Rock Mechanics

فهرست عناوین و فصول

۱- مقدمه
۲- طبقه بندی سنگها
۳- خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ ها
٤- رفتار سنگ ، معیارهای خرابی و شکست
٥- تنش های در جا در سنگ
٦- صفحات ضعیف در سنگها
۷- کاربرد مکانیک سنگ در مهندسی

۲

Rock Mechanics

خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ ها

خصوصیات ذاتی : نظیر نام سنگ شناسی ، چگالی ذرات جامد (G_s) ، توزیع حفرات

خصوصیات نشانه‌ای : نظیر دانسیته نسبی ، وزن مخصوص ظاهری ، نسبت تخلخل ، حداکثر جذب آب ، مقاومت فشاری (تک محوری) و مقاومت بار نقطه ای، دوام

خصوصیات شکل و اندازه سنگدانه‌ها : آزمایشات دانه بندی ، تعیین شکل مصالح ، ضریب یکنواختی ، ضریب انحنا و غیره که بیشتر برای سنگ پاره و سنگ های خرد شده استفاده می شود

۳

Rock Mechanics

INDEX PROPERTIES OF INTACT ROCK

- Unit Weight, γ
- Porosity, n
- Wave Velocities (V_p and V_s)
- Permeability
- Durability
- Strength
  - Compressive Strength, q_u
  - Tensile Strength, T_0
  - Elastic Modulus, E_R (at 50% of q_u)

٤

Rock Mechanics

UNIT WEIGHTS OF ROCKS

$\rho = \frac{m}{V}$ جرم حجمی $\gamma = \frac{W}{V}$ وزن حجمی

$G = \frac{\gamma}{\gamma_w}$ چگالی نسبی از تقسیم وزن حجمی سنگ به وزن حجمی آب بدست می آید

چگالی نسبی سنگ از چگالی نسبی کانی های متشکله در صد و حجم هر یک از آنها بدست می آید برای کانی های مختلف از ۲ تا ۸ تغییر می کند

$$G = \sum_{i=1}^{n} G_i V_i$$

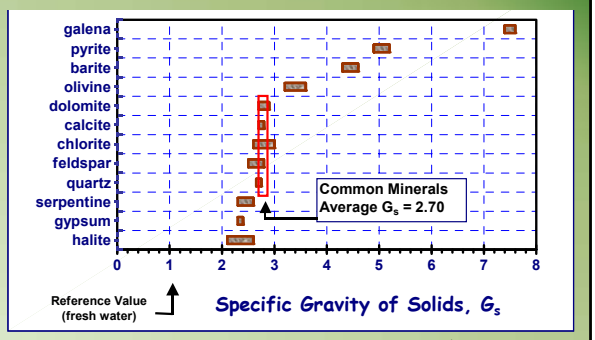
کانی ها	G
هالیت	۲٫۱-۲.۶
ژیپس	۲.۳-۲.۴
کوارتز	۲.۶۵
کلیت	۲.۷
باریت	۴.۳-۴.۶
پیریت	۴.۹-۵.۲

٥

Rock Mechanics

SPECIFIC GRAVITY OF ROCK MINERALS

وزن مخصوص جامد



خصوصیات ذاتی

٦

Rock Mechanics

Porosity, n

$n = \frac{V_v}{V}$ درجه پوکی

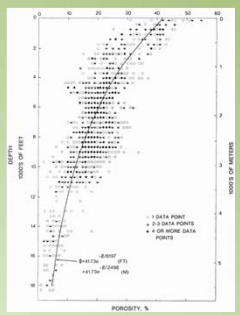
$e = \frac{V_v}{V_s}$ نسبت تخلخل

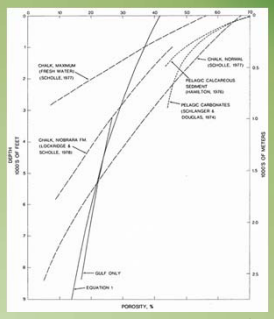
در سنگ ها آذرین و دگرگون معمولا" تخلخل بدلیل وجود ترک ها می باشد در سنگ های آذرین تخلخل حدود ۱ تا ۲٪ است و در صورت وجود هوازدگی به ۲۰٪ هم می رسد .
مقاومت مکانیکی سنگ ها با افزایش تخلخل کاهش می یابد و نفوذپذیری آن ها افزایش می یابد .

روش های مختلفی جهت اندازه گیری تخلخل وجود دارد
۱- اندازه گیری دانسیته
۲- اندازه گیری در صد رطوبت سنگ پس از اشباع شدن در آب
۳- - اندازه گیری در صد رطوبت سنگ پس از اشباع شدن در جیوه تحت فشار (دستگاه پروزیمتری جیوه ای)
۴- اندازه گیری حجم جامد و فضای خالی به توسط قانون بویل

۷

POROSITY VS. DEPTH





در سنگ های رسوبی $0 \le n \le 90\%$ معمولا" تغییر میکند و با افزایش عمق و سن سنگ تخلخل کاهش می یابد .

