



# مدرس‌ان شریف

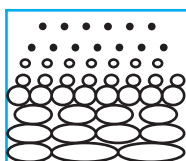
## فصل اول

### « خاک و منشأ پیدایش آن، روابط وزنی - حجمی »

#### خاک و منشأ پیدایش آن

خاک مخلوط غیر یکپارچه‌ای از ذرات کانی‌ها و مواد آلی فاسد شده می‌باشد که فضای خالی بین آن‌ها توسط آب و هوا اشغال شده است. ذرات خاک را می‌توان به وسیله دست یا ریختن در آب از هم جدا کرد. به علم شناخت رفتاری خاک، مکانیک خاک گفته می‌شود. در مکانیک خاک به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها (که در رفتار خاک‌ها تحت اثر بارگذاری مؤثر است) پرداخته می‌شود. ذرات خاک حاصل فرسایش شیمیایی و مکانیکی سنگ‌ها هستند و ممکن است اندازه بسیار متفاوتی داشته باشند. خاک‌های درشت‌دانه (شامل شن و ماسه) بیشتر از فرسایش فیزیکی و خاک‌های ریزدانه (خصوصاً رس) بیشتر از فرسایش شیمیایی حاصل می‌شوند. روند فیزیکی تخریب سنگ به صورت فرسایش حاصل از عمل باد، آب و یخچال‌ها، خرد شدن ناشی از تناوب یخ زدن و ذوب شدن یخ آب موجود در حفره‌ها و ترک‌های داخل سنگ، برخورد سنگ‌ها با یکدیگر و سقوط آن‌ها از ارتفاع خواهد بود. در این حالت ترکیب شیمیایی دانه‌های خاک به دست آمده همان ترکیب سنگ مادر است. ذرات این خاک‌ها ممکن است گوشه‌دار، نیمه‌گرد و یا گرد باشند. این خاک‌ها مانند مجموعه‌ای از دانه‌های مجزا که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند عمل می‌کنند (رفتار دانه‌ای). گرچه رفتار دانه‌ای معمولاً در خاک‌هایی با دانه‌های درشت و قابل تشخیص مشاهده می‌شود اما برخی از ریزدانه‌ها مانند خاک‌های سیلتی با روانی کم (ML)، نیز رفتار دانه‌ای دارند. ساختمان این خاک‌ها برحسب نحوه قرار گرفتن ذرات در کنار یکدیگر می‌تواند سست (غیر متراکم)، نیمه متراکم یا متراکم باشد. روند شیمیایی تخریب سنگ به صورت تغییر نوع کانی سنگ مادر در اثر واکنش شیمیایی با آب ( $H_2O$ ) (به ویژه اگر قدری اسیدی یا بازی باشد)، اکسیژن ( $O_2$ ) و گاز کربنیک ( $CO_2$ ) رخ می‌دهد. تخریب شیمیایی سنگ‌ها موجب پیدایش ذرات ریز بلوری با اندازه کلوئیدی (کوچک‌تر از ۲ میکرون) می‌شود که کانی‌های رس نامیده می‌شوند. مثلاً کانی رسی کائولینیت از تجزیه فلدسپات تحت اثر آب و گاز کربنیک به وجود می‌آید. اغلب ذرات کانی‌های رسی صفحه‌ای شکل و به ندرت سوزنی شکل بوده ولی با چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند. رفتار این نوع خاک‌ها به صورت یک خمیر چسبنده و به هم پیوسته می‌باشد (رفتار چسبنده یا خمیری). اگرچه رفتار خمیری در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که علاوه بر ریزدانه بودن ذراتشان از کانی‌های رسی تشکیل شده است، اما خاک‌های سیلتی با روانی زیادی (MH) همانند رس‌ها دارای رفتار خمیری هستند. در طبیعت خاک‌ها به دو حالت زیر یافت می‌شوند:

#### ۱- خاک ماندگار (برجا)



خاک‌هایی که از تخریب سنگ مادر و در محل سنگ مادر تشکیل شده و همان‌جا باقی می‌مانند خاک‌های برجا (درجا) نامیده می‌شوند. این نوع خاک‌ها دارای عمق کم و دانه‌بندی متمایز از یکدیگر می‌باشند، چرا که عامل تخریب سنگ مادر معمولاً در سطح زمین است، بنابراین مطابق شکل با افزایش عمق از سطح زمین دانه‌های خاک درشت‌تر می‌شوند.

**نکته ۱:** از آنجا که در خاک‌های برجا هیچ‌گونه جابجایی صورت نمی‌گیرد، این خاک‌ها اغلب دارای گوشه‌های تیز (دانه‌های تیز گوشه) می‌باشند. همچنین می‌توان قطعات درشتی از جنس سنگ مادر را در ترکیب این گونه خاک‌ها مشاهده نمود.



