# فصل ۱:

# آشنایی با مکانیک خاک، منشاء خاک و سنگ

## جزوه درس مکانیک خاک

# فهرست مطالب فصل اول:


۱-۱ مقدمه

۱-۲ تعریف خاک

۱-۳ تاریخچه مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک

۱-۴ چرا مکانیک خاک

۱-۵ چرخه خاک و سنگ

۱-۶ مرز بین خاک و سنگ

۱-۷ دانه های خاک

۱-۸ کانی های رسی

۱-۹ چگالی دانه ها

۱-۱۰ دانه بندی خاک

۱-۱۱ اندازه موثر، ضریب یکنواختی و ضریب دانه بندی

۱-۱۲ مسائل حل شده

۱-۱۳ مسائل فصل

۱-۱۴ منابع و مراجع

## ۱-۱ مقدمه

خاک به عنوان مصالح ساختمانی در طرح های مهمی در مهندسی عمران به کار گرفته می شود، انسان روی خاک زندگی می کند و انواع مختلف سازه همانند خانه ها، راه ها، پل ها و ..... را احداث می نماید بنابراین مهندسان عمران باید به خوبی خواص خاک از قبیل مبداء پیدایش، دانه بندی، قابلیت زهکشی آب، نشست، مقاومت برشی، ظرفیت باربری و غیره را مطالعه نموده و رفتار خاک را در نتیجه فعالیت انسان پیش بینی نماید. به طور مثال بعضی از مسائلی که ممکن است در نتیجه چنین فعالیت هایی در روی سطح زمین بوجود بیاید عبارتند از: نشست راه یا راه آهن در اثر بار ترافیک، ضریب ایمنی سازه حائل (به طور مثال آب بند خاکی، دیواره ساحلی یا سپری) در برابر واژگونی، فشار وارد بر روی تونل و یا نشست فونداسیون سازه های احداث شده در روی خاک. در این بخش به تعریفی مهندسی از خاک ارائه نموده و به بررسی منشاء تشکیل خاک به عنوان یک مصالح مهندسی ارزان، فراوان ولی پیچیده می پردازیم.

## ۱-۲ تعریف خاک

از نقطه نظر یک متخصص کشاورزی خاک ماده ای است که گیاه در آن قابل رشد بوده و زندگی آن را تامین می نماید. از نقطه نظر یک زمین شناس خاک مفهوم چندان مشخصی نداشته و کلاً به مواد سست و جدا از همی که از تجزیه سنگ ها حاصل شده است اتلاق می شود. اما از نظر مهندسین خاک مفهوم نسبتاً وسیع تری دارد. در علوم مهندسی، **خاک مخلوط غیر یکپارچه ای از دانه های کانی ها و مواد آلی فاسد شده ای می باشد که فضای خالی بین آن ها توسط آب و هوا (گازها) اشغال شده است.** لذا بر طبق تعاریف فوق متخصصین کشاورزی بیشتر به خاک های ارگانیک (آلی) توجه دارند و مهندسین بیشتر به خاک های غیر ارگانیک.

از بحث فوق دیده می شود که در نظر مهندسین خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، از نظر متخصصین کشاورزی خواص شیمیایی و فیزیکی آن و از نظر زمین شناسان خواص مینرالوژی آن مهم می باشد.

## ۱-۳ تاریخچه مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک

مکانیک خاک شاخه ای از علوم مهندسی است که به مطالعه مشخصات فیزیکی و رفتار توده خاک تحت بارهای وارده می پردازد. مکانیک خاک تقریباً در آغاز قرن بیستم توسعه پیدا نموده است. در آن زمان نیاز به تحلیل و بررسی رفتار خاک ها در بسیاری از کشورها حس می شد که علت آن هم حوادثی همانند زمین لغزش ها و گسیختگی فونداسیون ها بود. بسیاری از اصول پایه مکانیک خاک در آن زمان به خوبی مورد استفاده قرار می گرفتند اما جمع بندی جامعی از این مبانی بنیادی تحت عنوان علم مکانیک خاک وجود نداشت. نخستین کسانی که کمک شایانی به توسعه مکانیک خاک نمودند عبارتند از: **کولمب**[1] که در سال ۱۷۷۶ رساله مهمی در رابطه با گسیختگی خاک تالیف نمود و همچنین **رانکین**[2] که در سال ۱۸۵۷ مقاله بسیار

[1] Coulomb, 1776
[2] Rankine, 1857

مهمی در رابطه با حالت های محتمل تنش به چاپ رساند. در سال ۱۸۵۶ **دارسی**[1] نتایج تحقیقاتش در رابطه با نفوذپذیری خاک را با هدف تامین آب شهر **Dijon** به چاپ رساند. اصول مکانیک مصالح و محیط پیوسته شامل استاتیک و مقاومت مصالح نیز به خوبی در قرن نوزدهم در اثر فعالیت های کوشی، ناویر و بوزینسک توسعه پیده نموده بودند.

اما برای اینکه تمام این تمام این مبانی بنیادی را بتوان تحت عنوان یک علم واحد گردهم آورد باید تا قرن بیستم منتظر می ماندیم. در آغاز این قرن، **کارل ترزاقی**[2] بیشترین و مهمترین سهم را در توسعه مکانیک خاک بر عهده داشت. ترزاقی در سال ۱۹۲۵ کتاب **Erdbaumechanik** (مکانیک خاک) را به چاپ رساند چنانکه امروزه چاپ این کتاب به عنوان مبداء پیدایش مکانیک خاک مدرن شناخته می شود. وی علاوه بر به کارگیری علوم مکانیک مصالح، خواصی از خاک را مورد بررسی قرار داد که از ذهن دیگر محققین به دور مانده بود. ترزاقی نحوه در نظر گرفتن تاثیر فشار آب منفذی بر رفتار خاک را نیز مورد بررسی قرار داد. این مسئله یکی از عناصر اساسی نظریه مکانیک خاک است به طوری که اشتباه در در نظر گرفتن این جنبه از رفتار خاک تاکنون منجر به وقوع فجایع بزرگی همانند گسیختگی سد تتون شده است.

مطالب فوق نگاهی اجمالی بود بر پیدایش مکانیک خاک نوین و بسط و گسترش آن در سال های اخیر. در ادامه قصد داریم تاریخچه مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک را به طور مفصل تری بررسی نماییم.

## ۱-۳-۱ مهندسی ژئوتکنیک قبل از قرن هجدهم:

از دیدگاه مهندسی، درک مهندسی ژئوتکنیک آنچنانکه امروزه با آن آشنا هستیم از اوائل قرن هجدهم شروع شد (اسکمپتون، ۱۹۸۵). تا سال ها پس از آن نیز هنر مهندسی ژئوتکنیک بر مبنای تجربیات گذشته و احداث تجربی سازه ها بدون یک مبنای علمی واقعی بود. برمبنای همین ساخت و سازهای تجربی بود که سازه های متعددی احداث شدند. برخی از آن ها فروریختند و بعضی دیگر هنوز پاربرجا هستند.

شواهد تاریخی حاکی از آن هستند که تمدن های باستان اکثراً در طول سواحل رودخانه ها همچون نیل (مصر)، دجله و فرات (بین النهرین)، هوانگ هو (رود زرد، چین) و ایندوس (هند) شکل گرفتند. در حدود ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در حوضچه های آبگیر رود ایندوس آب بندهایی جهت حفاظت از شهر موهنژو دارا[3] (پاکستان امروزی) احداث گردید. در طول حکومت خاندان چان در چین (۱۱۲۰ تا ۲۴۹ قبل از میلاد) آب بندهای متعددی جهت مقاصد آبیاری احداث شدند.

مدرکی حاکی از اینکه آیا فونداسیون این آب بندها تثبیت شده اند و یا اینکه فرسایش ناشی از وقوع سیلاب در آن زمان کنترل شده است یا خیر وجود ندارد (کریزل، ۱۹۸۵). در دوران تمدن یونان باستان از فونداسیون منفرد و نواری و گسترده در ساخت سازه ها استفاده میشد. از حدود ۲۷۵۰ سال قبل از میلاد در طی یک قرن، پنج هرم مهم در مصر احداث شدند (سقراه، میدوم، داهشور جنوبی و شمالی و خئوپس). ساخت این هرم ها با چالش های سهمگینی در رابطه با فونداسیون، پایداری شیروانی ها و احداث تالارهای زیرزمینی همراه بود. به ظهور بودیسم در چین در طی سلطنت هان شرقی در ۶۸ سال بعد از میلاد، هزاران بتکده ساخته شدند. بسیاری از این سازه ها بر روی لایه های سیلت و رس نرم احداث شدند. در بعضی موارد فشار فونداسیون از ظرفیت باربری خاک فراتر رفته و باعث آسیب های سازه ای گسترده ای میشد.

[1] Darcy, 1856
[2] Carl Von Terzaghi
[3] Mohenjo Dara

یکی از مشهورترین نمونه های مشکلات مربوط به ظرفیت باربری در احداث سازه ها قبل از قرن هجدهم، برج کج پیزا[1] در ایتالیاست (شکل ۱-۱). احداث برج در سال ۱۱۷۳ بعد از میلاد شروع شد، هنگامی که جمهوری پیزا در حال پیشرفت بود و این پیشرفت در طی مراحل مختلف در طول ۲۰۰ سال آتی ادامه یافت. این سازه حدود ۱۵۷۰۰ تن وزن داشته و در روی یک شالوده دایره ای به قطر ۲۰ متر قرار گرفته است. در گذشته این برج به سمت شرق، شمال، غرب و در نهایت جنوب کج شده است. مطالعات اخیر نشان می دهد که یک لایه رس ضعیف در عمق ۱۱ متری زیر سطح زمین قرار داشته و همین لایه باعث کج شدن برج شده است. این برج با ارتفاع ۵۴ متر به اندازه ۵ متر کج شد. برج در سال ۱۹۹۰ از بیم واژگونی و یا فروریختن به روی عموم بسته شد. اخیراً فونداسیون این برج با برداشت خاک از زیر وجه شمالی برج تثبیت شد. حدود ۷۰ تن خاک در طی چهل مرحله حفاری جداگانه در عرض برج از زیر آن برداشته شد. بدین ترتیب خاک فونداسیون نشست نمود تا فضای خالی ایجاد شده را پر نماید و در نتیجه میزان کج شدگی کاهش یافت. هم اکنون برج پیزا به میزان پنج درجه کج است. تغییر نیم درجه ای خیلی قابل توجه نیست اما باعث شده است که این سازه به میزان قابل ملاحظه ای پایدارتر باشد. مثال دیگری از یک مورد مشابه در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. برج های نشان داده شده در شکل ۱-۲ در شهر بولونیا ایتالیا واقع شده است. این برج ها در قرن دوازدهم احداث شده اند. به برج سمت چپ اغلب برج گاریسندا[2] اطلاق می شود. این برج ۴۸ متر ارتفاع داشته و متحمل کجی زیادی شده است.

**شکل ۱-۱ برج کج پیزا در ایتالیا**

[1] Leaning Tower of Pizza, Italy
[2] Garisenda Tower

**شکل ۱–۲ برج کج گاریسندا واقع در شهر بولونیا در کشور ایتالیا**

پس از مواجهه با مشکلات متعدد در رابطه با عملکرد نامطلوب فونداسیون های سازه ها در طی قرون گذشته، مهندسین و دانشمندان پس از قرن هجدهم شروع به بررسی خصوصیات و رفتار خاک ها به صورت علمی تر نمودند. با در نظر گرفتن طبیت مطالعات انجام گرفته در حوزه مهندسی ژئوتکنیک بازه زمانی بین سال های ۱۷۰۰ تا ۱۹۲۷ را می توان به چهار دوره مهم تقسیم نمود (اسکمپتون، ۱۹۸۵):

۱ **دوران پیش از کلاسیک (۱۷۰۰ تا ۱۷۷۶)**
۲ **مکانیک خاک کلاسیک – فاز اول (۱۷۷۶ تا ۱۸۵۶)**
۳ **مکانیک خاک کلاسیک – فاز دوم (۱۸۵۶ تا ۱۹۱۰)**
۴ **مکانیک خاک مدرن (۱۹۱۰ تا ۱۹۲۷)**

در ادامه پیشرفت های صورت گرفته در هر یک از دوره های فوق را به طور مختصر مورد بررسی قرار می دهیم:

## ۱–۳–۲ دوران پیش از کلاسیک (۱۷۰۰ تا ۱۷۷۶):

تمرکز مطالعات در این دوران بر شیب های طبیعی و وزن مخصوص خاک های مختلف و همچنین نظریه های نیمه تجربی فشار جانبی خاک بود. در سال ۱۷۱۷ یک مهندس سلطنتی فرانسوی به نام هنری گوتیر[1] در زمانی که انعام بسیار زیادی دریافت نمود تا روش های طراحی دیوارهای حائل را فرموله نماید، به مطالعه شیب های طبیعی خاکی پرداخت. امروزه ما این شیب های طبیعی را زاویه قرار خاک می نامیم. وی شیب طبیعی ماسه خشک تمیز و خاک معمولی را به ترتیب $31^\circ$ و $45^\circ$ به دست آورد. همچنین وزن مخصوص ماسه خشک تمیز و خاک معمولی را به ترتیب $18.1kN/m^3$ و $13.4kN/m^3$ پیشنهاد نمود. ولی هیچگونه آزمایشی بر روی رس از طرف وی گزارش نشد. در سال ۱۷۲۹ مهندسی فرانسوی به نام برنارد فورست بلیدور[2] کتابی برای مهندسی عمران و مهندسی نظامی منتشر نمود. در این کتاب وی نظریه ای برای فشار جانبی دیوار حائل پیشنهاد نمود که در واقع ادامه مطالعات انجام گرفته توسط گوتیر (۱۷۱۷) بود. او همچنین یک سیستم طبقه بندی برای خاک ارائه نمود که در جدول زیر ارائه شده است.

[1] Henri Gautier (1660-1737)
[2] Bernard Forest De Belidor (1671-1761)

| طبقه بندی | وزن مخصوص $kN/m^3$ |
|---|---|
| سنگ | - |
| ماسه سخت یا سفت | 16.7 |
| ماسه تراکم پذیر | 18.4 |
| خاک معمولی (خاک های موجود در مناطق خشک) | 13.4 |
| خاک نرم (عمدتاً سیلت) | 16.0 |
| رس | 18.9 |
| پیت | - |

اولین نتایج آزمایشگاهی بر روی یک دیوار حائل به ارتفاع 76mm توسط یک مهندس فرانسوی به نام فرانسوا گادروی[۱] گزارش گزارش شد. تحقیقات گادروی در سال ۱۸۰۸ توسط مهندس دیگری به نام ماینیل[۲] منتشر شد.

