عمرانی از قبیل ساختمان‌های بلند مرتبه، پل‌ها، نیروگاه‌ها، کارخانه‌ها، مراکز تجاری، و غیره نیز جهت برطرف نمودن نیاز این جوامع رشد و توسعه فراوان یافته است. جهت طراحی ژئوتکنیکی سازه‌های مذکور نیاز به اندازه‌گیری و ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح موجود در محل به منظور طراحی هر چه بهینه‌تر و اقتصادی‌تر می‌باشد. در این کتاب سعی شده با توجه به استانداردهای موجود به صورت خیلی ساده و به روش گام به گام روش‌های آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی از قبیل تعیین رطوبت، دانسیته، چگالی، دانسیته‌ی صحرائی، و ... تشریح و نحوه‌ی استخراج پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مربوطه ارائه گردد. این پارامترها جهت بررسی و پیش بینی رفتار خاک‌ها جهت استفاده در پروژه‌های راهسازی، پی‌سازی و سازه‌های خاک مسلح مورد نیاز می‌باشند. از آنجایی که نتایج این آزمایش‌ها در طراحی ابنیه‌ی ژئوتکنیکی، مدل‌سازی‌های عددی و شیوه‌های تحلیلی به کار گرفته می‌شوند، تعیین هر چه دقیق‌تر پارامترها با استفاده از روش‌های یکسان آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. امید است این کتاب بتواند تا حدود زیادی نیاز تکنسین‌ها، دانشجویان کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترها و مهندسان فعال در زمینه‌های راهسازی و پی‌سازی را در رابطه با آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک برطرف نموده و باعث وحدت رویه در انجام آزمایش‌ها گردد. در تدوین کتاب سعی گردیده مطالب خلاصه‌نویسی شده با ذکر مثال‌هایی از نحوه‌ی تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های مختلف ارائه گردد.

در پایان لازم است از مسئولین دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی که امکان چاپ کتاب را فراهم نموده تشکر می‌نمایم. همچنین از خانم شقایق و آقای پارسا عبدی برای تایپ متن و از آقایان دکتر حامد میرزائی فر و مهندس مهدی صفدری که در تایپ فرمول‌ها و تنظیم متن و خانم مهندس پرستو حق‌گوی که در اصلاح شکل‌ها همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

محمود رضا عبدی

بهمن ۱۳۹۹



## فصل اول

# آزمایش آزمایشگاهی و گزارش نویسی

انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی صحیح بر روی نمونه‌های معرف خاک به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی آن بخش مهمی از طراحی و احداث فونداسیون‌ها، خاکریزها، اصلاح رفتار خاک، تعیین ضوابط و کیفیت کنترل عملیات خاکریزی می‌باشد. همیشه باید به خاطر داشت که خاک‌های طبیعی اغلب از غیر همگنی بالایی برخوردار می‌باشند. خصوصیات فیزیکی یک لایه‌ی خاک حتی در فواصل نسبتاً کم نیز می‌تواند بسیار متغیر باشد. اصول تئوریک و تجربی معادلات به کار گرفته شده در مکانیک خاک فقط و فقط زمانی در عمل درست به کار گرفته خواهند شد، که پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در این معادلات با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی دقیق تعیین شده باشند. بنابراین، یادگیری انجام آزمایش‌های صحیح آزمایشگاهی بخش مهم و مؤثری در حرفه‌ی مهندسی ژئوتکنیک ایفاء می‌نماید.

### ۱-۱- استفاده از تجهیزات<sup>۱</sup>

تجهیزات آزمایشگاهی اغلب گران‌قیمت بوده و برای نتایج آزمایشگاهی خوب و با کیفیت، تجهیزات نیاز به حفظ و نگهداری مناسب دارند. لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی از قبیل ترازو، حلقه‌های بارگذاری و ... باید در زمان‌های مشخص کالیبره شوند. الزامی است که تجهیزات همیشه قبل و پس از انجام آزمایش کاملاً تمیز باشند. نتایج بهتری با استفاده از دستگاه‌های تمیز به دست خواهد آمد، بنابراین همیشه فکر کنید که "تجهیزات متعلق به خود شما" می‌باشد.

