

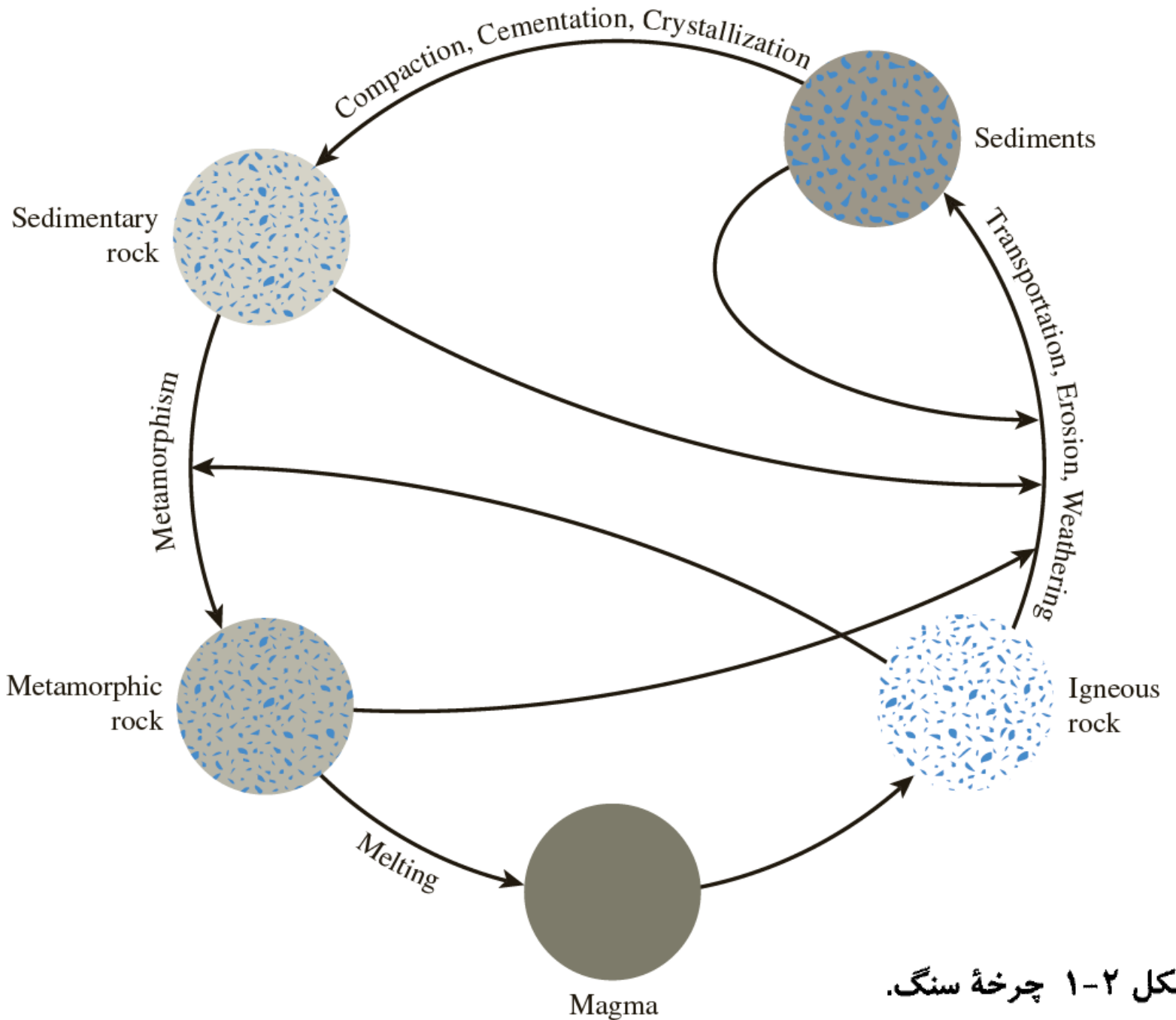
منشا خاک و اندازه ذرات

به طور کلی خاک‌ها از هوازدگی سنگ‌ها ایجاد می‌شوند. خصوصیات فیزیکی خاک در وهله نخست از کانی‌های تشکیل دهنده ذرات خاک و بنابراین از سنگی ناشی می‌شود که از آن به وجود آمده است. در این فصل چرخه سنگ و منشاء خاک و دانه‌بندی ذرات موجود در توده خاک شرح داده می‌شود.

چرخه سنگ و منشاء خاک

ذرات کانی تشکیل دهنده بخش جامد دانه‌های خاک از هوازدگی سنگ ایجاد می‌شوند. اندازه دانه‌های منفرد در محدوده وسیعی تغییر می‌کند. بسیاری از خصوصیات فیزیکی خاک تحت تأثیر اندازه، شکل و ترکیب شیمیایی این دانه‌ها قرار دارد. برای درک بهتر این عوامل باید با انواع اصلی سنگ‌های تشکیل دهنده پوسته زمین، کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و فرآیند هوازدگی آشنا بود.

سنگ‌ها را می‌توان بر اساس منشاء آنها به سه نوع اصلی تقسیم کرد: آذرین، رسوبی و دگرگونی. در شکل ۱-۲ نمودار چرخه شکل‌گیری انواع مختلف سنگ‌ها و فرآیندهای مربوط به آنها نشان داده شده است. به این روند **چرخه سنگ** گفته می‌شود. در ادامه مطلب شرح مختصری از هر بخش از چرخه سنگ آورده می‌شود.



شکل ۱-۲ چرخه سنگ.

سنگ آذرین

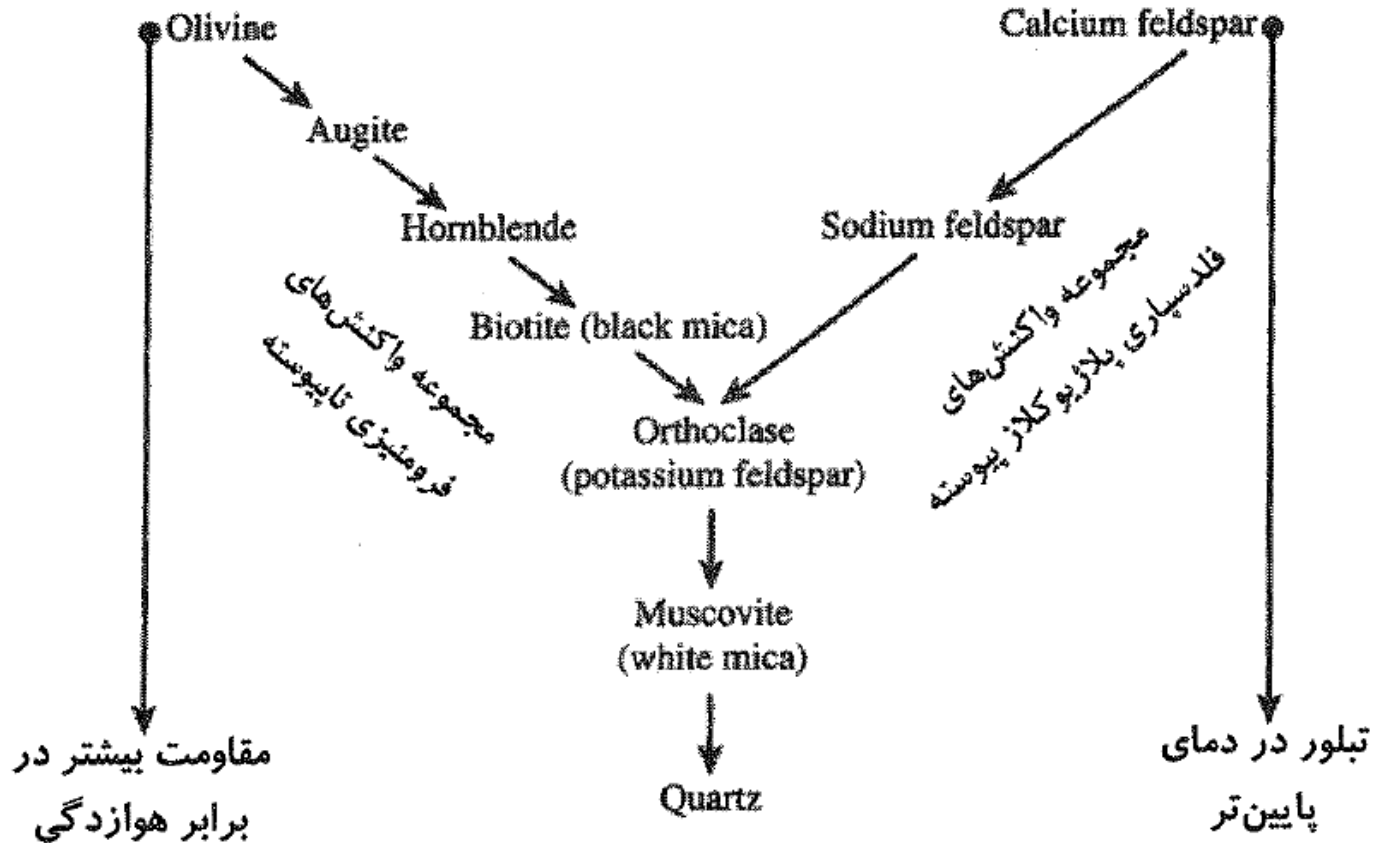
سنگ‌های آذرین در اثر جامد شدن *ماگمای* مذاب فوران کرده از عمق گوشته زمین تشکیل می‌شوند. پس از فوران شکافی یا فوران آتشفشانی، بخشی از ماگمای مذاب بر روی سطح زمین سرد می‌شود. گاهی حرکت ماگمای مذاب در زیر سطح زمین متوقف شده و با سرد شدن آن سنگ‌های آذرین نفوذی ایجاد می‌شوند که آنها را *پلوتون (Pluton)* می‌نامند. سنگ‌های نفوذی تشکیل شده در گذشته ممکن است در اثر فرآیند پیوسته فرسایش مواد پوشاننده آنها، در سطح زمین پدیدار شوند.

انواع سنگ‌های آذرین تشکیل شده در اثر سرد شدن ماگما به عواملی همچون ترکیب ماگما و سرعت سرد شدن آن بستگی دارد. Bowen (۱۹۲۲) پس از انجام چند آزمون آزمایشگاهی موفق شد که رابطه میان سرعت سرد شدن ماگما را با شکل‌گیری انواع مختلف سنگ‌ها شرح دهد. این نظریه که با عنوان *اصل واکنش Bowen* شناخته می‌شود، ترتیب شکل‌گیری کانی‌های جدید را با سرد شدن ماگما شرح می‌دهد. بله‌ها، کانی‌ها، گت‌ها، کانی‌ها، از آنها ته‌نشین می‌شوند. بله‌ها، معلقه، مانده در سیال با مواد مذاب باقی مانده واکنش انجام داده و کانی جدیدی را در دمای پایین‌تر تشکیل می‌دهند.

این روند تا جامد شدن کل مواد مذاب ادامه پیدا می‌کند. Bowen این واکنش‌ها را به دو دسته تقسیم کرد: (۱) **مجموعه واکنش‌های فرومنیزی ناپیوسته** که در آن کانی‌های تشکیل شده ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری متفاوتی دارند و (۲) **مجموعه واکنش‌های فلدسپاری پلاژیوکلاز پیوسته** که در آن کانی‌های تشکیل شده ترکیب شیمیایی متفاوت و ساختار بلوری مشابهی دارند. در شکل ۲-۲ مجموعه واکنش‌های Bowen نشان داده شده است. ترکیبات شیمیایی کانی‌ها در جدول ۲-۱ ارائه شده است. ریزنگار اسکن شده الکترونی شکل ۲-۳ سطح شکسته کوارتز را با شکستگی‌های شیشه مانند بدون شکاف صفحه‌ای پیوسته نشان می‌دهد. در ریزنگار اسکن شده الکترونی شکل ۲-۴ شکاف قاعده‌ای دانه‌های منفرد میکا دیده می‌شود.

مقاومت کمتر در برابر هوازدگی

تبلور در دمای بالاتر



شکل ۲-۲ مجموعه واکنش‌های Bowen.

جدول ۱-۲ ترکیب کانی‌های نشان داده شده در مجموعه واکنش‌های Bowen.

Mineral	Composition
Olivine	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$
Augite	$\text{Ca, Na}(\text{Mg, Fe, Al})(\text{Al, Si}_2\text{O}_6)$
Hornblende	Complex ferromagnesian silicate of Ca, Na, Mg, Ti, and Al
Biotite (black mica)	$\text{K}(\text{Mg, Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Plagioclase	$\left\{ \begin{array}{l} \text{calcium feldspar} \\ \text{sodium feldspar} \end{array} \right.$
Orthoclase (potassium feldspar)	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$
Muscovite (white mica)	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
Quartz	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	SiO_2



شکل ۲-۳ ریزنگار اسکن شده الکترونی سطح شکسته کوارتز، شکستگی‌های شیشه مانند را با سطح صفحه‌ای ناسوخته نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ ریزنگار
اسکن شده الکترونی،
شکاف قاعده‌های دانه‌های
منفرد میکا را نشان
م. دهد.

بنابراین بسته به نسبت کانی‌های موجود، انواع مختلف سنگ‌های آذرین تشکیل می‌شود. برخی از انواع معمول سنگ‌های آذرین موجود در این دسته عبارتند از: گرانیت، گابرو و بازالت. در جدول ۲-۲ ترکیب معمول برخی از سنگ‌های آذرین نشان داده شده است.

جدول ۲-۲ ترکیب برخی از سنگ‌های آذرین.

نام سنگ	حالت ایجاد	بافت	کانی‌های فراوان	کانی‌های غیرفراوان
گرانیت (Granite)	نفوذی	درشت	Quartz, sodium felspar postassium felspar	Biotite, muscovite, hornblende
ریولیت (Rhyolite)	خروجی	ریز		
گابرو (Gabbro)	نفوذی	درشت	Plagioclase, pyroxines, olivine	Hornblende, biotite, magnetite
بازالت (Basalt)	خروجی	ریز		
دیوریت (Diorite)	نفوذی	درشت	Plagioclase, hornblende	Biotite, pyroxenes (معمولاً وجود ندارد quartz)
آندزیت (Andesite)	خروجی	ریز		
سینیت (Syenite)	نفوذی	درشت	Potassium felspar	Sodium felspar, biotite, hornblende
تراکیت (Trachyte)	خروجی	ریز		
پریدوتیت (Peridotite)	نفوذی	درشت	Olivine, pyroxenes	اکسیدهای آهن

هوازدگی

هوازدگی به فرآیند خرد شدن سنگ‌ها به قطعات کوچک‌تر در اثر فرآیندهای مکانیکی و شیمیایی گفته می‌شود. هوازدگی مکانیکی ممکن است از انبساط و انقباض سنگ‌ها در اثر جذب و از دست دادن پیوسته گرما ناشی شود که به خردشدگی نهایی آنها منجر می‌گردد. اغلب آب به درون منافذ و ترک‌های موجود در سنگ نفوذ می‌کند. با پایین آمدن دما، آب منجمد شده و منبسط می‌گردد. فشار ناشی از یخ به دلیل انبساط حجمی حتی برای خرد کردن سنگ‌های بزرگ نیز کافی است. دیگر عوامل فیزیکی که به خرد شدن سنگ کمک می‌کنند، عبارتند از یخ یخچالی، باد، آب روان نهرها و رودخانه‌ها و امواج اقیانوس‌ها. درک این نکته مهم است که در هوازدگی مکانیکی، سنگ‌های بزرگ بدون تغییری در ترکیب شیمیایی به قطعات کوچکتر شکسته می‌شوند. در شکل ۲-۵ چند نمونه از فرسایش مکانیکی ناشی از امواج اقیانوس و باد در Yehliu کشور تایوان نشان داده شده است. این ناحیه در دماغه دریایی باریک و بلندی در سمت شمال غربی Keelung در حدود ۱۵ کیلومتری میان ساحل شمالی Wanli و Chin Shan قرار گرفته است.

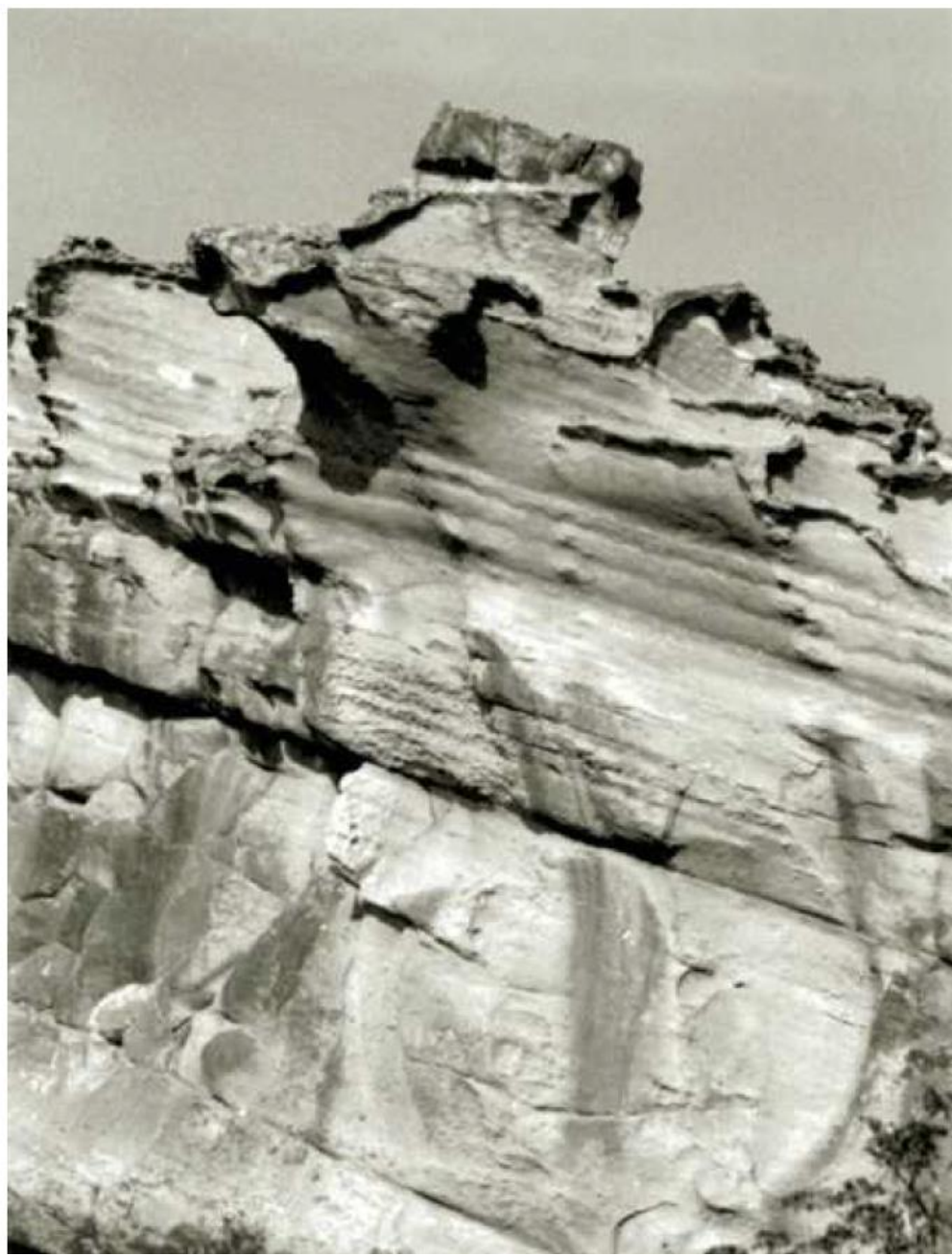




شکل ۲-۵ فرسایش مکانیکی ناشی از امواج
اقیانوس و باد در کشور تایوان. Yehlin



شکل ۲-۵ (ادامه).

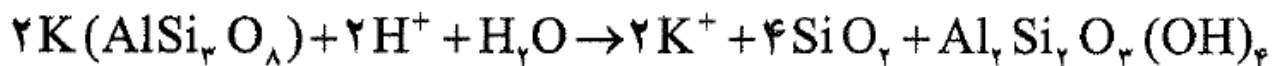


شکل ۲-۵ (ادامه).

در هوازدگی شیمیایی، کانی‌های سنگ اولیه در اثر یک واکنش شیمیایی به کانی‌های جدیدی تبدیل می‌شوند. آب و کربن دی‌اکسید موجود در جو تشکیل اسید کربنیک می‌دهند که با کانی‌های موجود در سنگ ترکیب شده و کانی‌ها و نمک‌های محلول جدیدی ایجاد می‌کند. نمک‌های محلول موجود در آب زیرزمینی و اسیدهای آلی ناشی از مواد آلی پوسیده نیز باعث هوازدگی شیمیایی می‌شوند. مثالی از هوازدگی شیمیایی ارتوکلاز (Orthoclase) برای تشکیل کانی‌های رس، سیلیس و پتاسیم کربنات محلول به صورت زیر است:



اسید کربنیک



سیلیس

کائولینیت

(کانی رس)

بیشتر یون‌های پتاسیم آزاد شده به صورت کربنات پتاسیم محلول‌اند که توسط گیاهان جذب

می‌شوند.

کانی‌های رس که محصول هوازدگی

شیمیایی فلدسپارها، فرومنیزی‌ها و میکاها هستند، در خاک‌ها خصوصیت خمیری ایجاد می‌کنند. سه نوع

کانی رسی مهم وجود دارد: (۱) کائولینیت (Kaolinite)، (۲) ایلیت (Illite) و (۳) مونت موریلونیت

(Montmorillonite).

حمل محصولات هواز دگی

محصولات هواز دگی ممکن است در همان مکان خود باقی بمانند یا توسط یخ، آب، باد و نیروی گرانش به مکان‌های دیگری منتقل شوند.

خاک‌های تشکیل شده از محصولات هواز دگی در مکان اولیه خود، خاک‌های برجا نامیده می‌شوند. یک خصوصیت مهم خاک‌های برجا دانه‌بندی ذرات آنها است. خاک ریزدانه در سطح یافت می‌شود و اندازه دانه‌ها با عمق افزایش پیدا می‌کند. در عمق‌های بیشتر امکان یافتن پاره سنگ‌های تیز گوشه نیز وجود دارد.

خاک‌های حمل شده را بسته به شکل حمل و نهشت می‌توان به چند گروه دسته‌بندی کرد:

- ۱- خاک‌های یخچالی: توسط یخچال‌ها حمل شده و نهشت می‌کنند.
- ۲- خاک‌های آبرفتی: توسط آب جاری حمل شده و در امتداد جریان‌ها نهشت می‌کنند.
- ۳- خاک‌های دریاچه‌ای: با نهشت در دریاچه‌های آرام تشکیل می‌شوند.
- ۴- خاک‌های دریایی: با نهشت در دریاها ایجاد می‌شوند.
- ۵- خاک‌های بادی: توسط باد حمل شده و نهشت می‌کنند.
- ۶- خاک‌های واریزه‌ای: در اثر حرکت خاک از مکان اولیه آن به کمک نیروی گرانش همچون زمان زمین لغزه ایجاد می‌شوند.

سنگ رسوبی

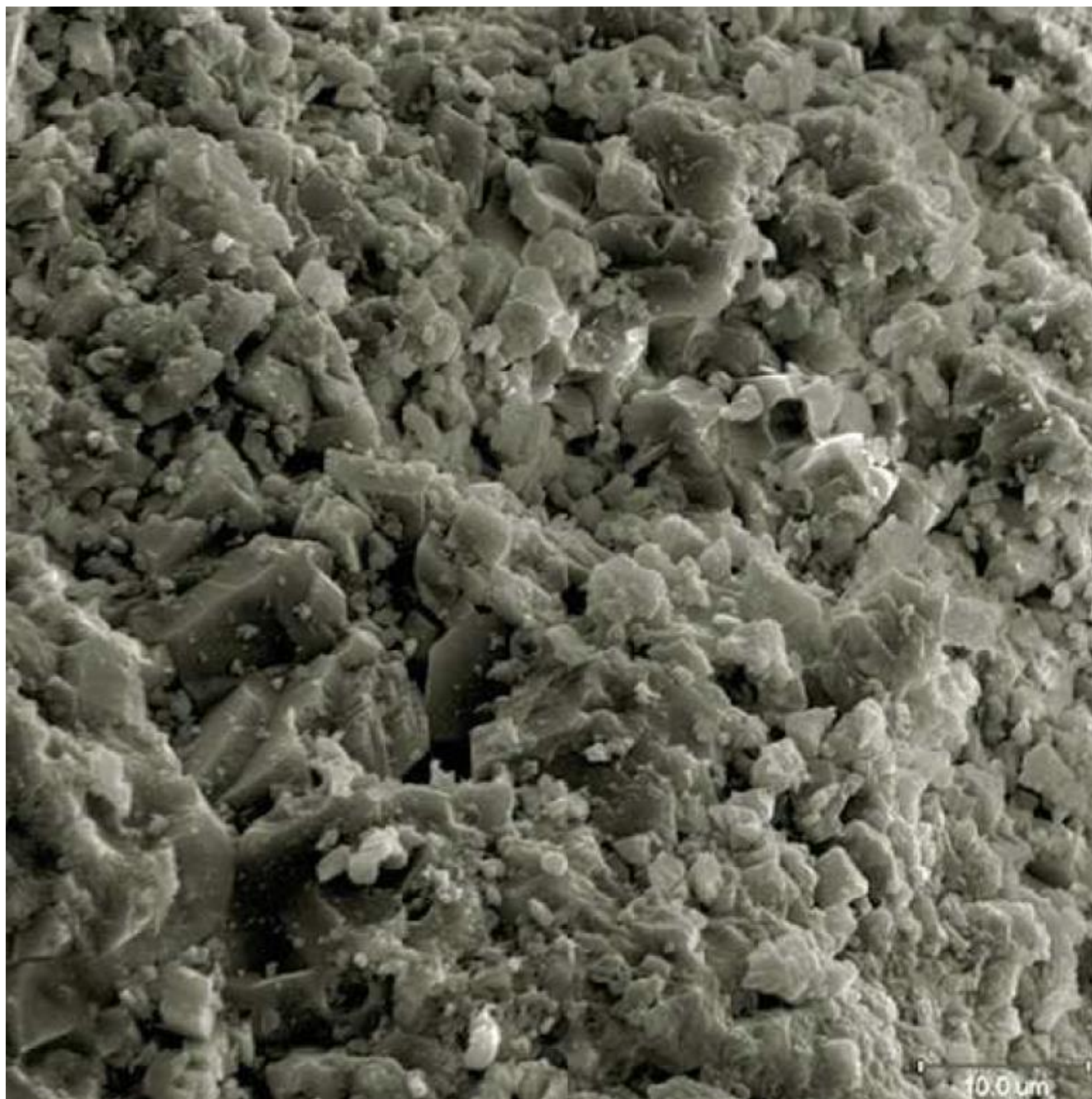
نهشت‌های شن، ماسه، لای و رس حاصل از هوازدهی ممکن است در اثر فشار سربار و سیمانی شدن با عواملی همچون اکسید آهن، کلسیت، دولومیت و کوارتز متراکم شوند. عوامل سیمانی شدن معمولاً به صورت محلول توسط آب‌های زیرزمینی حمل می‌شوند. این عوامل با پر کردن فضاهای خالی میان ذرات، سنگ رسوبی ایجاد می‌کنند. سنگ‌هایی که به این روش تشکیل می‌شوند، **سنگ‌های رسوبی آواری** نامیده می‌شوند.

تمامی سنگ‌های آواری بافت دانه‌ای دارند. در بخش زیر نمونه‌هایی از سنگ‌های آواری با بافت دانه‌ای آورده می‌شود.

سنگ رسوبی ممکن است با فرایندهای شیمیایی نیز تشکیل شود. سنگ‌هایی از این نوع به عنوان سنگ رسوبی شیمیایی طبقه‌بندی می‌شوند. این سنگ‌ها می‌توانند دارای بافت دانه‌ای یا غیردانه‌ای باشند. در بخش زیر نمونه‌هایی از سنگ رسوبی شیمیایی آورده می‌شود.

سنگ	ترکیب
سنگ آهن	Calcite (Ca CO_3)
نمک سنگ	Halite (NaCl)
دولومیت	Dolomite [CaMg (CO_3)]
سنگ گچ	Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2 \text{O}$)

سنگ آهک بیشتر از کلسیم کربنات نهشت کرده‌ای تشکیل می‌شود که منشاء آن موجودات زنده یا یک فرآیند غیرآلی است. بیشتر سنگ آهک‌ها بافت دانه‌ای دارند، اما بافت‌های غیردانه‌ای نیز معمولاً یافت می‌شوند. در شکل ۲-۶ ریزنگار اسکن شده الکترونی سطح شکسته سنگ آهک نشان داده شده است. دانه‌های منفرد کلسیت نشانگر رخ لوزی رویه‌ای سنگ است. نرم آهک (Chalk) سنگی رسوبی است که بخشی از آن از کلسیت حاصل از فرآیند بیوشیمی تشکیل شده است، یعنی از اجزای اسکلت گیاهان و جانوران میکروسکوپی. دولومیت با نهشت شیمیایی کربنات‌های مخلوط یا با واکنش منیزیم موجود در آب با سنگ آهک شکل می‌گیرد. سنگ گچ و گچین (Anhydrite) در اثر بارش CaSO_4 محلول ناشی از تبخیر آب اقیانوس‌ها تشکیل می‌شود. این دو به گروهی از سنگ‌ها تعلق دارند که معمولاً آنها را سنگ‌های تبخیری می‌نامند. نمک سنگ (NaCl) نمونه دیگری از سنگ‌های تبخیری است که از نهشت‌های نمکی آب دریا ناشی می‌شود.



شکل ۲-۶ ریزنگار
اسکن شده الکترونی
سطح شکسته سنگ
آهک.

سنگ دگرگونی

دگرگونی به فرآیند تغییر ترکیب و بافت سنگ‌ها در اثر گرما و فشار گفته می‌شود، بدون آن که ذوب شدگی صورت گیرد. در ضمن فرایند دگرگونی، کانی‌های جدیدی شکل می‌گیرند و در اثر برش ذرات کانی، سنگ دگرگونی بافت ورقه‌ای پیدا می‌کند. گنیس سنگی دگرگونی است که در اثر دگرگونی منطقه‌ای شدید سنگ‌های آذرینی همچون گرانیت، گابرو و دیوریت ایجاد می‌شود. شیست‌ها و گل سنگ‌ها در اثر دگرگونی خفیف به سنگ لوح (Slate) تبدیل می‌شوند. کانی‌های رسی موجود در شیل (Shale) در اثر گرما به کلریت (Chlorite) و میکا تبدیل می‌شوند، به همین دلیل سنگ لوح عمدتاً از پولک‌های میکا و کلریت تشکیل شده است. فیلیت (Phyllite) سنگی دگرگونی است که در اثر دگرگون شدن بیشتر سنگ لوح در معرض گرمای بیش از ۲۵۰ تا ۳۰۰°C شکل می‌گیرد. شیست (Schist) نوعی سنگ دگرگونی است که از چند سنگ آذرین، رسوبی و دگرگون شده خفیف با بافتی کاملاً ورقه‌ای و پولک‌های مشهودی از کانی‌های تخت و میکایی به وجود می‌آید. در سنگ‌های دگرگونی معمولاً مقدار زیادی کوارتز و همین طور فلدسپار وجود دارد.

اندازه ذرات خاک

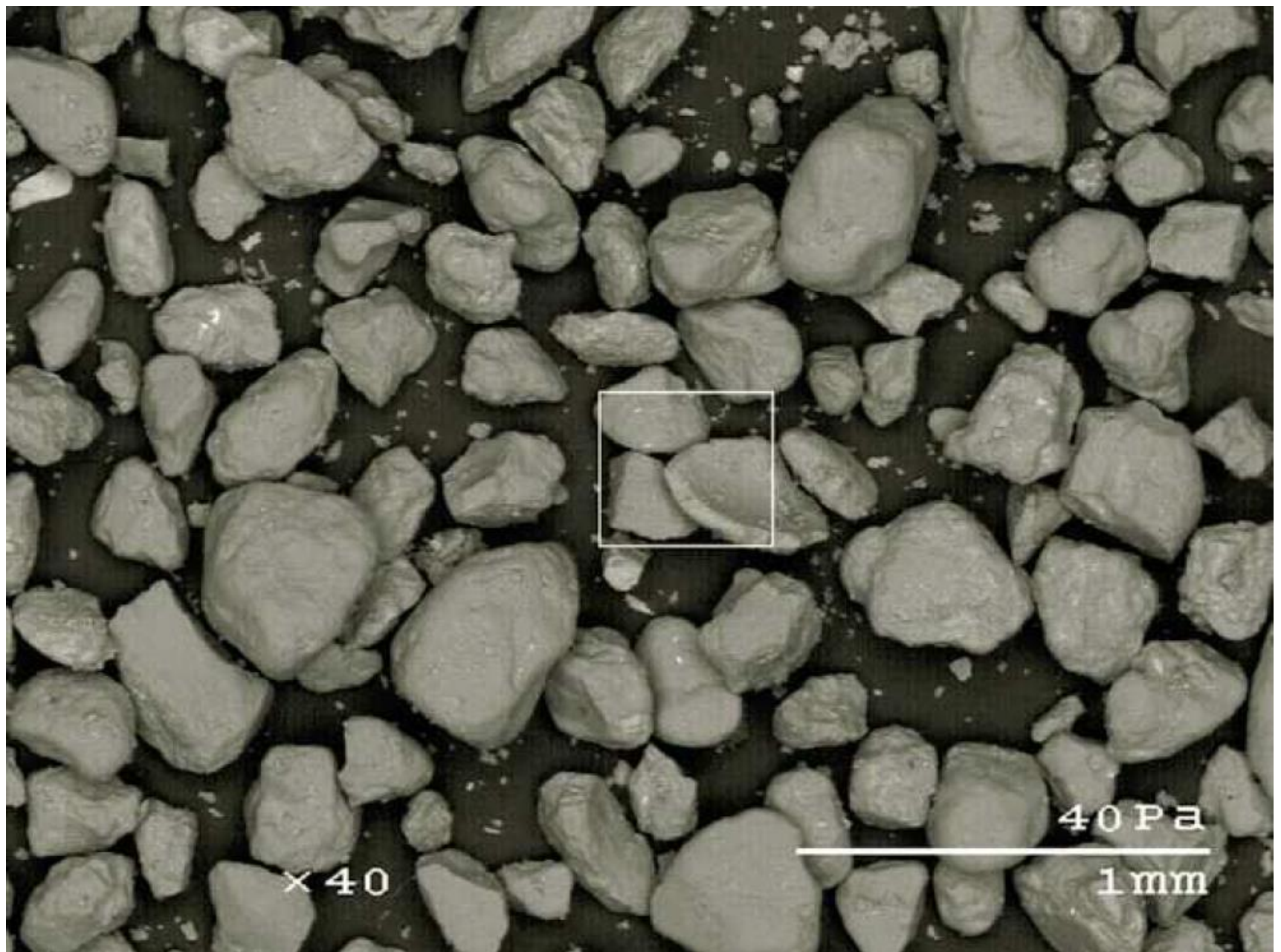
همان طور که در بخش پیش گفته شد، محدوده اندازه ذرات تشکیل دهنده خاک بسیار وسیع است. خاک بسته به اندازه غالب ذرات تشکیل دهنده آن، شن، ماسه، لای یا رس نامیده می‌شود. برای توصیف خاک‌ها به کمک اندازه ذرات آنها، سازمان‌های مختلف طبقه‌بندی ویژه‌ای را برای اندازه ذرات ابداع کرده‌اند. در جدول ۲-۳ طبقه‌بندی اندازه ذرات مربوط به «انجمن Massachusetts Institute of Technology»، «وزارت کشاورزی ایالات متحده»، «انجمن آمریکایی مسئولین حمل و نقل و بزرگراه‌های ایالتی» و «گروه مهندسين ارتش ایالات متحده» به همراه «دفتر آبادانی ایالات متحده» آورده شده است. در این جدول سیستم MIT تنها به منظور نمایش ارائه شده است. این سیستم در تاریخچه تکامل محدوده اندازه ذرات موجود در خاک دارای اهمیت است. با این حال، اکنون «سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک» تقریباً به صورت جهانی پذیرفته شده است و «انجمن آمریکایی آزمایش و مواد - ASTM» نیز آن را قبول کرده است. در شکل ۲-۷ محدوده ذرات به صورت نموداری نشان داده شده است.

جدول ۲-۳ طبقه‌بندی اندازه ذرات.

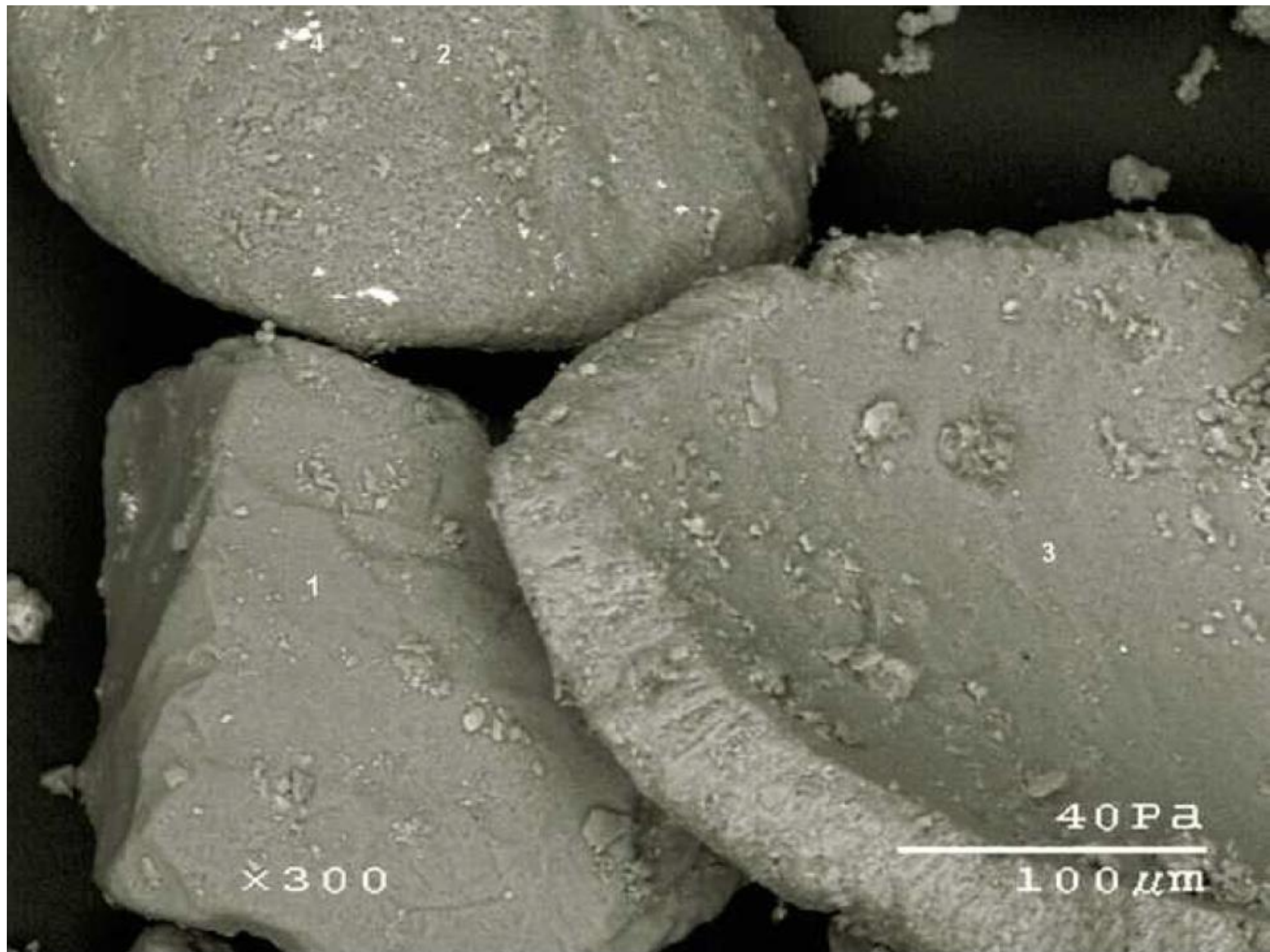
Name of organization	Grain size (mm)			
	Gravel	Sand	Silt	Clay
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 to 0.06	0.06 to 0.002	<0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 to 0.05	0.05 to 0.002	<0.002
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76.2 to 2	2 to 0.075	0.075 to 0.002	<0.002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation, and American Society for Testing and Materials)	76.2 to 4.75	4.75 to 0.075	Fines (i.e., silts and clays) <0.075	

توجه: چشمه الی ۴/۷۵ mm مربوط به الی شماره ۴ آمریکا، چشمه ۲ mm مربوط به الی شماره ۱۰ آمریکا و چشمه ۰/۰۷۵ mm مربوط به الی شماره ۲۰۰ آمریکا است. به جدول ۲-۵ نگاه کنید.

شن عبارت است از خرده سنگ‌های همراه با ذرات اتفاقی کوارتز، فلدسپار و دیگر کانی‌ها. ذرات ماسه بیشتر از کوارتز و فلدسپار تشکیل یافته‌اند. هم‌زمان ممکن است دانه‌های کانی‌های دیگری نیز وجود داشته باشند. در شکل ۲-۸ ریزنگار اسکن شده الکترونی چند دانه ماسه نشان داده شده است. توجه داشته باشید دانه‌های بزرگتر حالت گرد شده دارند که ممکن است از سایش ضمن حمل توسط باد و / یا آبریزش شده باشد. دانه‌های شکلی ۲-۹ تصویب شده، گت دانه‌ها، شکلی ۲-۸ نشان داده شده است و نشانگر چسبیدن ذرات کوچک رس به دانه‌های بزرگتر ماسه است. لایه‌ها بخش میکروسکوپی خاک محسوب می‌شوند که از دانه‌های بسیار ریز کوارتز و برخی ذرات پولکی شکل حاصل از کانی‌های میکادار تشکیل شده‌اند. رس‌ها عمدتاً از ذرات پولکی شکل میکروسکوپی، و ذرات ریز مسکه و سکه، مکا، کانه‌ها، رس و دیگر کانی‌ها تشکیل یافته‌اند.



شکل ۲-۸ ریزنگار اسکن شده الکترونی چند دانه ماسه.



شکل ۲-۹ تصویر بزرگتر دانه‌های ماسه نشان داده شده در شکل ۲-۸.

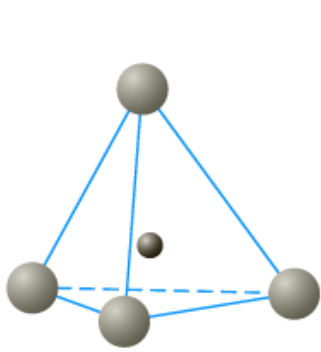
همان طور که در جدول ۲-۳ نشان داده شده است، رس‌ها معمولاً به صورت ذرات کوچکتر از 0.002 mm تعریف می‌شوند. با این حال در برخی موارد، ذرات با اندازه 0.002 تا 0.005 mm نیز به عنوان رس در نظر گرفته می‌شوند. ذراتی که بر اساس اندازه خود به عنوان رس طبقه‌بندی می‌شوند، لزوماً ممکن است دارای کانی‌های رس نباشند. رس‌ها به صورت ذراتی تعریف شده‌اند «که در زمان مخلوط شدن با مقدار محدودی آب، حالت خمیری پیدا می‌کنند» (Grim, 1953). (حالت خمیری، خصوصیت بتونه مانند رس‌های حاوی مقداری آب است.) خاک‌های غیررسی ممکن است دارای ذرات کوارتز، فلدسپار یا میکا با چنان اندازه کوچکی باشند که در گروه رس جای گیرند. به همین جهت مناسب‌تر آن است که ذرات خاک کوچکتر از $2 \mu\text{m}$ یا $5 \mu\text{m}$ تعریف شده در سیستم‌های مختلف، به صورت ذرات هم‌اندازه با رس تعریف شوند تا رس. ذرات رس اغلب در محدوده اندازه کلوئیدی ($1 \mu\text{m} >$) و حد بالایی $2 \mu\text{m}$ قرار دارند.

کانی‌های رس

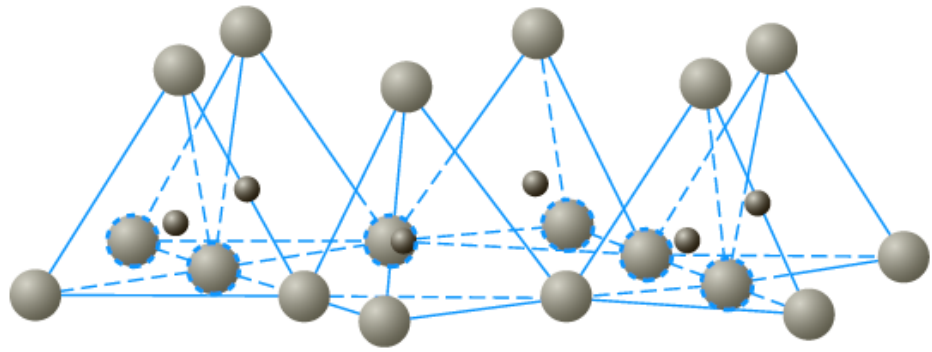
کانی‌های رس، آلومینیم سیلیکات‌های مرکبی متشکل از دو واحد اصلی‌اند: (۱) چهار وجهی سیلیکا و (۲) هشت وجهی آلومین. هر واحد چهار وجهی دارای چهار اتم اکسیژن است که یک اتم سیلیکون را احاطه کرده‌اند (شکل ۲-۱۰-الف). از ترکیب واحدهای چهار وجهی سیلیس، ورق سیلیس ایجاد می‌شود (شکل ۲-۱۰-ب). سه اتم اکسیژن موجود در قاعده هر چهار وجهی مجاور در اشتراک قرار دارند. واحدهای هشت وجهی از شش هیدروکسیل تشکیل یافته‌اند که یک اتم آلومینیم را احاطه کرده‌اند (شکل ۲-۱۰-ج) و از ترکیب واحدهای هشت وجهی، آلومینیم هیدروکسید، کساید هشت وجهی ایجاد می‌شود. (این ترکیب را ورق گیبسیت نیز می‌نامند - شکل ۲-۱۰-د). گاهی در واحدهای هشت وجهی، منیزیم به جای اتم‌های آلومینیم قرار می‌گیرد. در این حالت ورق هشت وجهی را ورق بروسیت می‌نامند.

در ورق سیلیس، هر اتم سیلیکون با بار مثبت چهار به چهار اتم اکسیژن با بار کل منفی هشت پیوند دارد. اما هر اتم اکسیژن موجود در قاعده چهار وجهی به دو اتم سیلیکون متصل است. این بدان مفهوم است که اتم اکسیژن بالایی هر واحد چهار وجهی دارای بار منفی یک است که باید متعادل شود. زمانی که ورق سیلیس به صورت نشان داده شده در شکل ۲-۱۰-هر روی ورق هشت وجهی قرار می‌گیرد، این اتم‌های اکسیژن جای هیدروکسیل‌ها را می‌گیرند تا بار آنها متعادل شود.

از سه کانی مهم رس، کائولینیت (Kaolinite) شامل لایه‌های تکراری ورق‌های بنیادی سیلیس - گیبسیت در شبکه بلوری ۱:۱ است (شکل‌های ۲-۱۱ و ۲-۱۲-الف). هر لایه در حدود $7/2 \text{ \AA}$ ضخامت دارد. لایه‌ها توسط پیوند هیدروژنی در کنار هم می‌مانند. کائولینیت به صورت پلاکت‌هایی با بعد جانبی 1000 \AA تا 20000 \AA و ضخامت 100 \AA تا 1000 \AA است. سطح جرم واحد ذرات کائولینیت به صورت سطح ویژه تعریف می‌شود. در شکل ۲-۱۳ ریزنگار اسکن شده الکترونی نمونه کائولینیت نشان داده شده است.

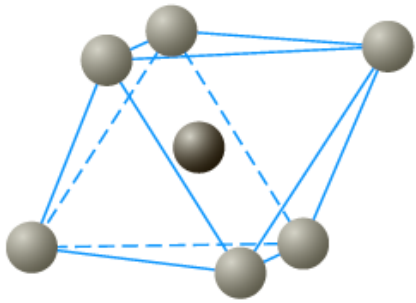


(a)

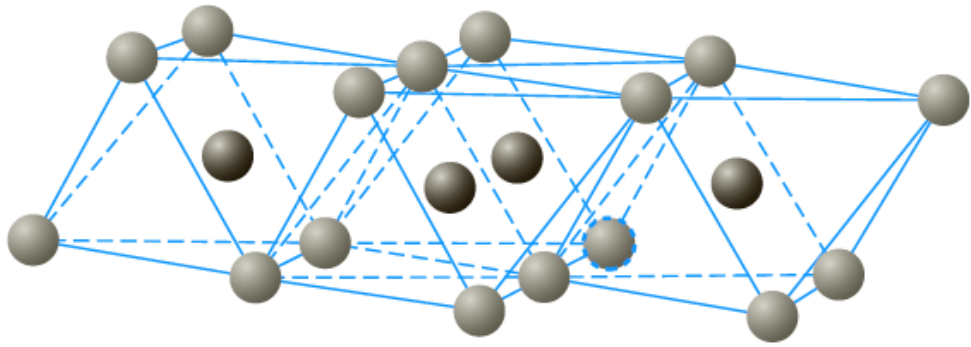


(b)

● Oxygen ● Silicon

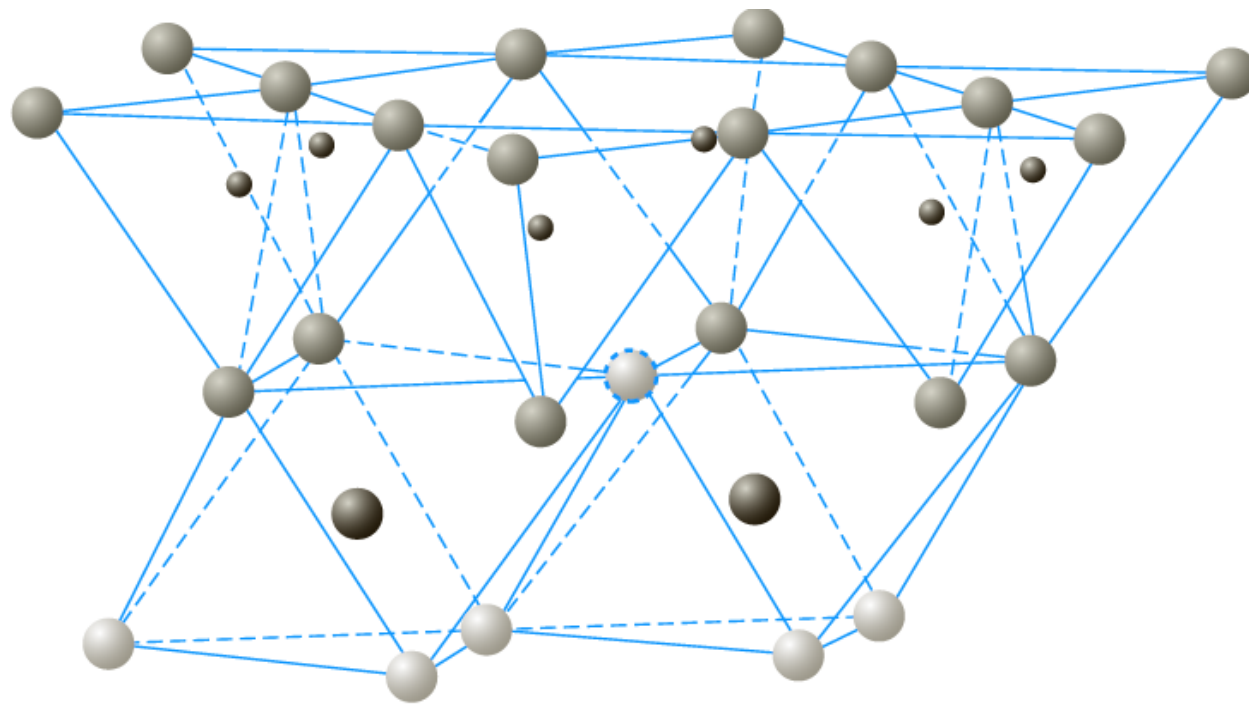


(c)

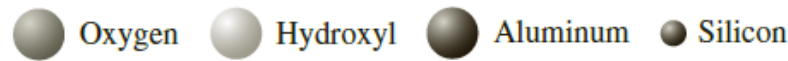


(d)

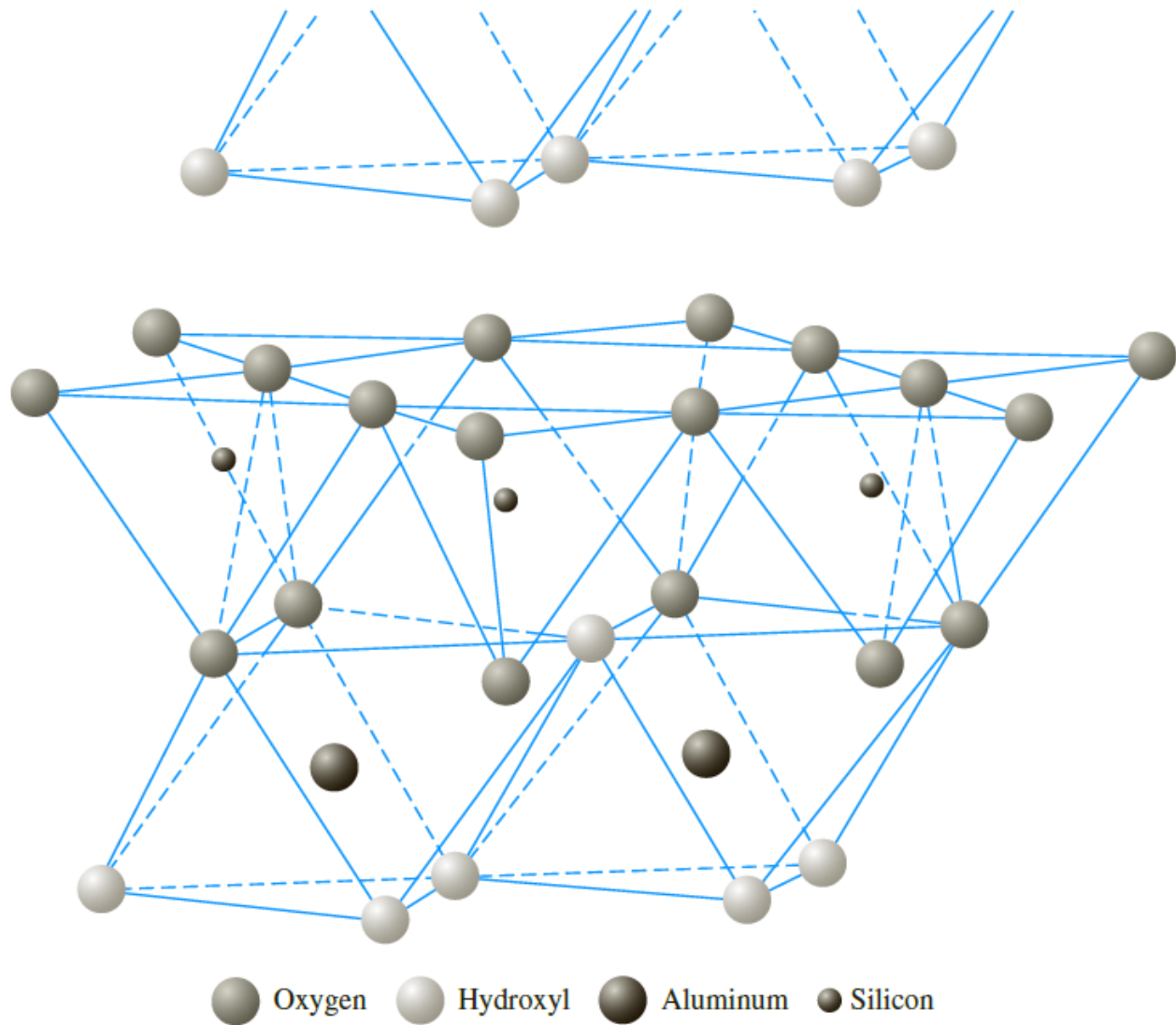
● Hydroxyl ● Aluminum



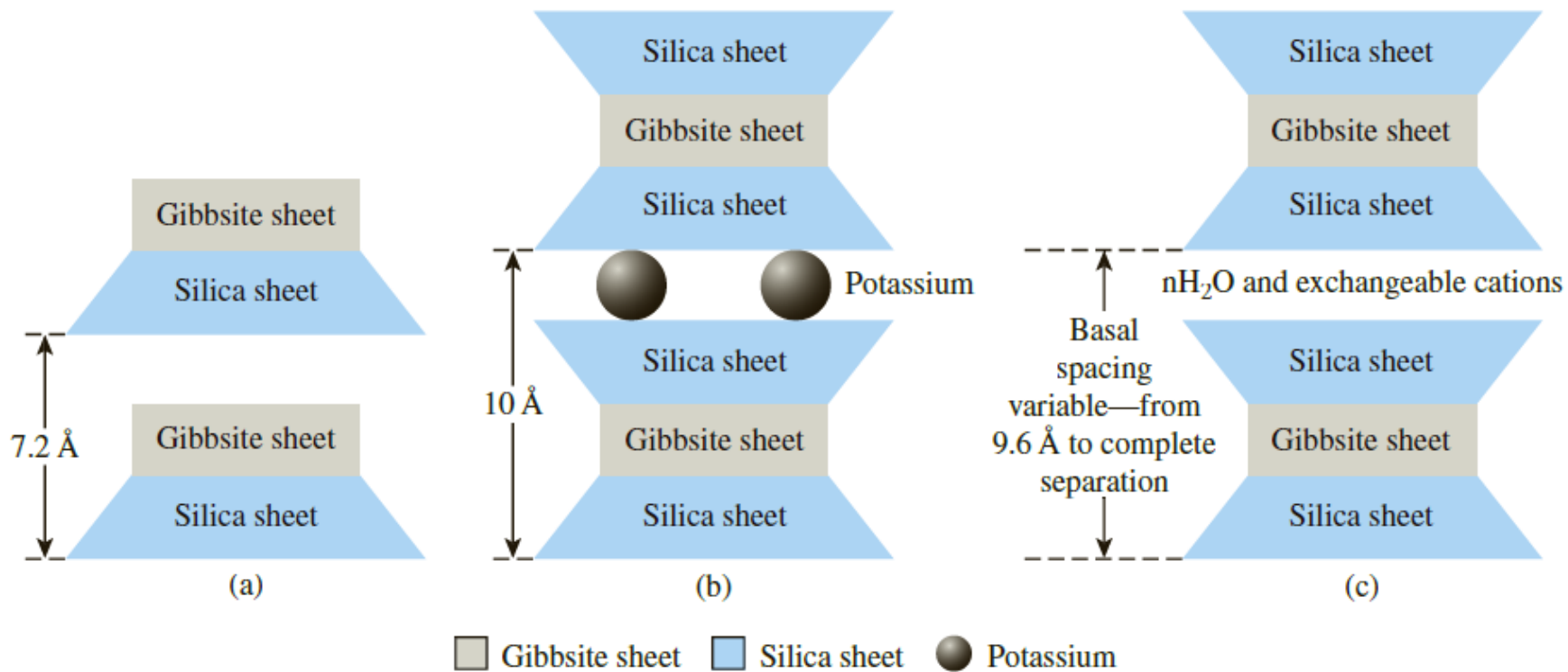
(e)



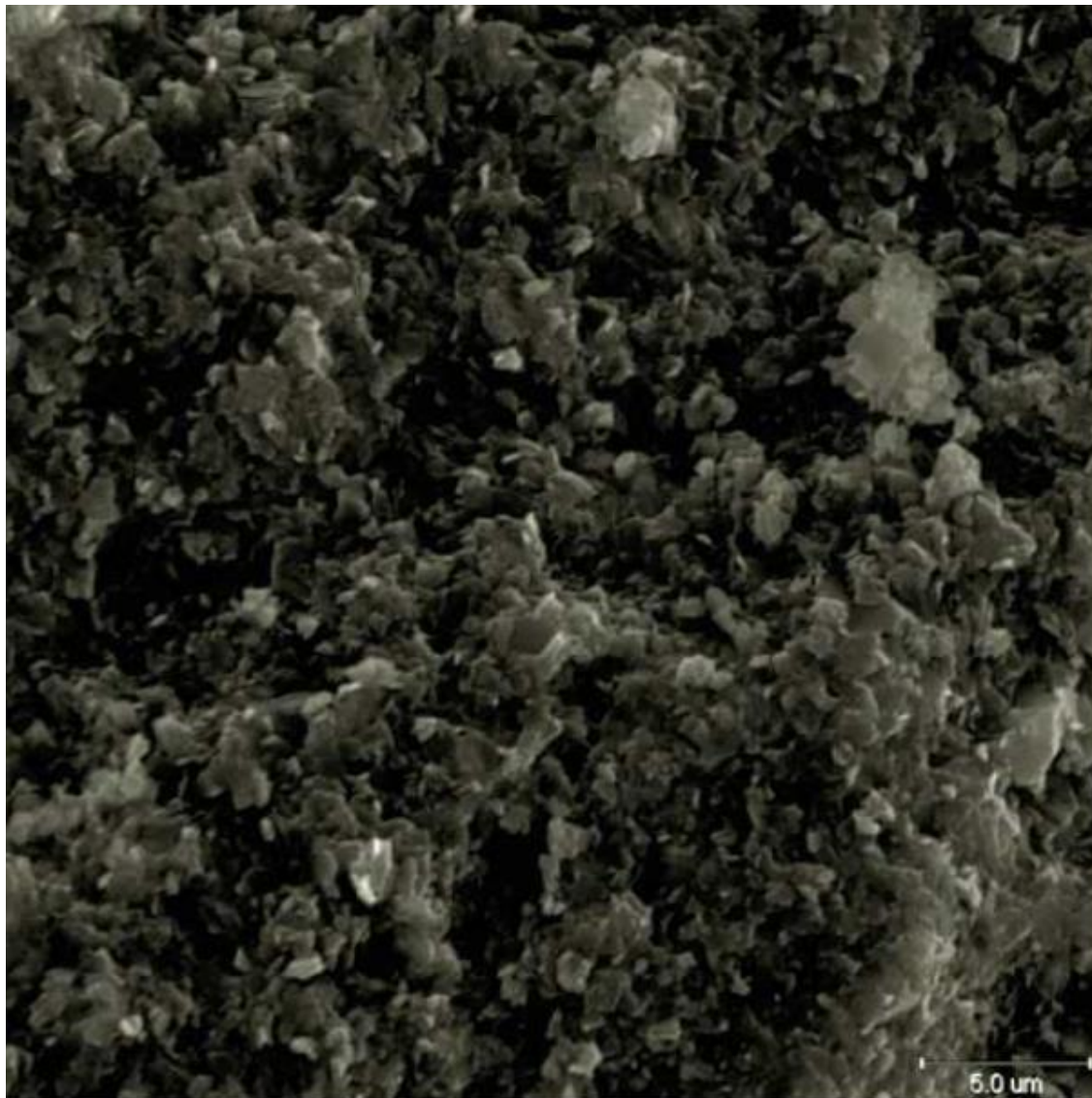
شکل ۲-۱۰ (الف) چهار وجهی سیلیس، (ب) ورق سیلیس، (ج) هشت وجهی آلومین، (د) ورق هشت وجهی (گیبسیت)، (ه) ورق بنیادی سیلیس - گیبسیت (بر اساس Grim، ۱۹۵۹).



شکا . ۱۱-۲ ساختار اتمی کائولینت (ب اساس Grim ، ۱۹۵۹).



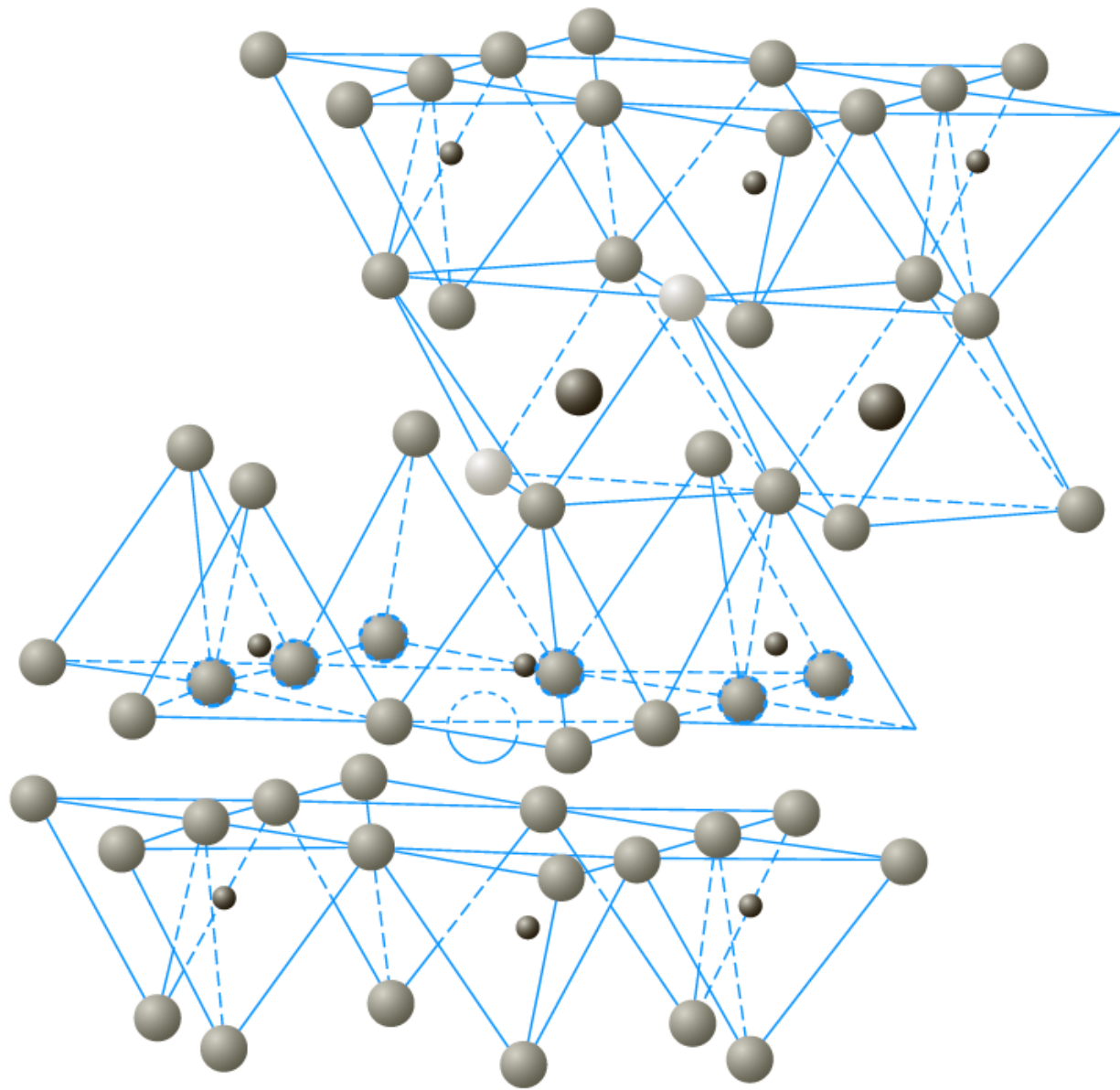
شکل ۲-۱۲ نمودار ساختار (الف) کائولینیت، (ب) ایلیت و (ج) مونت موریلونیت.



شكل ٢-١٣ ريزنگار
أسكن شدة الكتروني
نمونه كاثولينييت.

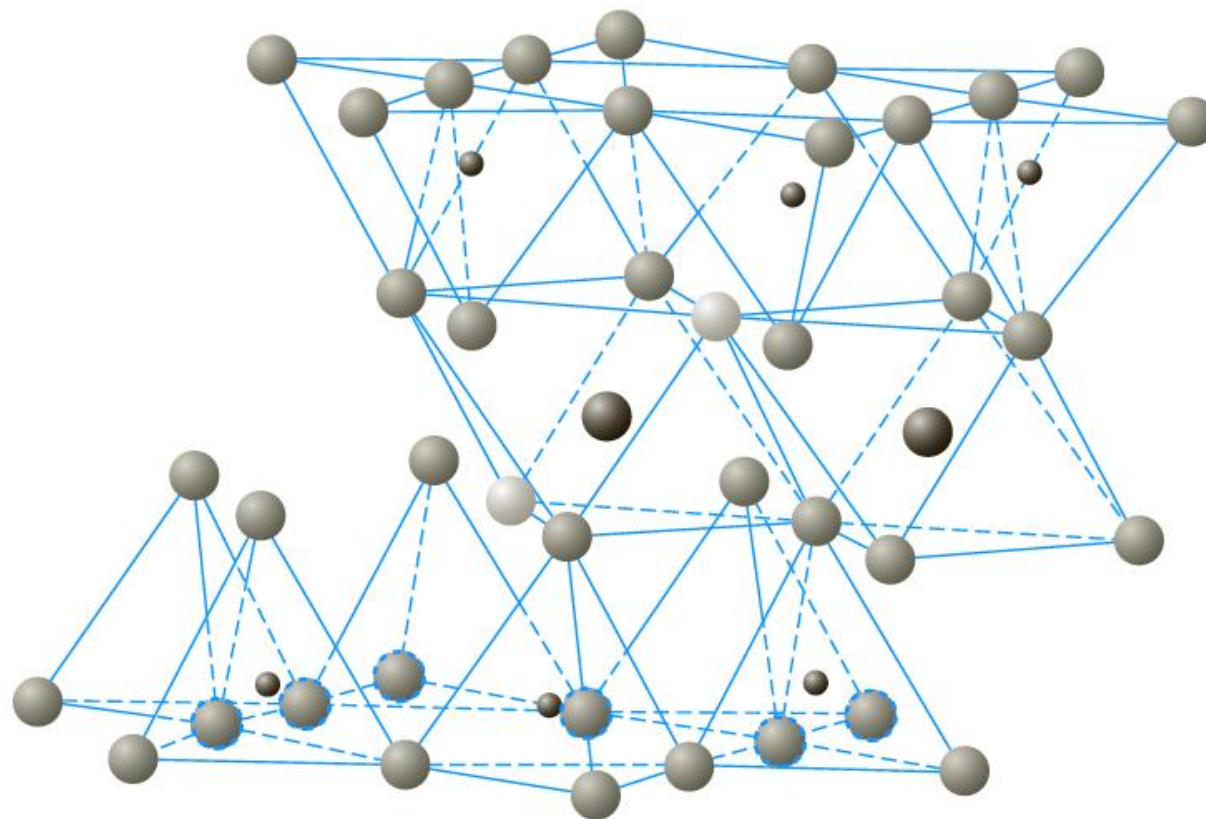
ایلیت (Illite) از ورق گیبسیت متصل به دو ورق سیلیس تشکیل شده است که یکی در بالا و دیگری در پایین قرار دارد. (شکل‌های ۲-۱۴ و ۲-۱۲-ب). این ترکیب گاهی رس میکا نامیده می‌شود. لایه‌های ایلیت به کمک یون‌های پتاسیم به یکدیگر متصل‌اند. بار منفی لازم برای تعادل یون‌های پتاسیم از جایگزین شدن آلومینیم به جای برخی از سیلیکون‌های موجود در ورق‌های چهار وجهی ناشی می‌شود. جانشینی یک عنصر با دیگری بدون تغییری در شکل بلوری، جانشینی ایزومورفی یا همگون نامیده می‌شود. بعد جانبی ذرات ایلیت معمولاً از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ Å و ضخامت آنها از ۵۰ تا ۵۰۰ Å متفاوت است. سطح ویژه ذرات در حدود ۸۰ m²/g است.

مونت موریلونیت (Montmorillonite) ساختاری همچون ایلیت دارد - یعنی یک ورق گیبسیت در بین دو ورق سیلیس (به شکل‌های ۲-۱۵ و ۲-۱۲-ج نگاه کنید). در مونت موریلونیت، منیزیم و آهن به شکل ایزومورفی یا همگون جانشین آلومینیم در ورق‌های هشت وجهی شده‌اند. در این جا همانند ایلیت یون‌های پتاسیم وجود ندارد و مقدار زیادی آب در فضای میان لایه‌ها جذب می‌شود. بعد جانبی ذرات مونت موریلونیت از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ Å و ضخامت آنها از ۱۰ تا ۵۰ Å متفاوت است. سطح ویژه ذرات مونت موریلونیت در حدود ۸۰۰ m²/g است.



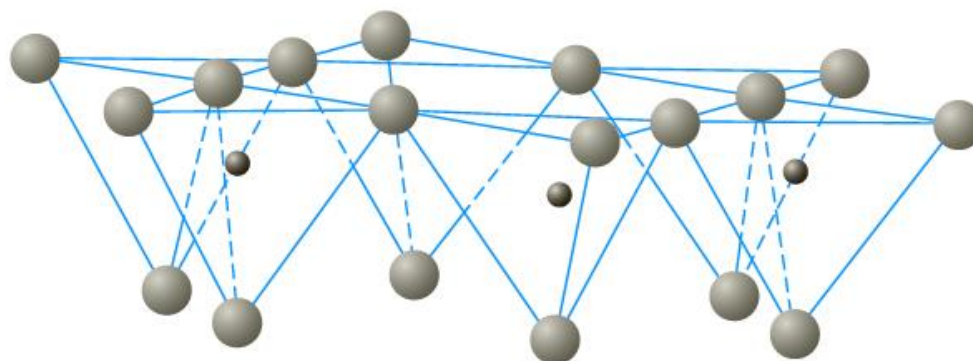
Oxygen
 Hydroxyl
 Aluminum
 Potassium
 Silicon

شکل ۲-۱۴ ساختار اتمی ایلیت.



Exchangeable cations
 nH_2O

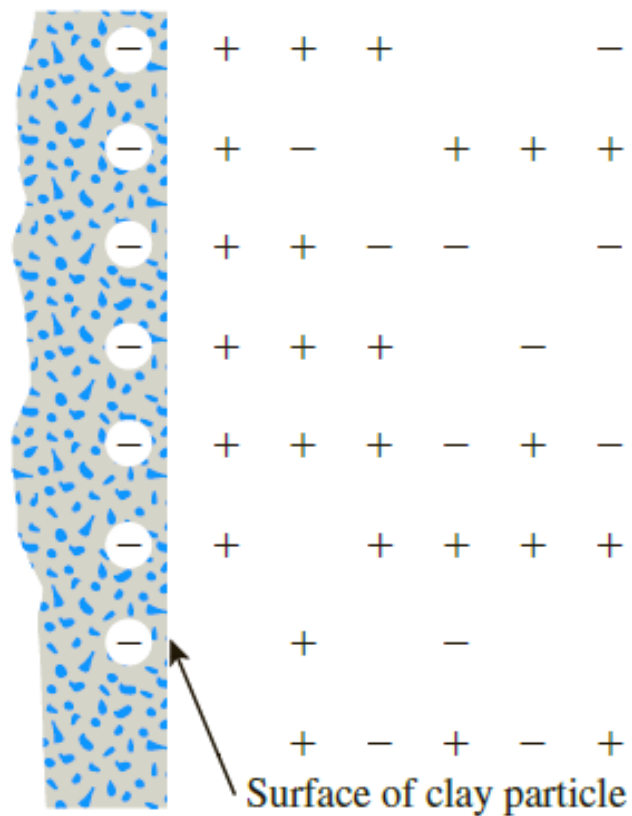
شکل ۲-۱۵ ساختار اتمی مونت موریلونیت (بر اساس Grim ، ۱۹۵۹).



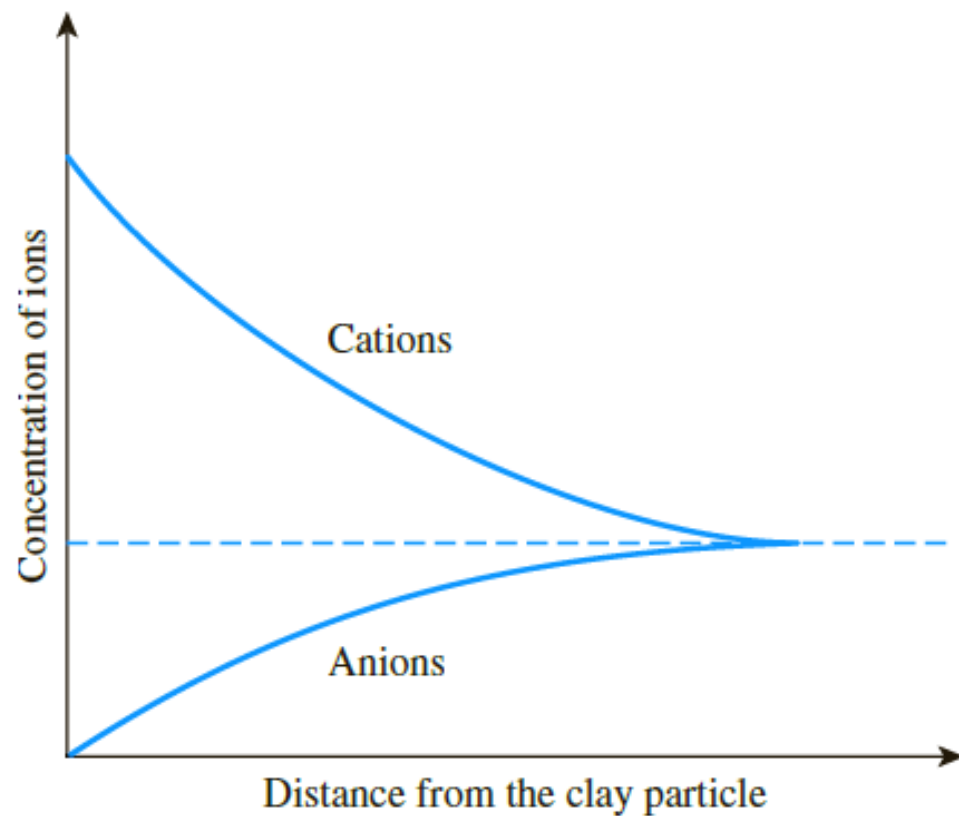
Oxygen
 Hydroxyl
 Aluminum, iron, magnesium
 Silicon, occasionally aluminum

در سطح ذرات رس بار منفی خالص وجود دارد. این موضوع به هر دو دلیل جانشینی ایزومورفی یا همگون و شکستگی پیوستگی ساختار آنها در لبه‌ها است. بارهای منفی بزرگتر از سطوح ویژه بزرگتر ناشی می‌شوند. همچنین در لبه ذرات نواحی با بار مثبت وجود دارد. در زیر فهرستی از معکوس چگالی سطحی متوسط بار منفی روی سطوح برخی از کانی‌های رس آورده شده است (Warkentin و Yong، ۱۹۶۶).

در رس خشک، بار منفی با کاتیون‌های قابل تعویض مانند Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ و K^+ متعادل می‌شود که ذرات نگه داشته شده با جاذبه الکترواستاتیکی را احاطه کرده‌اند. زمانی که آب به رس اضافه می‌شود، این کاتیون‌ها و چند آنیون در اطراف ذرات رس شناور می‌شوند. به این حالت لایه مضاعف پراکنده گفته می‌شود (شکل ۲-۱۷-الف). تمرکز کاتیون‌ها با افزایش فاصله از سطح ذره کاهش پیدا می‌کند (شکل ۲-۱۷-ب).



(a)



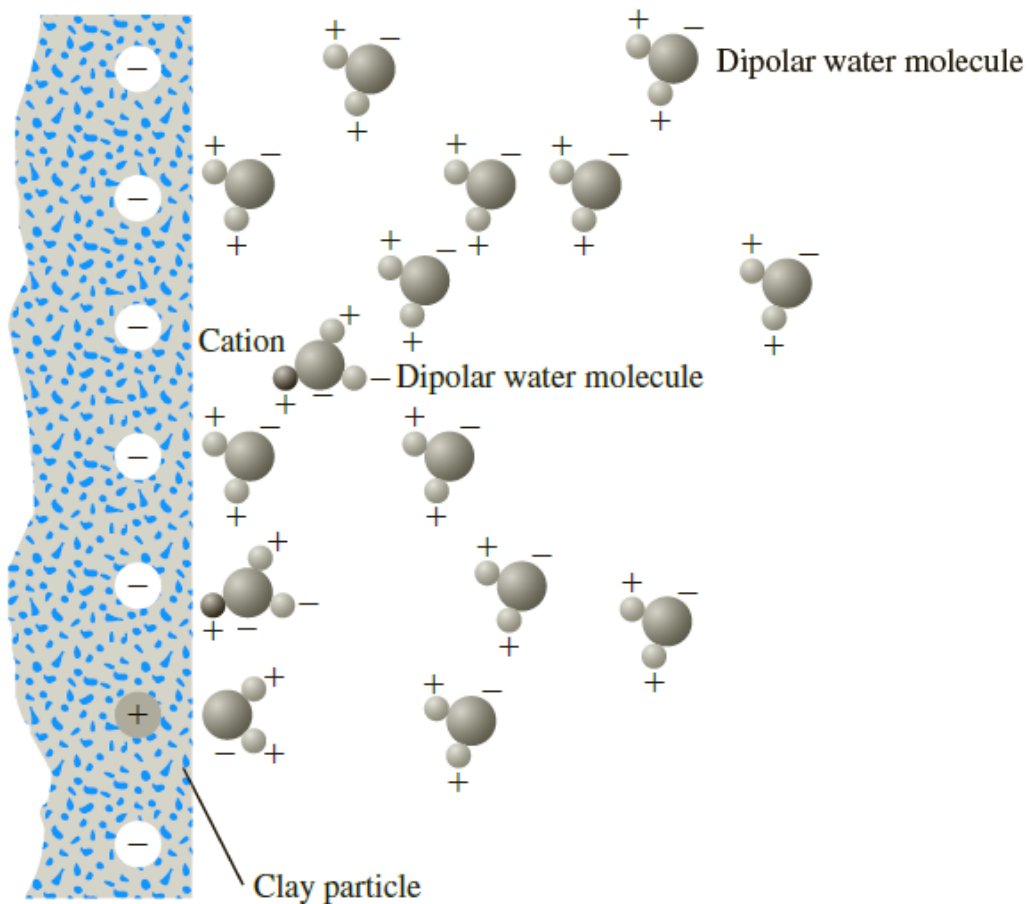
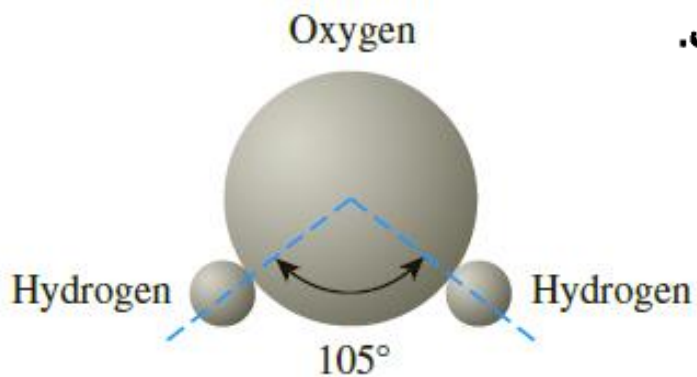
(b)

شکل ۲-۱۷ لایه مضاعف پراکنده.

مولکول‌های آب قطبی‌اند. آرایش اتم‌های هیدروژن در اطراف اتم اکسیژن حالت متقارن ندارد و در عوض زاویهٔ میان پیوندهای آنها 105° است (شکل ۲-۱۸). در نتیجه مولکول آب در یک سمت بار مثبت و در سمت دیگر بار منفی دارد. این شکل مولکول را دو قطبی می‌نامند.

مولکول‌های دو قطبی آب توسط سطح باردار منفی ذرات رس و کاتیون‌های موجود در لایهٔ مضاعف جذب می‌شوند. کاتیون‌ها به نوبهٔ خود جذب ذرات خاک می‌شوند. مکانیزم سوم جذب آب توسط ذرات رس، پیوند هیدروژنی است که در این حالت اتم‌های هیدروژن موجود در مولکول‌های آب با اتم‌های اکسیژن روی سطح رس اشتراک پیدا می‌کنند. برخی از کاتیون‌های کمی هیدراته شدهٔ موجود در آب منفذی نیز جذب سطح ذرات رس می‌شوند. این کاتیون‌ها مولکول‌های دو قطبی، آب را جذب می‌کنند. در شکل ۲-۱۹ تمامی این مکانیزم‌های ممکن جذب آب توسط رس نشان داده شده‌اند. نیروی جاذبهٔ میان آب و رس با افزایش فاصله از سطح ذرات کاهش پیدا می‌کند. کل آبی که نیروی جاذبه در ذرات رس نگه می‌دارد، با عنوان آب لایهٔ مضاعف شناخته می‌شود. داخلی‌ترین لایه آب لایهٔ مضاعف که به شدت توسط رس نگه داشته می‌شود، آب جذب شده نام دارد. گرانیروی این آب از آب آزاد بیشتر است.

شکل ۲-۱۸ ویژگی دو قطبی آب.



