اصول مقدماتی مهندسی ژئوتکنیک

ویژهٔ مهندسین عمران، ژئوتکنیک و زمین‌شناسی

مولفان:
رسول اجل لوئیان
(استاد دانشگاه اصفهان)
ارشک سبزی پور
(مدرس دانشگاه آزاد اسلامی)

سرشناسه:	اجل‌لوئیان، رسول، ۱۳۳۸ -
عنوان و نام پدیدآور:	اصول مقدماتی مهندسی ژیوتکنیک/ مولفان رسول اجل‌لوئیان، ارشک سبزی‌پور.
مشخصات نشر:	تهران : نوآور ، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری:	۲۲۰ص.
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۴۳۰-۲
وضعیت فهرست نویسی:	فیپا
موضوع:	مهندسی ژئوتکنیک
موضوع:	Geotechnical engineering
موضوع:	خاک -- مکانیک
موضوع:	Soil mechanics
موضوع:	خاک -- بهسازی
موضوع:	Soil remediation
شناسه افزوده:	سبزی‌پور، ارشک، ۱۳۷۱-
رده بندی کنگره:	TA۷۰۵/الف۳الف۶ ۱۳۹۷
رده بندی دیویی:	۱۵۱/۶۲۴
شماره کتابشناسی ملی:	۵۵۲۳۷۶۳

اصول مقدماتی مهندسی ژئوتکنیک

مولفان: رسول اجل‌لوئیان، ارشک سبزی‌پور
ناشر: نوآور
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۴۳۰-۲

نشر نوآور

مرکز پخش:

نوآور، تهران، خیابان انقلاب، خیابان فخررازی، خیابان شهدای ژاندارمری نرسیده به خیابان دانشگاه ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸، طبقه دوم، واحد ۶ تلفن: ۹۲- ۶۶۴۸۴۱۹۱ www. noavarpub. com

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان مصوب سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر نوآور می‌باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب (از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، عکس‌برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به صورت اینترنتی، سی‌دی، دی‌وی‌دی، فیلم فایل صوتی یا تصویری و غیره) بدون اجازه کتبی از نشر نوآور ممنوع بوده و شرعاً حرام است و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

فـهرست مطالب

پیشگفتار ۱۰

فصل اول / تحقیقات درون سایتی و استراتژی نمونه‌گیری ۱۳

۱-۱- مقدمه ۱۳

۱-۲- مراحل تحقیقات یک سایت ۱۳

۱-۳- چاله‌های آزمایشی ۱۸

۱-۴- گمانه‌های آزمایشی حفر شده در خاک ۱۹

۱-۵- استراتژی نمونه‌گیری ۲۰

۱-۶- ملاحظاتی بر الزامات گمانه‌زنی‌های اکتشافی بر پایه مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ۲۴

