

# اصول مهندسی ژئوتکنیک

SI ویرایش هشتم،

براجا ام. داس، دین امریتس

دانشگاه ایالتی کالیفرنیا، سکرامنتو

خالد سبحان

دانشگاه آتلانتیک فلوریدا



درباره نویسندگان.....	٦
مهندسی ژئوتکنیک - یک چشمانداز تاریخی.....	٧
منشأ خاک و اندازه دانه .....	٢٢
روابط وزن و حجم.....	٨٤
پلاستیسیته و ساختار خاک .....	١١٥
طبقه بندی خاک .....	١٤٨
تراکم خاک .....	١٧٣
نفوذپذیری.....	٢٣٠
نشبت.....	٢٨٠
تنشهای درجا.....	٣١٢
تنشها در توده خاک .....	٣٥٣
تراکم پذیری خاک.....	٤٠٨
مقاومت برشی خاک .....	٤٩١
فشار جانبی خاک: در حالت سکون، رانکین و کولن .....	٥٦٠
فشار جانبی خاک: سطح شکست منحنی .....	٦٢٥
پایدارسازی شیب .....	٦٥٧
ظرفیت باربری خاک برای فونداسیونهای کم عمق .....	٧٣٥
شناسایی زیر خاک .....	٧٧٣

## پیشگفتار

اصول مهندسی ژئوتکنیک در ابتدا با حق چاپ در سال ۱۹۸۵ منتشر شد و برای استفاده به عنوان متنی برای دوره مقدماتی مهندسی ژئوتکنیک که تقریباً توسط همه دانشجویان مهندسی عمران گرفته شده بود و همچنین برای استفاده به عنوان کتاب مرجع برای مهندسان شاغل در نظر گرفته شد. این کتاب در سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۴، ۱۹۹۸، ۲۰۰۲، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰ بازبینی شد. این نسخه هشتم دارای نویسنده‌ای به نام خالد سبحان از دانشگاه فلوریدا آتلانتیک است. مانند نسخه‌های قبلی کتاب، این ویرایش جدید مروری بر ویژگی‌ها و مکانیک خاک، همراه با پوشش اقدامات میدانی و رویه‌های مهندسی اولیه، بدون تغییر در فلسفه اصلی متن اصلی ارائه می‌دهد. هدف این کتاب مطابقت با کدهای طراحی نیست.

برفضای خالیف ویرایش هفتم که دارای ۱۸ فصل بود، این ویرایش دارای ۱۷ فصل است. فصل مربوط به لاینرهای دفن زباله و ژئوسنتتیک از این نسخه حذف شده است زیرا این موضوع در طول سال‌ها رشد کرده و بالغ شده است و به عنوان یک دوره جداگانه در بسیاری از برنامه‌های مهندسی عمران ارائه می‌شود.

بسیاری از مسائل مثال و مسائل تکالیف تغییر و/یا اصلاح شده‌اند. یک یا دو مسئله تفکر انتقادی به مسائل تکالیف در بیش‌تر فصل‌ها اضافه شده است تا فرآیند فکر و درک دانشجویان را در مورد موضوع (موضوعات) تحت پوشش در یک فصل به چالش بکشد و تقویت کند.

از آنجایی که مهندسی ژئوتکنیک یک موضوع عملی و کاربردی است، چند تاریخچه واقعی نیز گنجانده شده است. این تاریخچه‌های موردی در فصل‌های ۱۱، ۱۵ و ۱۶ با هدف اولیه آشنایی دانشجویان با تغییرپذیری غیرقابل پیش‌بینی خاک در میدان در مقایسه با وضعیت ایده‌آل در تدریس و یادگیری کلاس درس ارائه شده‌اند. عکس‌های جدید نیز در سراسر آن اضافه شده است.

از دیگر تغییرات قابل توجه در ویرایش هشتم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- یک بخش گسترده از مقدمه در ابتدا و یک بخش فضای خالیصه در پایان هر فصل ارائه شده است.
- در فصل ۲، در مورد منشأ خاک و اندازه دانه، چندین عکس از کانی‌ها، سنگ‌ها و سازه‌های رایج تشکیل‌دهنده سنگ اضافه شده است (بخش ۲.۳). برای کمک به دانشجویان در شناسایی میدان‌های سنگ‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، آن‌ها به صورت رنگی و همچنین سیاه و سفید ارائه می‌شوند.
- در فصل ۳، در مورد روابط وزن-حجم، بخش حداکثر و حداقل نسبت فضای خالی خاک دانه‌ای گسترش یافته است.

- روش تعیین حد انقباض خاک‌های چسبنده با استفاده از روش موم (تعییت تست ASTM ۴۹۴۳) در فصل ۴ (پلاستیسیته و ساختار خاک) به تفصیل شرح داده شده است.
  - در فصل ۵، در مورد طبقه بندی خاک، نمودارهای خطی به عنوان مثال برای تعیین نام گروهی خاک‌ها از نمادهای گروه (سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک) اضافه شده است. این نمودارهای خطی به خوانندگان کمک می‌کند تا یک روش گام به گام را برای رسیدن به نام گروهی مناسب خاک در طول طبقه‌بندی خاک دنبال کنند.
  - فصل تراکم خاک (فصل ۶) اکنون شامل چندین رابطه تجربی اخیر برای تخمین حداکثر وزن واحد خشک و رطوبت بهینه بر اساس انرژی تراکم است. بخش ارزیابی خاک به عنوان ماده متراکم اضافه شده است.
  - در فصل ۹، در مورد تنش‌های درجا، یک مشتق ریاضی برای یک حالت کلی برای به دست آوردن نیروی نشت در واحد حجم خاک اضافه شده است. همچنین در این فصل نمودار هارزا برای به دست آوردن گرادیان خروجی جریان تحت یک سازه هیدرولیکی ارائه شده است. این نمودار برای تخمین ضریب اطمینان در برابر جابه‌جایی کمک کننده است. مثالی برای نشان دادن استفاده از فیلتر در سمت پایین دست سازه هیدرولیک برای افزایش ضریب اطمینان در برابر جابه‌جایی آورده شده است. بخشی در مورد افزایش تنش عمودی در یک نقطه و عمق معین زیر سطح زمین به دلیل افزایش خطی بارگذاری عمودی بر روی یک نوار بی نهایت در فصل ۱۰، در مورد تنش‌ها در توده خاک اضافه شده است.
  - توضیح بهبود یافته مبانی تحکیم یافته در فصل ۱۱، در مورد تراکم پذیری خاک، ارائه شده است. این فصل همچنین یک بحث کلی در مورد تأثیر مدت زمان بار بر روی نمودار  $e - \log \sigma'$  ارائه می‌دهد.
  - فصل ۱۲، در مورد مقاومت برشی خاک، روش محاسبه چسبندگی زهکشی نشده را برای آزمایشات انجام شده با یک پره مخروطی بر اساس ASTM (۲۰۱۰) به روز می‌کند. روش تخمین فشار عامل زمین در یک خاک در شرایط زلزله در فصل ۱۳ (فشار جانبی خاک: در حالت سکون، رانکین و کولمن) به روز شده است.
  - تئوری کاکوات و کریسل برای تخمین فشار غیر عامل خاک با خاکریزی دانه‌ای (دیوار حائل متمایل به عقب و خاکریزی افقی، و پشت کار عمودی دیوار و خاکریزی متمایل) اکنون در فصل ۱۴، در مورد فشار جانبی زمین: سطح شکست منحنی گنجانده شده است.
  - در فصل ۱۵، در مورد پایداری شیب، یک مشتق دقیق در مورد ضریب اطمینان دامنه‌های بی نهایت با نشت وجود دارد. نتایج برخی از مطالعات اخیر در مورد دایره‌های بحرانی شکست برای شیب‌ها در خاک رس ( $\phi = 0$ ) و  $\phi' - c'$  خاک در این فصل اضافه شده است.
  - یک مورد تعمیم یافته برای فشار عامل و غیرعامل رانکین با پر کردن دانه‌ای در ضمیمه A ارائه شده است.
- در تهیه یک متن مهندسی از این نوع، گنجاندن بسیاری از تحولات اخیر در رابطه با رفتار رسوبات طبیعی خاک موجود در نقاط مختلف جهان که در مجلات و مقالات کنفرانس موجود است، و سوسه برانگیز است که آن‌ها را ثابت کند. در تمرینات آتی دانشجویان مفید باشد. با این حال، بر اساس سال‌ها تدریس، نویسندگان احساس می‌کنند که وضوح در توضیح اصول مکانیک خاک در اولین دوره در این زمینه بدون درهم ریختن کتاب با جزئیات و جایگزین‌های بسیار مهم‌تر است. بسیاری از جزئیات پیچیده را می‌توان به یک دوره پیشرفته در زمینه مهندسی ژئوتکنیک واگذار کرد. این رویکرد به احتمال زیاد به توسعه علاقه و قدردانی دانشجویان به حرفه مهندسی ژئوتکنیک به طور کلی کمک خواهد کرد.

#### مواد منبع مربی

راهنمای دقیق راه‌حل‌های مربی و اسلایدهای پاورپوینت از شکل‌ها و جداول و معادلات و مثال‌های کتاب از طریق یک وبسایت محافظت‌شده با رمز عبور به نشانی [www.cengagebrain.com](http://www.cengagebrain.com) برای مربیان در دسترس است.

#### منابع دانشجویی

سوالات چند گزینه‌ای خودارزیابی با پاسخ برای هر فصل برای دانشجویان در وب سایت کتاب موجود است. دانشجویان همچنین ممکن است از این سوالات به عنوان یک ابزار تمرینی در آمادگی برای امتحانات بهره مند شوند.

برای دسترسی به مطالب دوره اضافی، لطفاً به [www.cengagebrain.com](http://www.cengagebrain.com) مراجعه کنید. در صفحه اصلی [cengagebrain.com](http://cengagebrain.com) با استفاده از کادر جستجو در بالای صفحه، شایک عنوان خود را (از پشت جلد کتاب خود) جستجو کنید. این شما را به صفحه محصول می برد که در آن این منابع را می‌توانید پیدا کنید. اگر به رمز عبور نیاز دارید، دستورالعمل‌های منابع مربی را دنبال کنید.

نویسندگان بدون حمایت و تشویق همسرانشان، جنیس و سمیرا، و خانواده‌هایشان نمی‌توانستند این دست‌نوشته اصلاح‌شده را تکمیل کنند. جانیس داس در آماده کردن نسخه خطی برای چاپ بسیار کمک کننده بود. پروفیسور سانجی کی شوکلا از دانشگاه ادیت کوان، استرالیا، پیشنهادات ارزشمند بسیاری را در طول فرآیند بازنگری ارائه کرد. در نهایت، تشکر فراوان از کریستوفر شورت، ناشر. هیلدا گوانز، سردبیر ارشد توسعه؛ و لورن بتسوس، مدیر بازاریابی Cengage Learning (مهندسی) برای کمک و مشاوره در توسعه نهایی کتاب. جا دارد از رز پی کرنان از خدمات تحریریه RPK نیز تشکر کنیم. او در شکل‌دهی سبک و نظارت بر تولید این نسخه از اصول مهندسی ژئوتکنیک و همچنین چندین نسخه قبلی مؤثر بوده است.