Rock Mechanics

Porosity, n

Porosimeter

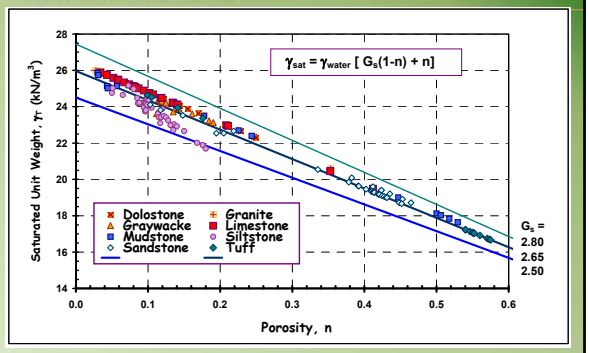
روش های مختلفی جهت اندازه گیری تخلخل وجود دارد

۱- اندازه گیری دانسیته
۲- اندازه گیری در صد رطوبت سنگ پس از اشباع شدن در آب
۳- اندازه گیری در صد رطوبت سنگ پس از اشباع شدن در جیوه تحت فشار (دستگاه پروزیمتری جیوه ای)
۴- اندازه گیری حجم جامد و فضای خالی به توسط قانون بویل

۹

Rock Mechanics

UNIT WEIGHTS OF ROCKS



۱۰

Rock Mechanics

SONIC VELOCITIES OF ROCKS

سرعت انتشار امواج در سنگ

سرعت انتشار موج فشاری و کششی $c_p = \sqrt{E/\rho}$

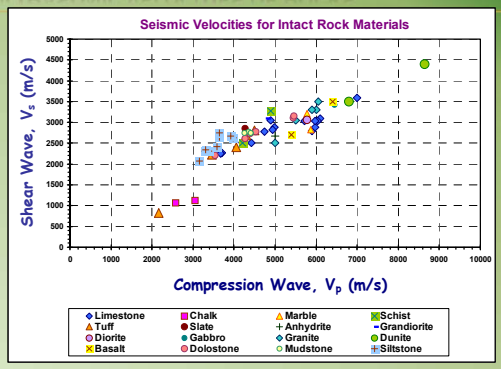
سرعت انتشار موج برشی یا پیچشی $c_s = \sqrt{G/\rho}$

تابع مشخصات مصالح

۱۱

Rock Mechanics

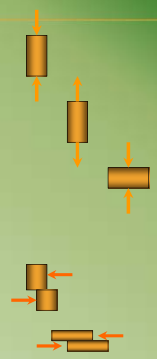
ULTRASONIC VELOCITIES OF ROCKS



۱۲

STRENGTH OF INTACT ROCKS

- Compressive Strength, $\sigma_u = q_u$
- (Direct) Tensile Strength, $*T_0$
- (Indirect) Brazilian Strength, T_0
- Shear Strength, τ
  - Across the intact rock
  - Along the planar surface (joints)

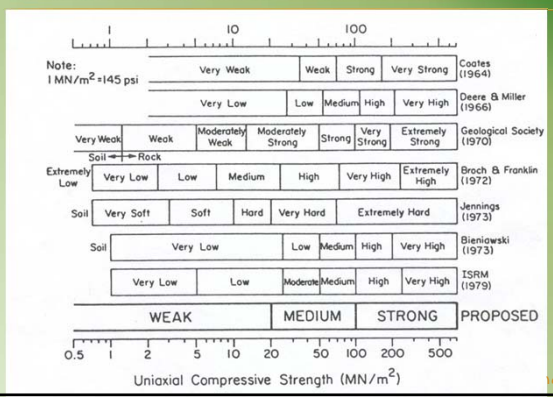


LAB DATA ON INTACT ROCKS (GOODMAN, 1989)

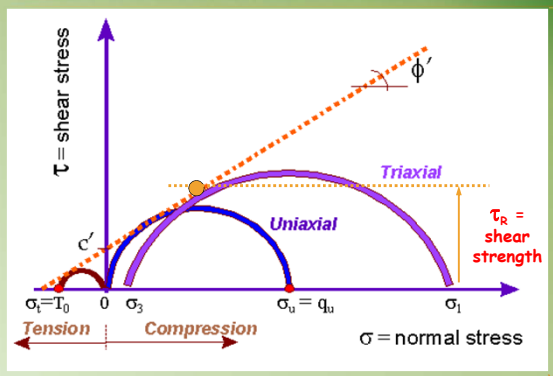
Intact Rock Material	q_u (MPa)	T_0 (MPa)	E_R (MPa)	ν (-)	Ratio q_u/T_0	Ratio E_R/q_u
Baraboo Quartzite	320.0	11.0	88320	0.11	29.1	276
Bedford Limestone	51.0	1.6	28509	0.29	32.3	559
Berea Sandstone	73.8	1.2	19262	0.38	63.0	261
Cedar City Tonalite	101.5	6.4	19184	0.17	15.9	189
Cherokee Marble	66.9	1.8	55795	0.25	37.4	834
Dworshak Dam Gneiss	162.0	6.9	53622	0.34	23.5	331
Flaming Gorge Shale	35.2	0.2	5526	0.25	167.6	157
Hackensack Siltstone	122.7	3.0	29571	0.22	41.5	241
John Day Basalt	355.0	14.5	83780	0.29	24.5	236
Lockport Dolomite	90.3	3.0	51020	0.34	29.8	565
Micaceous Shale	75.2	2.1	11130	0.29	36.3	148
Navajo Sandstone	214.0	8.1	39162	0.46	26.3	183
Nevada Basalt	148.0	13.1	34928	0.32	11.3	236
Nevada Granite	141.1	11.7	73795	0.22	12.1	523
Nevada Tuff	11.3	1.1	3649.9	0.29	10.0	323
Oneota Dolomite	86.9	4.4	43885	0.34	19.7	505
Palisades Diabase	241.0	11.4	81699	0.28	21.1	339
Pikes Peak Granite	226.0	11.9	70512	0.18	19.0	312
Quartz Mica Schist	55.2	0.5	20700	0.31	100.4	375
Solenhofen Limestone	245.0	4.0	63700	0.29	61.3	260
Taconic Marble	62.0	1.2	47926	0.40	53.0	773
Tavernalle Limestone	97.9	3.9	55803	0.30	25.0	570
Statistical Results: Mean =	135.5	5.6	44613	0.29	39.1	372.5
S.Dev. =	93.7	4.7	25716	0.08	35.6	193.8

