فصل اول

«تخلخل »

مقدمه

مواد تشکیل‌دهنده سنگ یک مخزن هیدروکربوری حوزه‌های وسیع دارند: ماسه شل و نامستحکم تا ماسه‌سنگ‌ها، سنگ‌های آهکی یا دولومیت‌های بسیار سخت؛ دانه‌های این سنگ‌ها با انواع مواد به همدیگر متصل شده‌اندکه معمولترین آنها سیلت،کلسیت یا رس‌اند. آگاهی از خواص فیزیکی سنگ و فعل و انفعالات سیستم هیدروکربنی و سازند، در فهم و ارزیابی عملکرد یک مخزن بسیار مهم است.

خواص سنگ با تحلیل‌های آزمایشگاهی مغزه‌های گرفته‌شده از مخزن ارزیابی می‌شوند. مغزه‌گیری از محیط مخزن معمولاً با تغییراتی در حجم کلی مغزه، حجم فضای متخلخل مغزه، درجات اشباع سیال مخزن و بعضی اوقات خاصیت ترشوندگی سازند همراه است. هرکدام از این تغییرات، بسته به خصوصیات سازند و خاصیت پارامتر مورد نظر، اثری قابل اغماض یا مهم بر نتیجه دارد.

در آزمایش یک مغزه باید به تغییرات زیر توجه کرد. اساساً دو نوع آزمایش عمده آنالیز مغزه برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی سنگ‌های مخزن انجام می‌شوند:

الف) آزمایش‌های معمولی (روتین) آنالیز مغزه (Routine Core Analysis Tests یا RCAL):

۱ـ تعیین تخلخل ۲ـ تعیین نفوذپذیری (تراوایی) افقی (k_h) و قائم (k_v) مطلق ۳ـ تعیین تراوایی گاز با لغزش گاز ۴ـ تعیین شکاف‌ها و حفره‌ها ۵ـ تعیین اشباع نسبی آب و نفت و درجه اشباع ۶ـ تعیین وزن مخصوص سنگ و ذرات آن

ب) آزمایش‌های ویژه آنالیز مغزه (Special Core Analysis Tests یا SCAL):

۱ـ اندازه‌گیری فشار موئینگی ۲ـ اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبی آب، گاز و نفت ۳ـ اندازه‌گیری توزیع اندازه خلل‌وفرج سنگ ۴ـ اندازه‌گیری درجه ترشوندگی و زاویه تماس ۵ـ تراکم‌پذیری سنگ ۶ـ فشار وزن روباره ۷ـ آزمایش‌های الکتریکی (به‌دست آوردن ضریب سازند و پارامترهای آرچی) ۸ـ اندازه‌گیری کشش سطحی و بین‌سطحی ۹ـ آزمایش‌های سیلاب‌زنی ۱۰ـ آزمایش‌های تزریق گاز

اطلاعات مربوط به خواص بالا، برای محاسبات مهندسی مخزن ضروری هستند و مستقیماً برکمّیت و مدل توزیع هیدروکربن‌ها در مخزن تأثیر می‌گذارند. اگر این اطلاعات با اطلاعات مربوط به خواص سیال ترکیب شوند، جریان فازهای موجود در مخزن مانند آب،گاز و نفت را کنترل می‌کنند.

مثال۱: کدام‌یک از اهداف آنالیز خاص مغزه (SCAL) نیست؟

۱) تعیین تخلخل ۲) تعیین ترشوندگی ۳) تعیین تراوایی نسبی ۴) تعیین اشباع آب همزاد

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» SCAL → فشار موئینگی، اشباع آب همزاد، اشباع بحرانی و نفت پسماند، تراوایی نسبی و ترشوندگی

Routine core analysis → تراوایی (k_h, k_v) , ϕ , ρ , saturation

◆ ◆ ◆ ◆

مثال۲: در روش SCAL(Special core analysis) کدام‌یک از موارد زیر بدست می‌آیند، در حالی‌که نمی‌توان آن را از روش RCAL(Routine core analysis) بدست آورد؟

۱) تعیین تخلخل، تراوایی گاز با لغزش گاز، تعیین اشباع نسبی

۲) تعیین تراوایی گاز با لغزش گاز، اندازه‌گیری فشار موئینگی، اندازه‌گیری توزیع خلل‌وفرج سنگ

۳) اندازه‌گیری فشار موئینگی، اندازه‌گیری درجه ترشوندگی و زاویه تماس، تراکم‌پذیری سنگ

۴) اندازه‌گیری درجه ترشوندگی و زاویه تماس، توزیع اندازه خلل‌وفرج سنگ، تعیین اشباع نسبی

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» اهداف RCAL: ۱ـ تعیین تخلخل ۲ـ تعیین تراوایی (k_v, k_h) مطلق ۳ـ تعیین تراوایی گاز با لغزش گاز ۴ـ تعیین شکاف‌ها و حفره‌ها ۵ـ تعیین اشباع نسبی آب و نفت ۶ـ تعیین وزن مخصوص سنگ و ذرات آن.

اهداف SCAL: ۱ـ اندازه‌گیری فشار موئینگی ۲ـ اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبی آب، گاز و نفت ۳ـ اندازه‌گیری توزیع اندازه خلل‌وفرج سنگ ۴ـ اندازه‌گیری درجه ترشوندگی و زاویه تماس ۵ـ تراکم‌پذیری و زاویه تماس ۵ـ تراکم‌پذیری سنگ ۶ـ آزمایش‌های تأثیر فشار طبقات فوقانی ۷ـ آزمایش الکتریکی (بدست آوردن ضریب سازند و پارامترهای آرچی) ۸ـ اندازه‌گیری کشش سطحی و بین‌سطحی ۹ـ انجام آزمایش‌های جریان سیال (در محیط متخلخل) ۱۰ـ آزمایش‌های سیلاب‌زنی

مثال۳: Flow Capacity توسط کدام‌یک از روش‌های آنالیز مغزه و با اندازه‌گیری کدام پارامتر پتروفیزیکی تعیین می‌شود؟

۱) Special Core analysis، تخلخل (ϕ)
۲) Routine Core analysis، نفوذپذیری (k)
۳) Special Core analysis، نفوذپذیری (k)
۴) Routine Core analysis، تخلخل (ϕ)

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» ظرفیت جریان عبارت است از: $\text{flow Capacity} = kh$

که تراوایی مطلق (k) با استفاده از روش RCAL بدست می‌آید.

