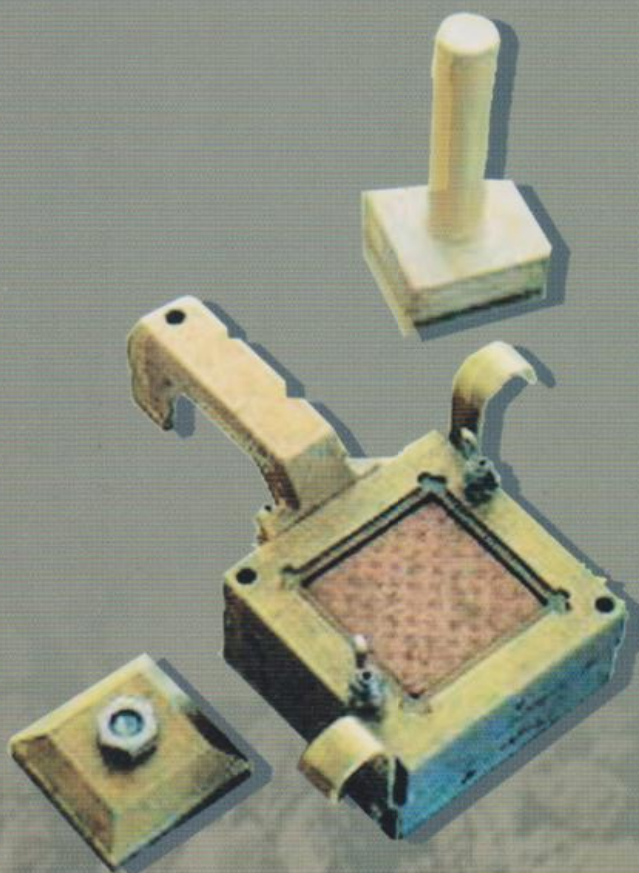


# آزمایش‌های مکانیک خاک



انتشارات دانشگاه کردستان

به همراه مفاهیم اولیه مکانیک خاک و توضیحات کاربردی



تهیه و تألیف: کامران نوبخت و کیلی

(عضو هیأت علمی گروه عمران دانشگاه کردستان)

# آزمایش‌های مکانیک خاک

به همراه مفاهیم اولیه مکانیک خاک و توضیحات کاربردی

تهیه و تألیف: کامران تویبخت و کیلی

# آزمایش‌های مکانیک خاک

به همراه مفاهیم اولیه مکانیک خاک و

توضیحات کاربردی



انتشارات دانشگاه گیلان

بهار ۱۳۹۱

# آزمایش‌های مکانیک خاک

به همراه مفاهیم اولیه مکانیک خاک و توضیحات کاربردی

تهیه و تألیف: کامران نوبخت و کیلی

(عضو هیات علمی دانشگاه کردستان)



انتشارات دانشگاه کردستان

بهار ۱۴۰۱

سرشناسه : نوبخت و کیلی، کامران، ۱۳۵۰-

عنوان و نام پدیدآور : آزمایش‌های مکانیک خاک به همراه مفاهیم اولیه مکانیک خاک و توضیحات کاربردی /  
تهیه و تالیف کامران نوبخت و کیلی

مشخصات نشر : سنندج، دانشگاه کردستان، انتشارات، ۱۴۰۱.

مشخصات ظاهری : د، ۳۰۰ص. مصور، جدول (بخشی رنگی)، نمودار (بخشی رنگی)