Note: 1 MPa = 10.45 tsf = 145.1 psi

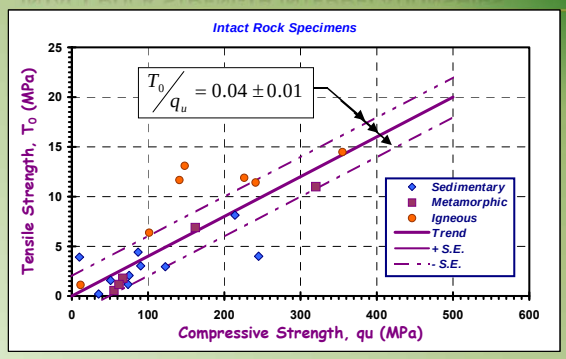
CLASSIFICATION FOR ROCK MATERIAL STRENGTH



ROCK STRENGTH INTERRELATIONSHIPS



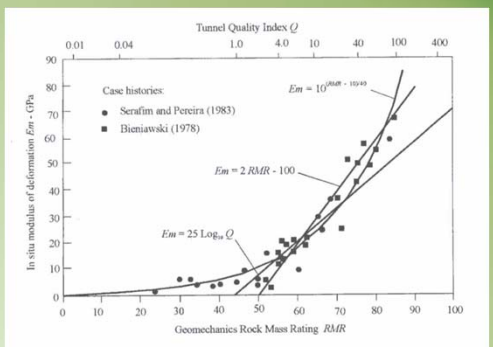
INTACT ROCK STRENGTH INTERRELATIONSHIPS



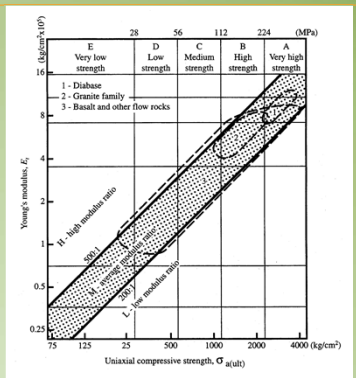
INTACT ROCK CLASSIFICATION

- Classification by Uniaxial Compressive Strength, σ_u
- Categorize Rock by its Strength and Modulus Ratio (E_R/σ_u)
- Summary plots for Igneous, Sedimentary, and Metamorphic Rock Types
- Check on reasonableness of your lab measurements and tests

IN SITU MODULUS FOR ROCK MASS

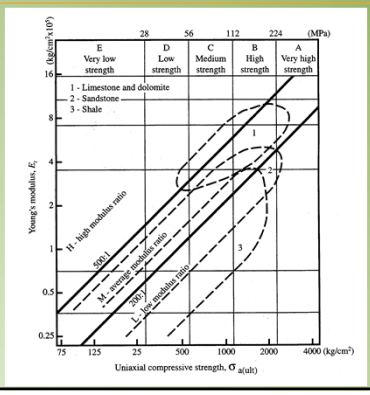


E_R-Q_U GROUPS FOR IGNEOUS ROCKS



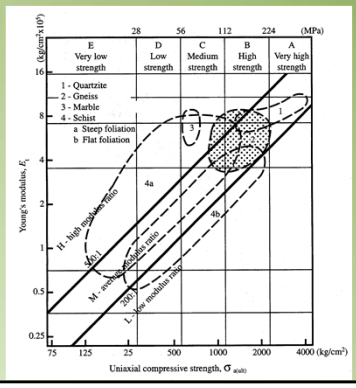
Deere and Miller (1966)

E_R-Q_U GROUPS FOR SEDIMENTARY ROCKS



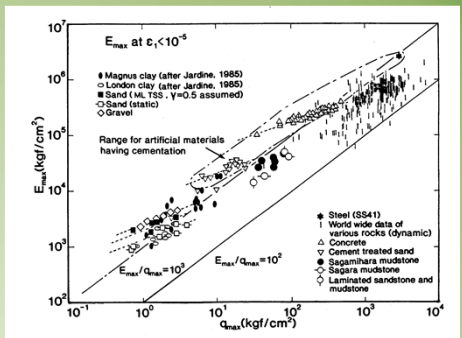
Deere and Miller (1966)

E_R-Q_U GROUPS FOR METAMORPHIC ROCKS



Deere and Miller (1966)