با تشکر از بازیگران زیر برای نظرات و پیشنهادات سازنده خود:

دراگوس آندری، دانشگاه پلی تکنیک ایالتی کالیفرنیا، پومونا، کالیفرنیا

تونسر ادیل، دانشگاه ویسکانسین، مدیسون، ویسکانسین

تون کیو، دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا، پارک دانشگاه، پنسیلوانیا

کمال توفیق، دانشگاه ایالتی فلوریدا، تالاهاسی، فلوریدا

بینود تیواری، دانشگاه ایالتی کالیفرنیا، فولرتون، کالیفرنیا

جی وانگ، دانشگاه فنی لوئیزیانا، راستون، لوئیزیانا

محمد ام. یامین، دانشگاه بردلی، پیوریا، ایلینوی

براجا داس و خالد سبحان

## درباره نویسندگان

پروفسور برآجا داس، رئیس دانشکده مهندسی و علوم کامپیوتر در دانشگاه ایالتی کالیفرنیا، سکراننتو است. او مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران از دانشگاه آیووا و دکترایش را در زمینه مهندسی ژئوتکنیک از دانشگاه ویسکانسین دریافت کرد. وی مولف چندین متون و کتاب مرجع مهندسی ژئوتکنیک و تألیف بیش از ۲۵۰ مقاله فنی در زمینه مهندسی ژئوتکنیک است. زمینه‌های اصلی تحقیقات او شامل فونداسیون‌های کم عمق، مهارهای خاکی و ژئوسنتتیک است. او عضو مادام‌العمر انجمن مهندسين عمران آمریکا، عضو مادام‌العمر انجمن آموزش مهندسی آمریکا، و عضو ممتاز کمیته تثبیت شیمیایی و مکانیکی هیئت تحقیقات حمل و نقل شورای تحقیقات ملی (واشنگتن، دی سی) است. او قبلاً به عنوان عضو هیئت تحریریه مجله مهندسی ژئوتکنیکال ASCE، عضو مجله لولند فناوری بین‌المللی (ژاپن)، ویراستار ژورنال بین‌المللی مهندسی دریایی و قطبی (ISOPE) و دستیار سردبیر مجله مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی (اسپرینگر، هلند) بوده است. در حال حاضر او سردبیر مجله بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک (جی راس، فت. لادردیل، فلوریدا) است. دکتر داس جوایز متعددی را برای تعالی آموزش دریافت کرده است، از جمله جایزه بنیاد AMOCO، جایزه AT&T برای تعالی آموزش از انجمن آموزش مهندسی آمریکا، جایزه رالف تیتور از انجمن مهندسان خودرو، و جایزه دستاورد برجسته برای تعالی آموزش از دانشگاه تگزاس در ال پاسو.

پروفسور خالد سیحان دانشیار مهندسی عمران در دانشگاه آتلانتیک فلوریدا است. او مدرک کارشناسی ارشد خود را از دانشگاه جانز هاپکینز و مدرک دکترای خود را از دانشگاه نورث وسترن، هر دو در حوزه مهندسی ژئوتکنیک دریافت کرد. زمینه‌های تحقیقاتی اولیه او شامل بهسازی زمین، ژئوتکنولوژی خاک‌های نرم، مکانیک خاک تجربی، و جنبه‌های ژئوتکنیکی مهندسی روسازی است. او به عنوان رئیس کمیته تثبیت شیمیایی و مکانیکی (AFS<sup>90</sup>) هیئت تحقیقات حمل و نقل (۲۰۰۵-۲۰۱۱) خدمت کرد و بخشنامه TRB با عنوان ارزیابی تثبیت‌کننده‌های شیمیایی: گزارش وضعیت عملی (E-C<sup>086</sup>) را نوشت. او در حال حاضر به عنوان دستیار ویراستار مجله ASCE مواد در مهندسی عمران، و در هیئت تحریریه ASTM ژورنال تست ژئوتکنیک، مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی (اسپرینگر، هلند) و مجله بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک (اف ال جی، راس فوت، لادردیل) است. او برنده جایزه برجسته برای تعالی و نوآوری در تدریس در مقطع کارشناسی (۲۰۰۶) و جایزه برتری در مربیگری فارغ‌التحصیلان (۲۰۰۹) از دانشگاه آتلانتیک فلوریدا است. وی بیش از ۷۵ مقاله و گزارش فنی در زمینه مهندسی ژئوتکنیک منتشر کرده است.

## مهندسی ژئوتکنیک - یک چشم‌انداز تاریخی

### ۱.۱ مقدمه

برای اهداف مهندسی، خاک به عنوان مجموعه بدون سیمان دانه‌های معدنی و مواد آلی تجزیه شده (ذرات جامد) همراه با مایع و گاز در فضاهای خالی بین ذرات جامد تعریف می‌شود. خاک به عنوان مصالح ساختمانی در پروژه‌های مختلف مهندسی عمران استفاده می‌شود و فونداسیون‌های سازه‌ای را پشتیبانی می‌کند. بنابراین، مهندسان عمران باید در مورد خصوصیات خاک مانند منشاء آن، توزیع اندازه دانه، قابلیت تخلیه آب، تراکم پذیری، مقاومت برشی و ظرفیت باربری را مطالعه کنند. مکانیک خاک شاخه‌ای از علم است که به مطالعه خواص فیزیکی خاک و رفتار توده‌های خاک تحت تأثیر انواع نیروها می‌پردازد. مهندسی خاک کاربرد اصول مکانیک خاک در مسائل عملی است. مهندسی ژئوتکنیک زیرشاخه مهندسی عمران است که شامل مواد طبیعی موجود در نزدیکی سطح زمین است. این شامل کاربرد اصول مکانیک خاک و مکانیک سنگ در طراحی فونداسیون‌ها، سازه‌های نگهدارنده و سازه‌های خاکی است.

### ۲.۱ مهندسی ژئوتکنیک قبل از قرن هجدهم

هیچ سابقه‌ای از اولین استفاده انسان از خاک به عنوان مصالح ساختمانی در دوران باستان وجود ندارد. از نظر مهندسی واقعی، شاخه مهندسی ژئوتکنیک به شکلی که امروز می‌شناسیم از اوایل قرن هجدهم آغاز شده است (اسکمپتون، ۱۹۸۵). برای سال‌ها هنر مهندسی ژئوتکنیک براساس تجربیات گذشته به دست آمده از آزمایشات پی در پی بوده و هیچگونه سابقه علمی واقعی وجود نداشته است. براساس همان آزمایشات، سازه‌های بسیاری ساخته شد که برخی از این سازه‌ها فرو ریخته‌اند و برخی دیگر هنوز پابرجا هستند. براساس تاریخ ثبت شده تمدن‌های باستانی در امتداد رودخانه‌هایی مانند نیل (مصر)، دجله و فرات (بین النهرین) هوانگ هو (روخانه زرد، چین) و (سند) هند به وجود آمده‌اند. قدمت سدها به حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد بر می‌گردد که اولین آن‌ها روی رودخانه سند برای محافظت از شهر (موهنجو دارا) جایی که پس از سال ۱۹۴۷ به پاکستان تبدیل گشت ساخته شد.

جدول ۱.۱ اهرام عمده در مصر

هرم / فرعون	مکان	سلطنت فرعون
جوسر	سقاره	2630-2612 B.C.
اسنفرو	داشور (شمال)	2612-2589 B.C.
اسنفرو	داشور (جنوب)	2612-2589 B.C.
اسنفرو	میدام	2612-2589 B.C.
خوفو	جیزه	2589-2566 B.C.
جدفره	ابوروش	2566-2558 B.C.
خفره	جیزه	2558-2532 B.C.
منکور	جیزه	2532-2504 B.C.

© Cengage Learning 2014

در زمان سلسله چان در چین ۱۱۲۰ قبل از میلاد تا ۲۴۹ قبل از میلاد، سدهای بسیاری به منظور آبیاری باغها ساخته شد. هیچ شواهدی از اقدامات انجام شده برای پایداری و تحکیم فوندانسیونها یا بررسی فرسایش ناشی از سیل وجود ندارد (کریسل، ۱۹۸۵). تمدن یونان باستان از فوندانسیون مجزا و فوندانسیون نواری و یکپارچه برای ساخت سازهها استفاده می کردند. در حدود ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد، در دوره پادشاهی قدیم و میانه، اهرام متعددی در مصر ساخته شد که بیش تر آنها به عنوان مقبره ای برای فرعونیان و همسرانشان استفاده می شد. جدول ۱-۱ فهرستی از برخی اهرام اصلی را نشان می دهد که طبق سوابق تاریخی موجود از فرعونیان که دستور ساخت آنها را داده بودند شناسایی شده اند. تا سال ۲۰۰۸ در مجموع ۱۳۸ هرم در مصر کشف شده است.





**شکل ۱.۱** نمایی از اهرام جیزه. (با اجازه جانیس داس، هندرسون، نوادا)

شکل ۱.۱ نمایی از اهرام جیزه را نشان می‌دهد. ساخت و ساز اهرام چالش‌های مهمی را در مورد فونداسیون‌ها، پایداری دامنه‌ها و ساخت اتاقک‌های زیرزمینی ایجاد کردند. با ورود بودیسم به چین در زمان سلسله (هان شرقی) در سال ۶۸ بعد از میلاد، هزاران پاگودا ساخته شد. بسیاری از این سازه‌ها بر روی لایه‌های سیلیت و خاک رس نرم ساخته شده‌اند. در برخی موارد، فونداسیون فشار از ظرفیت باربری خاک بیش‌تر شده و در نتیجه باعث آسیب‌های شدید ساختاری شده است.

یکی از مشهورترین نمونه مشکلات مربوط به ظرفیت باربری خاک در ساخت و سازهای قبل از قرن ۱۸، برج کج پیزا در ایتالیا است (شکل ۲.۱ را ببینید). ساخت این برج در سال ۱۱۷۳ پس از میلاد در زمانی که جمهوری پیزا در حال شکوفایی بود آغاز شد و در مراحل مختلف برای بیش از ۲۰۰ سال ادامه یافت. وزن این سازه حدود ۱۵۷۰۰ تن متریک است و توسط یک پایه دایره‌ای به قطر ۲۰ متر پشتیبانی می‌شود. این برج در گذشته به سمت شرق، شمال، غرب و در نهایت جنوب متمایل شده است.



**شکل ۲.۱** برج کج پیزا، ایتالیا (به لطف پراجا ام. داس، هندرسون، نوادا)

تحقیقات اخیر نشان داد که یک لایه خاک رس ضعیف در عمق حدود ۱۱ متری در زیر سطح زمین وجود دارد که فشرده سازی آن باعث کج شدن برج می‌شود. این برج در سال ۱۹۹۰ بسته شد زیرا بیم آن می‌رفت که یا سقوط کند یا فرو بریزد. اخیراً با حفاری خاک از زیر ضلع شمالی برج تثبیت شده است. حدود ۷۰ تن متریک خاک در ۴۱ استخراج جداگانه که در عرض برج بود برداشته شد. همان‌طور که زمین به تدریج مستقر شد تا فضای حاصل را پر کند، شیب برج کاهش یافت. اکنون برج ۵ درجه متمایل شده است. تغییر نیم درجه‌ای قابل توجه نیست، اما ساختار را به طور قابل ملاحظه‌ای پایدارتر می‌کند، (شکل ۳.۱ نمونه‌ای از مشکل مشابه است). برج‌های نشان داده شده در شکل ۳.۱ در بولونیای ایتالیا واقع شده است و در قرن ۱۲ ساخته شده‌اند. برج سمت چپ به عنوان برج گاریسندرا نامیده می‌شود، ارتفاع آن ۴۸ متر و وزن آن حدود ۴۲۱۰ تن متریک است که حدود ۴ درجه کج شده است. برج سمت راست، برج آسینلی است، ۹۷ متر ارتفاع و ۷۳۰۰ تن وزن دارد، حدود ۱.۳ درجه خم شده است.

پس از مواجه شدن با چندین مشکل مربوط به فونداسیون در حین ساخت و ساز طی قرن‌های گذشته، مهندسان و دانشمندان شروع به عنوان کردن خواص و رفتار خاک‌ها به شیوه‌ای روشمندتر در اوایل قرن ۱۸ کردند.