۱-۶-۱- گروه بندی ساختمان‌ها براساس درجه اهمیت ۲۵

۱-۶-۲- شرایط نیاز یا عدم نیاز به گمانه‌زنی ۲۶

۱-۶-۳-تعیین فاصله گمانه‌ها یا چاهک‌های شناسایی ۲۶

۱-۶-۴- عمق گمانه‌های اکتشافی ۲۸

۱-۷- سایر روش‌های پیشنهادی برای تعیین عمق بررسی‌ها و گمانه‌ها ۲۹

۱-۸- استفاده از اطلاعات پیشینه و گذشته ۳۰

۱-۹- انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا ۳۱

۱-۹-۱- متداول‌ترین آزمون‌های برجا ۳۳

۱-۹-۱-۱- آزمون نفوذ استاندارد (SPT) ۳۴

۱-۹-۱-۲- آزمون نفوذسنج مخروطی (CPT) ۳۷

۱-۱۰- چاه‌های مشاهده‌ای آب‌های زیرزمینی ۳۹

۱-۱۱- ارائه همبستگی‌های مناسب در آزمون‌های برجا ۴۰

۱-۱۲- نتایج مشاهداتی ۴۳

۱-۱۲-۱- پروفیل‌ها ۴۳

۱-۱۲-۲- نقشه‌ها (Maps) ۴۶

۱-۱۲-۳- مدل‌های سه بعدی ۴۸

۱-۱۲-۴- انیمیشن‌ها ۵۰

فصل دوم / مشخصات خاک‌ها ۵۱

۲-۱- مقدمه ۵۱

۲-۲- روابط وزنی- حجمی ۵۱

۲-۲-۱- نسبت تخلخل (e) ۵۳

۲-۲-۲- تخلخل (پوکی) ۵۳

۲-۲-۳- درجه اشباع ۵۳
۲-۲-۴- درصد رطوبت ۵۳
۲-۲-۵- وزن مخصوص ظاهری ۵۴
۲-۲-۶- وزن واحد حجم خشک ۵۴
۲-۲-۷- چگالی ذرات جامد خاک ۵۴
۲-۲-۸- درصد هوای موجود (A) ۵۵
۲-۲-۹- دانسیته نسبی (D_r) ۵۵
۲-۳- حدود اتربرگ ۵۸
۲-۴- مقاومت برشی ۶۳
۲-۵- فعالیت خاک‌ها ۶۴
۲-۶- حساسیت ۶۵
۲-۷- آزمون‌های تعیین پلاستیسیته خاک‌ها در محل ۶۶
۲-۸- طبقه‌بندی مهندسی خاک‌ها ۶۶
۲-۸-۱- سیستم طبقه‌بندی آشتو (AASHTO) ۶۷
۲-۸-۲- سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) ۶۸
۲-۹- مفهوم تنش و تنش‌های برجا ۷۲
۲-۱۰- خواص مهندسی توده‌ها ۷۶

فصل سوم / آشنایی با مدلسازی رفتار خاک‌ها ۷۷
۳-۱ مقدمه ۷۷
۳-۲- کلیات مدلسازی رفتار خاک ۷۷
۳-۲-۱- مفهوم تنش و کرنش ۷۷
۳-۲-۲- مفهوم ارائه ماتریس رفتاری ۸۰
۳-۳- انواع رفتار تنش- کرنش یک بعدی مواد و مصالح ۸۲

فصل چهارم / تعیین نفوذپذیری خاک‌ها ۸۹
۴-۱- مقدمه ۸۹
۴-۲- ضریب نفوذ پذیری خاک ۸۹
۴-۳- تعیین نفوذپذیری ۹۰
۴-۳-۱- روش‌های آزمایشگاهی ۹۰
۴-۳-۲- روش‌های صحرایی ۹۱
۴-۳-۳- روش‌های تجربی ۹۳
۴-۴- نفوذپذیری معادل در خاک‌های لایه‌ای ۹۳
۴-۴-۱- امتداد جریان به موازات لایه‌های خاک ۹۳

۴-۴-۲- امتداد جریان عمود بر لایه‌های خاک ۹۴
۴-۴-۳- نفوذپذیری معادل برای کل خاک ۹۵
۴-۵- تراوش آب در خاک ۹۶
۴-۵-۱- انرژی آب در خاک ۹۶
۴-۵-۲- معادله پیوستگی جریان آب در خاک ۹۸
۴-۵-۲-۱- تراوش یک بعدی ۹۹
۴-۵-۲-۲- تراوش دو بعدی ۱۰۰
۴-۵-۲-۲-۱- شبکه جریان و قوانین رسم آن ۱۰۱
۴-۵-۳- نیروی بلندکننده (Uplift) ۱۰۴

فصل پنجم / بهسازی خاک‌ها ۱۰۸
۵-۱- مقدمه ۱۰۸
۵-۲- لزوم و اهداف بهسازی ۱۰۸
۵-۳- خاک‌های مسئله‌دار ۱۰۹
۵-۳-۱- خاک‌های نرم و شل ۱۰۹
۵-۳-۲- خاک‌های انبساطی ۱۱۰
۵-۳-۳- خاک‌های فروریزشی ۱۱۱
۵-۳-۴- خاک‌های دستی ۱۱۱
۵-۴- روش‌های بهسازی ۱۱۱
۵-۴-۱- عملیات خاکی (برداشت خاک مشکل ساز با حفاری، جابجایی یا جایگزینی) ۱۱۲
۵-۴-۲- تراکم سطحی ۱۱۳
۵-۴-۳- تراکم دینامیکی ۱۱۳
۵-۴-۴- استفاده از مواد افزودنی ۱۱۵
۵-۴-۵- بهسازی بیولوژیکی ۱۱۵
۵-۴-۶- انفجار ۱۱۶
۵-۴-۷- پیش بارگذاری خاک‌ها ۱۱۷
۵-۴-۸- تراکم ویبره‌ای ۱۱۸
۵-۴-۸-۱- میله مرتعش ۱۱۸
۵-۴-۸-۲- تراکم ویبره‌ای شناور ۱۱۸
۵-۴-۸-۳- تراکم با ارتعاش و هوای فشرده ۱۱۸
۵-۴-۸-۴- تراکم توسط شمع کوبی ۱۱۹
۵-۴-۹- سیستم‌های حرارتی ۱۱۹
۵-۴-۱۰- تزریق ۱۲۰
۵-۴-۱۱- بهسازی الکتریکی ۱۲۱