E_{MAX}-Q_U GROUPS FOR ALL TYPES OF GEOMATERIALS



(Tatsuoka and Shibuya, 1992)

ROCK MECHANICS

In a very general sense, rock strengths are related to origin; e.g., dense igneous rocks are stronger than dense sedimentary rocks

Rock strength is also related to:

- Texture (interlocking textures are stronger)
- Anisotropy (the existence of preferred failure planes)
- Mineralogy (e.g., quartz is stronger than calcite)
- Moisture Content (dry rocks tend to be stronger than saturated rocks)
- Degree and Type of Cement (e.g., quartz is stronger than calcite and complete cementation makes rock stronger than just partial cementation)

Rocks are much stronger in compression than tension

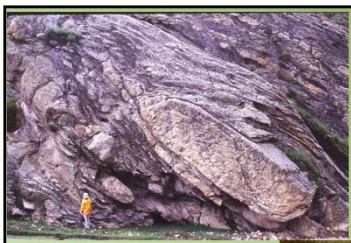
Rocks deform elastically, plasticly, brittlely

Deformation style in part a function of heat, pressure, and time (strength is inversely proportional to all three)

ROCK STRENGTH INTERRELATIONSHIPS

نوع سنگ	وزن مخصوص نمونه KN/M³	مدول الاستیسیته MPa×۱۰³	نسبت پوآسون	مقاومت فشاری MPa
بازالت	۲۸	۱۰۳–۱۷	۰,۳۲–۰,۲۷	۴۱۵–۱۷۰
گرانیت	۲۶,۴	۸۳–۱۴	۰,۳۰–۰,۲۶	۲۷۶–۷۰
شیست	۲۶	۸۳–۷	۰,۲۲–۰,۱۸	۱۰۵–۳۵
سنگ آهک	۲۶	۱۰۳–۲۱	۰,۴۵–۰,۲۴	۱۷۰–۳۵
سنگ آهک متخلخل		۸۳–۳	۰,۴۵–۰,۳۵	۳۵–۷
ماسه سنگ	۲۳,۶–۲۲,۸	۴۲–۳	۰,۴۵–۰,۲۰	۱۳۸–۲۸
شیست رسی	۲۲–۱۵,۷	۲۱–۳	۰,۴۵–۰,۲۵	۱۴۰–۷
بتن	۲۳,۶–۱۵,۷	متغیر	۰,۱۵	۴۰–۱۵

ROCK FLOW



Viscous (fluid) behavior

Rocks can flow like fluids!

ROCK FLOW

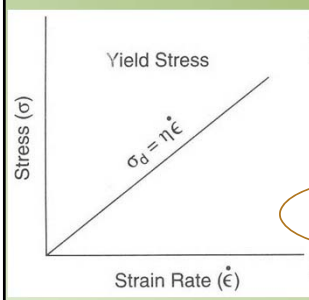


Table 5.5 Some Representative Viscosities (in Pa · s)

Air	10^{-5}
Water	10^{-3}
Olive oil	10^{-1}
Honey	4
Glycerin	83
Lava	$10–10^{4}$
Asphalt	10^{5}
Pitch	10^{9}
Ice	10^{12}
Rock salt	10^{17}
Sandstone slab	10^{18}
Asthenosphere (upper mantle)	10^{20}
Lower mantle	10^{21}

Sources: Several sources, including Turcotte and Schubert (1982).

viscosity: measure of resistance to flow

ROCK STRENGTH INTERRELATIONSHIPS

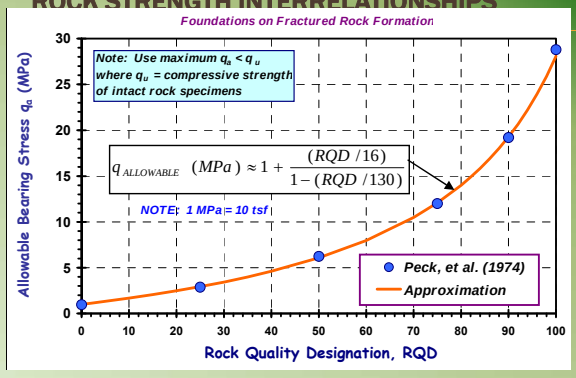
ظرفیت باربری نهایی را بر اساس *RQD* به صورت زیر کاهش می یابد

$$Q'_{ult} = Q_{ult} \times (RQD)^2$$

در بسیاری از موارد، فشار تکیه گاهی مجاز سنگ متناسب با *RQD* بین یک سوم تا یک دهم مقاومت فشاری تک محوری حاصل از نمونه سنگ‌های سالم در نظر گرفته می‌شود، به عنوان مثال برای *RQD* کوچک، یک دهم در نظر گرفته می‌شود

با بررسی چشمی مغزه‌های سنگ نوع سنگ تعیین شده ، و بر اساس آن فشار تکیه گاهی مجاز را به آسانی از روی آیین نامه ساختمانی محلی تعیین نمود.