شکل ۲-۱۹ جذب مولکولهای آب دو قطبی در لایه مضاعف آب خاک

چگالی (G_s)

چگالی به صورت نسبت وزن مخصوص یک ماده معین به وزن مخصوص آب تعریف می‌شود. اغلب برای محاسبات مختلف در مکانیک خاک به چگالی بخش جامد خاک احتیاج است. چگالی را به دقت می‌توان در آزمایشگاه تعیین کرد. در جدول ۲-۴ چگالی برخی از کانی‌های متداول موجود در خاک‌ها آورده شده است. اکثر مقادیر جدول در محدوده $2/6$ تا $2/9$ قرار دارند. چگالی بخش جامد ماسه روشن رنگ را که بیشتر از کوارتز تشکیل شده است، می‌توان در حدود $2/65$ تخمین زد. برای خاک‌های رس‌دار و لای‌دار، این مقدار از $2/6$ تا $2/9$ متفاوت است.

جدول ۲-۴ چگالی کانی‌های معمول.

چگالی، G_s	کانی
$2/65$	کوارتز (Quartz)
$2/6$	کائولینیت (Kaolinite)
$2/8$	ایلیت (Illite)
$2/65-2/80$	مونت موریلونیت (Montmorillonite)
$2-2/55$	هالویسیت (Halloysite)
$2/57$	پتاسیم فلدسپار (Potassium feldspar)
$2/62-2/76$	سدیم و کلسیم فلدسپار (Sodium & calcium feldspar)
$2/6-2/9$	کلریت (Chlorite)
$2/8-3/2$	بیوتیت (Biotite)
$2/76-3/1$	موسکوویت (Moscovite)
$3-3/47$	هورن بلند (Hornblende)
$3/6-4$	لیمونیت (Limonite)
$3/27-3/7$	اولیوین (Olivine)

دانه‌بندی با الک

تجزیه یا دانه‌بندی با الک یعنی لرزاندن نمونه خاک بر روی مجموعه‌ای از الک‌ها که چشمه آنها به تدریج کوچک و کوچکتر می‌شود. در جدول ۲-۵ شماره الک‌های استاندارد ایالات متحده و اندازه چشمه آنها آورده شده است.

الک‌های مورد استفاده دانه‌بندی خاک معمولاً ۲۰۳ mm قطر دارند. برای انجام دانه‌بندی با الک نخست باید خاک را در کوره خشک کرد و تمامی کلوخه‌ها را به صورت ذرات کوچکتر خرد نمود. سپس خاک را بر روی مجموعه‌ای از الک‌های روی هم لرزاند، الک‌هایی که اندازه چشمه آنها از بالا به پایین کاهش پیدا می‌کند (در زیر این مجموعه الک یک تابه وجود دارد). در شکل ۲-۲۱ مجموعه الک‌های قرار داده شده در دستگاه لرزاننده برای انجام آزمون آزمایشگاهی نشان داده شده است. کوچکترین اندازه الکی که باید برای این نوع آزمایش به کار برد، الک شماره ۲۰۰ ایالات متحده است. پس از لرزاندن خاک، جرم خاک باقی‌مانده بر روی هر الک تعیین می‌شود. در زمان تجزیه یا دانه‌بندی کردن خاک‌های چسبنده ممکن است خرد کردن کلوخه‌ها به صورت ذرات منفرد دشوار باشد. در این حالت می‌توان با مخلوط کردن خاک با آب آن را به دوغاب تبدیل کرد و سپس آن را از الک عبور داد. در مرحله بعد، بخش باقی‌مانده روی هر الک به صورت جداگانه جمع‌آوری شده و پیش از تعیین جرم خاک باقی‌مانده روی هر الک، آن را در کوره خشک می‌کنند.

جدول ۲-۵ اندازه الک‌های استاندارد ایالات متحده.

اندازه چشمه (mm)	شماره الک	اندازه چشمه (mm)	شماره الک
۰/۵۰۰	۲۵	۴/۷۵	۴
۰/۴۲۵	۴۰	۴/۰۰	۵
۰/۳۵۵	۵۰	۳/۳۵	۶
۰/۲۵۰	۶۰	۲/۸۰	۷
۰/۲۱۲	۷۰	۲/۳۶	۸
۰/۱۸۰	۸۰	۲/۰۰	۱۰
۰/۱۵۰	۱۰۰	۱/۷۰	۱۲
۰/۱۲۵	۱۲۰	۱/۴۰	۱۴
۰/۱۰۶	۱۴۰	۱/۱۸	۱۶
۰/۰۹۰	۱۷۰	۱/۰۰	۱۸
۰/۰۷۵	۲۰۰	۰/۸۵۰	۲۰
۰/۰۵۳	۲۷۰	۰/۷۱۰	۲۵
		۰/۶۰۰	۳۰



شکل ۲-۲۱ مجموعه الک‌های مورد استفاده در آزمون آزمایشگاهی.

۱- تعیین جرم خاک باقی مانده روی هر الک (یعنی M_1, M_2, \dots, M_n) و درون تابه (یعنی M_p).

۲- تعیین جرم کل خاک: $M_1 + M_2 + \dots + M_i + \dots + M_n + M_p = \Sigma M$.

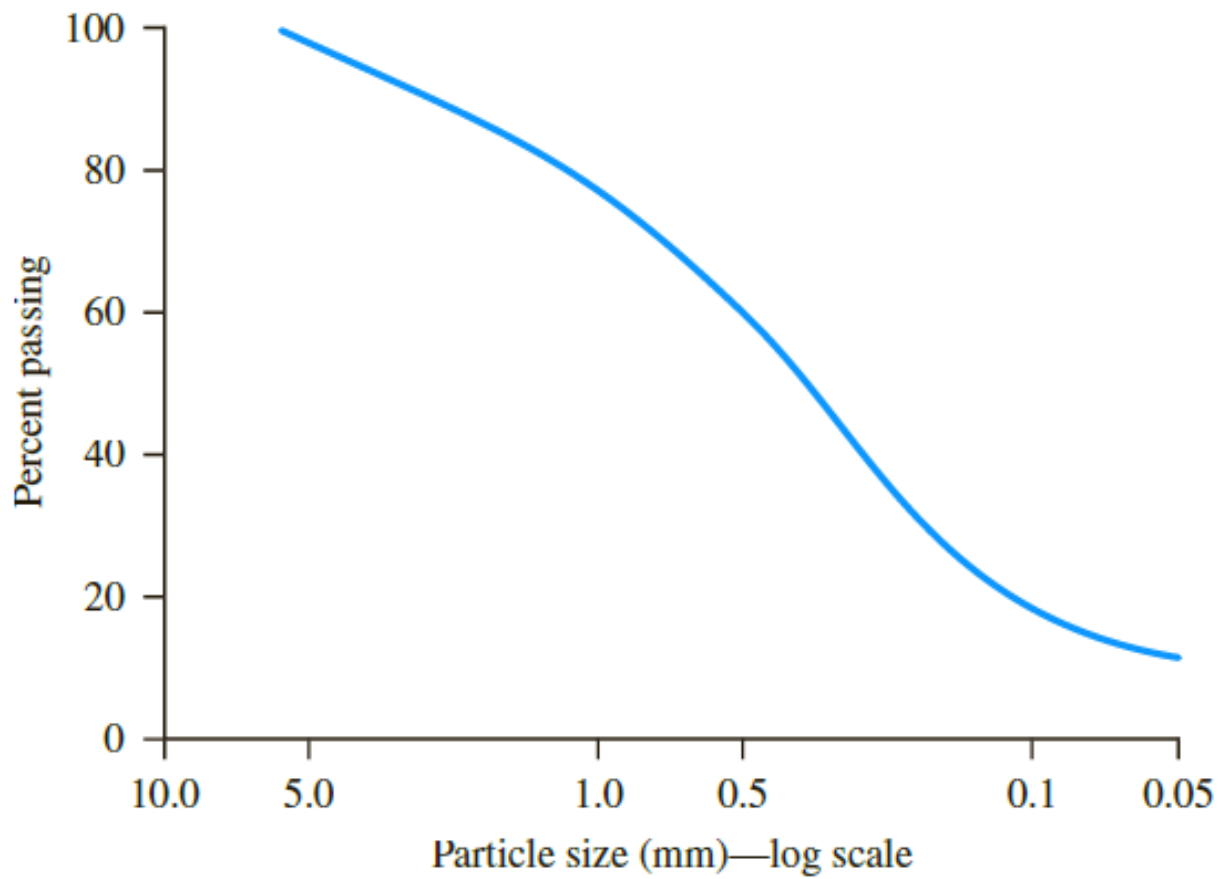
۳- تعیین جرم انباشته خاک باقی مانده روی هر الک. این جرم انباشته برای الک i ام عبارت است از: $M_1 + M_2 + \dots + M_i$.

۴- جرم خاک عبوری از الک i ام برابر است با: $\Sigma M - (M_1 + M_2 + \dots + M_i)$.

۵- درصد خاک عبوری از الک i ام (یا درصد ریزتر) عبارت است از:

$$F = \frac{\Sigma M - (M_1 + M_2 + \dots + M_i)}{\Sigma M} \times 100$$

پس از محاسبه درصد عبوری یا ریزتر هر الک (گام ۵)، نتیجه محاسبات بر روی یک کاغذ نمودار نیمه لگاریتمی ترسیم می شود (شکل ۲-۲۲) که در این حالت درصد عبوری روی محور عرض ها (مقیاس حسابی) و اندازه چشمه الک روی محور طول ها (مقیاس لگاریتمی) آورده می شود. به این نمودار منحنی دانه بندی گفته می شود.



شکل ۲-۲۲ منحنی دانه بندی.

تجزیه با چگالی سنج

تجزیه خاک با چگالی سنج بر اساس اصل ته نشینی دانه های خاک در آب انجام می شود. زمانی که نمونه خاک در آب پراکنده می شود، ذرات آن بسته به شکل، اندازه و وزن خود و گرانیروی آب با سرعت های متفاوتی ته نشین می شوند. از نظر سادگی، تمامی ذرات خاک کروی فرض می شوند و سرعت ذرات خاک را می توان به کمک قانون Stokes به صورت زیر بیان کرد:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \quad (1-2)$$

که در این جا: v = سرعت

ρ_s = جرم مخصوص ذرات خاک

ρ_w = جرم مخصوص آب

η = گرانیروی آب

D = قطر ذرات خاک.

بنابراین از معادله (۱-۲) داریم:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta v}{\rho_s - \rho_w}} = \sqrt{\frac{18\eta}{\rho_s - \rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (2-2)$$

که در این جا: $v = \frac{\text{فاصله}}{\text{زمان}} = \frac{L}{t}$

توجه داشته باشید که:

$$\rho_s = G_s \rho_w \quad (3-2)$$

بنابراین از ترکیب معادلات (۲-۲) و (۳-۲) نتیجه می‌شود:

$$D = \sqrt{\frac{18 \eta}{(G_s - 1) \rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4-2)$$

در صورتی که واحدهای η بر حسب $(g.s)/cm^2$ ، ρ_w بر حسب g/cm^3 ، L بر حسب cm ، t بر حسب min و D بر حسب mm باشد، داریم:

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

یا

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

با فرض آن که ρ_w تقریباً برابر با $1 g/cm^3$ باشد، داریم:

$$D(mm) = K \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}} \quad (5-2)$$

که در این جا:

$$K = \sqrt{\frac{30 \cdot \eta}{(G_s - 1)}}$$

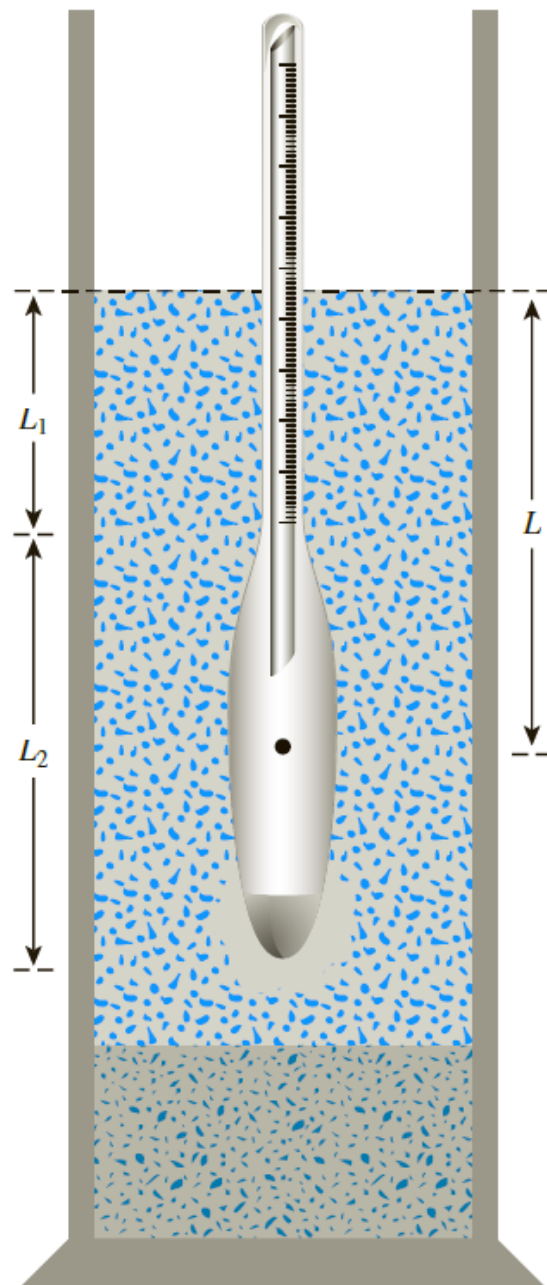
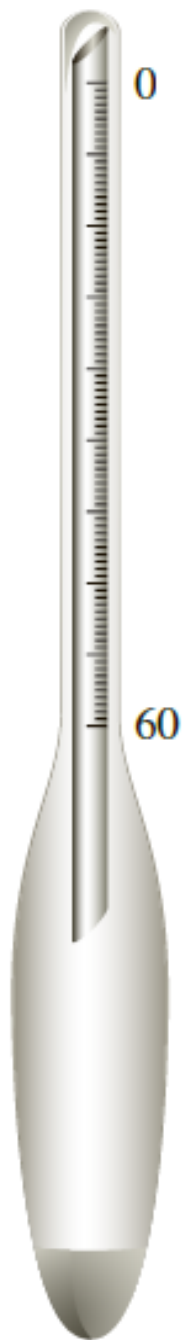
(۶-۲)

توجه داشته باشید که مقدار K تابعی است از G_s و η که به دمای آزمایش بستگی دارد. در جدول ۶-۲ تغییرات K نسبت به دمای آزمایش و چگالی بخش جامد خاک ارائه شده است. در آزمایشگاه، آزمون چگالی سنجی در استوانه ته‌نشینی و معمولاً با نمونه خاک خشک شده در کوره به وزن ۵۰ g انجام می‌شود. گاهی از نمونه‌هایی به وزن ۱۰۰ g نیز می‌توان استفاده کرد. استوانه ته‌نشینی ۴۵۷ mm ارتفاع و ۶۳/۵ mm قطر دارد. بر روی استوانه، حجم ۱۰۰۰ ml نشانه‌گذاری شده است. معمولاً از سدیم هگزامتافسفات به عنوان عامل پراکنده ساز استفاده می‌شود. حجم محلول تعلیق یا سوسپانسیون خاک پراکنده شده با افزودن آب مقطر به ۱۰۰۰ ml افزایش داده می‌شود. در شکل ۲-۲۳ چگالی سنج نوع ASTM 152H نشان داده شده است.