۵-۴-۱۲- تسلیح خاک‌ها ۱۲۱
۵-۴-۱۳- ستون‌های سنگی ۱۲۲

فصل ششم / ظرفیت باربری پی‌های سطحی ۱۲۵
۶-۱- مقدمه ۱۲۵
۶-۲- حالات گسیختگی ۱۲۶
۶-۳- ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی نواری ۱۲۹
۶-۴- معادله عمومی ظرفیت باربری ۱۳۲
۶-۴-۱- نظریه مایرهوف ۱۳۳
۶-۵- ظرفیت باربری و شرایط آب زیرزمینی ۱۳۴
۶-۶- ضریب اطمینان (F.S) ۱۳۵
۶-۷- ظرفیت باربری محتمل ۱۳۶
۶-۸- سایر ملاحظات مربوط به ظرفیت باربری ۱۳۶
۶-۹- انتخاب خصوصیات مهندسی ۱۳۷
۶-۱۰- نکات مهم و ضروری ۱۳۷
۶-۱۱- تحلیل تعینی در برابر تحلیل احتمالاتی ۱۳۸

فصل هفتم / نشست شالوده‌های سطحی ۱۴۲
۷-۱- مقدمه ۱۴۲
۷-۲- مولفه‌های نشست در خاک‌ها ۱۴۳
۷-۲-۱- نشست‌های آنی ۱۴۳
۷-۲-۲- تحکیم اولیه ۱۴۶
۷-۲-۳- تحکیم ثانویه ۱۴۶
۷-۳- نشست شالوده‌های متکی بر بستر ماسه‌ای ۱۴۶
۷-۴- نشست شالوده سطحی متکی بر بستر رسی ۱۴۸
۷-۵- نرخ زمان نشست (سرعت رخ دادن نشست) ۱۵۲
۷-۶- ناحیه موثر ۱۵۲

فصل هشتم / فشار جانبی خاک ۱۵۷
۸-۱- مقدمه ۱۵۷
۸-۲- دسته‌بندی فشارهای جانبی خاک ۱۵۷
۸-۳- محاسبه ضریب فشار جانبی خاک ۱۶۰
۸-۳-۱- ضریب حالت سکون ۱۶۱
۸-۳-۲- ضریب فشار جانبی خاک در حالت محرک و مقاوم ۱۶۱

۸-۴- محاسبه فشار موثر قائم ناشی از سربار ۱۶۴
۸-۵- محاسبه فشار جانبی خاک ۱۶۵
۸-۶- محاسبه نیروی کل فشاری جانبی خاک ۱۶۵
۸-۷- سایر نیروهای اعمالی بر روی دیوار ۱۶۷
۸-۷-۱- بار ناشی از سربار ۱۶۷
۸-۷-۲- نیروی ناشی از زلزله ۱۶۸
۸-۷-۳- فشار ناشی از آب ۱۶۹
۸-۸- تراکم ۱۶۹
۸-۹- نشانه‌ها، کدها و استانداردهای ساختمانی ۱۶۹
۸-۱۰- نکات مهم ۱۷۰

فصل نهم / دیوارهای حائل ۱۷۵
۹-۱- مقدمه ۱۷۵
۹-۲- محاسبه نیروی کل فشاری محرک از سوی خاک ۱۷۷
۹-۳- سایر نیروهای اعمالی بر روی دیوار ۱۷۹
۹-۴- ضریب اطمینان ۱۷۹
۹-۵- دیوارهای متناسب ۱۸۰
۹-۶- مشخصات خاک پشت دیوار حائل ۱۸۰
۹-۷- لغزش ۱۸۱
۹-۸- واژگونی ۱۸۲
۹-۹- ظرفیت باربری خاک زیر دیوارهای حائل ۱۸۴
۹-۱۰- ملاحظات دیگر ۱۸۵
۹-۱۱- نکات مهم ۱۸۵

