

دانشگاه سیم نور

مکانیک خاک

دکتر سیروس شاکری

دکتر آرش جاعل

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه ملی، که یک واجب دینی است.^۱

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه مطالعه هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

سوره‌ای که بر آن فرستاده عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار	سیزده
فصل اول. خاک و اجزای تشکیل دهنده آن.....	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری.....	۱
مقدمه	۱
۱-۱ تعریف خاک.....	۲
۱-۱-۱ پیدایش و تشکیل خاک	۲
۱-۱-۲ کانی‌های رسی	۵
۱-۱-۳ ساختمان خاک.....	۱۶
۱-۱-۴ دانه‌بندی خاک	۱۶
۱-۱-۵ منحنی دانه‌بندی	۲۵
۱-۱-۶ معرفی ضرایبی برای مقایسه خاک‌ها (اندازه مؤثر، ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی).....	۲۷
خلاصه فصل اول.....	۲۸
مسائل حل شده فصل اول	۲۸
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول	۳۲
خودآزمایی تشریحی فصل اول	۳۳
فصل دوم. ترکیب خاک	۳۵
هدف کلی	۳۵
هدف‌های یادگیری.....	۳۵
مقدمه	۳۵
۱-۲ ترکیب خاک	۳۶

۳۶	۱-۱-۲ روابط وزنی-حجمی
۳۸	۲-۱-۲ رابطه بین وزن مخصوص، پوکی و میزان رطوبت
۳۸	۳-۱-۲ تراکم نسبی
۴۰	۴-۱-۲ سفتی (قوام) خاک
۴۱	۵-۱-۲ حد مایع (حد روانی)
۴۵	۶-۱-۲ حد خمیری
۴۶	۷-۱-۲ حد انقباض
۴۶	۸-۱-۲ نشانه مایع
۴۷	۹-۱-۲ فعالیت
۴۷	۱۰-۱-۲ ساختار خاک
۴۸	خلاصه فصل دوم
۴۹	مسائل حل شده فصل دوم
۵۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۵۷	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۵۹	فصل سوم. آشنایی با سیستم‌های طبقه‌بندی خاک
۵۹	هدف کلی
۵۹	هدف‌های یادگیری
۵۹	مقدمه
۶۰	۱-۳ طبقه‌بندی خاک
۶۱	۱-۱-۳ طبقه‌بندی بافت
۷۰	خلاصه فصل سوم
۷۱	مسائل حل شده فصل سوم
۷۳	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۷۵	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۷۷	فصل چهارم. جریان آب در خاک
۷۷	هدف کلی
۷۷	هدف‌های یادگیری
۷۸	مقدمه
۷۸	۱-۴ جریان آب در خاک
۷۹	۱-۱-۴ گرا دیان (شیب) هیدرولیکی
۸۱	۲-۱-۴ قانون داریسی
۸۱	۳-۱-۴ عوامل مؤثر بر ضریب نفوذپذیری
۸۳	۴-۱-۴ تعیین ضریب نفوذپذیری در آزمایشگاه
۸۷	۵-۱-۴ نفوذپذیری معادل در خاک‌های لایه‌بندی شده

۹۰	۶-۱-۴ آزمایش نفوذپذیری در صحرا با استفاده از پمپاژ چاه
۹۲	۷-۱-۴ تعیین ضریب نفوذپذیری از طریق چاه گمانه
۹۲	۸-۱-۴ معادله جریان آب در خاک
۹۴	۹-۱-۴ شبکه جریان
۹۸	۱۰-۱-۴ فشار برکنش در زیر سازه‌های هیدرولیکی
۹۹	۱۱-۱-۴ شیب خروجی و ضریب ایمنی در مقابل جوشش
۹۹	خلاصه فصل چهارم
۱۰۰	مسائل حل شده فصل چهارم
۱۰۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۱۰۸	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۱۱۱	فصل پنجم. تنش مؤثر در خاک
۱۱۱	هدف کلی
۱۱۱	هدف‌های یادگیری
۱۱۲	مقدمه
۱۱۲	۱-۵ مفهوم تنش مؤثر
۱۱۳	۱-۱-۵ تنش در توده خاک اشباع غیر نشتی
۱۱۴	۲-۱-۵ تنش در خاک اشباع با جریان نشتی
۱۱۹	۳-۱-۵ نیروی نشت (نیروی زه آب)
۱۱۹	۴-۱-۵ بالازدگی در پای سپر کوبیده شده در لایه نفوذپذیر
۱۲۲	۵-۱-۵ استفاده از فیلتر برای افزایش ضریب اطمینان در مقابل جوشش
۱۲۳	۶-۱-۵ تنش مؤثر در خاک‌های نیمه اشباع
۱۲۴	۷-۱-۵ موئینگی در خاک
۱۲۴	۸-۱-۵ تنش مؤثر در ناحیه صعود موئینگی
۱۲۴	۹-۱-۵ اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای
۱۲۵	۱۰-۱-۵ چاه مشاهده‌ای
۱۳۷	خلاصه فصل پنجم
۱۳۸	مسائل حل شده فصل پنجم
۱۴۳	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۴۵	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۱۴۷	فصل ششم. تنش در توده خاک
۱۴۷	هدف کلی
۱۴۷	هدف‌های یادگیری
۱۴۷	مقدمه
۱۴۸	۱-۶ تنش در توده خاک