### ۱-۲- برداشت اطلاعات<sup>۲</sup>

در حین انجام هر آزمایش، بهترین روش یادداشت اطلاعات در جداول مناسب پس از برداشت می‌باشد، اغلب مشاهده می‌شود که دانشجویان، قرائت‌های برداشت شده را روی کاغذهای باطله یادداشت می‌نمایند که بعداً یا گم یا غیر قابل استفاده خواهند بود. بعضاً این امر نیاز به انجام دوباره‌ی آزمایش و یا به دست آوردن نتایج نامطمئن می‌گردد.

---

<sup>۱</sup>- use of equipment

<sup>۲</sup>- recording the data

### ۳- تدوین گزارش<sup>۱</sup>

آزمایش‌های آزمایشگاهی بعضاً توسط گروه‌های کوچک انجام می‌شود، لیکن هر یک از دانشجویان به طور جداگانه باید گزارش تهیه نماید. این امر باعث بهبود و یادگیری توانایی دانشجویان در تهیه و تدوین گزارش‌های فنی می‌گردد.

هر گزارش باید دارای مشخصات ذیل باشد:

۱- جلد: روی جلد باید عنوان آزمایش، اسم، تاریخ انجام آزمایش درج گردد.

۲- اطلاعات زیر باید در متن گزارش گنجانیده شود:

- هدف آزمایش
- تجهیزات مورد استفاده
- تصویر شماتیک دستگاه اصلی مورد استفاده
- خلاصه‌ی روش انجام آزمایش

۳- نتایج: نتایج شامل جداول، نمونه‌ی محاسبات و نمودارهای مورد نیاز می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری: بحث در خصوص دقت انجام آزمایش و منابع احتمالی اشتباه در این بخش گنجانیده می‌شود.

### ۱-۴- اظهار نظر در خصوص نمودارها و جداول گزارش<sup>۲</sup>

نمودارها و جداول باید دقیق و تمیز تهیه و همیشه واحدها قید گردند. نمودارها باید تا جایی که ممکن است بزرگ ترسیم و با دقت عنوان‌گذاری شوند. نمونه‌هایی از نمودارهای نامناسب و مناسب در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در صورت لزوم از باید خط‌کش و شابلون جهت ترسیم نمودارها استفاده گردد.

### ۱-۵- واحدها<sup>۳</sup>

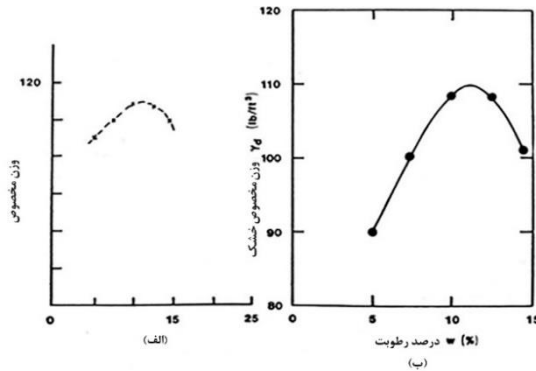
نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی باید بر حسب واحدهای استاندارد<sup>۴</sup> SI ارائه شوند. در جدول ۱-۱ واحدهای استاندارد مورد استفاده در مکانیک خاک و جداول کامل در پیوست A ارائه گردیده است.

<sup>۱</sup>- report preparation

<sup>۲</sup>- comments on graphs and tables prepared for the report

<sup>۳</sup>- dimensions

<sup>۴</sup>- International System of units



شکل ۱-۱: (الف) ارائه‌ی نتایج آزمایش تراکم به صورت نامناسب، (ب) ارائه‌ی نتایج آزمایش تراکم به صورت مناسب‌تر.