شابک : 4 - 61 - 6702 - 622 - 978

وضعیت فهرست نویسی : فیپا

یادداشت : واژه نامه

یادداشت : کتاب نامه: ص. ۲۹۹-۳۰۰

یادداشت : نمایه

موضوع : خاک - مکانیک - آزمایش‌ها

Soil mechanics - Experiments

خاک - مکانیک

Soil mechanics

شناسه افزوده : دانشگاه کردستان، انتشارات

رده بندی کنگره : TAV۱۰/۵

رده بندی دیویی : ۶۲۴/۱۵۱۳۶

شماره کتابشناسی ملی : ۸۸۱۲۲۳۸

اطلاعات رکورد کتابشناسی : فیپا

### آزمایش‌های مکانیک خاک

به همراه مفاهیم اولیه مکانیک خاک و توضیحات کاربردی

نویسنده: کامران نوبخت و کیلی

ناشر: انتشارات دانشگاه کردستان

نوبت چاپ: اول - بهار ۱۴۰۱

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۶۷۰۲-۶۱-۴

تیراژ: ۵۰۰ جلد

قیمت: ۱۰۰/۰۰۰ تومان



انتشارات دانشگاه کردستان

## فهرست مطالب

|       |   |
|-------|---|
| ۱     | فصل اول: آزمایش‌های آزمایشگاهی و تهیه گزارش                   |
| ۱-۱   | انجام آزمایشات بر اساس استانداردهای معتبر.....                |
| ۲-۱   | نگهداری از وسایل و تجهیزات.....                               |
| ۳-۱   | ایمنی.....  |
| ۴-۱   | یادداشت و ثبت داده‌ها.....                                    |
| ۵-۱   | آماده کردن گزارش آزمایشگاه.....                               |
| ۶-۱   | واحدها.....   |
| ۷-۱   | اقدامات کلی که توسط مسئول آزمایشگاه لازم است انجام شود.....   |
| ۸-۱   | اقدامات کلی که توسط گروه‌های دانشجویی لازم است انجام شود..... |
| ۱۱    | فصل دوم: مفاهیم و اطلاعات کلی خاک و تقسیم بندی‌های آن         |
| ۱-۲   | تعاریف سنگ و خاک.....   |
| ۲-۲   | خاک آلی و پیت.....  |
| ۳-۲   | طبقه بندی خاک‌ها از جنبه‌های مختلف.....                       |
| ۴-۲   | خاک دستی.....   |
| ۵-۲   | طبقه بندی مهندسی خاک (سیستم متحد).....                        |
| ۲-۵-۲ | طبقه بندی با استفاده از جدول و نمودار.....                    |
| ۳-۵-۲ | طبقه بندی خاک به روش متحد با استفاده از فلوجارت.....          |
| ۲۷    | فصل سوم: آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک                          |
| ۱-۳   | مقدمه.....  |
| ۳-۲   | وسایل آزمایش.....   |
| ۳-۳   | روش انجام آزمایش.....   |

|    |   |     |
|----|---|-----|
| ۲۹ | ..... محاسبات   | ۴-۳ |
| ۳۰ | ..... نکات کلی  | ۵-۳ |
| ۳۳ | <b>فصل چهارم: آزمایش تعیین چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک</b> |     |
| ۳۳ | ..... مقدمه   | ۱-۴ |
| ۳۵ | ..... وسایل آزمایش  | ۴-۲ |
| ۳۶ | ..... روش آزمایش  | ۳-۴ |
| ۳۸ | ..... محاسبات   | ۴-۴ |
| ۴۰ | ..... نکات کلی  | ۵-۴ |
| ۴۱ | <b>فصل پنجم: مفاهیم و اطلاعات کلی دانه‌بندی خاک</b>         |     |
| ۴۱ | ..... دانه‌بندی خاک و نحوه توزیع اندازه دانه‌های جامد خاک   | ۱-۵ |
| ۴۲ | ..... پارامترهای منحنی دانه‌بندی و موارد استفاده آنها       | ۲-۵ |
| ۴۴ | ..... انواع منحنی دانه‌بندی                                 | ۳-۵ |
| ۴۵ | ..... موارد استفاده منحنی دانه‌بندی                         | ۴-۵ |
| ۴۵ | ..... محدوده اندازه دانه‌های جامد خاک                       | ۵-۵ |
| ۴۷ | <b>فصل ششم: آزمایش دانه‌بندی خاک به روش الک</b>             |     |
| ۴۷ | ..... مقدمه   | ۱-۶ |
| ۵۰ | ..... وسایل لازم  | ۲-۶ |
| ۵۰ | ..... روش انجام آزمایش                                      | ۳-۶ |
| ۵۳ | ..... محاسبات   | ۴-۶ |
| ۵۴ | ..... رسم منحنی   | ۵-۶ |
| ۵۵ | ..... سایر محاسبات  | ۶-۶ |
| ۵۷ | <b>فصل هفتم: آزمایش دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتری</b>      |     |
| ۵۷ | ..... مقدمه   | ۱-۷ |
| ۶۲ | ..... وسایل آزمایش  | ۲-۷ |