## ۲- خاک‌های حمل شده (انتقالی)

در اغلب خاک‌ها پس از تخریب سنگ، ذرات خاک توسط عوامل مختلف از محل پیدایش اولیه خود جابجا می‌شوند.

انواع این خاک‌ها عبارتند از: رسوبات آبرفتی، رسوبات بادی، رسوبات یخچالی، رسوبات واریزه‌ای (ثقلی)

الف - رسوبات آبرفتی: عامل انتقال ذرات در این خاک‌ها، آب‌های جاری در سطح زمین می‌باشند.

ب - رسوبات بادی: ذرات این خاک‌ها توسط باد حمل و نقل و بر جای گذارده می‌شوند.

پ - رسوبات یخچالی: ذرات این خاک‌ها توسط یخچال‌ها یا آب‌های ناشی از ذوب یخچال‌ها انتقال می‌یابند.

ت - رسوبات واریزه‌ای: ذرات این خاک‌ها در اثر نیروی وزن خود جابجا می‌شوند.

**نکته ۲:** در خاک‌های انتقالی به دلیل حمل ذرات در مسیر طولانی، گوشه‌های تیز دانه‌ها ساییده شده و دانه‌ها اغلب به صورت گردگوشه می‌باشند.

ساختار خاک‌های آبرفتی به صورت لایه لایه بوده و اندازه ذرات در هر لایه تقریباً یکسان است.

خاک‌های بادرفتی معمولاً ساختار پوک و متخلخل دارند. از این نوع خاک‌ها می‌توان به خاک رس و ماسه‌های روان اشاره کرد.

## کانی‌شناسی خاک‌ها

### کانی‌های سازنده خاک‌های دانه‌ای

خاک‌های دانه‌ای حاصل تخریب فیزیکی سنگ‌ها هستند، بنابراین کانی‌های تشکیل دهنده آن‌ها همان کانی‌های سنگ مادر خواهد بود.

عمده کانی‌های تشکیل دهنده خاک‌های دانه‌ای عبارتند از: کوارتز، میکا و فلدسپات. کانی کوارتز به دلیل پایداری زیادی که نسبت به سایر کانی‌ها دارد

متداول‌ترین کانی تشکیل دهنده خاک‌های دانه‌ای است و پس از آن میکا و فلدسپات بیشتر از سایر کانی‌ها در ساختار خاک‌های دانه‌ای یافت می‌شوند.

### کانی‌های سازنده خاک‌های رسی

خاک‌های رسی حاصل فرسایش شیمیایی سنگ‌ها هستند و ابعاد ذراتشان کوچک‌تر از  $0.002 \text{ mm}$  است که بلورهایی کوچک به نام بلورهای کلوئیدی

رس را تشکیل می‌دهند. کانی‌های سازنده خاک‌های رسی سیلیکات‌های آلومینیوم‌دار آبدار کوچکی هستند که به طور عمده از ترکیب دو واحد بنیادی زیر

تشکیل شده‌اند:

الف) سیلیکا تتراهیدروژن (چهاروجهی سیلیکا) که به آن اصطلاحاً

سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) می‌گویند. این واحد بنیادی یک چهاروجهی متشکل از

یک عنصر سیلیکون یا سیلیسیوم ( $\text{Si}$ ) در وسط و چهار عنصر اکسیژن

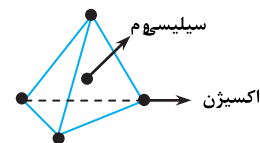
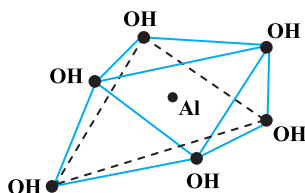
در چهار گوشه آن است.

ب) آلومینا اکتاهیدروژن (هشت‌وجهی آلومینا) که به آن اصطلاحاً

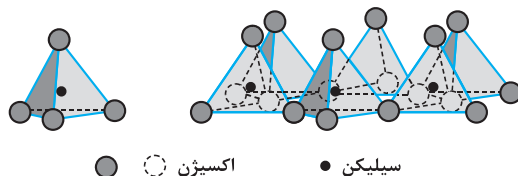
آلومین ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) می‌گویند. این واحد بنیادی یک هشت‌وجهی

متشکل از یک عنصر آلومینیوم در وسط و شش عنصر هیدروکسید در

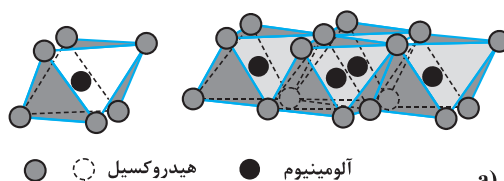
شش گوشه آن است.



این واحدهای بنیادی به یکدیگر می‌چسبند و صفحات کوچکی را تشکیل می‌دهند که دارای سطح جانبی بیشتری نسبت به اجسام هم‌وزن خود هستند:



صفحه سیلیکا



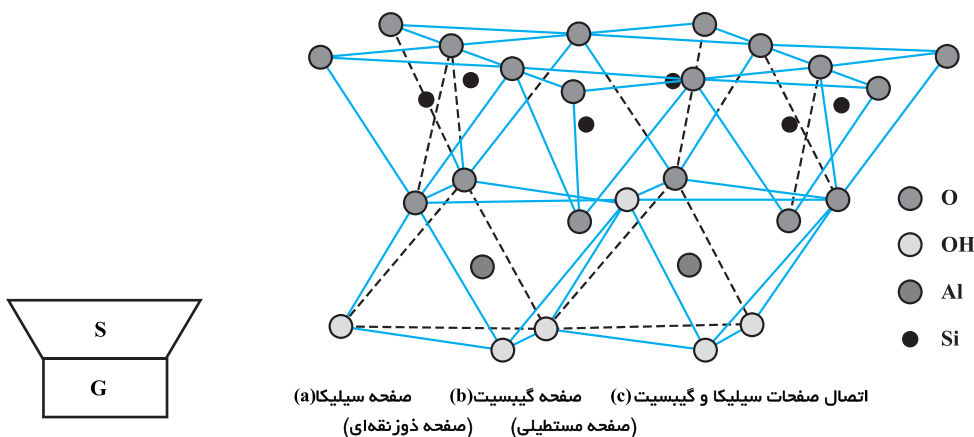
صفحه آلومینا

● سیلیکون ○ اکسیژن

● آلومینیوم ● هیدروکسید

a)

b)



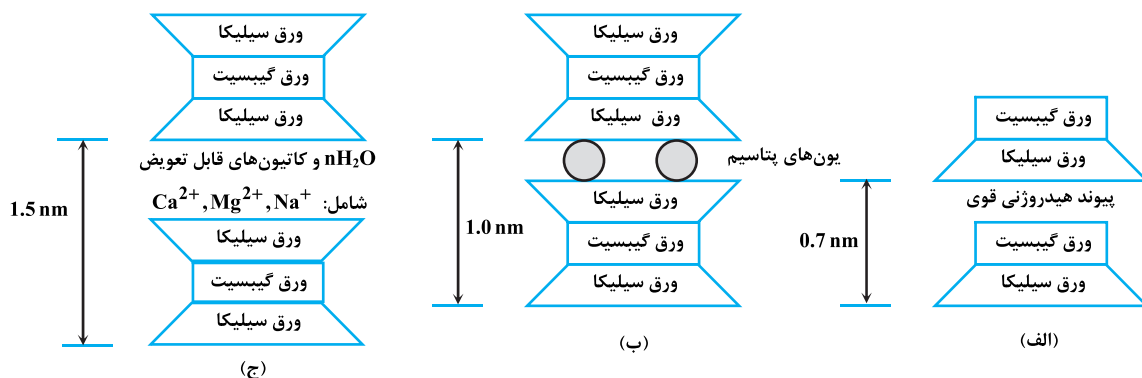
از ترکیب صفحات گیبسیت (آلومین) و سیلیکا واحدهای ساختمانی کانی‌های رسی به وجود می‌آیند. با توجه به نحوه ترکیب این صفحات و نوع پیوند بین واحدهای ساختمانی ۳ کانی اصلی خاک‌های رسی به صورت زیر حاصل می‌شوند:

الف - کائولینیت: هر واحد آن از به هم پیوستن یک ورق سیلیکا و یک ورق گیبسیت تشکیل شده است و پیوند بین واحدهای آن از نوع هیدروژنی قوی است.

ب - ایلیت: هر واحد آن از به هم پیوستن یک ورق گیبسیت و دو ورق سیلیکا تشکیل شده است. واحدهای ساختمانی در این کانی توسط پیوند فلزی با یون پتاسیم به هم متصل شده‌اند. این پیوند از پیوند هیدروژنی ضعیف‌تر است.

پ - مونت موریلونیت: هر واحد آن از به هم پیوستن یک ورق گیبسیت و دو ورق سیلیکا تشکیل شده است. ترکیب شیمیایی در مونت موریلونیت‌ها مشابه ایلیت‌هاست با این تفاوت که پیوند بین واحدهای آن، پیوند ضعیف واندروالسی است.

شکل زیر ساختار این سه کانی را نشان می‌دهد:



« نمودار ساختار (الف) کائولینیت، (ب) ایلیت و (ج) مونت موریلونیت. »

**کجه مثال ۱:** پیوند بین صفحات کدام رس از نوع هیدروژنی قوی می‌باشد؟

- (۱) مونت موریلونیت (۲) ایلیت (۳) هالوزیت (۴) کائولینیت

پاسخ: گزینه «۴» پیوند بین صفحات کائولینیت از نوع هیدروژنی قوی می‌باشد.

**توجه:** سطح ذرات کانی‌های رس حامل بار منفی الکترواستاتیکی است که عمدتاً در اثر جایگزینی اتم‌های سیلیسیم (Si) و آلومینیوم (Al) توسط اتم‌هایی با ظرفیت کمتر به وجود می‌آید. در واحدهای بنیادی سیلیکا، Al می‌تواند جایگزین Si شود و از آنجا که  $Al^{+3}$  دارای ۳ بار مثبت و  $Si^{+4}$  دارای ۴ بار مثبت است در سطح رس یک بار منفی به وجود می‌آید. در واحدهای بنیادی آلومینا، Fe و Mg می‌توانند جایگزین Al شوند که نتیجه این جایگزینی نیز بار منفی خنثی نشده در سطح رس است. این جانشینی‌ها از نوع هم شکل (ایزومرفیک) هستند، یعنی یک عنصر جانشین عنصر دیگری در ساختمان بلوری یک ماده می‌شود بدون آنکه ماده دچار تغییر شکل بلوری شود. در کانی کائولینیت پدیده جانشینی ایزومرفیک بسیار کم رخ می‌دهد، اما در کانی‌های ایلیت و مونت موریلونیت جانشینی ایزومرفیک هم در هشت وجهی آلومینا و هم در چهار وجهی سیلیکا رخ می‌دهد.



**سطح ویژه (سطح مخصوص):** برابر است با مساحت جانبی ذرات خاک تقسیم بر جرم آن‌ها. با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات، سطح مخصوص آن‌ها بیشتر می‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سطح مخصوص خاک‌های ریزدانه بسیار بیشتر از خاک‌های درشت‌دانه است.

«مقایسه خصوصیات کانی‌های رسی»

قدرت پیوند بین ذرات و پایداری ترکیب شیمیایی	⇐	مونت موریلونیت	>	ایلیت	>	کائولینیت
سطح مخصوص ( $\frac{m^2}{gr}$ )	⇐	۸۰۰	<	۸۰~۱۰۰	<	۱۰~۲۰
ضخامت (انگستروم)	⇐	۱۰~۵۰	>	۵۰~۵۰۰	>	۱۰۰~۱۰۰۰
ابعاد جانبی (انگستروم)	⇐	۱۰۰۰~۵۰۰۰	≈	۱۰۰۰~۵۰۰۰	>	۱۰۰۰~۲۰۰۰۰

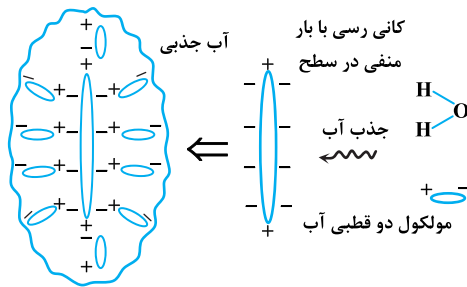
**نکته ۳:** بین واحدهای ساختمانی کانی مونت موریلونیت مولکول‌های آب و کاتیون‌های قابل تعویض قرار دارند که همین امر دلیلی برای تورم زیاد این کانی رسی می‌باشد.

**نکته ۴:** وجود لایه‌های میانی دارای یون پتاسیم ( $K^+$ ) در ایلیت سبب محدود کردن خواص خمیری این کانی رسی می‌شود و به این دلیل کانی مونت موریلونیت از ایلیت خمیری‌تر است.

### لایه‌های آب در اطراف کانی‌های رسی

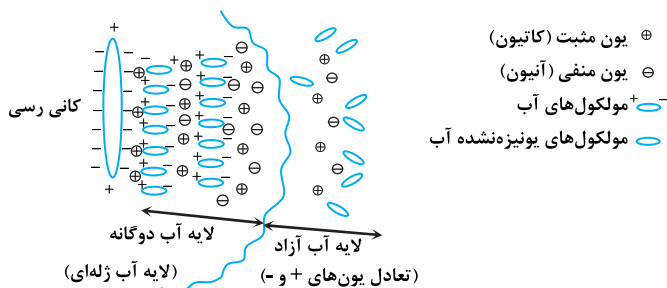
از آن‌جا که سطح صفحات رس دارای بار منفی است، می‌تواند ذرات دارای بار مثبت را به سمت خود جذب کند. دو لایه در مجاورت کانی‌های رسی قابل تشخیص است:

**الف - لایه آب جذبی:** به دلیل بار منفی موجود در سطح ذرات رس، مولکول‌های دو قطبی آب، مطابق شکل روبرو از سمت قطب مثبت خود به وسیله پیوند هیدروژنی به سطح ذره رسی می‌چسبند (در واقع هیدروژن با بار مثبت در مولکول آب، به بار منفی در سطح ذره رس می‌چسبند). در نتیجه این جذب، لایه نازکی از آب به دور ذره رسی تشکیل می‌شود که دارای پیوندی بسیار قوی با ذره رس می‌باشد و گران روی (لزجت) آب در این ناحیه بسیار بالاست. به این لایه، لایه «آب جذبی» یا «آب جذب سطحی» گفته می‌شود که در بسیاری موارد حتی با حرارت نیز نمی‌توان آن را از ذرات رس جدا نمود.



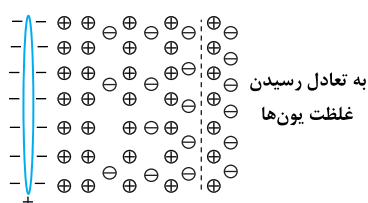
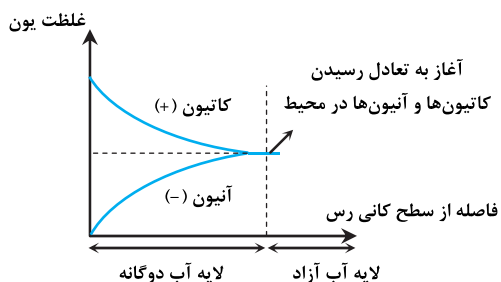
«آب جذبی یا آب جذب سطحی»

**ب- لایه دوگانه یا مضاعف:** سطح منفی رس علاوه بر آب، یون‌های مثبت موجود در محیط (کاتیون‌ها) را نیز به خود جذب می‌کند. غلظت کاتیون‌ها در مجاورت ذره رس زیاد بوده و با فاصله گرفتن از سطح ذره کاهش می‌یابد. در این میان برخی از مولکول‌های آب نیز از سمت منفی خود جذب کاتیون‌ها می‌گردند (هیدراته شدن کاتیون‌ها). همچنین غلظت یون‌های منفی (آن‌یون‌ها) با فاصله گرفتن از سطح ذرات رسی کم‌کم افزایش می‌یابد. (در لایه آزاد بر خلاف لایه دوگانه، مولکول‌های آب دیگر یونیزه و جهت‌دار نبوده و به صورت آزاد می‌باشند).



«آب لایه دوگانه»



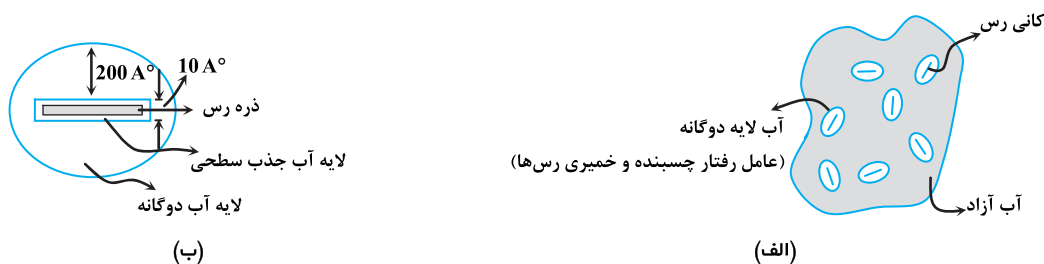


« به تعادل رسیدن یون‌های مثبت و منفی در مجاورت رس »

به ضخامتی از آب اطراف کانی رسی که دچار دوگانگی می‌باشد و ترکیبی از یون‌های مثبت و منفی است، لایه دوگانه یا لایه مضاعف گفته می‌شود. در این لایه که قطعاً ضخامت آن از لایه آب جذبی بیشتر است، آب به صورت ژله‌ای بوده و باعث بروز خاصیت خمیری در رس‌ها می‌گردد. (در واقع لایه آب جذبی، داخلی‌ترین قسمت لایه دوگانه محسوب می‌شود).

در خارج از لایه دوگانه، آب از قید جاذبه و دافعه سطح کانی رها شده و با گران روی (لزجت) پایین به راحتی در خاک روان است و آب آزاد نامیده می‌شود، که عامل روانی رس است. همچنین در ناحیه آب آزاد، غلظت یون‌های مثبت و منفی (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) به تعادل رسیده و محیط خنثی خواهد بود.

به این ترتیب می‌توان حضور آب در اطراف ذرات رس را به شکل زیر نمایش داد:



« ترکیب آب در مجاورت ذرات رس: (الف) توده خاک رسی، (ب) یک ذره رس به صورت میکروسکوپی »

**نکته ۵:** خاصیت خمیری خاک‌های رسی علاوه بر بار منفی سطح ذرات رس و بزرگی سطح مخصوص آن‌ها، به دو قطبی بودن مولکول آب نیز بستگی دارد. چنان‌که اگر ذرات رس در درون یک مایع غیر قطبی قرار بگیرند هیچ‌گونه جذبی صورت نگرفته و رس خاصیت خمیری نخواهد داشت.

### قابلیت جذب آب و تورم

قابلیت جذب آب یک خاک رسی علاوه بر نوع کانی‌های تشکیل دهنده آن، تابعی از سطح جانبی ذرات آن است، علت این مسئله آن است که مولکول‌های آب جذب سطح جانبی صفحات رسی می‌گردند بنابراین با افزایش سطح جانبی ذرات امکان جذب آب بیشتر می‌شود. برای مقایسه سطح جانبی ذرات رسی در یک جرم برابر، کافی است سطح مخصوص ذرات با یکدیگر مقایسه شود.

این که سطح مخصوص مونت موریلونیت‌ها از بقیه کانی‌های رسی بیشتر است (سطح جانبی بیشتری برای جذب آب دارد)، قابلیت جذب آب آن نیز از سایر کانی‌های رسی بیشتر می‌باشد.

بنابراین در مقایسه‌ی کانی‌های رسی می‌توان گفت:

**سطح مخصوص ذرات:**

مونت موریلونیت < ایلیت < کائولینیت

**قابلیت جذب آب:**

مونت موریلونیت < ایلیت < کائولینیت

از سوی دیگر چون کانی‌های رسی با جذب آب متورم می‌شوند، می‌توان گفت هر کانی که جذب آب بیشتری دارد، دارای تورم بیشتری نیز خواهد بود.



قابلیت تورم:

### مونت موریلونیت < ایلیت > کائولینیت

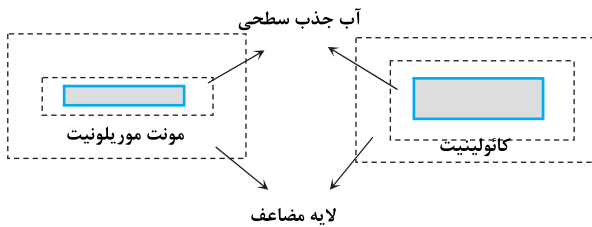
همچنین چون خاصیت خمیری خاک‌های رسی تابعی از ضخامت لایه دوگانه آن‌ها است، می‌توان نتیجه گرفت که کانی مونت موریلونیت به دلیل جذب آب بیشتر، لایه دوگانه بزرگ‌تر و قوی‌تری خواهد داشت و خاصیت خمیری آن از بقیه کانی‌ها بیشتر است.

خاصیت خمیری:

### مونت موریلونیت < ایلیت > کائولینیت

کج مثال ۲: کدام گزینه صحیح است؟

- (۱) ساختار لخته‌ای، وزن مخصوص بیشتری نسبت به پراکنده دارد.
- (۲) لایه مضاعف آب اطراف رس با افزایش غلظت نمک افزایش می‌یابد.
- (۳) ساختار پراکنده، وزن مخصوص بیشتری نسبت به ساختار لخته‌ای دارد.
- (۴) نسبت ضخامت لایه مضاعف به ضخامت ذره مونت موریلونیت از باقی کانی‌ها کمتر است.

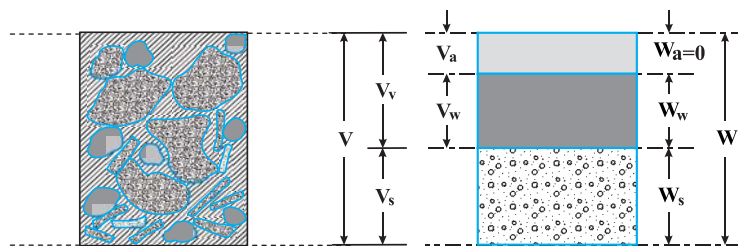


پاسخ: گزینه «۳» رس‌ها با ساختار لخته‌ای سبک‌اند و نسبت تخلخل آن‌ها بالاست. نهشت‌های رسی تشکیل شده در دریا، ساختار بسیار لخته‌ای دارند. وجود یون یا نمک در خاک، سبب کاهش لایه مضاعف اطراف ذرات می‌گردد. در اطراف رس مونت موریلونیت، ضخامت لایه مضاعف نسبت به ضخامت ذره بیشتر از باقی کانی‌هاست. با توجه به این مطالب گزینه ۳ صحیح است.

### ترکیب خاک (روابط وزنی - حجمی)

برای شناخت رفتار خاک، ابتدا لازم است اجزای تشکیل دهنده توده خاک را بشناسیم. هر توده خاکی در حالت کلی از سه قسمت دانه‌های جامد، آب و هوا تشکیل شده است. تعاریف و روابط پایه در مکانیک خاک براساس این سه جزء بیان می‌شود. در این روابط اندیس  $a$  معرف هوا (air)،  $w$  معرف آب (water) و  $s$  معرف قسمت جامد (solid) می‌باشد.