فصل دهم / فنداسیون‌های عمیق (شمع‌ها) ۱۹۱
۱۰-۱- مقدمه ۱۹۱
۱۰-۲- شمع‌ها ۱۹۳
۱۰-۲-۱- انواع شمع‌ها ۱۹۳
۱۰-۲-۲- شمع‌های اصطکاکی و اتکایی ۱۹۵
۱۰-۲-۳- ظرفیت باربری شمع ۱۹۶
۱۰-۲-۴- نشست شمع ۲۰۲
۱۰-۲-۵- آزمون بارگذاری استاتیکی شمع ۲۰۲
۱۰-۲-۶- آزمون دینامیکی ۲۰۲
۱۰-۳- شفت‌های حفاری شده ۲۰۳

۱۰-۳-۱- ظرفیت باربری ژئوتکنیکی شفت‌های حفاری شده ۲۰۳
۱۰-۳-۲- نشست ناشی از شفت‌های حفاری شده ۲۰۴

فصل یازدهم / شرحی بر فنداسیون ماشین‌آلات مرتعش ۲۰۹
۱۱-۱- مقدمه ۲۰۹
۱۱-۲- الزامات طراحی فنداسیون ماشین‌آلات مرتعش ۲۰۹
۱۱-۲-۱- گزارش ژئوتکنیک و پارامترهای طراحی ۲۰۹
۱۱-۲-۲- ارزیابی و مطالعات مربوط به گزینه‌های مختلف فنداسیون برای ماشین‌آلات مرتعش ۲۱۳
۱۱-۳- روش تحلیل ۲۱۴
۱۱-۴- اقدامات لازم در برابر ارتعاش ۲۱۷
مراجع ۲۱۹

پیشگفتار

امروزه مهندسی ژئوتکنیک یک موضوع و مسئله بسیار جالب محسوب می‌شود. بر خلاف بسیاری از رشته‌های مهندسی، این شاخه یک علم خالص نمی‌باشد، بلکه یک شکل هنری تلفیق یافته از قضاوت و تجربه می‌باشد تا بتوان راه حل‌های رضایت بخشی را کسب نمود. لذا در این راستا منابع متعددی در زمینه اصول و مبانی پایه‌ای در مهندسی ژئوتکنیک به رشته تحریر درآمده است که اغلب آنها به صورت مفصل به بررسی اهم مباحث مرتبط با علم مکانیک خاک و مهندسی پی پرداخته‌اند. در این نوشتار به منظور آشنایی با اصول مبانی ژئوتکنیک در بین گرایش‌های گوناگون مهندسی عمران و ضرورت آشنایی مهندسین محاسب از جمله مهندسین ژئوتکنیک و دانشجویان زمین شناسی مهندسی احساس نیاز به جمع‌آوری مطالب کاربردی شد. لذا در این راستا اقدام به ارائه عمده مطالب به زبانی ساده در یک مجموعه کاربردی شده است.

نوشتار حاضر مشتمل بر ۱۱ فصل می‌باشد که به ترتیب از اصول و مبانی تحقیقات صحرایی و استراتژی نمونه‌گیری در سایت‌های مهندسی، روابط منطقی و مفاهیم پایه ای مکانیک خاک و نیز مدلسازی عددی رفتار خاک‌ها و غیره آغاز گشته و در ادامه آن به اهم مطالب مرتبط با اصول مهندسی پی‌های سطحی و عمیق از جمله محاسبه نشست‌ها و ظرفیت باربری نهایی آنها پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در فصل پایانی نوشتار حاضر به اصول اولیه فنداسیون مرتبط با ماشین آلات مرتعش پرداخته شده است. البته شایان ذکر است که موضوعات ارائه شده در این نوشتار برای بازه وسیعی از مخاطبان انتخاب شده‌اند و شامل تمام موضوعات علم ژئوتکنیک نمی‌باشد. در واقع جستجو در اینترنت به منظور جبران ضعف مذکور اطلاعات زیادی را به ما نشان خواهد داد. همچنین خوانندگان علاقه مند می‌توانند یکی از کتاب‌های درسی و سایر نشریات مربوط به مهندسی ژئوتکنیک را برای کسب اطلاعات

بیشتر در مورد موضوعات مورد بحث در اینجا و همچنین موضوعاتی که ممکن است در کتاب حاضر به آن پرداخته نشده باشد، استفاده نماید. در کتاب حاضر سعی شده است که به دنبال مطالب ارائه شده تا جای ممکن نمونه مثال‌های کاربردی و مرتبط در خلال برخی از فصول ارائه گردد تا سطح دانش خوانندگان در مواجه با مسائل گوناگون ژئوتکنیک رشد یابد. در این نوشتار بعضی مفاهیم پایه از کتاب Basic Geotechnical Engineering for Non-Geotechnical Engineers به تالیفRichard P. Weber اقتباس یافته و سعی بر آن شده تا کاستی‌های مفاهیم نظری که در منبع مذکور بیان نشده است به زبان هرچه ساده‌تر و البته بر پایه مفاهیم مقدماتی ارائه گردد.