## ۱-۳-۳ مکانیک خاک کلاسیک - فاز اول (۱۷۷۶ تا ۱۸۵۶):

در طی این دوره اکثر پیشرفت های حوزه مهندسی ژئوتکنیک توسط مهندسین و دانشمندان فرانسوی انجام پذیرفت. در دوره قبل از کلاسیک، به صورت تجربی تمام ملاحظات طراحی به کار رفته در محاسبات فشار جانبی خاک بر مبنای سطوح گسیختگی دلخواه در خاک انجام می پذیرفت. در این مقاله مشهور که در ۱۷۷۶ منتشر شد، دانشمند فرانسوی، چالرز آگوستین کولمب[۳] با استفاده از اصول حساب دیفرانسیل و انتگرال و قضایای ماکسیمم و مینیمم، موقعیت واقعی سطوح لغزش در خاک پشت دیوار حائل را محاسبه نمود. وی در محاسباتش اصطکاک و چسبندگی در داخل توده خاک را نیز لحاظ نمود. در سال ۱۸۲۰، مهندس فرانسوی ژاک فردریک فرانسیس[۴] و پروفسور مکانیک کاربردی کلود لوئیز ماری هانری ناویر[۵] حالت های خاص نظریه کولمب را مورد مطالعه قرار دادند. این حالت های خاص شامل خاک شیب دار پشت دیوار و سربار پشت دیوار حائل میشد. در ۱۸۴۰ مهندس ارتش و پروفسور مکانیک ژان ویکتور پونسوله[۶] با استفاده از رویکری ترسیمی و در نظر گرفتن سطوح لغزش دلخواه چند وجهی نظریه کولمب را برای محاسبه فشار جانبی خاک در پشت دیوارهای حائل قائم و شیب دار بست داد. پونسله همچنین اولین کسی بود که از نماد $\phi$ برای نمایش زاویه اصطکاک خاک استفاده نمود. او همچنین اولین کسی بود که نظریه ای برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی فونداسیون های سطحی ارائه نمود. در سال ۱۸۴۶ مهندسی به نام الکساندر کولین[۷] نظریه هایی در مورد لغزش های عمیق در رس ها و ترانشه ها خاکریزها ارائه نمود. طبق نظریه کولین در تمام حالات، گسیختگی زمانی رخ می دهد که چسبندگی بسیج شده از چسبندگی موجود خاک بیشتر می شود. وی همچنین مشاهده نمود که سطوح گسیختگی معمولی را می توان به صورت قوس های سیکلوئید تقریب زد. مقالات منتشر شده در سال ۱۸۵۷ توسط ویلیام رانکین[۸] اغلب پایان فاز اول مکانیک خاک تقلی می شود. تحقیقات وی شامل نظریه های مهمی در باب فشار جانبی خاک و تعادل توده های خاکی میشد. نظریه رانکین در واقع سازه سازی بود از نظریه کولمب.

[1] Francois Gadroy
[2] J. J. Mayniel
[3] Charles Augustin Coulomb (1736-1806)
[4] Jacques Frederic Francais (1775-1833)
[5] Claude Louis Marie Navier (1785-1836)
[6] Jean Victor Poncelet (1788-1867)
[7] Alexandre Collin (1808-1890)
[8] William John Macquorn Rankine (1820-1872)

## ۱–۳–۴ مکانیک خاک کلاسیک – فاز ۲ (۱۸۵۶ تا ۱۹۱۰):

در این فاز نتایج تجربی متعددی که حاصل آزمون های آزمایشگاهی بر روی ماسه بود به چاپ رسید. یکی از اولین و مهمترین مقالات منتشر شده در این دوره توسط هانری فیلیپ گاسپارد دارسی[1] انجام پذیرفت. در سال ۱۸۵۶ وی نتایج مطالعاتش در مورد نفوذپذیری فیلترهای ماسه ای را منتشر نمود. برمبنای این مطالعات، دارسی واژه ضریب نفوذپذیری (یا ضریب هدایت هیدرولیکی) خاک را که یکی از کاربردی ترین پارامترهای مهندسی ژئوتکنیک تا به امروز است را تعریف نمود. سر جورج هوارد داروین[2] استاد ستاره شناسی با انجام یک سری آزمون آزمایشگاهی، لنگر واژگونی وارد بر یک دیوار حائل مفصلی با خاک ماسه ای در دو حالت شل و متراکم در پشت دیوار را مورد مطالعه قرار داد. یکی دیگر از مهمترین دستاوردهای این دوره در سال ۱۸۸۵ با چاپ مقاله ای توسط ژوسف والنتین بوزینسک[3] به وقوع پیوست. بوزینسک در این مقاله معروف نظریه توزیع تنش در زیر یک سطح بارگذاری شده در یک محیط همگن، نیمه بینهایت ارتجاعی و همسانگرد را ارائه نمود. در سال ۱۸۸۷ اوزبورن رینولدز[4] پدیده اتساع در ماسه ها را توصیف نمود.

## ۱–۳–۵ مکانیک خاک مدرن (۱۹۱۰ تا ۱۹۲۷):

در این دوره نتایج تحقیقات انجام گرفته بر روی رس ها منتشر شد که در آن ها ویژگی ها و پارامترهای اساسی رس ها مطرح و مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص ترین انتشارات این دوره در جدول ۱–۱ ارائه شده اند.

**جدول ۱–۱ مطالعات مهم بر روی رس ها از سال ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۷**

| محقق | سال | کشور | موضوع |
|---|---|---|---|
| آلبرت موریتس آتربرگ Albert Mauritz Atterberg (1846-1916) | ۱۹۱۱ | سوئد | قوام خاک یا همان روانی، خمیری و انقباض خاک |
| ژان فرونتارد Jean Frontard (1884-1962) | ۱۹۱۴ | فرانسه | آزمون های برش مضاعف (زهکش نشده) در رس تحت بار قائم ثابت |
| آرتور لانگتری بل Arthur Langtry Bell (1874-1956) | ۱۹۱۵ | انگلستان | فشار جانبی و مقامت رس، ظرفیت باربری رس، آزمون های جعبه برش برای اندازه گیری مقاومت برشی زهکش نشده با استفاده نمونه های دستنخورده |
| ولمار فلنیوس Wolmar Fellenius (1876-1957) | ۱۹۱۸ | سوئد | تحلیل دایره لغزش در شیروانی های رسی اشباع |
| کارل ترزاقی Karl Terzaghi (1883-1963) | ۱۹۲۵ | اتریش | نظریه تحکیم رس ها |

[1] Henri Philibert Gaspard Darcy (1803-1858)
[2] Sir George Howard Darwin (1845-1912)
[3] Joseph Valentin Boussinesq (1842-1929)
[4] Osborne Reynolds (1842-1912)

## ۱–۳–۵ مهندسی ژئوتکنیک پس از ۱۹۲۷:

انتشار کتاب *Erdbaumechanic auf Bodenphysikalisher Grundlage* توسط کارل ترزاقی در سال ۱۹۲۵ تولد عصر جدید مکانیک خاک محسوب می شود. کارل ترزاقی را به راستی پدر علم مکانیک خاک نوین می دانند. ترزاقی (شکل ۱–۳) در دوم اکتبر سال ۱۸۸۳ در پراگ که در آن زمان مرکز استان بوهمیای اتریش بود متولد شد. ترزاقی در سال ۱۹۰۴ از دانشکده فنی گراتس با دریافت مدرک لیسانس مهندسی مکانیک فارغ التحصیل شد و پس از آن یک سال در ارتش اتریش خدمت کرد. پس از ارتش، ترزاقی یک سال به مطالعه زمین شناسی پرداخت. در ژانویه ۱۹۱۲ وی درجه دکترای علوم فنی را از دانشگاه گراتس کسب نمود. در سال ۱۹۱۶ ترزاقی به تدریس در مدرسه سلطنتی مهندسین در استانبول پرداخت. پس از پایان جنگ جهانی اول ترزاقی سمت مدرس در دانشگاه آمریکایی رابرت کالج در استانبول (۱۹۲۵–۱۹۱۸) را پذیرفت. در آنجا بود که وی تحقیقاتش در مورد رفتار خاک ها و نشست رس ها را شروع کرد. انتشاب کتاب *Erdbaumechanic* در واقع ماحصل نتایج همین تحقیقات است.

**شکل ۱–۳ کارل ترزاقی (۱۹۶۳ تا ۱۸۸۳)**

**شکل ۱–۴ رالف پک (۲۰۰۸ تا ۱۹۱۲)**

در سال ۱۹۲۵ وی سمت تدریس در دانشگاه انستیتوی ماساچوست[1] را پذیرفت و تا سال ۱۹۲۹ در آنجا به فعالیت مشغول شد. در طی این دوره وی به عنوان پیشرو و پیشگام شاخه جدیدی از مهندسی عمران به نام مکانیک خاک شناخته شد. در اکتبر ۱۹۲۹ او به اروپا بازگشت تا در دانشگاه فنی وین به سمت استاد تمامی مشغول تدریس شود جائیکه به زودی تبدیل به کانون توجه و پایتخت مهندسین عمران مشتاق مکانیک خاک شد. در سال ۱۹۳۹ او به آمریکا بازگشت تا در دانشگاه هاروارد به سمت استاد تمام مشغول تدریس شود.

[1] Massachusetts Institute of Technology

اولین کنفرانس انجمن بین المللی مکانیک خاک و مهندسی پی[1] در سال ۱۹۳۶ در دانشگاه هاروارد به ریاست کارل ترزاقی برگزار شد. هدایت و رهبری ترزاقی در طی یک ربع قرن باعث شد که مقالات متعددی با طیف وسیعی از موضوعات در آن کنفرانس ارائه شود. موضوعاتی همچون: مقاومت برشی، تنش موثر، آزمایش های درجا، پنترومتر مخروطی هلندی، آزمایشات سانتریفیوژ، نشست تحکیمی، توزیع تنش ارتجاعی، بهسازی خاک با پیش بارگزاری، عملکرد یخزدگی خاک، رس های انبساطی، نظریه قوس زدگی، دینامیک خاک و زلزله. در طی ربع قرن بعدی هم ترزاقی، پیشگام و پادشاه مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک در سراسر دنیا بود. رالف پک[2] (شکل ۱-۴) در اینباره نقل می کند: "در طول دوران زندگی ترزاقی، افراد کمی مخالف این واقعیت بودند که ترزاقی نه تنها پیشرو و حاکم مکانیک خاک بود، بلکه او مرجع حل اختلاف تحقیقات و کاربردهای مکانیک خاک در سراسر دنیا نیز بود. در طی سال های آتی او در تمام پروژه ها در تمام قاره ها به جز استرالیا و قطب جنوب حضور خواهد داشت" وی ادامه می دهد: "حتی امروزه هم به سختی می توان ایرادی در ارزیابی ها و تخمین های وی از وضعیت خاک در مقالات و سخنرانی هایش یافت". در سال ۱۹۳۹ ترزاقی چهل و پنجمین سخنرانی James Forrest را در انستیتوی مهندسین عمران لندن ارائه نمود. در این سخنرانی وی مدعی شد که از این پس دیگر گسیختگی های فونداسیون به علت اتفاقات قهری و مشیت الهی نخواهد بود.

در ادامه مهمترین رویدادهای توسعه مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک که پس از اولین کنفرانس **ISSMFE** در سال ۱۹۳۶ به وقوع پیوست ارائه شده اند:

- انتشار کتاب مکانیک خاک نظری توسط کارل ترزاقی در سال ۱۹۴۳ (انتشارات John Wiley)
- انتشار کتاب مکانیک خاک در کاربرد مهندسی توسط کارل ترزاقی و رالف پک در سال ۱۹۴۸ (انتشارات John Wiley)
- انتشار کتاب مبانی مکانیک خاک توسط دونالد تیلور در سال ۱۹۴۸ (انتشارات John Wiley)
- شروع انتشار ژورنال بین المللی *Geotechnique* در انگلستان
- ارائه مقاله در مورد مفهوم $\phi = 0$ در رس ها توسط اسکمپتون در سال ۱۹۴۸
- انتشار مقاله اسکمپتون با موضوع پارامترهای فشار منفذی **A** و **B** در سال ۱۹۵۴
- انتشار کتاب اندازه گیری ویژگی های خاک در آزمایش سه محوری توسط بیشاپ و هنکل[3] در سال ۱۹۵۷
- کنفرانس تحقیقاتی **ASCE** با موضوع مقاومت برشی خاک های چسبنده در شهر بولدر در ایالت کلورادو در ۱۹۶۰

تا به امروز حرفه مهندسی ژئوتکنیک راه زیادی پیموده و به بلوغ رسیده است. اکنون این حرفه به عنوان یکی از شاخه های مهندسی عمران گسترش یافته و هزاران مهندس عمران آن را حوزه تخصص مورد علاقه خود می دانند.

از زمان اولین کنفرانس در سال ۱۹۳۶ تا به امروز به جز یک وقفه کوتاه در طول جنگ جهانی دوم، کنفرانس **ISSMFE** هر چهار سال یکبار برگزار می شود. در سال ۱۹۹۷ عنوان کنفرانس از **ISSMFE** به **ISSMGE** (انجمن بین المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک[4]) تغییر یافت تا منعکس کننده هدف واقعی این کنفرانس باشد. این کنفرانس ها نقش مهمی در تبادل اطلاعات و توسعه هرچه بیشتر و مدام فعالیت های تحقیقاتی در مهندسی ژئوتکنیک داشته است. محل و سال برگزاری این کنفرانس ها در جدول ۱-۲ ارائه شده است.

[1] International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE)
[2] Ralph Peck (1912-2008)
[3] A. W. Bishop and B. J. Henkel
[4] International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

**جدول ۱–۲ محل و سال برگزاری کنفرانس های بین المللی ISSMGE/ISSMFE**

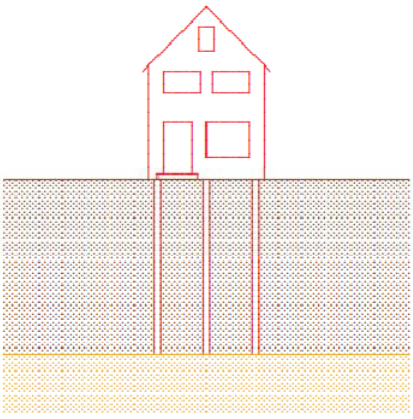
| کنفرانس | محل برگزاری | سال |
|---|---|---|
| I | دانشگاه هاروارد، بوستون، آمریکا | ۱۹۳۶ |
| II | روتردام، هلند | ۱۹۴۸ |
| III | زوریخ، سوئیس | ۱۹۵۳ |
| IV | لندن، انگلستان | ۱۹۵۷ |
| V | پاریس، فرانسه | ۱۹۶۱ |
| VI | مونترال، کانادا | ۱۹۶۵ |
| VII | مکزیکو سیتی، مکزیک | ۱۹۶۹ |
| VIII | مسکو، شوروی | ۱۹۷۳ |
| IX | توکیو، ژاپن | ۱۹۷۷ |
| X | استکهلم، سوئد | ۱۹۸۱ |
| XI | سان فرانسیسکو، آمریکا | ۱۹۸۵ |
| XII | ریو دو ژانیرو، برزیل | ۱۹۸۹ |
| XIII | دهلی نو، هندوستان | ۱۹۹۴ |
| XIV | هامبورگ، آلمان | ۱۹۹۷ |
| XV | استانبول، ترکیه | ۲۰۰۱ |
| XVI | اوزاکا، ژاپن | ۲۰۰۵ |

امروزه موسسات و شرکت های مشاور متعددی در سراسر دنیا وجود دارند که در زمینه ارائه خدمات مشاوره مکانیک خاک و مهندسی پی تخصص دارند. مهندسی پی شاخه ای از مهندسی است که هدف آن به کارگیری اصول مکانیک خاک در طراحی و ساخت فونداسیون ها و سازه های خاکی می باشد. به مجموعه علوم مکانیک خاک و مهندسی پی اغلب ژئوتکنیک گفته می شود.

## ۱–۴ چرا مکانیک خاک؟

امروزه مکانیک خاک به شاخه ای بالغ و مجزا از مهندسی عمران تبدیل شده است که دلیل اصلی آن خواص منحصر به فرد خاک در مقایسه با دیگر مصالح مهندسی می باشد. یکی از مهمترین دلایل توسعه مکانیک خاک طیف کاربرد وسیع خاک در مهندسی عمران و همچنین اینکه تمام سازه ها برای انتقال بارهایشان به خاک نیاز به یک فونداسیون کارآمد و طراحی شده دارند. در ادامه این بخش به مهمترین خواص خاک به طور مختصر اشاره خواهیم نمود.

