فصل ۱:
آشنایی با مکانیک خاک، منشاء خاک و سنگ

جزوه درس مکانیک خاک ۲ و مکانیک خاک کارشناسی

استاد: عبدالمتین ستایش

برای ارسال نظرات و پیشنهادات به سایت شخصی اینجانب رجوع نموده و یا نظرات و یا پیشنهادات خود را به آدرس پست الکترونیک زیر ارسال نمایید:

Website: www.ams.ir, Email: a_matin_s@yahoo.com

آخرین ویرایش: مهر ۹۰

فهرست مطالب فصل اول:

۱-۱	مقدمه
۱-۲	تعریف خاک
۱-۳	پیدایش مکانیک خاک
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 پیدایش مکانیک خاک

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]

[1] Coulomb, 1776

که در سال ۱۷۷۶ رساله مهمی در رابطه با گسیختگی خاک تالیف نمود و همچنین **رانکین**[1] که در سال ۱۸۵۷ مقاله بسیار مهمی در رابطه با حالت های محتمل تنش به چاپ رساند. در سال ۱۸۵۶ **دارسی**[2] 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.

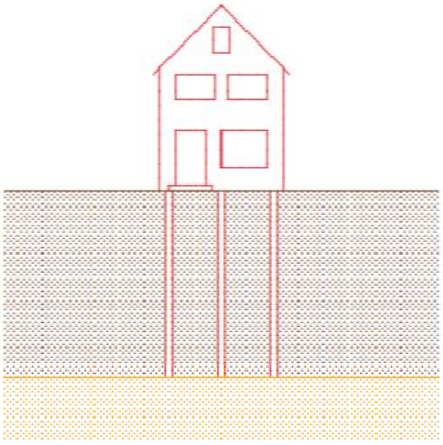
اما برای اینکه تمام این تمام این مبانی بنیادی را بتوان تحت عنوان یک علم واحد گردهم آورد باید تا قرن بیستم منتظر می ماندیم. در آغاز این قرن، **کارل ترزاقی**[3] بیشترین و مهمترین سهم را در توسعه مکانیک خاک بر عهده داشت. ترزاقی در سال ۱۹۲۵ کتاب **Erdbaumechanik** (مکانیک خاک) را به چاپ رساند چنانکه امروزه 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.

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 تبیعت 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

[1] Rankine, 1857
[2] Darcy, 1856
[3] Carl Von Terzaghi

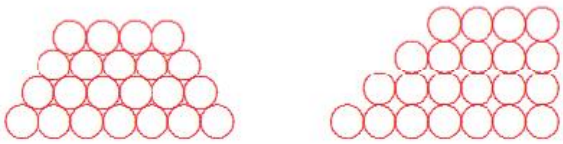
توجهی کسب می نمایند. این مسئله عمدتاً به خاطر افزایش نیروهای بین ذرات مجزا است که به ساختار ذرات مقاومتی فزاینده می بخشد. در مهندسی عمران رفتار غیر خطی مزایای خاص خود را دارد. به طور مثال رفتار فونداسیون های شمعی ساختمانی که در روی خاک بسیار نرم احداث شده و در زیر آن لایه ای از ماسه قرار دارد را در نظر 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.



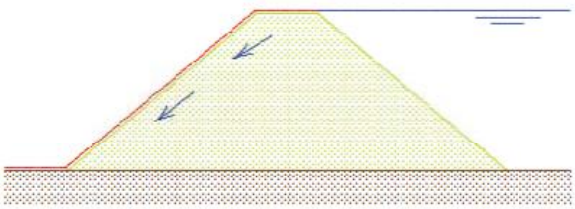
۴. خزش

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.

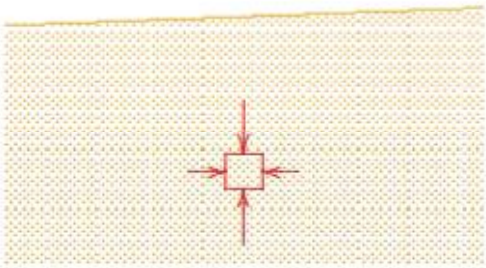
۵. تراز آب زیرزمینی



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.

۷. 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

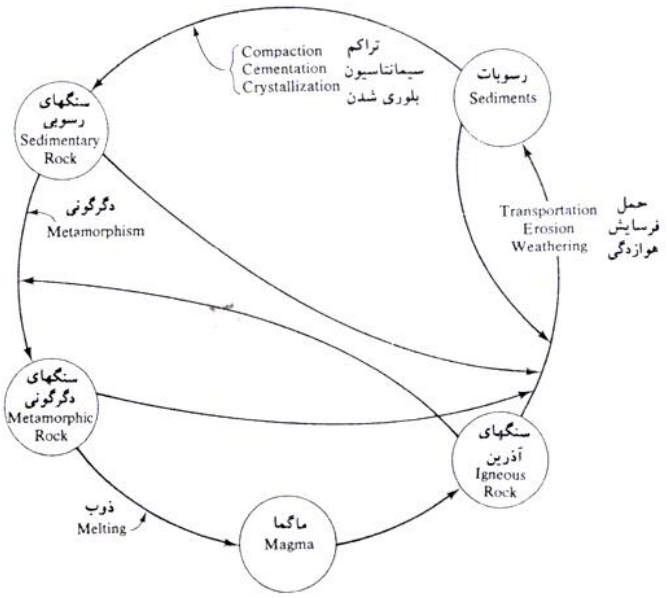
دانه های کانی که تشکیل دهندهٔ قسمت جامد خاک هستند، از هوازدگی سنگ ها بوجود می آیند. دامنهٔ تغییرات اندازهٔ دانه ها وسیع است. بسیاری از خواص فیزیکی خاک، توسط اندازه، شکل و ترکیبات شیمیایی دانه ها دیکته می شوند. برای فهم بهتر این عوامل، آشنایی با انواع اساس سنگهای تشکیل دهندهٔ پوسته زمین، کانیهای تشکیل 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 ۰–۱ 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 ۰–۱ 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 ۱-۱ 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 ۱–۱ حدود پیشنهادی جداکننده اندازه دانه های خاک

	اندازه دانه ها (mm)			
نام سازمان	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.

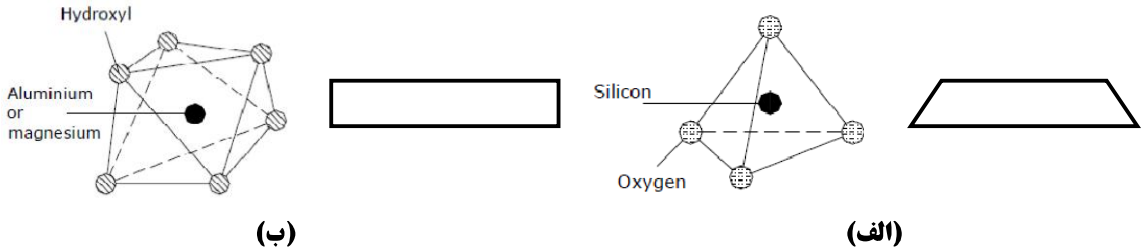
۱–۸ کانی های رسی

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 ۱-۲ واحد های تشکیل دهنده کانی های رسی و نماد آن ها و در شکل ۱-۳ طرز قرار گیری آن ها در کنار یکدیگر نشان داده شده است.

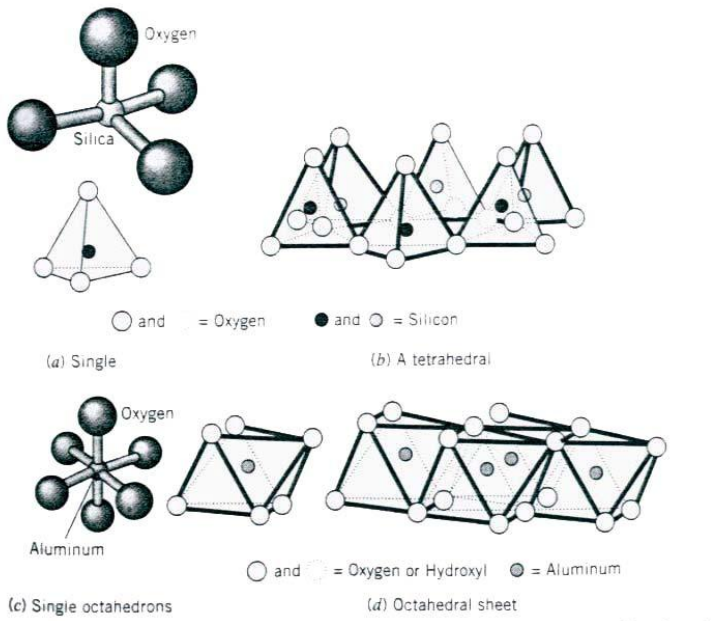
[1] Kaolinite
[2] Illite
[3] Montmorillonite

▪ کائولینیت:

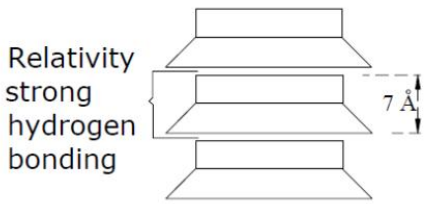
واحدهای ساختمانی این گروه ضخامتی در حدود $7\dot{A}$ ($\dot{A}$ =انگستروم = 1×10^{-10}m) دارند و متشکل از یک لایه چهاروجهی سیلیکا و یک لایه هشت وجهی آلومینا هستند. شمار زیادی از این لایه ها روی هم قرار می گیرند تا ذراتی به ضخامت $500\sim1000\dot{A}$ تشکیل دهند. نسبت قطر به ضخامت ۱۰ تا ۲۰ است. شکل ۱-۴ قرارگیری واحدهای سازنده را برای تشکل 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 ۱–۲ واحدهای تشکیل دهنده کانی های رسی (الف) چهاروجهی سیلیکا (ب) هشت وجهی آلومینا



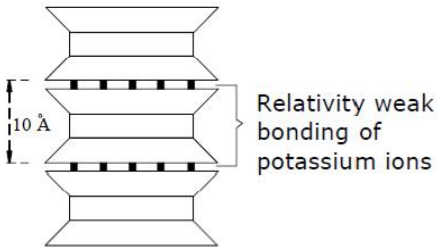
شکل ۱–۳ قرار گیری واحد های تشکیل دهنده کانی های رسی



شکل ۱–۴ نحوه پیوند واحدهای پایه کانی کائولینیت

- **ایلیت:**

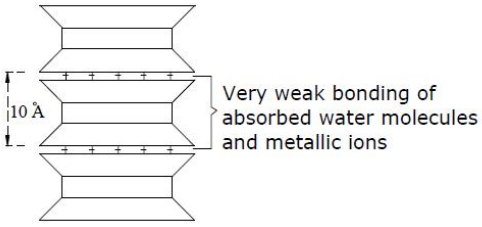
هر واحد ساختمانی ایلیت ضخامتی در حدود 10Å دارد که متشکل است از یک هشت وجهی آلومینا که بین دو لایه چهار وجهی سیلیکا قرار می گیرد. لایه های ایلیت به وسیلهٔ یون های پوتاسیوم به هم متصل هستند. هنگامی که آلومینیوم سه بار مثبت جایگزین سیلیکون چهار بار مثبت در واحد چهاروجهی می شود یک بار منفی خنثی نشده باقی 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 پیوند هیدروژنی در کائولینیت است. در نتیجه ذرات ایلیت ضخامتی حدود 200 ~ 300Å 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 ۱-۵ قرار گیری واحدهای سازنده را برای تشکیل ایلیت نشان می دهد.



شکل ۱–۵ نحوه پیوند واحدهای پایه کانی ایلیت

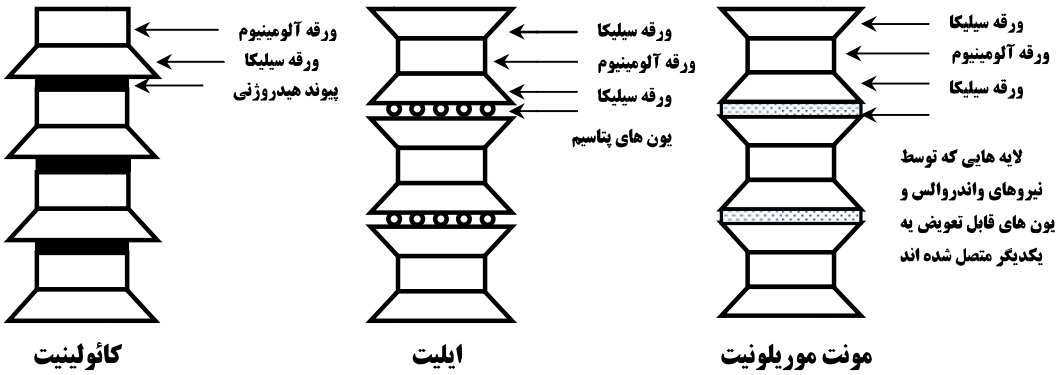
- **مونت موریلونیت**

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 ۱-۶ 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 ~ 30Å با نسبت قطر به ضخامت ۲۰۰ تا ۴۰۰ دارند. از جمله ویژگی های این گروه قدرت بالای جذب آب، انقباض و تورم است.



شکل ۱–۶ 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 ۱-۷ تصاویر ساختاری کانی های رسی در کنار یکدیگر نشان داده شده است.



شکل ۱–۷ مقایسه ساختاری کانی های رسی

سطح ویژه:

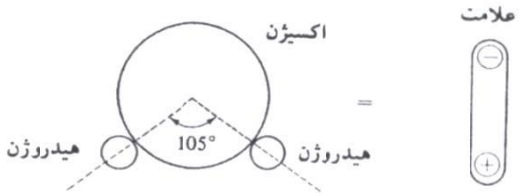
مقدار سطح جانبی کانی های رسی در واحد جرم، سطح ویژه نامیده می شود. از آنجائی که هرچه نسبت قطر به ضخامت پولک های رسی بیشتر باشد، سطح ویژه بیشتر خواهد شد، کائولینیت کمترین سطح ویژه و مونت موریلونیت بیشترین سطح ویژه را در میان کانی های رسی اصلی دارد. مقدار تقریبی مشخصات کانی های مهم رسی در جدول ۱–۲ ارائه شده است.

جدول ۱–۲ 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

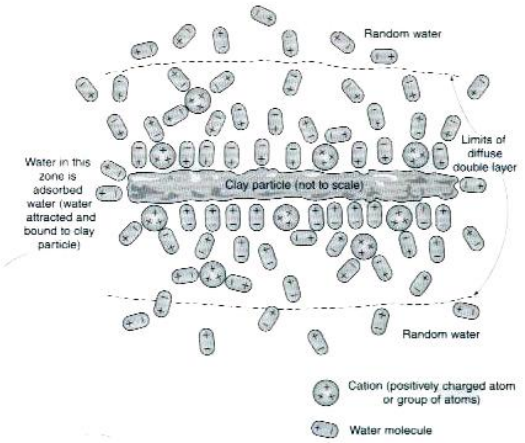
جذب آب:

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 ۱–۸) 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 ۱–۹ نحوه قرار گیری و جذب آب را در اطراف پولک های رسی نشان می دهد.

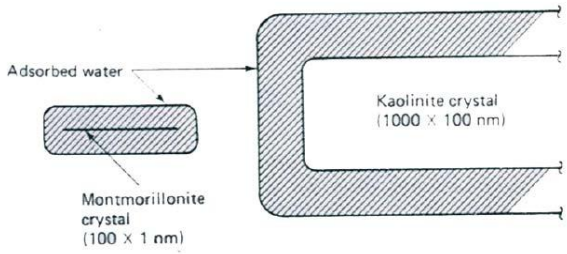


شکل ۱–۸ خاصیت دو قطبی مولکول آب

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 ۱-۱۰ که به صورت مقیاس نسبی ترسیم شده است. بیانگر همین مطلب است.



شکل ۱–۹ جذب آب در اطراف پولک رسی



شکل ۱–۱۰ 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 ۱-۳، 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 ۱–۳ چگالی دانه های کانی های مهم

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

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 ۱-۴ 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 ۱-۱۱ 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 ۱-۵ 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 ۱–۴ 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 ۱–۱۱ آزمایش دانه بندی مکانیکی با استفاده از سری الک

جدول ۱–۵ 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، γ_s = وزن مخصوص دانه های خاک ، γ_w = وزن مخصوص آب ، η = ویسکوزیته (لزجت) آب،

D = قطر دانه های خاک

بنابراین از رابطه ۱-۱ خواهیم داشت:

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

که در رابطه فوق

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

توجه شود که:

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

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

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

اگر واحد η بر حسب $(g \cdot sec)/cm^2$ و γ_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 η است که تابعی از درجه حرارت آزمایش هستند. در جدول ۱-۶ مقدار **K** برحسب درجه حرارت آزمایش و چگالی دانه های خاک ارائه شده است.

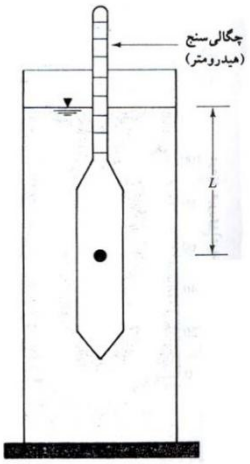
جدول ۱-۶ مقدار K در رابطه ۱-۶

حرارت درجه	G_s							
(°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

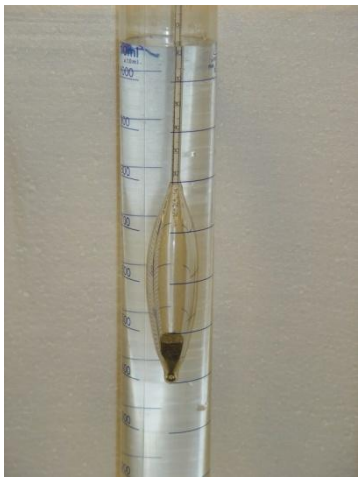
در آزمایشگاه، آزمایش هیدرومتری در یک استوانه ته نشینی با ۵۰ گرم نمونه خاک رد شده از الک ۰/۰۷۵ میلیمتر و خشک شده در کوره صورت می گیرد. ارتفاع استوانه ته نشینی ۱۸ اینچ و قطر آن ۲/۵ اینچ می باشد که برای حجم ۱۰۰۰ سیسی علامت گذاری شده است. معمولا از هگزامتافسفات سدیم به عنوان ماده ی پراکننده استفاده می شود. 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- ۱۳ 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 ۱–۱۴ تعریف طول موثر L در آزمایش هیدرومتری

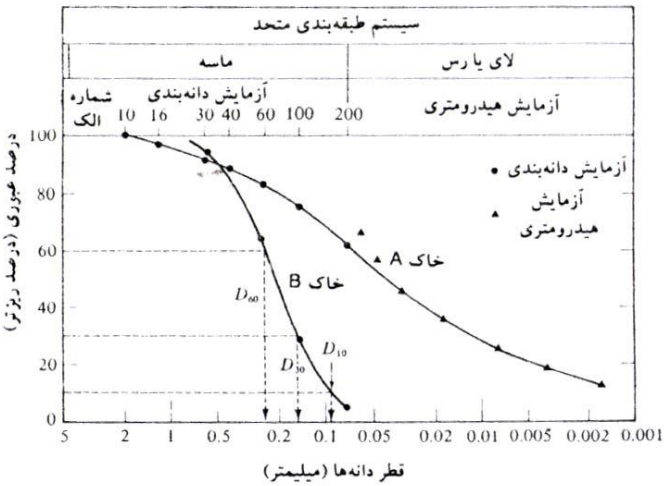


شکل ۱–۱۳ چگالی سنج (هیدرومتر) ASTM 152H

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 ۱–۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱–۱۵ منحنی دانه بندی

[1] Particle-size distribution curve

منحنی دانه بندی برای خاک A ترکیبی از نتایج آزمایش دانه بندی مندرج در جدول ۱-۶ 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:

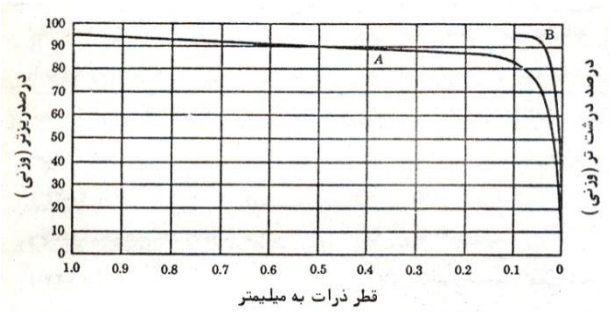
چرا محور افقی نمودار دانه بندی را لگاریتمی در نظر می گیریم؟

پاسخ:

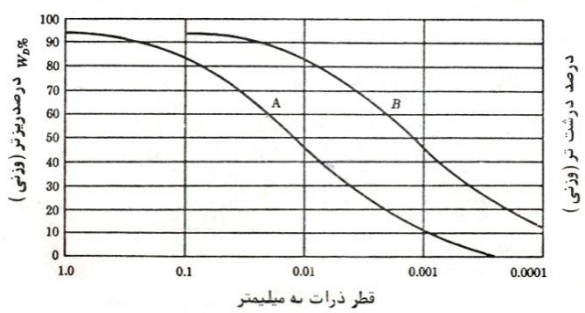
ترسیم منحنی دانه بندی روی سیستم مختصات نیمه لگاریتمی دارای مزایای زیر است:

۱. مقیاس در مورد ذرات خیلی 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 ۱-۱۶ 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 ۱-۱۶ و ۱-۱۷ 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 ۱-۱۷ 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 ۱-۱۶



شکل ۱-۱۷

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:

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

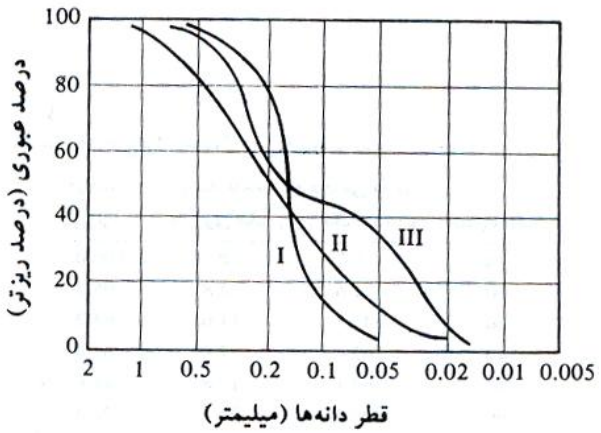
که در آن: C_c = ضریب دانه بندی و D_{30} = قطر مربوط به درصد عبوری ۳۰ درصد

برای منحنی دانه بندی خاک **B** در شکل ۱–۱۵، 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 دامنده اندازه دانه های موجود در خاک است، بلکه نوع توزیع اندازه های مختلف دانه ها را نشان می دهد. این موضوع در شکل ۱–۱۸ 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 ۱–۱۸ 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:

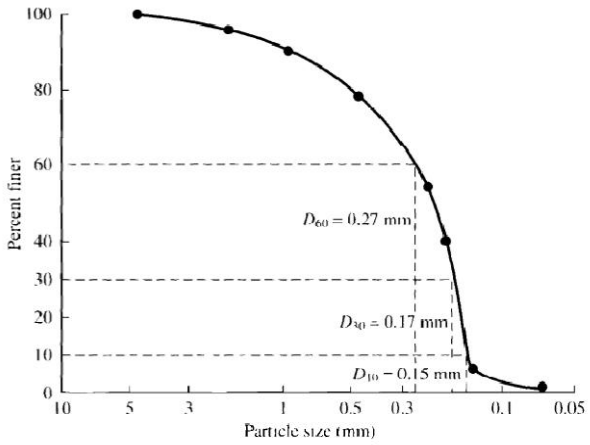
ابتدا جدول زیر را تهیه می نماییم. نمودار دانه بندی خاک فوق در صفحه بعد نشان داده شده است. با توجه به این نمودار دانه بندی داریم:

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

(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

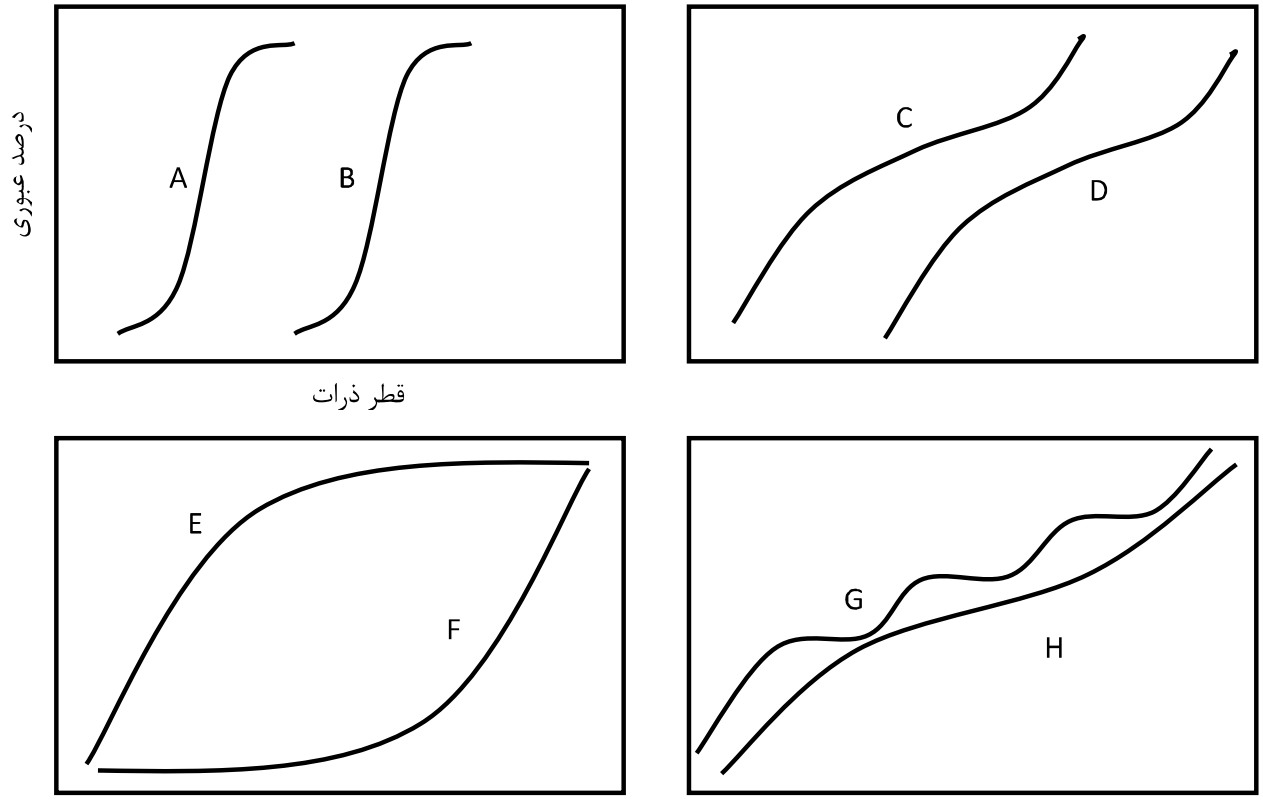
خاک D: خاک خوب دانه بندی شده که دارای ذرات متوسط و درشت دانه بوده و فاقد ریزدانه است

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.

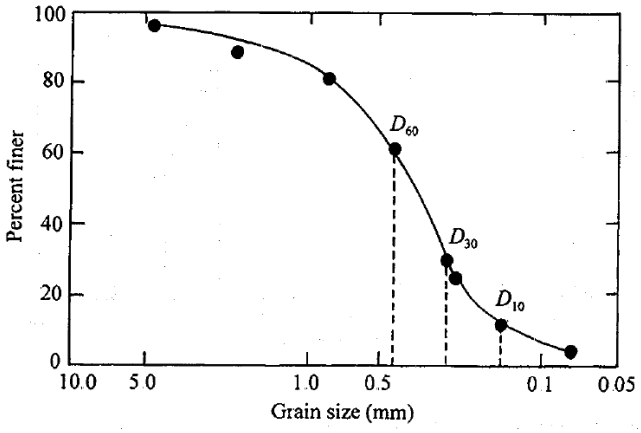
شماره الک	جرم مانده روی الک (گرم)
4	28
10	42
20	48
40	128
60	221
100	86
200	40
سینی	24

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.

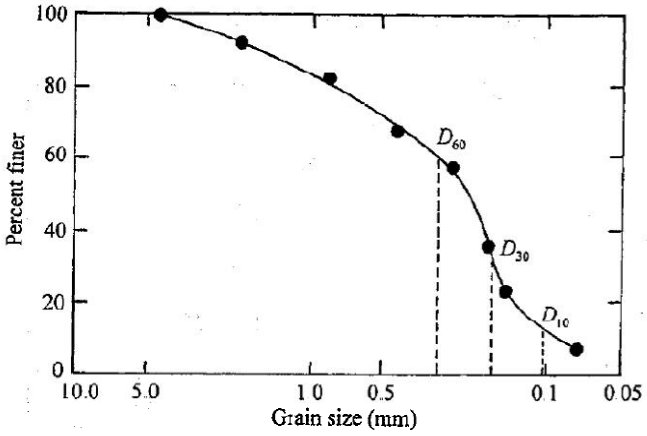
شماره الک	جرم مانده روی الک (گرم)
4	0
10	44
20	56
40	82
60	51
80	106
100	92
200	85
سینی	35

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.

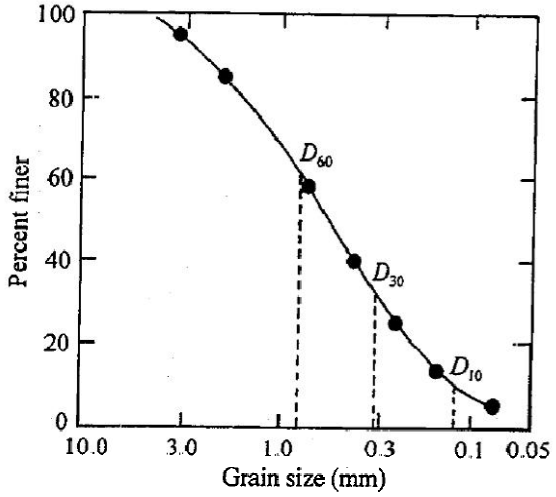
شماره الک	جرم مانده روی الک (گرم)
4	0
6	30.0
10	48.7
20	127.3
40	96.8
60	76.6
100	55.2
200	43.4
سینی	22.0

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.

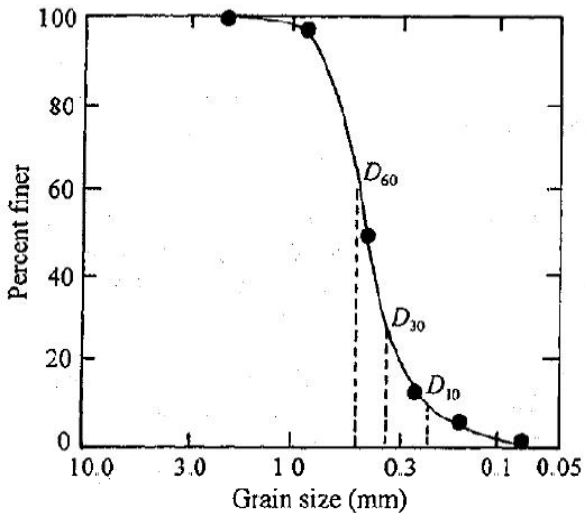
شماره الک	جرم مانده روی الک (گرم)
4	0
6	0
10	0
20	9.1
40	249.4
60	179.8
100	22.7
200	15.5
سینی	23.5

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
	Σ500g		

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° = 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° ، $k = 0.01282$ 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° = 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 :

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 تغییین 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:

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

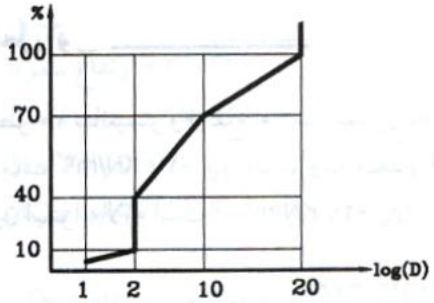
با استفاده از جدول ۱–۷ برای $G_s = 2.7$ و درجه حرارت ۲۲ درجه سانتیگراد، مقدار $K = 0.01312$ می باشد. بنابراین:

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

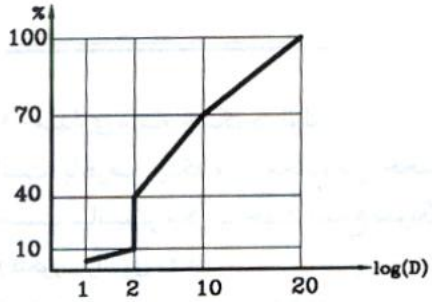
مثال ۱–۱۰

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)

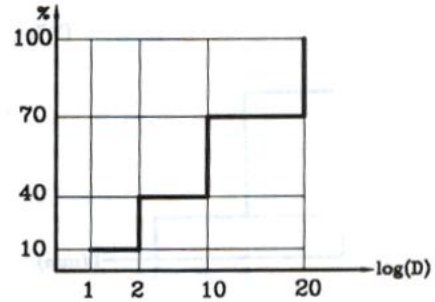
(۱)



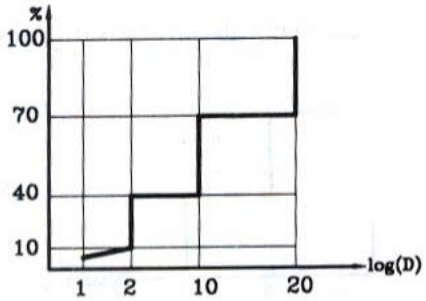
(۲)



(۳)



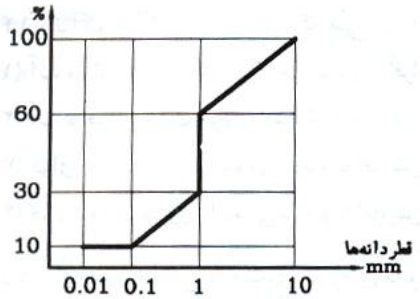
(۴)



پاسخ صحیح مسئله گزینه ۴ می باشد.

مثال ۱–۱۰

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 :

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) $16.8\,mm > D_{30} > 5.6\,mm$

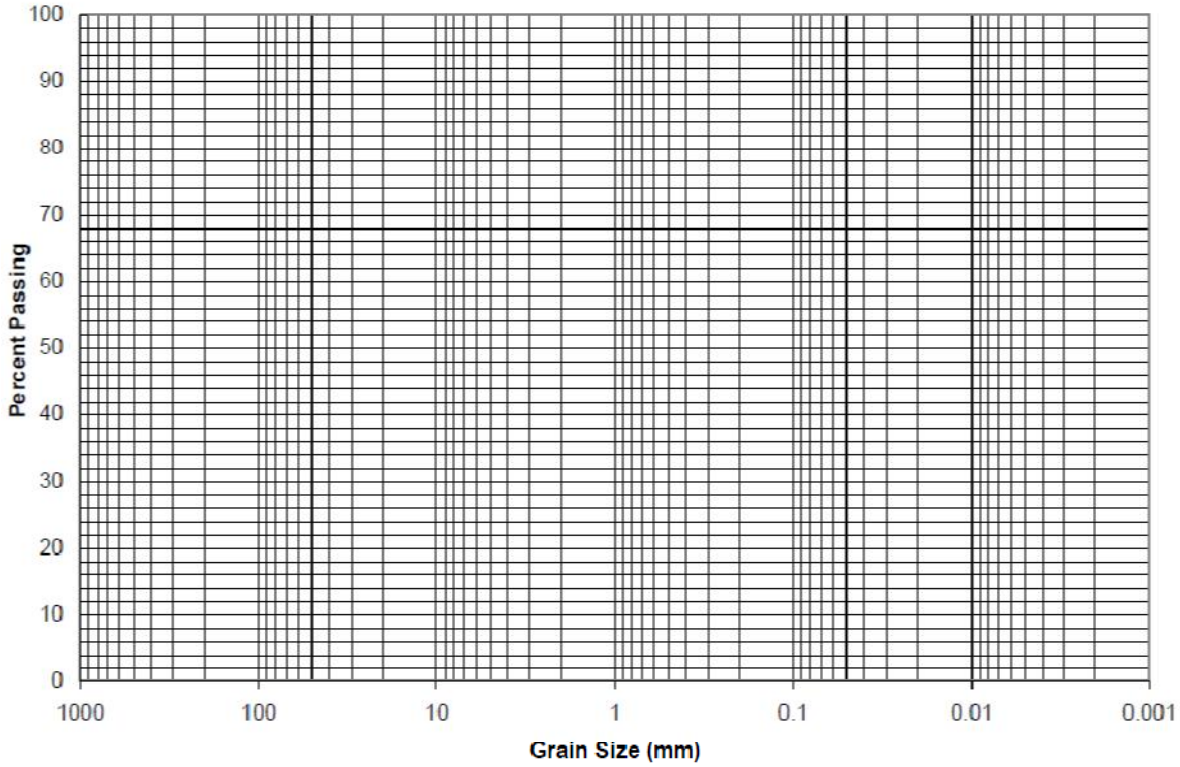
۴) $4.1\,mm > D_{30} > 2.4\,mm$

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 زیر 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 مکانیک خاک دکتر 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.

فصل ۲:

ترکیب خاک، حدود اتربرگ

جزوه درس مکانیک خاک ۲ و مکانیک خاک کارشناسی

استاد: عبدالمتین ستایش

برای ارسال نظرات و پیشنهادات به سایت شخصی اینجانب رجوع نموده و یا نظرات و یا پیشنهادات خود را به آدرس پست الکترونیک زیر ارسال نمایید:

Website: www.ams.ir Email: a_matin_s@yahoo.com

آخرین ویرایش: فروردین ۹۱ (ویرایش پنجم)

فهرست مطالب فصل دوم:

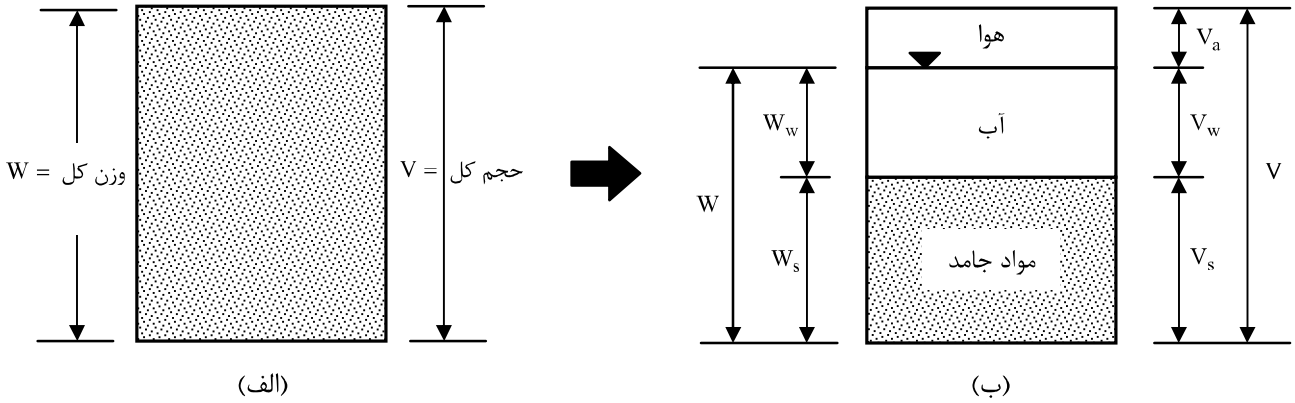
۲–۱	مقدمه
۲–۲	روابط وزنی – حجمی
۲–۳	روابط بین وزن مخصوص، نسبت تخلخل، درصد رطوبت و چگالی دانه ها
۲–۴	تراکم نسبی
۲–۵	سفتی (قوام) خاک
۲–۶	نشان مایع
۲–۷	فعالیت
۲–۸	نمودار خمیری
۲–۹	مسائل حل شده
۲–۱۰	منابع و مراجع

۲–۱ مقدمه

در وظعیت طبیعی، خاک یک سیستم سه قسمتی مرکب از مواد جامد، آب و هوا می باشد. در این فصل روابط وزنی – حجمی خاک را مورد بررسی قرار می دهیم.

۲–۲ روابط وزنی – حجمی

در شکل ۲-۱-الف یک توده خاک با حجم V و وزن W به همان صورتی که در طبیعت یافت می شود نشان داده شده است. برای حصول روابط وزنی–حجمی، سه قسمت خاک (یعنی مواد جامد، آب و هوا) مطابق شکل ۲-۱-ب از یکدیگر جدا می شوند. در نتیجه حجم کل نمونه خاک به صورت زیر قابل بیان است:



شکل ۲–۱ (الف) اجزای خاک در وضعیت طبیعی (ب) سه قسمت خاک

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

V_s = حجم قسمت جامد

V_v = حجم حفرات

V_w = حجم آب درون حفرات

V_a = حجم هوای درون حفرات

با صرف نظر کردن از وزن هوا، وزن کل نمونه را می توان به صورت زیر نوشت:

$$W = W_s + W_w$$

که در آن:

W_s = وزن قسمت جامد

W_w = وزن آب

روابط حجمی معمول در مکانیک خاک، عبارتند از نسبت تخلخل، پوکی و درجه اشباع.

نسبت تخلخل به صورت نسبت حجم حفرات به حجم قسمت جامد تعریف می شود:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

که در آن e نسبت تخلخل می باشد.

پوکی، نسبت حجم حفرات به حجم کل است:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

درجه اشباع به صورت نسبت حجم آب به حجم حفرات تعریف می شود:

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

که در آن S درجه اشباع است که معمولاً بر حسب درصد بیان می شود. رابطه بین نسبت تخلخل و پوکی را می توان از رابطه ۲-۱، ۲-۳ و ۲-۴ به صورت زیر بدست آورد:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{V_v / V}{1 - V_v / V} = \frac{n}{1-n}$$

و به طور معکوس، از رابطه ۲-۶ می توان نتیجه گرفت:

$$n = \frac{e}{1+e}$$

روابط وزنی معمول در مکانیک خاک عبارتند از: درصد رطوبت و وزن مخصوص. **درصد رطوبت** ω که میزان آب نیز گفته می شود به صورت نسبت آب به وزن قسمت جامد تعریف می شود:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

وزن مخصوص را می توان بر حسب وزن قسمت جامد، میزان رطوبت و حجم کل نوشت:

برای این کار از روابط ۲-۲، ۲-۸ و ۲-۹ می توان نوشت:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s\left[1 + W_w / W_s\right]}{V} = \frac{W_s(1+\omega)}{V}$$

مهندسین خاک اغلب به وزن مخصوص تعریف شده طبق رابطه ۲-۹ وزن مخصوص مرطوب می گویند. در مقابل، وزن مخصوص خشک خاک، γ_d به صورت زیر تعریف می شود:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

با استفاده از روابط ۲-۱۰ و ۲-۱۱، رابطه بین وزن مخصوص مرطوب و وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت به صورت زیر نوشته می شود:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$$

وزن مخصوص در دستگاه آحاد SI معمولاً بر حسب نیوتن بر متر مکعب (N/m^3) یا کیلونیوتن بر متر مکعب (kN/m^3) و در دستگاه MKS عملی بر حسب کیلوگرم نیرو بر متر مکعب (kgf/m^3) و یا تن بر متر مکعب (T/m^3) بیان می شود.

۲-۳ روابط بین وزن مخصوص، نسبت تخلخل، درصد رطوبت و چگالی دانه ها

برای اثبات روابط بین پارامترهای وزنی و حجمی خاک علاوه بر استفاده از روابط پایه، از دو رابطه مفید زیر استفاده می نماییم:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \times \gamma_w} \rightarrow W_s = v_s G_s \gamma_w$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \rightarrow W_w = \omega W_s = \omega V_s G_s \gamma_w$$

حال با استفاده از تعریف وزن مخصوص و جایگزینی دو رابطه کاربردی فوق می توان نوشت:

$$\boldsymbol{\gamma} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{V_s G_s \boldsymbol{\gamma}_w + \boldsymbol{\omega} V_s G_s \boldsymbol{\gamma}_w}{V_s + V_v}$$

با تقسیم صورت و مخرج رابطه فوق بر V_s نتیجه می شود:

$$\boldsymbol{\gamma} = \frac{\dfrac{V_s G_s \boldsymbol{\gamma}_w + \boldsymbol{\omega} V_s G_s \boldsymbol{\gamma}_w}{V_s}}{\dfrac{V_s + V_v}{V_s}} = \frac{G_s \boldsymbol{\gamma}_w + \boldsymbol{\omega} G_s \boldsymbol{\gamma}_w}{1 + \dfrac{V_v}{V_s}} = \frac{G_s \boldsymbol{\gamma}_w}{1+e}(1+\boldsymbol{\omega}) \rightarrow \boldsymbol{\gamma} = \frac{G_s \cdot \boldsymbol{\gamma}_w}{1+e}(1+\boldsymbol{\omega})$$

چنانچه رابطه وزن مخصوص خشک γ_d را برحسب روابطه پایه به صورت فوق بنویسیم نتیجه می شود:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{V_s G_s \gamma_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

با توجه با روابط فوق بار دیگر می توان نتیجه گرفت:

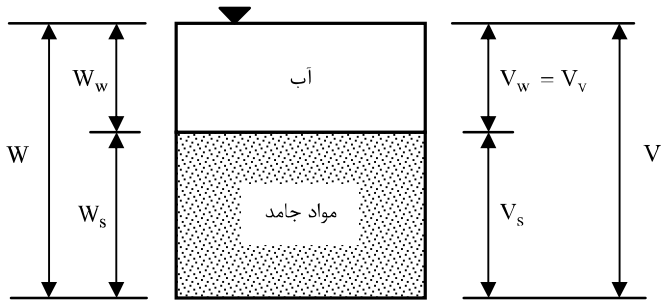
$$\gamma = \gamma_d (1+\omega)$$

برای تعریف درجه اشباع بر حسب درصد رطوبت، چگالی و نسبت تخلخل به صورت زیر عمل می نماییم:

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\dfrac{V_w}{V_s}}{\dfrac{V_v}{V_s}} = \frac{\dfrac{W_w}{\gamma_w V_s}}{e} = \frac{\dfrac{\omega V_s G_s \gamma_w}{\gamma_w V_s}}{e} = \frac{\omega G_s}{e} \qquad \text{یا} \qquad Se = \omega G_s$$

رابطه بدست آمده برای حل مسائلی که شامل روابط سه قسمتی می باشند بسیار مفید است.

اگر نمونه خاک اشباع باشد، بدین معنی که فضای حفرات کاملاً از آب پر باشد (شکل ۲-۳) روابط مربوط به وزن مخصوص اشباع می تواند به طریق مشابه بدست آید:



$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V_v + V_s} = \frac{\omega V_s G_s \gamma_w + V_s G_s \gamma_w}{V_v + V_s} = \frac{\omega G_s \gamma_w + G_s \gamma_w}{\dfrac{V_v}{V_s} + 1} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}(1+\omega)$$

$$S = 1 \rightarrow \omega = \frac{e}{G_s} \rightarrow \gamma_{sat} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}\left(1 + \frac{e}{G_s}\right) = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}\left(\frac{G_s + e}{G_s}\right) = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w$$

وزن مخصوص خاک در حالت مستغرق یعنی وقتی که نیروی ارشمیدس از پایین اثر می کند به صورت زیر تعریف می شود:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1+e}\gamma_w$$

به وزن مخصوص فوق، وزن مخصوص غوطه وری خاک اطلاق می شود.

نکته:

چنانچه بخواهیم وزن مخصوص خاک به ازاء درصد درجه اشباع مشخص را بدست آوریم به دو طریق می توانیم عمل نماییم:

۱- از رابطه $Se = \omega G_s$ درصد رطوبت معادل درجه اشباع مشخص را بدست آورد و سپس آنرا در رابطه وزن مخصوص خاک قرار دهیم.

۲- مستقیماً از رابطه زیر استفاده نماییم:

$$\gamma = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}(1+\omega) = \frac{G_s\gamma_w + \omega G_s\gamma_w}{1+e}$$

$$\omega G_s = Se \rightarrow \gamma_{(s\%)} = \frac{G_s + Se}{1+e}\gamma_w$$

مثال: در خاکی، پوکی 0.28 و چگالی دانه ها 2.65 می باشد. مطلوب است تعیین وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص در درجه اشباع 56%، وزن مخصوص اشباع و وزن مخصوص غوطه وری خاک.

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.28}{1-0.28} = 0.39$$

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{2.65 \times 9.81}{1+0.29} = 18.7\ kN/m^3$$

$$\gamma_{s=56\%} = \frac{G_s + Se}{1+e}\gamma_w = \frac{2.65 + 0.56 \times 0.39}{1+0.39} \times 9.81 = 20.24 kN/m^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.65 + 0.39}{1+0.39} \times 9.81 = 21.45\ kN/m^3$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 21.45 - 9.81 = 11.64\ kN/m^3$$

نکته:

بین وزن مخصوص اشباع و وزن مخصوص خشک رابطه زیر بر قرار است:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} + \frac{e}{1+e}\gamma_w \rightarrow \gamma_{sat} = \gamma_d + \frac{e}{1+e}\gamma_w = \gamma_d + n\gamma_w \quad \text{یا} \quad \gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$$

نکته:

اگر بدون تغییر در حجم خاک رطوبت آن را تغییر دهیم، تغییری در وزن مخصوص خشک خاک بوجود نخواهد آمد و خواهیم داشت:

$$\gamma_{d1} = \gamma_{d2} \rightarrow e_1 = e_2 \rightarrow \frac{\gamma_1}{1+\omega_1} = \frac{\gamma_2}{1+\omega_2}$$

به عبارت دیگر تغییر درصد رطوبت بدون تغییر حجم خاک باعث ثابت ماندن نسبت تخلخل خاک می شود.

مثال: وزن مخصوص طبیعی خاکی با رطوبت 20%، $21.6 kN/m^3$ است. اگر مقداری از رطوبت این خاک بدون کاهش حجم خاک تبخیر شود و وزن مخصوص آن به $20\ kN/m^3$ برسد، درصد رطوبت آن چقدر خواهد شد؟

$$\frac{21.6}{1+0.2} = \frac{20}{1+\omega} \rightarrow \omega = 0.1111 = 11.11\%$$

نکته :

اگر بخواهیم مقدار آبی را که باید به خاک اضافه شود تا آن را اشباع کند بدست آوریم باید وزن خاک در حالت اشباع را بدست آورده $(W_{sat} = \gamma_{sat} \times V)$ و سپس وزن موجود خاک را از آن کسر نماییم.

مثال :

در خاکی پوکی 0.39، چگالی دانه ها 2.67 و درصد رطوبت 0.15 است. مطلوب است وزن آبی که باید به $20m^3$ از آن خاک افزود تا 80% اشباع شود.

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.39}{1-0.39} = 0.64$$

$$\gamma = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}(1+\omega) = \frac{2.67 \times 9.81}{1+0.64}(1+0.15) = 18.37\ kN/m^3 \rightarrow W = \gamma \times V = 18.37 \times 20 = 367.4\ kN$$

$$\gamma_{s=80\%} = \frac{G_s + Se}{1+e}\gamma_w = \frac{2.67 + 0.8 \times 0.64}{1+0.64} \times 9.81 = 19\ kN/m^3 \rightarrow W_{s=80\%} = 19 \times 20 = 380\ kN$$

$$\Delta\omega = 380 - 367.4 = 12.6\ kN$$

مثال :

در وضعیت طبیعی یک خاک مرطوب دارای حجم $v = 9345cm^3$ و وزن 177.86N می باشد. وزن خشک شده در کوره خاک 153.82N است. مطلوب است محاسبه میزان رطوبت، وزن مخصوص مرطوب، وزن مخصوص خشک، نسبت تخلخل، پوکی و درجه اشباع. $\gamma_w = 9.81kN/m^3 = 1980kN/m^3$ و $G_s = 2.71$

حل مسئله:

با توجه به رابطه درصد رطوبت داریم:

$$\omega = \frac{177.86 - 153.82}{153.82} \times 100 = 15.6\%$$

از آنجائی که حجم مرطوب و خشک خاک و همچنین حجم کل خاک معلوم هستند وزن مخصوص مرطوب و خشک خاک به راحتی بدست می آید:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{117.86 \times 10^{-3}}{9345 \times 10^{-6}} = 19.03\ kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{153.82 \times 10^{-3}}{9345 \times 10^{-6}} = 16.46\ kN/m^3$$

با داشتن چگالی دانه های جامد و وزن مخصوص آب می توان حجم هر یک از فازهای خاک را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$W_s = V_s G_s \gamma_w \rightarrow V_s = \frac{153.82}{2.71 \times 9810} \times 10^6 = 5786\ cm^3$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{24}{9810} \times 10^6 = 2446\ cm^3$$

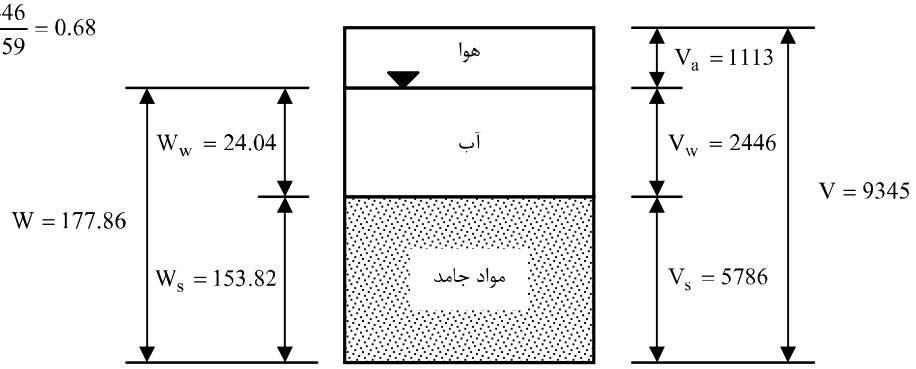
$$Va = V - V_w - V_s = 9345 - 5786 - 2446 = 1113\ cm^3$$

حال با استفاده از روابط پایه می توان تخلخل، پوکی و درجه اشباع را محاسبه نمود:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{2446 + 1113}{5786} = \frac{3559}{5786} = 0.615$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.615}{1+0.615} = 0.38$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{2446}{3559} = 0.68$$



مثال :

وزن مرطوب $0.00283\,m^3$ خاک $55.4N$ می باشد. اگر میزان رطوبت $\omega = 14\%$ و چگالی دانه ها $G_s = 2.72$ باشد، مطلوب است تعیین (الف) وزن مخصوص مرطوب (ب) وزن مخصوص خشک (پ) نسبت تخلخل (ت) توپی (ث) درجه اشباع و (ج) حجم اشغال شده توسط آب. $\gamma_w = 9.81\,kN/m^3$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{55.4\times10^{-3}}{0.00283} = 19.58\,kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{19.58}{1+0.12} = 17.48\,kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \rightarrow 17.48 = \frac{2.72\times9.81}{1+e} \rightarrow e = 0.526$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.526}{1+0.526} = 0.345$$

$$S = \frac{\omega G_s}{e} = \frac{0.12\times2.72}{0.526} = 0.621$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W-W_s}{W_s} \rightarrow 0.12 = \frac{55.4-W_s}{W_s} \rightarrow W_s = 49.494\,N \quad \text{یا} \quad W_s = \frac{W}{1+\omega} = \frac{55.4}{1+0.12} = 49.494\,N$$

$$W_w = W - W_s = 55.4 - 49.464\,N$$

$$V_w = \frac{5.936}{9810}\times10^6 = 605\,cm^3$$

مثال :

وزن مخصوص خشک خاکی با پوکی $n = 0.387$ مساوی $\gamma_d = 15.67\,kN/m^3$ می باشد. نسبت تخلخل و چگالی دانه های خاک را تعیین نمایید. $\gamma_w = 9.81\,kN/m^3$

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.387}{1-0.387} = 0.631$$

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \rightarrow 15.67 = \frac{G_s\times9.81}{1+0.631} \rightarrow G_s = 2.60$$

مثال :

نمونه ای از یک خاک رس اشباع با رطوبتی معادل $\omega = 56\%$ در دست است. چنانچه $G_s = 2.72$ باشد، مطلوب است تعیین مقادیر e ، n و γ_{sat}.

$$e = G_s \cdot \omega = 2.72 \times 0.56 = 1.52$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{1.52}{1+1.52} = 0.6$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.72+1.52}{1+1.52} \times 9.81 = 16.5\ kN/m^3$$

مثال :

نمونه ای از خاک رس مرطوب به حجم $50\,cm^3$ با استفاده از یک نمونه بردار فلزی استوانه ای شکل بدست آمده است. جرم نمونه برابر با 85gr در حالت مرطوب و 60gr در حالت خشک می باشد. مطلوب است محاسبه درصد رطوبت، نسبت تخلخل، درجه اشباع و وزن مخصوص خشک. $G_s = 2.7$

$$\omega = \frac{85-60}{60} = 0.4167$$

$$\gamma = \frac{85 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6}} = 16.67\ kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{16.67}{1+0.4167} = 11.767\ kN/m^3$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.7 \times 9.81}{11.767} - 1 = 1.25$$

$$S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.7 \times 0.4167}{1.25} \times 100 = 90\%$$

مثال :

خاکی با 12% درصد رطوبت، متراکم و وزن مخصوص آن به $21.5\,kN/m^3$ می رسد. اگر چگالی دانه ها $G_s = 2.65$ باشد، مطلوب است تعیین وزن مخصوص خشک، نسبت تخلخل و درجه اشباع خاک.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{21.5}{1+0.12} = 19.19\ kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \rightarrow 19.19 = \frac{2.65 \times 9.81}{1+e} \rightarrow e = 0.354$$

$$S \cdot e = G_s \cdot \omega \rightarrow S \times 0.354 = 2.65 \times 0.12 \rightarrow S = 0.9$$

مثال :

یک نمونه خاک اشباع با حجم $22cm^3$ و وزن 43gr موجود است. این نمونه پس از خشک شدن در کوره 8gr کاهش وزن از خود نشان می دهد. اگر حد انقباض برابر ۱۰ درصد باشد، مطلوب است:

(الف) حجم خاک در چه درصد رطوبتی به $21cm^3$ می رسد؟

(ب) برای هر دو حالت اشباع و خشک مطلوب است محاسبه $\gamma_d, \gamma_{sat}, G_s$.

جواب (الف):

پس از خشک شدن 8gr از وزن خاک کم می شود بنابراین می توان نتیجه گرفته که:

$$w_w = 8gr \rightarrow v_w = \frac{w_w}{\gamma_w} = \frac{8}{1} = 8cm^3 \rightarrow v_s = 22 - 8 = 14cm^3$$

$$w_s = 43 - 8 = 35gr$$

حد انقباض خاک ۱۰٪ است بنابراین می توان نتیجه گرفت:

$$SL = \omega = \frac{w_w}{w_s} = 0.1 \rightarrow w_w = 0.1 \times 35 = 3.5gr \rightarrow v_w = 3.5cm^3$$

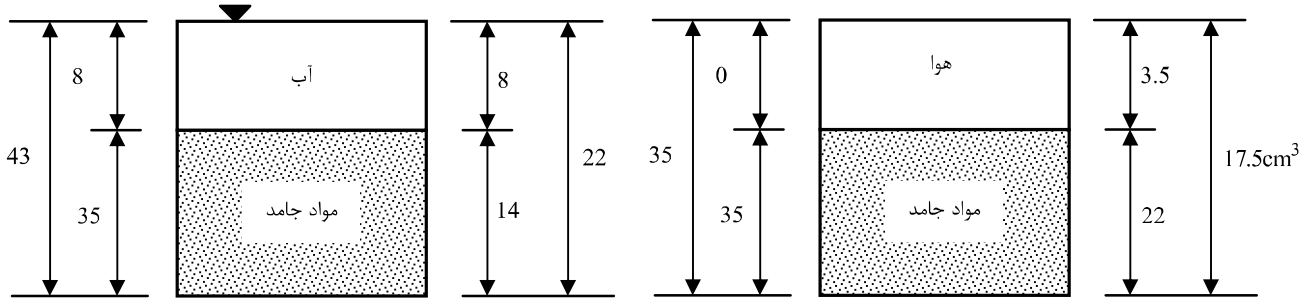
بنابراین نتیجه می گیریم که چناچه پس از خشک شدن خاک $35cm^3$ آب به آن اضافه کنیم اشباع می شود بدون اینکه حجم خاک تغییر کند. بدین ترتیب حجم خاک هنگامی که کاملاً خشک است برابر خواهد بود با:

$$v = v_s + v_w = 14 + 3.5 = 17.5cm^3$$

هنگامی که حجم خاک $21cm^3$ است حجم آن تغییر می کند به عبارت دیگر در این حالت خاک هنوز کاملاً اشباع است بنابراین:

$$v = 21cm^3 \rightarrow w_w = 8 - 1 = 7gr \rightarrow \omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{7}{35} = 0.2 = 20\%$$

تغییر فاز خاک در شکل های زیر نشان داده شده است.



جواب (ب): با توجه به شکل های فوق داریم:

پارامتر	V	v_s	W	w_s	w_w	G_s	γ_{sat}	γ_d
در حالت اشباع	۲۲	۱۴	۴۳	۳۵	۸	۲/۵	۱/۹۵	۱/۵۹
در حالت خشک	۱۷/۵	۱۴	۳۵	۳۵	۰	۲/۵	۲/۲	۲

مثال :

در داخل ظرفی مکعب شکل به ابعاد یک متر را از گلوله های کروی از جنس شیشه تا حد امکان پر کرده ایم. اگر وزن مخصوص شیشه ۲/۵ تن بر متر مکعب باشد مطلوبست:

(الف) تعیین تخلخل و وزن مخصوص مجموعه گلوله های موجود در داخل ظرف.

(ب) اگر ۱۰۰ لیتر آب داخل این ظرف بریزیم وزن مخصوص مرطوب کل گلوله ها در این حالت چقدر خواهد شد؟ و همچنین میزان آب لازم جهت اشباع شدگی کامل گلوله ها و وزن مخصوص اشباع و شناور مجموعه گلوله ها را در این حالت حساب کنید.

جواب:

با توجه به قانون گلوله ها در متراکم ترین حالت نسبت تخلخل برابر خواهد بود با ۰/۳۵ بنابراین:

$$G_s = 2.5t/m^3 \rightarrow \gamma = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.5+0.35}{1+0.35}\times 1 = 2.111t/m^3$$

$$\gamma = \gamma_d = \frac{w_s}{V} \rightarrow w_s = \gamma \times V = 2.111\times 1 = 2.111ton$$

$$V_s = \frac{w_s}{G_s\gamma_s} = \frac{2.111}{2.5\times 1} = 0.844m^3 \rightarrow V_v = V - V_s = 1 - 0.844 = 0.1556m^3$$

$$\omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{100kg}{2111kg}\times 100 = 4.73\%$$

$$\gamma = \gamma_d(1+\omega) = 2.111\times 1.0473 = 2.21ton/m^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{2.111 + 0.1556\times 1}{1} = 2.266ton/m^3$$

میزان آب لازم جهت اشباع نمودن نمونه برابر است با:

$$w = 0.1556 - 0.1 = 0.0556$$

یا به روش دیگر:

$$w = \gamma_{sat} - \gamma = 2.266 - 2.21 = 0.056ton = 56kg$$

۲–۴ تراکم نسبی

تراکم نسبی معمولاً برای نشان دادن میزان تراکم یا سستی خاک های دانه ای در محل، مورد استفاده قرار می گیرد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

D_r = تراکم نسبی که معملاً به صورت درصدی بیان می شود

e = نسبت تخلخل در محل

e_{max} = نسبت تخلخل خاک در شل ترین وضعیت

e_{min} = نسبت تخلخل خاک در متراکم ترین وضعیت

دامنه تغییرات D_r از ۰ برای خاک های شل تا حداکثر ۱ برای خاک های خیلی متراکم می باشد. با توجه به تراکم نسبی، خاک های دانه ای مطابق جدول ۲-۱ توصیف می شوند. در جدول ۲-۲ نیز برای بعضی خاک ها در حالت طبیعی، مقادیر نمونه برای نسبت تخلخل، میزان رطوبت در شرایط اشباع و وزن مخصوص خشک ارائه شده است.

جدول ۲–۱ توصیف خاک های دانه ای بر حسب تراکم نسبی

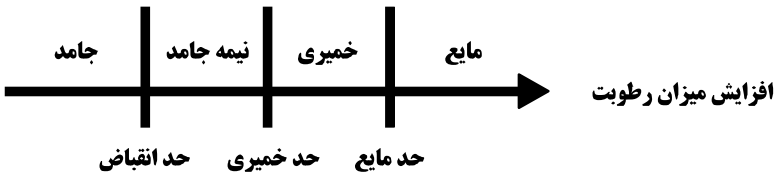
توصیف خاک های دانه ای	تراکم نسبی (درصد)
خیلی شل	0 – 15
شل	15 – 50
متوسط	50 – 70
متراکم	70 – 85
خیلی متراکم	85 - 100

جدول ۲–۲ مقادیر نمونه برای نسبت تخلخل، میزان رطوبت در شرایط اشباع و وزن مخصوص خشک

نوع خاک	نسبت تخلخل e	میزان رطوبت طبیعی در وضعیت اشباع (%)	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)
ماسه شل یکنواخت	0.8	30	14.5
ماسه شل متراکم	0.45	16	18
ماسه لای دار شل با دانه های تیزگوشه	0.65	25	16
ماسه لای دار متراکم با دانه های تیزگوشه	0.4	15	19
رس سفت	0.6	21	17
رس نرم	0.9-1.4	30 – 50	11.5-14.5
ماسه بادی	0.9	25	13.5
رس آبی نرم	2.5-3.2	90 - 120	6-8
تیل یخرفت	0.3	90 - 120	21

۲–۵ سفتی (قوام) خاک

وقتی در خاکهای ریزدانه، کانی های رسی ظاهر شود، با مرطوب کردن، خاک حالت خمیری به خود می گیرد و آن را می توان بدون خرد شدن شکل داد. این خاصیت چسبندگی به علت آب جذب شده ای است که ذرات رس را احاطه کرده است. در اوایل دهه ۱۹۰۰، دانشمند سوئدی، اتربرگ روشی برای توصیف سفتی خاک های ریزدانه بر حسب میزان رطوبت ابداع نمود. در میزان رطوبت خیلی کم، خاک مثل یک جسم جامد عمل می کند. در طوبت خیلی بالا، مخلوط آب و خاک می تواند به صورت یک مایع جاری شود. به طور کلی همانند شکل ۲-۲ بر حسب میزان رطوبت، طبیعت رفتار خاک به یکی از چهار حالت جامد، نیمه جامد، خمیری و مایع خواهد بود.



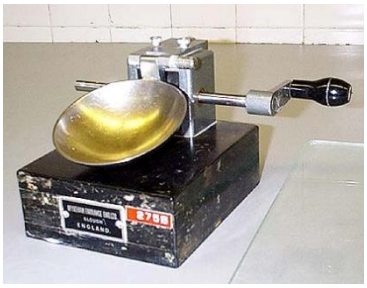
شکل ۲–۲ حدود اتربرگ

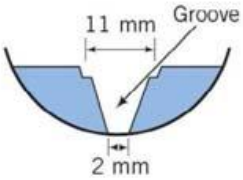
میزان رطوبت (برحسب درصد) در نقطه انتقال از جامد به نیمه جامد، حد انقباض و در نقطه انتقال از نیمه جامد به خمیری، حدی خمیری و از خمیری به مایع، حد مایع یا حد روانی نامیده می شود. حدود نامبرده به حدود اتربرگ معروف هستند.

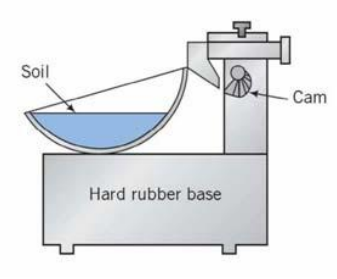
حد مایع (حد روانی)

در شکل ۲-۳ نمای جانبی وسیله اندازه گیری حد مایع نشان داده شده است. این وسیله شامل یک فنجان برنجی و یک پایه لاستیکی سخت می باشد. با پیچاندن دسته ای، فنجان از روی پایه قدری بلند شده و به طور ناگهانی روی آن می افتد.

برای انجام آزمایش تعیین حد روانی خمیر خاک در فنجان قرار داده شده و با استفاده از شیارزن استاندارد شیاری در وسط نمونه خمیری خاک ایجاد می شود. سپس با پیچاندن دسته دستگاه، فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰ میلیمتری بر آن می افتد. درصد رطوبتی که به ازای آن به علت ۲۵ ضربهٔ فنجان، شیار ایجاد شده در نمونهٔ داخل فنجان، بسته می شود حد روانی خوانده می شود.







(پ) **(ب)** **(الف)**

شکل ۲–۳ آزمایش حد روانی (الف) نمای جانبی دستگاه تعیین حد روانی (ب) شیار زن (پ) دستگاه تعیین حد روانی

تنظیم رطوبت به طوری که دقیقاً به علت ۲۵ ضربه، عرض شیار بسته شود مشکل است. بنابراین حداقل چهار آزمایش برای خاک مورد مطالعه با رطوبت های مختلف انجام شده و تعداد ضربات لازم برای بستن شیار اندازه گیری می شود. میزان رطوبت باید طوری باشد که تعداد ضربات **N** بین ۱۵ تا ۳۵ قرار گیرد. سپس مطابق شکل ۲-۴، میزان رطوبت بر حسب درصد در مقابل تعداد ضربات **N** در روی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم می شود. رابطهٔ بین میزان رطوبت و **Log N** تقریباً به صورت خط مستقیم است و به نمودار آن، **نمودار جریان** می گویند. با داشتن نمودار می توان درصد رطوبت نظیر **N=25** را که همان حد روانی می باشد را بدست آورد. شیب خط جریان، **نشانه جریان** نامیده شده و به صورت زیر بیان می شود:

$$I_F = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\mathrm{Log}\left(\frac{N_2}{N_1}\right)} \qquad (۲-۲)$$

$I_F =$ نشانه جریان

$\omega_1 =$ میزان رطوبت (بر حسب درصد) نظیر تعداد ضربات N_1

$\omega_2 =$ میزان رطوبت (بر حسب درصد) نظیر تعداد ضربات N_2

بنابراین رابطه منحنی جریان در شکل کلی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\omega = -I_F \log N + c \qquad (۳-۲)$$

رابطه تجربی برای تعیین حد مایع به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$LL = \omega_N \left(\frac{N}{25}\right)^{\tan\beta} \qquad (۴-۲)$$

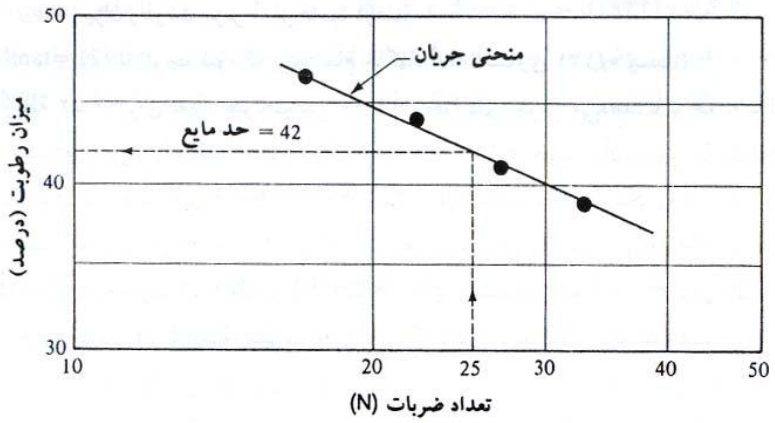
که در آن:

$N =$ تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار استاندارد در وسیله تعیین حد مایع

$\omega_N =$ میزان رطوبت مربوطه بر حسب درصد

$\tan\beta = 0.121$ (توجه شود که برای تمام خاک ها، $\tan\beta$ مساوی ۰/۱۲۱ نیست)

رابطه ۲-۴ برای تعداد ضربات بین ۲۰ تا ۳۰ جواب های خوبی می دهد. با توجه به اینکه در هنگام استفاده از این رابطه فقط احتیاج به یک نقطه است، از این جهت به آن، **روش یک نقطه ای** گفته می شود. علت اینکه روش یک نقطه ای نتایج مناسب به دست می دهد این است که در دامنه تغییرات رطوبت برای $N = 20$ تا $N = 30$ کوچک است. در جدول ۲-۳ مقادیر $(N/25)^{0.121}$ برای استفاده در رابطه ۲-۴ برای $N = 20$ تا $N = 30$ و در جدول ۲-۴ دامنه تغییرات حدود اتربرگ برای کانی های رسی ارائه شده است.



شکل ۲–۴ منحنی جریان برای تعیین حد مایع

جدول ۲–۳ مقدار $(N/25)^{0.121}$

N	$(N/25)^{0.121}$	N	$(N/25)^{0.121}$
20	0.973	26	1.005
21	0.979	27	1.009
22	0.985	28	1.014
23	0.990	29	1.018
24	0.995	30	1.022
25	1.000		

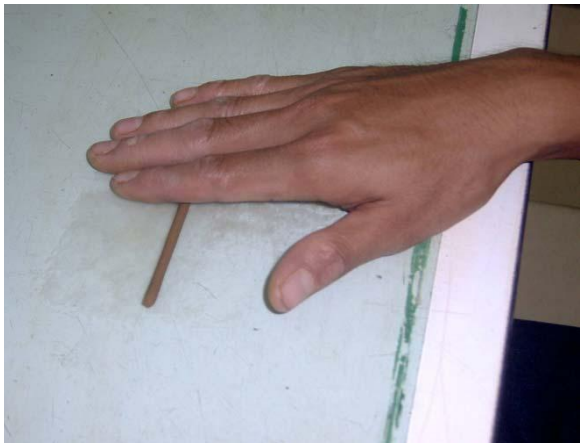
جدول ۲–۴ حدود اتربرگ برای کانی های رس

کانی		حد روانی	حد خمیری	حد انقباض
Montmorillonite	مونت موریلونیت	100-900	50-100	8.5-15
Nontronite	مونتورنیت	37-72	19-27	
Illite	ایلیت	60-120	35-60	15-17
Kaolinite	کائولینیت	30-110	25-40	25-29
Hydrated Halloysite	هالوزیت هیدراته	50-70	47-60	
Dehydrated halloysite	هالوزیت	35-55	30-45	
Attapulgite	آتاپولگیت	160-230	100-120	
Chlorite	کلریت	44-47	36-40	
Allophane	الوفین	200-250	130-140	

کاساگرانده (۱۹۳۲) چنین نتیجه گیری کرد که هر ضربه در وسیله استاندارد تعیین حد مایع متناظر با مقاومت برشی خاک در حدود **0.1 kN/m²** می باشد. بنابراین حد مایع برای خاک های ریزدانه، میزان رطوبتی را به دست می دهد که مقاومت برشی به ازای آن تقریباً مساوی **2.5 kN/m²** است

حد خمیری (PL)

حد خمیری میزان رطوبتی (بر حسب درصد) است که به ازای آن اگر فتیله ای به قطر ۳/۲ میلیمتر از خمیر خاک نمونه (با روش غلتاندن) ساخته شود، خرد گردد. حد خمیری پایین ترین میزان رطوبت مربوط به حالت خمیری خاک است. روش آزمایش ساده است و مطابق شکل ۲–۵–ب با غلتاندن تکه ای از خمیر خاک بر روی یک صفحهٔ شیشه ای به وسیله دست صورت گیرد.



(الف) **(ب)**

شکل ۲–۵ آزمایش تعیین حد خمیری (الف) وسایل مورد نیاز آزمایش (ب) روش غلتاندن نمونه

توجه: هرچه در خاکی ریزدانه هان آن جاذب آب بیشتری باشند، خاک چسبنده تر خواهد بود و این چسبندگی بیشتر سبب می شود تا اولاً حد روانی افزایش یابد چراکه خاک چسبنده دیرتر روان شده و برای روان شدن به رطوبت بیشتری نیاز دارد، ثانیاً سبب می شود حد خمیری کاهش پیدا کند زیرا خاک چسبنده استعداد خمیری شدن بیشتری را دارد و زودتر و با رطوبت کمتری به حالت خمیری در می آید.
بنابراین می توان نتیجه گرفت که هرچه فاصله بین حد خمیری و حد روانی بیشتر باشد، خاک چسبنده تر و خمیری تر خواهد بود. لذا این فاصله را نشانه خمیری می نامند.

نشانه خمیری **(PI)** اختلاف بین حد مایع و حد خمیری خاک می باشد:

$$PI = LL - PL \qquad (۵-۲)$$

حد انقباض (SL)

با از دست دادن رطوبت، خاک منقبض می شود (حجم آن کم می گردد). با کاهش پیوسته رطوبت، مرحله ای می رسد که از آن به بعد، کاهش رطوبت دیگر سبب کاهش حجم نمی شود. میزان رطوبت، بر حسب درصد که در آن کاهش حجم خاک متوقف می گردد، حد انقباض نامیده می شود.

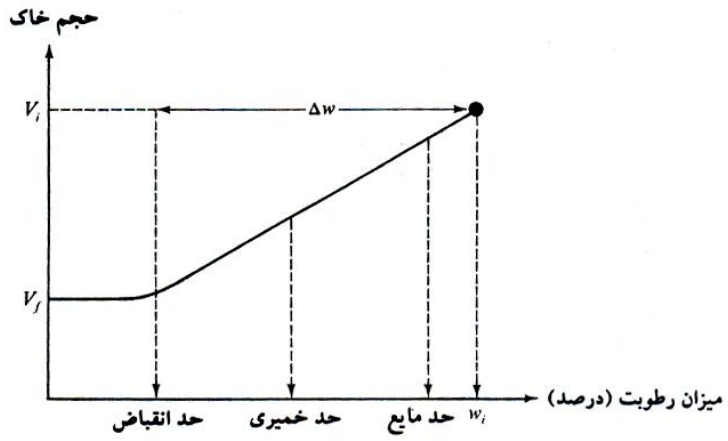
آزمایش حد انقباض **(ASTM D427)** در آزمایشگاه درون یک ظرف چینی به قطر ۱/۷۵ اینچ (۴۴/۴ میلیمتر) و عمق ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلیمتر) انجام می شود. داخل ظرف توسط یک روغن مخصوص چرب شده و سپس با خاک مرطوب کاملاً پر می شود. با یک وسیله لب تیز، سطح نمونه هم تراز با لبه های ظرف، صاف می شود. جرم خاک داخل ظرف یادداشت شده و سپس توسط کوره خشک می شود. پس از در آوردن از کوره، کاهش حجم خاک با ریختن جیوه اندازه گیری می گردد. با مراجعه به شکل ۲-۶، حد انقباض را می توان به روش زیر محاسبه نمود:

$$SL = \omega_i(\%) - \Delta\omega(\%) \qquad (۶-۲)$$

که در آن:

ω_i = میزان رطوبت اولیه خاک وقتی که خاک درون ظرف آزمایش قرار داده می شود.

$\Delta\omega$ = تغییر در میزان رطوبت (اختلاف بین میزان رطوبت اولیه و میزان رطوبت در حد انقباض) مقادیر مذکور با استفاده از روابط زیر محاسبه می شوند:



شکل ۲–۶ تعریف حد انقباض

$$\omega_i(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \qquad (۷-۲)$$

که در آن:

m_1 = جرم خاک مرطوب در ظرف در شروع آزمایش (گرم)

m_2 = جرم خاک خشک در ظرف (به شکل ۲-۷ مراجعه شود) (گرم)

همچنین

$$\Delta\omega(\%) = \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2} \times 100 \qquad (۸-۲)$$

که در آن:

V_i = حجم اولیه خاک مرطوب (که همان حجم داخلی ظرف است cm^3)

V_f = حجم خاک خشک شده در کوره (cm^3)

ρ_ω = جرم مخصوص آب (g/cm^3)

حال با ترکیب روابط ۲-۶، ۲-۷ و ۲-۸ خواهیم داشت:

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2}\right)(100) - \left[\frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2}\right](100) \qquad (۹-۲)$$

(الف) قبل از خشک شدن **(ب) بعد از خشک شدن**

شکل ۲–۷ آزمایش حد انقباض

مثال :

در یک آزمایش حد روانی و حد خمیری نتایج زیر حاصل شده است:

آزمایش حد خمیری

میزان رطوبت $= 18.7\%$

آزمایش حد روانی

تعداد ضربات N	میزان رطوبت (٪)
15	42
20	40.8
28	39.1

(الف) منحنی جریان را برای داده های حد مایع رسم نموده و حد مایع را تعیین نمایید.

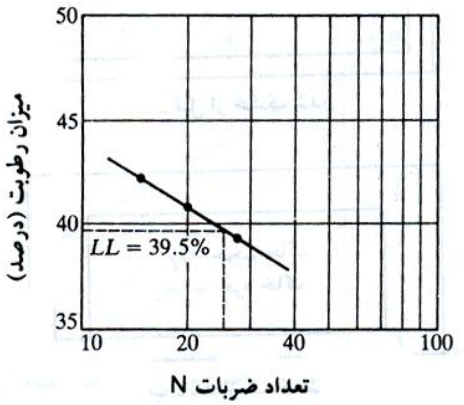
(ب) اندیس خمیری خاک چقدر است؟

(الف) در شکل ۲-۸ نمودار میزان رطوبت ω در مقابل تعداد ضربات N (در مقیاس لگاریتمی) نشان داده شده است. برای $N = 25$ به دست می آید:

$$\omega = 39.5\% = LL$$

(ب) با استفاده از رابطه ۲-۴۳ می توان نوشت:

$$PI = LL - PL = 39.5 - 18.7 = 208$$



شکل ۲-۸ نمودار میزان رطوبت در مقابل تعداد ضربات

مثال :

در یک آزمایش حد انقباض نتایج زیر به دست آمده است:

$$m_1 = 44.6g \qquad m_2 = 32.8g \qquad V_i = 16.2cm^3 \qquad V_f = 10.8cm^3$$

حد انقباض را محاسبه کنید.

از رابطه ۲-۴۷

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2}\right)(100) - \left[\frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2}\right](100)$$

با قرار دادن مقادیر اندازه گیری شده در رابطه فوق به دست می آید:

$$SL = \left(\frac{44.6 - 32.8}{32.8}\right)100 - \left[\frac{(16.2 - 10.8)\times 1}{32.8}\right]100 = 35.97 - 16.46 = 19.5$$

۲-۶ نشانه مایع

سفتی نسبی یک خاک چسبنده در وضعیت طبیعی را می توان توسط نسبتی که نشانه مایع **(LI)** نامیده می شود بیان نمود:

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} \qquad (۱۰-۲)$$

که در آن ω میزان رطوبت درجای خاک می باشد.

میزان رطوبت درجای یک نهشته خاکی تحکیم نیافته می تواند بزرگتر از حد مایع باشد. در این حالت:

$$LL > 1$$

در صورت بهم خوردگی، چنین خاک هایی می توانند به شکل یک مایع غلیظ روان شوند (آبگونگی).

در نهشته های خاک پیش تحکیم یافته، میزان رطوبت طبیعی می تواند کمتر از حد خمیری گردد. در این حالت:

$$LI < 1$$

نشانهٔ مایع چنین خاک هایی می تواند نزدیک به صفر یا منفی گردد.

مثال :

اگر میزان رطوبت درجای مثال قبل مساوی ۲۲ درصد باشد، نشانه مایع آن چقدر است؟ حدس شما در خصوص وضعیت طبیعی خاک چیست؟

از رابطه ۲-۴۸ می توان نوشت:

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} = \frac{22 - 18.7}{39.5 - 18.7} = 0.16$$

چون میزان رطوبت ω بزرگتر از **PL** و کمتر از **LL** است، خاک به مقدار زیادی پیش تحکیم یافته است.

۲-۷ فعالیت

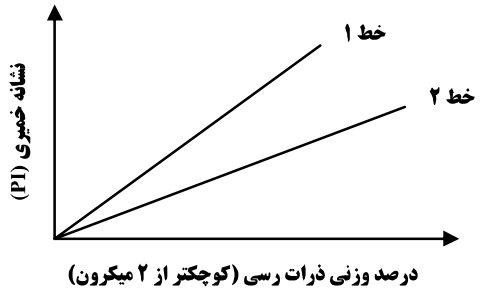
از آنجایی که خواص خمیری خاک به علت آب جذب سطحی است که ذرات رس را احاطه می کند، می توان انتظار داشت که نوع کانی رس و درصد آن در یک خاک، در روی حدهای مایع (روانی) و خمیری تاثیر بگذارد. اسکمتون (۱۹۵۳) مشاهده کرد که نشانه خمیری یک خاک به طور کلی با درصد ذرات رسی (درصد وزنی کوچکتر از ۲ میکرون) افزایش پیدا می کند. در شکل ۲-۹ این رابطه به صورت ترسیمی نشان داده شده است. خطوط متوسط تمام خاک ها از مرکز مختصات می گذرد.

روابط بین نشانه خمیری و درصد ذرات رسی برای خاک های رسی مختلف، خطوط مختلفی به دست می دهد که ناشی از نوع کانی رس موجود در آن خاک می باشد. بر پایه نتایج، اسکمتون کمیتی به نام **فعالیت** تعریف نمود که همان شیب نمودار خطی **PI** در مقابل درصد ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون است. فعالیت را می توان طبق رابطه زیر نشان داد:

$$A = \frac{PI}{\text{(درصد وزنی ذرات با اندازه رسی)}} \qquad (۲-۱۱)$$

که در آن **A** فعالیت خاک می باشد.

فعالیت به عنوان نشانه ای برای شناسایی پتانسیل تورم خاک های رسی است. در جدول ۲-۶ مقادیر فعالیت برای انواع کانی های رسی ارائه شده است.



شکل ۲-۹ رابطه بین نشانهٔ خمیری و درصد وزنی ذرات رسی

جدول ۲-۶ فعالیت کانی های رس

کانی		فعالیت
Smectites	اسمکتایت	۱ تا ۷
Illite	ایلیت	۰/۵ تا ۱
Kaolinite	کائولینیت	۰/۵
Halloysite	هالوزیت $(2H_2O)$	۰/۵
Halloysite	هالوزیت $(4H_2O)$	۰/۱
Attapulgite	آتاپولژیت	۰/۵ تا ۱/۲
Allophane	آلوفین	۰/۵ تا ۱/۲

مثال :

در آزمایش بر روی یک خاک رس با دامنه خمیری ۲۸، درصد وزنی ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر، برابر ۱۶ درصد بدست آمده است. این خاک رس احتمالاً دارای کانی از نوع ..... می باشد. (کنکور سراسری ۸۶)

۱) ایلیت

۲) کائولینیت

۳) مونت موریلونیت

۴) هالوزیت

جواب: گزینه «۳»

برای بررسی اینکه بخش رس یک خاک چسبیده تا چه درجه خاصیت خمیری دارد از شاخصی بنام اکتیویته (فعالیت)، **A** استفاده می شود:

$$A = \frac{PI}{\text{(درصد وزنی ذرات به اندازه رسی)}}$$

هر چه رس فعال تر (اکتیوتر) باشد تغییر حجم آن بر اثر رطوبت بیشتر است عدد اکتیویته برای بعضی کانیهای به شرح زیر است:

کانی رس	مسکویت	کائولینت	ایلیت	مونت موریلونیت
اکتیویته	۰/۲۵	۰/۴	۰/۹	> ۱/۲۵

برای مسأله حاضر چون $A = 28/16 = 1.75$ است پس احتمالاً کانی از نوع مونت موریلونیت است.

۲-۸ نمودار خمیری

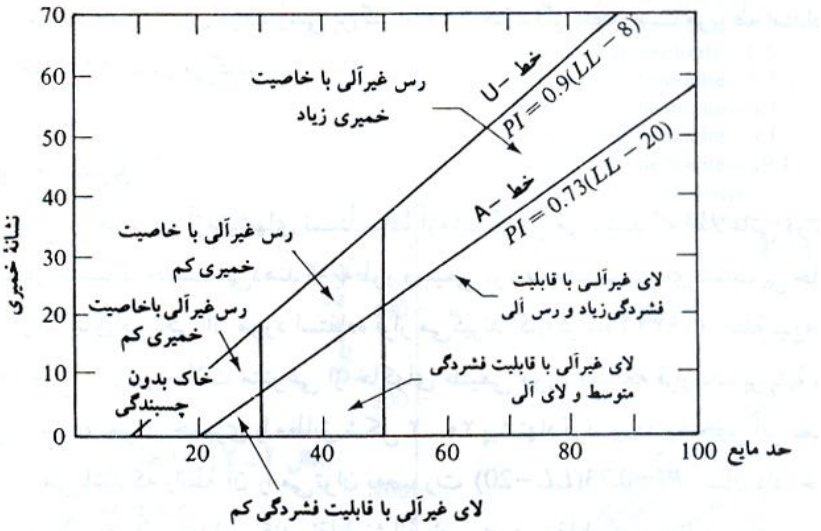
تعیین حدود مایع و خمیری، آزمایش های نسبتاً سادهٔ آزمایشگاهی می باشند که اطلاعاتی در مورد طبیعت خاک های چسبنده به دست می دهند که به طور وسیعی توسط مهندسان برای شناسایی خاک و ارتباط دادن پارامترهای فیزیکی آن مورد استفاده قرار می گیرند. کاساگرانده (۱۹۳۲) رابطه بین نشانه خمیری و حد مایع را برای حالات متنوعی از خاک های طبیعی مورد مطالعه قرار داد. بر پایه نتایج آزمایشگاهی، نامبرده نمودار خمیری را مطابق شکل ۲-۱۰ پیشنهاد کرد. وجه مشخص این نمودار، خط تجربی **A** می باشد که رابطه آن را می توان به صورت $PI = 0.73(LL - 20)$ نشان داد. خط **A** رس غیر آلی را از لای غیرآلی جدا می کند. نقاط نشانه خمیری در مقابل حد مایع برای رس های غیر آلی در بالای خط **A** و برای لای های غیر آلی در پایین خط **A** قرار می گیرند (زیر خط **A** با حد مایع بین ۳۰ تا ۵۰). رس های آلی در ناحیه مربوط به

لای غیر آلی با قابلیت فشردگی بالا قرار می گیرند (زیر خط **A** در حد مایع بزرگتر از ۵۰). اطلاعات فراهم آمده در نمودار خمیری بسیار با ارزش است و پایه ای برای طبقه بندی خاک های ریزدانه در سیستم طبقه بندی متحد خاک می باشد.

در بالای خط **A** خطی وجود دارد که به آن خط **U** می گویند. خط **U** به طور تقریبی حد بالای نقاط نشانه خیمری در مقابل حد مایع هر نوع خاکی می باشد که تا به حال شناخته شده است. رابطه خط **U** را می توان به صورت زیر نوشت:

$$PI = 0.9\,(LL - 8) \qquad (۱۲-۲)$$

استفاده دیگری از خطوط **A** و **U** وجود دارد. کاساگرانده پیشنهاد کرده است که حد انقباض را می توان از نشانه خمیری و حد مایع به دست آورد. با توجه به شکل ۲-۱۱ این کار را می توان به صورت زیر انجام داد:

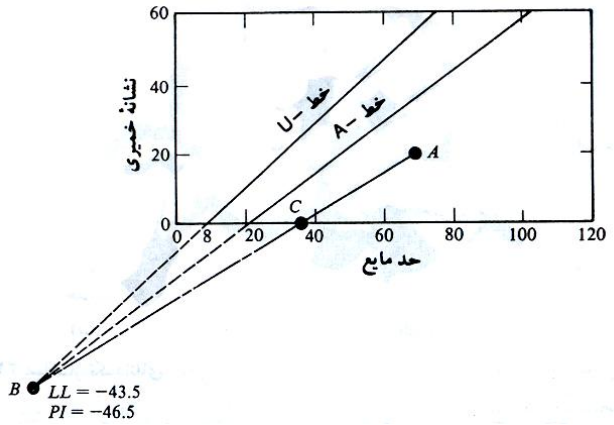


شکل ۲-۱۰ نمودار خمیری

(الف) نقطه ای با مختصات نشانه خمیری و حد مایع برای خاک مورد نظر همانند نقطه **A** در شکل ۲-۱۱ مشخص کنید.

(ب) خطوط **A** و **U** را امتداد دهید تا یکدیگر را در نقطه **B** قطع کنند. نقطه **B** دارای مختصات $LL = -43.5$ و $PI = 46.4$ خواهد بود.

(پ) نقاط **A** و **B** را با یک خط مستقیم به هم وصل کنید. این خط محور مربوط به حد مایع را در نقطه **C** قطع می کند. طول نقطه **C** همان حد انقباض خواهد بود.



شکل ۲-۱۱ تخمین حد انقباض از نمودار خمیری

مسائل حل شده

۱- حد انقباض خاکی ۸/۵ درصد است. درصد تخلخل آن در رطوبت حد انقباض کدام است؟ چگالی نسبی قسمت جامد G_s را برابر ۲/۶ در نظر بگیرید. (کنکور سراسری ۷۵)

$$SL = \frac{e}{G_s} \rightarrow 0.085 = \frac{e}{2.6} \rightarrow e = 0.221$$

۲- رابطه زیر را اثبات نمایید:

$$\gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{G_s}{1+e}\gamma_w + \frac{e}{1+e}\gamma_w = \gamma_d + n\gamma_w \rightarrow \gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$$

۳- رابطه زیر را اثبات نمایید:

$$e = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_d}{\gamma_d - \gamma_{sat} + \gamma_w}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s\gamma_w + e\gamma_w}{1+e} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} + \frac{e}{1+e}\gamma_w = \gamma_d + \frac{e}{1+e}\gamma_w$$

$$(1+e)(\gamma_{sat} - \gamma_d) = e\gamma_w \rightarrow e\gamma_w = \gamma_{sat} - \gamma_d + e\gamma_{sat} - e\gamma_d \rightarrow e(\gamma_w - \gamma_{sat} + \gamma_d) = \gamma_{sat} - \gamma_d$$

$$e = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_d}{\gamma_d - \gamma_{sat} + \gamma_w}$$

۴- رابطه زیر را اثبات نمایید:

$$G_s = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w - \omega_{sat}(\gamma_{sat} - \gamma_w)}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(1+\omega_{sat})G_s\gamma_w}{1+\omega_{sat}G_s}$$

$$\gamma_{sat} + \omega_{sat}G_s\gamma_{sat} = G_s\gamma_w + \omega_{sat}G_s\gamma_w \rightarrow G_s(\gamma_w + \omega_{sat}\gamma_w - \omega_{sat}\gamma_{sat}) = \gamma_{sat}$$

$$G_s = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w + \omega_{sat}\gamma_w - \omega_{sat}\gamma_{sat}} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w - \omega_{sat}(\gamma_{sat} - \gamma_w)}$$

۵- برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$$G_s = 2.67, \gamma = 17.6 kN/m^3, \omega = 10.8\%$$

مطلوب است تعیین: (الف) وزن مخصوص خشک، (ب) نسبت تخلخل، (پ) پوکی، (ت) درجه اشباع.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{17.6}{1+0.108} = 15.884 kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{G_s\gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.67 \times 9.81}{15.554} - 1 = 0.649$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.649}{1+0.649} = 0.396$$

$$S \cdot e = G_s \cdot \omega \rightarrow S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.67 \times 0.108}{0.649} = 0.444 = 44.4\%$$

۶- برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$G_s = 2.7, \gamma = 20.1 kN/m^3, \omega = 18.6\%$

مطلوب است تعیین: (الف) وزن مخصوص خشک، (ب) نسبت تخلخل، (پ) پوکی، (ت) درجه اشباع

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{20.1}{1+0.186} = 16.948 kN/m^3$$
$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.7 \times 9.81}{16.948} - 1 = 0.5628$$
$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.5628}{1+0.5628} = 0.36$$
$$S \cdot e = G_s \cdot \omega \rightarrow S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.7 \times 0.186}{0.5628} = 0.8923 = 89.23\%$$

۷- برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$G_s = 2.74, \gamma = 20.6\, kN/m^3, \omega = 16.6\%$

مطلوب است تعیین: (الف) وزن مخصوص خشک، (ب) نسبت تخلخل، (پ) پوکی، (ت) درجه اشباع

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{20.6}{1+0.166} = 17.667 kN/m^3 = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.74 \times 9.81}{17.667} - 1 = 0.5$$
$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.5}{1+0.5} = 0.33$$
$$S \cdot e = G_s \cdot \omega \rightarrow S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.74 \times 0.166}{0.5} = 0.9 = 90\%$$

توجه شود که هرچند در دو مثال قبل هر دو خاک، وزن مخصوص طبیعی تقریباً یکسانی دارند اما با دقت در وزن مخصوص خشک آن ها می توان دریافت که خاک دوم دارای تراکم بیشتر و در نتیجه کیفیت مهندسی بهتری می باشد.

۸- در مسئله ۴ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

با توجه به نکته بیان شده در جزوه: وزن آب مورد نیاز برای اشباع نمودن خاک = $\gamma_{sat} - \gamma$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.67 + 0.649}{1+0.649} \times 9.81 = 19.775 kN/m^3$$
$$19.775 - 17.6 = 2.145 kN/m^3 \rightarrow W = 2.145 kN/m^3 \times 1m^3 = 2.145 kN$$

۹- در مسئله ۵ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

$$\gamma_{sat} = \frac{2.7 + 0.5628}{1+0.5628} \times 9.81 = 20.488 kN/m^3$$
$$\gamma_{sat} - \gamma = 20.488 - 20.1 = 0.38 kN/m^3 \rightarrow W = 0.38 kN/m^3 \times 1m^3 = 0.38 kN$$

۱۰- در مسئله ۶ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

$$\gamma_{sat}=\frac{2.74+0.5}{1+0.5}\times 9.81=21.1896kN/m^3$$
$$\gamma_{sat}-\gamma=21.1896-20.6=0.5896kN/m^3\rightarrow W=0.5896kN/m^3\times 1m^3=0.5896kN$$

۱۱- وزن مرطوب $2832cm^3$ خاک $54.34N$ است. اگر میزان رطوبت ۱۲درصد و $G_s=2.72$ باشد، مطلوب است:

(الف) وزن مخصوص مرطوب (γ)

(ب) وزن مخصوص خشک (γ_d)

(پ) نسبت تخلخل (e)

(ت) پوکی (n)

(ث) درجه اشباع (S)

$$\gamma=\frac{W}{V}=\frac{54.34}{2832}\times\frac{10^{-3}}{10^{-6}}=19.18kN/m^3$$
$$\gamma_d=\frac{\gamma}{1+\omega}=\frac{19.18}{1+0.12}=17.132kN/m^3$$
$$\gamma_d=\frac{G_s\gamma_w}{1+e}\rightarrow e=\frac{2.72\times 9.81}{17.132}-1=0.5575$$
$$n=\frac{0.5575}{1+0.5575}=0.358$$
$$S=\frac{G_s\cdot\omega}{e}=\frac{2.72\times 0.12}{0.5575}\times 100=58.547\%$$
$$W_s=\frac{W}{1+\omega}=\frac{54.34}{1+0.12}=48.518N$$
$$W_w=\omega W_s=0.12\times 48.518=5.822N$$
$$\gamma_w=\frac{W_w}{V_w}\rightarrow V_w=\frac{W_w}{\gamma_w}=\frac{5.822}{9810}\times 10^6=593.49cm^3$$

۱۲- برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$\gamma=17.3kN/m^3$ ، $D_r=82\%$ ، $\omega=8\%$ ، $G_s=2.65$

برای این خاک اگر $e_{min}=0.44$ و باشد، e_{max} چقدر خواهد بود. در شل ترین وضعیت، وزن مخصوص خشک چقدر خواهد بود؟

$$\gamma=\frac{G_s\cdot\gamma_w}{1+e}(1+\omega)\rightarrow 17.3=\frac{2.65\times 9.807}{1+e}(1+0.08)\rightarrow e=0.622$$
$$D_r=\frac{e_{max}-e}{e_{max}-e_{min}}\rightarrow 0.82=\frac{e_{max}-0.622}{e_{max}-0.44}\rightarrow e_{max}=1.45$$
$$\gamma_d=\frac{G_s\cdot\gamma_w}{1+e_{max}}=\frac{2.65\times 9.807}{1+1.45}=10.6kN/m^3$$

مراجع

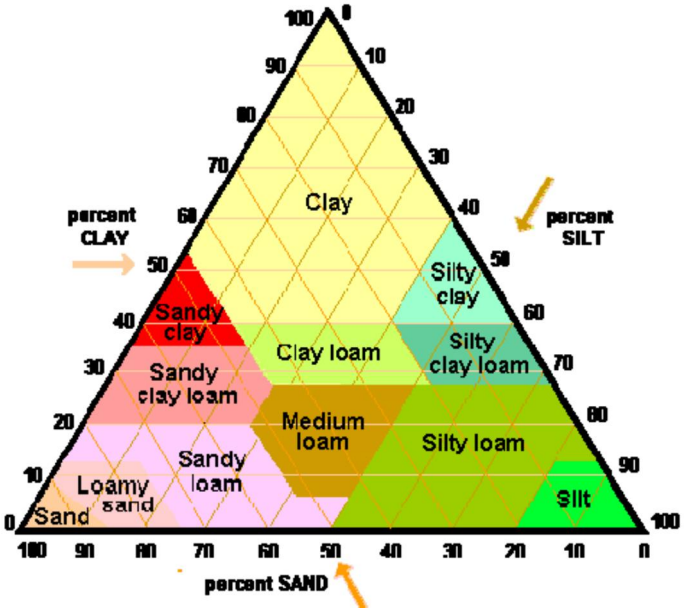
۱. **اصول مهندسی ژئوتکنیک**، جلد اول: مکانیک خاک.، ترجمه شاپور طاحونی.، چاپ هفتم ۱۳۸۰، ویرایش دوم.

۲. **مجموعه سوالات طبقه بندی شده آزمون کارشناسی ارشد مکانیک خاک**.، تالیف: ساسان امیر افشاری.، چاپ سوم ۱۳۸۲.

3. Soil Mechanics,Basic Concept and Engineering Applications., A. Aysen., Balkema Publishers., 2002.

فصل سوم:

طبقه بندی خاک



جزوه درس مکانیک خاک ۲ و مکانیک خاک کارشناسی

استاد: عبدالمتین ستایش

برای ارسال نظرات و پیشنهادات به سایت شخصی اینجانب رجوع نموده و یا نظرات و یا پیشنهادات خود را به آدرس پست الکترونیک زیر ارسال نمایید:

Website: www.ams.ir, Email: a_matin_s@yahoo.com

آخرین ویرایش: اسفند ۸۹

۳-۱ مقدمه

سیستم طبقه بندی خاک[1] عبارت است از مرتب کردن خاک های مختلف با خواص مشابه به گروه ها و زیرگروه هایی بر حسب کاربردشان. سیستم های طبقه بندی یک زبان مشترک برای بیان مشخصات خاک به طور خلاصه به وجود می آورند. اغلب سیستم های طبقه بندی خاک که برای مقاصد مهندسی تدوین یافته اند، بر پایه خواص ساده ای از خاک نظیر دانه بندی و خواص خمیری قرار دارند. اگرچه سیستم های طبقه بندی مختلفی وجود دارد، لیکن به علت تنوع در خواص خاک، هیچکدام از آن ها به طور کامل جوابگوی توصیف هر خاک برای تمام کاربردهای ممکنه نیستند. طبقه بندی خاک بر دو نوع است:

۱. طبقه بندی بافت خاک:

در این طبقه بندی ملاک حدود اندازه ذرات خاک می باشد و ابتدا نام گروه اصلی و بعد نام گروه فرعی به صورت صفت ذکر می گردد. مثل رس لای دار، رس ماسه دار و غیره. طبقه بندی USDA از این نوع است.

۲. طبقه بندی خاک ها بر حسب استفاده:

اگر چه طبقه بندی بافت خاک نسبتاً ساده است، لیکن کاملاً متکی بر دانه بندی خاک می باشد. مقدار کانی رسی که در خاک های ریزدانه ظاهر می شود، تاثیر بسیار عمده ای بر خواص فیزیکی خاک دارد. بنابراین برای تفسیر خواص یک خاک باید به خواص خمیری آن توجه داشت. از آنجایی که طبقه بندی های بافتی خاک توجهی به خواص خیری خاک ندارند، بنابراین برای اغلب کاربردهای مهندسی کافی نیستند. در حال حاضر استفاده از دو سیستم طبقه بندی پیچیده بین مهندسان خاک معمول است که هر دو سیستم دانه بندی و حدود اتربرگ را در طبقه بندی منظور می کنند. این دو سیستم عبارتند از سیستم طبقه بندی آشتو و سیستم طبقه بندی متحد. سیستم طبقه بندی آشتو اغلب توسط مهندسان راه و سیستم طبقه بندی متحد، اغلب توسط مهندسان ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می گیرد.

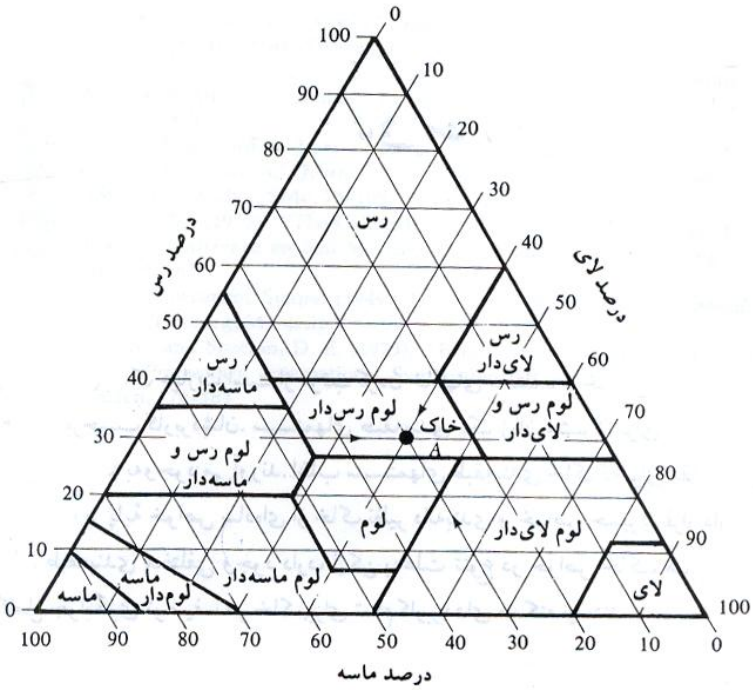
۳-۲ طبقه بندی سازمان کشاورزی آمریکا (USDA)

از نقطه نظر عمومی، بافت خاک به ظاهر سطحی آن نسبت داده می شود. بافت خاک تحت تاثیر اندازه ذرات موجود موجود در آن قرار دارد. در اغلب حالات، خاک های طبیعی ترکیبی از گروه ها با اندازه های مختلف می باشند. در طبقه بندی های بافت خاک، ابتدا نام گروه اصلی و بعد نام گروه فرعی به صورت صفت ذکر می شود. مثل رس ماسه دار، رس لای دار و غیره.

در شکل ۳-۱ طبقه بندی بافت خاک که توسط اداره کشاورزی ایالت متحده تدوین یافته، نشان داده شده است. این سیستم طبقه بندی بر پایه حدود اندازه ذرات طبق سیستم **USDA** قرار دارد:

- ماسه: قطر دانه ها بین ۲ تا ۰/۰۵ میلیمتر
- لای: قطر ذرات بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۰۲ میلیمتر
- رس: قطر ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر

[1] Soil Classification



شکل ۳–۱ طبقه بندی بافت خاک طبق طبقه بندی اداره کشاورزی ایالات متحده (USDA)

استفاده از نمودار فوق را می توان با ارائه یک مثال نشان داد. اگر منحنی دانه بندی خاک A مقدار ماسه را ۳۰ درصد، لای را ۴۰ درصد و ذرات با اندازه رسی را ۳۰ درصد نشان دهد، طبقه بندی بافت را می توان با رسم خطوط نشان داده شده در شکل ۳-۱ به دست آورد. این خاک در ناحیه لوم رس دار قرار می گیرد.

لوم خاکی است متشکل از ماسه، سیلت و رس به نسبت های تقریباً ۴۰-۴۰-۲۰ (۴۰ درصد ماسه، ۴۰ درصد سیلت و ۲۰ درصد رس). لوم به طور طبیعی دارای مواد مغذی و هوموس بیشتری از خاک های ماسه ای بوده و نفوذپذیری و زهکشی بهتری نسبت به سیلت ها دارد. لوم ایده آل ترین خاک برای کاشت گیاهان، باغداری و کشاورزی است زیرا به خوبی مواد مغذی در خاک را حفظ می نماید در حالی که به آب اجازه حرکت آزاد و راحت در داخل خاک را می دهد.

نکته :

نمودار شکل ۳-۱ برپایه قسمت عبوری از الک نمره ۱۰ قرار داد. بنابراین اگر دانه بندی خاک طوری باشد که درصد مشخصی از ذرات خاک بزرگتر از ۲ میلیمتر باشد، اصلاحاتی در طبقه بندی به روش **USDA** لازم خواهد بود. روش اصلاح به همراه مثال توضیح داده شده است.

مثال :

خاک های زیر را با استفاده از سیستم طبقه بندی **USDA** (اداره کشاورزی آمریکا) طبقه بندی نمایید.

درصد ذرات طبق USDA

خاک	شن	ماسه	لای	رس
A	18	51	22	9
B	10	20	41	29
C	21	12	35	32
D	0	18	34	58
E	12	22	26	40

حل مسئله:

گام ۱- محاسبه درصد ذرات اصلاح شده یا حذف قسمت شنی خاک.

خاک	درصد ماسه اصلاح شده	درصد لای اصلاح شده	درصد رس اصلاح شده
A	$\left(\frac{51}{82}\right)\times 100 = 62.2$	$\left(\frac{22}{82}\right)\times 100 = 26.83$	$\left(\frac{9}{82}\right)\times 100 = 10.96$
B	$\left(\frac{20}{90}\right)\times 100 = 22.2$	$\left(\frac{41}{90}\right)\times 100 = 45.6$	$\left(\frac{29}{90}\right)\times 100 = 32.2$
C	$\left(\frac{12}{100-21}\right)\times 100 = 15.2$	$\left(\frac{35}{100-21}\right)\times 100 = 44.3$	$\left(\frac{32}{100-21}\right)\times 100 = 40.5$
D	$\left(\frac{18}{100-0}\right)\times 100 = 18$	$\left(\frac{24}{100-0}\right)\times 100 = 24$	$\left(\frac{58}{100-0}\right)\times 100 = 58$
E	$\left(\frac{22}{100-12}\right)\times 100 = 25$	$\left(\frac{26}{100-12}\right)\times 100 = 29.5$	$\left(\frac{40}{100-12}\right)\times 100 = 45.5$

گام ۲- با محاسبه درصد های اصلاح شده، به کمک نمودار شکل ۳-۱، خاک ها به صورت زیر طبقه بندی می شوند:

نام خاک	طبقه بندی
A	لوم ماسه دار و شن دار
B	لوم رس دار و شن دار
C	رس لای دار و شن دار
D	رس
E	رس شن دار

صفت شن دار به علت ظهور شن در ترکیب خاک اضافه شده است.

۳-۲ سیستم طبقه بندی آشتو AASHTO:

این سیستم در سال ۱۹۲۹ میلادی پایه ریزی شد. متن اولیه بارها مورد تجدید نظر قرار گرفت و چیزی که در حال حاضر تحت عنوان ASTM D3282 استاندارد شده بر مبنای آخرین تجدید نظر در سال ۱۹۴۵ قرار دارد.

در جدول ۳-۱ طبقه بندی آشتو که در حال حاظر مورد استفاده قرار می گیرد، نشان داده شده است. طبق این سیستم، خاک به گروه های اصلی A-1 تا A-7 تقسیم می شوند. خاک های گروه A-1، A-2 و A-3 مصالح دانه ای هستند که درصد عبوری آن ها از الک نمره ۲۰۰ کمتر از ۳۵ درصد است. خاک هایی که درصد عبوریشان از الک نمره ۲۰۰ بیشتر از ۳۵ درصد است در گروه های A-4، A-5، A-6 و A-7 قرار می گیرند. این گروه ها اغلب مصالح لای و رس می باشند. سیستم طبقه بندی بر مبنای معیارهای زیر قرار دارد.

(الف) اندازه دانه ها

- شن: دانه هایی که از الک ۷۵ میلیمتر (۳اینچ) رد شده و بر روی الک ۲ میلیمتر (#10) باقی می مانند.
- ماسه: دانه هایی که از الک ۲ میلیمتر (#10) رد شده و ب روی الک ۰/۰۷۵ میلیمتر (#200) باقی می مانند.
- لای و رس: ذراتی که از الک ۰/۰۷۵ میلیمتر (#200) عبور می کنند.

(ب) خاصیت خمیری

صفت لای دار به خاک هایی اطلاق می شود که نشانه خمیری ریزدانه های آن ها مساوی و یا کوچکتر از ۱۰ است. صفت رس دار به خاک هایی اطلاق می شود که نشانه خمیری آن ها مساوی ۱۱ و یا بزرگتر است.

(پ) اگر قلوه سنگ (دانه های بزرگتر از ۷۵ میلی متر) در خاک یافت شود، در هنگام طبقه بندی از نمونه حذف می شوند. لیکن درصد آن ها ثبت می شود.

برای طبقه بندی یک خاک طبق جدول ۳-۱، نتایج آزمایشگاهی از چپ به راست اعمال می شوند. با فرآیند حذف، اولین گروهی از چپ که نتایج آزمایشگاهی با آن جور است، طبقه صحیح خاک می باشد.

در شکل ۳-۲ نموداری که بر حسب درصد مایع (روانی) و نشانه خمیری، خاک ها را در گروه های **A-2**، **A-4**، **A-5**، **A-6**، **A-7** جای می دهد، نشان داده شده است.

برای داشتن تخمینی از کیفیت یک خاک به عنوان مصالح بستر (زیرسازی)، عددی به عنوان نشانه گروه در کنار هر گروه و زیر گروه وجود دارد. این عدد در داخل پرانتز بعد از اسم گروه نوشته می شود. نشانه گروه از رابطهٔ زیر محاسبه می شود:

$$GI = (F-35)[0.2+0.005)(LL-40)] + 0.01(F-15)(PI-10) \qquad (۱-۳)$$

که در رابطه فوق:

F = درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلیمتر (#200)

LL = حد روانی

PI = نشانه خمیری

اولین جمله در رابطه ۳-۱، یعنی $(F-35)[0.2+0.005)(LL-40)]$، نشانه گروه جزئی می باشد که از حد روانی به دست می آید دومین جمله $0.01(F-15)(PI-10)$، نشانه گروه جزئی می باشد که از نشانه خمیری بدست می آید. در زیر قوانینی در ارتباط با تعیین نشانه گروه ارائه می شود:

(الف) اگر رابطه ۳-۱ یک مقدار منفی برای GI بدست دهد، مقدار آن را صفر منظور می نماییم.

(ب) نشانه گروه محاسبه شده از رابطه ۳-۱ به نزدیکترین عدد کامل گرد می شود (به طور مثال $GI = 3.4$ به ۳ و $GI = 3.5$ به ۴ گرد می شود).

(پ) هیچ حد بالایی برای نشانه گروه وجود ندارد.

(ت) نشانه گروه خاک های متعلق به گروه های A-1-a، A-1-b و A-2-4 و A-2-5 و A-3 همواره مساوی صفر هستند.

(ث) در هنگام محاسبه نشانه گروه برای خاک های متعلق به گروه های A-2-6 و A-2-7 باید از نشانه گروه جزئی مربوط به نشانه خمیری PI استفاده نمود. به عبارت دیگر:

$$GI = 0.01(F-15)(PI-10) \qquad (۲-۳)$$

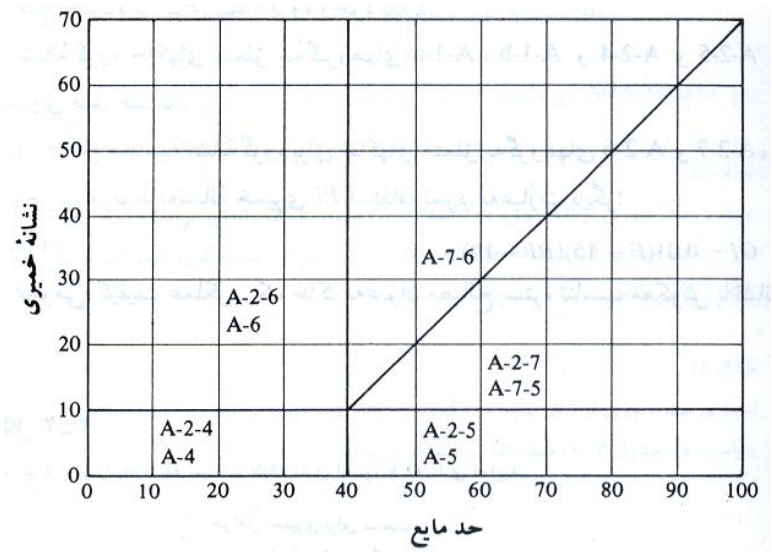
در حالت عمومی، کیفیت عملکرد یک خاک به عنوان مصالح بستر، تناسب معکوس با نشانه گروه دارد.

جدول ۳–۱ طبقه بندی مصالح بستر راه ها طبق طبقه بندی آشتو

طبقه بندی عمومی	مصالح دانه ای (درصد عبوری از الک ۲۰۰ مساوی ۳۵ درصد و یا کمتر)						
طبقه بندی گروهی	A-1		A-3		A-2		
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
آزمایش دانه بندی (درصد عبوری)							
No.10 (الک نمره ۱۰)	50 max						
No.40 (الک نمره ۴۰)	30 max	50 max	51 min				
No.200 (الک نمره ۲۰۰)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max
مشخصات قسمت عبوری از الک ۴۰							
حد مایع				40 max	41 min	40 max	41 min
نشانه خمیری	6 max		NP	40 max	40 max	11 min	11 min
نوع مصالح تشکیل دهنده	ماسه و شن با قلوه سنگ		ماسهٔ ریز	ماسه و شن رس دار و یا لای دار			
مناسب بودن به عنوان مصالح بستر	عالی تا خوب						

طبقه بندی عمومی	مصالح دانه ای (درصد عبوری از الک ۲۰۰ مساوی ۳۵ درصد و یا کمتر)			
طبقه بندی گروهی	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6+
آزمایش دانه بندی (درصد عبوری)				
No.10 (الک نمره ۱۰)				
No.40 (الک نمره ۴۰)				
No.200 (الک نمره ۲۰۰)	36 min	36 min	36 min	36 min
مشخصات قسمت عبوری از الک ۴۰				
حد مایع	40 max	42 min	40 max	41 min
نشانه خمیری	10 max	10 max	11 min	11 min
نوع مصالح تشکیل دهنده	خاک های لای دار		خاک های رس دار	
مناسب بودن به عنوان مصالح بستر	متوسط تا بد			

* For A-7-5, $PI \le LL-30$, + For A-7-6, $PI > LL-30$



شکل ۳–۲ دامنه حد مایع و نشانه خمیری برای خاک های گروه های A-2، A-4، A-5، A-6، A-7

مثال :

خاک های زیر را به وسیله سیستم طبقه بندی آشتو، طبقه بندی نمایید.

خواص خمیری برای قسمت عبوری از الک نمره ۴۰

خاک	الک No. 10	الک No. 40	الک No. 200	حد مایع	نشانه خمیری
A	83	48	20	20	5
B	100	92	86	70	32
C	48	28	6	-	Non Plastic
D	90	76	34	37	12

خاک A:

طبق جدول ۳-۱، چون ۲۰ درصد از خاک از الک نمره ۲۰۰ عبور می کند، خاک در رده خاک های دانه ای، یعنی A-1، A-3 و یا A-2 قرار می گیرد. با انجام بررسی از چپ به راست، ملاحظه می گردد که خاک در رده A-1-b قرار می گیرد. نشانه گروه برای خاک A-1-b مساوی صفر است. بنابرای طبقه بندی خاک به صورت A-1-b(0) خواهد بود.

خاک B:

درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ مساوی ۸۶ درصد است، پس طبق جدول ۳-۱، مصالح خاک رس و لای می باشد (یعنی A-4، A-5، A-6 و یا A-7) با انجام بررسی از چپ به راست، ملاحظه می شود که طبقه خاک A-7 است. برای این حالت $PI - 32 \le LL - 30$ است، پس طبقه کامل خاک A-7-5 می باشد. از رابطه ۳-۱ داریم:

$$GI = (F-35)[0.2+0.005)(LL-40)] + 0.01(F-15)(PI-10)$$

$$F = 86; LL = 70; PI = 32$$

$$GI = (80-35)[0.2+0.005)(70-40)] + 0.01(86-15)(32-10) = 33.47 \approx 33$$

پس خاک A-7-5(35) می باشد.

خاک C:

چون درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ کمتر از ۳۵ است، خاک دانه ای می باشد. با انجام بررسی از چپ به راست در جدول ۳-۱، طبق خاک A-1-a به دست می آید. نشانه گروه صفر است. پس نام کامل خاک A-1-a(0) می باشد.

خاک D:

چون درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ کمتر از ۳۵ است، خاک دانه ای می باشد. با انجام بررسی از چپ به راست در جدول ۳-۱ طبقهٔ خاک A-2-6 می باشد.

$$GI = 0.01(F-15)(PI-10)$$

$$F = 34; PI = 12$$

$$GI = 0.01(34-15)(12-10) = 0.38 \approx 0$$

پس نام کامل خاک A-2-6(0) است.

۳-۲ سیستم طبقه بندی متحد (Unified Soil Classification System) USCS:

شکل اولیه این سیستم در سال ۱۹۴۲ توسط کاساگرانده برای ساخت فرودگاه های نظامی به وسیله گروه مهندسان ارتش در اثنای جنگ جهانی دوم ارائه شد. این طبقه بندی در سال ۱۹۵۲ با همکاری اداره عمران ایالت متحده، مورد تجدید نظر قرار گرفت. درحال حاضر این سیستم تحت استاندارد $ASTM-D-2487$ مورد استفاده وسیع مهندسین قرار دارد. در جدول ۳-۲، ۳-۳ و ۳-۴ سیستم طبقه بندی متحد ارائه شده است. این سیستم خاک ها را به دو طبقه بزرگ تقسیم می نماید:

۱. خاک های درشت دانه با طبیعت شنی و یا ماسه ای و درصد عبوری کوچکتر از ۵۰ درصد از الک نمره ۲۰۰. علامت گروه های این طبقه با حرف G یا S شروع می شود. علامت G برای شن یا خاک های شن دار و علامت S برای ماسه یا خاک های ماسه دار به عنوان حرف اول به کار می روند.

۲. خاک های ریزدانه با درصد عبوری بزرگتر از ۵۰ درصد از الک نمره ۲۰۰. علامت گروه های این طبقه با حرف M برای لای غیر آلی و یا C برای رس غیر آلی و O برای لای ها و رس های آلی شروع می شود. علامت Pt برای پیت و ماک (خاک برگ) و یا سایر خاک ها با درجه آلی بالا به کار می رود.

علائمی که به عنوان حرف دوم در طبقه بندی به کار می روند، عبارتند از:

W = خوب دانه بندی شده

P = بد دانه بندی شده

L = خاصیت خمیری کم (حد مایع کوچکتر از ۵۰)

H = خاصیت خمیری زیاد (حد مایع بزرگتر از ۵۰)

حروف فوق همیشه به عنوان حرف دوم قرار گرفته و صفت حرف اول می باشند.

برای طبقه بندی کامل این سیستم، قسمت و یا تمام اطلاعات زیر لازم است:

الف: درصد شن، یعنی قسمتی که از الک ۷۵ میلیمتر عبور کرده و روی الک ۴/۷۵ میلیمتر (نمره ۴) باقی می ماند.

ب: درصد ماسه، یعنی درصد عبوری از الک ۴/۷۵ میلیمتر (نمره ۴) و مانده روی الک ۰/۰۷۵ میلیمتر (نمره ۲۰۰).

پ: درصد لای و رس، یعنی درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلیمتر (نمره ۲۰۰).

ت: ضریب یکنواختی C_u و ضریب دانه بندی C_c

ث: حد مایع و نشانه مایع برای قسمت عبوری از الک نمره ۴۰.

- علامت گروه برای خاک های درشت دانه شنی عبارتند از:

GW، GP، GM، GC، GC−GM، GW−GM، GW−GC، GP−GM، GP−GC

- برای خاک های دانه ای ماسه ای علائم عبارتند از:

SP−SC، SP−SM، SW−SC، SW−SM، SC−SM، SC، SM، SM، SP، SW

- به طور مشابه علامت گروه برای خاک های ریزدانه عبارتند از:

CL−ML، OH، MH، CH، OL، ML، CL و Pt

روش گام به گام برای طبقه بندی به روش متحد به شرح زیر است:

گام ۱: درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ ، PP #200 را تعیین نمایید. اگر $PP\#200 < 50\%$ باشد، خاک درشت دانه (شنی یا ماسه ای) بوده و به گام ۲ بروید. اگر $PP\#200 > 50\%$ باشد، خاک ریزدانه بوده و به گام ۳ بروید.

گام ۲: درصد عبوری از الک نمره ۴ ، PP #4 را تعیین نمایید. با داشتن درصد عبوری از الک ۴ و الک ۲۰۰ ، نسبت زیر را که نشان دهنده میزان ماسه موجود در قسمت درشت دانه خاک است را محاسبه نمایید:

$$F_s = \frac{\text{درصد ماسه}}{\text{درصد درشت دانه}} \times 100 = \frac{\text{عبوری از } \#4 - \text{عبوری از } \#200}{100 - \text{عبوری از } \#200} \times 100 = \frac{PP\#4 - PP\#200}{100 - PP200} \times 100$$

اگر $F_s < 50\%$ باشد خاک شنی است به عبارت دیگر حرف اول **G** است. برای تعیین علامت گروه به جدول ۳-۲ و شکل ۳-۲ مراجعه نمایید. سپس برای تعیین نام گروه به شکل ۳-۲ مراجعه کنید. اگر $F_S \geq 50\%$ باشد، خاک ماسه ای است. برای تعیین علامت گروه به جدول ۳-۳ و شکل ۳-۲ و برای تعیین نام گروه به شکل ۳-۳ مراجعه نمایید.

گام ۳: برای خاک های ریزدانه، برای تعیین علامت گروه به جدول ۳-۴ و شکل ۳-۲ مراجعه نمایید. اگر خاک غیر آلی باشد، برای تعیین نام گروه به شکل ۳-۴ و اگر آلی باشد به شکل ۳-۵ مراجعه نمایید. شکل ۳-۲ نمودار خمیری نام دارد و توسط کاساگرانده تهیه شده و سپس اصلاح گردیده است.

جدول ۳-۲ سیستم طبقه بندی متحد – علائم گروه برای خاک های شنی

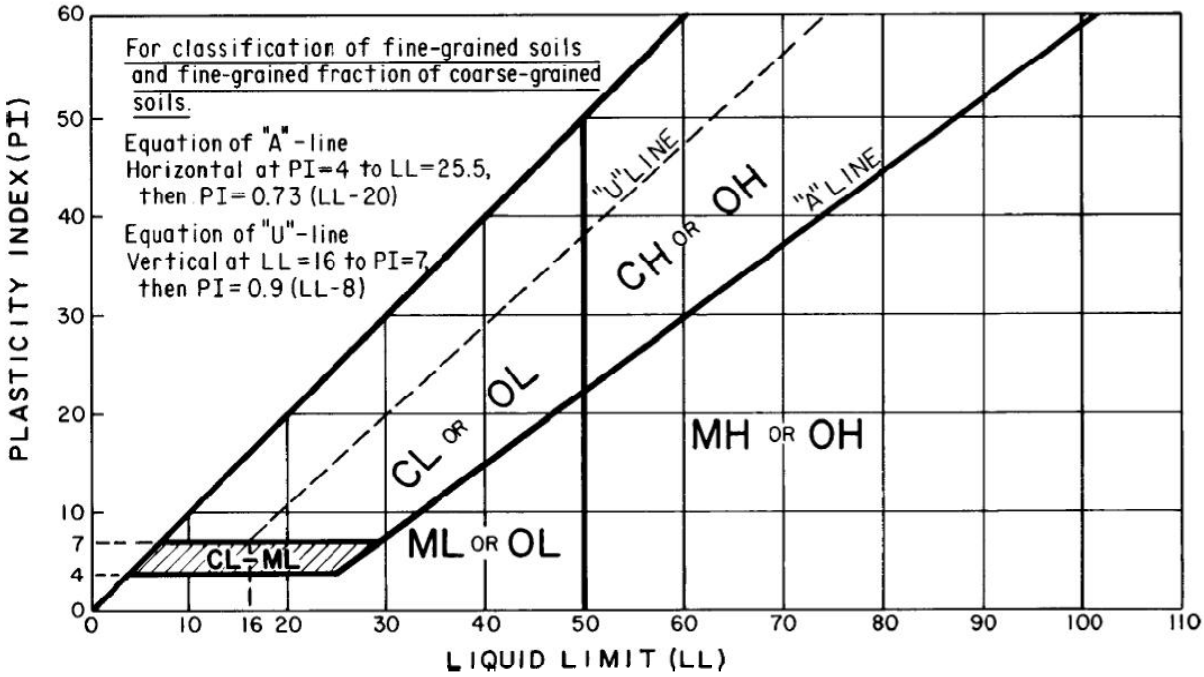
معیار	علامت گروه
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵ درصد، C_u بزرگتر یا مساوی ۴ و C_c بین ۱ و ۳	GW
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵ درصد، و هیچکدام از دو شرط GW برآورده نمی شود	GP
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ زیر خط A قرار می گیرد یا نشانه خمیری کمتر از ۴ است	GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ بالای خط A و نشانه خمیری بزرگتر از ۷ است	GC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ در ناحیه سایه خورده قرار می گیرد (ناحیه CL – ML)	GC – GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GW و GM برآورده می شود	GW – GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GW و GC برآورده می شود	GW – GC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GP و GM برآورده می شود	GP – GM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای GP و GC برآورده می شود	GP – GC

جدول ۳-۳ سیستم طبقه بندی متحد – علائم گروه برای خاک های ماسه ای

معیار	علامت گروه
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵ درصد، C_u بزرگتر یا مساوی ۶ و C_c بین ۱ و ۳	SW
عبوری از الک نمره ۲۰۰ کوچکتر از ۵ درصد، و هیچکدام از دو شرط GW برآورده نمی شود	SP
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ زیر خط A قرار می گیرد یا نشانه خمیری کمتر از ۴ است	SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ بالای خط A و نشانه خمیری بزرگتر از ۷ است	SC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ است. حدود اتربرگ در ناحیه سایه خورده قرار می گیرد (ناحیه CL – ML)	SC – SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SW و SM برآورده می شود	SW – SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SW و SC برآورده می شود	SW – SC
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SP و SM برآورده می شود	SP – SM
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ است و معیارهای SP و SC برآورده می شود	SP – SC

جدول ۳-۴ سیستم طبقه بندی متحد – علائم گروه برای خاک های رسی و لای

معیار	علامت گروه
غیر آلی، $LL < 50$، $PI > 7$ و منطبق یا بالای خط A (به ناحیه CL در شکل ۳-۳ توجه شود)	CL
غیر آلی، $LL < 50$، $PI > 4$ و زیر خط A (به ناحیه ML در شکل ۳-۳ توجه شود)	ML
آلی، $0.75 >$ (LL خشک نشده) / (LL خشک شده) و $LL < 50$ (به ناحیه OL در شکل ۳-۳ توجه شود)	OL
غیر آلی، $LL \geq 50$ و PI منطبق و یا بالای خط A (به ناحیه CH در شکل ۳-۳ توجه شود)	CH
غیر آلی، $LL \geq 50$ و PI زیر خط A (به ناحیه MH در شکل ۳-۳ توجه شود)	MH
آلی، $0.75 >$ (LL خشک نشده) / (LL خشک شده) و $LL \geq 50$ (به ناحیه OH در شکل ۳-۳ توجه شود)	OH
غیر آلی، در ناحیه هاشور خورده در شکل ۳-۳	CL – ML
تورب، ماک و یا سایر خاک های آلی	Pt



شکل ۳–۲ نمودار خمیری

نکته :

منظور از خاک خوب دانه بندی شده (W) خاکی است که در شرایط زیر صدق کند:

$1 < C_c < 3$

$C_u > 6$ برای ماسه

$C_u > 4$ برای شن

بدیهی است که خاکی که در هر یک از شرایط فوق صدق نکند خاک بد دانه بندی شده (P) است.

صفت های فوق مختص خاک های درشت دانه (شنی و ماسه) می باشد.