هدف از متن حاضر، ایجاد شناخت‌های اولیه برای مهندسین عمران، ژئوتکنیک و سایر علوم وابسته در مقاطع پایه‌ای کارشناسی و تحصیلات تکمیلی به منظور افزایش درک آنان از موضوع مورد نظر با استفاده از اطلاعات اساسی مربوط به مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. موضوعاتی که در این کتاب مورد بحث قرار گرفته‌اند به صورت ساده شده می‌باشند و جهت اطلاعات بیشتر نیاز به مراجع مربوطه می‌باشد.

در پایان از همکاری دوستانی که در امر ارائه برخی از مباحث یاری رسانده‌اند نهایت قدردانی می‌گردد و امید است با توجه به نظرات و پیشنهادات خوانندگان بتوان نقایص و ایرادات موجود را در ویرایش های بعدی اصلاح نمود.

امیدوار به ارائه هر چه بهتر مباحث این کتاب در ویرایش‌های آتی به واسطه نظردهی خوانندگان در ارائه و اصلاح برخی از مطالب خواهیم بود.

مولفین

فصل اول

تحقیقات درون سایتی و استراتژی نمونه‌گیری

۱-۱- مقدمه

پروژه‌های مهندسی عمران نظیر ساختمان‌ها، پل‌ها، سدهای خاکی و جاده‌ها نیاز به اطلاعات زیرزمینی کاملی به عنوان بخشی از فرایند طراحی دارند. زمین واقع شده در زیر پاهای ما در نهایت از تمامی سازه‌های واقع شده بر روی آن حمایت نموده و لذا به منظور رسیدن به موفقیت در چنین پروژه‌هایی این زمین نباید تحت بار سازه‌های رویین دچار شکست و گسیختگی شود.

وظیفه مهندس ژئوتکنیک کشف شرایط زیرزمینی در محل یک پروژه، تعیین ظرفیت باربری خاک به منظور تحمل بارهای وارده بر آن بدون ایجاد واژگونی یا حرکات و جابجایی‌های غیرقابل تحمل برای سازه رویین و در نهایت ارائه توصیه‌های جایگزین مناسب برای فنداسیون حاضر می‌باشد. این وظایف همچنین ممکن است به ارائه یک سری از توصیه‌ها در سایر زمینه‌های مرتبط مانند آب‌های زیرزمینی و عملیات تحقیقاتی مرتبط با زمین پروژه منجر شود. معمولاً محدوده برنامه اکتشافات خاک شامل تعداد اکتشافات، تجهیزات و آزمایش‌هایی که توسط یک طراح حرفه‌ای مانند مهندس ژئوتکنیک تعیین شده است، می‌باشد. لذا نمونه برداری، توصیف خاک، انجام آزمون‌های شاخص و نیز طبقه‌بندی مصالح ژئوتکنیکی با هدف شناسایی اولیه خاک انجام می‌پذیرد. چنانچه در یک پروژه مرتبط با خاک به هر علت عملیات نمونه‌گیری در راستای شناسایی‌های منطقه صورت نپذیرد، تکمیل اطلاعات مورد نیاز در روند طراحی پروژه مستلزم صرف زمان و هزینه‌های زیادتری می‌گردد.

مهندس ژئوتکنیک از اکتشاف انجام شده برای به دست آوردن نمونه‌های خاکی به منظور طبقه‌بندی و اهداف آزمایشی استفاده می‌نماید. انواع متداول روش‌های اکتشافی عبارتند از:

- ✓ گمانه‌های آزمایشی جهت انجام آزمون نفوذ استاندارد
- ✓ انجام آزمون مخروط نفوذ در خاک
- ✓ حفاری چاله آزمایشی

مباحث بیشتر در رابطه با موارد فوق در ادامه این فصل مورد بررسی واقع می‌گردد.

۱-۲- مراحل تحقیقات یک سایت

امروزه با توجه به ابعاد و موقعیت پروژه و نیز موقعیت طرح از لحاظ جانمایی در مرکز شهر و یا خارج از شهر، مراحل اصلی تحقیقات در یک سایت مشخص به شرح زیر می‌باشد:

- ✓ در مرحله ابتدایی مطالعات (desk study) تمامی اطلاعات جمع‌آوری شده در جهت فهم شرایط زمین در سایت مورد نظر تحت یک سری ملاحظات بکار برده می‌شوند. از آنجا که سایت‌های

درون شهری ممکن است هنوز در ارتباط با زندگی افراد باشد لذا فعالیت‌های انسانی روی مطالعات ما تاثیرگذار می‌باشد. لذا بایستی تحقیقات جامعی در این زمینه نیز انجام شود.