### ۱. سختی وابسته به سطح تنش



بسیاری از مصالح مهندسی همانند فلزات رفتاری خطی دارند حداقل تا یک سطح مشخص. این بدان معنی است که اگر تنش ها دو برابر شوند تغییر شکل ها نیز دو برابر خواهند شد. این ویژگی را می توان با استفاده از قانون هوک توصیف نمود. چنین مصالحی را الاستیک خطی می نامند. خاک ها از این قانون تبعیت نمی نمایند به طور مثال در صورت فشرده شدن، خاک ها به تدریج سفت تر می شوند. در سطح زمین ماسه را به راحتی می توان با انگشت تغییر شکل داد اما در تنش های فشاری بالا، سختی و مقاومت قابل

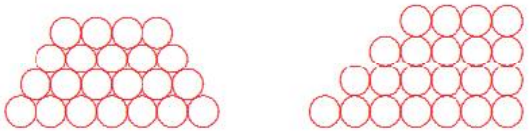
توجهی کسب می نمایند. این مسئله عمدتاً به خاطر افزایش نیروهای بین ذرات مجزا است که به ساختار ذرات مقاومتی فزاینده می بخشد. در مهندسی عمران رفتار غیر خطی مزایای خاص خود را دارد. به طور مثال رفتار فونداسیون های شمعی ساختمانی که در روی خاک بسیار نرم احداث شده و در زیر آن لایه ای از ماسه قرار دارد را در نظر بگیرید. در ماسه قرار گرفته در زیر نهشته ضخیمی از رس نرم، سطح تنش به خاطر وزن رس بالاست. این مسئله باعث می شود ماسه بسیار سفت و مقاوم شده و بدین ترتیب می توان نیروهای فشاری بزرگی به شمع اعمال نمود مشروط بر آنکه طول شمع ها به اندازه کافی بلند باشد تا به لایه باربر برسند.

## ۲. برش

خاک ها تحت فشار سخت تر می شوند، اما هنگام برش خاک ها به تدریج نرم شده و اگر سطح تنش برشی به همراه تنش های قائم به مقدار مشخصی برسد، گسیختگی در توده خاک رخ خواهد داد. این بدان معنی است که شیب یک تپه ماسه ای به طور مثال در یک سد نمی تواند از حدود ۳۰ یا ۴۰ درجه بیشتر شود. زیرا در این حالت ذرات ممکن است در روی یکدیگر بلغزد. این مسئله تاکنون باعث گسیختگی سدها و خاکریزهای متعددی در سراسر دنیا شده و در برخی موارد باعث فجایع سنگینی برای مردم آن نواحی شده است.

## ۳. اتساع

تغییر شکل برشی خاک ها اغلب با تغییرات حجمی همراه است. ماسه شل تمایل به کاهش حجم داشته و ماسه متراکم در عمل تنها زمانی قادر به تغییر شکل است که حجم آن افزایش یابد که این کار باعث شل شدن آن می شود. این پدیده اتساع نام دارد و در سال ۱۸۸۵ توسط **رینولدز**[1] کشف شد. افزایش حجم ماسه متراکم حین برش در شکل روبرو نشان داده شده است. فضای بین ذرات هنگامی که دانه ها بر روی یکدیگر برش می خورند افزایش می یابد. از طرف دیگر ذرات موجود در یک توده ماسه شل در هنگام برش تمایل به فروریختن و کاهش حجم دارند. چنین تغییرات حجمی مخصوصاً هنگامی که خاک اشباع می تواند بسیار خطرناک باشد. در این حالت تمایل به کاهش حجم ممکن است باعث افزایش قابل توجه فشار آب منفذی شود. بسیاری از فجایع ژئوتکنیکی در اثر افزایش آب منفذی ایجاد شده اند. به طور مثال در حین زلزله چنانچه خاک ماسه ای اشباع غیر متراکم در یک زمان کوتاه تراکم یابد، فشار منفذی بزرگی ایجاد شده به طوری که ذرات ماسه ممکن است در داخل آب شناور شوند. این پدیده روانگرایی[2] نام دارد.



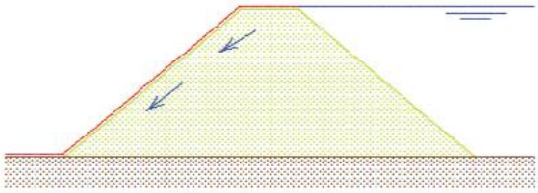
## ۴. خزش

تغییر شکل خاک اغلب وابسته به زمان است حتی تحت یک بار ثابت. این پدیده خزش نام دارد. خاک های رس و پیت دارای رفتار خزشی هستند. در اثر این پدیده، سازه هایی که در روی چنین خاک هایی بنا شده اند به نشست خود در اثر زمان ادامه می دهند. به طور مثال جاده ای که در روی خاک رسی احداث شده است برای سالیان متمادی به نشست خود ادامه خواهد

[1] Reynolds
[2] Liquefaction

داد. این نشست ها در سازه ها می توانند باعث ایجاد ترک شوند. ماسه و سنگ در عمل متحمل خزش نمی شوند مگر در تنش های بسیار بالا.

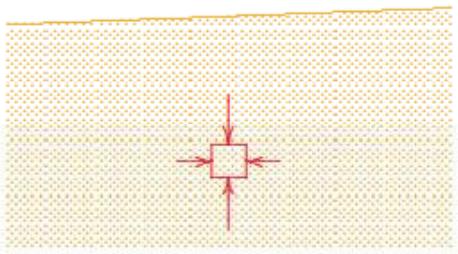
## ۵. تراز آب زیرزمینی



یکی از خصوصیات خاک وجود آب در منافذ آن است. این آب منفذی در انتقال تنش در خاک نقش دارد. چنانچه این آب جریان داشته باشد، باعث ایجاد تنش های اصطکاکی بین آب و ذرات خاک می شود. در بسیاری از موارد باید خاک را مصالحی دو فاز در نظر گرفت. با توجه به اینکه خروج آب از داخل توده خاک نیاز به زمان دارد، وجود آب معمولاً از بروز تغییرات حجمی سریع جلوگیری می نماید.

در بسیاری موارد تاثیر آب زیرزمینی بسیار قابل توجه است. به طور مثال کاهش تراز آب زیرزمینی به هر دلیلی منجر به افزایش تنش های بین ذرات و در نتیجه نشست خاک می شود. این پدیده در بسیاری از شهرهای بزرگ دنیا مثل ونیس و بانکوک در حال وقوع است. این نوع نشست ها همچنین در صورت کاهش موقت تراز آب زیرزمینی جهت احداث سازه ها نیز به وقوع می پیوندد. ساختمان های قرار گرفته در مجاورت گودبرداری ها نیز در اثر کاهش تراز آب زیرزمینی ممکن است آسیب ببینند. در یک مقیاس متفاوت همین پدیده در میادین گاز یا نفت نیز رخ می دهد به طوری که استخراج این سیالات باعث کاهش حجم مخزن و در نتیجه نشست خاک می شود. تخمین زده می شود که استخراج گاز از مخازن بزرگ **Gronigen** باعث نشست حدود **50cm** در طول مدت استخراج شده باشد.

## ۶. تنش های اولیه نامشخص



خاک مصالحی طبیعی است که در طول تاریخ در اثر فرآیندهای زمین شناسی مختلف تولید شده است. بنابراین حالت اولیه تنش در داخل خاک اغلب غیریکنواخت و در بسیاری حالات نامشخص است. به خاطر رفتار غیر خطی خاک که در قسمت قبل به آن اشاره شد، تنش های اولیه در خاک جهت تعیین رفتار خاک تحت بارهای اضافی اهمیت زیادی دارد. این تنش های اولیه بستگی به تاریخچه زمین شناسی دارد که آن نیز هیچوقت به طور دقیق مشخص نیست. تنش های اولیه قائم را می توان توسط وزن لایه های فوقانی بدست آورد. این بدان معنی است که تنش ها با عمق افزایش یافته و بنابراین سختی و مقاومت آن نیز با عمق افزایش می یابد. اما تنش های افقی معمولاً به مقدار زیادی نامشخص اند. چنانچه در زمان های گذشته خاک به صورت افقی فشرده شده باشد، می توان انتظار داشت که تنش های افقی بزرگ باشند. با در نظر داشتن رفتار وابسته به تنش خاک می توان نتیجه گرفته که عدم قطعیت های زیادی در رابطه با رفتار اولیه توده خاک وجود دارد.

### ۰۷. تغییر پذیری

پیدایش خاک در اثر فعالیت های زمین شناسی معنای دیگر نیز دارد و آن هم اینکه خصوصیات خاک ممکن است در نقاط مختلف، متفاوت باشد. حتی در دو نقطه بسیار نزدیک به یکدیگر، خصوصیات خاک ممکن است کاملاً متفاوت باشد. بستر رودخانه ای قدیمی را در نظر بگیرید که با نهشته های ماسه ای پر شده است. بعضی مواقع با مشاهده ماسه در سطح زمین می توان مسیر رودخانه را ردیابی نمود اما اغلب این کار ممکن نیست. چنانچه خاکریزی بر روی چنین خاکی احداث شود می توان انتظار داشت که نشست ها بسته به مصالح زیرین متغییر باشد. تغییر خصوصیات خاک ممکن است به خاطر بارهای موضعی سنگین در گذشته باشد.

حالت کلی ترکیب خاک را می توان از نقشه های زمین شناسی بدست آورد. این نقشه های نشان دهنده تاریخچه زمین شناسی و خصوصیات خاک می باشد. با داشتن دانش زمین شناسی و تجربه می توان بدین طریق برآورد اولیه از خصوصیات خاک بدست آورد. استفاده از دیگر اطلاعات زمین شناسی نیز می تواند مفید باشد. به طور مثال بخش بزرگی از اروپای غربی در دوران قدیم توسط لایه های ضخیم یخ پوشده شده بودند و این بدان معنی اسن که خاک های این نواحی در معرض پیش بارگذاری با بارهای بزرگی قرار گرفته اند و بنابراین احتمالاً بسیار متراکم خواهند بود. در این حالت نمی توان خصوصیات خاک را با استفاده از مطالعات دفتری بدست آورد. برای تعیین خصوصیات خاک در این حالت نیاز به نمونه گیری های صحرایی یا آزمایش خاک در محل می باشد.

## ۱–۵ | چرخه سنگ و منشاء خاک

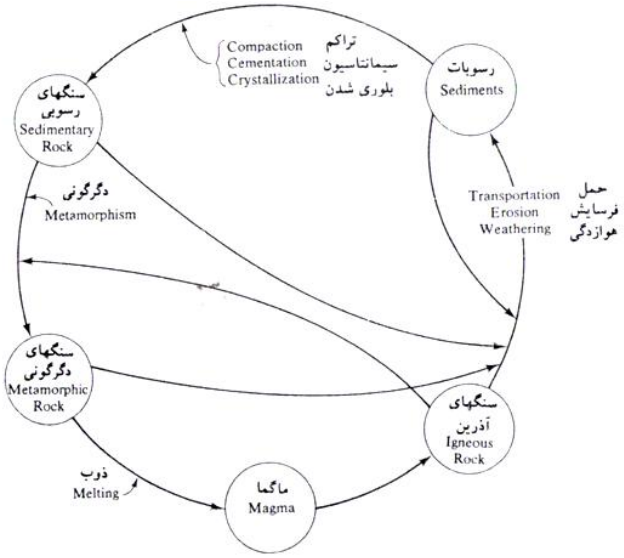
دانه های کانی که تشکیل دهندهٔ قسمت جامد خاک هستند، از هوازدگی سنگ ها بوجود می آیند. دامنهٔ تغییرات اندازهٔ دانه ها وسیع است. بسیاری از خواص فیزیکی خاک، توسط اندازه، شکل و ترکیبات شیمیایی دانه ها دیکته می شوند. برای فهم بهتر این عوامل، آشنایی با انواع اساس سنگهای تشکیل دهندهٔ پوسته زمین، کانیهای تشکیل دهندهٔ سنگها و فرآیند هوازدگی ضروری است.

بر پایهٔ نحوه پیدایش، سنگها به سه نوع اصلی، آذرین، رسوبی و دگرگونی تقسیم بندی می شوند. شکل ۱–۵ نمودار فرآیند شکل گیری انواع مختلف سنگ را نشان می دهد. این نمودار چرخهٔ سنگ نامیده می شود. در ادامه، بحث مختصری در مورد چرخهٔ هر یک از انواع سنگ ارائه می گردد.

**کانی ها مواد طبیعی، غیر آلی، جامد و متبلوری هستند که ترکیب شیمیایی نسبتاً ثابتی دارند. تعداد کانی های شناخته شده در طبیعت بسیار زیاد است اما تمام این کانی ها دارای اهمیت نیستند و تعداد معدودی از این کانی ها در ساخت سنگ ها مشارکت می کنند که به آن ها کانی های سنگ ساز می گویند.**

## ▪ سنگهای آذرین

سنگهای آذرین خروجی، از انجماد گدازه های ماگما که از اعماق گوشه ی زمین به بیرون پرتاب شده اند، تشکیل می شوند. بعد از پرتاب، چه به صورت فوران از شکافها و چه به صورت فوران از کوههای آتشفشانی، مقداری از گدازه های ماگما در روی سطح زمین سرد می شوند. گاهی مواقع حرکت ماگما در زیر سطح زمین متوقف شده و پس از سرد شدن تشکیل سنگهای آذرین نفوذی که پلوتون نامیده می شوند، می دهند. سنگهای نفوذی تشکیل شده در زمانهای گذشته، ممکن است به علت فرسایش مواد پوششی سطحی، نمایان شوند. نوع سنگ آذرین تشکیل یافته از سرد شدن ماگما، بستگی به عوامل متعددی نظیر ترکیبات ماگما، و سرد شدن آن دارد.




**شکل ۱–۵ چرخه سنگ**

## هوازدگی

هوازدگی فرآیند خرد شدن سنگها به قطعات کوچکتر به وسیله فعل و انفعالات مکانیکی و شیمیایی است. هوازدگی مکانیکی می تواند به وسیله انقباض و انبساط سنگ به علت تغییرات دما رخ دهد که در نهایت منجر به خرد شده سنگ می شود. همچنین انجماد آبهای نفوذی به داخل خلل و فرج سنگ که همراه با افزایش حجم یخ است، می تواند فشار کافی برای خرد شدن سنگ را بوجود آورد. سایر عوامل فیزیکی که به خرد شدن سنگ کمک می کنند، عبارتند از: یخ یخچالی، باد، آب جاری در رودخانه ها و جویبار ها و امواج دریا. تذکر این نکته لازم است که در هوازدگی مکانیکی، قطعات بزرگ سنگ به قطعات ریزتر بدون هرگونه تغییری در ترکیبات شیمیایی تقسیم می شوند.

در هوازدگی شیمیایی، به وسیله واکنشهای شیمیایی کانیهای اصلی سنگ به کانیهای جدید تبدیل می شوند. آب و دی اکسید کربن هوا، تشکیل اسید کربنیک می دهند که اسید حاصل بر روی کانی های سنگهای موجود واکنش شیمیایی انجام داده و تشکیل کانیهای جدید و نمکهای محلول می دهد. نمکهای محلول در آبهای زیرزمینی ظاهر می گردند. اسید آلی نیز که از فاسد شدن مواد آلی تشکیل می شوند، باعث هوازدگی شیمیایی می گردند.

فرآیند هوازدگی فقط محدود به سنگهای آذرین نمی شود. همانطور که در چرخه سنگها نشان داده شد، سنگهای رسوبی و سنگهای دگرگونی نیز به روشی مشابه، هوازده می شوند. بنابراین با استفاده از بحث مختصر ارائه شده، می توان مشاهده نمود که فرآیند هوازدگی، توده های جامد سنگ را به قطعات کوچکتر با اندازه های متنوع، در دامنه ای از قطعات بزرگ در حد قلوه سنگ تا ذرات ریز در حد ذرات رس، تبدیل می نماید. مخلوطهای سمنته نشده ای از این دانه های کوچک در نسبتهای مختلف، تشکیل انواع مختلف خاک را می دهند. کانیهای رس، که فرآورده هایی از هوازدگی شیمیایی فلداسپاتها، فرومنیزین ها و میکاها هستند، کانی هایی هستند که ظهور آنها در خاک، باعث خواص خمیری می شود. سه نوع کانی رس مهم وجود دارد که عبارتند از: ۱- **کائولینیت**، ۲- **ایلیت**، ۳- **مونت موریلونیت**.

## حمل فرآورده های هوازدگی

فرآورده های هوازدگی ممکن است در همان محل باقی بمانند و یا بوسیله جریان یخچال ها، آب، هوا و ثقل به جاهای دیگر انتقال یابند. خاکهایی که توسط فرآیند هوازدگی تولید شده و در جای خود باقی مانده اند، خاکهای برجا نامیده می شوند. یک مشخصه مهم از خاکهای برجا، دانه بندی ذرات آن است. خاکهای ریز دانه در سطح یافت می شوند و اندازه ذرات با عمق افزایش می یابد. در اعماق بزرگتر، قطعه سنگهای تیز گوشه نیز ممکن است یافت شود.

خاکهای حمل شده را می توانبه گروههای متعددی بر حسب نوع حمل و نوع رسوب گذاری طبقه بندی کرد:

**الف– رسوبات یخچالی:** که توسط یخچالها حمل و رسوب گذاری شده اند.

**ب– رسوبات آبرفتی:** که توسط رودخانه ها حمل و رسوب گذاری شده اند.

**پ– رسوبات دریاچه ای:** که توسط رسوب گذاری در دریاچه های آرام تشکیل یافته اند.

**ت– رسوبات دریایی:** که توسط رسوب گذاری در دریاها تشکیل یافته اند.

**ث– رسوبات بادی:** که توسط باد حمل و رسوب گذاری شده اند.

**رسوبات واریزه ای:** که توسط حرکت خاک از محل اولیه به وسیله ثقل، مثلا زمین لغزه ، تشکیل یافته اند.

### ▪ سنگ های رسوبی

رسوبات شن، ماسه، لای و رس که بوسیلهٔ هوازدگی تشکیل یافته اند، ممکن است توسط فشار ناشی از سربار، متراکم و توسط موادی نظیر اکسید آهن، کلیست، دولومیت و کوارتز سمنته شوند. مواد سمنتاسیون معمولاً به صورت محلول در آب زیر زمینی حمل می شوند. این مواد فضای بین ذرات را پر می کنند و تشکیل سنگهای رسوبی می دهند. سنگهایی که از این راه تشکیل می شوند، سنگهای رسوبی تخریبی نامیده می شوند. کنگلومرا، برش، ماسه سنگ، ماداستون و شیل مثال هایی از سنگهای رسوبی تخریبی هستند.

سنگهای رسوبی می توانند بوسیلهٔ فرآیندهای شیمیایی تشکیل یابند که سنگهایی از این نوع به سنگهای رسوبی شیمیایی معروف هستند. سنگ آهک، گچ، دولومیت، ژیپس، انیدریت، مثال هایی از این نوع سنگهای رسوبی می باشند. سنگهای آهکی اکثراً از کربنات کلسیم تشکیل می شوند که از رسوبات کلسیت توسط فرآیند های آلی یا غیرآلی شکل می گیرد. دولومیت، کربنات کلسیم- منیزیم است که رسوب گذاری شیمیایی کربنات های مخلوط و یا واکنش منیزیم محلول در آب با سنگ آهک تشکیل می یابد. ژیپس و انیدریت نتیجه بارش $CaSO_4$ محلول به علت تبخیر آب اقیانوسها هستند. این

سنگها به گروهی از سنگها تعلق دارند که معمولاً سنگهای تبخیری نامیده می شوند. سنگ نمک مثال دیگری از سنگهای تبخیری است که از رسوبات نمکی آب دریا تشکیل می شود. سنگهای رسوبی ممکن است به علت هوازدگی تبدیل به رسوب و یا تحت تاثیر فرآیندهای دگرگونی، به سنگهای دگرگونی تبدیل شوند.

- **سنگهای دگرگونی**

دگرگونی عبارت است از فرآیند تغییر ترکیب و بافت سنگ بوسیله گرما و فشار بدون وقوع ذوب. در حین دگرگونی، کانیهای جدید تشکیل شده و دانه های کانیها بریده می شوند تا یک بافت ورقه ای به سنگهای دگرگونی بدهند. گرانیت، دیوریت و گابرو تحت دگرگونی با درجه بالا به گنیس تبدیل می شوند. شیل و ماداستون با درجه دگرگونی پایین به اسلیت و فیلیت بدل می شود. شیست ها یک نوع از سنگهای دگرگونی با بافت ورقه ای خوب و پولک های قابل مشاهده و کانیهای میکا هستند.

مرمر از تغییر ساختار بلوری کلسیت و دولومیت شکل می گیرد. دانه های کانی در مرمر بزرگتر از آنهایی هستند که در سنگهای اصلی وجود دارد. کوارتزیت یک سنگ دگرگونی است که از ماسه سنگ غنی از کوارتز شکل می گیرد. سیلیس وارد فضای حفره ای بین کوارتز می شود و دانه های ماسه به عنوان یک سمنتاسیون عمل می کند. کوارتزیت یکی از سخت ترین سنگهاست. تحت فشار و دمای بالا سنگهای دگرگونی ذوب شده و به ماگما تبدیل می شوند و چرخه سنگ تکرار می شود.

## ۱–۶ مرز بین خاک و سنگ

بنا به تعریف، مواد معدنی متشکله پوسته روئی زمین تشکیل شده است از تعدادی ذرات مجزا از هم که خاک نامیده می شود و توده ای از ذرات چسبیده به هم و یکپارچه که سنگ خوانده می شود. از نقطه نظر چسبندگی ذرات به هم مرز قاطع و معینی بین سنگ و خاک وجود ندارد اما اکثر متخصصان در این رشته مرز بین این دو دسته مواد را به این صورت قبول می نمایند که چسبندگی بین ذرات توده خاک در اثر قرار گرفتن آن در آب و بهم زده شدن از بین برود و ذرات از هم جدا شوند در حالی که در سنگ ها این چسبندگی در اثر قرار گرفتن در آب از بین نرفته و توده سنگ استحکام خود را همچنان در زیر آب نیز حفظ نماید و با بهم زده شدن پراکنده نگردد. از آنجا که خاک خود از هوادیدگی و خرد شدن قطعات سنگی بوجود می آید، از نقطه نظر فیزیکی نیز مرز مشخصی بین ذراتی که خاک خوانده می شوند و قطعاتی که سنگ نامیده می شوند وجود ندارد و اگر هم چنین مرزی در نظر گرفته شود کاملاً دلخواه و قرار دادی است.

## ۱–۷ دانه های خاک

اندازه دانه های تشکیل دهنده خاک در دامنه وسیعی متغییر است. بر حسب اندازه دانه ها، خاک ها معمولاً شن، ماسه، لای و یا رس نامیده می شود. برای تشریح خاک ها، سازمان های مختلف حدود جداکننده اندازه دانه های خاک را پیشنهاد می کنند. در جدول ۱-۳ حدود پیشنهادی جداکننده اندازه دانه ها، توسط چند سازمان مختلف ارائه شده است. در حال حاضر، حدود پیشنهادی توسط سیستم طبقه بندی متحد خاک متداولترین است.

**شن:** خرده سنگ همراه با دانه هایی از جنس کوارتز، فلدسپار و سایر کانی ها می باشد.

**ماسه:** دانه هایی که اکثراً از جنس کوارتز و فلدسپار می باشد. دانه هایی از سایر کانی ها نیز گاهی مواقع یافت می شود.

**لای:** ذرات ریز (میکروسکوپی) خاک می باشد که از دانه های بسیار ریز کوارتز و ذرات پولکی شکل حاصل از متلاشی شدن کانی های میکا دار تشکیل می یابد.

**رس**: ذرات بسیار ریز پولکی شکل میکا، کانی های رس و سایر کانی ها می باشد. همان طور که جدول فوق نشان می دهد، رس ها معمولاً ذراتی با اندازه کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلی متر تعریف می شوند. لیکن گاهی مواقع ذراتی با اندازه ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۵ میلی متر رس تعریف می گردند. ذراتی که بر حسب اندازه، در طبقه رس ها قرار می گیرند، لزوماً شامل کانی های رس نمی شوند. رس های ذراتی تعریف می شوند که اگر با مقدار محدودی آب مخلوط شوند، خاصیت خمیری از خود نشان می دهند (Grim, 1953). خمیری بودن خاصیت بتونه شکلی است که رس مخلوط با آب از خود نشان می دهد. خاک های غیر رسی می توانند شامل ذرات کوارتز، فلدسپار یا میکا باشند که فقط به علت ریز دانه بودن در طبقه رس ها قرار می گیرند (یعنی اندازه آن ها کوچکتر از ۲ میکرون است). به نظر می رسد که اندازه ۲ میکرون تعریف شده در سیستم های مختلف، یک حد بالا باشد.

**جدول ۱–۳ حدود پیشنهادی جداکننده اندازه دانه های خاک**

| نام سازمان | اندازه دانه ها (mm) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | شن | ماسه | لای | رس |
| انستیتو تکنولوژی ماساچوست (MIT) | > 2 | 2 تا 0.06 | 0.06 تا 0.002 | < 0.002 |
| سازمان کشاورزی آمریکا (USDA) | > 2 | 2 تا 0.05 | 0.05 تا 0.002 | < 0.002 |
| انجمن ادارات راه و ترابری آمریکا (AASHTO) | 76.2 تا 2 | 2 تا 0.075 | 0.075 تا 0.002 | < 0.002 |
| سیستم طبقه بندی متحد | 76.2 تا 4.75 | 4.75 تا 0.075 | ریز دانه ها (رس و لای) | < 0.075 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **تخته سنگ** | > | **لاشه سنگ** | > | **قلوه سنگ** | > | **شن** | > | **ماسه** | > | **سیلت** | > | **رس** |
| Boulder | | Cobble | | Pebble | | Gravel | | Sand | | Silt | | Clay |

**ملاحظه می شود که در سیستم طبقه بندی متحد، ملاک تشخیص رس و لای اندازه قرار داده نشده است و کلیه ذراتی که اندازه آن ها از ۰/۰۷۵ ملیمتر (۷۵ میکرون) است، در طبقه ریزدانه ها قرار داده می شوند. در فصل دوم با علت این دسته بندی آشنا خواهیم شد.**

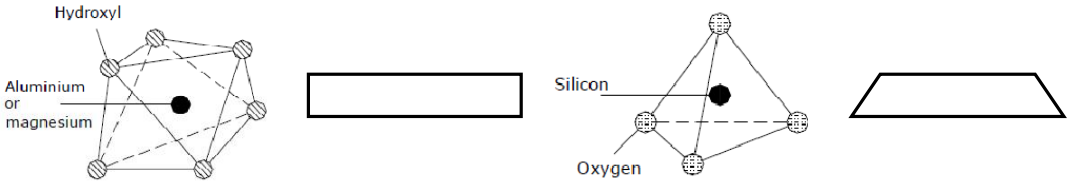
## ۱–۸ کانی های رسی

کانی های رسی معمولاً دارای ساختمان بلوری متشکل از دو بخش اساسی یعنی واحد چهار وجهی و واحد هشت وجهی هستند. با توجه به نحوه قرار گرفتن این ذرات در کنار هم سه گروه اصلی کانی های رسی یعنی **کائولینیت**[1] **و ایلیت**[2] و **مونت موریلونیت**[3] پدید می آید. از دیگر کانی های رسی می توان ورمیکولیت، آتاپولژیت و کلریت را نام برد. در شکل ۱–۶ واحد های تشکیل دهنده کانی های رسی و نماد آن ها و در شکل ۱–۷ طرز قرار گیری آن ها در کنار یکدیگر نشان داده شده است.

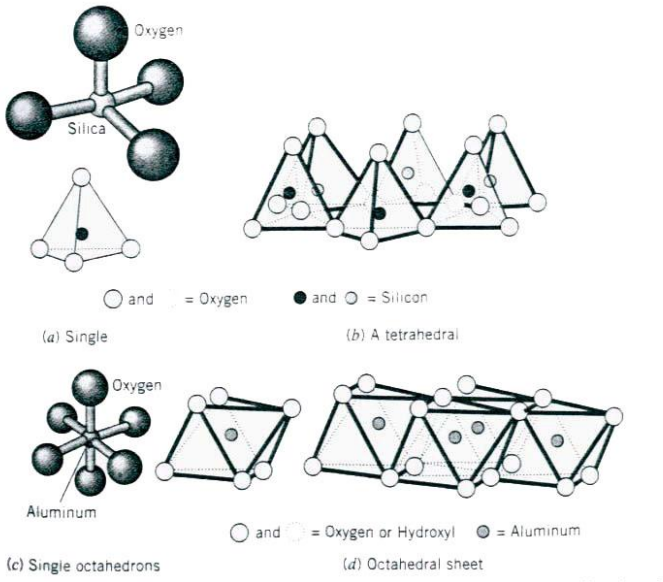
[1] Kaolinite
[2] Illite
[3] Montmorillonite

## ▪ کائولینیت:

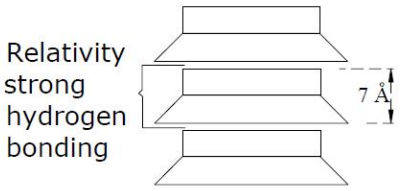
واحدهای ساختمانی این گروه ضخامتی در حدود $7\text{Å}$ ( $1\times10^{-10}\text{m}$ = انگستروم = Å) دارند و متشکل از یک لایه چهاروجهی سیلیکا و یک لایه هشت وجهی آلومینا هستند. شمار زیادی از این لایه ها روی هم قرار می گیرند تا ذراتی به ضخامت $500\sim1000\text{Å}$ تشکیل دهند. نسبت قطر به ضخامت ۱۰ تا ۲۰ است. شکل ۱-۸ قرارگیری واحدهای سازنده را برای تشکیل کائولینیت نشان می دهد. پیوند بین واحدها از نوع پیوند هیدروژنی بوده بنابراین شبکه نسبتاً مستحکمی پدید می آورند که به آسانی می تواند از نفوذ آب و شکافته شدن توسط آب جلوگیری به عمل آورد. از این رو قدرت جذب آب پایین دارد بنابراین توانایی منقبض و متورم شدن در این گروه در برابر تغییرات رطوبت نیز بسیار پایین است. رنگ کائولینیت سفید است و از آن در ساخت ضروف چینی استفاده می شود.




**شکل ۱–۶ واحدهای تشکیل دهنده کانی های رسی (الف) چهاروجهی سیلیکا (ب) هشت وجهی آلومینا**



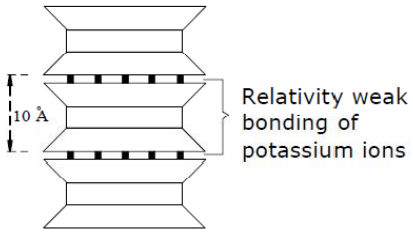

**شکل ۱–۷ قرار گیری واحد های تشکیل دهنده کانی های رسی**




**شکل ۱–۸ نحوه پیوند واحدهای پایه کانی کائولینیت**

- **ایلیت:**

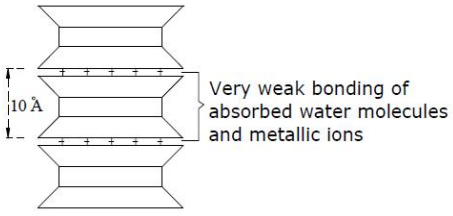
هر واحد ساختمانی ایلیت ضخامتی در حدود 10Å دارد که متشکل است از یک هشت وجهی آلومینا که بین دو لایه چهار وجهی سیلیکا قرار می گیرد. لایه های ایلیت به وسیلهٔ یون های پوتاسیوم به هم متصل هستند. هنگامی که آلومینیوم سه بار مثبت جایگزین سیلیکون چهار بار مثبت در واحد چهاروجهی می شود یک بار منفی خنثی نشده باقی می ماند که باعث ایجاد بار منفی در سطح رس می گردد. بنابراین یون های پتاسیم برای بر قرار کردن تعادل و از بین بردن کمبود بار با قرار گرفتن بین واحد های ایلیت با آنها پیوند برقرار می کنند. پیوند یون های پتاسیم اجازه می دهد که این واحدها همانند شکل زیر بر روی هم چیده شوند اما این پیوند ضعیف تر از پیونده هیدروژنی در کائولینیت است. در نتیجه ذرات ایلیت ضخامتی حدود $200 \sim 300\text{Å}$ خواهند داشت و نسبت قطر به ضخامت نیز حدود ۲۰ تا ۵۰ است. بنابراین از آنجائیکه هر یک از پولک های رسی تقریباً به مقدار یکسانی در اطراف خود آب جمع می کند، ایلیت بسیار مستعد تر از کائولینیت در جذب آب و انقباض و تورم است. شکل ۱-۹ قرار گیری واحدهای سازنده را برای تشکیل ایلیت نشان می دهد.




**شکل ۱–۹ نحوه پیوند واحدهای پایه کانی ایلیت**

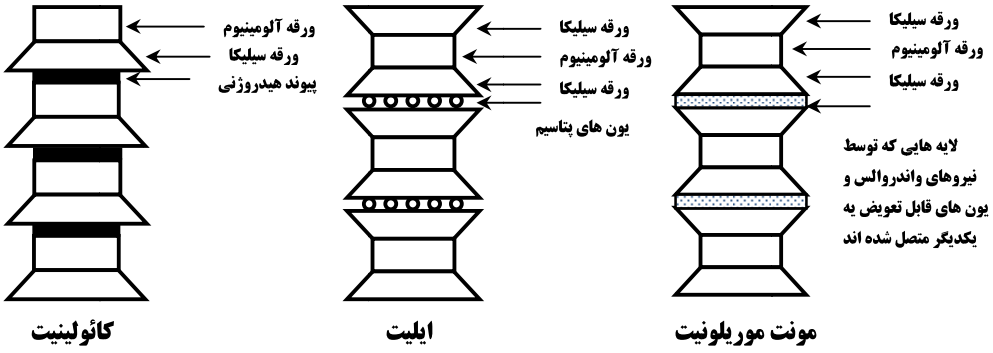
- **مونت موریلونیت**

واحدهای ساختمانی مونت موریلونیت بسیار شبیه گروه ایلیت است با این تفاوت که علاوه بر جانشینی آلومینیوم ۳ بار مثبت به جای سیلیکون ۴ بار مثبت در واحدهای چهاروجهی بعضی از یون های منیزیم ۲ بار مثبت و آهن ۲ بار مثبت جایگزین آلومینیوم ۳ بار مثبت در واحد های هشت وجهی می شوند. در شکل ۱-۱۰ قرار گیری واحدهای سازنده برای تشکیل مونت موریلونیت نشان داده شده است. این تغییرات سبب می شود یک شبکه از بارهای منفی که مولکول های آب و هر کاتیون موجود در شبکه کریستال را جذب می کند بوجود آید. پیوند مولکول های آب با این گروه بسیار ضعیف تر از پیوند یونی پتاسیم در ایلیت است. از این رو مونت موریلونیت به آسانی شکسته شده و به ذرات بسیار ریز تقسیم می شود که معمولاً ضخامتی در حدود $10 \sim 30\text{Å}$ با نسبت قطر به ضخامت ۲۰۰ تا ۴۰۰ دارند. از جمله ویژگی های این گروه قدرت بالای جذب آب، انقباض و تورم است.




**شکل ۱–۱۰ نحوه پیوند واحدهای پایه کانی مونت موریلونیت**

یکی از اعضای خانواده مونت موریلونیت، بنتونیت (گل حفاری) است که خاصیت جذب آب بسیار بالا (تا ۸ برابر وزن خودش) دارد. در شکل ۱-۱۱ تصاویر ساختاری کانی های رسی در کنار یکدیگر نشان داده شده است.




**شکل ۱–۱۱ مقایسه ساختاری کانی های رسی**

## سطح ویژه:

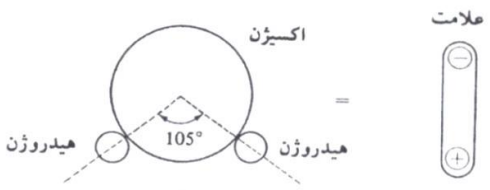
مقدار سطح جانبی کانی های رسی در واحد جرم، سطح ویژه نامیده می شود. از آنجائی که هرچه نسبت قطر به ضخامت پولک های رسی بیشتر باشد، سطح ویژه بیشتر خواهد شد، کائولینیت کمترین سطح ویژه و مونت موریلونیت بیشترین سطح ویژه را در میان کانی های رسی اصلی دارد. مقدار تقریبی مشخصات کانی های مهم رسی در جدول ۱-۴ ارائه شده است.

**جدول ۱–۴ مشخصات کانی های مهم رسی**

| نوع کانی | کائولینیت | ایلیت | مونت موریلونیت |
|---|---|---|---|
| ضخامت هر واحد (Å) | 7 | 10 | 9.6 |
| ضخامت هر لایه (Å) | 500 ~ 100 | 200 ~ 300 | 10 ~ 30 |
| تعداد واحد در هر لایه | 70 ~ 140 | 20 ~ 30 | - |
| سطح ویژه $(m^2/g)$ | 10 ~ 20 | 80 ~ 100 | 800 |

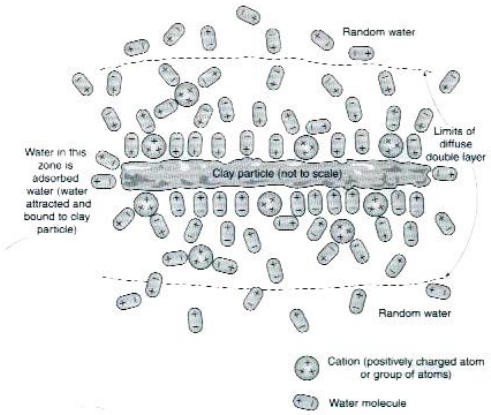
## جذب آب:

سطح جانبی کانی های رسی دارای بار الکتریکی منفی بوده و هنگامی که در تماس مستقیم با آب قرار می گیرد، یون های مثبت مولکول دو قطبی آب (شکل ۱-۱۲) را جذب می نماید. از لحاظ تراکم مولکولی آب در سه لایه در اطراف پولک های رسی قرار می گیرد. لایه اول که دارای پیوند مولکولی با جداره می باشد به صورت لایه ای نازک و متراکم بوده و لایه آب جذب سطحی **(Adsorbed water)** نامیده می شود. لایه دوم که لایه مضاعف خوانده می شود، دارای تراکم مولکولی کمتر و ضخامت بیشتری نسبت به لایه جذب سطحی می باشد. در اطراف لایه های مذکور نیز آب به صورت پراکنده قرار دارد. شکل ۱-۱۳ نحوه قرار گیری و جذب آب را در اطراف پولک های رسی نشان می دهد.

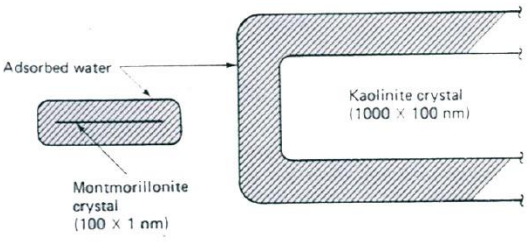



**شکل ۱–۱۲ خاصیت دو قطبی مولکول آب**

با توجه به مطالب هرچه مقدار سطح ویژه کانی بیشتر باشد، سطح تماس رس با آب بیشتر خواهد شد و در نتیجه مقدار آب جذب شده در جداره کانی بیشتر خواهد شد. از این نظر از لحاظ مقدار آب، مونت موریلونیت و کائولینیت به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار آب جذب شده در بین سه نوع مهم کانی های رسی هستند. شکل ۱-۱۴ که به صورت مقیاس نسبی ترسیم شده است. بیانگر همین مطلب است.




**شکل ۱–۱۳ جذب آب در اطراف پولک رسی**




**شکل ۱–۱۴ آب احاطه کننده ذرات رس**

## ۱–۹ چگالی دانه ها

در انجام محاسبات مختلف در مکانیک خاک، اغلب چگالی دانه های خاک لازم می گردد. چگالی دانه ها را می توان در آزمایشگاه به دقت تعیین کرد. در جدول ۱-۵، چگالی دانه های بعضی از کانی هایی که به طور معمول در خاک یافت می شوند، ارائه شده است. دامنه چگالی دانه ها معمولا بین ۲/۶ تا ۲/۹ است. چگالی دانه های ماسهٔ کمرنگ، که اکثراً از کوارتز ساخته شده، در حدود ۲/۶۵ و چگالی خاکهای لای دار و رس دار در حدود ۲/۶ تا ۲/۹ است.

**جدول ۱–۵ چگالی دانه های کانی های مهم**

| چگالی دانه ها $G_s$ | | کانی |
|---|---|---|
| 2.65 | Quartz | کوارتز |
| 2.6 | Kaolinite | کائولینیت |
| 2.8 | Illite | ایلیت |
| 2.65 – 2.80 | Montmorillonite | مونت مریلونیت |
| 2 – 2.55 | Halloysite | هالوسیت |
| 2.57 | Potassium feldspar | فلدسپار پتاسیم |
| 2.62 – 2.76 | Chlorite | فلدسپار سدیم و کلسیم |
| 2.6 – 2.9 | Biotite | کلریت |
| 2.8 – 3.2 | Muscovite | مسکویت |
| 2.76 – 3.1 | Hornblende | هورن بلند |
| 3.6 – 4.0 | Limonite | لیمونیت |
| 3.27 – 3.37 | Olivine | الیوین |

## ۱–۱۰ | دانه بندی خاک

دانه بندی خاک، تعیین دامنهٔ اندازه ذرات موجود در خاک و توزیع وزنی آنهاست که برحسب درصدی از وزن کل خشک خاک بیان می شود. معمولاً دو روش برای تعیین منحنی دانه بندی مورد استفاده قرار می گیرد: ۱- آزمایش دانه بندی برای ذراتی با قطر بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر و ۲- آزمایش هیدرومتری برای ذراتی با قطر کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر. در ادامه مبانی آزمایش دانه بندی آزمایش هیدرومتری تشریح می شود.

### آزمایش دانه بندی

آزمایش دانه بندی عبارت است از لرزاندن نمونه خاک بر روی یک سری الک که اندازه های آن به ترتیب از بالا به پایین کاهش می یابد. در جدول ۱–۶ شماره و اندازهٔ روزنه های الک های استاندارد آمریکایی ارائه شده است.

برای آزمایش دانه بندی، ابتدا خاک در کوره خشک می شود. سپس کلوخه های خاک کاملاً خرد شده و نمونه از الکها عبور داده می شود. در شکل ۱–۱۵ یک سری الک استاندارد که بر روی لرزانندهٔ مکانیکی قرار دارند و از آن برای آزمایش دانه بندی در آزمایشگاه استفاده می شود، نشان داده شده است. بعد از اتمام مرحله لرزاندن الکها و عبور دادن کامل خاک از آنها، جرم خاکهایی که در روی هر یک از الکها باقیمانده، اندازه گیری می شود. در هنگام آزمایش دانه بندی خاکهای چسبنده، شکستن کلوخه های سنگ به دانه های جدا از هم مشکل است. در این صورت خاک را می توان در آب حل کرد تا به صورت دوغاب خاک درآید. دوغاب خاک از میان الکها عبور داده شده و مقدار باقیمانده در روی الک در کوره خشک و توزین می شود.

نتایج آزمایش دانه بندی معمولا بر حسب درصد وزنی خاکهای عبوری از هر الک بیان می شود. جدول ۱–۷ نشان دهندهٔ مثالی از محاسبات آزمایش دانه بندی می باشد.

### آزمایش هیدرومتری ( دانه بندی به وسیله ته نشینی )

آزمایش هیدرومتری بر پایه اصول ته نشینی دانه های خاک در آب قرار دارد. وقتی که نمونه خاک در آب کاملاً هم زده می شود، دانه های معلق بر حسب شکل، اندازه و وزن با سرعت های مختلفی ته نشین می شوند. برای سهولت، فرض می شود که تمام دانه های خاک کروی هستند و سرعت ته نشینی آنها طبق قانون استوکس بیان می شود. در نتیجه:

**جدول ۱–۶ اندازه الک های استاندارد آمریکایی**

| شماره الک | اندازه روزنه (میلی متر) |
|---|---|
| 4 | 4.75 |
| 6 | 3.350 |
| 8 | 2.360 |
| 10 | 2.00 |
| 16 | 1.180 |
| 20 | 0.850 |
| 30 | 0.600 |
| 40 | 0.425 |
| 50 | 0.300 |
| 60 | 0.250 |
| 80 | 0.180 |
| 100 | 0.150 |
| 140 | 0.106 |
| 170 | 0.088 |
| 200 | 0.075 |
| 270 | 0.053 |

**شکل ۱–۱۵ آزمایش دانه بندی مکانیکی با استفاده از سری الک**

**جدول ۱–۷ آزمایش دانه بندی (جرم نمونه خاک خشک – ۴۵۰ گرم)**

| شماره الک (۱) | قطر الک (۲) | جرم مانده روی الک (گرم) (۳) | درصد مانده (۴) | درصد عبوری (درصد ریز تر) (۵) |
|---|---|---|---|---|
| 10 | 2.00 | 0 | 0 | 100.00 |
| 16 | 1.180 | 9.90 | 2.20 | 97.80 |
| 30 | 0.600 | 24.66 | 5.48 | 92.32 |
| 40 | 0.425 | 17.60 | 3.91 | 88.41 |
| 60 | 0.250 | 23.90 | 5.31 | 83.10 |
| 100 | 0.150 | 35.10 | 7.80 | 75.30 |
| 200 | 0.075 | 59.85 | 13.30 | 62.00 |
| Pan | - | 278.99 | 62.00 | 0 |

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} D^2 \qquad (۱-۱)$$

که در آن:

$v$ = سرعت، $\gamma_s$ = وزن مخصوص دانه های خاک ، $\gamma_w$ = وزن مخصوص آب ، $\eta$ = ویسکوزیته (لزجت) آب،

$D$ = قطر دانه های خاک

بنابراین از رابطه ۱-۱ خواهیم داشت:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta v}{\gamma_s - \gamma_w}} = \sqrt{\frac{18\eta}{\gamma_s - \gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \qquad (۱-۲)$$

که در رابطه فوق

$$v = \frac{\text{طول}}{\text{زمان}} = \frac{L}{t}$$

توجه شود که:

$$\gamma_s = G_s \gamma_w \qquad (۱-۳)$$

با ترکیب روابطه ۱-۲ و ۱-۳ بدست می آید:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \qquad (۱-۴)$$

اگر واحد $\eta$ بر حسب $(g \cdot sec)/cm^2$ و $\gamma_w$ بر حسب $g/cm^3$ و $L$ بر حسب $cm$ و $t$ بر حسب دقیقه و $D$ بر حسب $mm$ باشد، می توان نوشت:

$$\frac{D(mm)}{10}=\sqrt{\frac{18\eta[(g\cdot sec)/cm^2]}{(G_s-1)\gamma_w(g/cm^3)}}\sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)\times 60}}$$

یا:

$$D=\sqrt{\frac{30\eta}{(G_s-1)\gamma_w}}\sqrt{\frac{L}{t}}$$

با فرض $\gamma_w=1g/cm^3$ خواهیم داشت:

$$D(mm)=K\sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}} \qquad (۵-۱)$$

که در آن:

$$K=\sqrt{\frac{30\eta}{(G_s-1)}} \qquad (۶-۱)$$

ملاحظه می شود که مقدار K تابعی از G و $\eta$ است که تابعی از درجه حرارت آزمایش هستند. در جدول ۱-۸ مقدار **K** برحسب درجه حرارت آزمایش و چگالی دانه های خاک ارائه شده است.

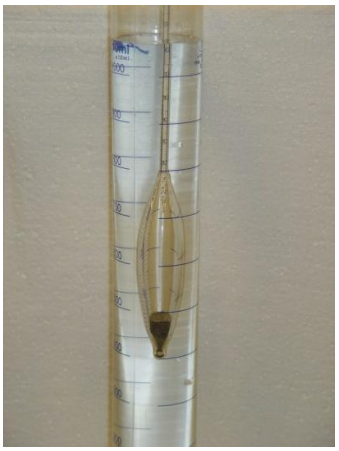
**جدول ۱–۸ مقدار K در رابطه ۱–۶**

| حرارت درجه | $G_s$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ($^\circ$c) | 2.42 | 2.50 | 2.55 | 2.60 | 2.65 | 2.70 | 2.75 | 2.80 |
| 16 | 0.01510 | 0.01505 | 0.01481 | 0.01457 | 0.01435 | 0.01414 | 0.01394 | 0.01374 |
| 17 | 0.01511 | 0.01486 | 0.01462 | 0.01439 | 0.01417 | 0.01396 | 0.01376 | 0.01356 |
| 18 | 0.01492 | 0.01467 | 0.01443 | 0.01421 | 0.01399 | 0.01378 | 0.01359 | 0.01339 |
| 19 | 0.01474 | 0.01449 | 0.01425 | 0.01403 | 0.01382 | 0.01361 | 0.01342 | 0.01323 |
| 20 | 0.01456 | 0.01431 | 0.01408 | 0.01386 | 0.01365 | 0.01344 | 0.01325 | 0.01307 |
| 21 | 0.01438 | 0.01414 | 0.01391 | 0.01369 | 0.01348 | 0.01328 | 0.01325 | 0.01307 |
| 22 | 0.01421 | 0.01397 | 0.01374 | 0.01353 | 0.01332 | 0.01312 | 0.01294 | 0.01276 |
| 23 | 0.01404 | 0.01381 | 0.01358 | 0.01337 | 0.01317 | 0.01297 | 0.01279 | 0.01261 |
| 24 | 0.01388 | 0.01365 | 0.01342 | 0.01321 | 0.01301 | 0.01282 | 0.01264 | 0.01246 |
| 25 | 0.01372 | 0.01349 | 0.01327 | 0.01306 | 0.01286 | 0.01267 | 0.01249 | 0.01232 |
| 26 | 0.01357 | 0.01334 | 0.01312 | 0.01291 | 0.01272 | 0.01253 | 0.01235 | 0.01218 |
| 27 | 0.01342 | 0.01319 | 0.01297 | 0.01277 | 0.01258 | 0.01239 | 0.01221 | 0.01204 |
| 28 | 0.01327 | 0.01304 | 0.01283 | 0.01264 | 0.01244 | 0.01225 | 0.01208 | 0.01191 |
| 29 | 0.01312 | 0.01290 | 0.01269 | 0.01249 | 0.01230 | 0.01212 | 0.01195 | 0.01178 |
| 30 | 0.01298 | 0.01276 | 0.01256 | 0.01236 | 0.01217 | 0.01199 | 0.01182 | 0.01169 |

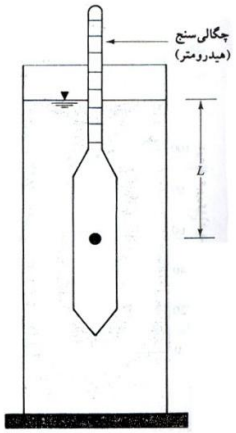
در آزمایشگاه، آزمایش هیدرومتری در یک استوانه ته نشینی با ۵۰ گرم نمونه خاک رد شده از الک ۰/۰۷۵ میلیمتر و خشک شده در کوره صورت می گیرد. ارتفاع استوانه ته نشینی ۱۸ اینچ و قطر آن ۲/۵ اینچ می باشد که برای حجم ۱۰۰۰ سیسی علامت گذاری شده است. معمولا از هگزامتافسفات سدیم به عنوان ماده ی پراکننده استفاده می شود. ابتدا نمونه با ماده پراکننده مخلوط شده و ۱ تا ۱۶ ساعت به همان حال می ماند. سپس توسط همزن، مخلوط شده و با اضافه کردن آب مقطر، حجم آن به ۱۰۰۰ سی سی افزایش می یابد.

شکل ۱- ۱۶ یک چگالی سنج از نوع **ASTM 152H** را که در آزمایش هیدرومتری از آن استفاده می شود را نشان می دهد. وقتی که چگالی سنج در زمان **t** در محلول تعلیق تهیه شده قرار داده می شود. چگالی را در همسایگی در عمق موثر **L** اندازه گیری می کند. چگالی تابعی از مقدار ذرات خاکی است که در واحد حجم محلول تعلیق در آن عمق وجود دارد. همچنین در زمان **t** ذرات خاکی که در عمق L معلق هستند، دارای قطری کوچکتر از **D** محاسبه شده از رابطه ۱- ۵ می

باشند. ذرات بزرگتر به اعماق بزرگتر ته نشین شده اند. چگالی سنج طوری کالیبره شده که با توجه به چگالی محلول تعلیق، مقدار خاکی را که در حالت معلق است، برحسب گرم بدست می دهد. چگالی سنجها برای خاکی با چگالی دانه های ۲/۶۵ کالیبره شده اند. برای خاکها با چگالی دانه های دیگر، لازم است اصلاحاتی به عمل آید.



**شکل ۱–۱۶ چگالی سنج (هیدرومتر) ASTM 152H**

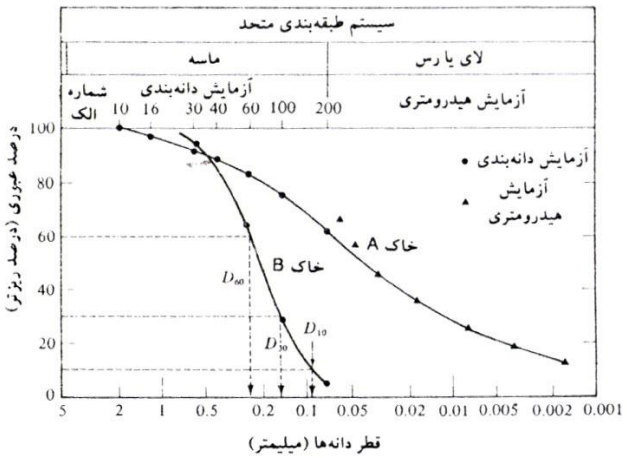



**شکل ۱–۱۷ تعریف طول موثر L در آزمایش هیدرومتری**

با دانستن مقدار خاک معلق، طول L و زمان t می توان درصد وزنی خاک ریزتر از قطر مشخصی را بدست آورد. توجه شود که طول **L** عمق اندازه گیری شده از سطح آب تا مرکز ثقل حباب هیدرومتر می باشد که در آن نقطه چگالی محلول تعلیق اندازه گیری می شود. مقدار عمق L با زمان t متغیر است و زمان قرائت آن در استاندارد **ASTM** داده شده است. آزمایش هیدرو متری برای تعیین منحنی دانه بندی خاکهایی با ذراتی تا ۰/۵ میکرون معتبر است.

## منحنی دانه بندی

نتایج تحلیل های مکانیکی معمولاً در روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی رسم می شود که به آن منحنی دانه بندی[1] می گویند. قطر دانه ها در روی محور لگاریتمی افقی و درصد عبوری مربوطه در روی محور غیر لگاریتمی قائم برده می شود.. به عنوان مثال منحنی دانه بندی برای دو نمونه خاک در شکل ۱–۱۸ نشان داده شده است.




**شکل ۱–۱۸ منحنی دانه بندی**

[1] Particle-size distribution curve

منحنی دانه بندی برای خاک A ترکیبی از نتایج آزمایش دانه بندی مندرج در جدول ۱-۷ و آزمایش هیدرومتری برای دانه های ریز می باشد. در هنگام ترکیب نتایج آزمایش دانه بندی و آزمایش هیدرومتری یک عدم پیوستگی در ناحیه مشترک منحنی ها به وجود می آید این مسئله ناشی از نامنظم بودن شکل دانه های سنگی است. آزمایش دانه بندی معمولاً یک اندازه متوسط از دانه های خاک و آزمایش هیدرومتری قطر کره معادل با سرعت ته نشینی مساوی را بدست می دهد.

از روی منحنی دانه بندی می توان درصد شن، ماسه، لای و رس را بدست آورد. طبق سیستم طبقه بندی متحد، درصد مصالح فوق برای خاک A برابر است با:

شن (بزرگتر از ۴/۷۵ میلیمتر) $= 0\%$

ماسه (بین ۴/۷۵ تا ۰/۰۷۵ میلیمتر) = درصد ریزتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر – درصد ریزتر از ۴/۷۵ میلیمتر $= 100 - 62 = 38\%$

لای و رس (کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر) $= 62\%$

**سوال:**

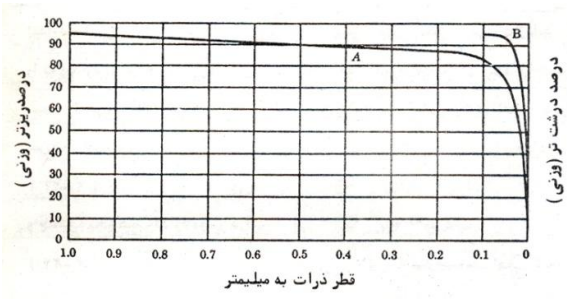
چرا محور افقی نمودار دانه بندی را لگاریتمی در نظر می گیریم؟

**پاسخ:**

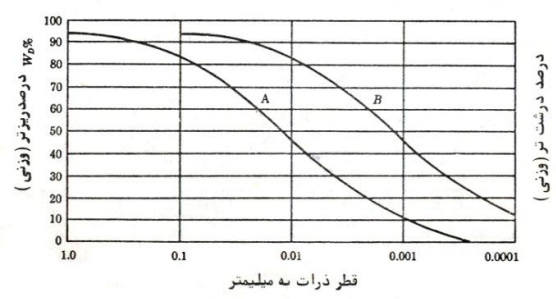
ترسیم منحنی دانه بندی روی سیستم مختصات نیمه لگاریتمی دارای مزایای زیر است:

۱. مقیاس در مورد ذرات کوچک و خیلی کوچک وسیعتر شده و لذا توزیع ذرات خیلی ریزدانه را به نحو بهتری می توان نمایش داد. چنانچه منحنی دانه بندی خاک را که در سیستم مختصات نیمه لگاریتمی رسم شده در روی یک سیستم محور مختصات حسابی رسم کنیم شکل ۱-۱۹ حاصل می شود. همانطور که از این شکل دیده می شود دانه بندی ذرات ریز در این سیستم به خوبی قابل مشاهده نیست. با مقایسه شکل های ۱-۱۹ و ۱-۲۰ دیده می شود که این نقائص با ترسیم منحنی دانه بندی در سیستم مختصات نیمه لگاریتمی بخوبی برطرف می شود.

۲. ترسیم منحنی دانه بندی در سیستم مختصات نیمه لگاریتمی، مقایسه دانه بندی دو خاک با اندازه ذرات متفاوت را خیلی آسان تر می سازد. در سیستم مختصات نیمه لگاریتمی خاک هایی که دارای دانه بندی مشابه هستند با منحنی های موازی مشخص می شوند. اگر دانه بندی دو خاک آنچنان مشابه باشد که قطر ذرات یکی در هر درصد وزنی یکدهم قطر ذرات دیگر در همان درصد وزنی باشد، تمام نقاط منحنی دوم با اندازه یک سیکل در روی محور لگاریتمی به طرف راست منتقل شده و دو منحنی موازی خواهند بود. در شکل ۱-۲۰ دانه بندی چنین خاک هایی با منحنی های **A** و **B** نشان داده شده است. واضح است که ترسیم منحنی دانه بندی چنین خاک های مشابهی (از نظر دانه بندی) در روی سیستم مختصات حسابی به صورت دو منحنی موازی نشان داده نخواهد شد.




**شکل ۱-۱۹**




**شکل ۱-۲۰**

## ۱-۱۱ | اندازه موثر، ضریب یکنواختی و ضریب دانه بندی

از منحنی دانه بندی می توان برای مقایسه خاکهای مختلف استفاده کرد. همچنین سه پارامتر پایه که از آنها برای طبقه بندی خاک های دانه ای استفاده می شود، از روی منحنی دانه بندی قابل تعیین است. این سه پارامتر عبارتند از:

(الف) اندازه موثر

(ب) ضریب یکنواختی

(پ) ضریب دانه بندی

قطری که در روی منحنی دانه بندی مربوط به درصد عبوری ۱۰ است، اندازه موثر نامیده شده و با $D_{10}$ نمایش داده می شود. ضریب یکنواختی[1] نیز مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

که در آن: $C_u$ = ضریب یکنواختی و $D_{60}$ = قطر مربوط به درصد عبوری ۶۰ درصد در روی منحنی دانه بندی

ضریب دانه بندی[2] نیز طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

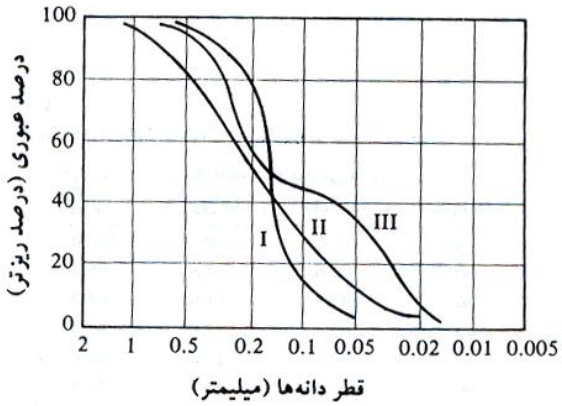
که در آن: $C_c$ = ضریب دانه بندی و $D_{30}$ = قطر مربوط به درصد عبوری ۳۰ درصد

برای منحنی دانه بندی خاک **B** در شکل ۱-۱۸، مقادیر $D_{10}$، $D_{30}$ و $D_{60}$ به ترتیب برابر با ۰/۰۹۶، ۰/۱۶ و ۰/۲۴ می باشند. در نتیجه ضریب یکنواختی و دانه بندی برای آن برابرند با:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.24}{0.096} = 2.5$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{0.16^2}{0.24 \times 0.096} = 1.11$$

منحنی دانه بندی نه تنها نشان دهنده دامنه اندازه دانه های موجود در خاک است، بلکه نوع توزیع اندازه های مختلف دانه ها را نشان می دهد. این موضوع در شکل ۱-۲۱ نشان داده شده است. نمودار I نشان دهنده خاکی است که اکثر دانه های خاک دارای اندازه یکسانی می باشند. به این خاک، خاک بد دانه بندی شده می گویند. منحنی II نشان دهنده خاکی می باشد که اندازه ذرات آن در دامنه وسیعی توزیع شده است که به آن خاک خوب دانه بندی شده می گویند. خاک های خوب دانه بندی شده دارای ضریب یکنواختی بزرگتر از ۴ برای شن و ۶ برای ماسه و ضریب دانه بندی ۱ تا ۳ می باشند (برای شن و ماسه). ممکن است خاکی ترکیبی از ۲ و یا چند خاک با دانه بندی یکنواخت باشد. منحنی III مربوط به چنین خاکی می باشد که به آن خاک با دانه بندی منفصل می گویند.




**شکل ۱-۲۱ انواع مختلف منحنی های دانه بندی**

[1] Uniformity coefficient
[2] Coefficient of gradation

## ۱-۱۲ | مسائل حل شده:

### مثال ۱-۱

نتایج حاصل از آزمایش دانه بندی یک نمونه خاک با استفاده از سری الک استاندارد در جدول زیر ارائه شده است. نمودار دانه بندی خاک را ترسیم نموده و موارد خواسته شده را محاسبه نمایید.

(الف) $D_{10}$، $D_{30}$ و $D_{60}$ خاک.

(ب) ضریب یکنواختی $C_u$.

(پ) ضریب انحنا $C_c$.

| شماره الک # | جرم مانده روی هر الک (gr) |
|---|---|
| 4 | 0 |
| 10 | 40 |
| 20 | 60 |
| 40 | 89 |
| 60 | 140 |
| 80 | 122 |
| 100 | 210 |
| 200 | 56 |
| سینی | 12 |

**حل:**

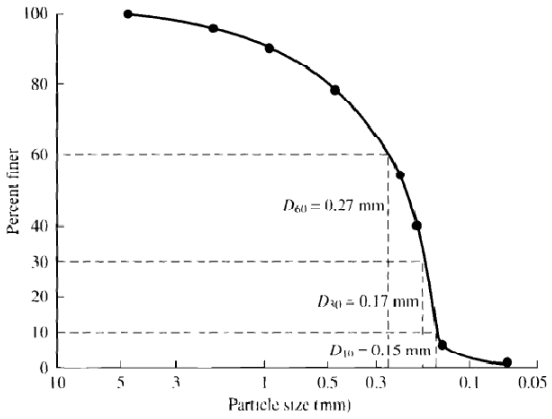
ابتدا جدول زیر را تهیه می نماییم. نمودار دانه بندی خاک فوق در صفحه بعد نشان داده شده است. با توجه به این نمودار دانه بندی داریم:

(الف) $D_{10} = 0.15\text{mm}$ ، $D_{30} = 0.17\text{mm}$ ، $D_{60} = 0.27\text{mm}$

(ب) $$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.27}{0.15} = 1.8$$

(پ) $$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{0.17^2}{0.27 \times 0.15} = 0.71$$

| شماره الک # | قطر سوراخ | جرم مانده روی هر الک (gr) | درصد مانده روی هر الک (٪) | جرم مانده تجمعی روی هر الک (gr) | درصد عبوری |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4.75 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 10 | 2.00 | 40 | 5.5 | 5.5 | 94.5 |
| 20 | 0.85 | 60 | 8.23 | 13.73 | 86.27 |
| 40 | 0.425 | 89 | 12.2 | 25.93 | 74.07 |
| 60 | 0.250 | 140 | 19.2 | 45.13 | 54.87 |
| 80 | 0.180 | 122 | 16.73 | 61.86 | 38.14 |
| 100 | 0.150 | 210 | 28.8 | 90.66 | 9.34 |
| 200 | .075 | 56 | 7.7 | 98.36 | 1.64 |
| سینی | - | 12 | 1.64 | 100 | 0 |
| | | 729 gr | 100 % | | |



### مثال ۱–۲

برای توزیع دانه بندی نشان داده شده در شکل فوق، درصد شن، ماسه و سیلت و رس را محاسبه نمایید.

Gravel (%) = 100 – PP#4 = 100-100 = 0 (بزرگتر از ۴/۷۵ میلیمتر)

Sand (%) = PP#4 - PP#200 = 100 – 1.64 = 98.36 (درصد ذرات بین الک نمره ۴ و ۲۰۰)

Silt (%) = PP#200 = 1.64 (درصد عبوری از الک ۲۰۰)

### مثال ۱–۳

منحنی های زیر به طور کیفی نشان دهنده چه نوع خاک هایی هستند؟

**حل:**

خاک A: خاک بد دانه بندی شده که دارای دانه بندی یکنواخت بوده و فاقد درشت دانه است

خاک B: خاک بد دانه بندی شده که دارای دانه بندی یکنواخت بوده و فاقد ریزدانه است

خاک C: خاک خوب دانه بندی شده که دارای ذرات ریزدانه و متوسط بوده و فاقد درشت دانه است

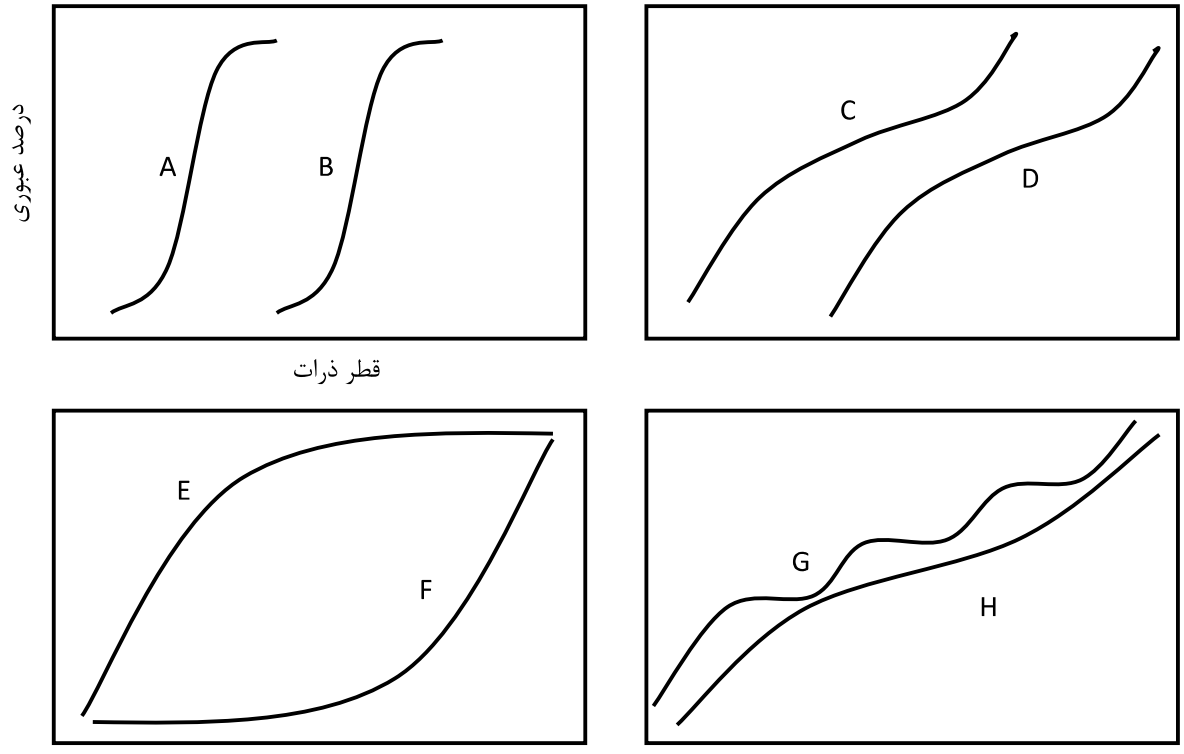
خاک D: خاک خوب دانه بندی شده که دارای ذرات متوسط و درشت دانه بوده و فاقد ریزدانه است

خاک E: خاک بد دانه بندی شده ای که تمام اندازه ذرات را شامل می شود ولی ریزدانه آن خیلی بیشتر است

خاک F: خاک بد دانه بندی شده ای که تمام اندازه ذرات را شامل می شود ولی درشت دانه آن خیلی بیشتر است

خاک G: خاک با دانه بندی منفصل، بعضی از اندازه های دانه ها وجود ندارند

خاک H: خاک خوب دانه بندی شده. توزیع تقریباً برابر از تمام ذرات خاک



### مثال ۱-۴

مشخصات دانه بندی خاکی طبق جدول زیر است. مطلوب است ترسیم منحنی دانه بندی و تعیین ضریب یکنواختی و ضریب انحنای خاک.

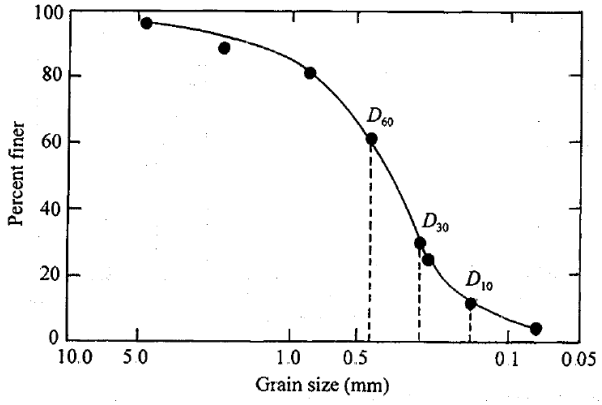
| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) |
|---|---|
| 4 | 28 |
| 10 | 42 |
| 20 | 48 |
| 40 | 128 |
| 60 | 221 |
| 100 | 86 |
| 200 | 40 |
| سینی | 24 |

### حل مسئله

برای ترسیم منحنی دانه بندی، جدول فوق را کامل می نماییم.

| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) | درصد مانده روز هر الک | درصد عبوری |
|---|---|---|---|
| 4 | 28 | 4.54 | 95.46 |
| 10 | 42 | 6.81 | 88.65 |
| 20 | 48 | 7.78 | 80.87 |
| 40 | 128 | 20.75 | 60.12 |
| 60 | 221 | 35.82 | 24.3 |
| 100 | 86 | 13.94 | 10.36 |
| 200 | 40 | 6.48 | 3.88 |
| سینی | 24 | 3.88 | 0 |
| | Σ617g | | |

نمودار درصد عبوری در مقابل اندازه دانه ها در شکل زیر نشان داده شده است.




با توجه به نمودار $D_{10} = 0.14mm$ ، $D_{30} = 0.27mm$ ، $D_{60} = 0.42mm$ بدست می آید. حال برای محاسبه ضریب یکنواختی و ضریب انحنا داریم:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.42}{0.14} = 3$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} = \frac{0.27^2}{0.42 \times 0.14} = 1.24$$

### مثال ۱–۵

مشخصات دانه بندی خاکی طبق جدول زیر است. مطلوب است ترسیم منحنی دانه بندی و تعیین ضریب یکنواختی و ضریب انحنای خاک.

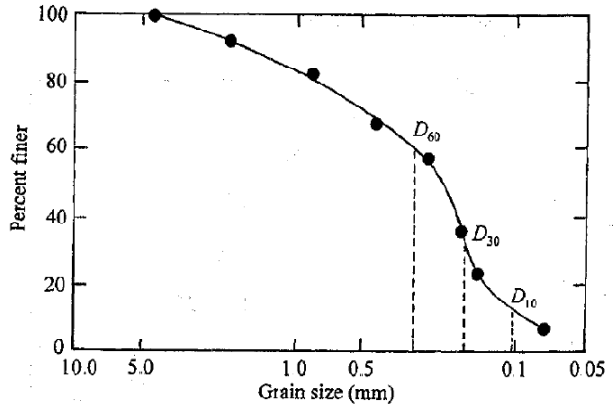
| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) |
|---|---|
| 4 | 0 |
| 10 | 44 |
| 20 | 56 |
| 40 | 82 |
| 60 | 51 |
| 80 | 106 |
| 100 | 92 |
| 200 | 85 |
| سینی | 35 |

### حل مسئله

برای ترسیم منحنی دانه بندی، جدول فوق را کامل می نماییم.

| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) | درصد مانده روز هر الک | درصد عبوری |
|---|---|---|---|
| 4 | 0 | 0 | 100 |
| 10 | 44 | 7.99 | 92.01 |
| 20 | 56 | 10.16 | 81.85 |
| 40 | 82 | 14.88 | 66.97 |
| 60 | 51 | 9.26 | 57.71 |
| 80 | 106 | 19.24 | 38.47 |
| 100 | 92 | 16.70 | 21.77 |
| 200 | 85 | 15.43 | 6.34 |
| سینی | 35 | 6.34 | 0 |
| | $\Sigma 551g$ | | |

نمودار درصد عبوری در مقابل اندازه دانه ها در شکل زیر نشان داده شده است.




با توجه به نمودار $D_{10} = 0.11mm$ ، $D_{30} = 0.17mm$ ، $D_{60} = 0.3mm$ بدست می آید. حال برای محاسبه ضریب یکنواختی و ضریب انحنا داریم:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.3}{0.11} = 2.73$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} = \frac{0.17^2}{0.11 \times 0.3} = 0.88$$

### مثال ۱-۶

مشخصات دانه بندی خاکی طبق جدول زیر است. مطلوب است ترسیم منحنی دانه بندی و تعیین ضریب یکنواختی و ضریب انحنای خاک.

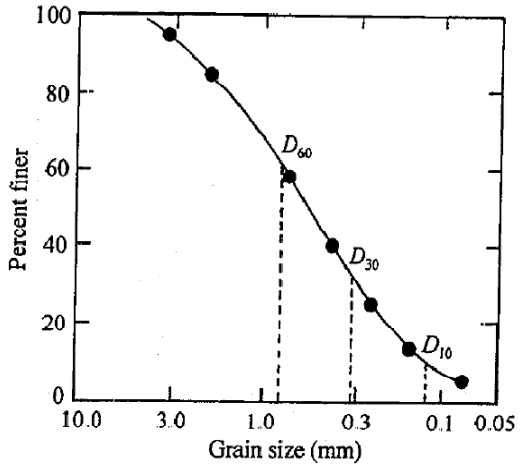
| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) |
|---|---|
| 4 | 0 |
| 6 | 30.0 |
| 10 | 48.7 |
| 20 | 127.3 |
| 40 | 96.8 |
| 60 | 76.6 |
| 100 | 55.2 |
| 200 | 43.4 |
| سینی | 22.0 |

### حل مسئله

برای ترسیم منحنی دانه بندی، جدول فوق را کامل می نماییم.

| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) | درصد مانده روز هر الک | درصد عبوری |
|---|---|---|---|
| 4 | 0 | 0 | 100 |
| 6 | 30.0 | 6.0 | 94 |
| 10 | 48.7 | 9.74 | 84.26 |
| 20 | 127.3 | 25.46 | 58.8 |
| 40 | 96.8 | 19.36 | 39.44 |
| 60 | 76.6 | 15.32 | 24.12 |
| 100 | 55.2 | 11.04 | 13.08 |
| 200 | 43.4 | 8.68 | 4.40 |
| سینی | 22.0 | 4.4 | 0 |
| | $\Sigma$500g | | |

نمودار درصد عبوری در مقابل اندازه دانه ها در شکل زیر نشان داده شده است.