۱۴۸	۶-۱-۱ تنش قائم و برشی در امتداد یک صفحه
۱۵۰	۶-۱-۲ دایره مور برای تنش
۱۵۳	۶-۱-۳ تنش به علت بار متمرکز
۱۵۴	۶-۱-۴ تنش قائم به علت بار خطی
۱۵۵	۶-۱-۵ تنش به علت بار نواری (عرض محدود و طول نامحدود)
۱۵۷	۶-۱-۶ تنش قائم زیر یک سطح با شکل دلخواه
۱۵۹	۶-۱-۷ روش تقریبی
۱۵۹	خلاصه فصل ششم
۱۶۰	مسائل حل شده فصل ششم
۱۶۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۱۶۸	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۱۷۱	فصل هفتم. نشست خاک
۱۷۱	هدف کلی
۱۷۱	هدف‌های یادگیری
۱۷۲	مقدمه
۱۷۲	۷-۱ نشست خاک
۱۷۳	۷-۱-۱ نشست تحکیم
۱۷۴	۷-۱-۲ تحکیم یک بعدی
۱۷۵	۷-۱-۳ آزمون آزمایشگاهی یک بعدی
۱۷۷	۷-۱-۴ نمودار نسبت تخلخل - فشار
۱۷۹	۷-۱-۵ رس‌های عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته
۱۸۰	۷-۱-۶ تعیین تنش پیش تحکیمی خاک
۱۸۱	۷-۱-۷ تأثیر دست خوردگی در نمودار تخلخل - فشار
۱۸۱	۷-۱-۸ روش تجربی برای تخمین رابطه تخلخل - فشار
۱۸۲	۷-۱-۹ محاسبه نشست به علت تحکیم اولیه یک بعدی
۱۸۳	۷-۱-۱۰ نشانه فشردگی
۱۸۳	۷-۱-۱۱ نشانه تورم
۱۸۴	۷-۱-۱۲ نشست به علت تحکیم ثانویه
۱۸۴	۷-۱-۱۳ سرعت تحکیم
۱۸۷	۷-۱-۱۴ تعیین ضریب تحکیم
۱۸۷	۷-۱-۱۴-۱ روش لگاریتم زمان
۱۸۹	۷-۱-۱۴-۲ روش جذر زمان
۱۹۰	۷-۱-۱۵ نشست آبی
۱۹۰	۷-۱-۱۵-۱ تأثیر نوع بار بر میزان نشست آبی خاک
۱۹۲	۷-۱-۱۶ محاسبه نشست آبی بر پایه تئوری الاستیسته

۱۹۳	 ۱۷-۱-۷ نشست کل شالوده
۱۹۳	 خلاصه فصل هفتم
۱۹۴	 مسائل حل شده فصل هفتم
۲۰۲	 خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم
۲۰۶	 خودآزمایی تشریحی فصل هفتم
۲۰۹	 فصل هشتم. مقاومت برشی خاک
۲۰۹	 هدف کلی
۲۰۹	 هدف‌های یادگیری
۲۰۹	 مقدمه
۲۱۰	 ۱-۸ مقاومت برشی خاک
۲۱۱	 ۱-۱-۸ حالات مختلف تنش‌های اصلی
۲۱۳	 ۱-۱-۸-۱ مقاومت ناشی از چسبندگی
۲۱۳	 ۱-۱-۸-۲ مقاومت ناشی از اصطکاکی
۲۱۴	 ۱-۱-۸-۲ معیار گسیختگی مور-کولمب
۲۱۶	 ۱-۱-۸-۳ تعیین پارامترهای مقاومت برشی در آزمایشگاه
۲۱۶	 ۱-۱-۸-۳ آزمایش برش مستقیم
۲۲۱	 ۱-۱-۸-۲ آزمایش برشی سه محوری
۲۲۷	 ۱-۱-۸-۴ آزمایش برش پره
۲۳۰	 ۱-۱-۸-۵ ضرایب اسکمپتون برای فشار منفذی
۲۳۶	 خلاصه فصل هشتم
۲۳۶	 مسائل حل شده فصل هشتم
۲۴۵	 خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هشتم
۲۴۸	 خودآزمایی تشریحی فصل هشتم
۲۵۱	 فصل نهم. فشار جانبی خاک
۲۵۱	 هدف کلی
۲۵۱	 هدف‌های یادگیری
۲۵۱	 مقدمه
۲۵۲	 ۱-۹ فشار جانبی خاک
۲۵۴	 ۱-۱-۹ فشار خاک در حال سکون
۲۵۵	 ۱-۱-۹-۱ فشار خاک در حال سکون برای خاک نیمه غوطه‌ور
۲۵۸	 ۱-۱-۹-۲ تئوری رانکین برای تعیین فشار جانبی خاک
۲۶۱	 ۱-۱-۹-۳ توزیع فشار جانبی خاک بر دیوار حائل
۲۶۱	 ۱-۱-۹-۳ خاک‌ریز غیر چسبنده با سطح افقی
۲۶۱	 ۱-۱-۹-۲ خاک‌ریز غیر چسبنده همراه با آب زیرزمینی و سربار