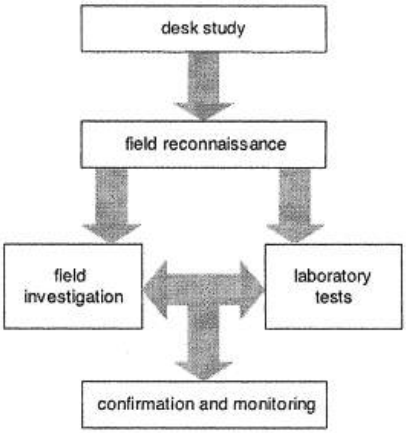
- ✓ در طی فاز شناسایی حوزه (field reconnaissance) نقشه‌ای که شامل اطلاعات زمین‌شناسی، آب‌شناسی و ژئومورفولوژی منطقه و اثرات ناشی از انسان است، تهیه می‌شود. چنین نقشه‌هایی بازبینی‌های مشاهدات قبلی، قطعات زیرسازه‌ای و فنداسیون، بخش‌های آلوده شده، سایت‌های مدفن زباله و درجه و میزان تخریب زمین‌های شهری را به ما نشان می‌دهد.

به عنوان مثال چنانچه سنگ بستر در معرض زمین و سطح زمین باشد توجه بسیار زیادی به شرایط تکتونیکی منطقه و نیز الگوهای شکستگی منطقه باید انجام شود. نمونه‌هایی از خاک و سنگ بمنظور شناسایی نوع مصالح منطقه به کمک آزمون‌های برجا صورت می‌گیرد و نیز میزان مقاومت آنها و شرایط بهم‌خوردگی آنها در منطقه باید مدنظر قرار گرفته شود.

درواقع شرایط آب زیرزمینی، اکوسیستم منطقه، پوشش گیاهی و جانوری و... شامل ساختمانها، جاده‌ها و دیگر منابع زیرساختاری می‌توانند دوباره پس از گسترش مجدد سایت یا در طی عملیات اصلاح منطقه استفاده شوند.

به منظور پرهیز از طرح موارد غیرمنتظره که ممکن است در پروژه‌ها توصیه گردد، عملیات فوق ضروری می‌باشد.

- ✓ در طی فاز مطالعات صحرایی وضع زمین شناسی و آب شناسی منطقه با بکارگیری از ابزار و تجهیزات پیچیده‌تری شناسایی می‌شوند. آزمون‌های صحرایی ویژه و خاصی برای اندازه‌گیری خصوصیات مقاومتی زیرسطحی مصالح و بررسی شرایط آب شناسی منطقه انجام می‌شوند. نمونه‌های گرفته شده در طی تحقیقات توسط محققان مجرب در آزمایشگاه‌های خاصی آنالیز می‌شوند. آزمون‌های استاندارد شامل آنالیز ترکیب‌بندی و ساختاربندی نمونه‌ها، مشخصات مقاومتی، خصوصیات هیدرولیکی و درجه آلودگی می‌باشند.

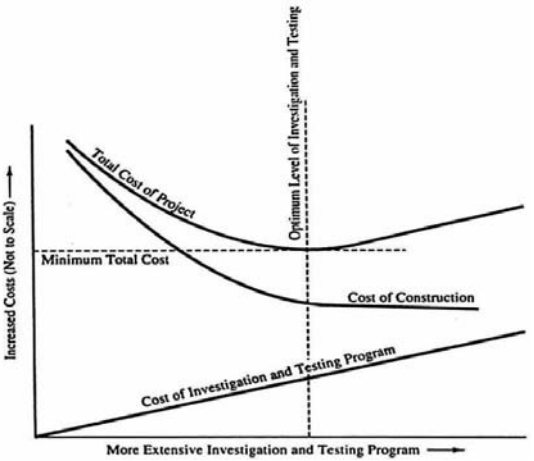


شکل (۱-۱): استراتژی تحقیقات صحرایی[۱۴]

همچنین آزمایشگاه‌های محلی و برجا (mobile laburatory) اجازه می‌دهند که آنالیزها بصورت تعاملی و سریع روی نمونه‌های سایت انجام شوند و درنهایت امکان تفسیر بصری و عینی شرایط زمین را فراهم آورند.