**شکل ۳.۱** کج شدن برج گاریسندرا (چپ) و برج آسینلی (راست) در بولونیا، ایتالیا (با اجازه برجا ام. داس، هندرسون، نوادا)

بر اساس تاکید و ماهیت مطالعه در زمینه مهندسی ژئوتکنیک، بازه زمانی ۱۷۰۰ تا ۱۹۲۷ را می‌توان به چهار دوره اصلی تقسیم کرد (اسکمپتون، ۱۹۸۵):

۱. پیش کلاسیک (۱۷۰۰ تا ۱۷۷۶ بعد از میلاد)

۲. مکانیک کلاسیک خاک - فاز اول (۱۷۷۶ تا ۱۸۵۶ بعد از میلاد)

۳. مکانیک کلاسیک خاک - فاز دوم (۱۸۵۶ تا ۱۹۱۰ پس میلاد)

۴. مکانیک خاک مدرن (۱۹۱۰ تا ۱۹۲۷ پس از میلاد)

شرح مختصر برخی از پیشرفت‌های مهم در طول هر یک از این چهار دوره، در زیر ارائه شده است.

### ۱.۳ دوره پیش کالسیک مکانیک خاک (۱۷۷۶-۱۷۰۰)

این دوره بر مطالعات مربوط به شیب طبیعی و وزن واحد انواع مختلف خاک‌ها و همچنین نظریه‌های فشار زمین متمرکز شده است. در سال ۱۷۱۷، یک مهندس سلطنتی فرانسوی، هانری گوتیر (۱۶۶۰-۱۷۳۷)، شیب‌های طبیعی خاک را هنگامی که در یک توده برای فرموله کردن روش‌های طراحی دیوارهای حائل قرار می‌گرفتند، مطالعه کرد. شیب طبیعی چیزی است که ما در حال حاضر از آن به عنوان زاویه سکون یاد می‌کنیم. بر اساس این مطالعه، شیب طبیعی ماسه خشک و تمیز و زمین معمولی به ترتیب ۳۱ درجه و ۴۵ درجه خواهد بود. همچنین، وزن واحد ماسه تمیز و خشک و خاک معمولی به ترتیب  $18.1 \text{ kN/m}^3$  و  $13.4 \text{ kN/m}^3$  ( $13.4 \text{ lb/ft}^3$ ) و ۸۵ در نظر گرفته می‌شود. هیچ نتیجه‌ای از آزمایش روی خاک رس گزارش نشده. در سال ۱۷۲۹، برنارد فارست دی بلیدور (۱۶۷۱-۱۷۶۱) کتابی را برای مهندسان نظامی و عمرانی در فرانسه منتشر کرد. در این کتاب او نظریه‌ای را برای فشار جانبی زمین بر دیوارهای حائل ارائه کرد که در پیرو مطالعه اصلی گوتیه (۱۷۱۷) بود. وی همچنین یک سیستم طبقه‌بندی خاک را به روشی که در جدول زیر نشان داده شده است مشخص کرد.

وزن واحد	طبقه‌بندی
$\text{kN/m}^3$	
—	سنگ
16.7 to	ماسه سفت یا سخت
18.4	شن و ماسه فشرده
13.4	زمین معمولی (همانطور که در مکان های خشک یافت می شود)
16.0	زمین نرم (عمدتاً سیلت)
18.9	خاک رس
—	ذغال سنگ نارس

© Cengage Learning 2014

اولین نتایج آزمایش مدل آزمایشگاهی بر روی دیوار حائل به ارتفاع ۷۶ میلی متر که با خاکریزی مجدد ماسه ساخته شده بود در سال ۱۷۴۶ توسط یک مهندس فرانسوی به نام فرانسوا گادروی (۱۷۰۵-۱۷۵۹) گزارش شد که وجود صفحات لغزشی در خاک را در هنگام گسیختگی مشاهده کرد. مطالعه گادروی بعداً توسط J. J. Mayniel در سال ۱۸۰۸ فضای خالی‌صه شد. مشارکت قابل

توجه دیگر در این دوره توسط مهندس فرانسوی ژان رودولف پرونت (۱۷۰۸-۱۷۹۴)، که پایدار ی شیب را در حدود سال ۱۷۶۹ مطالعه کرد و بین زمین دست نخورده و خاکریزی تمایز قائل شد، صورت گرفت.

#### ۴.۱ مکانیک کلاسیک خاک - فاز اول (۱۷۷۶-۱۸۵۶)

در این دوره، بیش تر پیشرفت ها در زمینه مهندسی ژئوتکنیک توسط مهندسان و دانشمندان فرانسوس صورت گرفته است. در دوره پیش کلاسیک، عملاً همه ملاحظات نظری مورد استفاده در محاسبه فشار جانبی زمین بر روی دیوارهای حائل بر اساس سطح شکست دلخواه در خاک بودند. در مقاله معروف او که در سال ۱۷۷۶ ارائه شده بود، دانشمند فرانسوی چارلز آگوستین کولومب (۱۷۳۶-۱۸۰۶) از اصول محاسبه حداکثر و حداقل برای تعیین موقعیت صحیح سطح لغزش در خاک پشت دیوار حایل استفاده کرد. در این تحلیل، کولن از قوانین اصطکاک و پیوستگی برای اجسام جامد استفاده کرد. در سال ۱۷۹۰، مهندس عمران برجسته فرانسوی، گاسپارد کله، ماری ریش دو پرونی (۱۷۵۵-۱۸۳۹)، نظریه کولن را در کتاب درسی برجسته خود، Nouvelle Architecture Hydraulique (جلد ۱) گنجانده. در سال ۱۸۲۰، موارد خاصی از کار کولن توسط مهندس فرانسوی ژاک فردریک فرانسیس (۱۷۷۵-۱۸۳۳) و کارشناس مکانیک کاربردی فرانسوی کلود لوئیس ماری هانری ناویه (۱۷۸۵-۱۸۳۶) مورد مطالعه قرار گرفت. این موارد ویژه مربوط به خاکریزی مجدد شیبدار و خاکریزی های مجدد پشتیبان هزینه اضافی است. در سال ۱۸۴۰، ژان ویکتور پونسله (۱۷۸۸-۱۸۶۷)، مهندس ارتش و استاد مکانیک، نظریه کولن را با ارائه روشی گرافیکی برای تعیین میزان فشار جانبی زمین بر روی دیوارهای حائل عمودی و شیبدار با سطوح چند ضلعی دلخواه شکسته زمین، گسترش داد. همچنین، Poncelet اولین کسی بود که از علامت  $f$  برای زاویه اصطکاک خاک استفاده کرد. او همچنین اولین نظریه ظرفیت باربری نهایی را برای فونداسیون های کم عمق ارائه کرد. در سال ۱۸۴۶ الکساندر کولین (۱۸۰۸-۱۸۹۰)، یک مهندس، جزئیات لغزش های عمیق در شیب های سفالی، برش ها و خاکریزها را ارائه کرد. کالین این نظریه را مطرح کرد که در همه موارد گسیختگی زمانی رخ می دهد که پیوستگی بسیج شده از پیوستگی موجود خاک فراتر رود. او همچنین مشاهده کرد که سطوح گسیختگی واقعی را می توان به صورت قوس های سیکلوئیدی تقریب زد.

پایان فاز اول دوره کلاسیک مکانیک خاک به طور کلی با سال (۱۸۵۷) اولین انتشار توسط ویلیام جان مکورن رانکین (۱۸۲۰-۱۸۷۲)، استاد مهندسی عمران در دانشگاه گلاسکو مشخص می شود. این مطالعه یک نظریه قابل توجه در مورد فشار زمین و تعادل توده های زمین ارائه کرد. نظریه رانکین ساده شده نظریه کولن است.

#### ۵.۱ مکانیک کلاسیک خاک - فاز دوم (۱۸۵۶-۱۹۱۰)

چندین نتیجه تجربی از آزمایش های آزمایشگاهی روی ماسه در متن این مرحله ظاهر شد. یکی از اولین و مهم ترین انتشارات، انتشارات مهندس فرانسوی هانری فیلیبر گاسپارد داری (۱۸۰۳-۱۸۵۸) است. او در سال ۱۸۵۶ مطالعه ای در مورد نفوذپذیری فیلترهای ماسه ای منتشر کرد. بر اساس آن آزمایشات، داری اصطلاح ضریب نفوذپذیری (یا هدایت هیدرولیکی) خاک را تعریف کرد که یک پارامتر بسیار مفید در مهندسی ژئوتکنیک تا به امروز است.

جناب جورج هاوارد داروین (۱۸۴۵-۱۹۱۲)، استاد نجوم، آزمایش های آزمایشگاهی را برای تعیین لحظه واژگونی روی دیواره های لولایی که ماسه را در حالت های سست و متراکم نگه می دارد، انجام داد. کمک قابل توجه دیگری که در سال ۱۸۸۵ توسط جوزف والتین بوسینسک (۱۸۴۲-۱۹۲۹) منتشر شد، توسعه نظریه توزیع تنش در مناطق باربر در یک محیط همگن، نیمه نامتناهی، الاستیک و همسانگرد بود. در سال ۱۸۸۷، آربورن رینولدز (۱۸۴۲-۱۹۱۲) پدیده اتساع را در ماسه نشان داد. دیگر مطالعات قابل توجه در این

دوره، مطالعات جان کلیبرن (۱۸۴۷-۱۹۳۸) و جان استوارت برسفورد (۱۸۴۵-۱۹۲۵) در رابطه با جریان آب از بستر ماسه و فشار بالابرنده است. مطالعه کلیبورن در رساله مهندسی عمران جلد ۲: کار آبیاری در هند، رورکی، ۱۹۰۱ و همچنین در مقاله فنی شماره ۹۷، دولت هند، ۱۹۰۲. مطالعه ۱۸۹۸ برسفورد در مورد فشار بالابر روی سرریز نارورا در رودخانه گنگ در مقاله فنی شماره ۹۷، دولت هند، ۱۹۰۲، مستند شده است.

## ۶.۱ مکانیک خاک مدرن (۱۹۱۰-۱۹۲۷)

در این دوره نتایج تحقیقات انجام شده بر روی خاک رس منتشر شد که در آن خواص و پارامترهای اساسی خاک رس مشخص شد. قابل توجه‌ترین نشریات در ادامه شرح داده شده است.

در حدود سال ۱۹۰۸، آلبرت موریتز آتربرگ (۱۸۴۶-۱۹۱۶)، شیمیدان و خاک شناس سوئدی، کسرهای اندازه خاک رس را به عنوان درصد وزنی ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون تعریف کرد. او به نقش مهم ذرات رس در خاک و شکل پذیری آن پی برد. در سال ۱۹۱۱، او قوام خاک‌های چسبنده را با تعریف حدود مایع، خمیری و انقباض توضیح داد. او همچنین شاخص پلاستیسیته را به عنوان تفاوت بین حد مایع و حد خمیری تعریف کرد (به آتربرگ، ۱۹۱۱ نگاه کنید).

در اکتبر ۱۹۰۹، سد خاکی ۱۷ متری در چارمس، فرانسه، شکست خورد. بین سالهای ۱۹۰۲ و ۱۹۰۶ ساخته شد. یک مهندس فرانسوی به نام ژان فونتارد (۱۸۸۴-۱۹۶۲)، تحقیقاتی را برای تعیین علت شکست انجام داد. در آن زمینه، او آزمایش‌های برشی دوگانه زه‌کشی نشده را بر روی نمونه‌های رسی (۰/۷۷ متر مربع در سطح و ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر) تحت تنش عمودی ثابت انجام داد تا پارامترهای مقاومت برشی آن‌ها را تعیین کند (به فونتارد، ۱۹۱۴ نگاه کنید). زمان شکست این نمونه‌ها بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه بود.

آرتور لنگلی بل (۱۸۷۴-۱۹۵۶)، مهندس عمران از انگلستان، بر روی طراحی و ساخت دیوار بیرونی دریا در Rosyth Dockyard کار کرد. او بر اساس کار خود، روابطی را برای فشار جانبی و مقاومت در خاک رس و همچنین ظرفیت باربری فونداسیون‌های کم عمق در خاک رس ایجاد کرد (به بل، ۱۹۱۵ مراجعه کنید). او همچنین از آزمایش‌های جعبه برشی برای اندازه‌گیری مقاومت برشی زه‌کشی نشده نمونه‌های رسی دست‌نخورده استفاده کرد.