نکته :

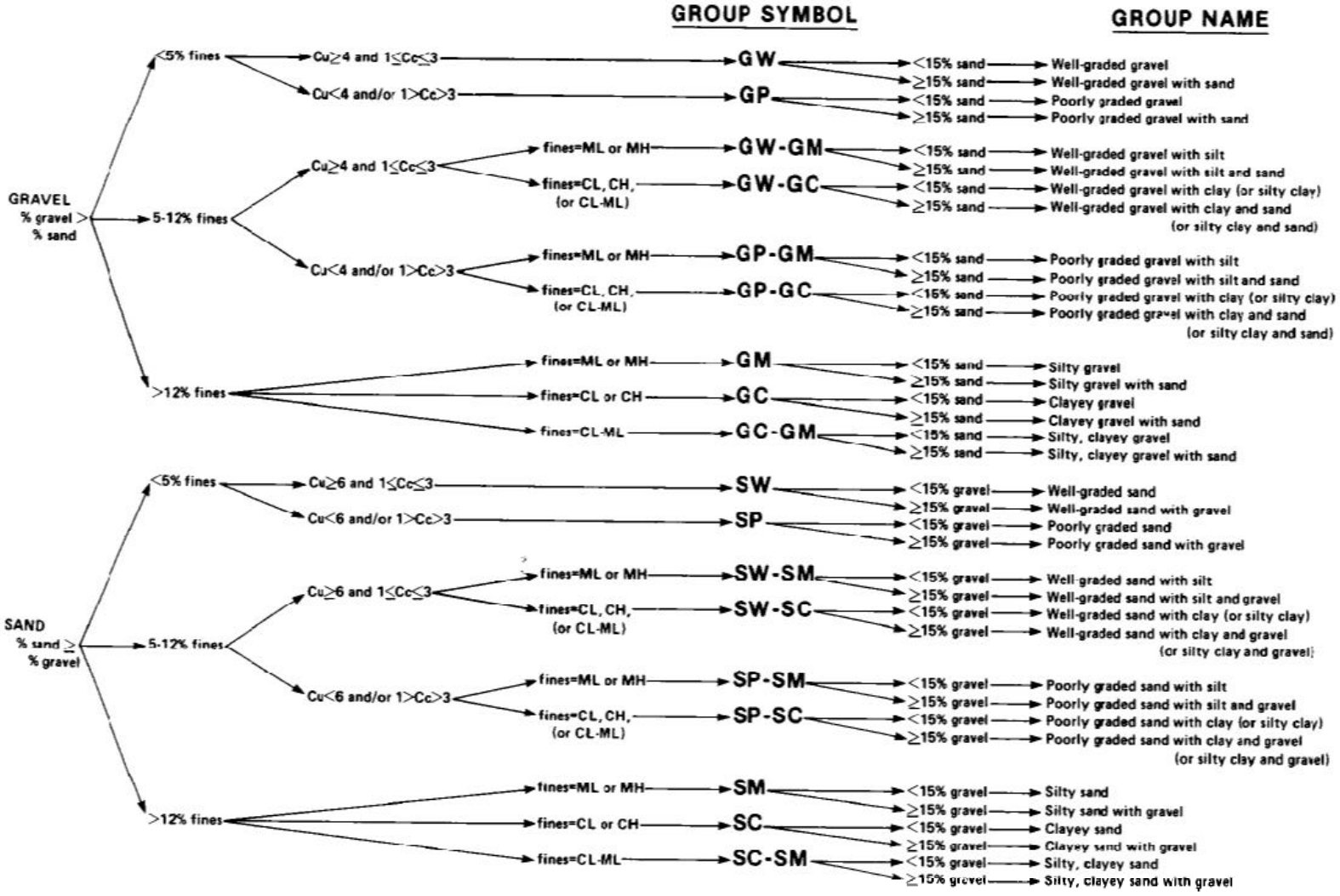
همانطور که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، خط A خطی است که جداکننده ناحیه رس و لای در نمودار خمیری می باشد این خط از $PI = 4$ تا $LL = 25.5$ افقی بوده و از آن پس معادله آن به صورت $PI = 0.73(LL - 20)$ می باشد.

خط U به طور تقریبی حد بالای نقاط نشانه خمیری در مقابل حد مایع هر نوع خاکی است که تا به حال شناخته شده است.

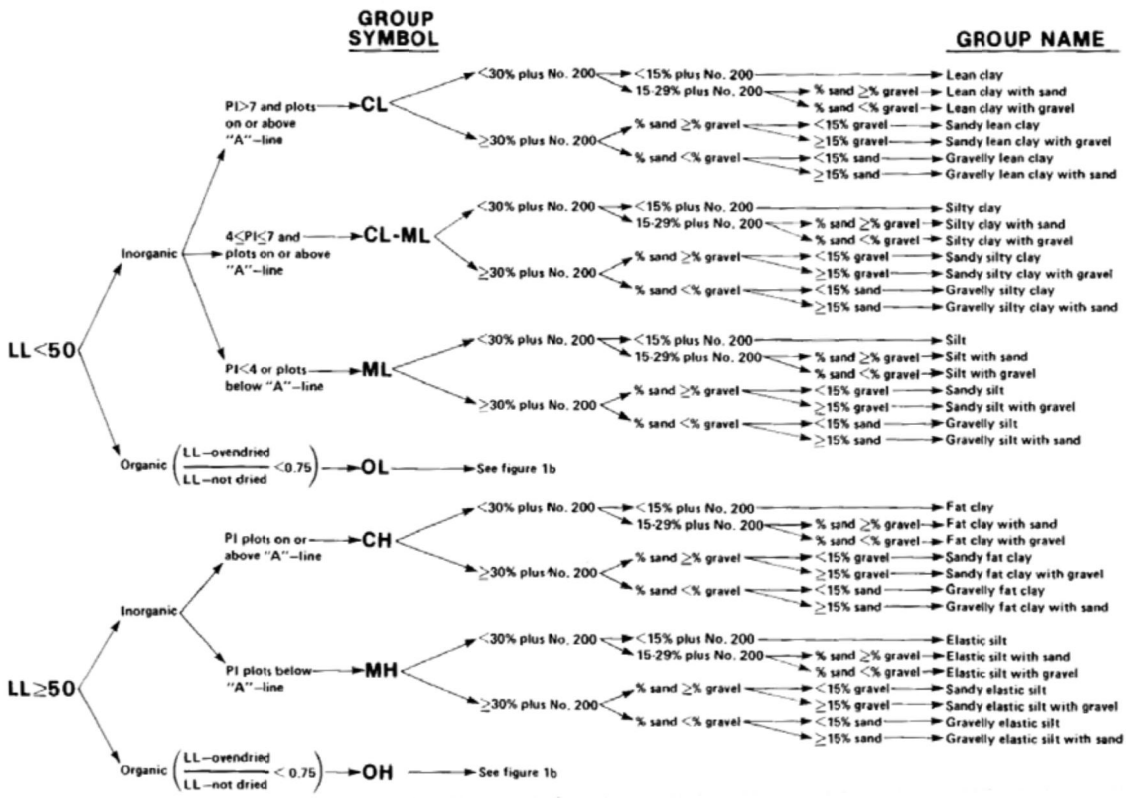
این خط از $LL = 16$ تا $PI = 7$ قائم بوده و از آن پس معادله آن به صورت $PI = 0.9(LL - 8)$ می باشد.

اصطلاحات به کار رفته در شکل های ۳-۳، ۳-۴ و ۳-۵ در زیر فهرست شده اند:

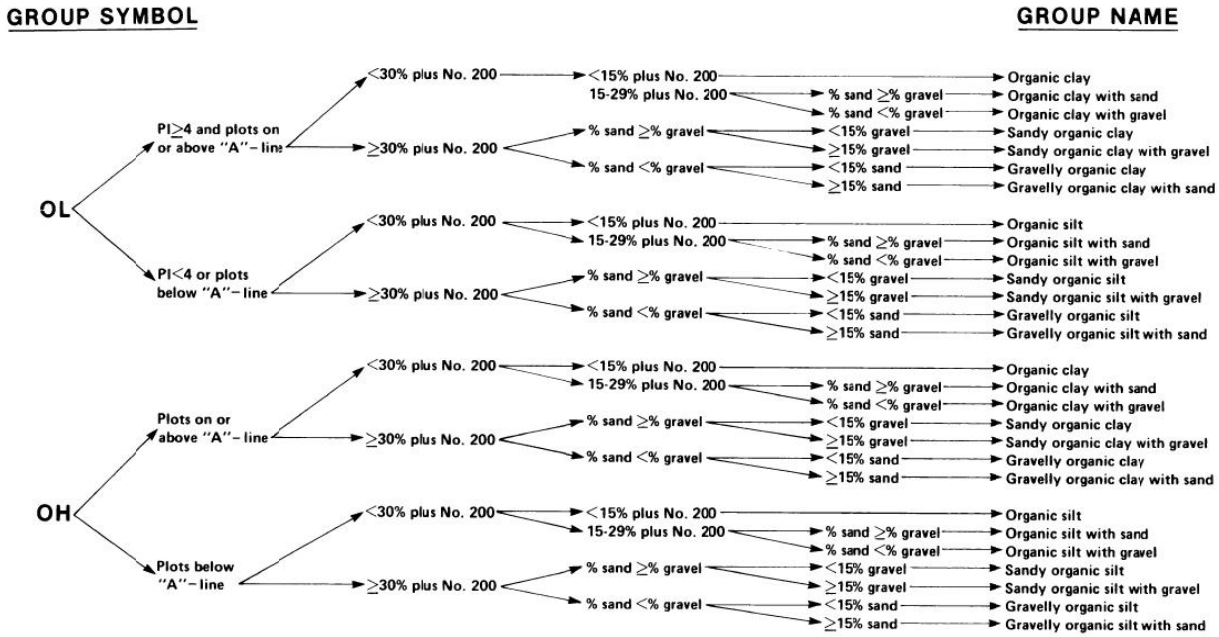
gravel	شن	sand	ماسه	Well graded	دانه بندی خوب
poorly graded	دانه بندی بد	silt	لای	Clay	رس
organic	آلی	inorganic	غیر آلی	Lean clay	رس لاغر
fat clay	رس چاق	silty sand	ماسه لای دار	Clayey sand	ماسه رس دار
silty gravel	شن لای دار	clayey gravel	شن رس دار		



شکل ۳–۳ نمودار تعیین علامت و نام گروه برای خاک های شنی و ماسه ای



شکل ۳–۴ نمودار تعیین علامت و نام گروه برای خاک های رسی و لای غیر آلی



شکل ۳–۵ نمودار تعیین علامت و نام گروه برای خاک های رسی و لای آلی

مثال :

آزمایش دانه بندی بر روی یک نمونه خاک نشان می دهد که درصد عبوری از الک #200 برابر ۳۲ است. اگر درصد مانده روی الک نمره #4 برابر ۲۲ درصد باشد، نام خاک در طبقه بندی متحد را بدست آورید.

$$\begin{cases} LL = 73\% \\ PL = 41\% \end{cases} \quad \begin{cases} C_u = 5 \\ C_c = 3.6 \end{cases}$$

حل مسئله:

گام ۱) درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ کمتر از ۵۰ درصد است بنابراین خاک درشت دانه است.

$$PP\ \#200 < 50\% \rightarrow G \text{ or } S$$

گام ۲) باید مشخص نماییم خاک شن است یا ماسه بنابراین با توجه به درصد عبوری از الک نمره ۴ داریم:

$$\frac{PP\#4 - PP\#200}{100 - PP\#200} = \frac{78-32}{100-32} = 68\% > 50\% \rightarrow S$$

برای تعیین حرف دوم یا علامت گروه می توان هم از جداول ارائه شده و هم از معادله خط A استفاده نمود. در این مثال از آنجائی که $PP\#200 > 12\%$ است حرف دوم یا C است یا M در نتیجه با توجه به حدود اتربرگ داریم:

$$PI = LL - PL = 73 - 41 = 32\%$$

$$A : 0.73(LL - 20) = 0.73(73 - 20) = 38.7 \rightarrow PI < 38.7 \rightarrow M$$

بنابراین با توجه به اینکه قسمت ریزدانه خاک زیر خط A قرار دارد صفت خاک مورد نظر سیلتی خواهد بود. در نتیجه علامت گروه خاک مورد نظر عبارت است از: SM

توجه: خط U به صورت خودکار در تمام خاک ها ارضاء می شود بنابراین در حل مسائل کاربردی ندارد.

حال با توجه به اینکه درصد شن بزرگتر از ۱۵٪ می باشد نام گروه Clayey sand with gravel می باشد.

توجه: در مسئله فوق مقدار ضریب یکنواختی و ضریب انحنا کاربردی نداشته و ارائه آن ها در صورت مسئله انحرافی است.

مثال :

در یک آزمایش دانه بندی درصد عبوری از الک ۴ و الک ۲۰۰ به ترتیب ۷۵ درصد و ۲۰ درصد می باشد. اگر حد روانی خاک ۶۰ درصد و دامنه خمیری آن ۲۰ درصد باشد، علامت گروه خاک در طبقه بندی USCS چیست؟

حل مسئله:

$$PP\ \#200 = 20\% < 50\% \rightarrow G \text{ or } S$$

$$\frac{PP\ \#4 - PP\ \#200}{100 - PP\ \#200} = \frac{75-20}{100-20} = \frac{55}{80} = 69\% > 50\% \rightarrow S$$

$$PP\ \#200 = 20\% > 12\% \rightarrow C \text{ or } M$$

$$A : 0.73(LL - 20) = 0.73(60 - 20) = 29.2\% > 20\% \rightarrow M$$

بنابراین خاک مورد نظر SM است.

مثال :

پس از آزمایش دانه بندی بر روی یک نمونه خاک مشخص شد که ۶ درصد از الک ۲۰۰ و ۶۳ درصد آن الک ۴ عبور کرده است. حد روانی و حد خمیری بخش ریزدانه آن نیز به ترتیب ۵۵ و ۳۵ درصد می باشد. اگر ضریب یکنواختی آن $C_u = 23.5$ و ضریب دانه بندی $C_c = 1.06$ باشد، در این صورت نام گروه خاک در سیستم طبقه بندی متحد چیست ؟

حل مسئله:

$PP\ \#200 = 6\% < 50\% \rightarrow S\ \text{or}\ G$

$\frac{63-6}{100-6} \times 100 = 60\% > 50\% \rightarrow S$ خاک ماسه ای است

$PP\ \#200 = 60\% \rightarrow 5\% < PP\ \#200 < 12\% \rightarrow$ نام گذاری دوگانه

$PI = 55 - 35 = 20\%$

$A : 0.73(55-20) = 25.5$

$PI < 25.55 \rightarrow M$ خاک سیلتی است

$\begin{cases} 1 < C_c < 3 \\ C_u > 6 \end{cases} \rightarrow$ خاک خوب دانه بندی شده است $\rightarrow SW - SM$

مثال :

۷۰ درصد خاکی از الک ۴ و ۳ درصد آن از الک ۲۰۰ می گذرد. اگر $D_{60} = 3mm$ و $D_{30} = 1.2mm$ و $D_{10} = 0.2mm$ باشد. علامت و نام گروه خاک را در طبقه بندی یونیفاید تعیین نمایید.

حل مسئله:

$PP\ \#200 = 3 \rightarrow G\ \text{or}\ S$

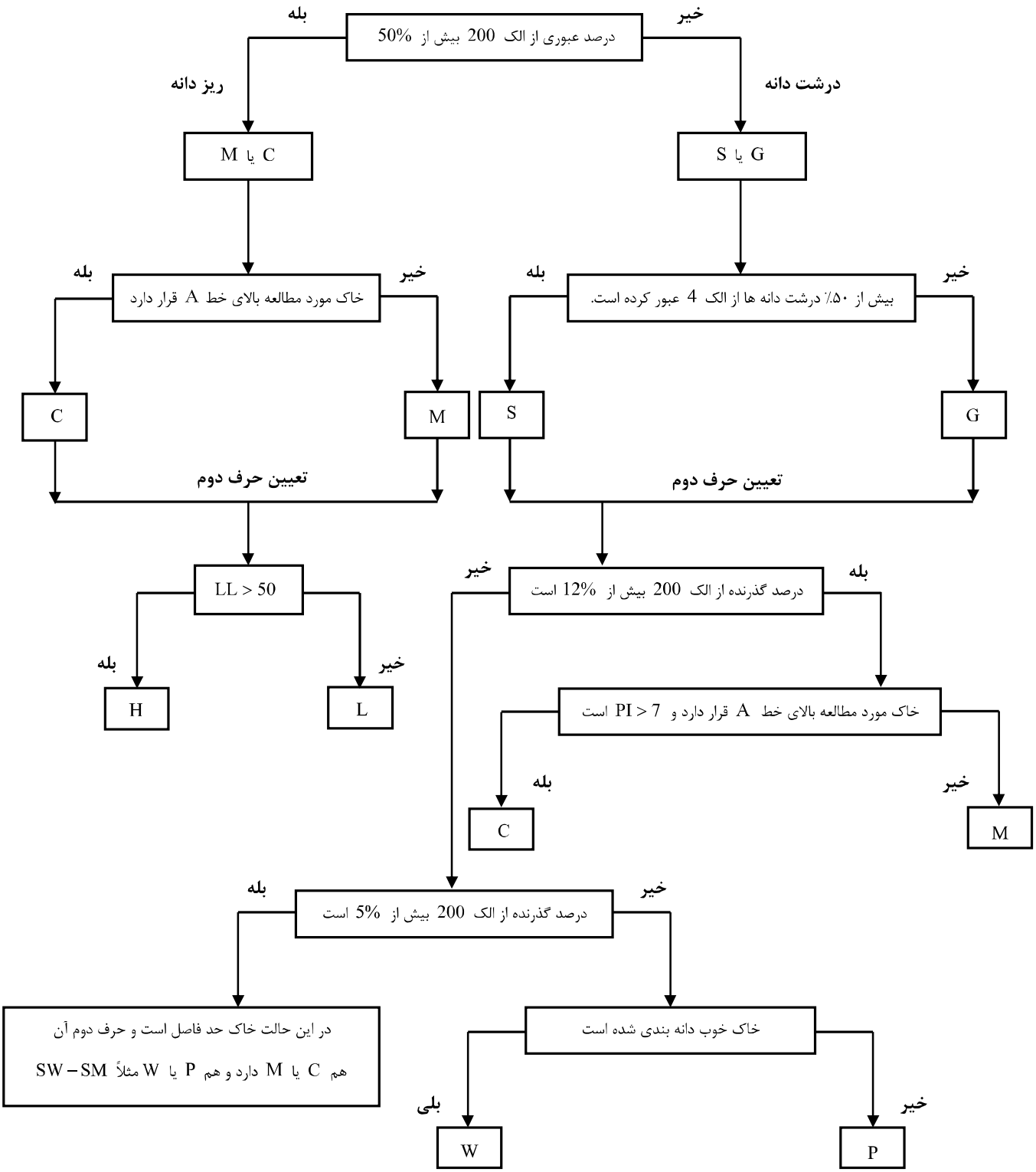
$\frac{70-3}{100-3} \times 100 = 69\% > 50\% \rightarrow S$ خاک ماسه ای است

$PP\ \#200 = 3\% < 5\% \rightarrow W\ \text{or}\ P$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{1.2^2}{3 \times 0.2} = 2.4 \rightarrow 1 < C_c < 3$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{3}{0.2} = 15 > 6$$

$\rightarrow SW$

$Gravel = 100 - 70 - 3 = 27\% > 15\% \rightarrow$ well – graded sand with gravel

برای طبقه بندی سریع به روش متحد می توان از الگوریتم زیر نیز استفاده نمود.