هر مرحله از تحقیقات سایت شامل یک رشته از گزارش‌ها می‌باشد. این گزارشات تصمیم گیرندگان را در انتخاب بهترین استراتژی برای پیشرفت پروژه هدایت می‌کند. نوع گزارشات بایستی به گونه‌ای باشد که کاملا واضح و قابل فهم برای تمامی خوانندگان مبتدی بمنظور پرهیز از تفسیر اشتباه باشد که در نهایت فرایند تصمیم‌گیری به صورت حرفه‌ای صورت پذیرد.

البته باید توجه داشت که با پیشروی در هر مرحله و فاز مطالعاتی هزینه‌ها بالا می‌روند بگونه‌ای که: پس از مرحله مطالعات دفتری و شناساسایی‌های صحرایی (شناسایی حوزه) امکانات تکنیکی پروژه تحلیل می‌شوند و در نهایت منجر به تصمیم‌گیری نهایی می‌گردد که آیا پروژه ادامه پیدا کند یا اینکه متوقف شود. درمورد ادامه دادن پروژه، فاز هزینه‌های اصلی آغاز می‌شود. هزینه همه فازها برای تحقیقات سایت حدودا کمتر از ۵ درصد کل هزینه پروژه است ولیکن در برخی موارد امکان دارد که حتی از یک درصد هم کمتر باشد. برای نمونه، با توجه به شکل (۱-۲) می‌توان روند تغییر هزینه‌ها در طی یک پروژه را ملاحظه نمود. همچنین مطابق جدول (۱-۱) هزینه کاوش‌های ژئوتکنیکی بر اساس تحقیقات Rowe بسته به نوع عملیات صورت گرفته، ارائه شده است.



شکل (۱-۲): تاثیر هزینه مطالعات ژئوتکنیک بر بهینه‌سازی ساخت و اجرا پروژه

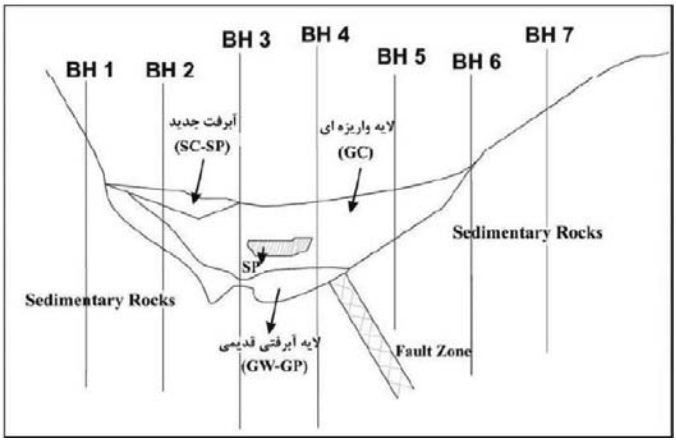
جدول (۱-۱): هزینه کاوش‌های صحرایی (Rowe 1972) [۱۵]

نوع کار	درصدی از هزینه کل پروژه	درصدی از هزینه کل عملیات خاکی و پی سازی
سدهای خاکی	۰/۸۹–۳/۳	۱/۱۴–۵/۲
خاکریزها	۰/۱۲–۰/۱۹	۰/۱۶–۰/۲
دایک‌ها	۰/۲۳–۰/۵	۰/۴۲–۱/۶۷
پل‌ها	۰/۱۲–۰/۵	۰/۲۶–۱/۳

نوع کار	درصدی از هزینه کل پروژه	درصدی از هزینه کل عملیات خاکی و پی سازی
ساختمان‌ها	۰/۰۵-۰/۲۲	۰/۵-۲
جاده‌ها	۰/۲-۱/۵۵	۱/۶-۵/۶۷
خطوط آهن	۰/۶-۲	۳/۵
متوسط کلی پروژه‌ها	۰/۷	۱/۵

البته باید توجه داشت که تحقیقات در رسته منابع آلاینده، ممکن است هزینه تحقیقات را افزایش دهد. این باور غلط است که بایستی بودجه مربوط به هزینه‌های مطالعات سایت را پایین آورد کـه امـروزه در برخی پروژه‌ها رایج می‌باشد. با این تصور اشتباه فقـط بخـش کمـی از سـایت مربوطـه مـورد مطالعـه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