۲۶۲	 خاک ریز چسبنده با سطح افق
۲۶۴	 نظریه فشار خاک کولمب
۲۶۵	 حالت متحرک کولمب
۲۶۶	 حالت مقاوم کولمب
۲۶۷	 پایداری دیوار حائل
۲۷۱	 خلاصه فصل نهم
۲۷۱	 مسائل حل شده فصل نهم
۲۷۷	 خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل نهم
۲۷۸	 خودآزمایی تشریحی فصل نهم
۲۸۱	 فصل دهم. پایداری شیروانی‌های خاکی
۲۸۱	 هدف کلی
۲۸۱	 هدف‌های یادگیری
۲۸۱	 مقدمه
۲۸۲	 ۱-۱۰ پایداری شیروانی‌های خاکی
۲۸۳	 ۱-۱۰ ضریب ایمنی (ضریب اطمینان)
۲۸۴	 ۱-۱۰ پایداری شیروانی نامحدود بدون نشست (بدون زه آب)
۲۸۷	 ۱-۱۰ شیروانی محدود
۲۸۷	 ۱-۱۰ تحلیل شیروانی محدود با سطح لغزش صفحه‌ای
۲۸۸	 ۱-۱۰ تحلیل شیروانی محدود با سطح لغزش استوانه‌ای (دایره‌ای)
۲۹۰	 ۱-۱۰ روش توده برای تحلیل پایداری (سطح لغزش استوانه‌ای)
۲۹۴	 ۱-۱۰ روش قطعه
۲۹۶	 خلاصه فصل دهم
۲۹۶	 مسائل حل شده فصل دهم
۳۰۲	 خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دهم
۳۰۳	 خودآزمایی تشریحی فصل دهم
۳۰۷	 فصل یازدهم. تراکم خاک
۳۰۷	 هدف کلی
۳۰۷	 هدف‌های یادگیری
۳۰۷	 مقدمه
۳۰۸	 ۱-۱۱ اصول کلی تراکم
۳۰۹	 ۱-۱۱ آزمایش پروکتور استاندارد
۳۱۳	 ۱-۱۱ عوامل مؤثر در تراکم
۳۱۴	 ۱-۱۱ آزمایش پروکتور اصلاح شده
۳۱۵	 ۱-۱۱ روش آشتو

۳۱۷	۱۱-۶ نقش توأم آب و انرژی تراکم بر روی رفتار و ساختار خاک‌ها
۳۱۹	۱۱-۷ روابط تجربی برای بیان رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک
۳۲۱	۱۱-۸ تراکم کارگاهی
۳۲۶	۱۱-۹ اندازه‌گیری وزن مخصوص خاک خشک در کارگاه
۳۲۶	۱۱-۹-۱ روش مخروط ماسه
۳۲۹	۱۱-۹-۲ روش بالون لاستیکی
۳۳۰	خلاصه فصل یازدهم
۳۳۰	مسائل حل شده فصل یازدهم
۳۳۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل یازدهم
۳۳۷	خودآزمایی تشریحی فصل یازدهم
۳۳۹	فصل دوازدهم. آزمایشگاه مکانیک خاک
۳۳۹	هدف کلی
۳۳۹	هدف‌های یادگیری
۳۴۰	مقدمه
۳۴۰	۱۲-۱ آزمایش تعیین میزان رطوبت خاک
۳۴۱	۱۲-۲ آزمایش تعیین چگالی بخش جامد خاک
۳۴۲	۱۲-۳ آزمایش هیدرومتری
۳۴۵	۱۲-۴ آزمایش حد روانی
۳۴۷	۱۲-۵ آزمایش حد خمیری
۳۴۹	۱۲-۶ آزمایش حد انقباض
۳۵۱	۱۲-۷ طبقه‌بندی مهندسی خاک
۳۵۱	۱۲-۷-۱ روش گام‌به‌گام طبقه‌بندی آشتو
۳۵۴	۱۲-۷-۲ روش گام‌به‌گام برای سیستم طبقه‌بندی یکنواخت
۳۵۶	۱۲-۸ آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت در ماسه
۳۵۸	۱۲-۹ آزمایش نفوذپذیری با بار نزولی
۳۵۹	۱۲-۱۰ آزمایش تراکم استاندارد
۳۶۴	۱۲-۱۱ آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده
۳۶۴	۱۲-۱۲ تعیین وزن مخصوص صحرائی تراکم به روش مخروط ماسه
۳۶۷	۱۲-۱۳ آزمایش بالون لاستیکی
۳۶۹	۱۲-۱۴ آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه
۳۷۳	۱۲-۱۵ آزمایش فشاری محدود نشده
۳۷۶	۱۲-۱۶ آزمایش تحکیم
۳۷۹	۱۲-۱۷ آزمایش سه محوری
۳۸۱	۱۲-۱۷-۱ آزمایش تحکیم نیافته-زهکشی نشده (UU)
۳۸۳	۱۲-۱۷-۲ آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU)

۳۸۵	 ۱۲-۱۸ آزمایش باربری کالیفرنیا (CBR)
۳۹۱	 خلاصه فصل دوازدهم
۳۹۳	 پاسخنامه خودآزمایی های چهارگزینه ای
۳۹۵	 واژه نامه (انگلیسی - فارسی)
۴۱۱	 منابع

