

شود. قابل ذکر است که رفتار سنگها در اثر تغییرات تنشها، حرارت و سیالات موجود و زمان نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. کمترین نتیجه ای که از تقسیم بندی سنگها براساس خواص شاخصی آنها گرفته می شود این است که رفتار آنها در مقایسه با توده سنگی که شاید حاوی شکستگیهای فراوانی می باشد مشخص می شود. نتیجه دیگر بکارگیری این خواص عبارت از خواص نمونه سنگهای سالم است. در اغلب موارد کاربردی شامل استخراج رویاز و یا زیرزمینی، آزمایشهای شکستگی و ارزیابی آنها برابر و یا حتی بیشتر از سنگهای بدون شکستگی است. برای مثال تقسیم بندی توده های سنگی نه تنها انعکاسی از آزمایشهای سنگها در آزمایشگاه می دهند بلکه خواص ساختی و محیطی توده های سنگی در محدوده مورد نظر نیز در آن مؤثر هستند. این تقسیم بندی بعداً مورد توجه قرار می گیرد.

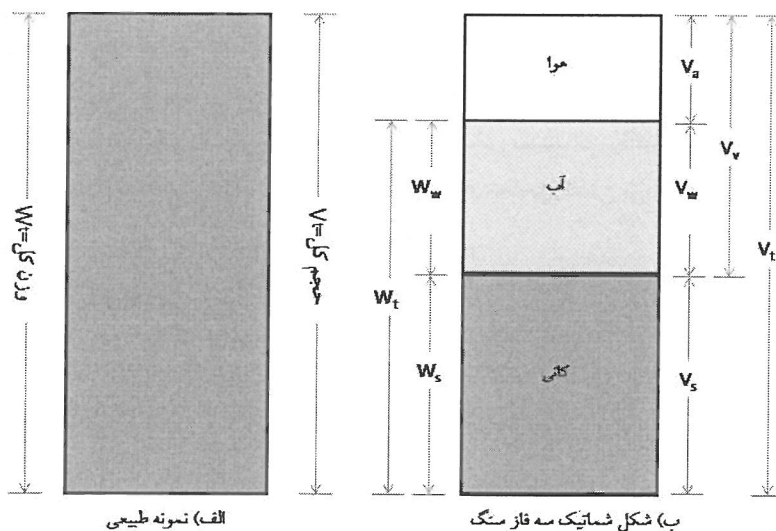
در کل خواص شاخصی سنگها را می توان به سه دسته زیر تقسیم نمود:

- خواص ذاتی و مستقل سنگها همانند وزن مخصوص و تخلخل، پوکی، دانسیته و نظایر آن.
  - خواص عکس العملی سنگها که در برابر شرایط خاص ایجاد شده اند مانند سختی، ساینده گی و نظایر آن.
  - خواصی از سنگها که در ارتباط با پدیده های فیزیکی دیگر هستند مانند رسانایی حرارتی، خواص صوتی و نظایر آن .
- در ادامه خواص هر گروه با جزئیات بیشتری ارائه می شود.

### ۲-۳- خواص ذاتی و مستقل سنگها

مواد ژئومکانیکی مانند سنگ و خاک از چند فاز مانند جامد، مایع و گاز تشکیل شده اند. برخلاف موادی مانند شیشه، فولاد، آب که تنها دارای یک فاز هستند، سنگها معمولاً از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده اند. به طور طبیعی فازهای تشکیل دهنده سنگ و خاک شامل بخش جامد کانیهای تشکیل دهنده آنها و فاز مایع و گازی که در فضای متخلخل بین کانیها هستند .

شکل (۲-۳-الف) یک نمونه طبیعی سنگ با حجم  $V$  و وزن  $W$  را نشان می دهد. برای تشریح روابط بین خصوصیات فیزیکی، نمونه ای از سنگ را که از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است، این سیستم سه فازی را به صورت مجزا در نظر می گیریم (شکل ۲-۳-ب):



شکل ۲-۳- فازهای جامد- مایع- گاز در یک نمونه سنگ

حجم کل نمونه سنگ به صورت رابطه زیر بیان می شود :

$$V_t = V_v + V_s \quad (۱-۲)$$

وزن هوا و وزن کل

نمونه به صورت زیر تعیین می شود :

$$W_a = 0 \quad , \quad W_t = W_w + W_s \quad (2-2)$$

پارامترهای ذکر شده در این عبارتند از:  $V_w$ : حجم آب،  $V_a$ : حجم هوا،  $V_s$ : حجم بخش جامد،  $V_v$ : حجم فضای خالی،  $V_t$ : حجم کل،  $W_w$ : وزن آب،  $W_a$ : وزن هوا که صفر در نظر گرفته می شود،  $W_t$ : وزن کل،  $W_s$ : وزن بخش جامد  
روش های آزمایشگاهی و مراحل اندازه گیری و محاسبه خواص ذاتی سنگ ها در استاندارد و روش های پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) بیان شده است.

### ۲-۳-۱- شاخص های حجمی سنگها

روابط حجمی شامل تخلخل، نسبت پوکی و درجه اشباع است که به صورت زیر تشریح شده است:

الف) تخلخل: نسبت حجم خلل و فرج سنگ به حجم کل سنگ را که معمولاً برحسب درصد بیان می شود را تخلخل می نامند آن را بطور معمول با  $n$  نشان می دهند. تخلخل سنگها در دامنه وسیعی متغیر است.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (1-2)$$

در سنگهای غیر هوازده روش استاندارد اندازه گیری حجم منافذ و حجم کل در استاندارد روش پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ بیان شده است. بین تخلخل و مقاومت فشاری تک محوری،

مدول تغییر شکل پذیری و دانسیته رابطه وجود دارد. تخلخل سنگهای رسوبی در حدود ۱۵٪ بوده و تخلخل آنها از تخلخل سنگهای آذرین و دگرگونی بیشتر است. در سنگهای رسوبی تخلخل توده سنگ با افزایش عمق کاهش می یابد این بدلیل تراکم شدن توده سنگ با گذشت زمان و بارگذاری لایه های بالایی است. به طور طبیعی تخلخل سنگ ها به دو شکل عمده دیده می شود که عبارتند از:

- منافذ کروی شکل که در اثر خروج حبابها و گازها در سنگهای آذرین ایجاد شده اند.  
- ریز ترکها و شکافها که بطور معمول در سنگهای آذرین درونی و دگرگونی مانند گرانیته و شیست وجود دارد.  
منافذ کروی موجود در سنگهای آذرین نسبت به تنش چندان حساس نیستند اما شکافهای ریز در مقابل تنشهای وارده بشدت واکنش نشان می دهند. در اثر تنشهای فشاری با بسته شدن منافذ و شکافها میزان تخلخل کاهش می یابد و با اعمال تنشهای کششی منافذ بازتر شده و تخلخل افزایش می یابد.

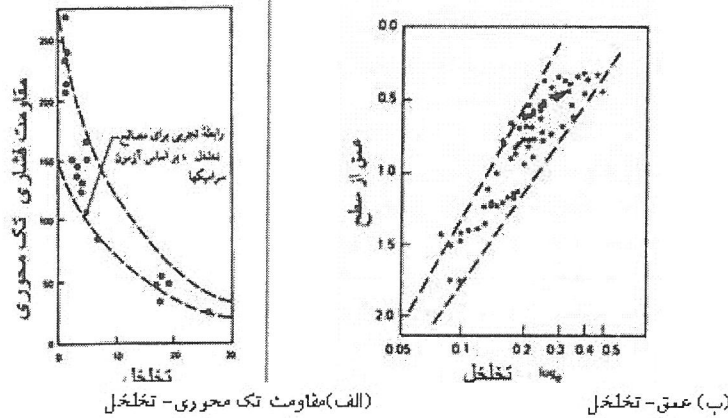
موثرترین نوع تخلخل آن است که فضاهای خالی موجود در سنگ به یکدیگر ارتباط داشته باشند. تخلخل مؤثر در میزان نفوذ پذیری سنگ ها اثر مستقیم دارد. در سنگهای رسوبی عمق و سن سنگها تأثیر زیادی در میزان تخلخل دارند چنانکه اعماق بیشتر و سن بیشتر سنگ، تخلخل کمتری را نشان می دهد و این مسئله نیز به آن علت رخ می دهد که در اثر تحمل تنش وزنی فضای بین لایه ها، مسدود می شوند.  
تخلخل مؤثر ( $n_e$ )<sup>(۱)</sup> به صورت نسبت منافذ مؤثر ( $V_{ve}$ ) به حجم نمونه با رابطه زیر بیان می شود:

$$n_e = \frac{V_{ve}}{V_t} \times 100 \quad (2-2)$$

برای اندازه گیری تخلخل مؤثر، نمونه خشک را در آب یا جیوه غرق می کنند و وزن آن را در حالت اشباع اندازه می گیرند. با اندازه گیری اختلاف وزن و وزن مخصوص سیال، حجم منافذی را که با سیال پر شده است محاسبه می شود.  
تخلخل توده سنگ همیشه بیشتر از تخلخل ماده سنگ است و علت آن وجود ناپیوستگیها در توده سنگ است. در واقع هر چه میزان خردشدگی توده سنگ بیشتر باشد اختلاف تخلخل میان توده سنگ و سنگ بکر بیشتر می شود.