ROCK STRENGTH INTERRELATIONSHIPS



ROCK STRENGTH INTERRELATIONSHIPS

ظرفیت باربری سنگ در صورت وجود چاه‌های حفاری شده با قطر بزرگ که ۲ تا ۳ برابر قطر چاه در داخل سنگ فرو می‌روند بر اساس آزمایشهای بارگذاری بر روی این نوع پی‌ها فشار تکیه گاهی مجاز تقریباً برابر است با :

$$q_a = q_u to 2.5 q_u$$

این مقدار به مراتب از مقادیر یک سوم و یک دهم پیش گفته بیشتر است.
حداقل بخشی از افزایش زیاد فشار مجاز را می‌توان به پدیدهٔ محدود کنندهٔ سه محوری ناشی از عمق نفوذ در بخش تحتانی پایه مربوط دانست.
از مقادیر کوچکتر پیش گفته برای پی‌های مستقر بر سطح سنگ استفاده می‌شود.

حرکت آب

قانون دارسی

$q_u = K\nabla(P)A$

q_u : دبی

A : سطح مقطع

$\nabla(P) = \frac{dh}{dx}$ گرادیان هیدرولیکی

$K = \frac{K_{(n)}\gamma_f}{\mu_f}$

μ_f : ویسکوزیته مایع

$K(n)$ نفوذپذیری ذاتی بر حسب دارسی

دارسی $1 = 9.86 * 10^{-9} cm^2$

۳۱

حرکت آب

رژیم جریان

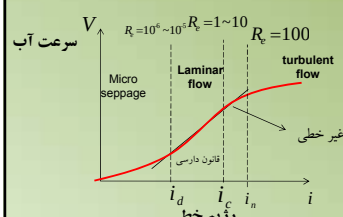
$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$

: جرم مخصوص

V : سرعت آب

D : قطر موثر خاک یا درزه های سنگ

μ : ویسکوزیته



رژیم خطی

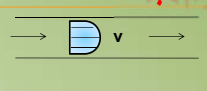
$10^{-6} \langle R_e \langle 1.0 \Rightarrow$ قانون دارسی معتبر است

در لوله ها $R_e \langle 2000 \Rightarrow$ قانون دارسی معتبر است

۳۲

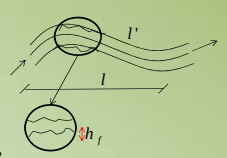
حرکت آب

نفوذپذیری $k_f = \frac{ge^2}{12\nu}$



درزه صاف

درزه ناهموار



ν: لزجت حیه

e: دهانه درزه

g: شتاب ثقل

$\Rightarrow k_f = \frac{ge^2}{12\nu}\varepsilon f$

$\varepsilon = 1/l'$: انحنا و l' طول عبور جریان

α : ضریب ناهمواری نسبی بین ۴,۵ تا ۱۲۵

$D_h = 2e$: میانگین شعاع هیدرولیکی

h_f: برآمدگی متوسط ناهمواری دیواره درزه

ضریب ناهمواری $f = \frac{1}{1 + \alpha\left[\frac{h_f}{D_h}\right]^m}$

m: ضریب ثابت بین ۱,۵ تا ۳

۳۳

حرکت آب

نفوذپذیری: سه دسته درزه عمود برهم

$k = \frac{\gamma_w}{6\mu}\left(e^3/s\right)$

s: فاصله درزه ها

e: دهانه درزه

نفوذپذیری

دهانه درزه $\Rightarrow$ میزان تنش

در سایت

$k = \frac{q\ln(R_2/R_1)}{2\pi L \Delta h}$

R_2, R_1 شعاع داخلی و خارجی نمونه استوانه ای

Δh اختلاف هد در شعاع داخلی و خارجی

l طول نمونه

q دبی

۳۴

آزمایشات سنگ

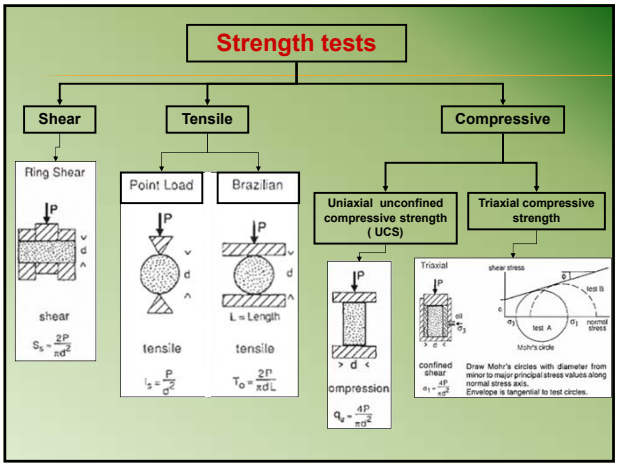
آزمایشات آزمایشگاهی

آزمایش تک محوری
شاخص بار نقطه ای
تست برزیلی
تست خمشی
آزمایش برش حلقه
دوام

آزمایشات صحرایی

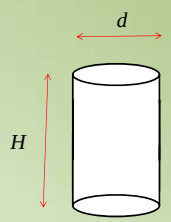
چگالی در سایت
درصد رطوبت
نفوذپذیری
تنش برجا
تغییر شکل پذیری
خزش

۳۵



آزمایشات سنگ

آزمایش تک محوری



نمونه استوانه ای

$$\frac{H}{D} = 2.5 \sim 3$$

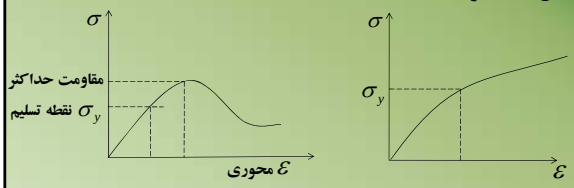
نرخ بار گذاری ۰٫۵ تا ۱ MPa/sec

مقاومت فشاری نمونه از تقسیم بار حداکثر به سطح مقطع اولیه نمونه بدست می آید .

۲۷

آزمایشات سنگ

آزمایش تک محوری



منحنی تنش و کرنش سنگ

عوامل تاثیر گذار بر مقاومت

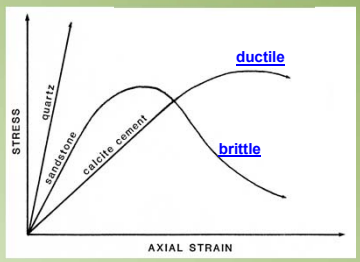
۱ مربوط به نمونه : نظیر کانی های سنگ ، چگالی، تخلخل، اندازه دانه ها و ناهمسانگردی سنگ

۲ عواملی خارجی: نظیر هندسه نمونه (H/D) اصطکاک صفحات فشار ماشین و سطوح انتهایی نمونه و نرخ بار گذاری

۳ شرایط محیطی : مانند رطوبت ، مایعات موجود در سنگ و درجه حرارت

۲۸

آزمایشات سنگ



- The stress strain behavior of a natural rock like sandstone is a combination of its mineralogical components, in this case: quartz and calcite

دستگاه های جدید ⟸ منحنی بعد از نقطه پیک تنش

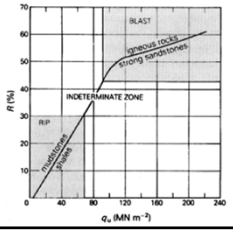
آزمایشات سنگ

آزمایش چکش اشمیت

Schmidt Hammer
Hand held, spring loaded hammer measures rebound from rock surface; rebound values correlate with UCS and decline significantly in fractured rock.

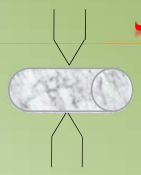
Schmidt hardness	20	30	40	50	60
UCS (MPa)	12	25	50	100	200

Very rapid field test may identify weaker or weathered rock, or loose fracture blocks, in exposed rock face.



آزمایشات سنگ

شاخص بار نقطه ای



$$I_s = P / D^2$$

$$l = 1.4D$$

در حالت استاندارد D=50mm می باشد و با افزایش D مقدار I_S کاهش می یابد

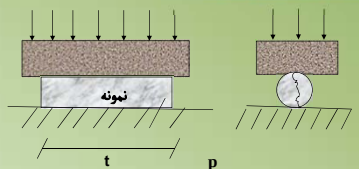
$$q_u = 24 I_{s(50)}$$

سنگ	$I_{S(50)}$ (MPa)
ماسه سنگ و سنگ رس دوران سوم	0.05 – 1
ذغال	0.2 – 2
شیل	0.2 – 8
دولومیت	6 – 11

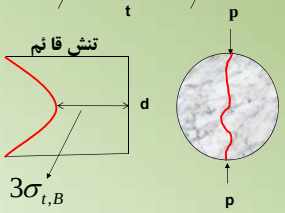
۴۱

آزمایشات سنگ

تست برزیلی



جهت تخمین مقاومت کششي



$$\sigma_{t,B} = \frac{2P}{\pi d t}$$

تنش کششي در تست برزيلي

p : بار

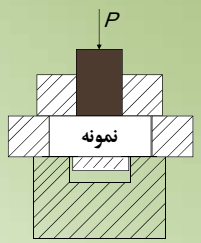
d : قطر

t : طول نمونه

۴۲

آزمایشات سنگ

آزمایش برش حلقه

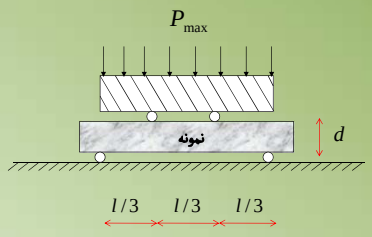


تنش برشی ماکزیمم $\tau_P = \dfrac{P}{2A}$

P نیروی ماکزیمم
A مساحت جانبی

آزمایشات سنگ

تست خمشی



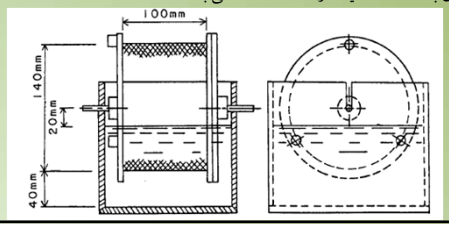
ممان خمشی یکنواخت

$$T_{MR} = \frac{16\,P_{max}\,l}{3\pi d^3}$$

آزمایشات سنگ

شاخص دوام (slake durability index)

در این آزمایش یک درام ۱۴۰ میلی متری و با طول ۱۰۰ میلی متری با پوشش یک توری با چشمه های ۲ میلی متری وجود دارد . ۵۰۰ گرم سنگ در ده قطعه و در حالت اشباع در درام ریخته و ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه می چرخانیم . در صد وزنی باقیمانده سنگ (در شرایط خشک) شاخص دوام را می دهد. توصیه Gambel چرخش ثانوی به مدت ۱۰ دقیقه در حالت خشک می باشد .



آزمایشات سنگ

دوام

تغییرات در سنگ بدلیل ورقه ورقه شدن تماس با آب ، حل شدن ، اکسیداسیون و فرسایش و ... صورت می پذیرد

در بعضی از سنگ های آذرین وشیل ، دگرسانی در مدت کمی از ایجاد یک سطح تماس با هوا ایجاد می شود .

شاخص دوام	slake durability index
آزمایش سایش لس آنجلس	Los Angeles Abrasion
آزمایش خردایش هلندی	Dutch crushing test
آزمایش سلامت	Soundness test
یخ زدن و آب شدن	Freezing & thawing test

دوام با دانسیته سنگ نسبت مستقیم و با در صد رطوبت نسبت معکوس دارد

آزمایشات سنگ

آزمایش سایش لس آنجلس *Los Angeles* Abrasion

در این آزمایش مقاومت سایشی سنگدانه ها اندازه گیری می شود . لیکن مقاومت سایشی ارتباط نزدیکی با مقاومت تک محوری دارد .

استاندارد شماره ۴۴۸ ایران روش این آزمایش را برای چندین نوع دانه بندی مشخص می نماید . در این آزمایش جرم مشخصی از مصالح سنگی درون درام ریخته شده و با مقداری گلوله فولادی با سرعت ۱۰۰۰ دور درون درام می چرخند . میزان مصالح درشت دانه باقیمانده پس از شست و شو و خشک کردن بدست می آید . در صد کاهش وزن مصالح در اثر سایش به عنوان درصد سایش لس آنجلس نامیده می شود .

آزمایشات سنگ

شاخص دوام (slake durability index)

Table 1. Visual description of the rock samples retained in the test drum after the second cycle (after Franklin and Chandra. 1972).

Type	Description
I	Pieces remain virtually unchanged
II	Consist of large and small pieces
III	Exclusively small fragments

Table 2. Slake durability index classification (after Franklin and Chandra. 1972).

ID_2 (%)	Durability classification
0 – 25	Very Low
26 – 50	Low
51 – 75	Medium
76 - 90	High
91 – 95	Very High
96 - 100	Extremely High

Rock Mechanics

آزمایشات صحرایی سنگ

چگالی

پرتوگاما

یکی از روش های تعیین چگالی در سایت استفاده از پرتوگاما می باشد .
پرتوگاما به هنگام انتشار در اثر بر خورد با الکترونها جذب شده یا منحرف شده (پخش شده) و به مسیر خود ادامه می دهد و بنابراین انرژی خود را از دست می دهد.
هر چه انرژی پرتوگاما بیشتر باشد تقلیل انرژی بدلیل پخش بیشتر می شود و هر چه انرژی آن کمتر باشد تقلیل انرژی بدلیل جذب بیشتر است .
در عمل با استفاده از یک چشمه پرتوگامای (معمولا CS۱۳۷ با نیمه عمر ۳۰,۲ سال) و یکسری آشکار ساز پرتوگاما می توان چگالی سنگ را تعیین نمود .

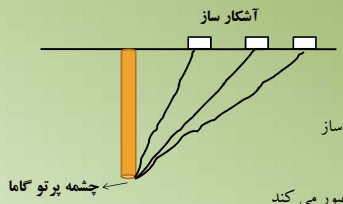
۴۹

Rock Mechanics

آزمایشات صحرایی سنگ

چگالی

پرتوگاما



$$I = I_o e^{-\mu t}$$

I : انرژی پرتوهای رسیده به آشکارساز

I_O : انرژی اولیه پرتوهای γ

t : ضخامت لایه ای که اشعه از آن عبور می کند

μ : ضریب تقلیل که بستگی به عنصری که میان چشمه و آشکار ساز می باشد دارد

$$R = Ae^{-B\gamma} - C$$

R : نرخ شمارش فوتون های رسیده به آشکار ساز

A,B,C : ثابت های کالیبراسیون

γ : چگالی سنگ

۵۰

Rock Mechanics

آزمایشات صحرایی سنگ

درصد رطوبت

یکی از روش های تعیین میزان رطوبت استفاده از نوترون می باشد .
ذرات نوترون خنثی بوده و جرم زیادی دارند که تنها احتمال برخورد با هسته اتم را دارند لذا ذرات نافذی می باشند . نوترون ها در اثر برخورد متوالی کند شده و به اصطلاح نوترون حرارتی می شوند .