پیشگفتار

خاک فراوان‌ترین ماده‌ای است که در دسترس بشر قرار گرفته است و دارای نقش‌های مختلفی در زندگی بشر است. تقریباً تمام سازه‌های ساخته دست بشر بر روی خاک بنا می‌شوند، از این رو رفتار خاک به عنوان تکیه‌گاه و زیربنای سازه‌های دیگر می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. با توجه به پیچیدگی‌های مطالعه رفتار خاک به تدریج علمی به نام مکانیک خاک از قرن هجدهم میلادی شکل گرفت. مکانیک خاک به مطالعه رفتار خاک تحت تنش و کرنش در شرایط ایده‌آل می‌پردازد. از این لحاظ مکانیک خاک را می‌توان مشتق شده از رشته مهندسی مکانیک دانست. در واقعیت نهشته‌های طبیعی خاک در اغلب حالت از مصالح مختلف تشکیل شده‌اند و رفتار آن‌ها با رفتار یک ماده همگن تغییر می‌کند. از این رو در عمل شرایط واقعی در صحرا با شرایط ایده‌آل تفاوت دارد، با این وجود، علم مکانیک خاک به شناخت و پیش‌بینی رفتار خاک در شرایط واقعی کمک شایانی می‌کند؛ بنابراین هدف از مطالعه مکانیک خاک، ارزیابی خاک‌ها بر اساس رفتارشان، پیش‌بینی عکس‌العمل خاک تحت بارگذاری و آشنایی با کاربردهای آن در مصارف عمرانی است. طیف وسیعی از رشته‌های مرتبط با مهندسی عمران از جمله ابنیه، آب، ژئوتکنیک، راه، زمین‌شناسی و ... می‌بایست با مکانیک خاک آشنایی کافی داشته باشند. بدیهی است که هرگونه عدم شناخت از خصوصیات خاک زیر سازه‌ها منجر به عدم پایداری ابنیه ساخته شده بر روی آن‌ها می‌گردد.

بهتر است در ادامه به ذکر تاریخچه‌ای مختصر از مکانیک خاک پرداخته شود. خاک از دیرباز توسط انسان‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در متون غربی، مهندسان رومی به‌عنوان تشخیص‌دهنده اهمیت خاک در پایداری سازه‌ها شناخته شده‌اند. آن‌ها به انواع خاک‌ها در طراحی پی‌ها توجه زیادی می‌نمودند؛ اما قدیمی‌ترین تحقیقات دانشگاهی و تئوریک در زمینه مکانیک خاک به قرن ۱۸ میلادی برمی‌گردد. دانشمند پیشتازی که در این دوره بر پیشرفت مکانیک خاک متمرکز شد کولمب^۱ بود که در سال ۱۷۷۶ تئوری خود را در مورد فشار جانبی خاک ارائه داد. این تئوری تا سال‌های طولانی به‌عنوان تنها تئوری موفق در محاسبات فشار وارد بر دیوار به‌کار می‌رفت. تئوری کولمب به‌عنوان اولین کار اساسی در زمینه مکانیک خاک مطرح شده است و همچنان به‌کار می‌رود. ایشان علاقه‌مند به حفظ دژهای قدیمی بود که در اثر حملات توپخانه فرو می‌ریختند. کولمب با ایجاد توده‌های شیب‌دار در جلوی دیواره‌های دژ، آن‌ها را از خطرات ضربات گلوله‌های توپ حفظ کرد. او متوجه شد که توده خاک یک نیروی جانبی به دیوار وارد می‌کند که می‌تواند سبب فاصله گرفتن آن از توده خاک، لغزش و یا حتی واژگونی دیوار شود. کولمب یک معیار شکست نیز برای خاک تعریف کرد که همچنان معتبر است.

دارسی^۲ قانون دبی تراوش را ارائه نمود و پاولاسکی^۳ مطالعات اساسی در مورد تئوری حرکت آب‌های زیرزمینی انجام داد. این تحقیقات مبنای روش‌های نوین زهکشی و نفوذپذیری خاک قرار گرفت. کارهای بوسینسک^۴ که در سال ۱۸۸۵ در مورد گسترش تنش در محیط کشسان انتشار یافت، به ارائه راه‌حل‌های دقیق در محاسبه تنش‌ها و تغییر شکل‌های درون محیط خاکی منجر گردید و توانست در تحلیل بخش مهمی از مبحث مکانیک خاک، پاسخگو باشد. در قرن ۱۹ ترزاقی^۵ نقش عمده‌ای در توسعه و پیشرفت مکانیک خاک داشت. به‌گونه‌ای که ایشان را بنیان‌گذار مکانیک خاک می‌دانند. شاگردان و همکاران ایشان در قرن بیستم از جمله زبندگان این رشته به‌حساب می‌آیند. با پیشرفت مهندسی و ظهور ساختمان‌های بزرگ و احداث سدها، احتیاج به

1. Charles-Augustin de Coulomb
2. Henry Philibert Gaspard Darcy
3. Pavlovsky, N.N
4. Joseph Valentin Boussinesq
5. Karl von Terzaghi

مطالعه دقیق‌تر رفتار خاک برای بهره‌برداری بهتر و اقتصادی‌تر از سازها بیشتر نمایانگر شد؛ زیرا گسیختگی خاک منجر به ناپایداری سازه احداث شده بر روی آن می‌گردد. از جمله دانشمندان مکانیک خاک قرن بیستم می‌توان به تیلور^۱ و بیشاب^۲ که بر پایداری شیب‌های خاکی مطالعه نموده‌اند. کاذا گراند^۳ که در مورد طبقه‌بندی خاک و تراوش در سدهای خاکی و مقاومت برشی خاک تحقیق نموده است. جرزوانف^۴ تحکیم یک‌بعدی خاک را که توسط ترزاقی پیشنهاد شده بود تکمیل کرد و فلورین^۵ تغییر شکل خاک‌های اشباع را مورد بررسی قرار داد و راه‌حل‌های عمومی آن‌ها را با استفاده از روش تفاضل محدود بسط داد. اسکمپتون^۶ در مورد تنش مؤثر و فشار منفذی در رس‌ها و پایداری شیب کار کرده است. در مورد ظرفیت باربری خاک (که در مهندسی پی خوانده می‌شود) می‌توان به افراد برجسته‌ای مانند میرهوف^۷ و پک^۸ اشاره کرد. افرادی که نام برده شدند تنها تعداد محدودی از دانشمندان علم مکانیک خاک می‌باشند.