هوازدهگی نیز باعث افزایش تخلخل در توده سنگ می شود. در اثر افزایش تخلخل بویژه در اثر هوازدهگی ضریب جذب آب در سنگ افزایش یافته و در نتیجه مقاومت سنگ بکر کاهش می یابد (شکل ۲-۴-ب).

1-Effective porosity



شکل ۲-۴- تغییرات سنگ با تغییرات عمق (الف) و مقاومت فشاری تک محوری (ب)

ب) نسبت پوکی (Void ratio): نسبت حجم خلل و فرج به حجم بخش جلبد سنگ را ضریب پوکی می نامند، و آنرا با  $e$  نمایش می دهند. ضریب پوکی بصورت عدد اعشاری بیان می شود در آزمایشگاه با استفاده از استاندارد ISRM تعیین می شود.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3-2)$$

سنگ های متراکم شاخص پوکی کمتر از ۰.۵ دارند ولی سنگ های رسوبی پوکی بین ۲ تا ۱.۱۵ دارند. آزمایش های آزمایشگاهی نشان می دهند که با افزایش شاخص پوکی مقاومت سنگ ها کاهش می یابد. رابطه بین تخلخل و پوکی را بصورت زیر می توان بدست آورد.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_t - V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_t}}{\frac{V_t - V_v}{V_t}} = \frac{n}{1-n} \quad \text{یا برعکس} \quad ; n = \frac{e}{1+e} \quad (4-2)$$

ج) درجه اشباع (Degree of Saturation): نسبت حجم آب موجود در سنگ به حجم کل منافذ را با  $S$  نشان داده و به صورت درصد بیان می کنند و آن را درجه اشباع می گویند.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (5-2)$$

در صورتیکه سنگ کاملاً خشک باشد  $V_w = 0$  و در نتیجه  $S = 0$  است. و در صورتیکه سنگ کلاً از آب اشباع باشد  $V_w = V_v$  و در نتیجه  $S = 100$  بنابراین درجه اشباع  $0 < S < 100$  می باشد.

میزان اشباع شدن سنگ اغلب باعث کاهش مقاومت سنگ ها می شود و در آزمایشگاه با استفاده از استاندارد ISRM تعیین می شود.

۲-۳-۲- شاخصهای وزنی سنگها:

شاخص هایی که معمولاً برای روابط وزنی استفاده می شوند عبارتند از آب محتوا، وزن حجمی و چگالی که به شرح زیر می باشند:

الف) آب محتوا<sup>(۱)</sup> یا درصد رطوبت: نسبت وزنی آب موجود در یک سنگ به وزن بخش جامد در نمونه سنگ را آب محتوا یا درصد رطوبت می نامند و با  $m$  نمایش می دهند:

$$m = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (۶-۲)$$

درصد رطوبت با استفاده از روش پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) و یا استاندارد ASTM D2216 تعیین می شود.

رطوبت با مکانیزم های مختلفی ممکن است باعث کاهش مقاومت سنگ شود. از یک طرف جذب رطوبت در سنگ ممکن است با واکنش های شیمیایی باعث تضعیف پیوند بین کانی ها و در نتیجه کاهش چسبندگی و اصطکاک سنگ شود. از طرف دیگر ممکن است جذب آب باعث ایجاد فشار منفذی و کاهش کل تنش به تنش موثر شود.

ب) وزن حجمی (دانسیته)<sup>(۲)</sup>: نسبت وزن کل به حجم کل سنگ را وزن حجمی می گویند و با  $\gamma_t$  نشان می دهند.

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V_t} \quad (۷-۲)$$

وزن مخصوص سنگ ها معمولاً بعنوان تابعی از تخلخل بوده و متوسط دانسیته اکثر سنگ ها مشابه هم است.

در حالتیکه نمونه کاملاً خشک باشد یعنی  $W_t = W_s$  باشد وزن حجمی خشک بدست می آید.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} \quad (S = 0) \quad (۸-۲)$$

در حالتیکه نمونه کاملاً اشباع باشد  $W_t = W_{sat}$  وزن حجمی اشباع بدست می آید.

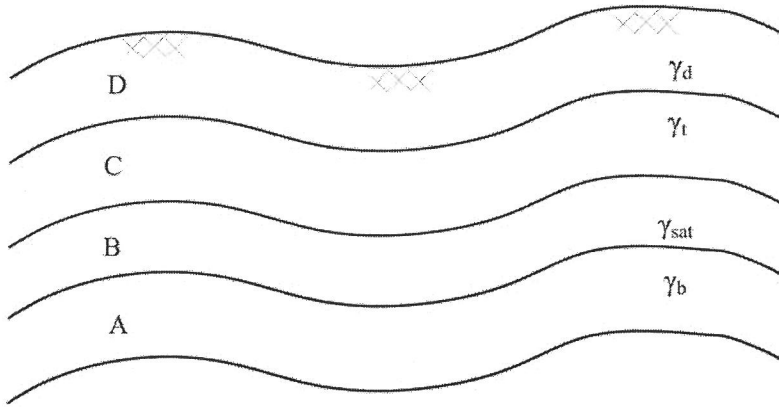
$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_t} \quad (S = 100) \quad (۹-۲)$$

معمولاً مقدار وزن حجمی کل سنگ ( $\gamma_t$ ) بین وزن حجمی خشک ( $\gamma_d$ ) و وزن حجمی اشباع ( $\gamma_{sat}$ ) قرار دارد. باید توجه داشت که در عمل تشکیلات مورد نظر در زمین نسبت به آبهای زیرزمینی چه موقعیتی را دارا می باشند تا در نهایت بتوان وزن حجمی صحیح آنها را تعیین کرد. شرایط در زیرزمین معمولاً به صورت زیر است (شکل ۵-۲).

1-Water content

2-Unit weight





شکل ۲-۵ وزن حجمی سنگ در اعماق مختلف زمین

وزن حجمی غوطه ور با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد می شود:

$$\gamma_b = \gamma_t - \gamma_w \quad (10-2)$$

در منطقه غوطه ور چون وزن مخصوص سنگ در واقع همان وزن مخصوص اشباع است داریم:

$$\gamma_b = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (11-2)$$

دانسیته سنگ با سن زمین شناسی، عمق، مقاومت فشاری و مدول تغییر شکل پذیری نسبت مستقیم و با تخلخل و هوازگی نسبت معکوس دارد.

در جدول ۲-۳ وزن مخصوص خشک برخی از سنگها ارائه شده است.

جدول ۲-۳- وزن مخصوص خشک تعدادی از سنگها

نمونه سنگ	دانسیته خشک (KN/m <sup>۳</sup> )	نمونه سنگ	دانسیته خشک (KN/m <sup>۳</sup> )
نقلین سینیت	۲۶/۵	شیلهای نفتی	۲۱/۰
سینیت	۲۵/۵	سنگ آهک متراکم	۲۰/۹
گرانیت	۲۶	مرمر	۲۷/۰
دیوریت	۲۷/۹	شیل (عمق 1000ft فوت)	۲۲/۱
گابرو	۲۹/۴	شیل (عمق 3000ft فوت)	۲۴/۷
ژیپس	۲۲/۵	شیل (عمق 5000ft فوت)	۲۵/۷
سنگ نمک	۲۰/۶	کوارتز - میکالیت	۲۷/۶
زغالسنگ (برحسب مقدار خاکستر موجود در آن)	۰/۷ - ۲/۰	آمفیولیت	۲۹/۳

(ج) وزن مخصوص یا چگالی<sup>(۱)</sup>

نسبت وزن حجمی کل نمونه به وزن حجمی آب را وزن مخصوص می گویند و آنرا با  $G$  نمایش می دهند. لازم به ذکر است که چگالی یک کمیت نسبی بوده و بدون بعد بوده و به ترکیب کانی شناسی، تخلخل و مقدار آب موجود در سنگ بستگی دارد.

$$G_r = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad \text{چگالی ظاهری} \quad (12-2)$$

چگالی حقیقی بصورت نسبت وزن حجمی بخش جامد به وزن حجمی آب بیان می شود.

$$G_s = G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (13-2)$$

در حالتیکه سنگ مجموعه ای از چند کانی بوده که وزن مخصوص و درصد حجمی هر کدام مشخص است در این حالت چگالی متوسط سنگ از فرمول مقابل بدست می آید.

$$\bar{G} = \sum_{i=1}^m G_i V_i \quad (14-2)$$

که در آن  $G_i$  چگالی کانی  $i$ ام و  $V_i$  درصد حجمی کانی  $i$ ام است.

چگالی برخی از کانیها در جدول ۲-۴ آمده است.

روش آزمایشگاهی تعیین دانسیته و چگالی در استاندارد روش پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) و استاندارد (ASTMD2216) بیان شده است.

### ۲-۳-۳- شاخصها و روابط فازی (وزنی / حجمی) سنگها

روابط ریاضی موجود بین پارامترهای وزنی و حجمی به شرح زیر بیان شده است که در عمل برای تعیین خواص مختلف سنگ استفاده از آنها مفید است.