مثال۴: کدام گزینه در آزمایش RCAL بدست می‌آید؟

۱) Overburden Pressure, k, ϕ, Saturation
۲) IFT, k, density
۳) Saturation, k_o, ϕ
۴) ϕ, S_w, density

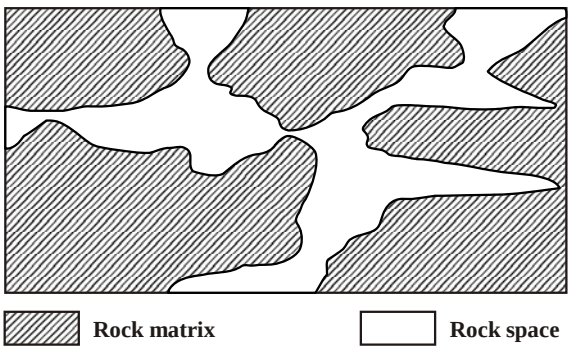
☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در گزینه اول Overburden Pressure، در گزینه دوم IFT و درگزینه سوم تراوایی نسبی k_o ، از آزمایش ویژه SCAL بدست می‌آیند.

تعریف تخلخل و انواع آن

تخلخل یک سنگ، اندازه‌گیری ظرفیت سنگ (Capacity Storage) و حجم خلل‌وفرج برای انباشت سیالات است. به صورت کمّی، تخلخل نسبت حجم خلل‌وفرج به حجم کل سنگ است. رابطه زیر این خاصیت مهم سنگ را تعریف می‌کند:

$$\phi = \frac{\text{حجم فضای خالی سنگ}}{\text{حجم کل سنگ}} = \frac{V_p}{V_b}$$

به طور کلی حجم کلی سنگ، مجموع حجم خلل‌وفرج و حجم ذرات تشکیل‌دهنده سنگ (ماتریکس) است. $V_b = V_m + V_p$



قسمت‌های مختلف سازنده سنگ

اگر $\phi = \frac{V_p}{V_b}$ استفاده شود، تخلخل بین صفر و یک خواهد بود؛ اما معمولاً از واحد درصد برای بیان تخلخل استفاده می‌شود، بنابراین:

$$\boxed{\phi = \frac{V_p}{V_b} \times ۱۰۰}$$

به طور کلی سنگ‌ها را می‌توان به دو دسته آواری (clastic) و کربناته (carbonate) تقسیم کرد. خصوصیات سنگ‌های آواری عبارتند از: ۱ـ معمولاً از کانی‌های سیلیس ($SiO_۲$) تشکیل شده‌اند ۲ـ بر اساس اندازه دانه‌ها و ترکیب کانی‌ها تقسیم می‌شوند. نمونه‌هایی از سنگ آواری ماسه‌سنگ‌ها و سنگ رس‌ها هستند.

سنگ‌های کربناته از کانی‌های کربناته (دارای آنیون $CO_۳^{-۲}$) تشکیل شده‌اند، نمونه‌هایی از سنگ کربناته سنگ آهک و دولومیت هستند.

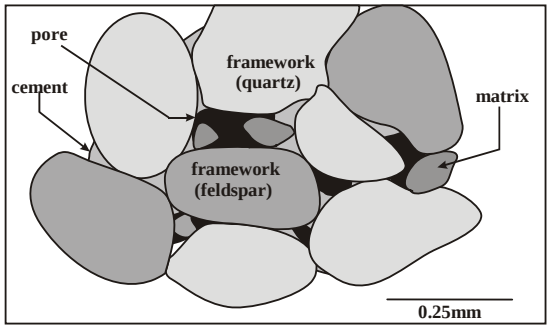
چهار مؤلفه اصلی تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها عبارت‌اند از:

الف) قالب اصلی (Framework): دانه‌های به اندازه ماسه

ب) ماتریکس (Matrix) : شامل مواد به اندازه رس و ماسه

ج) سیمان (Cement): موادی که پس از رسوبگذاری (deposition)، ته‌نشین (Precipitate) می‌شوند.

د) خلل‌وفرج (Pores): فضای خالی بین مؤلفه‌های فوق



مؤلفه‌های اصلی تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ

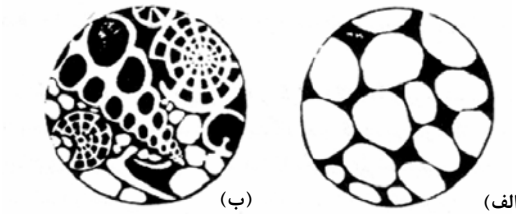
انواع تخلخل برحسب زمان تشکیل

بر اساس زمان تشکیل یا دگرگونی سنگ در دوره‌های مختلف سن سنگ، تخلخل به دو دسته تخلخل اولیه و تخلخل ثانویه (تخلخل القا شده) تقسیم می شود.

دسته اول) تخلخل اولیه: همزمان با رسوب مواد تشکیل‌دهنده سنگ، تشکیل می‌شود. از جمله این تخلخل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱ـ تخلخل بین دانه‌ای (Intergranular pore) یا بین ذره‌ای (Interparticle pore) : این نوع تخلخل در حفره‌های بین ذرات تشکیل‌دهنده سنگ در هنگام رسوبگذاری تشکیل می‌شود.

۲ـ تخلخل درون دانه‌ای (Intragranular pore): این نوع تخلخل در داخل دانه‌ها و بیشتر در سنگ‌های آهکی اسکلتی مشاهده می‌شود.



تخلخل بین دانه‌ای (الف) و تخلخل مخلوط بین دانه‌ای و میان دانه‌ای (ب)

۳ـ تخلخل پناهگاهی (Shelter): این نوع تخلخل معمولاً حفره‌هایی هستند که به صورت پناهگاهی در زیر دانه‌های درشت باقی می‌مانند مثل صدف دو کفه‌ای به صورت محدب.