در ادامه به ساختار کتاب حاضر پرداخته می‌شود. هدف کلی کتاب آموزش مکانیک خاک در سطح مقدماتی است. این کتاب بر اساس سرفصل شورای عالی انقلاب فرهنگی برای تدریس یک درس دو واحدی تئوری با عنوان «مکانیک خاک» به همراه یک واحد عملی آزمایشگاه مکانیک خاک به رشته تحریر درآمده است. مکانیک خاک علم گسترده‌ای هست؛ اما با توجه به محدودیت تعداد صفحات کتاب برای چاپ این اثر، از شاخ و برگ دادن به مطالب کتاب پرهیز گردید و فقط به ذکر ضروریات بسنده شده است.

از آنجا که نظام آموزشی ما بر اساس دستگاه آحاد متریک (SI) بنا شده است کلیه مسائل مطرح شده در این کتاب بر مبنای این سیستم می‌باشد. این کتاب در ۱۲ فصل نگارش شده است که فصل آخر به آزمایشگاه مکانیک خاک می‌پردازد. انتهای هر فصل شامل خودآزمایی‌های تشریحی همراه با جواب و خودآزمایی‌های چهارگزینه‌ای می‌باشد. پاسخنامه خودآزمایی چهارگزینه‌ای در انتهای کتاب آمده است. دانشجویان

1. Donald W. Taylor

2. A.W.Bishop

3. Arthur Casagrande

4. M.N. Gersevanov

5. V.A.Florin

6. Alec Westley Skempton

7. George Geoffrey Meyerhof

8. Ralph Brazelton Peck

گرامی مطالب فصل آخر این کتاب را به صورت عملی و در آزمایشگاه مکانیک خاک مورد بررسی قرار می دهند. تلاش شده است هر آزمایش به صورت مرحله به مرحله و آزمایش ها به صورت مصور باشد تا درک آن ها راحت تر گردد. در نگارش کتاب از منابع علمی معتبر از جمله کتب «اصول مهندسی ژئوتکنیک» تألیف استاد برآجا ام داس، ترجمه استاد شاپور طاحونی و «اصول نظری و عملی مکانیک خاک» تألیف استاد رضا ابن جلال و استاد محمود شفاعی بجستان استفاده شده است که جا دارد در اینجا از زحمات این اساتید گران قدر و سایر اساتید گرامی این مرزوبوم که بی شک دانش خود را مادیون آن ها هستیم قدردانی شود. در انتهای کتاب واژه نامه انگلیسی به فارسی جهت آشنایی بهتر دانشجویان با معادل انگلیسی هر واژه و یا اصطلاح، آورده شده است. مؤلفان این کتاب بر خود لازم می دانند که از زحمات داوران محترم این کتاب و ویراستار فنی، جناب دکتر جواد احدیان دانشیار دانشگاه شهید چمران اهواز به جهت نظرات مفیدشان، کمال تشکر را نمایند. در پایان از خوانندگان محترم تقاضا می شود هرگونه پیشنهاد، انتقاد یا اشتباه سهوی را که در کتاب مشاهده کردند، لطف نموده از طریق آدرس زیر مکاتبه کنند تا پس از بررسی در چاپ های بعدی اصلاح گردد.

با تقدیم احترام

سیروس شاکری

آرش جاعل

shakeri@pnu.ac.ir arashjael@pnu.ac.ir

فصل اول

خاک و اجزای تشکیل دهنده آن

هدف کلی

امید است دانشجویان پس از مطالعه این فصل بتوانند به شناخت مقدماتی از اصول پیدایش خاک دست یابند. همچنین با آزمایش‌های دانه‌بندی خاک آشنا شوند.

هدف‌های یادگیری

- انتظار می‌رود پس از مطالعه این فصل خواننده بتواند:
۱. خاک را از دیدگاه مکانیک خاک تعریف کند.
 ۲. درباره پیدایش خاک‌ها در سطح مقدماتی نظر دهد.
 ۳. درباره خصوصیات متداول‌ترین کانی‌های رسی اظهار نظر کند.
 ۴. بر اساس شرایط آب و هوایی منطقه نوع کانی‌های رسی را برآورد اولیه کند.
 ۵. درباره ساختمان خاک و دانه‌بندی خاک نظر دهد.
 ۶. اصول آزمایش‌های دانه‌بندی خاک را بداند.
 ۷. منحنی دانه‌بندی خاک را رسم کند.

مقدمه

خاک‌ها از تجزیه سنگ‌های اصلی به وجود آمده‌اند. خصوصیات خاک‌ها در درجه اول تابع شرایط تشکیل و اندازه ذرات آن‌ها است. در این فصل در ابتدا به بحث در مورد پیدایش خاک می‌پردازیم. برای اطلاع از اندازه ذرات می‌توان از منحنی دانه‌بندی خاک

استفاده کرد. برای رسم منحنی دانه‌بندی احتیاج به معرفی دو آزمایش الک و هیدرومتری می‌باشد. در این فصل این موضوعات تحقق یافته است.