|    |       |      |   |
|----|-------|------|---|
| ۶۳ | ..... | ۳-۷  | مراحل انجام آزمایش  |
| ۶۶ | ..... | ۴-۷  | محاسبات   |
| ۶۸ | ..... | ۷-۵  | رسم منحنی   |
| ۶۸ | ..... | ۶-۷  | مراحل تصحیح   |
| ۷۰ | ..... | ۷-۷  | نکات کلی  |
| ۷۱ |       |      | <b>فصل هشتم: مفاهیم و اطلاعات کلی خصوصیات خمیری خاک‌های ریزدانه</b> |
| ۷۱ | ..... | ۱-۸  | حدود اتربرگ   |
| ۷۳ | ..... | ۲-۸  | نشانه (دامنه) خمیری (PI)  |
| ۷۴ | ..... | ۳-۸  | فعالیت (A)  |
| ۷۵ | ..... | ۴-۸  | شاخص (نشانه) روانی خاک LI   |
| ۷۶ | ..... | ۵-۸  | شاخص (نشانه) سفتی خاک CI  |
| ۷۷ | ..... | ۶-۸  | نمودار خمیری  |
| ۷۸ | ..... | ۷-۸  | تعیین حد انقباض خاک با استفاده از روش پیشنهادی کاساگرانده           |
| ۷۹ |       |      | <b>فصل نهم: آزمایش حد روانی</b>                                     |
| ۷۹ | ..... | ۱-۹  | مقدمه   |
| ۷۹ | ..... | ۲-۹  | وسایل مورد نیاز آزمایش  |
| ۸۱ | ..... | ۳-۹  | روش آزمایش  |
| ۸۴ | ..... | ۴-۹  | محاسبات   |
| ۸۴ | ..... | ۵-۹  | رسم منحنی   |
| ۸۵ | ..... | ۶-۹  | نکات کلی  |
| ۸۷ |       |      | <b>فصل دهم: آزمایش حد خمیری</b>                                     |
| ۸۷ | ..... | ۱-۱۰ | مقدمه   |
| ۸۷ | ..... | ۲-۱۰ | وسایل آزمایش  |
| ۸۸ | ..... | ۳-۱۰ | روش انجام آزمایش  |
| ۹۰ | ..... | ۴-۱۰ | محاسبات   |

|     |   |
|-----|---|
| ۹۱  | <b>فصل یازدهم: مفاهیم و اطلاعات کلی نفوذپذیری</b>                     |
| ۹۱  | ۱-۱۱ سرعت جریان و رابطه داریسی.....                                   |
| ۹۲  | ۲-۱۱ ضریب نفوذپذیری.....  |
| ۹۳  | ۳-۱۱ روش‌های کلی تعیین ضریب نفوذپذیری.....                            |
| ۹۳  | ۴-۱۱ روش‌های آزمایشگاهی تعیین ضریب نفوذپذیری.....                     |
| ۹۴  | ۵-۱۱ روش‌های صحرایی تعیین ضریب نفوذپذیری.....                         |
| ۹۵  | ۶-۱۱ روابط تجربی جهت تخمین ضریب نفوذپذیری.....                        |
| ۹۹  | <b>فصل دوازدهم: آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت</b>                       |
| ۹۹  | ۱-۱۲ مقدمه.....   |
| ۹۹  | ۲-۱۲ وسایل آزمایش.....  |
| ۱۰۰ | ۳-۱۲ دستگاه تعیین نفوذپذیری با هد ثابت.....                           |
| ۱۰۲ | ۴-۱۲ روش آزمایش.....  |
| ۱۰۳ | ۵-۱۲ محاسبات.....   |
| ۱۰۷ | <b>فصل سیزدهم: آزمایش نفوذپذیری با هد (بار) متغیر (نزولی - افتان)</b> |
| ۱۰۷ | ۱-۱۳ مقدمه.....   |
| ۱۰۷ | ۲-۱۳ وسایل آزمایش.....  |
| ۱۰۷ | ۳-۱۳ دستگاه تعیین نفوذپذیری با هد متغیر.....                          |
| ۱۰۹ | ۴-۱۳ روش آزمایش.....  |
| ۱۱۰ | ۵-۱۳ محاسبات.....   |
| ۱۱۳ | <b>فصل چهاردهم: مفاهیم و اطلاعات کلی تراکم</b>                        |
| ۱۱۳ | ۱-۱۴ مقدمه.....   |
| ۱۱۳ | ۲-۱۴ اصول تراکم - منحنی تراکم و پارامترهای مهم تراکم.....             |
| ۱۱۵ | ۳-۱۴ آزمایش تراکم پروکتور استاندارد.....                              |
| ۱۱۶ | ۴-۱۴ وزن مخصوص حفرات-هوای-صفر.....                                    |
| ۱۱۷ | ۵-۱۴ عوامل موثر بر تراکم.....   |



|     |  |
|-----|--|
| ۱۱۹ | ۶-۱۴ آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده                                |
| ۱۲۰ | ۷-۱۴ روش‌های مختلف انجام آزمایش تراکم                              |
| ۱۲۰ | ۸-۱۴ روابط همبستگی تجربی برای $\gamma_{d(max)}$ و $\omega_{opt}$   |
| ۱۲۳ | ۹-۱۴ تراکم کارگاهی   |
| ۱۲۴ | ۱۰-۱۴ میزان تراکم (R)  |
| ۱۲۵ | ۱۱-۱۴ دانسیته نسبی ( $D_r$ )                                       |
| ۱۲۷ | ۱۲-۱۴ روابط همبستگی تجربی برای $(D_r)$ ، $(e_{min})$ و $(e_{max})$ |

### ۱۲۹ فصل پانزدهم: آزمایش تراکم پروکتور استاندارد

|     |  |
|-----|--|
| ۱۲۹ | ۱-۱۵ مقدمه                                   |
| ۱۲۹ | ۲-۱۵ وسایل آزمایش                            |
| ۱۳۰ | ۳-۱۵ قالب و چکش تراکم پروکتور                |
| ۱۳۱ | ۴-۱۵ روش آزمایش                              |
| ۱۳۴ | ۵-۱۵ محاسبات                                 |
| ۱۳۶ | ۶-۱۵ رسم منحنی                               |
| ۱۳۶ | ۷-۱۵ نکات کلی آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده |

### ۱۳۹ فصل شانزدهم: آزمایش دانسیته خشک حداقل و حداکثر خاک‌های دانه‌ای

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| ۱۳۹ | ۱-۱۶ مقدمه                    |
| ۱۳۹ | ۲-۱۶ وسایل آزمایش             |
| ۱۴۱ | ۳-۱۶ تعیین دانسیته خشک حداقل  |
| ۱۴۳ | ۴-۱۶ تعیین دانسیته خشک حداکثر |

### ۱۴۷ فصل هفدهم: آزمایش وزن مخصوص صحرایی خاک به کمک مخروط ماسه

|     |                   |
|-----|-------------------|
| ۱۴۷ | ۱-۱۷ مقدمه        |
| ۱۴۷ | ۲-۱۷ وسایل آزمایش |
| ۱۴۹ | ۳-۱۷ روش آزمایش   |
| ۱۵۲ | ۴-۱۷ محاسبات      |

|     |   |      |
|-----|---|------|
| ۱۵۴ | ..... نکات کلی  | ۵-۱۷ |
| ۱۵۷ | <b>فصل هجدهم: آزمایش تحکیم</b>                          |      |
| ۱۵۷ | ..... مقدمه   | ۱-۱۸ |
| ۱۵۹ | ..... وسایل آزمایش                                      | ۲-۱۸ |
| ۱۵۹ | ..... وسیله آزمایش تحکیم                                | ۳-۱۸ |
| ۱۶۴ | ..... روش آزمایش  | ۴-۱۸ |
| ۱۶۵ | ..... محاسبات و رسم منحنی                               | ۵-۱۸ |
| ۱۷۳ | ..... نکات کلی  | ۶-۱۸ |
| ۱۷۷ | <b>فصل نوزدهم: مفاهیم و اطلاعات کلی مقاومت برشی خاک</b> |      |
| ۱۷۷ | ..... مقدمه   | ۱-۱۹ |
| ۱۷۷ | ..... معیار گسیختگی موهر-کولمب                          | ۲-۱۹ |
| ۱۸۱ | ..... روشهای کلی تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک       | ۳-۱۹ |
| ۱۸۱ | ..... روش‌های آزمایشگاهی تعیین پارامترهای مقاومت برشی   | ۴-۱۹ |
| ۱۸۲ | ..... ویژگی‌های کلی روش‌های آزمایشگاهی فوق‌الذکر        | ۵-۱۹ |
| ۱۸۵ | ..... روابط تجربی جهت تخمین پارامترهای مقاومت برشی خاک  | ۶-۱۹ |
| ۱۸۶ | ..... حساسیت و دگرروانی خاک رس                          | ۷-۱۹ |
| ۱۸۹ | <b>فصل بیستم: آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه</b>         |      |
| ۱۸۹ | ..... مقدمه   | ۱-۲۰ |
| ۱۹۰ | ..... وسایل آزمایش                                      | ۲-۲۰ |
| ۱۹۰ | ..... دستگاه برش مستقیم و تجهیزات آن                    | ۳-۲۰ |
| ۱۹۳ | ..... روش آزمایش  | ۴-۲۰ |
| ۱۹۵ | ..... محاسبات   | ۵-۲۰ |
| ۱۹۷ | ..... رسم منحنی   | ۶-۲۰ |
| ۱۹۹ | ..... نکات کلی  | ۷-۲۰ |