ولمار فلنیوس (۱۸۷۶-۱۹۵۷)، یک مهندس از سوئد، تجزیه و تحلیل پایداری شیب‌های رسی اشباع (یعنی شرایط  $\phi = 0$ ) را با این فرض که سطح بحرانی لغزش قوس یک دایره است، توسعه داد. این در مقالات او که در سال ۱۹۱۸ و ۱۹۲۶ منتشر شده توضیح داده شد. مقاله منتشر شده در سال ۱۹۲۶ راه‌حل‌های عددی صحیحی برای اعداد پایداری سطوح لغزش دایره‌ای که از نوک شیب عبور می‌کنند ارائه کرد.

کارل ترزاقی (۱۸۸۳-۱۹۶۳) از اتریش (شکل ۴.۱) نظریه تحکیم خاک رس را که امروزه می‌شناسیم توسعه داد. این نظریه زمانی ایجاد شد که ترزاقی در کالج آمریکایی رابرت در استانبول ترکیه تدریس می‌کرد. مطالعه او یک دوره پنج ساله از ۱۹۱۹ تا ۱۹۲۴ را در بر گرفت. پنج خاک رسی مختلف استفاده شد. حد مایع آن خاک‌ها بین ۳۶ تا ۶۷ بود و شاخص پلاستیسیته بین ۱۸ تا ۳۸ بود. نظریه تحکیم در کتاب مشهور Erdbaumechanik ترزاقی در سال ۱۹۲۵ منتشر شد.



شکل ۴.۱ کارل ترزاقی (۱۸۸۳-۱۹۶۳) (SSPL) از طریق گتی ایماژ)

#### ۷.۱ مهندسی ژئوتکنیک پس از ۱۹۲۷

انتشار Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage توسط کارل ترزاقی در سال ۱۹۲۵ عصر جدیدی را در توسعه مکانیک خاک متولد کرد. کارل ترزاقی به عنوان پدر مکانیک خاک مدرن شناخته می‌شود و به حق نیز چنین است. ترزاقی در ۲ اکتبر ۱۸۸۳ در پراگ که در آن زمان مرکز استان بوهیمیا اتریش بود به دنیا آمد. در سال ۱۹۰۴ از Technische Hochschule در گراتس اتریش با مدرک کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک فارغ التحصیل شد. پس از فارغ التحصیلی یک سال در ارتش اتریش خدمت کرد. ترزاقی پس از خدمت سربازی، یک سال دیگر به تحصیل پرداخت و روی موضوعات زمین شناسی تمرکز کرد. در ژانویه ۱۹۱۲ مدرک دکترای علوم فنی را از دانشگاه خود در گراتس دریافت کرد. در سال ۱۹۱۶ سمت تدریس در مدرسه مهندسی امپراتوری استانبول را پذیرفت. پس از پایان جنگ جهانی اول، او در کالج آمریکایی رابرت در استانبول (۱۹۱۸-۱۹۲۵) دوره سخنرانی را پذیرفت. در آنجا کار تحقیقاتی خود را در مورد رفتار خاک و نشست رس‌ها و شکست ناشی از لوله کشی در ماسه در زیر سدها آغاز کرد. نشریه Erdbaumechanik در درجه اول نتیجه این تحقیق است.

در سال ۱۹۲۵، ترزاقی پذیرفت که در موسسه فناوری ماساچوست سخنرانی کند و تا سال ۱۹۲۹ در آنجا کار کرد. در این مدت، او به عنوان رهبر شاخه جدید مهندسی عمران به نام مکانیک خاک شناخته شد. در اکتبر ۱۹۲۹، او به اروپا بازگشت و کرسی استادی در دانشگاه فنی وین را پذیرفت که خیلی زود به مرکز مهندسين عمران علاقه مند به مکانیک خاک تبدیل شد. در سال ۱۹۳۹ به ایالات متحده بازگشت و در دانشگاه هاروارد استاد شد.

اولین کنفرانس انجمن بین المللی مکانیک خاک و مهندسی فونداسیون (ISSMFE) در دانشگاه هاروارد در سال ۱۹۳۶ به ریاست کارل ترزاقی برگزار شد. این کنفرانس با اعتقاد و تلاش پروفیسور آرتور کازاگراندا از دانشگاه هاروارد امکان پذیر شد. حدود ۲۰۰ نفر به نمایندگی از ۲۱ کشور در این کنفرانس شرکت کردند. از طریق الهام و راهنمایی ترزاقی در طول ربع قرن گذشته بود که مقالاتی به آن کنفرانس آورده شد که طیف وسیعی از موضوعات را در بر می گرفت از جمله

- تنش موثر
- مقاومت برشی
- تست با نفوذ سنج مخروطی هلندی
- تحکیم
- آزمایش سانتریفیوژ
- نظریه الاستیک و توزیع تنش
- پیش بارگیری برای کنترل نشست
- خاک رس متورم
- عمل یخ زدگی
- زلزله و روانگرایی خاک
- ارتعاش دستگاه
- نظریه قوس فشار زمین

برای ربع قرن بعدی، ترزاقی روحیه راهنما در توسعه مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک در سراسر جهان بود. به همین منظور، رالف پک در سال ۱۹۸۵ نوشت که «در زمان حیات ترزاقی، تعداد کمی از مردم موافق نبودند که او نه تنها روحیه راهنما در مکانیک خاک بود، بلکه او مرکز تحقیقات و کاربرد در سراسر جهان بود. در چند سال آینده او در پروژه هایی در هر قاره به جز استرالیا و قطب جنوب مشغول خواهد شد. پک ادامه داد: «بنابراین، حتی امروز، به سختی می توان ارزیابی های معاصرش از وضعیت مکانیک خاک را که در فضای خالیصه مقالات و سخنرانی های ریاست جمهوری بیان می شود، بهبود بخشید.» در سال ۱۹۳۹، ترزاقی چهل و پنجمین سخنرانی جیمز فارست را در موسسه مهندسين عمران لندن ایراد کرد. سخنرانی او با عنوان "مکانیک خاک - فصل جدیدی در علوم مهندسی" بود. در آن، او اعلام کرد که بیشتر شکست های بنیادی که رخ داده است دیگر «اعمال خدا» نیستند.

در زیر برخی از نکات برجسته در توسعه مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک که پس از اولین کنفرانس ISSMFE در سال ۱۹۳۶ تکامل یافت، آمده است:

- انتشار کتاب مکانیک نظری خاک اثر کارل ترزاقی در سال ۱۹۴۳ (وایلی، نیویورک)
  - انتشار کتاب مکانیک خاک در عمل مهندسی اثر کارل ترزاقی و رالف پک در سال ۱۹۴۸ (وایلی، نیویورک)
  - انتشار کتاب مبانی مکانیک خاک نوشته دونالد دبلیو تیلور در سال ۱۹۴۸ (وایلی، نیویورک)
  - شروع انتشار ژئوتکنیک، مجله بین المللی مکانیک خاک در سال ۱۹۴۸ در انگلستان.
- پس از یک وقفه کوتاه برای جنگ جهانی دوم، دومین کنفرانس ISSMFE در روتردام، هلند، در سال ۱۹۴۸ برگزار شد. حدود ۶۰۰ شرکت کننده در آن حضور داشتند و هفت جلد از مقالات منتشر شد. در این کنفرانس، A. W. Skempton مقاله برجسته در مورد مفهوم  $\phi = 0$  برای خاک رس ارائه کرد. پس از روتردام، کنفرانس‌های ISSMFE تقریباً هر چهار سال یک بار در نقاط مختلف جهان برگزار می‌شود. پیامدهای کنفرانس روتردام شاهد رشد کنفرانس‌های منطقه‌ای در زمینه مهندسی ژئوتکنیک بود از جمله
- کنفرانس منطقه‌ای اروپا در مورد پایداری شیب‌های زمین، استکهلم (۱۹۵۴)
  - اولین کنفرانس استرالیا-نیوزیلند در مورد ویژگی‌های برشی خاک (۱۹۵۲)
  - اولین کنفرانس پان آمریکا، مکزیکو سیتی (۱۹۶۰)
  - کنفرانس تحقیقاتی در مورد مقاومت برشی خاک‌های چسبنده، بولدر، کلرادو، (۱۹۶۰)
- دو نقطه عطف مهم دیگر بین سال‌های ۱۹۴۸ و ۱۹۶۰ عبارتند از (۱) انتشار مقاله AW Skempton در مورد پارامترهای فشار منفذ A و B، که محاسبات تنش مؤثر را برای کارهای مهندسی مختلف کاربردی تر کرد، و (۲) انتشار کتابی با عنوان اندازه‌گیری خواص خاک در متن سه محوری توسط AW Bishop و BJ Henkel (آرنولد، لندن) در سال ۱۹۵۷.
- در اوایل دهه ۱۹۵۰، راه‌حل‌های تفاضل محدود و اجزای محدود به کمک کامپیوتر برای انواع مختلفی از مسائل مهندسی ژئوتکنیک به کار گرفته شد. آن‌ها هنوز یک ابزار محاسباتی مهم و مفید در حرفه ما هستند. از همان روزهای اولیه، حرفه مهندسی ژئوتکنیک راه طولانی را پیموده و به بلوغ رسیده است. اکنون این یک شاخه تاسیس شده از مهندسی عمران است و هزاران مهندس عمران مهندسی ژئوتکنیک را به عنوان حوزه تخصصی ترجیحی خود اعلام می‌کنند.
- در سال ۱۹۹۷، ISSMFE به ISSMGE (انجمن بین المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک) تغییر یافت تا دامنه واقعی آن را منعکس کند. این کنفرانس‌های بین المللی برای تبادل اطلاعات در مورد پیشرفت‌های جدید و عملیتهای تحقیقاتی در حال انجام در مهندسی ژئوتکنیک بسیار مفید بوده است. جدول ۲.۱ مکان و سال برگزاری هر کنفرانس ISSMFE/ISSMGE را نشان می‌دهد.



**جدول ۲.۱ جزئیات کنفرانس‌های ISSMFE (۱۹۹۷-۱۹۳۶) و ISSMGE (اکتوبر-۱۹۹۷)**

سال	مکان	کنفرانس
1936	دانشگاه هاروارد، بوستون، ایالات متحده آمریکا	I
1948	روتردام، هلند	II
1953	زوریخ، سوئیس	III
1957	لندن، انگلستان	IV
1961	پاریس، فرانسه	V
1965	مونترال، کانادا	VI
1969	مکزیکو سیتی، مکزیک	VII
1973	مسکو، U.S.S.R.	VIII
1977	توکیو ژاپن	IX
1981	استکهلم سوئد	X
1985	سانفرانسیسکو، ایالات متحده آمریکا	XI
1989	ریودوژانیرو، برزیل	XII
1994	دهلی نو، هند	XIII
1997	هامبورگ، آلمان	XIV
2001	استانبول، ترکیه	XV
2005	اوزاکا، ژاپن	XVI
2009	اسکندریه، مصر	XVII
2013 (برنامه‌ریزی شده)	پاریس، فرانسه	XVIII

© Cengage Learning 2014

در سال ۱۹۶۰، بیشاپ، آلپان، بلایت و دونالد رهنمودهای اولیه و نتایج تجربی را برای عوامل کنترل کننده مقاومت خاک‌های چسبنده نیمه اشباع ارائه کردند. از آن زمان پیشرفت‌هایی در مطالعه رفتار خاک‌های غیراشباع در رابطه با مقاومت و تراکم‌پذیری و سایر عوامل مؤثر بر ساخت سازه‌های پشتیبانی زمین و نگهداری زمین صورت گرفته است.

ISSMGE چندین کمیته فنی دارد و این کمیته‌ها چندین کنفرانس را در سرتاسر جهان سازماندهی یا حمایت مالی می‌کنند. فهرستی از این کمیته‌های فنی (۲۰۱۰-۲۰۱۳) در جدول ۳.۱ آورده شده است. ISSMGE هم‌چنین سمینارهای بین‌المللی (که قبلاً به عنوان سخنرانی‌های تور شناخته می‌شد) برگزار می‌کند و ثابت شده است که آن‌ها یک عاملیت مهم هستند. این سمینارها دست‌اندرکاران، پیمانکاران و دانشگاهیان را، چه روی صحنه و چه در بین تماشاگران، به نفع خود بدون توجه به منطقه، اندازه، یا ثروت جامعه عضو گرد هم می‌آورند، بنابراین حس تعلق به انجمن بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک را تقویت می‌کنند.

نام کمیته فنی	شماره کمیته فنی	گروه
تست مقاومت تنش آزمایشگاهی ژئومواد	TC101	مبانی
ویژگی‌های زمینی از آزمایش‌های درجا	TC102	
روش‌های عددی در ژئومکانیک	TC103	
مدل سازی فیزیکی در ژئوتکنیک	TC104	
ژئومکانیک از میکرو تا ماکرو	TC105	
خاک‌های غیر اشباع	TC106	
جنبه‌های ژئوتکنیکی سدها و خاکریزها، حفاظت از ساحل و احیای زمین	TC201	کاربرد
ژئوتکنیک حمل و نقل	TC202	
مهندسی ژئوتکنیک زلزله و مسائل مرتبط با آن	TC203	
ساخت و ساز زیرزمینی در زمین نرم	TC204	
طراحی حالت محدود در مهندسی ژئوتکنیک	TC205	
طراحی تعاملی ژئوتکنیکی	TC206	
اندرکنش خاک و سازه و دیوارهای حائل	TC207	
پایداری دامنه‌های طبیعی	TC208	
ژئوتکنیک فراساحلی	TC209	
سدها و خاکریزها	TC210	
بهسازی زمین	TC211	
پایه‌های عمیق	TC212	
ژئوتکنیک فرسایش خاک	TC213	
مهندسی پایه برای شرایط سخت خاک نرم	TC214	
ژئوتکنیک محیطی	TC215	تأثیر بر جامعه
ژئوتکنیک یخ زدگی	TC216	
حفاظت از اماکن تاریخی	TC301	
مهندسی ژئوتکنیک قانونی	TC302	
کاهش و احیای بلایای سواحل و رودخانه	TC303	
تمرین مهندسی ارزیابی و مدیریت ریسک	TC304	
زیرساخت‌های ژئوتکنیکی برای کلان شهرها و پایتخت‌های جدید	TC305	

## ۸.۱ پایان یک دوره

در بخش ۷.۱، فضای خالی‌ه‌ای از کمک‌های پیشگامانی مانند کارل ترزاقی، آرتور کازاگران، دونالد دبلیو. تیلور، لوریتس بیجروم و رالف بی. پک به مکانیک خاک مدرن ارائه شد. آخرین غول اولیه این حرفه، رالف بی پک، در ۱۸ فوریه ۲۰۰۸ در سن ۹۵ سالگی درگذشت.

پروفسور رالف بی. پک (شکل ۵.۱) در وینپیگ، کانادا از پدر و مادر آمریکایی اروپین کی و اتل اچ میک در ۲۳ ژوئن ۱۹۱۲ به دنیا آمد. او مدرک لیسانس و دکترای تخصصی‌اش را به ترتیب در سال ۱۹۳۴ و ۱۹۳۷ از موسسه پلی تکنیک رنسلیر، تروی، نیویورک دریافت کرد. در طول دوره ۱۹۳۸ تا ۱۹۳۹، او دوره‌هایی را از آرتور کاساگران در دانشگاه هاروارد در یک موضوع جدید به نام "مکانیک خاک" گذراند. از سال ۱۹۳۹ تا ۱۹۴۳، دکتر پک به عنوان دستیار کارل ترزاقی، «پدر» مکانیک خاک مدرن، در پروژه متروی شیکاگو کار کرد. در سال ۱۹۴۳، او به دانشگاه ایلینوی در Champaign-Urban پیوست و از سال ۱۹۴۸ تا زمانی که در

سال ۱۹۷۴ بازنشسته شد، استاد مهندسی فونداسیون بود. او پس از بازنشستگی در زمینه مشاوره عامل بود که شامل پروژه‌های بزرگ ژئوتکنیکی در ۴۴ ایالت آمریکا و ۲۸ کشور دیگر در پنج قاره بود. چند نمونه از پروژه‌های عمده مشاوره او عبارتند از

- سیستم‌های حمل و نقل سریع در شیکاگو، سانفرانسیسکو، و واشنگتن، دی سی.

- سیستم خط لوله آلاسکا

- پروژه جیمز بی در کبک، کانادا

- پروژه قطار سریع السیر هیترو (بریتانیا)

- سدهای دریای مرده



شکل ۵.۱ رالف بی پک (عکس با حسن نیت از رالف بی پک)

آخرین پروژه او پل Rion-Antirion در یونان بود. در ۱۳ مارس ۲۰۰۸، تایمز انگلستان نوشت: «رالف بی پک یک مهندس عمران آمریکایی بود که یک تکنیک ساخت و ساز بحث برانگیز را اختراع کرد که در برخی از شگفتی‌های مهندسی مدرن جهان، از جمله

تونل مانش، استفاده می‌شد. او که به‌عنوان «پدرخوانده مکانیک خاک» شناخته می‌شود، مستقیماً مسئول پروژه‌های مشهور تونل‌سازی و سدهای خاکی بود که مرزهای آنچه را که تصور می‌شد ممکن می‌شد جابجا کرد.

دکتر یک بیش از ۲۵۰ نشریه فنی بسیار برجسته را تالیف کرد. او از سال ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۳ رئیس ISSMGE بود. در سال ۱۹۷۴، مدال ملی علم را از رئیس جمهور جرالد آر. فورد دریافت کرد. پروفیسور یک معلم، مربی، دوست و مشاور نسل‌های مختلف مهندسان ژئوتکنیک در هر کشوری در جهان بود. شانزدهمین کنفرانس ISSMGE در اوزاکا، ژاپن (۲۰۰۵) آخرین کنفرانس بزرگ از نوع خود خواهد بود که وی در آن شرکت خواهد کرد.

این واقعه پایان یک دوره است.

## منابع

ATTERBERG, A. M. (۱۹۱۱). "Über die physikalische Bodenuntersuchung, und über die Plastizität de Tone," International Mitteilungen für Bodenkunde, Verlag für Fachliteratur. G.m.b.H. Berlin, Vol. ۱, ۱۰–۴۳.

BELIDOR, B. F. (۱۷۲۹). La Science des Ingenieurs dans la Conduite des Travaux de Fortification et D'Architecture Civil, Jombert, Paris.

BELL, A. L. (۱۹۱۵). "The Lateral Pressure and Resistance of Clay, and Supporting Power of Clay Foundations," Min. Proceeding of Institute of Civil Engineers, Vol. ۱۹۹, ۲۳۳–۲۷۲.

BISHOP, A. W., ALPAN, I., BLIGHT, G. E., and DONALD, I. B. (۱۹۶۰). "Factors Controlling the Strength of Partially Saturated Cohesive Soils." Proceedings. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, ۵۰۲–۵۳۲.

BISHOP, A. W. and HENKEL, B. J. (۱۹۵۷). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Arnold, London.

BOUSSINESQ, J. V. (۱۸۸۵). Application des Potentiels à L'Etude de L'Équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques, Gauthier-Villars, Paris.

COLLIN, A. (۱۸۴۶). Recherches Expérimentales sur les Glissements Spontanés des Terrains Argileux Accompagnées de Considérations sur Quelques Principes de la Mécanique Terrestre, Carilian-Goeury, Paris.

COULOMB, C. A. (۱۷۷۶). "Essai sur une Application des Règles de Maximis et Minimis à Quelques Problèmes de Statique Relatifs à L'Architecture," Mémoires de la Mathématique et de Phisique, présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers savans, et lûs dans sés Assemblées, De L'Imprimerie Royale, Paris, Vol. ۷, Annee ۱۷۹۳, ۳۴۳–۳۸۲.

DARCY, H. P. G. (۱۸۵۶). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.

DARWIN, G. H. (۱۸۸۳). "On the Horizontal Thrust of a Mass of Sand," Proceedings, Institute of Civil Engineers, London, Vol. ۷۱, ۳۵۰–۳۷۸.

FELLENIIUS, W. (۱۹۱۸). "Kaj-och Jordrasen I Göteborg," Teknisk Tidskrift. Vol. ۴۸, ۱۷–۱۹.

FRANCAIS, J. F. (۱۸۲۰). "Recherches sur la Poussée de Terres sur la Forme et Dimensions des Revêtements et sur la Talus D'Excavation," Mémorial de L'Officier du Génie, Paris, Vol. IV, ۱۵۷–۲۰۶.

FRONTARD, J. (1914). "Notice sur L'Accident de la Digue de Charmes," Anns. Ponts et Chaussées 9th Ser., Vol. 22, 173-292.

GADROY, F. (1946). Mémoire sur la Poussée des Terres, summarized by Mayniel, 1808.

GAUTIER, H. (1919). Dissertation sur L'Epaisseur des Culées des Ponts . . . sur L'Effort et al Pesanteur des Arches . . . et sur les Profiles de Maconnerie qui Doivent Supporter des Chaussées, des Terrasses, et des Remparts. Cailleau, Paris.

KERISEL, J. (1980). "The History of Geotechnical Engineering up until 1900," Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume, A. A. Balkema, 3-93.

MAYNIEL, J. J. (1808). Traité Experimentale, Analytique et Pratique de la Poussée des Terres. Colas, Paris.

NAVIER, C. L. M. (1839). Leçons sur L'Application de la Mécanique à L'Etablissement des Constructions et des Machines, 2nd ed., Paris.

PECK, R. B. (1980). "The Last Sixty Years," Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume, A. A. Balkema, 123-133.

PONCELET, J. V. (1840). Mémoire sur la Stabilité des Revêtements et de leurs Fondations, Bachelier, Paris

PRONY, G. C. M. L. R. (1790), Nouvelle Architecture Hydraulique, contenant l'art d'élever l'eau au moyen de différentes machines, de construire dans ce fluide, de le diriger, et généralement de l'appliquer, de diverses manières, aux besoins de la société, FirminDidot, Paris.

RANKINE, W. J. M. (1867). "On the Stability of Loose Earth," Philosophical Transactions, Royal Society, Vol. 147, London.

REYNOLDS, O. (1887). "Experiments Showing Dilatency, a Property of Granular Material Possibly Connected to Gravitation," Proceedings, Royal Society, London, Vol. 11, 304-363.

SKEMPTON, A. W. (1948). "The Factor Analysis of Stability and Its Theoretical Basis," Proceedings, II International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. 1, 72-78.

SKEMPTON, A. W. (1964). "The Pore Pressure Coefficients A and B," Geotechnique, Vol. 14, 143-147.

SKEMPTON, A. W. (1980). "A History of Soil Properties, 1917-1947," Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume, A. A. Balkema, 90-121.

TAYLOR, D. W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley, New York.

TERZAGHI, K. (1920). Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage, Deuticke, Vienna

TERZAGHI, K. (1929). "Soil Mechanics—A New Chapter in Engineering Science," Institute of Civil Engineers Journal, London, Vol. 12, No. 7, 106-142.

TERZAGHI, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, New York.

TERZAGHI, K., and PECK, R. B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley, New York.

## منشأ خاک و اندازه دانه

### ۱.۲ مقدمه

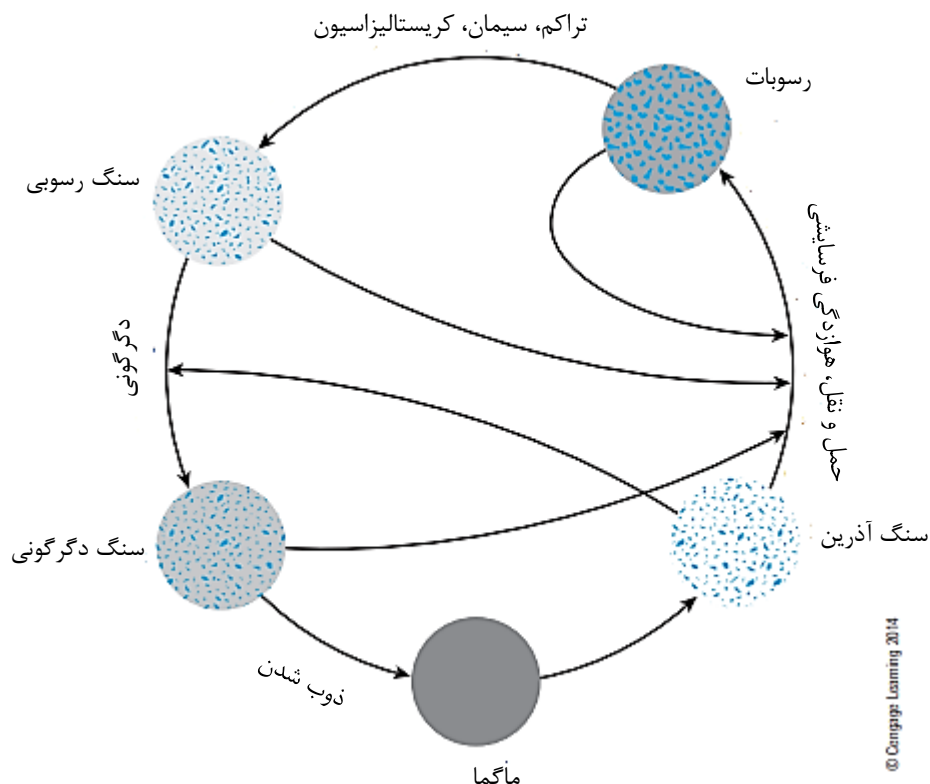
به طور کلی خاک‌ها از هوازدگی سنگ‌ها تشکیل می‌شوند. خواص فیزیکی خاک عمدتاً توسط مواد معدنی تشکیل دهنده ذرات خاک و در نتیجه سنگی که از آن مشتق شده است تعیین می‌شود. در این فصل به موارد زیر خواهیم پرداخت:

- تشکیل انواع سنگ‌ها که منشأ آن‌ها انجماد ماگمای مذاب گوشته زمین است.
- تشکیل خاک در اثر هوازدگی مکانیکی و شیمیایی سنگ
- تعیین توزیع اندازه ذرات در یک توده خاک معین
- ترکیب کانی‌های رسی که خواص خمیری توده خاک را فراهم می‌کند
- شکل ذرات مختلف در یک توده خاک

### ۲.۲ چرخه سنگ و منشأ خاک

دانه‌های معدنی که فاز جامد یک خاکدانه را تشکیل می‌دهند محصول هوازدگی سنگ هستند. اندازه هر دانه در محدوده وسیعی متفاوت است. بسیاری از خواص فیزیکی خاک به اندازه، شکل و ترکیب شیمیایی دانه‌ها تعیین می‌شود. برای درک بهتر این عوامل، باید با انواع اصلی سنگ‌هایی که پوسته زمین را تشکیل می‌دهند، کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و فرآیند هوازدگی آشنا بود.

سنگ‌ها را بر اساس نحوه پیدایش آن‌ها می‌توان به سه نوع اصلی تقسیم کرد: آذرین، رسوبی و دگرگونی. شکل ۱.۲ نموداری از چرخه تشکیل انواع مختلف سنگ و فرآیندهای مرتبط با آن‌ها را نشان می‌دهد. به این چرخه سنگ می‌گویند. بحث‌های مختصری در مورد هر عنصر از چرخه سنگ در ادامه می‌آید.



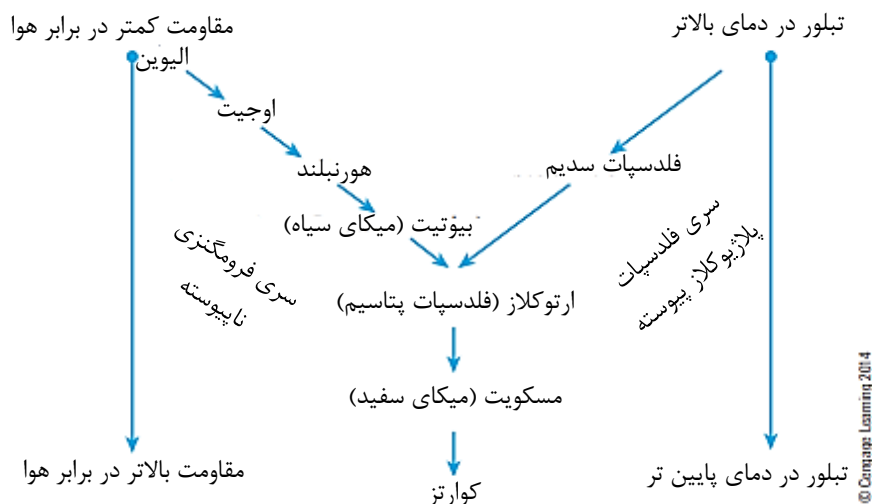
شکل ۱.۲ چرخه سنگ

## سنگ آذرین

سنگ‌های آذرین از انجماد ماگمای مذاب خارج شده از اعماق گوشته زمین تشکیل می‌شوند. پس از بیرون راندن توسط فوران شکاف یا فوران آتشفشانی، مقداری از ماگمای مذاب در سطح زمین سرد می‌شود. گاهی اوقات ماگما حرکت خود را در زیر سطح زمین متوقف می‌کند و سرد می‌شود و سنگ‌های آذرین نفوذی را تشکیل می‌دهد که پلوتون نامیده می‌شوند. سنگ‌های نفوذی تشکیل شده در گذشته ممکن است در اثر فرآیند مداوم فرسایش موادی که زمانی آن‌ها را پوشانده‌اند، در سطح قرار گیرند.

انواع سنگ‌های آذرین تشکیل شده از سرد شدن ماگما به عواملی مانند ترکیب ماگما و سرعت سرد شدن مرتبط با آن بستگی دارد. پس از انجام چندین آزمایش آزمایشگاهی، بوون (۱۹۲۲) توانست رابطه سرعت سرد شدن ماگما را با تشکیل انواع مختلف سنگ توضیح دهد. این توضیح که به عنوان اصل واکنش بوون شناخته می‌شود، توالی تشکیل کانی‌های جدید را با سرد شدن ماگما توصیف می‌کند. بلورهای معدنی بزرگ‌تر می‌شوند و برخی از آن‌ها ته‌نشین می‌شوند. کریستال‌هایی که در مایع معلق می‌مانند با مذاب باقی مانده واکنش می‌دهند و در دمای پایین‌تری یک کانی جدید تشکیل می‌دهند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که کل بدنه مذاب جامد شود. بوون این واکنش‌ها را به دو گروه طبقه‌بندی کرد: (۱) سری واکنش‌های فرومگنزی ناپیوسته، که در آن کانی‌های تشکیل شده از نظر ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی متفاوت هستند، و (۲) سری واکنش‌های پلاژیوکلاز فلدسپات پیوسته، که در آن

کانی‌های تشکیل شده دارای ترکیبات شیمیایی متفاوتی هستند. با ساختارهای کریستالی مشابه شکل ۲.۲ سری واکنش بوون را نشان می‌دهد. ترکیبات شیمیایی مواد معدنی در جدول ۱.۲ آورده شده است. شکل ۳.۲ یک میکروسکوپ الکترونی روبشی از یک سطح شکسته کوارتز است که شکستگی‌های شیشه مانند را بدون شکاف مسطح مجزا نشان می‌دهد. شکل ۴.۲ یک میکروسکوپ الکترونی روبشی است که برش پایه تک دانه‌های میکا را نشان می‌دهد.



شکل ۲.۲ سری واکنش بوون

بنابراین، بسته به نسبت مواد معدنی موجود، انواع مختلفی از سنگ‌های آذرین تشکیل می‌شود. گرانیات، گابرو و بازالت برخی از انواع رایج سنگ‌های آذرین هستند که عموماً در این زمینه با آن مواجه می‌شوند. جدول ۲.۲ ترکیب کلی برخی از سنگ‌های آذرین را نشان می‌دهد.

## هوازدگی

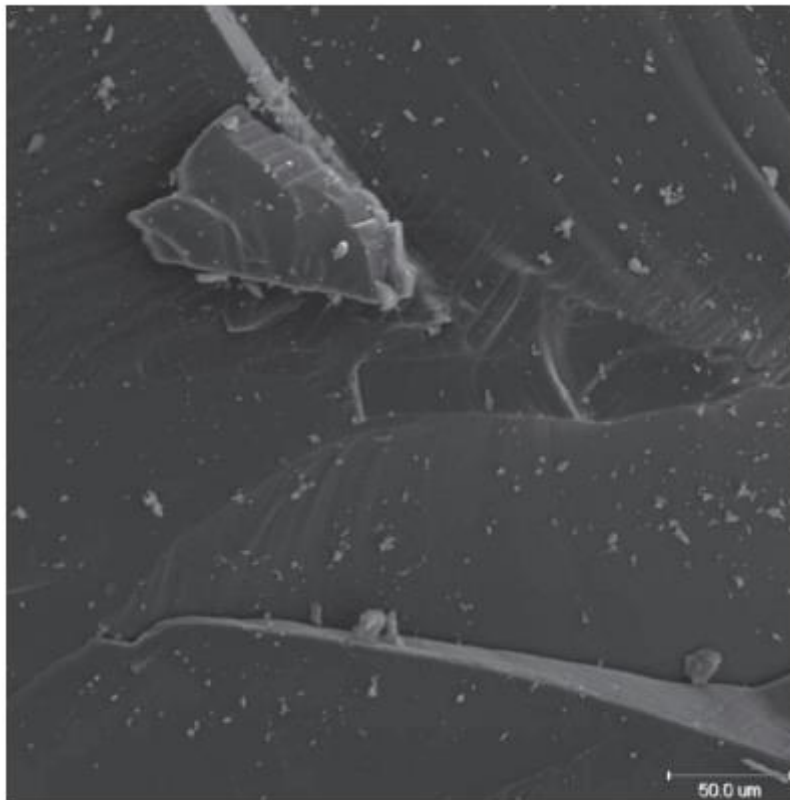
هوازدگی فرآیندی است که در آن سنگ‌ها توسط فرآیندهای مکانیکی و شیمیایی به قطعات کوچک‌تر تجزیه می‌شوند. هوازدگی مکانیکی ممکن است در اثر انبساط و انقباض سنگ‌ها از افزایش و از دست دادن مداوم گرما ایجاد شود که منجر به تجزیه نهایی می‌شود. اغلب آب به داخل منافذ و شکاف‌های موجود در سنگ‌ها نفوذ می‌کند. با کاهش دما، آب یخ می‌زند و منبسط می‌شود. فشار وارد شده توسط یخ به دلیل انبساط حجم به اندازه کافی قوی است که حتی سنگ‌های بزرگ را نیز تجزیه می‌کند. سایر عوامل فیزیکی که به تجزیه سنگ‌ها کمک می‌کنند عبارتند از یخ یخچال، باد، آب جاری نهرها و رودخانه‌ها و امواج اقیانوس. توجه به این نکته مهم است که در هوازدگی مکانیکی، سنگ‌های بزرگ بدون هیچ تغییری در ترکیب شیمیایی به قطعات کوچک‌تر شکسته می‌شوند. شکل ۵.۲ چندین نمونه از فرسایش مکانیکی ناشی از امواج اقیانوس و باد در Yehliu در تایوان را نشان می‌دهد. این منطقه در دماغه دریایی طولانی و باریک در سمت شمال غربی کیلونگ، در حدود ۱۵ کیلومتری بین ساحل شمالی چین شان و وانلی واقع شده است. شکل ۶.۲ نمونه دیگری از هوازدگی مکانیکی در رخنمون گرانیات پرکامبرین در پارک ایالتی فیل راکس در جنوب شرقی میسوری را نشان می‌دهد. عمل انجماد و ذوب آب روی سطح، سنگ را می‌شکند و شکاف‌های بزرگ و الگوی زهکشی در سنگ ایجاد می‌کند (شکل ۶.۲ الف). در طی یک دوره زمانی، سنگ‌های بدون هوا به تخته سنگ‌های بزرگ تبدیل می‌شوند (شکل ۶.۲ ب). شکل ۷.۲ عکس دیگری از هوازدگی در جای گرانیات را نشان می‌دهد.