مطالعه یک ترانشه موجب می‌شود که بخش محدودی از زمین، مورد بررسی و شناسـایی قـرار گیـرد و اطلاعاتی صرفاً مربوط به طول ترانشه نمایش دهد. تحقیقات ژئوفیزیکی نیز در امر تفسیر نتـایج چنـین شرایطی بسیار ابهام آمیز می‌باشند. لذا احتمال سوء تدبیر در نتایج زیاد شده و در چنین مواردی مجبور به انجام تحقیقات مکملی به منظور جبران تردیدها و سوء تدبیرها خواهیم شد. لذا مطـابق مثـال ارائـه شده در شکل (۱-۳) ممکن است یکسری از نواحی در طی مطالعات و گمانه‌زنی‌ها شناسایی نشده باشد (در شکل زیر، BH عبارتست از گمانه‌های اکتشافی حفر شده).



شکل(۱-۳): ساختگاه یک سد که در آن گمانه‌های حفر شده، لایه سست ماسه‌ای و ناحیه گسلش را شناسایی نکرده است

- ✓ فاز تاییدیه (confirmation phase): زمانی که ساخت و سازها آغاز می‌شوند، رخنمون‌های جدیدی بدست می‌آیند. چنین رخنمون‌هایی باعث شده که مقایسه‌ای بین شرایط پیش‌بینی شده سایت و زمین با مشاهدات بدست آمده را بتوان انجام داد. در طی این فاز اطلاعات جدیدی ممکن است منجر به تنظیم مجدد برنامه ریزی ما و نیز عملیات ساخت و ساز شوند.

پس از تکمیل یافتن پروژه، کارایی طولانی مدت که مانیتورینگ یا پایش نامیده می‌شود، آغاز می‌گـردد. این امر ممکن است شامل پایش کیفیت آب زیرزمینی باشد که در جهت کنترل موفقیت پـروژه در امـر

اقدامات آلودگی زدایی انجام شده و یا مشاهده نشست ساختمان‌های جدید و... باشد.

شکل(۱-۴): کاوش‌های زیست محیطی بر روی سنگ‌های باطله (Western Mining Corp. Australia)[۱۴]

همچنین به طور عمده مهندس ژئوتکنیک به دو بخش اطلاعاتی زیر که از برنامه اکتشافی حاصل شده است، علاقه مند می‌باشد. این اطلاعات را می‌توان برای تهیه گزارش مناسبی برای کار مهندسان مورد استفاده قرار داد و شامل موارد زیر است:

- خصوصیات مصالح و شرایط موجود، از جمله آبهای زیرزمینی
- خواص مهندسی مواد و مقادیر محاسبه شده برای آن‌ها

نوع مواد موجود در محل مهم می‌باشد؛ زیرا نشان می‌دهد که چگونه یک خاک تحت بار وارده از خود واکنش نشان می‌دهد و در هر صورت نشان دهنده این است که آیا خاک موجود در محل حتی به عنوان یک بستر برای حمایت از فنداسیون‌ها مناسب است یا خیر. به عنوان مثال، خاک رس کاملا متفاوت نسبت به ماسه از خود واکنش نشان می‌دهد. خاک نباتی و خاک‌های سست ریخته شده در زیر بستر یک سازه پیشنهادی به منظور تحمل سازه رویین مناسب نمی‌باشد. در واقع می‌بایست مواد ضعیف برداشته شوند و یا تثبیت شوند و یا اینکه فنداسیون‌ها می‌بایست در لایه (لایه‌های) زیرین خود با مصالح مستحکم و مناسب پشتیبانی شود. لذا با توجه به اندازه ذرات موجود در منطقه بر مبنای دو استاندارد ASTM و MIT می‌توان دسته بندی کلی برای انواع خاک‌ها مطابق جدول (۱-۲) در نظر گرفت.

جدول (۱-۲): طبقه‌بندی خاک‌های منطقه بر اساس اندازه ذرات تشکیل دهنده طبق استانداردهای ASTM و MIT

استاندارد ASTM		استاندارد MIT	
طبقه‌بندی	اندازه ذرات (mm)	طبقه‌بندی	اندازه ذرات (mm)
شن	بزرگتر از ۴/۷۵	شن	بزرگتر از ۲/۰۰
ماسه درشت	۲/۰۰–۴/۷۵	ماسه	۰/۰۶ –۲/۰۰
ماسه متوسط	۰/۴۲۵–۲/۰۰	لای	کوچکتر از ۰/۰۶
ماسه ریز	۰/۰۷۵ –۰/۴۲۵	رس	کوچکتر از ۰/۰۰۵
رس و لای	کوچکتر از ۰/۰۷۵	–	–