۴ـ تخلخل درون شبکه‌ای حاصل از رشد موجودات (Growth – framework): این نوع تخلخل بر اثر رشد موجودات زنده درون حوضه رسوبی، در بین آن‌ها ایجاد می‌شود، مثل ریف‌ها.

مثال۵: مؤثرترین تخلخل مخازن ماسه‌سنگی کدام است؟

۱) تخلخل درون دانه‌ای ۲)تخلخل بین دانه‌ای ۳) تخلخل زیست جانوری ۴) تخلخل قالبی

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» مؤثرترین تخلخل در مخازن ماسه‌سنگی، تخلخل بین دانه‌ای است.

مثال۶: کدام‌یک از انواع آلوکم‌ها (دانه‌ها) دارای قابلیت انحلال و بوجود آمدن تخلخل هستند؟

۱) Shell fragments , Pellet ۲) Oolith , Pellet

۳) Oolith , Shell fragments ۴) Oolith , Intraclast

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» اجزاء سازنده سنگ به ۲ قسمت آلوکم(دانه‌ها) و ارتوکم (زمینه) تقسیم‌بندی می‌شود. دانه‌های Oolith و ذرات Shell راحت حل می‌شوند، در حالی‌که ذرات Pellet و Intraclast به سختی حل می‌شوند (پایداری زیادی دارند).

مثال۷: کدام یک از گزینه‌های زیر از انوع سیمان نیست؟

۱) سیلیسی ۲) کلسیتی ۳) انیدریتی ۴) دولومیتی

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» با توجه به این‌که دولومیت‌ها دارای سختی (Rigidity) بالایی می‌باشند، تخلخل خود را برابر فشار حفظ نموده و در هم فرو نمی‌روند و حل نمی‌شوند. بنابراین سیمان دولومیتی ایجاد نمی‌شود.

دسته دوم) تخلخل ثانویه: به دلیل بعضی فرایندهای زمین‌شناسی، در سنگ و پس از تشکیل آن رخ می‌دهد. از جمله این نوع تخلخل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱ـ تخلخل بین بلوری (Intercrystalline porosity): در طول مرزهای کریستالی کانی‌ها (خلل‌وفرج کوچک بین کریستال‌ها) تشکیل می‌شود، مثل دولومیت‌ها.

۲ـ تخلخل روزنه‌ای یا پنجره‌ای (Fenestral porosity): در این نوع تخلخل حفره‌ها به شکل عدسی، کروی یا بدون شکل به دنبال یکدیگر قرار گرفته‌اند. این حفره‌ها بر اثر از دست دادن آب بین ذرات و تخمیر جلبک‌ها در هنگام خشک‌شدن رسوبات به‌وجود آمده‌اند.

۳ـ تخلخل حفره‌ای (Vugular porosity): این نوع تخلخل در اثر انحلال قسمتی از سنگ به‌وجود می‌آید.

۴ـ تخلخل قالبی (Fabric porosity): این نوع تخلخل در اثر انحلال خود دانه یا آلوکم (به دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ آلوکم و به موادی که در بین دانه‌ها قرار می‌گیرند، ارتوکم می‌گویند) به‌وجود می‌آید.

۵ـ شکستگی (Fracture) : این نوع تخلخل در اثر ایجاد ترک‌ها ایجاد می‌شود.

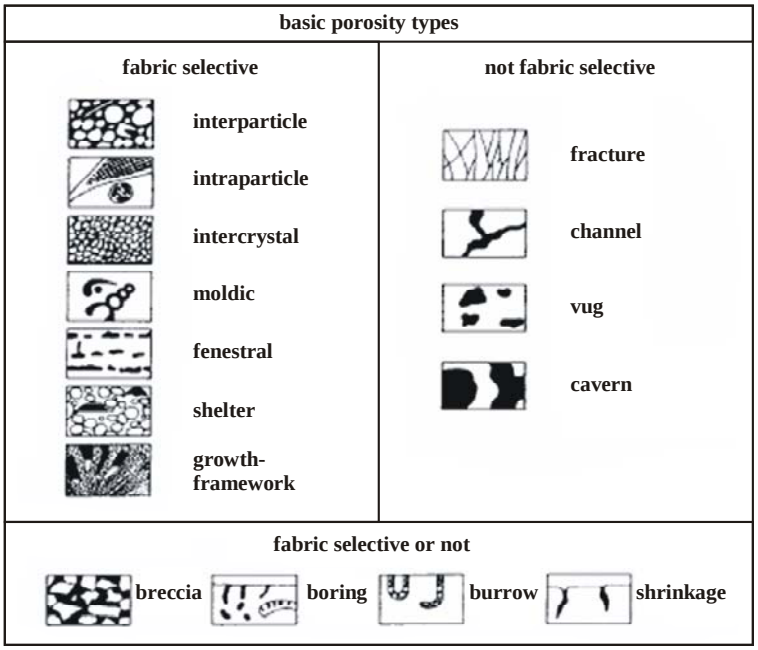
شکل شماتیک انواع تخلخل ثانویه

انواع تخلخل براساس وابستگی به اجزاء سازنده سنگ

تخلخل را براساس نوع وابستگی به اجزاء سنگ می‌توان به دو دسته تقسیم نمود:

الف) وابسته به بافت سنگ (Fabric selective): در این نوع تخلخل شکل دانه‌ها میزان تخلخل را مشخص می‌کنند. به عبارت دیگر تخلخل براساس شکل دانه‌ها ایجاد می‌شود.

ب) مستقل از بافت سنگ (Not Fabric selective): در این نوع تخلخل، شکل دانه‌ها و اندازه آن‌ها هیچ تأثیری بر تخلخل ایجاد شده ندارد.



مثال۸: کدام یک از موارد زیر عمده‌ترین سنگ مخزن در کشور ایران است؟

۱) ماسه سنگ (Sandstone) ۲) سنگ نمک ۳) کربناته (Carbonate) ۴) شیل نفتی (oilshale)

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» به طور عمده سنگ‌های رسوبی به دو دسته Clastic (آواری) و non clastic (غیر آواری) تقسیم می‌شوند که از این دو دسته ماسه سنگ‌ها (آواری) و سنگ‌های کربناته (غیرآواری یا شیمیایی) عمده سنگ‌های دنیا را تشکیل می‌دهند.