جدول ۲-۳ چگالی تعدادی از کانیهای فراوان در سنگها

چگالی G	کانی	چگالی G	کانی
۲/۷ - ۳/۰	مسکویت	۲/۱ - ۲/۶	هالیت
۲/۸ - ۳/۱	بیوتیت	۲/۳ - ۲/۹	ژیپس
۲/۱ - ۳/۱	دولومیت	۲/۳ - ۲/۶	سریانتین
۲/۹ - ۳/۰	آنیدریت	۲/۵ - ۲/۶	اورتوکلاز
۳/۶ - ۳/۶	پروکسن	۲/۶-۳	کلریت وایلیت
۳/۲ - ۳/۶	الیوین	۲/۶ - ۲/۶۴	کلسدون
۴/۳ - ۴/۶	باریت	۲/۶۵	کوارتز
۴/۹ - ۵/۲	پیریت	۲/۶ - ۲/۸	پلاژیوکلاز
۷/۴ - ۷/۶	گالن	۲/۷	کلسیت

$$G.m = S.e \quad \gamma_d = \frac{G\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma_t = \frac{(G+Se)\gamma_w}{1+e} \quad \gamma_d = G.\gamma_w(1-n) \quad (15-2)$$

$$\gamma_t \frac{1+m}{1+e} G.\gamma_w \quad \gamma_d = \frac{\lambda_i}{1+m}$$

$$\gamma_t \gamma_d + S.n.\gamma_w = G.\gamma_w(1-n) + (S.n.\gamma_w)$$

### ۲-۳-۴- شاخص کشسانی (الاستیسته) و روابط تنش - کرنش در سنگها

شاخص کشسانی در واقع بیانگر بازگشت پذیری تغییر شکل سنگ ها در اثر اعمال تنش است. هر سنگ در یک تراز از تنشها دارای خاصیت کشسانی است. در کل می توان گفت که این بازه تنش برای سنگهای مختلف متفاوت بوده و باید برای هر سنگ جداگانه محاسبه شود. همچنین در هر سنگ باید مقدار تغییرات طولی، سطحی و حجمی نسبت به تغییرات تنش بر واحد هر کدام محاسبه شود تا در نهایت رفتار و مقدار کرنش هر سنگ در مقابل میزان معینی از تنش محاسبه و یا پیش بینی شود. در فصلهای آتی در باره روابط موجود بین تنش و کرنش بیشتر توضیح داده خواهد شد. در نهایت می توان کاربرد این شاخص مهم را در مسائلی همچون سد سازی و تونل سازی که توده سنگ تحت یک تنش ثانویه قرار می گیرد بررسی کرد.

### ۲-۳-۵- شاخص لایه بندی، تورق و کلیواژ در سنگها

این شاخص در واقع با توجه به منشاء و نحوه تشکیل یک سنگ متغیر بوده و مقاومت سنگ در امتداد این صفحات لایه بندی، تورق و کلیواژ حداقل می باشد. در صورتی که تنشهای ثانویه اعمالی بر سنگ در راستای این صفحات وارد شوند باعث گسیختگی و شکست سنگ می شود. بنابراین تعیین مقدار، جهت، امتداد و شیب این شاخص برای پیش بینی رفتار توده سنگ در مقابل تنشهای القایی و ثانویه بسیار ضروری است.

### ۲-۴-۲- خواص عکس العملی سنگها در برابر شرایط خاص

این خواص در واقع عکس العمل و رفتار سنگ را در برابر شرایط اعمالی وارد بر آن را نشان می دهد. در صورت شناخت این شاخص ها قادر خواهیم بود رفتار توده سنگ را در مقابل شرایط اعمالی پیش بینی کرده و براساس آن طراحی صحیح انجام داد.

### ۲-۴-۱- شاخص های سختی و ساینده گی در سنگها

شاخص های سختی و ساینده گی در کانیها، یکی از مهمترین عوامل مؤثر در مقاومت مکانیکی آنها محسوب می شود. این خاصیت همراه با سختی کانی در بقا و دوام فیزیکی سنگها بسیار تعیین کننده است. در واقع سختی بالا موجب افزایش مقاومت در مقابل ساینده گی های شدید و طولانی می شود. یکی از شاخص های معرف سختی، شاخص معیار موس است که در (جدول ۲-۴) ارائه شده است.

جدول ۲-۴- سختی سنگها با استفاده از شاخص موس

کانی	عدد سختی	کانی	عدد سختی
تالک	۱	اورتوکلاز	۶
ژپس	۲	کوارتز	۷

۸	توپاز	۳	کلسیت
۹	کروندوم	۴	فلوریت
۱۰	الماس	۵	آباتیت

کانی‌های دیگر در واقع در بین کانیهای ارائه شده در جدول ۲-۴ قرار گرفته و با استفاده از این کانیها میزان سختی این مواد مشخص می‌شود. البته امروزه شاخصهای جدیدتری با دقت بیشتری به منظور تعیین سختی کانیها ابداع شده است که بطور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای تعیین سختی سنگها علاوه بر مقیاس موس از روش‌های آزمایشگاهی مانند روش اسکلوراسکوپ شور، چکش اشمیت و آزمایش خراش‌اندازی نیز استفاده می‌شود. از جمله کاربردهای این شاخص می‌توان به تأثیر آن بر سرمت‌های دستگاه‌های چالزنی و حفاری مکانیزه تونل‌ها اشاره کرد که در واقع هر چه میزان میزان سختی و ساینده گی یک سنگ با توجه به کانیهای تشکیل دهنده آن بیشتر باشد میزان سایش و خورده گی سرمت‌های حفاری افزایش می‌یابد.

آزمایش چکش اشمیت برای تعیین سختی سنگ در آزمایشگاه و یا در محل استفاده می‌شود. جزئیات مراحل آزمایش و نحوه تعیین مقاومت سنگ توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) به صورت استاندارد ارائه شده است. اجزا چکش اشمیت و نحوه اندازه گیری با آن در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. همچنین نحوه تعیین مقاومت فشاری تک محوری سنگ با استفاده از نتیجه چکش اشمیت در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.

رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری با وزن مخصوص و سختی چکش اشمیت به صورت زیر است:

$$\sigma_c = 12.74 e^{0.0185(H_s, \gamma)} \quad (16-2)$$

و همچنین مدول تغییر شکل پذیری سنگ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = 192(H_s, \gamma) - 12.71 \quad (17-2)$$

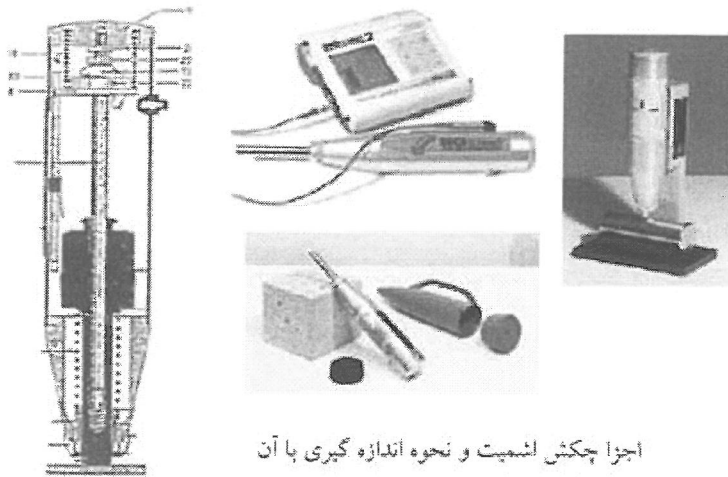
در این روابط  $\sigma_c$ ، مقاومت فشاری تک محوری بر حسب Mpa،  $H_s$ ، سختی اشمیت، E مدول الاستیسیته بر حسب Mpa و  $\gamma$  وزن مخصوص سنگ است.

## ۲-۴-۲- نفوذ پذیری سنگها

نفوذ پذیری به صورت قابلیت گذردهی سیالات (مایعات) از سنگ‌ها تعریف می‌شود.

آشنایی با نفوذ پذیری سنگها کاربردهای فراوانی در مسائل مهندسی از قبیل، مطالعه جریان آبهای زیرزمینی، انرژی ژئوترمال، استخراج نفت و گاز از مخازن هیدروکربوری، زهکشی و مطالعات زیست محیطی و عایق سازی دفن زباله‌های خطرناک و هسته ای دارد. سیالات در توده سنگ به دو صورت جریان از ماتریکس سنگ و جریان از میان درزه و شکافها صورت می‌گیرد. بدیهی است که مقدار جریان از میان درزه و شکافها در مقایسه با ماتریکس سنگ بسیار زیاد است. بنابراین برای تعیین نفوذ پذیری توده سنگ نه تنها نفوذپذیری ماتریکس سنگ مورد نیاز است بلکه نفوذپذیری از میان درزه و شکافهای سنگها نیز باید برآورد شود. برای بدست آوردن مقدار واقعی نفوذپذیری صحرائی انجام آزمایشهای نفوذپذیری بر جا از قبیل آزمایش لوژان و لوفران ضروری است.