جدول ۶-۲ مقادیر K با استفاده از معادله (۶-۲)*.

Temperature (°C)	G_s							
	2.45	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	0.01309	0.01291
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

*After ASTM (2014). Copyright ASTM INTERNATIONAL. Reprinted with permission.



شکل ۲-۲۳ چگالی سنج ASTM 152H.

شکل ۲-۲۴ تعریف L در آزمایش چگالی سنجی.

با قرار دادن چگالی سنج در محلول تعلیق یا سوسپانسیون خاک در زمان t که از شروع ته نشینی اندازه‌گیری می‌شود، چگالی سنج چگالی را در مجاورت حباب خود در عمق L اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۲-۲۴). چگالی تابعی است از مقدار ذرات خاک موجود در واحد حجم محلول تعلیق در آن عمق. همچنین در زمان t ، قطر ذرات خاک موجود در محلول تعلیق در عمق L کوچکتر از قطر D محاسبه شده از روی معادله (۲-۵) خواهد بود. ذرات بزرگتر فراتر از ناحیه اندازه‌گیری ته نشین می‌شوند. چگالی سنج‌ها طوری طراحی شده‌اند که مقدار خاک هنوز موجود در محلول تعلیق را بر حسب گرم به دست دهند. چگالی سنج‌ها برای خاک‌های با چگالی $G_s = 2/65$ کالیبره یا واسنجی شده‌اند. برای خاک‌های با چگالی متفاوت باید اصلاحی انجام داد.

با دانستن مقدار خاک موجود در محلول تعلیق و همین‌طور L و t ، می‌توان درصد وزنی خاک ریزتر از یک قطر معین را محاسبه کرد. توجه داشته باشید که L عمق اندازه‌گیری شده از سطح آب تا گرانیگاه حباب چگالی سنج است که چگالی محلول تعلیق در آن نقطه اندازه‌گیری می‌شود. مقدار L با زمان t تغییر می‌کند. روش تجزیه با چگالی سنج برای جداسازی بخش کوچکتر از تقریباً $0.5 \mu\text{m}$ خاک مؤثر است.

مقدار L (cm) مربوط به چگالی سنج ASTM 152H را می‌توان با عبارت زیر بیان کرد (به شکل ۲-۲۴ نگاه کنید):

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left(L_2 - \frac{V_B}{A} \right) \quad (7-2)$$

که در این جا: L_1 = فاصله در امتداد بدنه چگالی سنج از بالای حباب تا نشانه قرائت چگالی سنج (cm)

$$L_2 = \text{طول حباب چگالی سنج} = 14 \text{ cm}$$

$$V_B = \text{حجم حباب چگالی سنج} = 67 \text{ cm}^3$$

$$A = \text{سطح مقطع استوانه ته نشینی} = 27/8 \text{ cm}^2$$

مقدار L_1 برای قرائت $R = 0$ برابر با $10/5 \text{ cm}$ و برای قرائت $R = 50$ برابر با $2/3 \text{ cm}$ است. بدین

ترتیب برای هر قرائت R داریم:

$$L_1 = 10/5 - \frac{(10/5 - 2/3)}{50} R = 10/5 - 0/164 R \text{ (cm)}$$

بنابراین از معادله (۷-۲) نتیجه می‌شود:

$$L = 10/5 - 0/164 R + \frac{1}{2} \left(14 - \frac{67}{27/8} \right) = 16/29 - 0/164 R \quad (8-2)$$

که در این جا: R = قرائت اصلاح شده چگالی سنج به دلیل انحنای سطح سیال.

منحنی دانه‌بندی

از منحنی دانه‌بندی می‌توان برای تعیین چهار پارامتر یک خاک معین استفاده کرد (شکل ۲-۲۶):

- ۱- **اندازه مؤثر** (D_{10}): این پارامتر، قطری از منحنی دانه‌بندی است که ۱۰٪ ذرات از آن ریزتراند. اندازه مؤثر یک خاک دانه‌ای برای تخمین ضریب نفوذپذیری و زهکشی خاک معیار خوبی محسوب می‌شود.

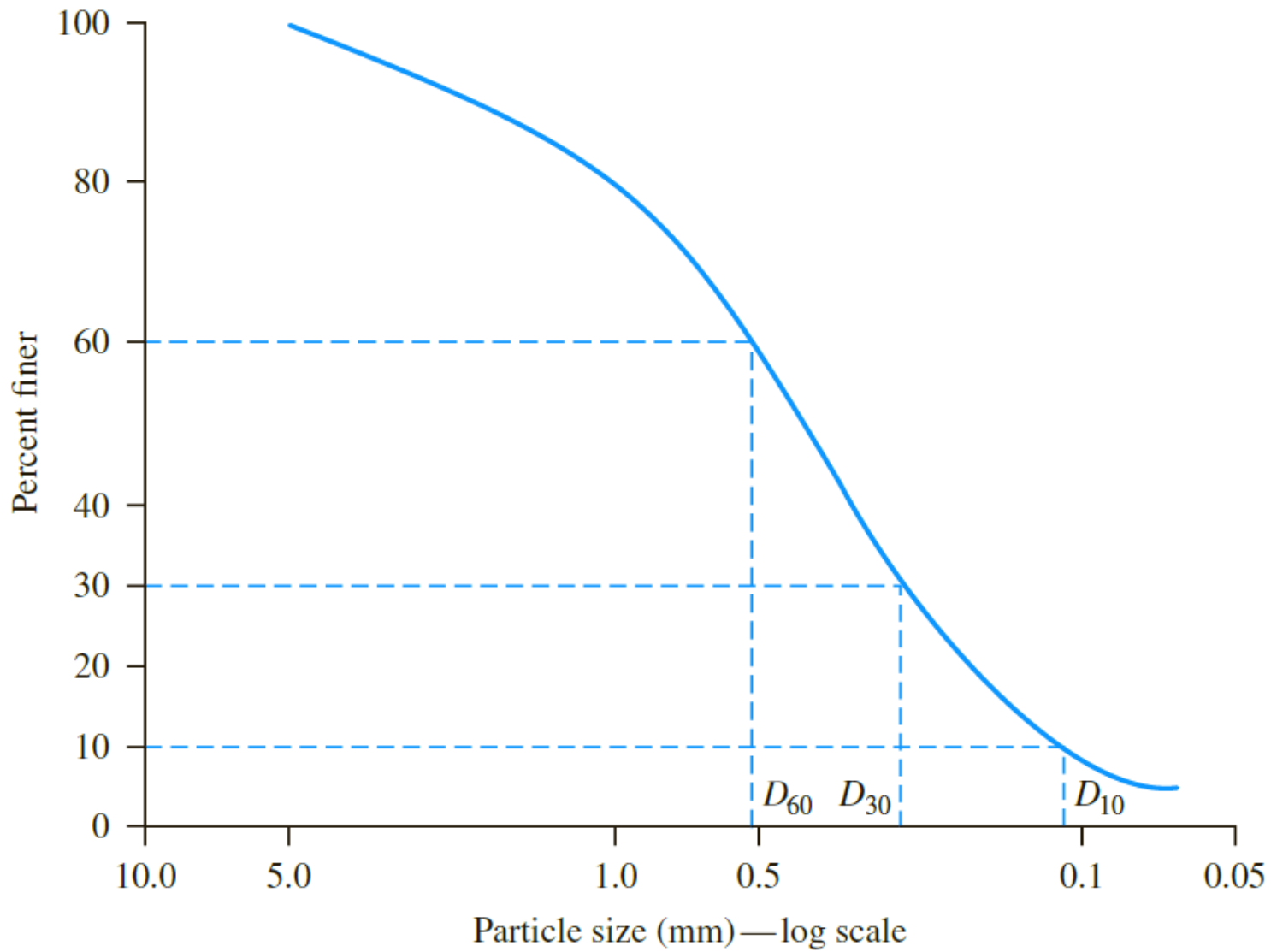
۲- **ضریب یکنواختی** (C_u): این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (۹-۲)$$

که در این جا: D_{60} = قطری که ۶۰٪ ذرات خاک از آن ریزتراند.

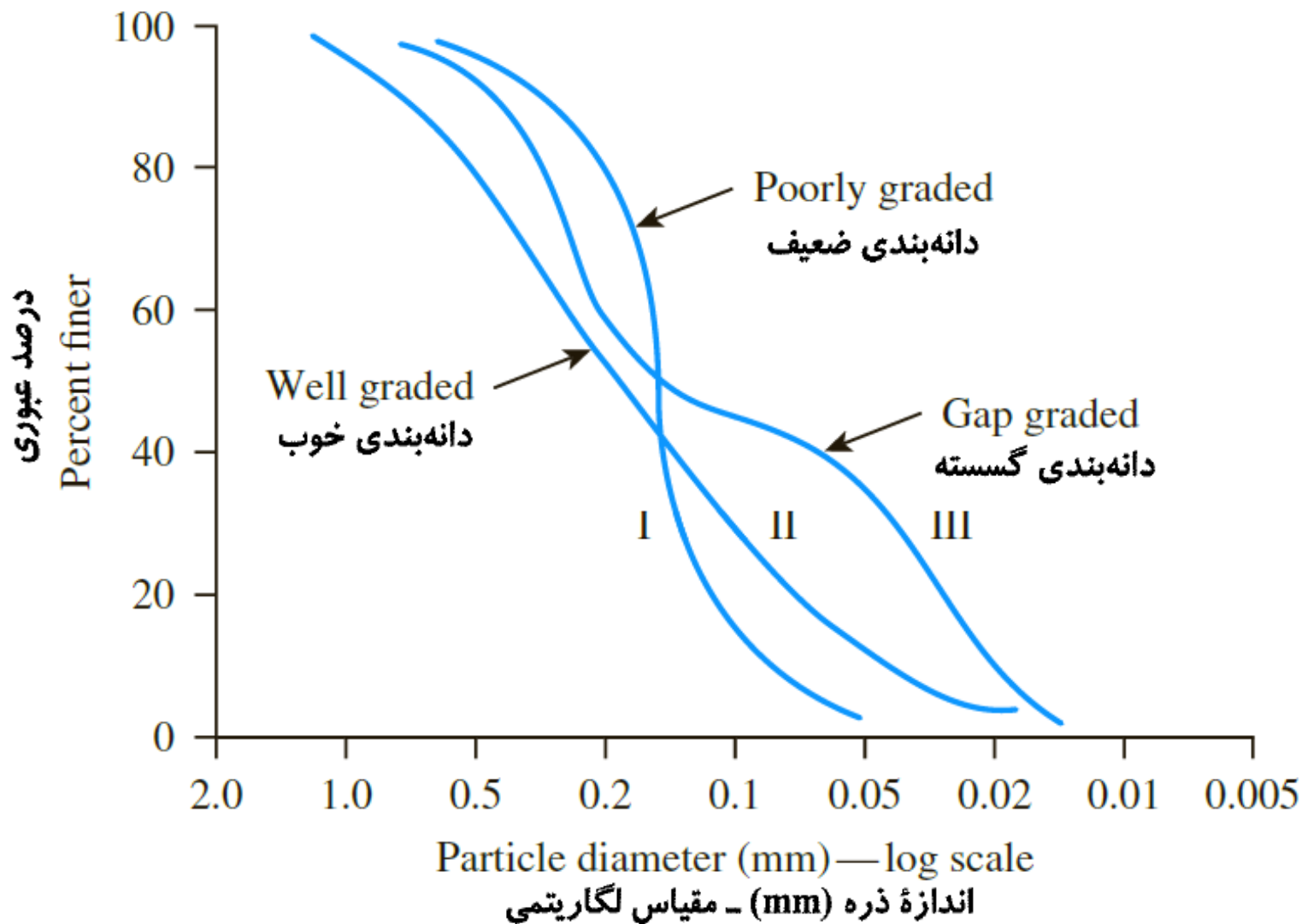
۳- **ضریب دانه‌بندی یا ضریب خمیدگی** (C_c): این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

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



شکل ۲-۲۶ تعریف D_{10} ، D_{25} ، D_{30} ، D_{60} ، و D_{75} .

منحنی دانه‌بندی نه تنها محدودهٔ اندازهٔ ذرات موجود در خاک، بلکه نوع توزیع اندازهٔ ذرات را نیز نشان می‌دهد. در شکل ۲-۲۷ انواع مختلف منحنی‌های دانه‌بندی نشان داده شده است. منحنی I نشانگر نوعی خاک است که اکثر دانه‌های آن هم‌اندازه‌اند. این خاک را خاک با *دانه‌بندی ضعیف* می‌نامند. منحنی II نشانگر خاکی است که اندازهٔ ذرات آن در محدودهٔ وسیعی توزیع شده‌اند و به همین دلیل آن را خاک با *دانه‌بندی خوب* می‌نامند. ضریب یکنواختی خاک با دانه‌بندی خوب برای شن‌ها در حدود ۴ و برای ماسه‌ها ۶ است و ضریب دانه‌بندی شن‌ها و ماسه‌ها بین ۱ تا ۳ است. خاک ممکن است از ترکیب دو یا چند جزء با دانه‌بندی یکنواخت تشکیل شده باشد. منحنی III نشانگر چنین خاکی است. این نوع خاک را خاک با *دانه‌بندی گسسته* می‌نامند.



شکل ۲-۲۷ انواع مختلف منحنی‌های دانه‌بندی.