مخازنی که به طور عمده از ماسه سنگ‌ها تشکیل شده‌اند را مخازن آواری می‌نامند که بیش از ۹۰ درصد مخازن نفتی دنیا را تشکیل می‌دهند.

اما در ایران برخلاف سایر نقاط دنیا بیش از ۹۰ درصد سنگ مخزن‌ها را سنگ‌های کربناته و از نوع کربناته شکافدار تشکیل می‌دهند. سنگ‌های کربناته در حالت معمول سنگ مخزن خوبی نیستند، چون تخلخل و نفوذپذیری لازم را ندارند، اما در ایران، به دلیل تکتونیک شدید، این سنگ‌ها دارای شکاف شده و به همین دلیل برای مخزن شدن بسیار مستعدند.

نکته۱: ماسه‌سنگ‌ها عمده مخازن دنیا را تشکیل می‌دهند و شیل‌های نفتی هم در کشورهایی مانند کانادا با فرایندهای مانند حرارت‌دادن و .... نفت خوبی تولید می‌کنند.

مثال۹: کدام‌یک از انواع تخلخل زیر، تخلخل اولیه محسوب می‌شود؟

۱) Intercrystaline porosity ۲) Fracture porosity ۳) Intergranular porosity ۴) Solution porosity

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در تقسیم‌بندی تخلخل براساس زمان پیدایش، تخلخل به دو دسته‌ی اولیه (Primary) و ثانویه (Secondary) تقسیم می‌شود. تخلخل اولیه در زمان تشکیل سنگ ایجاد می‌شود از جمله:

۱ـ Intergranular (بین دانه‌ها) ۲ـ Intragranular (درون دانه‌ها)

تخلخل ثانویه هم طی گذر زمان و پس از نهشته‌شدن سنگ‌ها ایجاد می‌شود، مانند Solution (انحلال)، شکستگی (Fracture), Intercrystaline porosity.

مثال۱۰: تخلخل Moldic (قالبی) با کدام فرایند در ارتباط است؟

۱) Dolomitization ۲) Tectonic ۳) Dissolution ۴) At time of deposition

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» تخلخل Moldic (قالبی) نوعی تخلخل در سنگ‌های کربناته است که در اثر حل شدن یک دانه یا کریستال ایجاد می‌شود.

مثال۱۱: کدام گزینه جزء عوامل تشکیل‌دهنده‌ی تخلخل ثانویه نیست؟

۱) Dolomitization ۲) Folding ۳) Hydraulic fracturing ۴) Solution by organic acid

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» باید توجه داشت که Hydraulic fracturing از روشهای کاهش skin است و تأثیر به‌سزایی بر روی تراوایی دارد و موجب تحریک چاه می‌شود و از روش‌های stimulation می‌باشد، ولی تأثیری روی تخلخل ندارد.

مثال۱۲: کدام‌یک از انواع تخلخل زیر، Fabric- Selective نیست؟

۱) Interparticle ۲) Intraparticle ۳) Fenestral ۴) Bioturbation

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» انواع تخلخل Fabric- Selective، وابسته به اندازه ذرات عبارتند از:

۱ـ Interparticle ۲ـ Intraparticle ۳ـ Fenestral

Bioturbation که در اثر فعالیت و حرکت موجودات زنده ایجاد می‌شود، not- Fabric Selective است.

مثال۱۳: با از دست دادن آب در رسوبات و ایجاد انقباض و ایجاد ترک‌ها و شکستگی‌ها، کدام تخلخل حاصل می‌شود؟

۱) Shrinkage ۲) Breccia ۳) Boring ۴) Burrowing

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» در اثر از دست رفتن آب رسوبات و ایجاد ترک، تخلخل Shrinkage حاصل می‌شود.

تخلخل‌های Burrowing و Boring از نوع تخلخل زیست جانوری یا Bioturbation می‌باشند. تخلخل Breccia در اثر گسل ایجاد می‌شود.

مثال۱۴: کدام گزینه تخلخل پیوسته است؟

۱) Moldic ۲) Intraparticle ۳) Shelter ۴) Interparticle

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» سه گزینه اول جزء تخلخل غیر پیوسته می‌باشند، در حالی که گزینه۴ از نوع تخلخل پیوسته است.

مثال۱۵: کدام یک از انواع تخلخل زیر non fabric selective نیست؟

۱) شکستگی (Fracture) ۲) زیست‌جانوری (Bioturbation) ۳) برشی(Breccia) ۴) شبکه‌ای(Fenestral)

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» سه گزینه اول non fabric selective می‌باشند، در حالی‌که تخلخل شبکه‌ای، fabric selective می‌باشد.

آب هیدراته (water of hydration)

آب هیدراته، میزان تغییر حجمی است که ذرات تشکیل‌دهنده سنگ بر اثر جذب آب و کریستاله‌شدن پیدا می‌کنند. بایستی دقت شود که این حجم در محاسبات به تخلخل اضافه نشود.

سنگ‌ها در دوره‌های زمین‌شناسی با رسوب‌گذاری در محیط‌های مختلف تشکیل شده‌اند. این سنگ‌ها دو نوع فضای‌خالی دارند؛ بعضی از این فضاها مرتبط هستند و بعضی دیگر با مواد سیمانی از دیگر فضاهای خالی جدا شده‌اند. بر اساس این توضیح کوتاه، دو نوع مشخص تخلخل را می‌توان تعریف کرد:

۱ـ تخلخل مطلق ۲ـ تخلخل مؤثر

تخلخل مطلق (ϕ_t یا ϕ_a)

تخلخل مطلق، نسبت حجم کل خلل‌وفرج موجود در سنگ به حجم کل نمونه است. ممکن است یک سنگ، تخلخل مطلق قابل ملاحظه‌ای داشته باشد در حالی‌که قابلیت گذردهی سیال آن به علت فقدان ارتباط منافذ در حد صفر باشد. تخلخل مطلق در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\phi = \frac{\text{حجم کل فضای خالی سنگ}}{\text{حجم کل سنگ}}$$

یا به صورت دیگر می‌توان نوشت:

$$\phi_a = \frac{\text{حجم قسمت جامد سنگ ـ حجم کل سنگ}}{\text{حجم کل سنگ}}$$

که در رابطه فوق a بیانگر absolute است.

تخلخل مؤثر (ϕ_e)

درصد خلل‌وفرج مرتبط به حجم کل نمونه است که به صورت رابطه زیر می‌توان آن را بیان کرد:

$$\phi_e = \frac{\text{حجم فضاهای خالی به هم پیوسته سنگ}}{\text{حجم کل سنگ}}$$

که در رابطه فوق e، بیانگر effective است.

در همه محاسبات مهندسی مخزن، چون تخلخل مؤثرحجم خلل‌وفرج مرتبط با هم و حاوی سیالات هیدروکربنی قابل برداشت را نشان می‌دهد، از این پارامتر استفاده می‌کنند.

برای مقایسه تخلخل کل و تخلخل مؤثر می‌توان نوشت:

در ماسه‌سنگ‌های تمیز: $\phi_e \to \phi_t$

در ماسه‌سنگ‌های دارای سیمان شدگی ضعیف: $\phi_e \approx \phi_t$

در ماسه‌سنگ‌های با سیمان‌شدگی بالا: $\phi_e < \phi_t$

یکی از کاربردهای مهم تخلخل مؤثر تعیین حجم اولیه نفت درجاست. مخزنی با ضخامت h را در نظر بگیرید. حجم کل مخزن را با استفاده از مساحت بر حسب ایکر (A) از رابطه روبرو محاسبه می‌کنند: $\text{Bulk Volume} = ۷۷۵۸Ah,\ \text{bbl}$ یا $\text{Bulk Volume} = ۴۳۵۶\circ Ah,\ \text{ft}^۳$

حجم فضای خالی را می‌توان با استفاده از روابط بالا و ترکیب آن با تخلخل به‌دست آورد:

$PV = ۷۷۵۸Ah\phi,\ \text{bbl}$ یا $PV = ۴۳۵۶\circ Ah\phi,\ \text{ft}^۳$

مثال۱۶: کدام گزینه تعریف دقیقی از تخلخل مؤثر ($\phi_{effective}$) است؟

۱) تخلخلی که در هنگام تشکیل سنگ به‌وجود می‌آید و همان تخلخل بین دانه‌ای است.

۲) نسبت حجم حفره‌های به هم پیوسته که سیال مخزن می‌تواند در آن جریان یابد به حجم کل سنگ.

۳) درصدی از کل تخلخل در سنگ‌هایی که بیشتر ذرات آن‌ها دچار انحلال شده‌اند.

۴) درصدی از کل تخلخل موجود در سنگ که در اختیار سیال آزاد باشد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» تخلخل براساس نوع حرکت سیالات در آن به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱ـ Effective porosity (تخلخل مؤثر): عبارت است از حجم سیالی که می‌تواند حرکت کند، تقسیم بر حجم کل توده سنگ (تخلخل که در اختیار سیال آزاد می‌باشد، سیال آزاد سیالی است که می‌تواند حرکت کند.)

۲ـ Ineffective porosity : فضاهای خالی را شامل می‌شود که سیال نمی‌تواند در آن حرکت کند.

۳ـ Potential porosity : که عبارت است از نسبت حجم حفره‌های به هم پیوسته که سیال می‌تواند در آن جریان یابد به حجم توده سنگ.

فاکتورهای مؤثر بر تخلخل

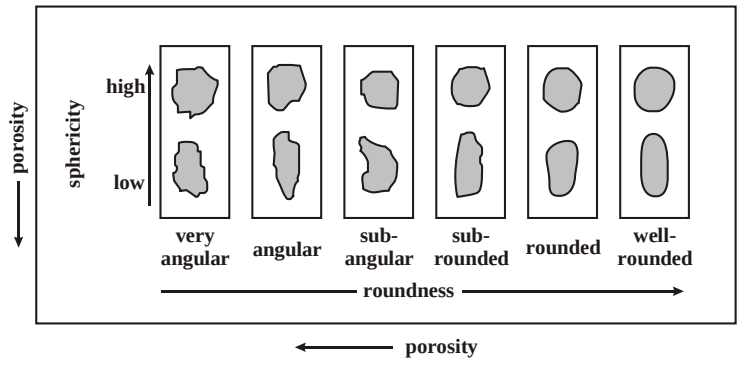
فاکتورهای مؤثر بر تخلخل به دو دسته کلی اولیه و ثانویه (دیاژنزی) تقسیم می‌شوند. این فاکتورها عبارت‌اند از:

اولیه: ۱ـ کرویت ذرات و زاویه‌داری آن‌ها (sphericity and angularity) ۲ـ چینش (packing) ۳ـ جورشدگی sorting

ثانویه: ۱ـ سیمان‌شدگی cementing ۲ـ فشارهای فوقانی (overburden stress) ۳ـ حفره‌ها، انحلال و شکاف‌ها (vugs, dissolution and fractures)

۱ـ کرویت ذرات و زاویه‌داری آن‌ها

شکل زیر روند تغییرات تخلخل و گردشدگی و کروی‌شدگی را نشان می‌دهد.



اثر کرویت و زاویه‌داری بر تخلخل

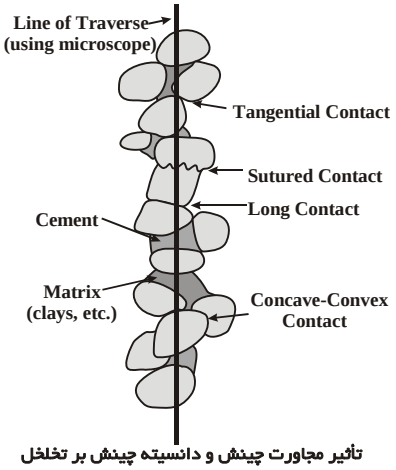
۲ـ چینش (Packing)

در چینش دو خاصیت مهم مطرح می‌شود:

الف) مجاورت چینش (Packing prorximity) ب) دانسیتی چینش (Packing density)

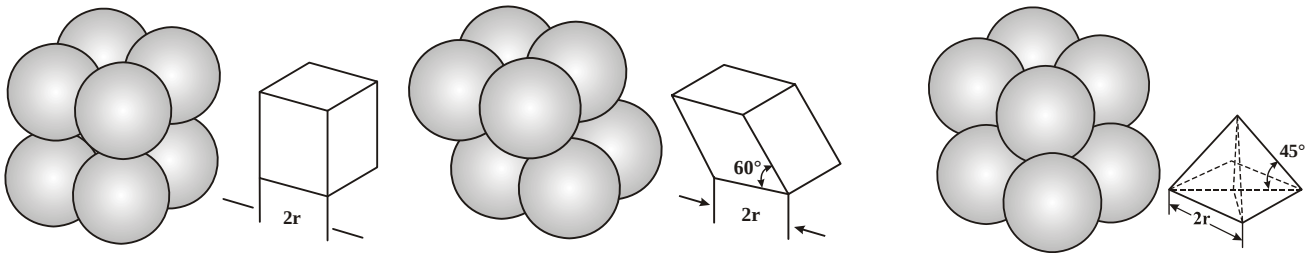
Packing proximity به نوعی اندازه‌گیری میزان تماس دانه‌های مجاور با یکدیگر می‌باشد، در حالی‌که **Packing density**، به نوعی بیانگر تعداد ذرات سنگ در واحد (حجمی یا طولی یا سطحی) می‌باشد.

برای محاسبه Packing density برای شکل مقابل، با رسم خط و اندازه‌گیری طولی از این حد که ذرات سنگی را در برمی‌گیرد و تقسیم آن بر کل طول خط، دانسیتی چینش را به دست می‌آورند. معمولاً برای به دست آوردن تأثیر Packing بر تخلخل فرض می‌شود، ذرات حالت کروی شکل بوده (ساده‌ترین حالت) و از آن‌جا میزان تخلخل را محاسبه می‌کنند.



تأثیر مجاورت چینش و دانسیته چینش بر تخلخل

شکل زیر سه نوع مختلف را نشان می‌دهد. تراکم نوع مکعبی (Cubic) دارای تخلخل ۴۷/۶٪، (Orthorhombic) دارای تخلخل ۳۹/۵٪ و رمبوهدرال (rhombohedral) دارای تخلخل ۲۵/۹٪ است. همان‌طور که در شکل مشخص است، نوع تراکم و درجه تراکم مستقل از اندازه ذرات تشکیل‌دهنده و قطر آن‌ها است.



cubic packing

$$V_b = D^2 \times D\sin\theta$$
$$\theta = 60°$$
$$V_g = \frac{\pi}{6}D^3$$
$$\phi = \frac{D^3(0.866 - \frac{\pi}{6})}{0.866D^3}$$
$$\phi = 39.5\%$$

orthorhombic packing

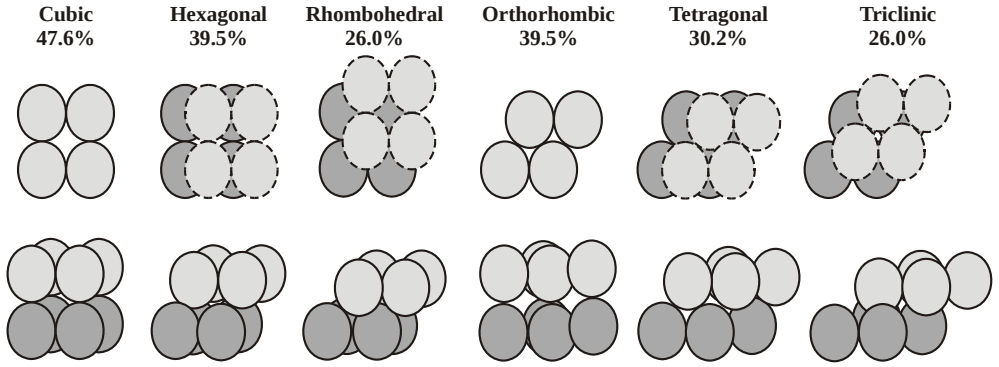
$$\theta = 60°$$
$$V_b = D^2 \times D\sin\theta$$
$$V_g = \frac{\pi}{6}D^3$$
$$\phi = \frac{D^3(0.866 - \frac{\pi}{6})}{0.866D^3}$$
$$\phi = 39.5\%$$

Rhombohedral packing

$$\theta = 45°$$
$$V_b = D^2 \times D\sin\theta$$
$$V_g = \frac{\pi}{6}D^3$$
$$\phi = \frac{D^3(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{6})}{\frac{D^3}{\sqrt{2}}}$$
$$\phi = 25.9\%$$

آرایش مختلف دانه‌های سنگ

برای آرایش‌های دیگر نیز به صورت مشابه عمل می‌شود. به طور خلاصه برای انواع چینش‌ها داریم:

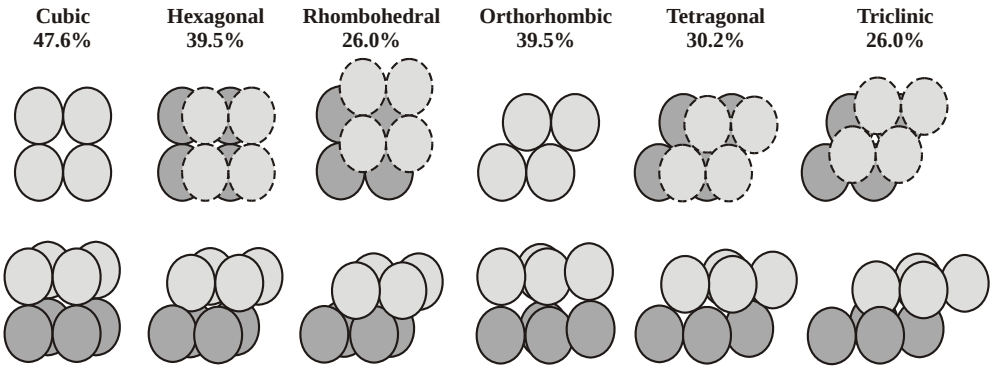


میزان تخلخل برای چینش‌های مختلف

مثال۱۷: با دانه‌های کروی و قطر معین، ساختار ارتورومبیک چه تخلخلی دارد؟

۱) ۴۷/۶ درصد ۲) ۲۵/۹ درصد ۳) ۳۰/۲ درصد ۴) ۳۹/۵ درصد

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» شکل زیر انواع آرایش را نشان می‌دهد.



با توجه به آرایش ارتورومبیک خواهیم داشت: $\text{مساحت‌لوزی} = \frac{۱}{۲} \times \text{قطربزرگ} \times \text{قطرکوچک} = \frac{۱}{۲} \times ۲\sqrt{(۲r)^۲ - r^۲} \times ۲r = ۲\sqrt{۳}r^۲$

بنابراین مقدار تخلخل برابر است با: $\text{تخلخل} = ۱ - \frac{\text{حجم‌جامد}}{\text{حجم‌کل}} = ۱ - \frac{\frac{۴}{۳}\pi r^۳}{۲\sqrt{۳}r^۲ \times ۲r} = ۳۹/۵ \text{ درصد}$

مثال۱۸: در یک محیط متخلخل که دارای ذرات کروی شکل می‌باشد (قطر هر ذره ۳۰۰ میکرومتر) و ذرات در یک سیستم رومبوهدری در کنار هم قرار گرفته‌اند، میزان تخلخل چند درصد است؟

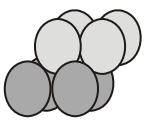
۱) ۴۷/۶ ۲) ۳۳ ۳) ۲۷/۷ ۴) ۲۶

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» برای محاسبه تخلخل سیستم رومبوهدری داریم:

$$V_b = ۲r \times ۲r \times h = ۲r \times ۲r \times \sqrt{۲}r = ۴\sqrt{۲}r^۳ \qquad V_m = \frac{۴}{۳}\pi(\frac{r}{۲})^۳ \times ۸$$

بنابراین با جایگذاری اعداد در رابطه تخلخل داریم: $\phi = \frac{V_p}{V_b} = ۱ - \frac{V_m}{V_b} = ۱ - (\frac{\frac{۴}{۳}\pi r^۳}{۴\sqrt{۲}r^۳}) = ۲۶\%$

مثال۱۹: ساختار زیر دارای چه تخلخلی است؟



۱) ۴۷/۶ درصد ۲) ۲۵/۹ درصد
۳) ۳۰/۲ درصد ۴) ۳۹/۵ درصد

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» همانطور که مشخص است این شکل مربوط به ساختار رومبوهدرال با تخلخل ۲۶% یا ۲۵/۹ درصد است.

مثال۲۰: یک محیط متخلخل داریم که تمامی ذرات آن، ذرات کروی یکسان است. حداکثر تخلخل این محیط متخلخل چقدر است؟

۱) %۴۸ ۲) %۲۸ ۳) %۵۸ ۴) %۶۴

پاسخ: گزینه «۱» برای محاسبه تخلخل در این سیستم داریم:

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} = ۱ - \frac{V_m}{V_b} = ۱ - \frac{\frac{۴}{۳}\pi r^۳}{(۲r)^۳} = ۰/۴۷۶۶ \times ۱۰۰ = ۴۷/۶۶\%$$

مثال۲۱: با دانه‌های کروی و قطر معین، ساختار Rhombohedral دارای چه تخلخلی است؟

۱) ۴۷/۶ ۲) ۳۹/۵ ۳) ۲۵/۹ ۴) ۱۶/۱

پاسخ: گزینه «۳» با توجه به نکات گفته‌شده، ساختار Rhombohedral دارای تخلخل ۲۵/۹ درصد می‌باشد.

مثال۲۲: مقدار تخلخل برای مخزنی با آرایش دانه‌های Hexagonal کدام است؟

۱) ۲۵/۹ درصد ۲) ۳۹/۵ درصد ۳) ۴۶/۷ درصد ۴) ۴۷/۶ درصد

پاسخ: گزینه «۲» با توجه به نکات گفته‌شده، مقدار تخلخل برای آرایش Hexagonal، ۳۹/۵ درصد است.

مثال۲۳: اگر محیط متخلخلی از مجموعه‌ای از لوله‌های موئین در کنار هم تشکیل شده باشد، تخلخل در حالتی که درون لوله‌های موئین خالی باشند (جریان از داخل لوله‌ها عبور کند) و در حالتی که درون لوله‌های موئین پر باشند (جریان از فضای بین لوله‌های موئین عبور کند) به ترتیب کدام است؟

۱) $۱-\frac{\pi}{۴}, \frac{\pi}{۴}$ ۲) $\frac{\pi}{۴}, ۱-\frac{\pi}{۴}$ ۳) $۱-\frac{\pi}{۲}, \frac{\pi}{۲}$ ۴) $\frac{\pi}{۲}, ۱-\frac{\pi}{۲}$

پاسخ: گزینه «۱» برای محاسبه تخلخل دو حالت لوله‌های موئین توپر و توخالی در نظر گرفته می‌شوند:

حالت اول:

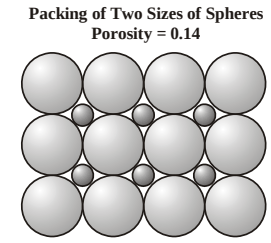
$$\phi = \frac{\pi r^۲}{۴r^۲} = \frac{\pi}{۴}$$

حالت دوم:

$$\phi = \frac{۴r^۲ - \pi r^۲}{۴r^۲} = ۱ - \frac{\pi}{۴}$$

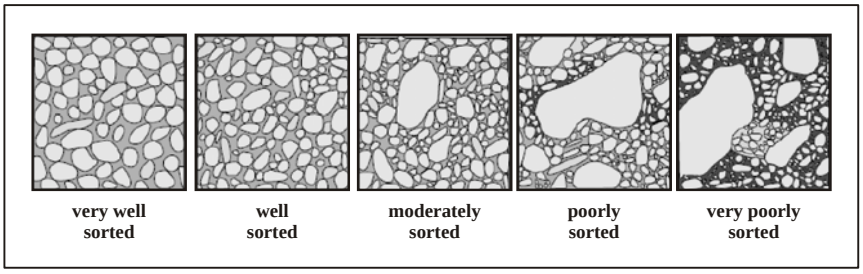
۳ـ جورشدگی (Sorting)

اگر ذرات سنگ دارای ترتیب و طبقه‌بندی خوبی باشند (well sorted)، یعنی اینکه ذرات سنگ دارای اندازه‌های یکسان هستند. اگر طبقه‌بندی ذرات ضعیف (poorly sorted) باشد، باعث می‌شود که تخلخل کاهش یابد. شکل مقابل نشان می‌دهد که اگر ذرات بزرگ‌تر با ذرات کوچکتر پر شود، تخلخل کاهش می‌یابد.



چینش با دو دسته اندازه متفاوت

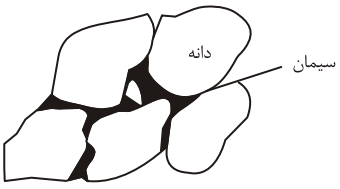
شکل زیر به وضوح تأثیر جورشدگی را بر تغییرات تخلخل نشان می‌دهد.



تأثیر جورشدگی بر تخلخل

۴ـ سیمان‌شدگی (Cementing)

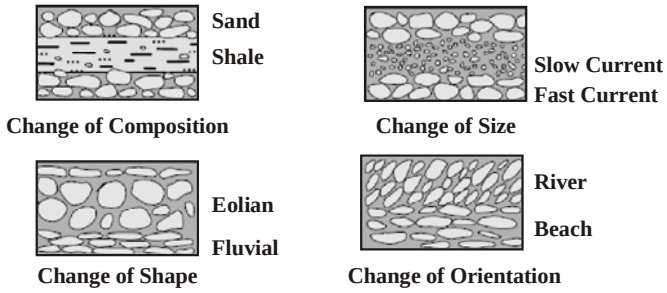
در سنگ‌های یکپارچه (Consolidated Rock)، ذرات با هم و معمولاً به وسیله کوارتز یا مواد کربناته سیمانی می‌شوند. عمل سیمانی‌شدن باعث کاهش تخلخل می‌شود.



سیمانی‌شدن دانه‌های سنگ

۵ـ تأثیر فشارهای فوقانی (Overburden pressure)

معمولاً فشارهای فوقانی به شکل‌های مختلف می‌تواند باعث تغییر تخلخل شوند که بعضی از آن‌ها در شکل زیر نشان داده شده‌اند.



تأثیر لایه‌بندی‌های مختلف بر تخلخل

مثال۲۴: در یک محیط متخلخل، میزان تخلخل ۲۰ درصد گزارش شده است. در این سیستم حجم دانه‌های سنگ چند برابر حجم فضای خالی است؟

۱) ۶ ۲) ۵ ۳) ۳ ۴) ۴

پاسخ: گزینه «۴» برای محاسبه تخلخل داریم: $\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{V_t + V_{grain}} = \frac{۲۰}{۱۰۰} \Rightarrow V_{grain} = ۸۰, V_p = ۲۰ \Rightarrow V_{grain} = ۴V_p$

مثال۲۵: در یک محیط متخلخل، میزان تخلخل برابر با ۲۵% گزارش شده است، در این سیستم حجم دانه‌های سنگ چند برابر pore volume است؟

۱) ۴ برابر ۲) ۵ برابر ۳) ۳ برابر ۴) ۲۵ برابر

پاسخ: گزینه «۳» رابطه تخلخل عبارت است از: $۱)\phi = \frac{V_p}{V_b} = \frac{\text{pore volume}}{\text{Bulk volume}} = ۰/۲۵ = \frac{۱}{۴} \Rightarrow \text{Bulk volume} = ۴ \times \text{pore volume}$

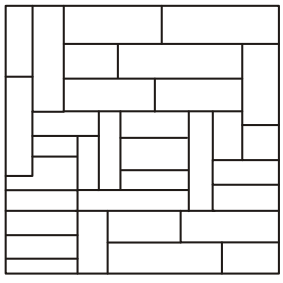
برای محاسبه حجم کل داریم: $۲)\text{Bulk volume} = (\text{grain volume} + \text{pore volume})$

بنابراین: $۱,۲ \Rightarrow ۴ \times \text{pore volume} = \text{grain volume} + \text{pore volume} \Rightarrow \text{grain volume} = ۳ \times \text{pore volume}$

۶ـ حفره‌ها، انحلال، شکاف‌ها (Vugs , dissolution and fractures)

معمولاً در سنگ‌های کربناته، تخلخل ثانویه مهمتر از تخلخل اولیه است. منشأ اصلی تخلخل ثانویه در این سنگ‌ها؛ شکاف، حل‌شدن و جایگزینی مواد شیمیایی است.

شکاف‌ها، به ترک‌هایی که در سنگ وجود دارد، گفته می‌شوند. شکل زیر یک مدل ایده‌آل سازند شکاف‌دار را نشان می‌دهد که دانه‌های آن همانند مکعبی و شکاف‌ها، فضای خالی را تشکیل می‌دهند. تخلخل شکاف‌ها معمولاً کوچک بوده و اغلب $۲\% - ۱$ است. جریان سیال درون شکاف‌ها به راحتی اتفاق می‌افتد، بنابراین شکاف‌ها ظرفیت جریان سیال را افزایش می‌دهند.



شماتیک شکاف‌ها در سنگ کربناته

حل‌شدن، یک واکنش شیمیایی است که در آن آب و دی‌اکسید کربن با کربنات کلسیم ترکیب می‌شود و بی‌کربنات کلسیم را تشکیل می‌دهد. این واکنش، تخلخل سنگ آهک را افزایش می‌دهد. واکنش شیمیایی ذکر شده به‌صورت مقابل است.

$$CO_۲ + H_۲O \rightarrow H_۲CO_۳$$
$$H_۲CO_۳ + CaCO_۳ \rightarrow Ca(HCO_۳)_۲$$

نکته۲: جایگزینی مواد شیمیایی، یک واکنش شیمیایی است که در آن یک یون با یون دیگری جایگزین می‌شود که در نتیجه آن، اندازه ماده شیمیایی کاهش می‌یابد. برای مثال دولومیتی‌شدن (Dolomitization) با جایگزینی منیزیم (Mg) به جای (Ca) انجام می‌شود که در نتیجه آن حجم ذرات کنترل‌شده و فضای خالی تا ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. $۲CaCO_۳ + MgCl_۲ \rightarrow CaMg(CO_۳)_۲ + CaCl_۲$