۱-۱ تعریف خاک

از دیدگاه کاربرد خاک تعاریف مختلفی برای خاک لحاظ شده است. برای یک مهندس خاک رسوبات تشکیل شده از کانی‌ها یا مواد آلی سیمان نشده یا قطعات پوشاننده قسمت‌های وسیعی از پوسته زمین است که شامل قطعات و ذراتی نظیر قلوه‌سنگ‌ها شن ماسه سیلت‌ها و رس‌ها است و بنابراین اندازه دانه‌ها در خاک از چند میکرون تا چندین سانتی‌متر تغییر می‌کند.

یک توده خاک یک سیستم سه فازی است که شامل قطعات جامد آب و هوا می‌باشد. فضای خالی بین دانه‌های خاک به وسیله آب و قسمتی از آن به وسیله هوا پر شده‌اند. در خاک کاملاً خشک فضاهای خالی فقط با هوا و در توده خاک اشباع از آب فضاهای خالی کاملاً با آب پر شده‌اند. بستگی به درصد نسبی مواد متشکله خاک رفتار خاک تغییر می‌یابد.

۱-۱-۱ پیدایش و تشکیل خاک

عقیده بر این است که در حدود ۴۸۰۰ تا ۵۰۰۰ میلیون سال پیش، زمین با آمیختن قطعات بزرگ سنگ و یخ و گرد و گاز به وجود آمده است. در حدود ۳۰۰ میلیون سال پس از آن قطعاتی که به هم برخورد کرده بودند، مقدار زیادی انرژی آزاد و دمای کره زمین را تا ۵۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دادند. در حدود ۴۵۰۰ میلیون سال پیش، اولین سنگ‌کره تشکیل شد و آتش‌فشان‌ها و گدازه‌ها، سبب تشکیل سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی شدند. ۵۰۰ میلیون سال پس از آن، اولین آب‌کره به وسیله باران و گازها به وجود آمد. آب کره مقدمات ایجاد سنگ‌های رسوبی را فراهم آورد. فرایندهای زمین‌شناسی، سبب ایجاد دما و فشار بالا در نواحی از صفحات زمین‌ساخت، شدند که این پدیده به ایجاد سنگ‌های دگرگونی منجر شد. در حدود ۲ تا ۳ میلیارد سال پیش زندگی توسط اولین میکروارگانیسم تک‌سلولی آغاز گردید. همراه با توسعه و رشد حیات، بقایای به‌جامانده از موجودات زنده سبب تشکیل سنگ‌هایی شد که عمده‌تأ منبع آلی داشتند. فسیل‌ها و زغال‌سنگ از جمله این سنگ‌ها می‌باشند.

پوسته خارجی زمین از سنگ‌ها تشکیل شده است. از تخریب و فرسایش سنگ‌ها خاک به وجود می‌آید. صرف‌نظر از مواد آلی تشکیل‌دهنده خاک، اینکه چه نوع سنگی جزو مواد مادر و تشکیل‌دهنده خاک باشد، می‌تواند بر رفتار خاک تأثیر بگذارد. سنگ‌های آذرین همان‌طور که اشاره شد از سرد شدن ماگما تشکیل شده‌اند. اگر سرعت سرد شدن کند باشد سنگ‌های مانند گرانیت و گابرو به وجود می‌آید. این سنگ‌ها به دلیل ظاهر زیبایی که دارند در کارهای ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بازالت نوع دیگری از سنگ آذرین است که فرایند سرد شدن ماگما سرعت بیشتری نسبت به گرانیت داشته است این سنگ بسیار سخت است و در صورت خرد شدن برای مصارف راه‌سازی مناسب است.

محیط آبی مکانی مناسب برای تشکیل سنگ‌های رسوبی می‌باشد. از این رو چنانچه یک سنگ با هر ماده تشکیل‌دهنده در اثر عوامل فیزیکی یا شیمیایی به قطعات کوچک‌تر تبدیل شود و سپس در یک محیط آبی رسوب کند، مواد چسبنده و محلول در آب آن ذرات را در بر گرفته و در آن‌ها نفوذ می‌کنند. با گذشت زمان این رسوبات به صورت لایه‌هایی بر هم انباشته می‌شوند و تحت فشار طبقات فوقانی، تشکیل سنگ رسوبی می‌دهند. به عنوان مثال ماسه‌سنگ از و به هم فشردن ماسه‌های کوارتزی در دریا‌های ماقبل تاریخ و ماسه‌های کوارتزی از فرسایش گرانیت تشکیل شده‌اند. همچنین فشردن شدن سیلت و لای، شیل را به وجود می‌آورد. ترکیب شیل و آهک حاصل از پوسته جانداران تولید سنگ Calcareous Shale می‌کند که در کارخانه‌های ساخت سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. ممکن است در سنگ‌های رسوبی و آذرینی که در اعماق زمین مدفون شده‌اند، در اثر حرارت و فشار زیاد، ترکیب کانی‌ها و ترکیب شیمیایی سنگ اولیه تغییر کند و سنگ‌های دگرگونی تشکیل شود. از جمله سنگ‌های دگرگونی، می‌توان به مرمر، اسلیت و کوارتزیت اشاره کرد.

علاوه بر عوامل فیزیکی، عوامل شیمیایی نیز در تشکیل خاک مؤثرند. خاک‌ها همچنین از نقطه نظر عامل انتقال تقسیم‌بندی می‌شوند. چنانچه خاکی در محل که فعلاً در آن قرار دارد تشکیل شده باشد به آن خاک در جا می‌گویند. چنانکه خاکی در یک محل تشکیل و توسط عامل انتقال به نقطه دیگری منتقل شود به آن خاک انتقال یافته می‌گویند. عامل انتقال آب، باد، یخچال و نیروی ثقل است. خاک‌های آبرفتی که در رودخانه‌ها دیده می‌شوند خاک‌هایی هستند که عامل انتقال آن‌ها آب است. باد عامل انتقال ماسه روان در بیابان‌ها می‌باشد به این خاک‌ها بادرفتی می‌گویند.