نفوذپذیری در نمونه آزمایشگاهی روی ماده سنگ تابعی از ارتباط بین منافذ و یا ریزترکهای موجود در سنگ است. نفوذپذیری ماده سنگ با تغییر تنش‌های عمودی بویژه در حالتی که تغییرات تنش از حالت فشاری به حالت کششی است تغییر می‌کند که معیاری از درجه ترک خوردگی سنگ بدست می‌دهد. زیرا ترکهای مسطح با تغییر تنشهای عمودی بطور مؤثری تغییر می‌کنند. آزمایش نفوذپذیری نمونه آزمایشگاهی ماده سنگ مشابه آزمایش داریسی برای خاکها است و تفاوت عمده آن در میزان نفوذپذیری می‌باشد. با توجه به اینکه نفوذ



اجزا چکش اشعیت و نحوه اندازه گیری با آن

شکل ۶-۲

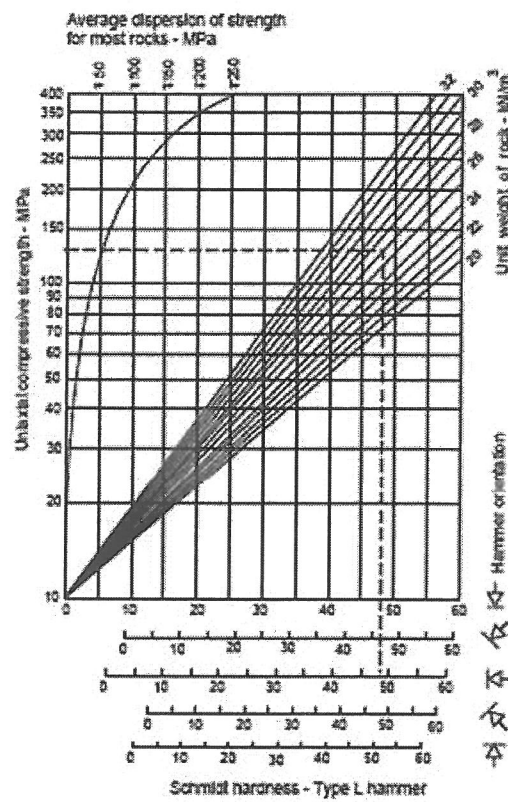


Figure 4.7: Estimate of joint wall compressive strength from Schmidt hardness.

شکل ۶-۲-۷- روش تعیین مقاومت فشاری تک محوری از روی نتایج آزمایش چکش اشعیت نوع L

پذیری سنگها در مقایسه با خاکها کمتر است بنابراین اختلاف ارتفاع هیدرولیکی زیادی لازم است تا بتوان نفوذپذیری نمونه سنگی را اندازه گیری کرد. نفوذپذیری سنگها عمدتاً با استفاده از قانون دارسی محاسبه می شود که در آن مقدار جریان سیال از یک محیط متخلخل مانند خاک یا ماده سنگ به سطح مقطع نمونه و شیب هیدرولیکی نسبت داده شده است که به صورت زیر بیان می شود.

$$q_x = k \frac{dh}{dx} \cdot A = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{dh}{dx} \cdot A \quad (18-2)$$

در این رابطه  $q_x$ : مقدار جریان در واحد زمان در جهت X برحسب  $\text{cm}^3/\text{sec}$ ،  $dh$ : تفاوت ارتفاع هیدرولیکی آب ورودی و خروجی از نمونه (cm)، A: سطح مقطع عمود بر محور X ( $\text{cm}^2$ ) و K: ضریب نفوذپذیری سنگ برحسب  $\text{cm/s}$  است.

ضریب نفوذپذیری براساس نوع سیال با رابطه زیر برحسب ضریب هدایت هیدرولیکی بیان می شود که عبارت است از:

$$k = \frac{K \rho g}{\mu} = \frac{kg}{\nu} \quad (19-2)$$

در این رابطه،  $\nu$ : گرانیوی یا ویسکوزیته سینماتیکی سیال؛  $\mu$ : ویسکوزیته (لزجت) سیال ( $\frac{NS}{m^2}$ )؛  $g$ : شتاب ثقل (واحد  $\text{m/s}^2$ )؛ K: ضریب هدایت هیدرولیکی برحسب میلی دارسی، که همان نفوذ پذیری ذاتی سنگ محسوب می شود.  $\mu$  ویسکوزیته سیال بوده که برای آب در ۲۰ درجه سانتیگراد برابر  $1/0 \times 10^{-3} \text{ NS/m}^2$  است. زمانیکه قانون دارسی برحسب K نوشته می شود، ضریب نفوذپذیری

مستقل از خواص سیال بوده و واحد آن برحسب سطح است. واحد دیگر اندازه گیری نفوذپذیری دارسی است که عبارت است از:

$$1 \text{ دارسی} = 9/869 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \cong 10^{-3} \text{ cm/s}$$

در جدول شماره ۲-۵ هدایت هیدرولیکی تعدادی از سنگها ارائه شده است. جزئیات انجام آزمایش نفوذپذیری سنگها در آزمایشگاه در استاندارد ASTM D4525 ارائه شده است.

جدول ۲-۵- هدایت هیدرولیکی نمونه هایی از سنگها با سیال آب ۲۰ درجه سانتیگراد برحسب  $k(\text{cm/s})$

سنگ	نفوذپذیری برجا	نفوذپذیری در آزمایشگاه
ماسه سنگ	$1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3} - 8 \times 10^{-8}$
ماسه سنگ ناواجو Navajo	----	$2 \times 10^{-3}$
ماسه سنگ بریا Berea	----	$4 \times 10^{-5}$
گری واک Gray waeke	----	$2/2 \times 10^{-8}$
شیل	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^{-9} - 5 \times 10^{-13}$
شیل پیر Pierre	$2 \times 10^{-9} - 5 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-12}$
سنگ آهک - دولومیت	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{-5} - 10^{-13}$
سنگ آهک سلیسیم Salem	----	$2 \times 10^{-6}$
بازالت	$10^{-2} - 10^{-7}$	$10^{-12}$
گرانیت	$10^{-4} - 10^{-9}$	$10^{-7} - 10^{-11}$
شیست	$2 \times 10^{-7}$	$10^{-8}$
شیست ترک دار Fissured schist	----	$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$

نفوذپذیری نمونه سنگ در آزمایشگاه بصورت های مختلفی با توجه به کاربرد آن اندازه گیری می شود. در واقع نمونه سنگ بکر در شرایط طبیعی بطور تقریبی نفوذپذیر است. برای انجام آزمایش نفوذپذیری با استفاده از هوای فشرده آب را با فشار بالا به سوی نمونه می فرستند. نفوذپذیری ممکن است در جهت طولی، عرض یا شعاعی انجام گیرد. برای انجام آزمایش نفوذپذیری شعاعی در یک نمونه استوانه ای یک

سوراخ ایجاد نموده و آب را با فشار به داخل نمونه وارد کرده و از میزان آب تراوش نموده از محیط پیرامون نمونه نفوذپذیری بصورت زیر محاسبه می شود.

$$k = \frac{q.L \ln(R_2/R_1)}{2\pi L \Delta H} \quad (2-20)$$

در این رابطه:

$q$  عبارت است از دبی جریان (واحد  $\text{cm}^3/\text{sec}$ );  $L$ : طول نمونه (واحد  $\text{Cm}$ );  $R_1$  و  $R_2$ : بترتیب قطر بیرونی و داخلی نمونه (واحد  $\text{Cm}$ );  $\Delta h$ : اختلاف ارتفاع هیدرولیکی در ابتدا و انتهای ناحیه جریان که متناظر با  $\Delta q$  است (واحد ارتفاع سیال) از مزایای آزمایش نفوذپذیری شعاعی قابلیت اندازه گیری

نفوذپذیری ریز درزه ها و ترکها و امکان انجام آزمایش در دامنه وسیع نفوذپذیری است. این روش برای تعیین نفوذپذیری سنگهای سخت قابل استفاده است.

اطلاع از این خاصیت در موارد زیادی حائز اهمیت است از آنجمله تعیین میزان نفوذ آب به داخل تونل، مباحث تزریق سیمان در سنگ، نفوذ آبهای شور از داخل سنگهای تبخیری و شسته شدن سنگهای پیرامونی را می توان بر شمرد.

#### ۲-۴-۳- شاخص دوام در سنگها

دوام سنگها اهمیت به سزایی در همه کارهای مهندسی سنگ دارد. خواص سنگ ها در اثر ورقه ورقه شدن، هیدراته شدن، سست شدن، حل شدن، اکسید شدن، سایش و سایر عوامل تغییر می کند. در برخی شیلهها و سنگ های آذرین، آواری پوسته پوسته شدن سنگ به صورت شعاعی به سرعت بعد از ایجاد سطوح جدید در سنگ اتفاق می افتد. این تغییرات در توده سنگ معمولاً به طور نامحسوس اتفاق می افتد و فقط سطوح توده سنگی طی ده ها سال پیوستگی خود را از دست می دهد. بدلیل اینکه روشهای فرسایش سنگ در طبیعت مختلف و متفاوتند، هیچ آزمایش کاملی را نمی توان ارائه داد که معرف همه جنبه های فرسایش سنگ باشد. نکته مهم این است معرفی شاخصی که درجه تغییرات سنگ را نشان دهد بسیار مشکل است. ولی به هر حال یک شاخص هوازدگی و یا فرسایش سنگ برای بیان درجه ای از پایداری سنگ بسیار مفید خواهد بود.

آزمایش دوام برای تعیین میزان مقاومت سنگ ها در اثر تر و خشک شدن متوالی است. شکل ۲-۸ نمونه ای از دستگاه اندازه گیری شاخص دوام که توسط گمبل ساخته شده است را نشان می دهد. همانطور که در شکل (۲-۸) نشان داده شده است این دستگاه از دو استوانه به قطر ۱۴۰ میلیمتر و طول ۱۰۰ میلیمتر تشکیل شده است که سطوح استوانه با شبکه هایی توری با باز شدگی ۲۰ میلیمتر بافته شده است. تقریباً ۵۰۰ گرم و یا ده قطعه شکسته شده از سنگ را داخل استوانه ها قرار می دهیم و آنها را در آب با سرعت  $20\text{r}/\text{min}$  به مدت ۱۰ دقیقه می چرخانیم. سپس وزن نمونه سنگ که بعد از این عمل در داخل استوانه ها باقی می ماند اندازه گیری کرده و با استفاده از فرمول زیر شاخص دوام سنگ محاسبه می شود.

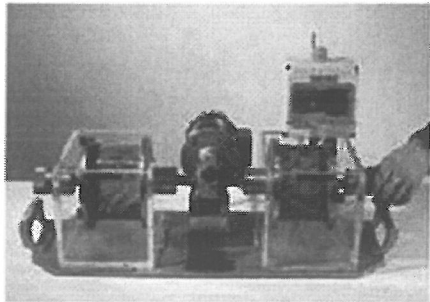
$$I_d = \frac{C - D}{A - D} \times 100 = (\text{وزن اولیه / وزن باقیمانده}) \times 100 \quad (2-21)$$

در این رابطه،  $A$  و  $C$  وزن نمونه و استوانه به ترتیب قبل و بعد از آزمایش بر حسب گرم و  $D$  وزن استوانه بر حسب گرم است.

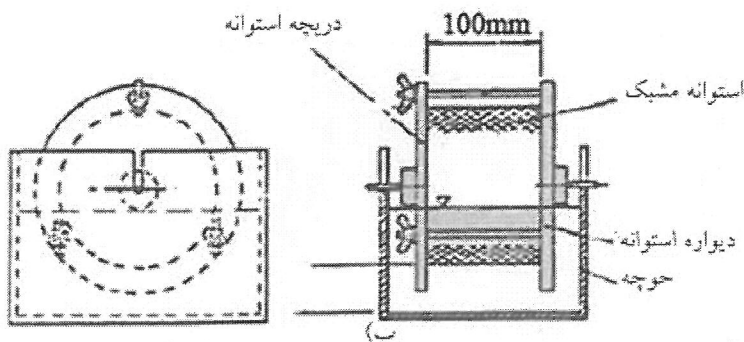
#### دستگاه آزمایش دوام سنگها

گمبل (۱۹۷۱) استفاده از سیکل ده دقیقه ای دوم را ارائه نمود و طبق مطالعه ایشان ارتباط مستقیمی بین دوام و سن زمین شناسی سنگها وجود ندارد، همچنین مطالعات او نشان داد که دوام با دانسیته سنگ ها نسبت مستقیم دارد و با آب موجود در نمونه سنگ نسبت عکس دارد. براین اساس برای تعیین میزان دوام سنگها در برابر فرسایش جدول ۶-۲ ارائه شد.

دوام سنگ شیل و سنگ های رسی و کاشمش مقاومت آنها به جذب رطوبت در آنها بستگی دارد (مورگنترن و ایکنرید).



(الف)



شکل ۲-۸- دستگاه آزمایش دوام (الف) عکس دستگاه آزمایش دوام (ب) شکل شماتیک قطعات دستگاه

جدول ۶-۲ تقسیم بندی سنگها براساس شاخص دوام طبق نظر گمبل

درصد وزن باقیمانده بعد از ده دقیقه در سیکل دوم (براساس وزن خشک)	درصد وزن باقیمانده بعد از ده دقیقه در سیکل اول (براساس وزن خشک)	رده دوام
> ۹۸	> ۹۹	موق‌العاده پایدار
۹۵ - ۹۸	۹۸ - ۹۹	خیلی پایدار
۸۵ - ۹۵	۹۵ - ۹۸	پایداری بالا تا متوسط
۶۰ - ۸۵	۸۵ - ۹۵	پایداری متوسط
۳۰ - ۶۰	۶۰ - ۸۵	پایداری پایین
< ۳۰	< ۶۰	پایداری خیلی پایین



سنگهای رسی سیمان شده با شیلها وقتی در تماس با آب قرار می گیرند شروع به جذب آب می کنند تا به حد روانی برسند (liquid limit) (مقدار رطوبتی که در آن خاک و یا سنگ در اثر وزن خود جریان می یابد). چگونگی اندازه گیری و تعیین مقدار حد روانی در استانداردهای ASTM D 4235 یا BS 1377

به طور مفصل شرح داده شده است. مواد با حد روانی بالا با شدت بیشتری نسبت به مواد با حد روانی پایین تحت تاثیر پدیده شکستگی قرار می گیرند. جدول ۷-۲ میزان سست شدگی سنگ برحسب مقدار حد روانی نشان می دهد.

جدول ۷-۲- تعیین کیفیت شکستگی سنگ براساس مقدار حد روانی

حد روانی	رده شکستگی
< 20	خیلی کم
20 - 50	کم
50 - 90	متوسط
90 - 140	بالا
> 140	خیلی بالا

جدول ۸-۲- تغییر در شاخص حد روانی بعد از خیس کردن به مدت ۲ ساعت را نشان می دهد.

جدول ۸-۲- تغییر سرعت شکستن بعد از ۲ ساعت

تغییر در شاخص حد روانی بعد از خیس کردن به مدت ۲ ساعت	سرعت شکستن
< 0.75	کم
0.75 - 1.25	سریع
> 1.25	خیلی سریع

سرعتی که در آن پدیده شکستن رخ می دهد ارتباطی به حد روانی ندارد ولی می تواند با نسبت تغییر آب در نمونه به وسیله خیس کردن آن در آب مشخص شود. سرعت شکستن را به صورت تغییر در شاخص روانی (نسبت بین مقدار رطوبت بالای حد خمیری مانند و شاخص

خمیری مانند  $\Delta I_L = \frac{10W - PL}{LL - LP}$ ) به وسیله قرار دادن آن در آب به مدت ۲ ساعت مشخص می شود معرفی کرد که:

$$\Delta I_L = \frac{\Delta W}{W_L - W_P} \quad (22-2)$$

که در آن:  $\Delta W$ : تغییر در دبی آب موجود در نمونه بعد از قرار دادن آن به مدت ۲ ساعت در آب،  $W_P$ : مقدار آب در نمونه موقعی که به حد پلاستیک می رسد.  $W_L$ : مقدار آب در نمونه زمانی که به حد روانی می رسد.

## ۲-۴-۴- شاخص مقاومت سنگها (شاخص بار نقطه‌ای)

در فعالیت‌های مهندسی بیان سنگ‌ها به صورت یک شاخص کمی ضروری است. ولی برای تعیین دقیق مقاومت سنگ‌ها معمولاً نیاز به تهیه نمونه‌ها و وسایل دقیق آزمایش در روشهای دقیق بارگذاری

است. بنابراین تخمین مقاومت سنگ از سایر خواص آن با صرف هزینه بسیار کم مفید خواهد بود. این چنین شاخص فعلاً در دسترس کارشناسان مکانیک سنگ می‌باشد و آن را آزمایش شاخص بار نقطه ای سنگ می‌نامند که بوسیله بروک و فرانکلین (۱۹۷۲) ارائه شده است. در این آزمایش نمونه سنگی بین دو مخروط فلزی بارگذاری می‌شود (شکل ۲-۵) که در اثر آن یک سطح شکستگی حاصل از نیروهای کششی به موازات محور بارگذاری در نمونه ایجاد می‌شود. جزئیات روش آزمایش بار نقطه ای در استانداردهای ISRM و ۵۷۳۱ ASTM تشریح شده است. قطر معادل نمونه و باری نمونه در اثر آن می‌شکند ثبت شده و مقدار شاخص بار نقطه ای یک نمونه سنگی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (2-23)$$

که در آن داریم: P: مقدار نیرویی که در آن اولین شکستگی در نمونه دیده می‌شود و  $D_e$ : فاصله بین دو مخروط در دستگاه می‌باشد. در آزمایش محوری، بلوکی و کلونچه ای قطر معادل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$D_e^2 = (4W D/\pi) \quad (2-24)$$

با توجه به این که شاخص بار نقطه ای روی نمونه ای با قطر ۵۰ میلی‌متر مبنای محاسبات بعدی است لذا شاخص بار نقطه ای تعیین شده بایستی به شاخص بار نقطه ای ۵۰ میلی‌متر تصحیح شود. با استفاده از روابط زیر می‌توان شاخص بار نقطه ای را اصلاح کرد.

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (2-25)$$

که در این رابطه F ضریب تصحیح،  $I_s$  شاخص بار نقطه ای حاصل از آزمایش و  $I_{s(50)}$  شاخص بار نقطه ای تصحیح شده است. ضریب تصحیح F با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (2-26)$$

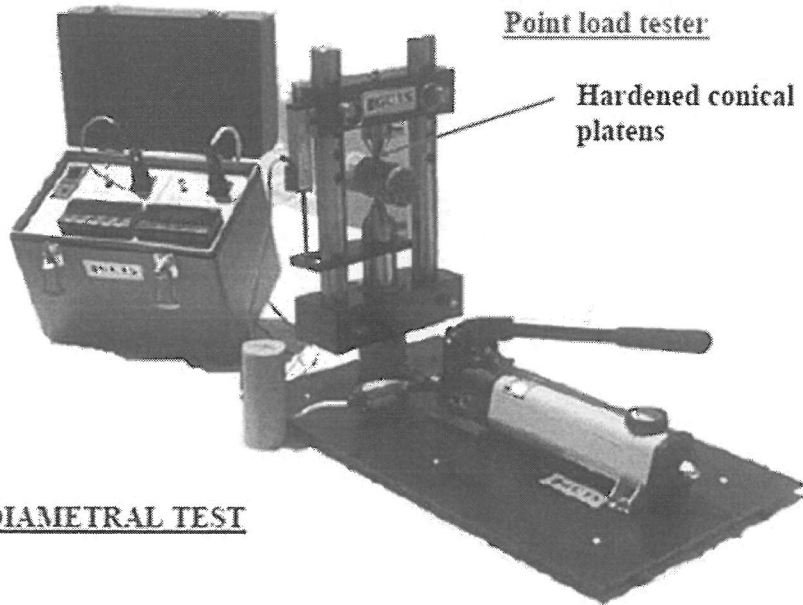
و برای یک نمونه با قطر نزدیک به ۵۰ میلی‌متر با تقریب قابل قبولی می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$F = \sqrt{\frac{D_e}{50}} \quad (2-27)$$

این نوع آزمایش معمولاً بر روی نمونه های سنگی استوانه ای شکل حاصل از مغزه های حفاری (core) و با طول حداقل ۱/۴ برابر قطر آنها انجام می‌شود. در عمل مقاومت بار نقطه ای استوانه هایی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر تا ۳ برابر استوانه هایی با قطر ۷۰ میلی‌متر مشاهده شده است. بنابراین یک ضریب تطبیق مقاومت اندازه لازم است تا نتایج را با اندازه نمونه استاندارد تطبیق دهد. معمولاً شاخص بار نقطه ای نمونه به صورت مقاومت بار نقطه ای یک نمونه استوانه ای ۵۰ میلی‌متری از نمونه سنگی گزارش می‌شود. یک معادله تطبیقی بین شاخص بار نقطه ای و مقاومت فشاری نمونه سنگی به صورت زیر ارائه شده است.

$$\sigma_c = 24I_{s(50)} \quad (2-28)$$

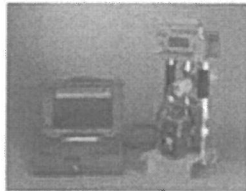
$$\sigma_c = (14+0.175D) \cdot I_{s(50)} \quad (2-29) \text{ و یا}$$



DIAMETRAL TEST

POINT LOAD SPECIMENS can be tested as :-

Diametral test :- loaded across the diameter of the core



$$L > 0.5D$$



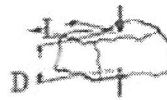
Axial test :- loaded along the core axis

$$0.3W > D > W$$



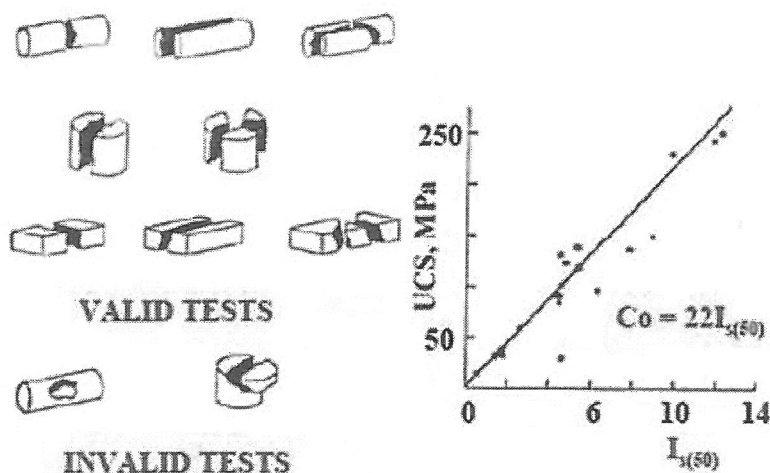
$$L > 0.5D$$

Irregular lump :- should be spheroidal.



The ISRM suggested method includes a size correction procedure to determine  $I_{500}$  from diametral, axial and irregular lump tests.

## POINT LOAD TEST INTERPRETATION



شکل ۲-۱- انواع نمونه‌های شکسته شده معتبر و غیر معتبر به همراه نتایج آزمایش‌های بار نقطه‌ای

در این رابطه مقدار  $\sigma_c$  در فرمول فوق عبارت است از مقاومت فشاری نمونه با نسبت طول به قطر ۶ تا ۲ و  $I_s(50)$  عبارت از شاخص بار نقطه‌ای نمونه با قطر ۵۰ میلی‌متر است. با این وجود مقادیر تخمینی از این روش تا حدودی غیر دقیق است و واسنجی (کالیبراسیون) مخصوص باید مورد سنجش قرار گیرد. در برخی مواقع تطابق بین مقاومت فشاری تک محوری و شاخص بار نقطه‌ای در عمل اهمیت دارد. از طرف دیگر این نوع آزمایش بسیار ساده و سریع است و در روی زمین و محل حفاری قابل انجام است. در سنگ‌های ناهمسان یا استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای در جهات عمود و موازی صفحات ناهمسانی می‌توان شاخص ناهمسانی را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$I_{a(50)} = \frac{I_{s(50)Max}}{I_{s(50)Min}} \quad (2-3)$$

در این رابطه  $I_{s(50)Max}$  و  $I_{s(50)Min}$  به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار یا نتایج در جهت عمود و موازی صفحات ضعیف است. با استفاده از این اندیس می‌توان به درجه ناهمسانی یا آنیروپی سنگ‌ها پی برد.

مقادیر شاخص بار نقطه‌ای چند نمونه سنگی در جدول ۲-۹ نشان داده شده است.

جدول ۲-۹ شاخص بار نقطه‌ای چند نمونه سنگی (پروک و فراتکلین ۱۹۷۲)

شاخص استحکام بار نقطه‌ای (MPa)	نمونه سنگی
۰/۰۵ - ۱	ماسه سنگ و سنگ رس نرمیاری
۰/۲ - ۲	زغالسنگ
۰/۲۵ - ۸	سنگ آهک
۰/۲ - ۸	گل سنگ و شیل
۳/۰ - ۱۵	سنگ‌های آذرین
۶/۰ - ۱۱	دولومیت

مثال: ۲-۹- یک نمونه لای سنگ به صورت یک مغزه استوانه ای به قطر ۵۴ میلیمتر به شرح زیر تحت آزمایشهای بار نقطه ای قرار گرفته است. چنانچه فشار وارد بر سنگ در لحظه شکست ۱۸۰۰ پوند به اینچ مربع قرائت شده باشد و سطح مقطع پیستون جک اعمال کننده فشار ۲/۰۷ اینچ مربع باشد، مطلوب است برآورد مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی تک محوره سنگ مورد نظر.

حل:

$$p = \sigma \cdot A = 1800 \times 2/07 = 3726 lb$$

$$D^2 = \left(\frac{54}{25/4}\right)^2 = 4/52 in^2$$

$$J_s = \frac{3726}{4/52} = 824/33 lb/in^2$$

$$\sigma_{com} = 24J_s = 24 \times 824/33 = 19784/07 psi$$

$$\sigma_{ten} = 0/96J_s = 0/96 \times 824/33 = 791/36 psi$$

## ۲-۴-۵- شاخص درزه ها و ناپیوستگیها در سنگها

این شاخص در واقع به میزان درزه ها و ناپیوستگیهای موجود در توده سنگ که در اثر نیروها و تنشهای اعمالی (تنشهای ثقلی، تکتونیکی، ...) ایجاد شده اند بستگی دارد. در واقع با اطلاع از این شاخص و بررسی آن می توان رفتار توده سنگ را از لحاظ نفوذپذیری، مقاومت، بلوکی شدن و غیره بدست آورد.

اندازه بلوک

اندازه بلوک عبارت از ابعاد بلوک سنگ است که متأثر از راستای نسبی دسته های متقاطع ناپیوستگی ها نسبت به همدیگر و نیز فاصله بندی هر کدام از این دسته ها است. هر ناپیوستگی می تواند به سهم خود تاثیر ویژه ای بر اندازه بلوک و شکل آن داشته باشد.

برای درک مفهوم اندازه و شکل بلوک، توده سنگ را می توان به انواع زیر تقسیم کرد:

(I) متراکم - درزه های کم و یا فاصله بندی بسیار زیاد

(II) صخره ای - تقریباً با ابعاد مساوی

(III) صفحه ای - یکی از ابعاد به طور قابل ملاحظه ای کوچکتر از دو بعد دیگر است.

(IV) ستونی - یکی از ابعاد مشخصاً بزرگتر از دو بعد دیگر است.

(V) نامنظم - دارای تغییرات وسیع در اندازه و شکل بلوکها

(VI) شکسته شده - پر از درزه و شکاف

یکی از پرکاربردترین فواید این شاخص در رده بندی توده سنگ از لحاظ مقاومت و پایداری سازه های زیرزمینی می باشد. در فصل

جداگانه ای کاربردهای این شاخص بیشتر نمایان خواهد شد.

## ۲-۵- خواص سنگ در ارتباط با پدیده های فیزیکی دیگر

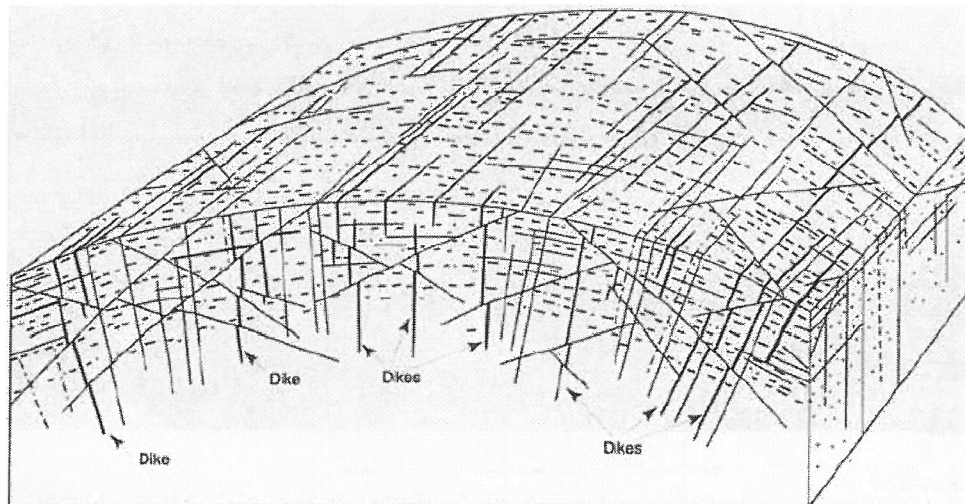
برخی مواقع با استفاده از اعمال برخی پدیده های فیزیکی بر سنگ و مشاهده نتایج آن می توان رفتار توده سنگ را در برابر این پدیده

ها پیش بینی کرد. همچنین با استفاده از این نتایج می توان به طور غیر مستقیم اطلاعات مفیدی از توده سنگ بدست آورد. مشاهده اثر

حرارت و صورت سنگ یکی از پرکاربردترین آزمایشهایی است که بر روی سنگها انجام می شود. تأثیر حرارت و صوت بر به سنگ شناسی و

کانی شناسی و همچنین درزه داری، تخلخل، وزن مخصوص سنگ و دیگر خواص آن بستگی دارد. بنابراین با مشاهده این شاخص ها می

توان برخی از خواص ذکر شده را بدست آورده و یا حداقل تخمین زد.



### ۲-۵-۱- شاخص حرارتی سنگها

شاخص حرارتی در واقع بیانگر میزان انتقال حرارت در زمان و حجم مشخصی از سنگ است. از کاربردهای مهم این شاخص در تعیین میزان انتقال حرارت و نرخ انتقال آن از حجم معینی از سنگ در مسائلی مانند، حفاری و چالزنی انرژی ژئوترمال و دفن زباله های حرارت زا بکار می رود.

مهمترین عوامل مؤثر بر شاخص حرارتی سنگها عبارت ضریب انتقال حرارت سنگها است که با توجه به کانیهای تشکیل دهنده سنگ، درصد کانیهای تشکیل دهنده سنگ، درزه ها، شکافها، ناپیوستگیها،

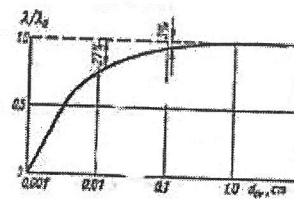
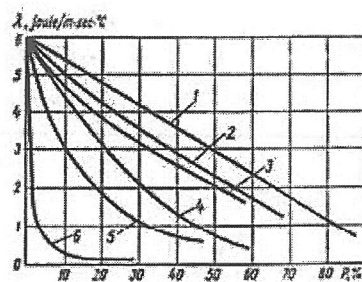
تخلخل و ... در سنگهای مختلف متفاوت می باشد. با استفاده از این شاخص می توان میزان توزیع حرارتی و گرمای انرژی های ژئوترمال را در سنگهای مختلف بدست آورد. همچنین این شاخص برای بررسی استخراج با حرارت بالا بسیاری مفید است.

### ۲-۵-۲- شاخص صوتی سنگها

متداولترین روش برای اندازه گیری سرعت صورت این است که نمونه سنگی را به وسیله یک کریستال پیزوالکتریک که از یک طرف ضرباتی (توسان) به نمونه سنگی می دهد و در طرف دیگر گیرنده این نوسانات را به وسیله کریستال دومی می گیرد آزمایش کنیم. زمان حرکت توسان در نمونه سنگی بوسیله مقدار اختلاف فاز در یک اسپلوسکوپ مجهز به خط تأخیر، اندازه گیری می شود. روش دیگر آزمایش صوتی این است که سنگ را به وسیله یک ارتعاش کننده به شدت ارتعاش بدهیم و سرعت صوتی را از فرکانس تشدید شده اندازه گیری کنیم (لازم به ذکر است که ابعاد و دانسیته نمونه از قبل اندازه گیری شده اند). در این آزمایش  $V_L$  سرعت امواج طولی مورد نظر ما است که معمولاً اندازه گیری آن آسانتر است (ISRM روشهایی را برای اندازه گیری این شاخص به صورت استاندارد بیان می کند). از لحاظ نظری (تئوری) سرعت امواج منتقل شده از سنگ بستگی مستقیم به خواص الاستیک و دانسیته آنها دارد. در عمل یک دسته درزه و ریزترکها در نمونه اثر قابل ملاحظه ای روی خاصیت صوتی سنگ دارد. بنابراین سرعت صوتی در نمونه سنگی به طور قطع شاخصی برای درجه درزه داری در نمونه سنگ باشد.

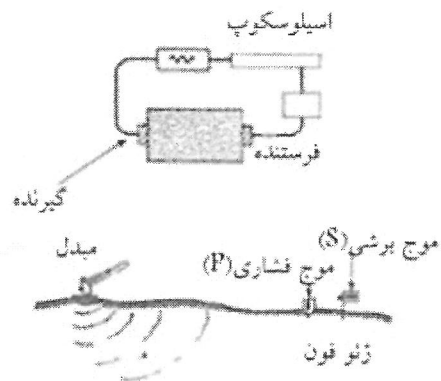
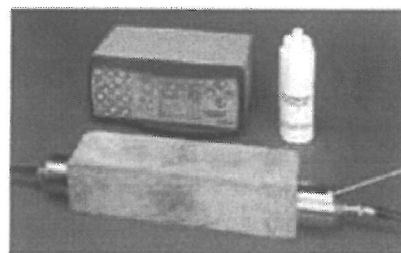
جدول ۱-۵. مقایسه رسانایی گرمایی تک بلوری و چند بلوری

$\lambda_1/\lambda_2$	$\lambda_2$	چند بلوری	$\lambda_1$	تک بلوری
1.94 - 5.3	3.6	کوارتزیت	7 - 11.7	کوارتز
1.85	2	مرمر	3.7	کلسیت
3.73	7.2	سنگ سنگ	26.7	عالیات
2.15	9.8	سیلیت (سنگ)	21.7	سیلیت
1.08	384	مس	414	مس
1.06	117	روی	124.2	روی
1.12	205	آلومینیم	230	آلومینیم



شکل ۱-۵. تاثیر اندازه دانه ها بر افت رسانایی گرمایی (مأخذ شماره ۱۶)

شکل ۳-۵. ارتباط بین رسانایی گرمایی و تخلخل (مأخذ شماره ۱۶):  
 ۱- گذر گرما در امتداد شکستگی ها، ۲ - در امتداد حفره های کروی مجزا،  
 ۳- در امتداد حفره های مکعبی مجزا، ۴ - منحنی متوسط تپ مکعبی،  
 ۵- بستن بر فرمول های سنگهای باد کانی، ۶. گذر گرما در عرض شکستگی ها



شکل ۲ دستگاه و روش انجام آزمایش صوتی در آزمایشگاه و صعرا

سرعت امواج طولی  $V_L$  در یک نمونه سنگی که بدون فضای خالی یا هر نوع ترکی باشد را می توان محاسبه کرد. اگر یک نمونه سنگی فشرده از کانی های مختلف با سرعت امواج طولی  $V_{L2}$  در نظر گرفته شود، متوسط سرعت امواج طولی ( $V_L^*$ ) در نمونه به وسیله محاسبه زمان حرکت موج یا نسبت به زمان عبور این موج از کانی های مختلف قابل محاسبه است اگر نمونه سنگی دارای ضخامت  $L$  و کانی نام دارای درصد حجمی  $C_2$  باشد زمان انتقال یک موج از این کانی نام به صورت زیر است:

$$t_i = \frac{C_i L}{V_{Li}} \quad (31-2)$$

که در رابطه؛  $t_i$ : زمان انتقال یک موج بر حسب ثانیه (Sec)،  $C_i$ : درصد حجمی کانی  $\lambda_m$ ،  $L$ : ضخامت نمونه سنگی (m)،  $V_{Li}$ : ضخامت کانی (m) و  $V_{Li}$ : سرعت عبور موج طولی در کانی  $\lambda_m$  (m/s) است.

زمان کل برای عبور موج از نمونه سنگی به ضخامت  $L$  برابر است با:

$$t = L \sum \frac{C_i}{V_{Li}} \quad (32-2)$$

در نهایت  $V_L^*$  عبارت است از:

$$\frac{1}{V_L^*} = \frac{t}{L} = \sum \frac{C_i}{V_{Li}} = \sum \frac{C_i}{V_i} \quad (33-2)$$

که در آن  $V_L^*$  سرعت عبور امواج طولی است. که بصورت نظری حساب می شود: در حالیکه  $V_{Li}$  سرعت امواج طولی در کانی تشکیل دهنده  $\lambda_m$  که نسبت حجمی  $C_i$  در نمونه سنگی را دارد. جدول ۲-۱۰ سرعت امواج طولی در کانی ها را نشان می دهد.

نسبت بین سرعت اندازه گیری در نمونه (سرعت امواج طولی) و  $V_L^*$  مقدار  $V_L^*$  از فرمول بالا شاخص کیفیت را ارائه می دهد (IQ) که عبارت است از:

$$IQ(\%) = \frac{V_L}{V_L^*} \times 100 \quad (34-2)$$

در این رابطه؛  $V_L$  سرعت اندازه گیری شده موج در آزمایشگاه و  $V_L^*$  سرعت عبور موج که بصورت نظری محاسبه شده است. آقای فورمین فراکس (Fourmain Fraux) (۱۹۷۹) به طور تجربی فرمول زیر را بین IQ و تخلخل در نمونه روی IQ را به صورت زیر معرفی نمود:

$$IQ(\%) = 100 - 1/6 n \quad (35-2)$$

جدول ۲-۱۰- سرعت امواج طولی در برخی کانیها (m/s)

VL(m/s)	کانی	VL(m/s)	کانی
۶۶۰۰	کلسیت	۶۰۵۰	کوارتز
۷۵۰۰	دولومیت	۸۴۰۰	الیون
۷۴۰۰	منیتیت	۷۲۰۰	آزیت
۵۲۰۰	ژنپس	۷۲۰۰	آمفیبولیت
۷۴۵۰	اپیدوت	۵۸۰۰	مسکویت
۸۰۰۰	پیریت	۵۸۰۰	ارتوکلاز
		۶۲۵۰	پلاژیوکلاز

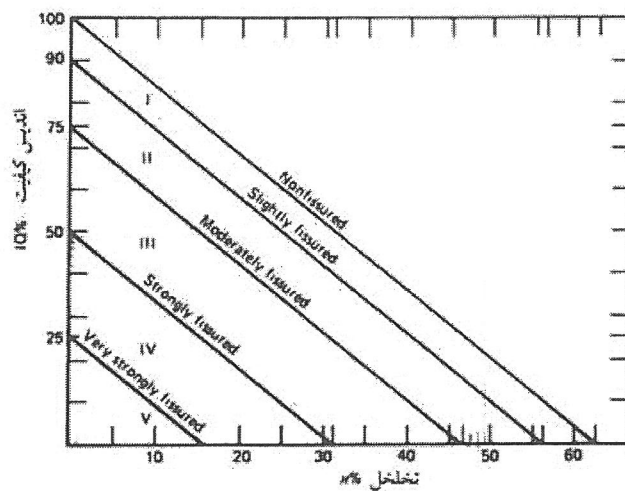
در فرمول بالا  $n$  عبارت است از تخلخل نمونه سنگی بدون هیچ نوع درزه و یا شکاف به هر حال حتی اگر کوچکترین درزه یا شکافی در نمونه سنگی باشد این رابطه معتبر نیست. برای مثال یک نمونه ماسه سنگ با تخلخل ۱۰٪ مقدار شاخص کیفی  $IQ = 84\%$  را دارا است در صورتیکه پس از حرارت دادن نمونه سنگی در درجه حرارت بالا و افزایش تخلخل نمونه به میزان ۲ درصد به علت ایجاد درزه ( $n = 12\%$ ) مقدار IQ آن به عدد ۵۲٪ کاهش می یابد. جدول ۲-۱۱ مقادیر  $V_L^*$  را برای برخی از سنگها نشان می دهد.



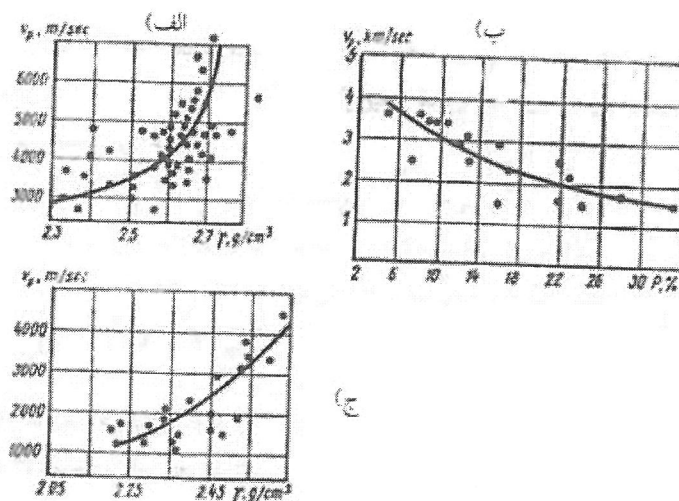
جدول ۲-۱۱ مقادیر  $V^*L$  برای چند نمونه سنگی

$V^*L$ (m/s)	سنگ
۷۰۰۰	کابرو
۶۵۰۰ - ۷۰۰۰	بازالت
۶۰۰۰ - ۶۵۰۰	سنگ آهک
۶۵۰۰ - ۷۰۰۰	دولومیت
۶۰۰۰	ماسه سنگ و کوارتزیت
۵۵۰۰ - ۶۰۰۰	سنگ های گرانیتی

فرورین فراکتس برحسب کارهای عملی و نظری شکلی مطابق ریز را که مقدار  $IQ$  را در مقابل تخلخل نشان می دهد، ارائه داده است. در این نمودار همچنین درجه درزه و یا ترکهای موجود در نمونه سنگی نیز که کاربرد عملی خوبی نیز دارد ارائه شده است (منحنی ۲-۳).



شکل ۲-۱۴ - روش تقسیم بندی درزه ها در نمونه های سنگی (شکل از Fourmaintrax ۱۹۷۶)



شکل ۲-۶ - وابستگی سرعت امواج طولی به وزن مخصوص ظاهری : ماسه سنگ

(ب) رس . رس . ارتباط سرعت موج و تخلخل در سنگ ها

## فصل سوم: تنش و کرنش

۱-۳- مقدمه

۲-۳- تفاوت بین یک اندازه ، یک بردار و یک تانسور

۳-۳- نیرو و تنش

۴-۳- تبدیل تنش

۵-۳- تنش های اصلی و نامتغیرهای تنش

۶-۳- معادلات دیفرانسیل تعادل استاتیکی

۸-۳- تنش صفحه ای

۹-۳- جابجائی و کرنش

۱۰-۳- کرنشهای اصلی، تبدیل کرنش، کرنش حجمی و انحرافی

۱۱-۳- گل کرنش

۱۴-۳- روابط تنش کرنش

۱۷-۳- نمایش تصویری تنش در صفحه

۱۸-۳- نمایش تصویری کرنش در صفحه

۱-۳- مقدمه

مسائل مکانیک مهندسی در حفاریات زیرزمینی معدنی و عمرانی، بصورت پیش بینی جابجائیهای ایجاد شده در سنگهای درونگیر حفریه در اثر استخراج مواد معدنی می باشد. سنگهای حفر شده قبل از حفاری تحت تنشهای ثقلی روباره، تنشهای تکنیکی و یا سایر نیروها و تنشها قرار داشته است. از آنجائیکه ابعاد حفاریات زیرزمینی در مقایسه با مساحت سطح زمین بسیار کوچک است، می توان از فرضیه کروی بودن زمین استفاده کرد. بنابراین محدوده حفاریات زیرزمینی بمنظورهای عمرانی و معدنی را می توان بصورت حفاریات نامحدود یا شبه نامحدود در نظر گرفت که تحت تنشهای اولیه قرار گرفته اند.

درک مفاهیم نیرو، تنش و کرنش از اصول درک مناسب رفتار توده سنگها هستند. استخراج هر حفریه زیرزمینی از لحاظ مکانیکی معادل اعمال یا القای دسته ای از نیروها روی سطح ایجاد شده در اثر حفریه است. شکل حفریه نیز همچنین یک سری تغییر شکلها را روی سطح حفریه القاء می کند. با استفاده از اطلاعات نیروهای سطحی و جابجائیهای القاء شده می توان تنشها و جابجائیهای تولید شده در هر نقطه از محیط سنگی حفر شده را بدست آورد. بیان فرآیند حفاری زیرزمینی بر مبنای دسته ای از نیروهای سطحی، دلیل صرفنظر کردن از نیروهای حجمی در سنگ نیست، بلکه نیروهای حجمی با حفاری در توده سنگ ایجاد نمی شوند. رفتار یک جزء سنگ در محیط حفریه بصورت قابلیت پایداری و خود ایستائی آن در اثر نیروهای حجمی و داخلی و نیروهای سطحی بعد از حفاری در اثر حفاری می باشد. اگرچه در عملکرد مسائل حفاریات زیرزمینی مولفه های نیروهای حجمی در مقایسه با نیروهای سطحی نسبتاً کوچک است. یک مهندس مکانیک سنگ به دلایل زیر نیاز به درک تنش دارد.