|     |  |
|-----|--|
| ۲۰۱ | فصل بیست و یکم: آزمایش سه محوری (بر روی رس)                        |
| ۲۰۱ | ۱-۲۱ مقدمه.....  |
| ۲۰۲ | ۲-۲۱ وضعیت تنش‌ها و دایره‌های موهر در آزمایشات مختلف سه محوری..... |
| ۲۰۶ | ۳-۲۱ وسایل آزمایش.....   |
| ۲۰۶ | ۴-۲۱ سلول سه محوری و تنظیم بارگذاری.....                           |
| ۲۰۸ | ۵-۲۱ نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش سه محوری.....                |
| ۲۰۹ | ۶-۲۱ قرار دادن نمونه در سلول سه محوری.....                         |
| ۲۱۰ | ۷-۲۱ آزمایش تحکیم نیافته - زهکشی نشده (UU).....                    |
| ۲۱۶ | ۸-۲۱ آزمایش تحکیم یافته - زهکشی نشده (CU).....                     |

### ۲۲۵ فصل بیست و دوم: آزمایش فشاری محدود نشده (تک محوری)

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| ۲۲۵ | ۱-۲۲ مقدمه.....               |
| ۲۲۶ | ۲-۲۲ وسایل آزمایش.....        |
| ۲۲۶ | ۳-۲۲ دستگاه انجام آزمایش..... |
| ۲۲۷ | ۴-۲۲ روش آزمایش.....          |
| ۲۲۹ | ۵-۲۲ محاسبات.....             |
| ۲۳۲ | ۶-۲۲ رسم منحنی.....           |
| ۲۳۳ | ۷-۲۲ نکات کلی.....            |

### ۲۳۵ فصل بیست و سوم: مطالعات ژئوتکنیکی و جایگاه آزمایشات آزمایشگاهی

|     |   |
|-----|---|
| ۲۳۵ | ۱-۲۳ مقدمه.....                         |
| ۲۳۶ | ۲-۲۳ مراحل انجام مطالعات ژئوتکنیکی..... |

## پیشگفتار

سازه‌های متعارف مهندسی معمولاً بر روی زمین تکیه کرده و نیروهای ثقلی و جانبی ناشی از آنها از طریق فونداسیون به زمین زیر آن‌ها منتقل می‌گردند. تنش‌های وارده به زمین در اثر بار سازه، باید توسط خاک و یا سنگ واقع در زیر سازه تحمل شوند. شناخت رفتار زمین جهت طراحی ایمن و اقتصادی پی سازه‌های مختلف ضروری می‌باشد.

به همین منظور، مهندسين در پروژه‌های مختلف عمرانی از جمله ساختمان‌سازی، راه‌سازی، سدسازی، پل‌سازی و غیره، جهت طراحی پی و سازه‌های مرتبط با خاک نیازمند مطالعات ژئوتکنیک و مکانیک خاک هستند. به این منظور لازم است که پارامترهای شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی خاک را از آزمایشات مختلف آزمایشگاهی و صحرایی بدست آورند. بطور کلی در یک پروژه عمرانی، بسته به وضعیت لایه‌بندی زمین، ممکن است صرفاً نیاز به مطالعات مکانیک سنگ، مکانیک خاک و یا مطالعات مکانیک خاک و مکانیک سنگ توما باشد. مطالعات مکانیک سنگ در محدوده این کتاب نیست و مورد بحث و بررسی قرار نمی‌گیرد و تمامی توضیحات این کتاب صرفاً در محدوده مطالعات مکانیک خاک می‌باشد.