توده خاک مقابل را در نظر بگیرید:  $W = W_s + W_w$   $\Rightarrow$  وزن آب موجود در خاک + وزن دانه‌های جامد = وزن کل توده خاک



توجه: وزن هوا در هوا به علت قانون ارشمیدس (مانند وزن آب در آب که صفر است) برابر صفر می‌باشد.

$V = V_v + V_s$   $\rightarrow$  حجم دانه‌های جامد خاک + حجم کل حفرات موجود در خاک = حجم کل توده خاک

$V_v = V_w + V_a$   $\rightarrow$  حجم حفرات پر شده با هوا + حجم حفرات پر شده با آب = حجم کل حفرات موجود در خاک (حجم فضای خالی)

پارامترهای وزنی - حجمی در یک توده خاک به صورت زیر تعریف می‌شوند:

۱- وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک: دانه‌های جامد خاک اسکلت خاک را تشکیل می‌دهند. چگالی آن‌ها برابر است با نسبت وزن دانه‌ها به حجم آن‌ها

و با  $\gamma_s$  نشان داده می‌شود:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

چگالی دانه‌های جامد خاک که با  $G_s$  نشان داده می‌شود برابر است با نسبت وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک به وزن مخصوص آب:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad \gamma_w = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^3} = 9/81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

محدوده تغییرات  $G_s$  زیاد نیست و در اکثر خاک‌ها این عدد در بازه  $2/6 \leq G_s \leq 2/75$  می‌باشد. حدود تغییرات  $G_s$  برای خاک‌های مختلف در جدول زیر آورده شده است.

$G_s$	خاک
۲/۶۵-۲/۶۸	شن
۲/۶۵-۲/۶۸	ماسه
۲/۶۲-۲/۶۸	لای
۲/۵۸-۲/۷۵	رس

توجه: برای خاک‌های دیگری که در جدول موجود نیستند امکان افزایش  $G_s$  تا ۲/۹ نیز وجود دارد؛ هم‌چنین امکان کاهش  $G_s$  تا ۲ و حتی کمتر از آن در خاک‌های آلی وجود دارد.

مثال ۳: مقدار توده ویژه ( $G_s$ ) در رس‌ها در چه محدوده‌ای است؟

(۱) ۲ تا ۲/۷۵      (۲) ۲/۴ تا ۲/۷      (۳) ۲/۸ تا ۳/۵      (۴) ۲/۶ تا ۲/۷

پاسخ: گزینه «۴» طبق جدول محدوده تغییرات  $G_s$  در خاک‌ها، گزینه ۴ صحیح است.

۲- پوکی: نسبت حجم حفرات موجود در خاک به حجم کل خاک می‌باشد که  $n$  نمایش داده می‌شود و همواره مقداری کوچک‌تر از یک است:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_a + V_w}{V} \quad (0 < n < 1)$$

۳- نسبت تخلخل یا نسبت منافذ: نسبت حجم حفرات موجود در خاک به حجم دانه‌های جامد خاک می‌باشد که با  $e$  نمایش داده می‌شود.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s}$$

مقدار  $e$  الزاماً کوچک‌تر از یک نبوده و بسته به تخلخل خاک می‌تواند مقادیر بزرگ‌تری هم داشته باشد، یعنی به صورت تئوری می‌توان نوشت:  $0 < e < \infty$ . اما در واقعیت مقدار  $e$  در خاک‌ها از حدود ۰/۳۵ در متراکم‌ترین حالت تا بیش از ۲ در سست‌ترین حالت متغیر است. برای ماسه‌ها معمولاً  $0/5 < e < 0/8$  و برای خاک‌های چسبنده  $0/1 < e < 0/7$  می‌باشد.

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

نکته ۶: بین پوکی ( $n$ ) و نسبت تخلخل ( $e$ ) دو رابطه مقابل برقرار است:

تذکره: هرگاه در صورت مسئله از عبارات نسبت تخلخل، نسبت حفرات، نسبت منافذ و نشانه خلأ استفاده شد، منظور  $e = \frac{V_v}{V_s}$  می‌باشد؛ اما هرگاه

از پوکی استفاده شد، منظور  $n = \frac{V_v}{V}$  می‌باشد.

۴- درصد هوای خاک: نسبت حجم هوای موجود در خاک به حجم کل خاک می‌باشد که با  $A$  نمایش داده می‌شود و همواره مقداری کوچک‌تر از یک است:

اگر خاکی اشباع شود حجم هوای موجود در آن صفر می‌شود بنابراین  $A = 0$  خواهد شد.

۵- درصد هوای حفرات: نسبت حجم هوای موجود در خاک به حجم حفرات موجود در خاک می‌باشد که با  $ac$  نشان داده می‌شود:

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

۶- میزان رطوبت: نسبت وزن آب موجود در خاک به وزن دانه‌های جامد خاک می‌باشد که  $\omega$  نشان داده می‌شود:

اگر میزان رطوبت در ۱۰۰ ضرب شود و برحسب درصد بیان شود، درصد رطوبت به دست می‌آید.



◀ **توجه:** درصد رطوبت در برخی از خاک‌های آلی می‌تواند به ۳۰۰ تا ۴۰۰ هم برسد ولی در اغلب خاک‌ها معمولاً کمتر از ۶۰ است.

۷- **درجه اشباع:** نسبت حجم آب موجود در خاک به حجم حفرات موجود در خاک می‌باشد که با  $S_r$  نمایش داده می‌شود.

اگر درجه اشباع در ۱۰۰ ضرب شود و برحسب درصد بیان شود، درصد اشباع خاک حاصل می‌شود.

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

در خاک‌های کاملاً اشباع تمامی حفرات موجود در خاک با آب پر می‌شوند، بنابراین حجم هوای موجود در خاک صفر و درجه اشباع خاک برابر یک خواهد شد. اگر تمام حفرات موجود در خاک از هوا باشند آنگاه یک خاک خشک خواهیم داشت که درجه اشباع آن صفر است.

🌟 **تذکره ۲:** برخلاف میزان رطوبت که بسته به نوع خاک می‌تواند از یک هم بیشتر باشد، درجه اشباع خاک‌ها در هیچ حالتی بیشتر از یک نخواهد شد و محدوده تغییرات آن برابر  $0 \leq S_r \leq 1$  می‌باشد.

رابطه بین میزان رطوبت، درجه اشباع، نسبت تخلخل و چگالی دانه‌های جامد خاک به صورت روبرو است:

$$\omega \cdot G_s = S_r \cdot e$$

📌 **مثال ۴:** رطوبت یک نمونه خاک اشباع ۲۰٪ و چگالی دانه‌های جامد آن  $G_s = 2/7$  می‌باشد. پوکی ( $n$ ) برابر است با:

۰/۵۴ (۱)                      ۰/۸ (۲)                      ۰/۳۵ (۳)                      ۰/۱۵ (۴)

☑️ **پاسخ:** گزینه «۳»  
 $n = \frac{e}{1+e} = \frac{0/54}{1+0/54} = 0/35$  ;  $e = \omega \cdot G_s \Rightarrow e = 0/2 \times 2/7 = 0/54$  ;  $S_r = 1 \rightarrow$  خاک اشباع است

۸- **وزن مخصوص خاک:** نسبت وزن کل توده خاک به حجم کل خاک می‌باشد و برای یک نمونه طبیعی خاک با  $\gamma$  نمایش داده می‌شود و به وزن مخصوص مرطوب خاک موسوم است:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_v + V_s} = \frac{\frac{W_w}{V_s} + \frac{W_s}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s} + \frac{V_s}{V_s}} = \frac{\frac{W_s}{V_s} \left( \frac{W_w}{W_s} + 1 \right)}{e + 1} = \frac{G_s \gamma_w (\omega + 1)}{e + 1} \rightarrow \boxed{\gamma = \frac{G_s (1 + \omega)}{1 + e} \gamma_w}$$

این رابطه را می‌توان به صورت دیگری نیز نمایش داد:

$$\gamma = \frac{G(1 + \omega)}{1 + e} \gamma_w, \quad \omega \cdot G_s = S_r \cdot e \rightarrow \boxed{\gamma = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e} \gamma_w}$$

اگر در رابطه وزن مخصوص مرطوب خاک رطوبت (یا درجه اشباع) را برابر صفر قرار دهیم، **وزن مخصوص خشک خاک** به دست می‌آید که نسبت وزن خشک خاک به حجم کل خاک می‌باشد:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} = \frac{\gamma}{1 + \omega}$$

در این حالت حفرات خاک فقط از هوا پر شده و آب ندارند به همین علت وزن مخصوص خشک خاک از وزن مخصوص مرطوب آن کوچک‌تر است.

◀ **توجه:** با توجه به اینکه وزن  $\gamma_d < \gamma$ ، وزن خشک خاک با وزن دانه‌های جامد آن برابر است ولی حجم دانه‌های جامد خاک از حجم کل خاک کمتر است، بنابراین:  $\gamma_d < \gamma_s$

اگر در رابطه وزن مخصوص مرطوب خاک، درجه اشباع را برابر یک قرار دهیم، **وزن مخصوص اشباع خاک** به دست می‌آید که نسبت وزن خاک اشباع به حجم کل خاک می‌باشد:

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

در این حالت تمام حفرات خاک از آب پر شده است. از آنجا که در حالت اشباع رطوبت بیشتری نسبت به حالت طبیعی و خشک دارد، می‌توان نوشت:

$$\gamma_{sat} > \gamma > \gamma_d$$