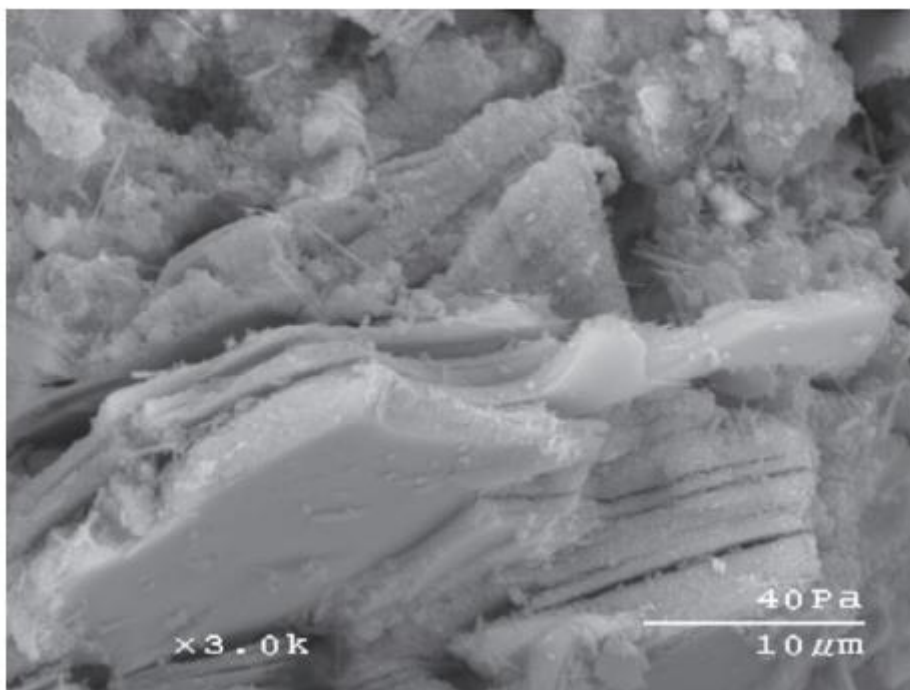
## جدول ۱.۲ ترکیب مواد معدنی نشان داده شده در سری واکنش بوون

ترکیب	معدنی
$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$	الیوین
$\text{Ca, Na}(\text{Mg, Fe, Al})(\text{Al, Si}_2\text{O}_6)$	اوجیت
Complex ferromagnesian silicate of Ca, Na, Mg, Ti, and Al	هورنبلند
$\text{K}(\text{Mg, Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	بیوتیت (میکای سیاه)
$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$	فلدسپات کلسیم پلاژیوکلاز
$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	
$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	فلدسپات سدیم
$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	ارتوکلاز (فلدسپات پتاسیم)
$\text{SiO}_2$	مسکویت (میکای سفید) کوارتز

© Cengage Learning 2014



**شکل ۳.۲** میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکسته کوارتز که شکستگی‌های شیشه‌ای مانند بدون سطح مسطح مجزا را نشان می‌دهد (با اجازه دیوید جی وایت، دانشگاه ایالتی آیووا، ایمز، آیووا)



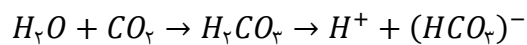
**شکل ۴.۲** میکروسکوپ الکترونی روبشی که برش پایه تک دانه‌های میکا را نشان می‌دهد (با اجازه دیوید جی وایت، دانشگاه ایالتی آیووا، ایمز، آیووا)

**جدول ۲.۲** ترکیب برخی از سنگهای آذرین

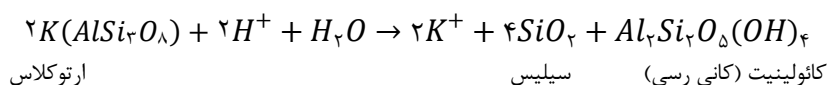
نام سنگ	نحوه وقوع	بافت	مواد معدنی فراوان	مواد معدنی کمتر
سنگ گرانیت	نفوذی	درشت	کوارتز، فلدسپات سدیم، فلدسپات پتاسیم	بیوتیت، مسکویت، هورنبلند
ریولیت	اکستروژن	ریز	پلاژیوکلاز	هورنبلند، بیوتیت، مگنتیت
گابرو	نفوذی	درشت	پیروکسین ها، الیوین	بیوتیت، پیروکسن (کوارتز معمولاً وجود ندارد)
بازالت	اکستروژن	ریز	پلاژیوکلاز، هورنبلند	فلدسپات سدیم، بیوتیت، هورنبلند
دیوریت	نفوذی	درشت	فلدسپات پتاسیم	اکسیدهای آهن
آندزیت	اکستروژن	ریز	الیوین، پیروکسن ها	
سینیت	نفوذی	درشت		
تراکیت	اکستروژن	ریز		
پریدوتیت	نفوذی	درشت		

© Cengage Learning 2014

در هوازدگی شیمیایی، کانی‌های سنگی اولیه با واکنش شیمیایی به کانی‌های جدید تبدیل می‌شوند. آب و دی اکسید کربن موجود در اتمسفر، اسید کربنیک را تشکیل می‌دهند که با کانی‌های سنگی موجود واکنش داده و مواد معدنی و نمک‌های محلول جدید را تشکیل می‌دهد. نمک‌های محلول موجود در آب‌های زیرزمینی و اسیدهای آلی تشکیل شده از مواد آلی پوسیده نیز باعث هوازدگی شیمیایی می‌شوند. نمونه‌ای از هوازدگی شیمیایی ارتوکلاز برای تشکیل کانی‌های رسی، سیلیس و کربنات پتاسیم محلول به شرح زیر است:



اسید کربنیک



ارتوکلایس

سیلیس

کانولینیت (کانی رسی)

بیشتر یون‌های پتاسیم آزاد شده در محلول منتقل می‌شوند زیرا کربنات پتاسیم توسط گیاهان جذب می‌شود.

هوازدهی شیمیایی فلدسپات‌های پلاژیوکلاز شبیه ارتوکلایس است زیرا کانی‌های رسی، سیلیس و نمک‌های محلول مختلف تولید می‌کند. کانی‌های فرومگنزی نیز محصولات تجزیه کانی‌های رسی، سیلیس و نمک‌های محلول را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، آهن و منیزیم موجود در مواد معدنی فرومگنزی باعث تولید محصولات دیگری مانند همتیت و لیمونیت می‌شود. کوارتز در برابر هوا بسیار مقاوم است و فقط کمی در آب حل می‌شود. شکل ۲.۲ حساسیت کانی‌های سنگ ساز را به هوازدهی نشان می‌دهد. کانی‌هایی که در دماهای بالاتر در سری واکنش بوون تشکیل می‌شوند نسبت به آنهایی که در دماهای پایین‌تر تشکیل می‌شوند در برابر هوا مقاومت کمتری دارند.



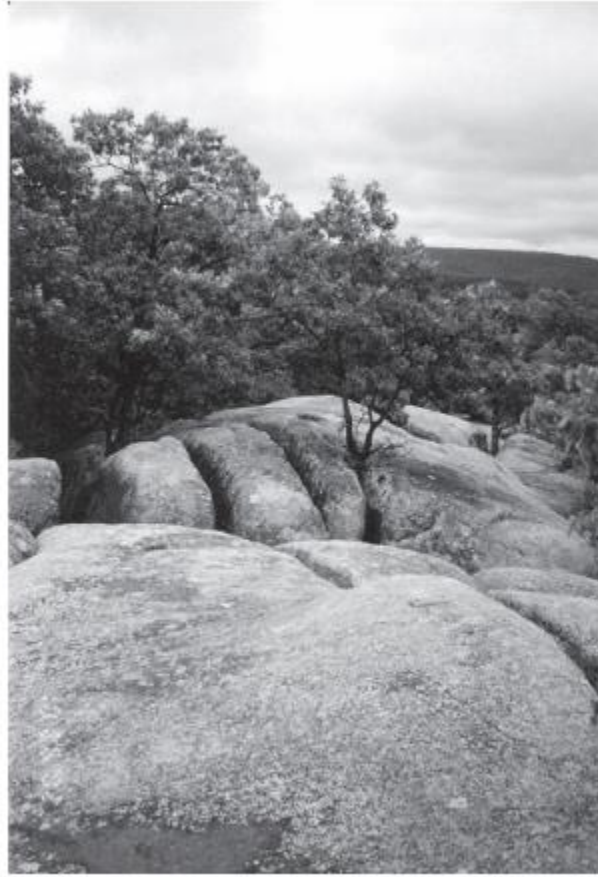
**شکل ۵.۲** فرسایش مکانیکی ناشی از امواج اقیانوس و باد در Yehliu، تایوان (با اجازه داده شده از Braja Das، هندرسون، نوادا)





شکل ۵.۲ (ادامه)





(الف)



(ب)

**شکل ۶.۲** هواز دگی مکانیکی گرانیت: (الف) ایجاد ترک‌های بزرگ به دلیل انجماد و ذوب و به دنبال آن یک الگوی زهکشی، (ب) تبدیل سنگ‌های بدون هوا به تخته سنگ‌های بزرگ (با اجازه از جانیس داس، هندرسون، نوادا)



**شکل ۷.۲** هواز دگی مکانیکی در جای گرانیت (با اجازه ریچارد ال. هندی، دانشگاه ایالتی آیووا، ایمز، آیووا)

فرآیند هواز دگی به سنگ‌های آذرین محدود نمی‌شود. همان‌طور که در چرخه سنگ (شکل ۱.۲) نشان داده شده است، سنگ‌های رسوبی و دگرگونی نیز به شیوه‌ای مشابه هوا زده می‌شوند.

بنابراین، از بحث مختصر قبلی، می‌توان دید که چگونه فرآیند هواز دگی، توده‌های سنگ جامد را به قطعات کوچک‌تر با اندازه‌های مختلف تبدیل می‌کند که می‌تواند از تخته سنگ‌های بزرگ تا ذرات رسی بسیار کوچک متغیر باشد. سنگدانه‌های بدون سیمان این دانه‌های ریز به نسبت‌های مختلف انواع مختلفی از خاک را تشکیل می‌دهند. کانی‌های رسی که محصول هواز دگی شیمیایی فلدسپات-ها، فرومگنزیان‌ها و میکاها هستند، خاصیت شکل‌پذیری را به خاک می‌دهند. سه کانی رسی مهم وجود دارد: (۱) کائولینیت، (۲) ایلیت و (۳) مونت موریلونیت. (ما بعداً در این فصل درباره این کانی‌های رسی بحث می‌کنیم).

### انتقال محصولات هوازده

محصولات هوازده ممکن است در همان مکان باقی بمانند یا ممکن است توسط یخ، آب، باد و جاذبه به مکان‌های دیگر منتقل شوند. خاک‌هایی که توسط محصولات هوازده در محل پیدایش خود تشکیل می‌شوند، خاک‌های باقی مانده نامیده می‌شوند. یکی از ویژگی‌های مهم خاک باقی مانده، درجه بندی اندازه ذرات است.