با توجه به نمودار $D_{10} = 0.11mm$ ، $D_{30} = 0.17mm$ ، $D_{60} = 0.3mm$ بدست می آید. حال برای محاسبه ضریب یکنواختی و ضریب انحنا داریم:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.82}{0.12} = 6.83$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} = \frac{0.31^2}{0.81 \times 0.12} = 0.98$$

### مثال ۱-۷

مشخصات دانه بندی خاکی طبق جدول زیر است. مطلوب است ترسیم منحنی دانه بندی و تعیین ضریب یکنواختی و ضریب انحنای خاک.

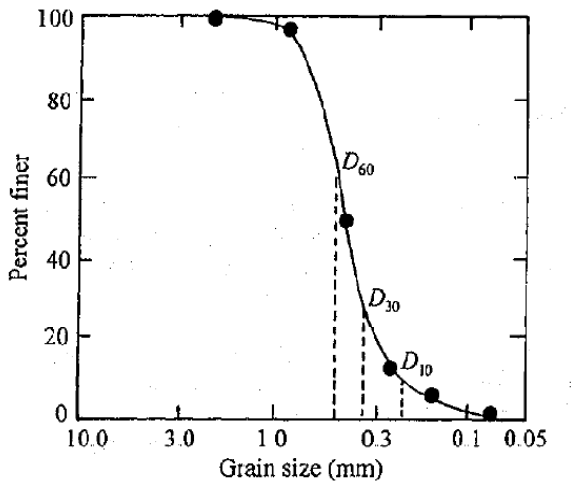
| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) |
|---|---|
| 4 | 0 |
| 6 | 0 |
| 10 | 0 |
| 20 | 9.1 |
| 40 | 249.4 |
| 60 | 179.8 |
| 100 | 22.7 |
| 200 | 15.5 |
| سینی | 23.5 |

### حل مسئله

برای ترسیم منحنی دانه بندی، جدول فوق را کامل می نماییم.

| شماره الک | جرم مانده روی الک (گرم) | درصد مانده روز هر الک | درصد عبوری |
|---|---|---|---|
| 4 | 0 | 0 | 100 |
| 6 | 0 | 0 | 100 |
| 10 | 0 | 0 | 100 |
| 20 | 9.1 | 1.82 | 98.18 |
| 40 | 249.4 | 49.88 | 48.3 |
| 60 | 179.8 | 35.96 | 12.34 |
| 100 | 22.7 | 4.54 | 7.8 |
| 200 | 15.5 | 3.10 | 4.7 |
| سینی | 23.5 | 4.70 | 0 |
| | $\Sigma$500g | | |

نمودار درصد عبوری در مقابل اندازه دانه ها در شکل زیر نشان داده شده است.




با توجه به نمودار $D_{10} = 0.23mm$، $D_{30} = 0.33mm$، $D_{60} = 0.48mm$ بدست می آید. حال برای محاسبه ضریب یکنواختی و ضریب انحنا داریم:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.48}{0.23} = 2.09$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} = \frac{0.33^2}{0.48 \times 0.23} = 0.99$$

### مثال ۱–۸

در یک آزمایش هیدرومتری اطلاعات زیر در دست است:

۶۰ دقیقه پس از شروع ته نشینی = t ، L = 9.2 ، $24^\circ$ = درجه حرارت آزمایش ، $G_s = 2.7$

مطلوب است تعیین قطر D کوچکترین اندازه ذره ای که در لحظه اندازه گیری از نقطه اندازه گیری عبور کرده است.

حل: با توجه به جدول مربوطه برای $G_s = 2.7$ و دمای $24^\circ$ ، $k = 0.01282$ بدست می آید. بنابراین:

$$D = 0.01282\sqrt{\frac{9.2}{60}} = 0.005\text{mm}$$

### مثال ۱–۹

مسئله قبل را برای اطلاعات زیر تکرار نمایید:

$k = 0.01279$ ، $23^\circ$ = درجه حرارت آزمایش ، $G_s = 2.7$

حل:

$$D(\text{mm}) = k\sqrt{\frac{L(\text{cm})}{t(\text{min})}} = 0.01279\sqrt{\frac{12.8}{100}} = 0.0046\text{mm}$$

### مثال ۱–۱۰:

در یک آزمایش هیدرومتری نتایج زیر در دست است:

$G_s = 2.7$

درجه حرارت آزمایش = ۲۲ (درجه سانتیگراد)

$L = 11.9\text{cm}$ (در $t = 30$ دقیقه بعد از شروع ته نشینی)

مطلوب است تعیین قطر D کوچکترین ذره ای که در لحظه اندازه گیری از نقطه اندازه گیری عبور کرده است.

حل: با استفاده از رابطه ۱–۵ می توان نوشت:

$$D(\text{mm}) = K\sqrt{\frac{L(\text{cm})}{t(\text{mm})}}$$

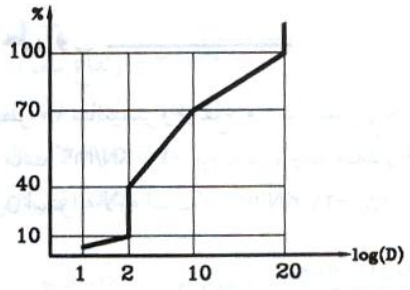
با استفاده از جدول ۱–۷ برای $G_s = 2.7$ و درجه حرارت ۲۲ درجه سانتیگراد، مقدار $K = 0.01312$ می باشد. بنابراین:

$$D = 0.01312\sqrt{\frac{11.9}{30}} = 0.0083\text{ mm}$$

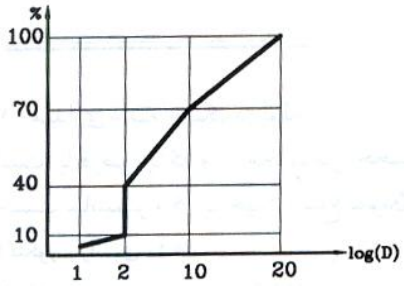
### مثال ۱–۱۱

نتایج زیر در یک آزمایش دانه بندی بدست آمده است. منحنی دانه بندی کدامیک از پاسخ های ذیل خواهد بود: ۳۰ درصد از خاک دارای قطر دانه معادل **20mm**، ۳۰ درصد خاک دارای قطر دانه معادل **10mm**، ۳۰ درصد از خاک دارای قطر معادل **2mm**، ۱۰ درصد از خاک دارای قطر دانه کمتر از **2mm** و ۵ درصد از خاک دارای قطر دانه کمتر از **1mm** است. (کنکور سراسری ۷۳)

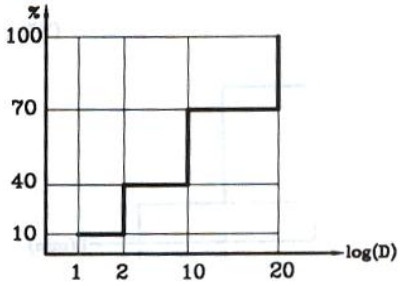
(۱)



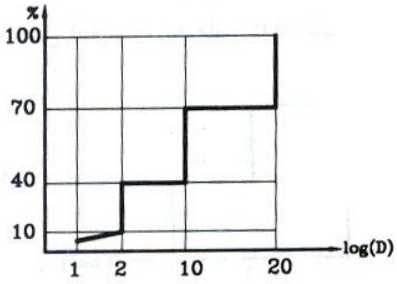

(۲)




(۳)



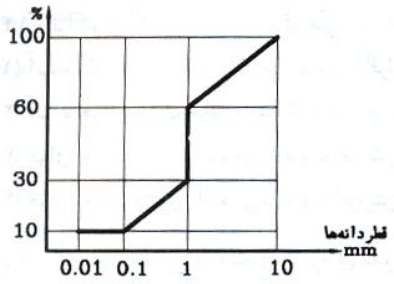

(۴)




پاسخ صحیح مسئله گزینه ۴ می باشد.

### مثال ۱-۱۲

در صورتی که ضرایب یکنواختی ($C_u$) و ضریب انحنا ($C_c$) خاک بوسیله فرمول های زیر ارائه شود، مقادیر ضرایب فوق را به ترتیب معین کنید. (کنکور سراسری ۷۴) $C_u = D_{60}/D_{10}$ و $C_c = D_{30}^2/(D_{60}\times D_{10})$




۱) ۱ و ۱۰۰
۲) ۱۰۰ و ۱
۳) ۱۰ و ۱۰
۴) ۱۰ و ۱

پاسخ صحیح گزینه ۳ است.

$$D_{30} = D_{60} = 1mm$$

$$D_{10} = 0.1mm$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1}{0.1} = 10$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}\times D_{10}} = \frac{1^2}{1\times 0.1} = 10$$

**مثال ۱-۱۳:**

برای یک نمونه خاک در آزمایش دانه بندی به روش مکانیکی $D_{10} = 0.6\,mm$ و $D_{60} = 5\,mm$ بدست آمده است. برای آنکه چنین خاکی بادانه بندی خوب ارزیابی شود، محدودهٔ $D_{30}$ چقدر باید باشد؟ (کنکور سراسری ۸۶)

۱) $3\,mm > D_{30} > 1.7\,mm$

۲) $9\,mm > D_{30} > 3\,mm$

۳) $16.8\,mm > D_{30} > 5.6\,mm$

۴) $4.1\,mm > D_{30} > 2.4\,mm$

جواب: گزینه «۱»

می دانیم یکی از شرایط اصلی برای اینکه خاکی را با دانه بندی خوب توصیف کنیم این است که $1 < C_c < 3$ باشد.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \Rightarrow 1 < \frac{D_{30}^2}{0.6 \times 5} < 3 \Rightarrow 3 < D_{30}^2 < 9 \Rightarrow 1.7 < D_{30} < 3$$

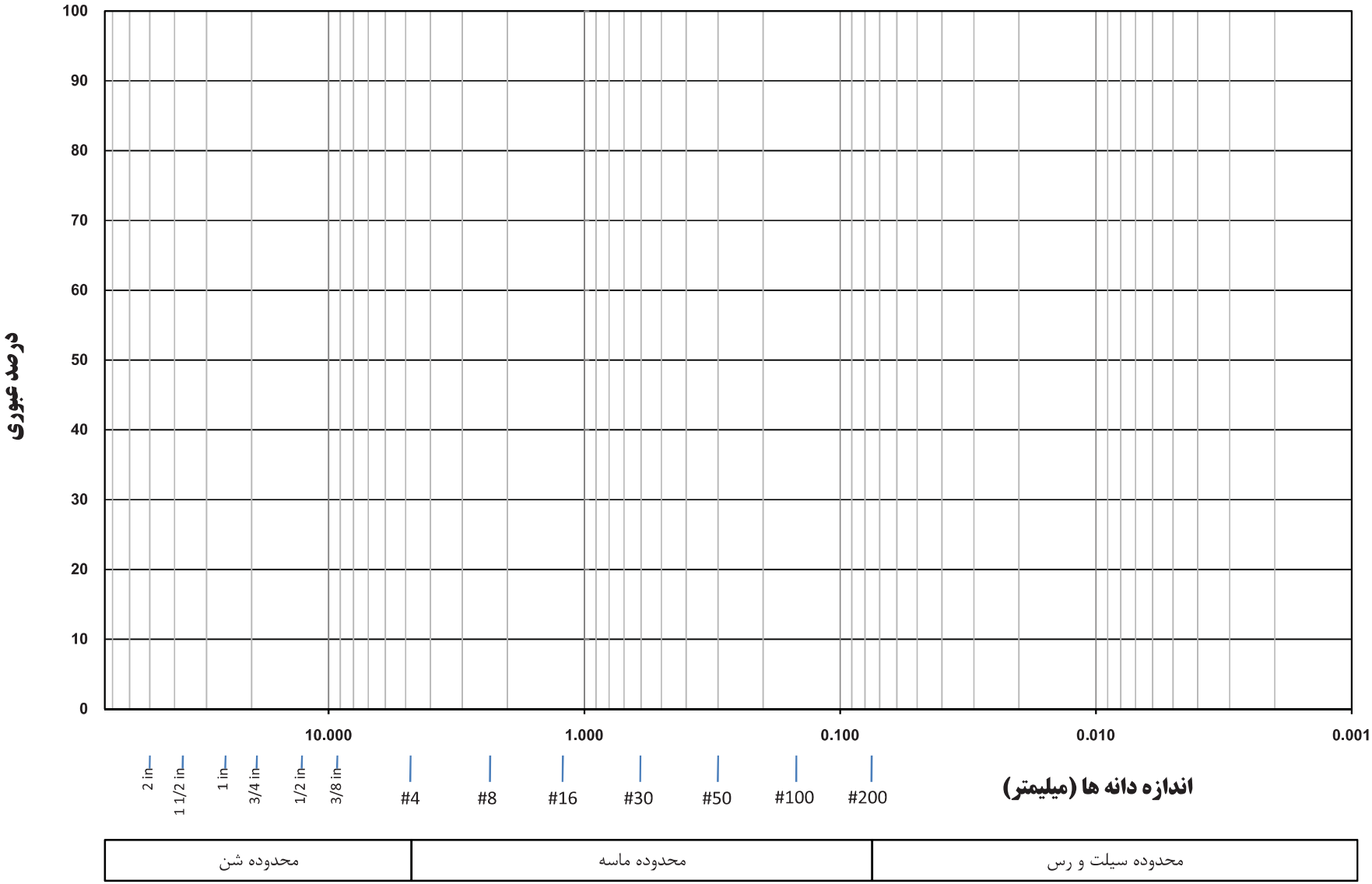
توجه: برای ترسیم منحنی دانه بندی مثال های ارائه شده در این فصل می توانید از کاغذ نیمه لگاریتمی ضمیمه انتهای فصل استفاده نمایید.

## ۱-۱۳ | مسائل فصل:

۱. آزمایش هیدرومتری بر روی چه نوع خاک هایی انجام می شود و هدف از انجام آن چیست ؟
۲. $D_{10}$ خاکی بزرگتر از $D_{60}$ خاکی دیگری است. آیا می توان از این گفته در رابطه با این دو خاک قضاوت نمود.
۳. سه دسته مهم کانی های رسی را نام برده و با یکدیگر مقایسه نمایید.
۴. ساختار پایه کانی های رسی کائولینیت، ایلیت و مونت موریلونیت را با رسم شکل با یکدیگر مقایسه نمایید.
۵. سطح مخصوص ذرات رسی را تعریف نموده و بیان نمایید که سطح مخصوص چه تاثیری بر خواص رس دارد.

## ۱-۱۴ | منابع و مراجع:

۱. **اصول مهندسی ژئوتکنیک**، جلد اول: مکانیک خاک.، ترجمه شاپور طاحونی.، چاپ هفتم ۱۳۸۰، ویرایش دوم.
۲. **مجموعه سوالات طبقه بندی شده آزمون کارشناسی ارشد مکانیک خاک**.، تالیف: ساسان امیر افشاری.، چاپ سوم ۱۳۸۲.
۳. **جزوه درس مکانیک خاک گارشناسی ارشد دکتر فرزین کلانتری**.، ویرایش پاییز ۸۵.
۴. **مکانیک خاک**، تالیف دکتر حسن رحیمی.، انتشارات دانش و فن، چاپ پنجم ۱۳۷۸.
5. **Soil Mechanics**, Delft University of Technology, 2001.
6. **Principles of Geotechnical Engineering.,** Braja M. Das., 5th Ed., ISBN: 0-534-55144-0.


100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
درصد عبوری
10.000
1.000
0.100
0.010
0.001
2 in
1 1/2 in
1 in
3/4 in
1/2 in
3/8 in
#4
#8
#16
#30
#50
#100
#200
اندازه دانه ها (میلیمتر)
محدوده شن
محدوده ماسه
محدوده سیلت و رس