زمین، چندین عصر یخبندان را پشت سر گذاشته است. همراه با هر عصر یخبندان آب دریاها تشکیل یخچال‌های طبیعی را می‌دهد. یخچال‌ها به سبب ضخامت زیاد، وزن زیادی داشته و نیروی عظیمی بر سنگ‌های زیر خود اعمال می‌کنند. حرکت یخچال‌ها سبب ساییدن و پودر شدن سنگ‌های زیر آن‌ها شده و سطحی صاف و صیقلی را پس از خود به جای خواهد گذاشت. در ساخت‌وسازها توجه ویژه‌ای به این خاک‌ها می‌شود. به عنوان مثال در گذشته دور در منهن آمریکا یخچال طبیعی وجود داشته، که در نتیجه آن جهت احداث مترو، آزمایش‌های مکانیک خاک و ژئوتکنیکی فراوانی به جهت اطمینان از پایداری سازه‌های زیرزمینی صورت گرفته است. در جدول زیر به طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس منشأ پیدایش پرداخته شده است.

جدول ۱-۱. طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس منشأ پیدایش (منبع: اسلامی و سخاوتیان، ۱۳۹۲؛ به نقل از Look, 2007).

طبقه‌بندی	Category	فرایند شکل‌گیری و طبیعت نهشته
رسوبی	Residual	هوازدگی شیمیایی سنگ مادر. با افزایش عمق شاهد وجود سنگ و هوازدگی کمتر هستیم.
آبرفتی	Alluvial	حمل و رسوب‌گذاری توسط جریان آب. اغلب به صورت لایه‌لایه بوده و شن‌های حاصل گرد گوشه می‌باشد.
واریزه‌ای	Colluvial	حمل به وسیله نیروی ثقل. ناهمگن بوده و دارای گستره وسیعی از اندازه مختلف ذرات می‌باشد.
یخچالی	Glacial	حمل توسط یخچال. دانه‌بندی باز بوده و شن‌های تشکیل‌دهنده از نوع گوشه‌دار می‌باشد.
بادرفتی	Aeolian	حمل توسط باد. دانه‌بندی بسیار یکنواخت بوده و عموماً شامل سیلت یا ماسه ریز می‌باشد.
آلی	Organic	شکل‌گیری در محل توسط رشد و فرسایش گیاهان. خاک‌های نباتی تیره‌رنگ می‌باشد.
آتش‌فشانی	Volcanic	خاکستر آتش‌فشانی و اسفنج‌های معدنی نهشته شده از فوران‌های آتش‌فشانی. به شدت گوشه‌دار بوده و هوازدگی موجب تشکیل رس‌های بسیار پلاستیک و گاهاً متورم در آن می‌گردد.
تبخیری	Evaporites	مواد رسوبی یا تبخیر شده از محلول‌های حاوی مقدار زیادی نمک. این نوع خاک به شکل پیوسته درست زیر سطح زمین در مناطق کم آب و خشک شکل می‌گیرد.

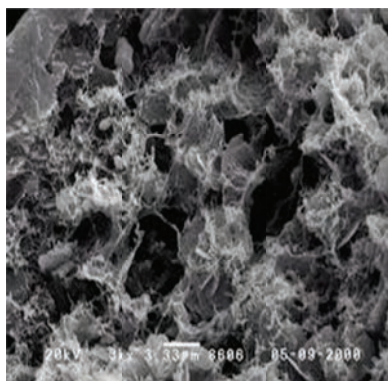
از نظر اندازه، خاک از قلوه‌سنگ‌های درشت تا ذرات ریز سیلت و رس تشکیل یافته است. کانی عمده اکثر ذرات تشکیل‌دهنده خاک فلدسپار و کوارتز می‌باشد. از آنجا که چگالی کوارتز در حدود ۲/۶۵ می‌باشد، چگالی اکثر خاک در این محدوده قرار دارد در جدول زیر چگالی کانی‌های تشکیل‌دهنده نشان داده شده است.

جدول ۱-۲. چگالی تعدادی از کانی‌ها و خاک‌های متداول (منبع: Das, 2018 و Bowles, 1986).

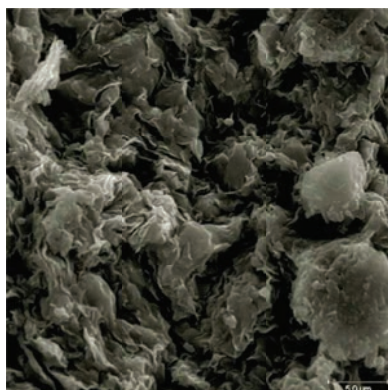
نوع کانی	کوارتز	کائولینیت	ایلیت	مونت موریلونیت	مسکویت (میکا)	فلدسپار سدیم و کلسیم‌دار	فلدسپار پتاسیم‌دار
چگالی	۲/۶۵	۲/۶	۲/۸	۲/۸ تا ۲/۶۵	۲/۷۶ تا ۳/۱	۲/۶۲ تا ۲/۷۶	۲/۵۷
نوع خاک	ماسه	ماسه لای دار	رس غیر آلی	خاک‌های حاوی میکا یا آهن	خاک‌های آلی	متغیر، اما ممکن است زیر ۲ باشد.	
چگالی	۲/۶۷ تا ۲/۶۵	۲/۷۰ تا ۲/۶۷	۲/۷۰ تا ۲/۸۰	۲/۷۵ تا ۳/۰			