بر خورد نوترون سریع با اتم های هیدروژن نوترون حرارتی تولید می کند واگر فرض نمائیم اتم های هیدروژن موجود در محیط مربوط به آب می باشند از شمارش نوترون های حرارتی می توان به مقدار هیدروژن موجود در محیط مربوط به آب می‌باشند

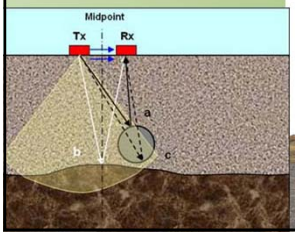
۵۱

Rock Mechanics

آزمایشات صحرایی سنگ

درصد رطوبت

با استفاده از دستگاه GPR نیز می توان به رطوبت حتی آلاینده های آب پی برد



Rock Mechanics

آزمایشات صحرایی سنگ

نفوذپذیری

Gas Permeameter

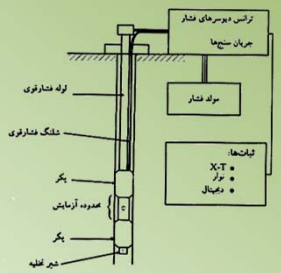
Liquid Permeameter

۵۳

Rock Mechanics

آزمایشات صحرایی سنگ

نفوذپذیری
آزمایش لوژان Lugeon test



معمولا آزمایش در گمانه ای به قطر ۵ سانتیمتر انجام می شود محدوده ای به طول ۵ متر توسط پکرها بسته شده و با فشار حدود 1MPa آب داخل گمانه تزریق شده و میزان دبی آب اندازه گیری می شود و نفوذ پذیری بر حسب لوژان بیان می شود.

یک لوژان نفوذ پذیری سنگی است که در طول یک متر گمانه تحت فشار ۱۰ بار یک لیتر آب در دقیقه از خود عبور دهد

۵۴

آزمایشات صحرایی سنگ

پکر ها
packers

آزمایشات صحرایی سنگ

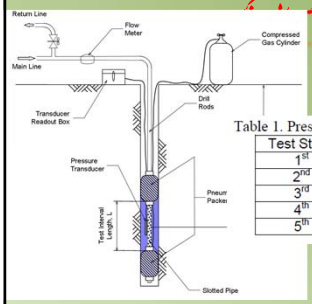


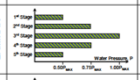
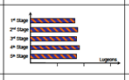
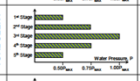
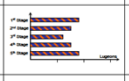
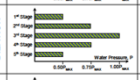
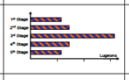
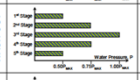
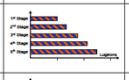
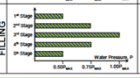
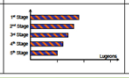
Table 1. Pressure magnitudes typically used for each test stage

Test Stage	Description	Pressure Step
1st	Low	$0.50 \cdot P_{MAX}$
2nd	Medium	$0.75 \cdot P_{MAX}$
3rd	Maximum (peak)	P_{MAX}
4th	Medium	$0.75 \cdot P_{MAX}$
5th	Low	$0.50 \cdot P_{MAX}$

Pmax does not exceed the *confinement stress* (σ3) expected at the depth

A single stage consists of keeping a constant water pressure at the test interval for 10 minutes by pumping as much water as required

Table 3. Summary of current Lugeon interpretation practice (as proposed by Houlsby, 1976)

BEHAVIOR	PRESSURE STAGES	LUGEON PATTERN	DESCRIPTION	REPRESENTATIVE LUGEON VALUE
LAMINAR			All Lugeon values about equal regardless of the water pressure	Average of Lugeon values for all stages
TURBULENT			Lugeon values decrease as the water pressures increase. The minimum Lugeon value is observed at the stage with the maximum water pressure	Lugeon value corresponding to the highest water pressure (3rd stage)
DILATION			Lugeon values vary proportionally to the water pressures. The maximum Lugeon value is observed at the stage with the maximum water pressure	Lowest Lugeon value recorded, corresponding either to low or medium water pressures (1st, 2nd, 4th, 5th stage)
WASH-OUT			Lugeon values increase as the test proceeds. Discontinuities' infillings are progressively washed-out by the water	Highest Lugeon value recorded (5th stage)
VOID FILLING			Lugeon values decrease as the test proceeds. Either non-persistent discontinuities are progressively being filled or swelling is taking place	Final Lugeon value (5th stage)

آزمایشات صحرایی سنگ

- **Laminar Flow:** The hydraulic conductivity of the rock mass is independent of the water pressure employed. This behavior is characteristic of rock masses observing low hydraulic conductivities, where seepage velocities are relatively small (i.e., less than four Lugeons).
- **Turbulent Flow:** The hydraulic conductivity of the rock mass decreases as the water pressure increases. This behavior is characteristic of rock masses exhibiting partly open to moderately wide cracks.
- **Dilation:** Similar hydraulic conductivities are observed at low and medium pressures; however, a much greater value is recorded at the maximum pressure. This behavior – which is sometimes also observed at medium pressures – occurs when the water pressure applied is greater than the minimum principal stress of the rock mass, thus causing a temporary dilatancy (hydro-jacking) of the fissures within the rock mass.
  Dilatancy causes an increase in the cross sectional area available for water to flow, and thereby increases the hydraulic conductivity.
- **Wash-Out:** Hydraulic conductivities increase as the test proceeds, regardless of the changes observed in water pressure. This behavior indicates that seepage induces permanent and irrecoverable damage on the rock mass, usually due to infillings wash out and/or permanent rock movements.
- **Void Filling**: Hydraulic conductivities decrease as the test proceeds, regardless of the changes observed in water pressure. This behavior indicates that either: (1) water progressively fills isolated/non-persistent discontinuities, (2) swelling occurs in the discontinuities, or (3) fines flow slowly into the discontinuities building up a cake layer that clogs them.