خاک ریزدانه در سطح آن یافت می‌شود و اندازه دانه با عمق افزایش می‌یابد. در اعماق بیش‌تر، قطعات سنگی زاویه دار نیز ممکن است یافت شود.

خاک‌های انتقال یافته بسته به نحوه انتقال و رسوب آن‌ها به چند گروه طبقه بندی می‌شوند:

۱. خاک‌های یخبندان - از انتقال و رسوب یخچال‌ها تشکیل شده است
  ۲. خاک‌های آبرفتی - توسط آب‌های جاری منتقل شده و در کنار نهرها رسوب می‌کنند
  ۳. خاک‌های دریاچه‌ای - از رسوب در دریاچه‌های آرام تشکیل شده است
  ۴. خاک‌های دریایی - که در اثر رسوب گذاری در دریاها به وجود می‌آیند.
  ۶. خاک‌های کولوویال - با حرکت خاک از محل اصلی خود در اثر گرانش، مانند هنگام رانش زمین، تشکیل می‌شوند.
- سنگ رسوبی رسوبات شن، ماسه، سیلت و خاک رس که در اثر هوازدگی ایجاد می‌شوند ممکن است در اثر فشار اضافه بار فشرده شده و توسط عواملی مانند اکسید آهن، کلسیت، دولومیت و کوارتز سیمان شوند. عوامل سیمانی معمولاً در محلول توسط آب‌های زیرزمینی حمل می‌شوند. آن‌ها فضای بین ذرات را پر می‌کنند و سنگ‌های رسوبی را تشکیل می‌دهند. به سنگ‌هایی که به این ترتیب به وجود می‌آیند، سنگ‌های رسوبی آواری می‌گویند.
- تمام سنگ‌های آواری دارای بافت آواری هستند. در ادامه چند نمونه از سنگ‌های آواری با بافت آواری آورده شده است.

سنگ رسوبی	اندازه ذره
کنگلوмера	دانه‌ای یا بزرگ‌تر (اندازه دانه ۲ تا ۴ میلی متر یا بزرگ‌تر)
ماسه سنگ	شن
گل سنگ و شیل	سیلت و خاک رس

© Cengage Learning 2014

در مورد کنگلومرها، اگر ذرات زاویه دارتر باشند، سنگ برش نامیده می‌شود. در ماسه سنگ، اندازه ذرات ممکن است بین  $\frac{1}{16}$  میلی متر تا ۲ میلی متر متفاوت باشد. هنگامی که دانه‌های ماسه سنگ تقریباً تمام کوارتز هستند، سنگ به عنوان ارتوکوارتزیت شناخته می‌شود. در گل سنگ و شیل، اندازه ذرات به طور کلی کم‌تر از  $\frac{1}{16}$  میلی متر است. مادستون جنبه بلوکی دارد. در حالی که در مورد شیل، سنگ به صفحات پلاتی تقسیم می‌شود.

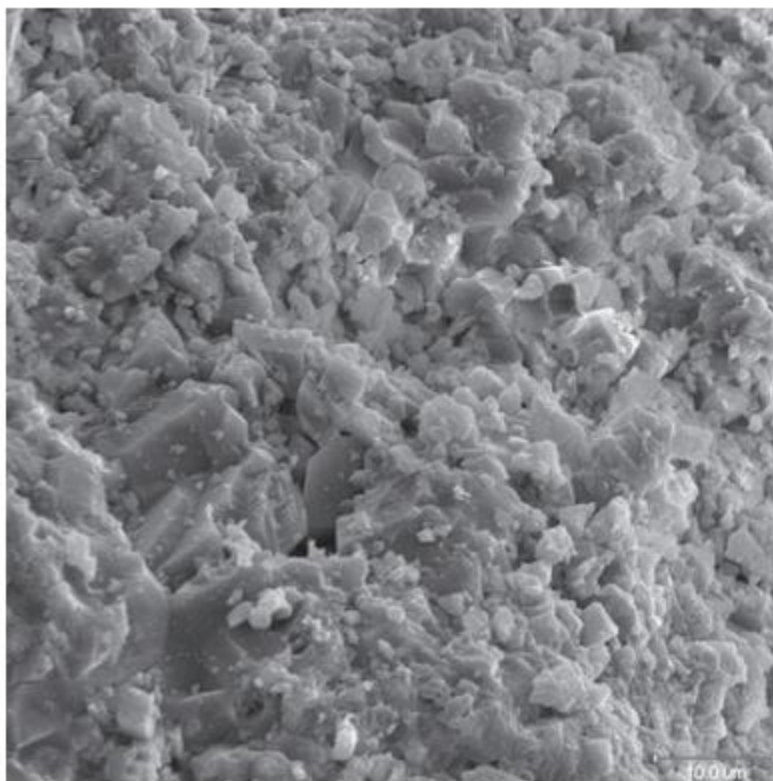
سنگ رسوبی نیز می‌تواند توسط فرآیندهای شیمیایی تشکیل شود. سنگ‌های این نوع به عنوان سنگ‌های رسوبی شیمیایی طبقه‌بندی می‌شوند. این سنگ‌ها می‌توانند بافت آواری یا غیرآواری داشته باشند. در زیر چند نمونه از سنگ‌های رسوبی شیمیایی آورده شده است.



ترکیب	سنگ
کلسیت ( $\text{CaCO}_3$ )	سنگ آهک
هالیت ( $\text{NaCl}$ )	سنگ نمک
دولومیت [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]	دولومیت
گچ ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	گچ

© Cengage Learning 2014

سنگ آهک بیش‌تر از کربنات کلسیم تشکیل شده است که توسط ارگانیزم‌ها یا توسط یک فرآیند غیر آلی رسوب می‌کند. بیش‌تر سنگ‌های آهکی دارای بافت آواری هستند. با این حال، بافت‌های غیرآواری نیز معمولاً یافت می‌شوند. شکل ۸.۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی یک سطح شکسته سنگ آهک را نشان می‌دهد. دانه‌های منفرد کلسیت شکاف لوزی شکل را نشان می‌دهند. گچ یک سنگ رسوبی است که بخشی از آن از کلسیت مشتق شده بیوشیمیایی، که قطعات اسکلتی گیاهان و جانوران میکروسکوپی هستند، ساخته شده است. دولومیت یا از رسوب شیمیایی کربنات‌های مخلوط یا از واکنش منیزیم در آب با سنگ آهک تشکیل می‌شود. گچ و انیدریت از رسوب  $\text{CaSO}_4$  محلول ناشی از تبخیر آب اقیانوس‌ها حاصل می‌شود. آن‌ها به دسته‌ای از سنگ‌ها تعلق دارند که عموماً به آن‌ها نمک‌های تبخیر می‌گویند. سنگ نمک ( $\text{NaCl}$ ) نمونه دیگری از نمک تبخیری است که از رسوبات نمکی آب دریا سرچشمه می‌گیرد.



شکل ۸.۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکسته سنگ آهک (با اجازه دیوید جی وایت، دانشگاه ایالتی آیووا، ایمز، آیووا)

سنگ‌های رسوبی ممکن است تحت هوازدگی قرار گیرند تا رسوبات ایجاد کنند یا ممکن است در معرض فرآیند دگرگونی قرار گیرند تا تبدیل به سنگ دگرگون شوند.

### سنگ دگرگونی

دگرگونی فرآیند تغییر ترکیب و بافت سنگ‌ها (بدون ذوب) توسط گرما و فشار است. در طی دگرگونی، کانی‌های جدیدی تشکیل می‌شوند و دانه‌های معدنی بریده می‌شوند تا بافتی برگ‌دار به سنگ دگرگونی بدهند. گنیس یک سنگ دگرگونی است که از دگرگونی منطقه‌ای با عیار بالای سنگ‌های آذرین مانند گرانیت، گابرو و دیوریت به دست می‌آید. دگرگونی با عیار پایین شیل‌ها و گلسنگ‌ها باعث ایجاد تخته سنگ می‌شود. کانی‌های رسی در شیل در اثر حرارت تبدیل به کلریت و میکا می‌شوند. از این رو، تخته سنگ در درجه اول از تکه‌های میکا و کلریت تشکیل شده است. فیلیت یک سنگ دگرگونی است که از تخته سنگ با دگرگونی بیشتر در معرض حرارت بیش از ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد است. شایسته نوعی سنگ دگرگونی است که از چندین سنگ آذرین، رسوبی و دگرگونی کم عیار با بافتی خوب ورق‌خورده و پوسته‌های قابل رویت کانی‌های پلاتی و میکایی به دست می‌آید. سنگ دگرگونی عموماً حاوی مقادیر زیادی کوارتز و فلدسپات نیز می‌باشد.

سنگ مرمر از کلسیت و دولومیت با تبلور مجدد به وجود می‌آید. دانه‌های معدنی در سنگ مرمر بزرگ‌تر از دانه‌های موجود در سنگ اصلی است. مرمرهای سبز با ترکیب هورنبلند، سرپانتین یا تالک رنگ می‌شوند. سنگ مرمر سیاه حاوی مواد قیر و سنگ مرمر قهوه‌ای حاوی اکسید آهن و لیمونیت است. کوارتزیت یک سنگ دگرگونی است که از ماسه سنگ‌های غنی از کوارتز تشکیل شده است. سیلیس وارد فضاهای خالی بین دانه‌های کوارتز و ماسه می‌شود و به عنوان یک عامل سیمانی عمل می‌کند. کوارتزیت یکی از سخت‌ترین سنگ‌ها است. در اثر گرما و فشار شدید، سنگ‌های دگرگونی ممکن است ذوب شوند و ماگما تشکیل دهند و این چرخه تکرار می‌شود.

### ۳.۲ کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، ساختارهای سنگی و سنگی

در بخش قبل با فرآیند تشکیل سنگ‌های آذرین از کانی‌های سنگ‌ساز، هوازدگی و تشکیل سنگ‌های رسوبی و دگرگونی و تشکیل سنگ‌های دگرگونی آشنا شدیم. شکل ۹.۲ برخی از کانی‌های رایج سنگ‌ساز مانند کوارتز، ارتوکلاز، پلاژیوکلاز، مسکویت، بیوتیت، آندرادیت، گارنت، کلسیت، دولومیت و کلریت را نشان می‌دهد. برخی از انواع رایج سنگ‌هایی که مهندسان ژئوتکنیک ممکن است در این زمینه با آن‌ها مواجه شوند، مانند گرانیت، بازالت، ریولیت، ماسه سنگ، سنگ آهک، کنگلومرا، مرمر، تخته سنگ و شایسته در شکل ۱۰.۲ نشان داده شده است. شکل ۱۰.۲ (ی) نمونه‌ای از شایسته تا شده را از باغ صخره‌ای دانشگاه جیمز کوک در محوطه دانشگاه در تاونزویل، استرالیا نشان می‌دهد. تنش‌های برشی و دگرگونی ناشی از دما و فشار بالا باعث کمانش و چین خوردگی لایه‌ها شد. شکل‌های ۹.۲ تا ۱۱.۲ به صورت تمام رنگی در درج رنگ بازتولید شده‌اند.



(الف)

**شکل ۹.۲** برخی از کانی‌های سنگ ساز معمولی: (الف) کوارتز. (ب) اورتوکلاز؛ (ج) پلاژیوکلاز؛ (د) مسکوویت؛ (ه) بیوتیت؛ (و) گارنت آندرادیت؛ (ز) کلسیت. (ح) دولومیت؛ (ط) کلریت. (از دکتر سانجی کی شوکلا، دانشگاه ادیث کوان، پرت، استرالیا)



(ب)



(ج)

شکل ۹.۲ (ادامه)



(د)



(ه)

شکل ۹.۲ (ادامه)



(و)



(ز)

شکل ۹.۲ (ادامه)



(ح)





(ط)

شکل ۹.۲ (ادامه)



(الف)



(ب)