تا کنون چندین کتاب آزمایشگاه مکانیک خاک در ایران توسط افراد متخصص در این زمینه نوشته شده است که کتاب‌های بسیار خوبی بوده، اما صرفاً روش‌ها و مراحل انجام آزمایشات در آن شرح داده شده است. ساختار کتاب حاضر و مطالب گنجانده شده در آن متفاوت از کتاب‌های موجود بوده و فراتر از صرفاً شرح آزمایشات می‌باشد. هدف از نگارش این کتاب، این است که دانشجویان، فارغ التحصیلان و مهندسين علاقه‌مند در این زمینه، علاوه بر یادگیری نحوه انجام آزمایشات مکانیک خاک، درک درستی از مراحل کلی انجام مطالعات ژئوتکنیکی پروژه‌های متعارف پیدا کرده و به بینشی برسند که این آزمایشات چرا انجام می‌شوند و دارای چه اهمیتی هستند و در چه مرحله‌ای از مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند و جایگاه آزمایشات آزمایشگاهی در مراحل مختلف مطالعات ژئوتکنیکی مشخص گردد. به همین منظور، کتاب در دو بخش اصلی تهیه شده است:

### بخش اول: آزمایشات آزمایشگاهی

این بخش از کتاب به نحوه انجام آزمایشات اختصاص داده شده است. روش انجام آزمایشات بر اساس کتاب "آزمایشگاه مکانیک خاک، براجا. ام. داس" [۴] نوشته شده است که یکی از کتاب‌های معتبر در این زمینه و بر اساس استاندارد ASTM می‌باشد. سعی شده که در هر آزمایش، توضیحات کلی و کاربردی، توسط نویسنده، در مورد آن بیان گردد که خواننده دامنه کاربرد و

اهمیت آزمایش مزکور را بهتر درک کند. در بخش‌های مختلف متن نیز، بنا به ضرورت، توضیحات تکمیلی ارائه شده است.

ساختار این بخش به این صورت است که آزمایشات مختلفی که در یک محدوده موضوعی می‌باشند، دسته‌بندی شده‌اند و مفاهیم کلی مربوط به هر دسته موضوعی، به عنوان یک فصل جداگانه ارائه شده است. در فصل‌های دوم، پنجم، هشتم، یازدهم، چهاردهم و نوزدهم، صرفاً مفاهیم کلی موضوعات مختلف توضیح داده شده‌اند (و نه شرح روش آزمایشات). به عنوان مثال، در فصل ۱۹، مفاهیم کلی مقاومت برشی توضیح داده شده است و سپس آزمایشات برش مستقیم، سه‌محوری و تک‌محوری، به ترتیب در فصل‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ که همگی در ارتباط با مقاومت برشی هستند ارائه گردیده‌اند.

### بخش دوم (فصل ۲۳): مطالعات ژئوتکنیکی و جایگاه آزمایشات آزمایشگاهی

مبحث مطالعات ژئوتکنیکی بسیار گسترده می‌باشد و نیاز به مطالعه و تسلط کافی در موضوعات مختلف مکانیک خاک، مکانیک سنگ، مهندسی پی، زمین‌شناسی مهندسی، روش‌های بهسازی خاک، دینامیک خاک، خاک‌های مسئله‌دار، مدل‌سازی‌های عددی و غیره دارد، چرا که هر پروژه ژئوتکنیکی با توجه به وضعیت هندسی و فیزیکی زمین و سازه‌های مرتبط با آن و اهمیت پروژه، مشخصات و خصوصیات خاص خود را دارد و باید از همه جنبه‌ها و زوایا مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

هدف از این بخش، آشنایی دانشجویان و فارغ‌التحصیلان رشته مهندسی عمران و به ویژه گرایش مهندسی ژئوتکنیک، با مراحل کلی انجام مطالعات ژئوتکنیک به صورت گام به گام در پروژه‌های ساختمانی، در محدوده مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ایران است. در واقع مطالب این بخش که بر اساس مطالعات و تجارب نویسنده نگارش شده است، به عنوان ورودی به این موضوع بوده و باعث ایجاد یک دید کلی در این زمینه می‌گردد. همچنین خواننده کتاب در این بخش متوجه خواهد شد که آزمایشات آزمایشگاهی در چه مرحله‌ای از مطالعات ژئوتکنیکی باید انجام شوند و از نتایج آن چگونه استفاده شود. به این ترتیب جایگاه آزمایشات آزمایشگاهی در ارتباط با مطالعات ژئوتکنیکی یک پروژه نمایان می‌شود.