### جدول ۱-۱: واحدهای استاندارد SI.

SI Units	واحد
m	طول
m <sup>2</sup>	مساحت
m <sup>3</sup>	حجم
$\frac{m}{s}$	سرعت
N	نیرو
$\frac{kN}{m^2}$	تنش
$\frac{kN}{m^3}$	وزن مخصوص
$\frac{cm^2}{s}$	ضریب تحکیم

## ۱-۶- روش‌های استاندارد انجام آزمایش<sup>۱</sup>

در اغلب نقاط جهان امروزه آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک برای مقاصد مهندسی، از روش‌های تدوین شده توسط (ASTM<sup>۲</sup>) و یا (AASHTO<sup>۳</sup>) استفاده می‌نمایند. تجهیزات آزمایشگاهی ممکن است از یک آزمایشگاه به آزمایشگاه دیگر قدری تفاوت داشته باشد، لیکن اساس و فلسفه آزمایش همه جا یکسان می‌باشد. در جدول ۱-۲ عناوین آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک براساس سیستم‌های ASTM، AASHTO و BSI ارائه گردیده است.

<sup>۱</sup>- standard test procedures

<sup>۲</sup>- American Society for Testing and Materials

<sup>۳</sup>- American Association of State Highways and Transportation Officials

جدول ۱-۲: آزمایش‌های آزمایشگاهی بر اساس سیستم‌های ASTM ، AASHTO و BSI

BSI	AASHTO	ASTM	آزمایش	ردیف
BS1377: Part 2	T- 265	D- 2216	درصد رطوبت ( $w$ )	۱
BS1377: Part 2	T- 100	D- 854	چگالی ( $G_s$ )	۲
BS1377: Part 2	T- 87, T- 88	D- 421	دانه‌بندی	۳
BS1377: Part 2	T- 87, T- 88	D- 422	هیدرومتری	۴
BS1377: Part 2	T- 89	D- 4318	حد روانی (LL)	۵
BS1377: Part 2	T- 90	D- 4318	حد خمیری (PL)	۶
BS1377: Part 2	T- 92	D- 427	حد انقباض (SL)	۷
BS1377: Part 4	T- 99	D- 648	تراکم استاندارد پروکتور	۸
BS1377: Part 4	T- 180	D- 1557	تراکم اصلاح شده	۹
...	T- 191	D- 1556	دانستیه‌ی صحرائی	۱۰
BS1377: Part 5	T- 215	D- 2434	نفوذپذیری	۱۱
BS1377: Part 5	T- 216	D- 2435	تحکیم	۱۲
BS1377: Part 7	T- 236	D- 3080	برش مستقیم	۱۳
...	T- 208	D- 2166	فشاری محصور نشده	۱۴
BS1377: Part 7	T- 234	D- 2850	سه محوری	۱۵
BS1377: Part 4	T- 193	D- 4429	سی. بی. آر. (CBR)	۱۶
...	...	D- 4647	واگرایی (Dispersive)	۱۷
...	...	D-5333	رمبندگی (Collapsibility)	۱۸
...	M- 145	D- 3282	سیستم طبقه‌بندی AASHTO	۲۰
...	...	D- 2487	سیستم طبقه‌بندی Unified	۲۱

## فصل دوم

### آزمایش تعیین درصد رطوبت<sup>۱</sup>

#### ۱-۲- مقدمه<sup>۲</sup>

برای انجام تقریباً تمامی آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک، تعیین درصد رطوبت الزامی می‌باشد. طبق تعریف، درصد رطوبت برابر است با :

$$\omega = \frac{\text{جرم آب در نمونه‌ی خاک}}{\text{جرم خشک نمونه‌ی خاک}} \quad ۱-۲$$

میزان رطوبت اغلب به صورت "درصد" بیان می‌گردد.

برای به دست آوردن نتایج بهتر، اندازه‌ی حداقل نمونه‌های خاک مرطوب باید تقریباً برابر آنچه در جدول ۱-۲ آمده، باشد:

جدول ۱-۲: اندازه‌ی نمونه‌های خاک مرطوب جهت تعیین درصد رطوبت.

حداقل جرم نمونه (gr)	حداکثر اندازه‌ی دانه‌های موجود در خاک
۱۰۰۰-۱۲۰۰	۲ اینچ (۵۰/۸ میلی‌متر)
۳۰۰-۵۰۰	$\frac{1}{2}$ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر)
۱۰۰-۱۵۰	<sup>a</sup> ۴/۷۵ میلی‌متر
۱۰-۴۰	<sup>b</sup> ۰/۴۲ میلی‌متر

a) No.4 Sieve

b) No. 40 Sieve

<sup>1</sup>- Moisture Content Determination

<sup>2</sup>- introduction