۱-۱-۲ کانی‌های رسی

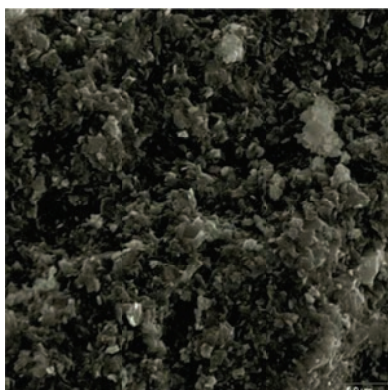
ذرات رس فعال‌ترین فاز جامد معدنی خاک به‌شمار می‌روند. کلوئیدهای رس در نتیجه فعل و انفعالات شیمیایی بر روی قطعات حاصل از فرسایش فیزیکی و یا حتی کانی‌های سنگ مادر می‌باشد. ذرات رسی قطری در حد چند هزارم میلی‌متر و خاصیتی چسبنده دارند. اندازه کوچک کانی‌های رس خاک سبب شده است سطح ویژه رس نسبت به سایر اجزا خاک بسیار بالاتر باشد. ذرات رس دارای بار منفی بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه دارند. اندازه کوچک رس سبب شده است تنها با میکروسکوپ‌های الکترونی (به‌عنوان مثال، میکروسکوپ الکترونی روبنده^۱) می‌توان تصویری از ذرات رسی مشاهده نمود. شکل این کانی‌ها معمولاً به‌صورت ورقه‌ای می‌باشد. البته شکل‌های دیگر از جمله سوزنی شکل نیز مشاهده شده است. تصاویر زیر شکل انواعی از رس را نشان می‌دهد که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبنده به‌دست آمده است.



ایلیت



مونت موریلونیت



کائولینیت

شکل ۱-۱. تصاویر میکروسکوپی متداول‌ترین انواع کانی‌های رسی

میکروسکوپ الکترونی قابلیت مشاهده تصویر و طیف‌سنجی ذرات رس را دارد. دستگاه دیگری که قادر به طیف‌سنجی ذرات رس می‌باشد دستگاه پراش اشعه X است. شناسایی کمی و کیفی و ترکیب ساختمانی رس‌ها اطلاعات مفیدی از جذب، تثبیت و رهاسازی کاتیون‌ها در اختیار می‌گذارد (دیکسون و وید، ۱۹۹۲). نوع کانی تشکیل شده در خاک تحت تأثیر سه عامل اقلیم، شرایط محیطی و مواد مادری می‌باشد. بیشتر مطالعات انجام گرفته در رابطه با کانی‌شناسی خاک در راستای دستیابی به منشأ و نحوه تشکیل و تکامل خاک‌ها بوده است. کانی‌های رسی از نظر ساختمانی از ترکیب دو واحد اساسی (کانی بیس) تشکیل شده‌اند:

۱. ساختار چهاروجهی سیلیکا (سیلیکات تتراهدردن): واحدهای یا ساختار کانی پایه چهار وجه سیلیکا از یک اتم سیلیکون (SI) در وسط و چهار اتم اکسیژن در گوشه‌ای یک هرم چهاروجهی تشکیل شده است.

۲. ساختار هشت‌وجهی آلومینا (آلومینا اکتاهدردن): شکل ساختاری در این کانی بیس، یک هشت‌وجهی است که در وسط آن یک اتم آلومینیوم (Al) و در ۶ گوشه این ساختار یون هیدروکسیل (OH) یا اکسیژن قرار گرفته است.

در ساختار چهاروجهی سیلیکا آلومینیوم می‌تواند جایگزین سیلیکون شود زیرا اندازه آن فقط اندکی از سیلیکون بزرگ‌تر است. درحالی‌که آلومینیوم سه بار مثبت و سیلیکون چهار بار مثبت دارد لذا حاصل این جایگزینی هم شکل، ایجاد یک بار منفی خنثی نشده است که منجر به ایجاد بار منفی در سطح رس می‌گردد. در کانی بیس هشت‌وجهی آلومینا نیز روی (Zn) با شعاع یونی ۰/۷ آنگستروم و منیزیم (Mg) با شعاع یونی ۰/۶۵ آنگستروم، می‌تواند جایگزین آلومینیوم با شعاع یونی ۰/۵ آنگستروم شود. لذا جایگزینی هم شکل در ساختار کانی بیس هشت‌وجهی آلومینا نیز بار منفی در سطح رس ایجاد خواهد کرد.

واحدهای بنیادی (کانی بیس‌های) مشابه در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و یک صفحه با ضخامت کم ایجاد می‌کنند. در واحدهای چهاروجهی سیلیکا هر صفحه از سه طبقه تشکیل شده است. رئوس چهاروجهی در یک طبقه، سیلیکون‌ها در یک طبقه و قاعده‌ها در یک طبقه قرار می‌گیرد. کانی بیس هشت‌وجهی آلومینا نیز از سه طبقه تشکیل شده است. یک طبقه آلومینیوم که بین دو طبقه یون‌های هیدروکسیل قرار دارد. ترکیبات مختلف صفحات هشت و چهاروجهی انواع رس‌های زیر را به وجود آورده است: