فصل اول

«خواص فیزیکی سنگ‌ها»

زمین‌شناسی

اگرچه تقسیم‌بندی زمین‌شناسی سنگ‌ها، جوابگوی نیازهای مهندسان معدن نیست ولی زمین‌شناسان براساس مشاهدات چشمی و به وسیله آنالیزهای دستی، خواصی را به نمونه‌های سنگی انتصاب می‌دهند، که برخی از خواص سنگ‌ها را دربردارد. به طور خلاصه براساس ژنز می‌توان سه گروه زیر را برای تقسیم‌بندی سنگ‌ها مطرح نمود که عبارتند از:

الف ـ آذرین (Igneous) آن دسته از سنگ‌هایی هستند که مستقیماً از سرد شدن و انجماد ماگما یا یک سیال مذاب (داغ) تشکیل می‌شود.

ب ـ رسوبی (Sedimentary) سنگ‌هایی که منشأ خارجی داشته و در نتیجه حمل و نقل و ته‌نشین شدن ذرات سنگ‌های قبلی یا رسوب مواد محلول حاصل از آن در محیط‌های مختلف (هوا، رودخانه، دریاچه و یخچال) و یا سرانجام از سیمانی‌شدن و به هم چسبیدن ذرات سنگ‌های مختلف و برجا (بدون حمل و نقل) تشکیل شده‌اند.

ج ـ دگرگونی (Metamorphic): سنگ‌های دگرگونی، سنگ‌های ثانویه هستند که از دگرگون‌شدن سنگ‌های آذرین یا سنگ‌های رسوبی تحت فشار و حرارت تشکیل می‌شوند.

این تقسیم‌بندی سنگ‌ها نه تنها نتیجه نهایی نیست؛ بلکه به عنوان نقطه شروع تقسیم‌بندی سنگ‌ها از نظر متخصصان مکانیک سنگ نیز مطرح نمی‌شود. طبیعی است که یک مهندس مکانیک سنگ به رفتار مهندسی سنگ‌ها در اثر بارهای اعمالی علاقه بیشتری در مقایسه با منشأ پیدایش آنها دارد.

سنگ‌های با منشأ مختلف ممکن است رفتارهای متفاوتی با توجه به شرایط تشکیل سنگ و عوامل محیطی، از خود نشان دهند که ممکن است در راستای تأمین پایداری یا تهدیدکننده‌ی پایداری عمل کنند. در جدول زیر ویژگی‌های نامطلوب مهندسی تعدادی از سنگ‌ها بیان شده است که در زمان طراحی در ارتباط با سنگ‌های با خواص نامطلوب بایستی تمهیدات لازم اتخاذ شود، در صورتی که سنگ‌هایی با خواص نامطلوب مهندسی در مسیر پروژه یافت شوند ممکن است باعث تغییر مسیر پروژه شوند.

ویژگی‌های نامطلوب مهندسی برای سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی

گروه ژنتیکی	اسم سنگ	ویژگی‌های نامطلوب مهندسی
سنگ‌های آذرین	گرانیت	تمایل به تجزیه، به خصوص وقتی که دانه‌درشت است.
	بازالت	هوازدگی و تبدیل به کانی‌های رسی بسیار حساس مونت‌موریلونیت
سنگ‌های رسوبی	ماسه سنگ	قابلیت حفاری ضعیف
	شیل	مستعد به انبساط (آماس) و انقباض
	سنگ آهک	کارست: نشست (فرونشست)، نفوذپذیری فوق‌العاده بالا
	گچ	آماس در تماس با آب، مخرب بودن آب زیرزمینی در آن
	سنگ نمک	متمایل به خزش، شکسته شدن
سنگ‌های دگرگونی	شیست	(میکا، گرافیت، تالک) باعث پایین بودن مقاومت برشی می‌شوند.
	گنایس	ناهمسانگردی
	کوارتزیت	قابلیت حفاری فوق‌العاده ضعیف
	سنگ لوح	ناهمسانگردی زیاد، کانی‌های مختلف صفحه‌ای

نکته۱: با توجه به جدول فوق به طور کلی می‌توان خواص نامطلوب مهندسی را برای سنگ‌های:

آذرین: هوازدگی

رسوبی: انحلال و شکفتن

دگرگونی: تورق و شیستوزیته دانست.

تقسیم‌بندی سنگ‌ها از نظر خواص آن‌ها

به علت فراوانی خواص سنگ‌ها که عامل اصلی آن تنوع ساخت سنگی، مؤلفه‌های سنگی متفاوت و بافت آنها است فقط تعدادی از اندازه‌گیری‌های اساسی خواص سنگ‌ها ذکر می‌شود و سعی می‌شود سنگ‌ها را برحسب مقدار خواص آنها بیان کرد.

سنگ‌ها دارای خواصی می‌باشند که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. در واقع این خصوصیات نقش مهمی در تقسیم‌بندی سنگ‌ها از نظر مهندسی دارند و این امکان را فراهم می‌کنند که یک انطباق کلی بین این خواص از طریق تجربه برای کاربردهای عملی ترسیم شود. قابل ذکر است که رفتار سنگ‌ها در اثر تغییرات تنش‌ها، حرارت و سیالات موجود و زمان از اهمیت بالایی برخوردار است، کمترین نتیجه‌ای که از تقسیم‌بندی سنگ‌ها براساس خواص شاخص آنها گرفته می‌شود این است که رفتار آنها در مقایسه با توده‌های سنگی که شاید حاوی شکستگی‌های فراوان باشند، مشخص می‌شود.

نتیجه دیگر بکارگیری این خواص عبارت است از خواص نمونه سنگ‌های سالم است که در اغلب موارد کاربردی شامل استخراج روباز و زیرزمینی، آزمایش‌های شکستگی و ارزیابی آنها برابر و یا حتی بیشتر از سنگ‌های بدون شکستگی است. برای مثال تقسیم‌بندی توده‌های سنگی نه تنها انعکاسی از آزمایش‌های سنگ‌ها در آزمایشگاه می‌دهند بلکه خواص ساختی و محیطی توده‌های سنگی در محدوده مورد نظر نیز در آن مؤثر هستند.

در حالت کلی خواص شاخص سنگ‌ها را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم نمود:

ـ خواص ذاتی سنگ‌ها، مانند وزن مخصوص، پوکی و نظایر آن.

ـ خواص عکس‌العملی سنگ‌ها که در برابر شرایط خاص ایجاد شده‌اند، مانند سختی، ساینده‌گی و نظایر آن.

ـ خواصی از سنگ‌ها که در ارتباط با پدیده‌های فیزیکی دیگر هستند، مانند رسانایی حرارتی، خواص صوتی و نظایر آن.

در ادامه هر گروه با جزئیات بیشتری ارائه می‌شوند.

خواص ذاتی سنگ‌ها

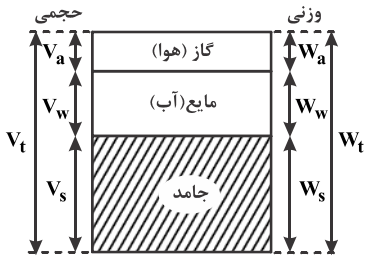
مواد ژئومکانیکی مانند سنگ و خاک بر خلاف موادی مانند آب، فولاد و شیشه که تنها دارای یک فاز می‌باشند، از چند فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده‌اند. به طور کلی فازهای تشکیل‌دهنده سنگ و خاک شامل بخش‌های زیر می‌باشند:

- بخش جامد سنگ (فاز جامد)
- حفرات:
  - ۱ـ آب: که برخی حفرات را پر کرده‌اند (فاز مایع).
  - ۲ـ هوا: که باقی‌مانده حفرات را پر کرده‌اند (فاز گاز).

در شکل زیر یک نمونه سنگ طبیعی با حجم V_t و وزن W_t نشان داده شده است:

نمونه طبیعی از یک سنگ

در شکل زیر برای تشریح خصوصیات فیزیکی نمونه‌ای از سنگ که از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است؛ آن را به صورت فازهای مجزا در نظر می‌گیریم.



شکل شماتیک از سه فاز سنگ

با بررسی روابط موجود میان این سه فاز می‌توان پارامترهای مختلف یک سنگ را به دست آورد.
وزن کل نمونه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$w_{total} = w_{solid} + w_{water} + w_{air}$$

نکته۲: وزن هوا ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر کردن است.

$$w_{air} = ۰ \Rightarrow w_{total} = w_{solid} + w_{water}$$

حجم کل نمونه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_{total} = V_{void} + V_{solid}$$

پارامترها ذکر شده در این روابط عبارتند از:

w_{air}:وزن هوا v_{water} : حجم آب موجود در سنگ w_{water} : وزن آب موجود در سنگ v_{air}:حجم هوای موجود در سنگ
w_{solid} : وزن بخش جامد سنگ v_{void} : حجم فضای خالی موجود در سنگ v_{solid}:حجم بخش جامد موجود در سنگ

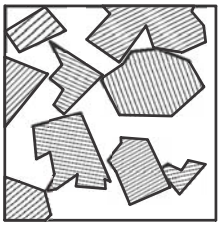
تذکر ۱: روش‌های آزمایشگاهی و مراحل اندازه‌گیری و محاسبه خواص ذاتی سنگ‌ها در استاندارد و روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) پیشنهاد شده است.

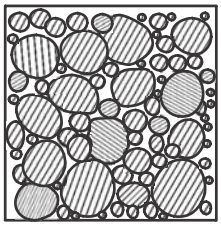
روابط حجمی

سنگ‌ها اجسامی کاملاً توپر نیستند و همیشه حاوی منافذی به صورت حفره‌های کم و بیش مرتبط، شکاف‌ها یا حفره‌های مجزا هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی سنگ دارند به طور کلی هر چه این حفره‌ها و منافذ بیشتر باشند، مقاومت مکانیکی سنگ کمتر می‌شود. به منظور بررسی کمیّت‌های در ارتباط با منافذ موجود در سنگ‌ها کمیّتی به نام تخلخل (Porosity) تعریف می‌شود.
تخلخل عبارت است از: نسبت حجم منافذ و حفره‌های موجود در سنگ به حجم کل سنگ و معمولاً آن را با نماد n نشان می‌دهند و به صورت درصد بیان می‌شود:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times ۱۰۰$$

به همین دلیل نوع تخلخل و خواص آن از نخستین خواصی است که در بحث مکانیک سنگ و خاک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدیهی است که تخلخل سنگ‌ها متفاوت است. در سنگهای آذرین تخلخل معمولاً کمتر از یک یا دو درصد است، مگر آنکه هوازدگی رخ داده باشد که در این صورت میزان تخلخل افزایش می‌یابد. معمولاً تخلخل سنگ‌های رسوبی از تخلخل سنگ‌های آذرین و دگرگونی بیشتر است.
در سنگ‌های رسوبی تخلخل توده سنگ با افزایش عمق، کاهش می‌یابد که این به دلیل متراکم‌شدن توده سنگ با گذشت زمان و وزن لایه‌های بالایی است و همچنین سنگ‌هایی که سن بیشتری دارند، مقدار تخلخل در آنها کمتر است؛ به طور مثال یک نمونه ماسه سنگ کامبرین دارای تخلخل ۱۱% و ماسه‌سنگ کرتاسه دارای تخلخل ۳۴% است.
به طور طبیعی تخلخل سنگ‌ها به دو شکل عمده دیده می‌شود که عبارتند از:
۱ـ منافذ کروی‌شکل که در اثر خروج حباب‌ها و گازها در سنگ‌های آذرین ایجاد می‌شود.
۲ـ ریزترک‌ها و شکاف‌هایی که به طور معمول در سنگ‌های آذرین و دگرگونی مانند گرانیت و شیست وجود دارد.
منافذ موجود در سنگ‌های آذرین نسبت به تنش چندان حساس نیستند. اما شکاف‌های ریز در مقابل تنش‌های وارده به شدت واکنش نشان می‌دهند. در اثر تنش‌های فشاری با بسته‌شدن منافذ و شکاف‌ها تخلخل کاهش می‌یابد و با اعمال تنش‌های کششی منافذ بازتر شده و تخلخل افزایش می‌یابد.
نکته۳: اگر سنگ از دانه‌های کروی با اندازه‌های متفاوت تشکیل شده باشد، حداقل تخلخل را خواهد داشت. در صورتی که اگر این دانه‌ها زاویه‌دار و بی‌شکل باشند، مقدار تخلخل زیاد است.


دانه‌های زاویه‌دار و بی‌شکل


دانه‌های کروی با اندازه‌های متفاوت

تاثیر شکل و اندازه مقدار دانه‌ها در تخلخل

مؤثرترین نوع تخلخل آن است که فضاهای خالی موجود در سنگ به یکدیگر ارتباط داشته باشند، تخلخل مؤثر در میزان نفوذپذیری سنگ‌ها تأثیر مستقیم دارد.

تخلخل مؤثر با نماد n_e نشان داده شده و به صورت درصد بیان می‌شود: $n_e = \frac{V_{ve}}{V_t} \times ۱۰۰$

نکته۴: تخلخل توده سنگ همیشه از تخلخل ماده سنگ، بیشتر است و علت آن وجود ناپیوستگی‌ها در تودهٔ سنگ است. در واقع هر چه میزان خردشدگی توده سنگ بیشتر باشد اختلاف تخلخل میان توده سنگ و سنگ بکر بیشتر می‌شود.

نکته۵: هوازدگی نیز باعث افزایش تخلخل در توده سنگ می‌شود. در اثر افزایش تخلخل به ویژه در اثر هوازدگی ضریب جذب آب در سنگ افزایش یافته در نتیجه مقاومت سنگ کاهش می‌یابد.

نکته۶: از آنجایی که نفت در منافذ سنگ تجمع پیدا می‌کند، روش دقیقی برای اندازه‌گیری تخلخل در صنعت نفت وجود دارد که در آن جیوه به درون نمونه تزریق می‌شود و مقدار تخلخل به دست می‌آید:

$$n = \frac{m_{Hg}\frac{G_s}{G_{Hg}}}{۱ + m_{Hg}\frac{G_s}{G_{Hg}}}$$

اثبات رابطه نکته ۶:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad , \quad V_v = \frac{M_{Hg}}{G_{Hg}.\rho_w} \quad , \quad V_t = V_v + V_s$$

$$m_{Hg} = \frac{M_{Hg}}{G_s.\rho_w.V_s} \Rightarrow V_s = \frac{M_{Hg}}{G_s.\rho_w.m_{Hg}}$$

$$n = \frac{\frac{M_{Hg}}{G_{Hg}.\rho_w}}{\frac{M_{Hg}}{G_{Hg}.\rho_w} + \frac{M_{Hg}}{m_{Hg}(G_s.\rho_w)}} \Rightarrow n = \frac{\frac{۱}{G_{Hg}}}{\frac{۱}{G_{Hg}} + \frac{۱}{m_{Hg}.G_s}} n = \frac{m_{Hg}.G_s}{m_{Hg}.G_s + G_{Hg}} \Rightarrow n = \frac{m_{Hg}.\frac{G_s}{G_{Hg}}}{۱ + m_{Hg}.\frac{G_s}{G_{Hg}}}$$

m_{Hg}: جیوه محتوی M_{Hg}: جرم جیوه تزریق‌شده G_s: وزن مخصوص ذرات جامد G_{Hg}: وزن مخصوص جیوه

نکته۷: در شرایطی که تخلخل با عمق تغییر نماید، می‌توان تخلخل متوسط را از رابطه زیر به دست آورد:

$$\bar{n} = \frac{\int n dh}{\int dh}$$

مثال۱: با فرض اینکه مقدار تخلخل با استفاده از رابطه زیر با عمق تغییر نماید، مقدار تخلخل درعمق ۱۵۰۰متری و تخلخل متوسط تا عمق ۱۸۰۰متری کدام‌یک از گزینه‌های زیر است؟ **$(n = ۳۱/۷۱ - ۰/۰۱۲۵۶h)$**

۱) ۲۰/۴، ۱۲/۸۷ ۲) ۱۱/۵، ۱۲/۸۷ ۳) ۱۸/۱۱، ۲۰/۲ ۴) ۱۲/۹، ۳۰/۵

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» با توجه به رابطه ارائه شده برای تخلخل داریم:

$$n = ۳۱/۷۱ - ۰/۰۱۲۵۶h \rightarrow h = ۱۵۰۰m$$

$$n = ۳۱/۷۱ - ۰/۰۱۲۵۶(۱۵۰۰) = ۱۲/۸۷$$

برای به دست آوردن مقدار تخلخل متوسط تا عمق ۱۸۰۰متری به ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

$$\bar{n} = \frac{\int_۰^h n dh}{\int_۰^h dh} = \frac{\int_۰^{۱۸۰۰} (۳۱/۷۱ - ۰/۰۱۲۵۶h) dh}{\int_۰^{۱۸۰۰} dh} = \frac{\left[۳۱/۷۱h - ۰/۰۱۲۵۶\frac{h^۲}{۲}\right]_۰^{۱۸۰۰}}{[h]_۰^{۱۸۰۰}} = \frac{۵۷۰۷۸ - ۲۰۳۴۷/۲}{۱۸۰۰} = ۲۰/۴$$

نسبت پوکی (Void ratio): نسبت حجم منافذ سنگ به حجم بخش جامد موجود در سنگ را نسبت پوکی گویند و آن را با e نشان داده و به صورت درصد بیان می‌شود:

$$\boxed{e = \frac{V_v}{V_s} \times ۱۰۰}$$

نکته۸: با افزایش نسبت پوکی، مقاومت سنگ کاهش می‌یابد.

مثال۲: اگر مقدار تخلخل سنگی n باشد، نسبت پوکی از کدام‌یک از گزینه‌های زیر به دست می‌آید؟

۱) $n+1$ ۲) $\frac{n-1}{n+1}$ ۳) $\frac{n}{1-n}$ ۴) $\frac{n}{1+n}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» ابتدا رابطه مربوط به نسبت پوکی را می‌نویسیم: $e=\frac{V_v}{V_s} \Rightarrow V_t=V_s+V_v \Rightarrow V_s=V_t-V_v$

سپس با جایگذاری $V_s=V_t-V_v$ در رابطه مربوط به نسبت پوکی و تقسیم صورت و مخرج بر V_t داریم: $e=\frac{V_v}{V_t-V_v}=\frac{\frac{V_v}{V_t}}{\frac{V_t}{V_t}-\frac{V_v}{V_t}}$

و از آنجایی که $n=\frac{V_v}{V_t}$، داریم: $e=\frac{n}{1-n}$

مثال۳: اگر نسبت پوکی سنگی e باشد، مقدار تخلخل از کدام‌یک از گزینه‌های زیر به دست می‌آید؟

۱) $e+1$ ۲) $\frac{e-1}{e+1}$ ۳) $\frac{e}{e-1}$ ۴) $\frac{e}{1+e}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» ابتدا رابطه مربوط به تخلخل را می‌نویسیم: $n=\frac{V_v}{V_t} \Rightarrow V_t=V_s+V_v \Rightarrow n=\frac{V_v}{V_s+V_v}$

و از آنجایی که $e=\frac{V_v}{V_s}$، داریم: $n=\frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s}+\frac{V_v}{V_s}} \Rightarrow n=\frac{e}{1+e}$

نکته۹: با حل دو مثال بالا می‌توان دریافت که بین تخلخل و نسبت پوکی رابطه‌ای وجود دارد.

نکته۱۰: در سنگ‌هایی که حجم منافذ از حجم جامد سنگ بیشتر باشد $(V_v > V_s)$، پارامتر e می‌تواند بزرگتر از یک باشد.

درجه اشباع (Degree of Saturation): نسبت حجم آب موجود در منافذ سنگ به حجم کل منافذ را درجه اشباع گویند و آن را با S نشان داده و به صورت درصد بیان می‌شود: $S=\frac{V_w}{V_v}\times 100$

نکته۱۱:

- در صورتی که سنگ کاملاً خشک باشد، $V_w=0$ در نتیجه $S=0$ خواهد بود.
- در صورتی که سنگ کاملاً اشباع (یعنی اینکه تمام منافذ موجود در سنگ پر از آب باشد) باشد، $V_v=V_w$ در نتیجه $S=100$ خواهد بود.
- و در سایر حالات $0<S<100$ خواهد بود.

نکته۱۲: افزایش میزان اشباع‌شدن سنگ‌ها اغلب باعث کاهش مقاومت سنگ‌ها می‌شود.

نکته۱۳: تخلخل، نسبت پوکی و درجه اشباع را روابط حجمی گویند، زیرا همگی بیان‌کننده رابطه بین حجم بخش‌های مختلف موجود در سنگ یا خاک با یکدیگر هستند.

روابط وزنی

آب‌محتوا (Water Content) یا درصد رطوبت: نسبت وزن آب موجود در یک سنگ به وزن بخش جامد سنگ را آب‌محتوا یا درصد رطوبت گویند و آن را با m نشان داده و به صورت درصد بیان می‌شود: $m=\frac{W_w}{W_s}\times 100$

تذکر۲: البته برخی منابع میزان آب‌محتوا یا درصد رطوبت را با W نشان می‌دهند.

نکته۱۴: رطوبت با مکانیزه‌های مختلفی ممکن است باعث کاهش مقاومت سنگ شود، از یک طرف جذب رطوبت در سنگ ممکن است با واکنش‌های شیمیایی باعث تضعیف پیوند کانی‌ها و در نتیجه کاهش چسبندگی و دیگر خواص سنگ شود، از طرف دیگر ممکن است جذب آب باعث ایجاد فشار منفذی شود که کاهش مقاومت را به دنبال دارد.

مثال۴: کدام‌یک از عبارات زیر صحیح است؟

۱) آب فیزیکی موجود در داخل سنگ‌ها در حدود دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد از آن جدا می‌شود.

۲) آب با اتصال شیمیایی از نوع آب کریستالیزاسیون در حدود ۲۰۰ تا ۶۰۰درجه سانتی‌گراد از سنگ جدا می‌شود.

۳) آب ساختمانی (یونی) موجود در سنگ در دمای بیشتر از ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد از آن جدا می‌شود.

۴) هر کدام از حالت های فوق می‌تواند اتفاق بیفتد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» آب با پیوند شیمیایی همراه با مولکول‌ها و یون‌های دیگر بخشی از شبکه بلوری کانی‌ها را تشکیل می‌دهند. حذف این آب باعث تخریب کانی و تغییر آن به ترکیب بدون آب می‌شود.

اگر آب موجود در شبکه بلور به صورت مولکولی باشد، آن را آب تبلوری می‌نامند که در دمای ۲۰۰تا۶۰۰درجه سانتی‌گراد جدا می‌شود. آب با پیوند فیزیکی از طریق نیروهای جاذبه مولکولی با ذرات جامد سنگ پیوند نزدیکی دارد و ذرات را به صورت غشایی می‌پوشاند، این آب در دمای بین ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد از دست می‌رود. آب ساختمانی (یونی) آبی است که در اثر گرم شدن یون‌ها (H^+, OH^-) تشکیل می‌شود و در دمای حدود ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد از دست می‌رود.

مثال۵: کدام‌یک از تعاریف زیر صحیح است؟

۱) نسبت حجم کل فضاهای خالی موجود در نمونه سنگ به حجم کل آن را نسبت پوکی آن سنگ می‌گویند.

۲) نسبت حجم آب موجود در نمونه سنگ به حجم فضاهای خالی آن را (برحسب درصد) مقدار آب و یا رطوبت آن سنگ می‌گویند.

۳) نسبت جرم آب موجود در نمونه سنگ به جرم مواد جامد سنگی را (برحسب درصد) مقدار آب یا رطوبت آن سنگ می‌گویند.

۴) نسبت حجم کل فضاهای خالی موجود در نمونه سنگ به حجم مواد جامد سنگی آن را تخلخل آن سنگ می‌گویند.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» نسبت تخلخل عبارت است از: حجم کل فضاهای خالی موجود در نمونه سنگ به حجم کل.

نسبت پوکی عبارت است از: حجم کل فضاهای خالی موجود در نمونه سنگ به حجم مواد جامد سنگی.

رطوبت یا مقدار آب عبارت است از: نسبت جرم آب موجود در نمونه سنگ به جرم مواد جامد سنگی.

وزن حجمی سنگ: وزن حجمی عبارت است از تقسیم وزن نمونه سنگ بر حجم آن و با نماد γ نشان داده می‌شود. واحد وزن حجمی در سیستم‌های مختلف عبارت‌اند از: $\frac{gr.f}{cm^3}$ یا $\frac{KN}{m^3}$ یا $\frac{lb}{ft^3}$

نکته۱۵: وزن حجمی سنگ در شرایط مختلف قابل تغییر است.

وزن حجمی کل (Total Unit Weight): نسبت وزن کل به حجم کل سنگ را وزن حجمی عادی یا مرطوب گویند و با نماد γ_t نشان می‌دهند: $\gamma_t = \frac{W_t}{V_t}$

وزن حجمی خشک (Dry Uint Weight): در حالتی که نمونه کاملاً خشک باشد $(w_t = w_s)$، وزن حجمی خشک به دست می‌آید که آن را با نماد γ_d نشان می‌دهند و در این حالت $s = 0$ است. $\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$

وزن حجمی اشباع (Saturated Unit Weight): در حالتی که نمونه کاملاً اشباع باشد، یعنی اینکه تمام حفرات آن پر از آب باشد $(W_t = W_{sat})$، وزن حجمی اشباع به دست می‌آید که آن را با نماد γ_{sat} نشان می‌دهند و در این حالت $S = 100$ است:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_t}$$

نکته۱۶: چون در این حالت آب تمام حفرات را پر کرده و وزن آب با رابطه‌ی مقابل قابل بیان است: $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$

$V_w = V_V \Rightarrow W_W = \gamma_w \times V_V$ (γ_w : وزن حجمی آب)

وزن حجمی جامد: عبارت است از: نسبت وزن اجزای سازنده‌ی سنگ بر حجم آن و با نماد γ_s نشان داده می‌شود.

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

نکته۱۷: وزن حجمی جامد به نوع و جنس اجزای سازنده جامد سنگ بستگی دارد و ارتباطی با کل توده سنگ نخواهد داشت.

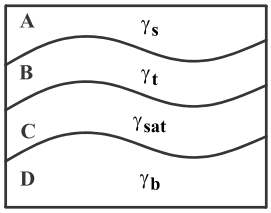
نکته۱۸: وزن حجمی سنگ با سن زمین‌شناسی، عمق، مقاومت فشاری و مدول شکل‌پذیری نسبت مستقیم و با تخلخل و هوازدگی نسبت معکوس دارد.

وزن حجمی غوطه‌وری (Bouyont Uint Weight): آخرین نوع وزن حجمی که به‌خصوص هنگام غوطه‌ور شدن سنگ مطرح می‌شود، وزن حجمی غوطه‌وری نامیده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma_b = \gamma_t - \gamma_w$$

γ_b: بیشتر در سفره‌های آب زیرزمینی مطرح می‌شود، زیرا سنگ به صورت غوطه‌ور در آب است. در منطقه غوطه‌ور چون وزن حجمی سنگ در واقع همان وزن حجمی اشباع است، داریم: $\gamma_b = \gamma_{sat} - \gamma_w$

عموماً وزن‌های حجمی براساس سطح آب‌های زیرزمینی به صورت شکل زیر است:



وزن حجمی سنگ در اعماق مختلف

نکته۱۹: در حالت غوطه‌وری وزن نمونه به علت اینکه نیرویی از طرف آب (نیروی غوطه‌وری) به آن اعمال می‌شود، کمتر از وزن نمونه در حالت اشباع است.

نکته۲۰: تمام تعاریف وزن حجمی را می‌توان با جایگزینی جرم(M) به جای وزن (W) به تعریف «جرم حجمی» تبدیل نمود:

وزن حجمی: $\gamma = \frac{W}{V} \Rightarrow$ جرم حجمی : $\rho = \frac{M}{V}$

از آنجا که جرم و وزن همواره با ضریب g(شتاب ثقل) به هم مرتبط می‌شوند $(W = m \times g)$؛ رابطه وزن حجمی و جرم حجمی بدین صورت قابل بیان است:

وزن: $W(N)$ جرم و $M(kg) \Rightarrow W = M \times g \Rightarrow \gamma = \rho g$

شتاب ثقل: $g(\frac{m}{s^2})$

مقدار g همواره برابر $(g = 9/81 \simeq 10 \frac{m}{s^2} = 1000 \frac{cm}{s^2})$ خواهد بود:

به عنوان مثال برای آب: $(\gamma_w \simeq 10 \frac{kN}{m^3}, \rho_w = 1000 \frac{kg}{m^3} = 1 \frac{gr}{cm^3})$

نکته۲۱: با توجه به مطالب فوق، محدود مقادیر وزن حجمی سنگ‌ها به صورت زیر است:

$$\gamma_s > \gamma_{sat} > \gamma_t > \gamma_d > \gamma_b$$

وزن مخصوص نسبی یا چگالی نسبی: نسبت وزن حجمی کل نمونه به وزن حجمی آب را وزن مخصوص نسبی گویند و آن را با G نشان می‌دهند، لازم به ذکر است که چگالی یک کمیّت نسبی و بدون بُعد بوده و به ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و مقدار آب موجود در سنگ بستگی دارد.

چگالی ظاهری: نسبت وزن حجمی کل بر وزن حجمی آب است: $G_t = \frac{\gamma_t}{\gamma_w}$

چگالی مطلق: نسبت وزن حجمی جامد بر وزن حجمی آب است: $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$

نکته۲۲: چگالی مطلق را چگالی دانه‌های جامد یا وزن مخصوص دانه‌های جامد و یا وزن مخصوص نسبی هم می‌نامند.

با وجود اینکه سنگ از ترکیب کانی‌های مختلفی تشکیل شده است، می‌توان برای تعیین چگالی نسبی سنگ با تعیین چگالی نسبی هر یک از کانی‌ها و نیز درصد حجمی آنها، از رابطه مقابل استفاده کرد: $\bar{G} = \sum_{i=1}^{n} G_i V_i$

که در آن G_i، چگالی کانی iام و V_i، درصد حجمی کانی iام است.

نکته۲۳: روابط مختلفی بین روابط وزنی ـ حجمی وجود دارد که مهمترین آنها در زیر آورده شده است. از آنجایی که سؤالاتی که در کنکور کارشناسی ارشد طرح می‌شوند با دانستن روابط زیر به راحتی قابل حل می‌باشند بر آن شدیم این روابط را به همراه اثبات آنان بیان کنیم.

۱) $n = \frac{e}{1+e}$

۲) $e = \frac{n}{1-n}$

۳) $G_s.m = S.e$

برای اثبات رابطه مقابل از دو روش زیر استفاده می‌شود:

روش اول: $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \Rightarrow \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{W_w}{V_w}} = \frac{W_s \times V_w}{W_w \times V_s} = \frac{W_s}{W_w} \times \frac{V_w}{V_s}$

با ضرب و تقسیم V_v در عبارت فوق داریم: $\frac{W_s}{W_w} \times \frac{V_w}{V_s} \times \frac{V_v}{V_v} \Rightarrow G_s \frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w}{V_v} \times \frac{V_v}{V_s}$

$$\boxed{\frac{W_w}{W_s} = m \quad , \quad \frac{V_w}{V_v} = S \Rightarrow G_s.m = Se \quad , \quad \frac{V_v}{V_s} = e}$$

روش دوم: $G_s.m = Se \Rightarrow G_s.m = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \times \frac{W_w}{W_s} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \times \frac{\gamma_w V_w}{\gamma_s V_s} = \frac{V_w}{V_s} \times \frac{V_v}{V_v} = \frac{V_w}{V_v} \times \frac{V_v}{V_s} = S \times e$

۴) $\gamma_t = \frac{(G_S + Se)}{1+e}\gamma_w$

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{\frac{W_s}{V_s} + \frac{W_w}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{\gamma_s + \frac{W_w}{V_s}}{1+e}$$

از طرفی داریم: $\gamma_s = G_s.\gamma_w \quad , \quad W_w = V_w.\gamma_w$

بنابراین با جایگذاری رابطه‌های فوق داریم: $\gamma_t = \frac{\gamma_s + \frac{V_w \gamma_w}{V_s}}{1+e} = \frac{G_s.\gamma_w + \frac{V_w}{V_v} \times \frac{V_v}{V_s} \times \gamma_w}{1+e}$

$$\begin{cases} \frac{V_w}{V_v} = S \\ \frac{V_v}{V_s} = e \end{cases} \Rightarrow \gamma_t = \frac{G_s \gamma_w + S.e.\gamma_w}{1+e} \Rightarrow \gamma_t = \frac{(G_s + Se)}{1+e}\gamma_w$$

۵) $\gamma_t = \frac{G_S(1+m)}{1+e}\gamma_w$

یادآوری: $\gamma_t = \frac{(G_s + Se)}{1+e}\gamma_w \quad , \quad G_s.m = Se$

$$\gamma_t = \frac{G_s + Se}{1+e}\gamma_w \xrightarrow{G_s m = Se} \gamma_t = \frac{G_s + G_s m}{1+e}\gamma_w \Rightarrow \gamma_t = \frac{G_s(1+m)}{1+e}\gamma_w$$

۶) $\gamma_d = \frac{G_s.\gamma_w}{1+e}$

نکته۲۴: برای به دست آوردن روابط مربوط به γ_d کافی است در روابط γ_t مقدار S را مساوی صفر قرار دهیم، زیرا در وزن حجمی خشک مقدار آب موجود در نمونه صفر است.

یادآوری: $\gamma_t = \frac{(G_s + Se)}{1+e}\gamma_w \quad , \quad S = 0 \Rightarrow \gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}$

۷) $\gamma_d = G_s.\gamma_w(1-n)$

یادآوری: $\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$ ، $n = \frac{e}{1+e}$

$1-n = \frac{1}{1+e} \Rightarrow \gamma_d = G_s\gamma_w(1-n)$

۸) $\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+m}$

یادآوری: $\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$ ، $\gamma_t = \frac{G_s(1+m)}{1+e}\gamma_w$ ، $\frac{\gamma_t}{\gamma_d} = 1+m \Rightarrow \gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+m}$

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

یادآوری: $\gamma_t = \frac{G_s+Se}{1+e}\gamma_w$

نکته۲۵: در حالت اشباع $s=1$ است.

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

۱۰) $n = \frac{\gamma_{sat}-\gamma_d}{\gamma_w}$

یادآوری: $n = \frac{V_v}{V_t}$

با ضرب و تقسیم W_w در n داریم: $n = \frac{V_v}{V_t}\times\frac{W_w}{W_w} \Rightarrow n = \frac{\frac{W_w}{V_t}}{\frac{W_w}{V_v}} \Rightarrow \gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$

$\xrightarrow[\text{اشباع}]{\text{در حالت}} V_w = V_v \Rightarrow \gamma_w = \frac{W_w}{V_v}$ ، $W_w = W_{sat} - W_s$

$$\boxed{n = \frac{\frac{W_{sat}-W_s}{V_t}}{\gamma_w} \Rightarrow n = \frac{\frac{W_{sat}}{V_t} - \frac{W_s}{V_t}}{\gamma_w}}$$

یادآوری: $\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_t}$ ، $\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$ ، $n = \frac{\gamma_{sat}-\gamma_d}{\gamma_w}$

۱۱) $\gamma_b = (\frac{G_s-1}{1+e})\gamma_w$

$\gamma_b = \gamma_{sat} - \gamma_w \Rightarrow \gamma_{sat} = \frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w$

$\gamma_b = \frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w - \gamma_w \Rightarrow \gamma_b = (\frac{G_s+e-1-e}{1+e})\gamma_w \Rightarrow \gamma_b = (\frac{G_s-1}{1+e})\gamma_w$

نکته۲۶: به یاد داشتن روابط فوق در حل تست‌های کنکور کارشناسی ارشد بسیار مهم و کاربردی است. از آنجایی که روابط وزنی ـ حجمی در درس مکانیک سنگ مبحثی مهم است و در هر سال سؤالاتی از این بخش در کنکور کارشناسی ارشد مطرح شده است بنابراین به دانشجویان گرامی توصیه می‌شود که حتماً روابط فوق را به یاد داشته باشند.

نکته۲۷: برای حل تست‌هایی که از این قسمت مطرح می‌شوند، ابتدا باید داده‌های مربوط به سؤال را یادداشت کرده و سپس دریابیم که سؤال چه پارامتری را می‌خواهد و در ادامه با استفاده از روابطی که مطرح شد به راحتی می‌توان سؤال مورد نظر را حل کرد.

مثال۶: اگر سنگی دارای کانی‌هایی با مشخصات زیر باشد، آنگاه چگالی نسبی آن کدام گزینه است؟

کانی دارای چگالی نسبی ۳/۲ و ۵۰ درصد — کانی دارای چگالی نسبی ۲/۵ و ۲۵ درصد — کانی دارای چگالی نسبی ۳/۵ و ۲۵ درصد

۱) ۲/۵ ۲) ۳/۱ ۳) ۳/۵ ۴) ۲/۸

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» اگر سنگی از ترکیبات مختلف تشکیل شده باشد برای تعیین چگالی نسبی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{G}=\sum_{i=1}^{n}G_iV_i \Rightarrow \bar{G}=(۳/۲\times ۰/۵)+(۲/۵\times ۰/۲۵)+(۳/۵\times ۰/۲۵)=۳/۱$$

مثال۷: اگر چگالی نسبی نمونه‌ای ۲/۶۵ و مقدار رطوبت سنگ ۱۰درصد و نسبت پوکی آن ۲۰ درصد باشد، مقدار تخلخل و درجه اشباع نمونه کدام گزینه است؟

۱) ۱/۳ ،۰/۱۶ ۲) ۱/۶ ،۱/۳ ۳) ۱/۶ ،۰/۲۵ ۴) ۵/۳ ،۰/۲۵

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» ابتدا از رابطه زیر مقدار تخلخل محاسبه می‌شود: $G_s=۲/۶۵\ ,\ m=۱۰\%\ ,\ e=۲۰\%$

$$n=\frac{e}{1+e}=\frac{۰/۲}{۱+۰/۲}=۰/۱۶$$

سپس برای محاسبه درجه اشباع از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$G_s.m=Se \Rightarrow S=\frac{G_sm}{e}=\frac{۲/۶۵\times ۰/۱}{۰/۲}=۱/۳$$

مثال۸: نمونه‌ای اشباع از یک سنگی ۱۷/۴ سانتی‌متر مکعب حجم و ۲۹/۸ گرم جرم دارد. پس از خشک کردن نمونه در دمای ۱۰۵درجه سانتی‌گراد، حجم نمونه به ۱۰/۵سانتی‌متر مکعب و جرم آن به ۱۹/۶ گرم می‌رسد. مقدار آب‌محتوا و وزن مخصوص نسبی سنگ کدام است؟ $\left(\gamma_w=۱\frac{gr}{cm^۳}\right)$

۱) ۱/۸۷ ،۵۲% ۲) ۱/۸۷ ،۶۵% ۳) ۱/۲۴ ،۶۵% ۴) ۰/۵۳ ،۵۲%

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» ابتدا داده‌های مربوط به سؤال به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$V_t=۱۷/۴cm^۳\ ,\ M_{sat}=۲۹/۸gr\ ,\ V_s=۱۰/۵cm^۳\ ,\ M_s=۱۹/۶gr\ ,\ \rho_w=۱\frac{gr}{cm^۳}$$

سپس برای به دست آوردن میزان آب‌محتوا یا درصد رطوبت باید مقدار آب موجود در نمونه را محاسبه کنیم:

$$M_w=M_{sat}-M_s=۲۹/۸-۱۹/۶=۱۰/۲\ gr$$

$$m=\frac{M_w}{M_s}=\frac{۱۰/۲}{۱۹/۶}=۰/۵۲ \Rightarrow m=۵۲\%$$

برای محاسبه وزن مخصوص نسبی ابتدا مقدار P_s را به‌دست آورده و سپس G_s به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_s=\frac{\rho_s}{\rho_w} \Rightarrow \rho_s=\frac{M_s}{V_s}=\frac{۱۹/۶}{۱۰/۵}=۱/۸۷\frac{gr}{cm^۳}$$

$$G_s=\frac{\rho_s}{\rho_w}=\frac{۱/۸۷}{۱}=۱/۸۷$$

مثال۹: یک قطعه سنگ در حالت عادی ۳۷ سانتی‌متر مکعب حجم و در حالت خشک ۵۸ گرم جرم دارد، جرم این سنگ در صورت اشباع شـدن از آب، بدون تغییر حجم به ۷۶/۵ گرم می‌رسد، جرم حجمی ذرات تشکیل دهنده سنگ چند $\frac{gr}{cm^۳}$ **است؟**

۱) ۲/۸۵ ۲) ۲/۶ ۳) ۲/۷۸ ۴) ۳/۱

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» ابتدا داده‌های مربوط به سؤال را می‌نویسیم: $V_t=۳۷cm^۳\ ,\ M_s=۵۸gr\ ,\ M_{sat}=۷۶/۵gr\ ,\ \rho_w=۱\frac{gr}{cm^۳}$

در این قسمت جرم آب به صورت مقابل محاسبه می‌شود: $M_w=M_{sat}-M_s=۷۶/۵-۵۸=۱۸/۵gr$

$$V_w=V_v \xrightarrow[\text{اشباع}]{\text{در حالت}} V_v=\frac{M_w}{\rho_w}=\frac{۱۸/۵}{۱}=۱۸/۵cm^۳$$

$$V_s=V_t-V_v=۳۷-۱۸/۵=۱۸/۵cm^۳ \Rightarrow \rho_s=\frac{M_s}{V_s}=\frac{۵۸}{۱۸/۵}=۳/۱\frac{gr}{cm^۳}$$