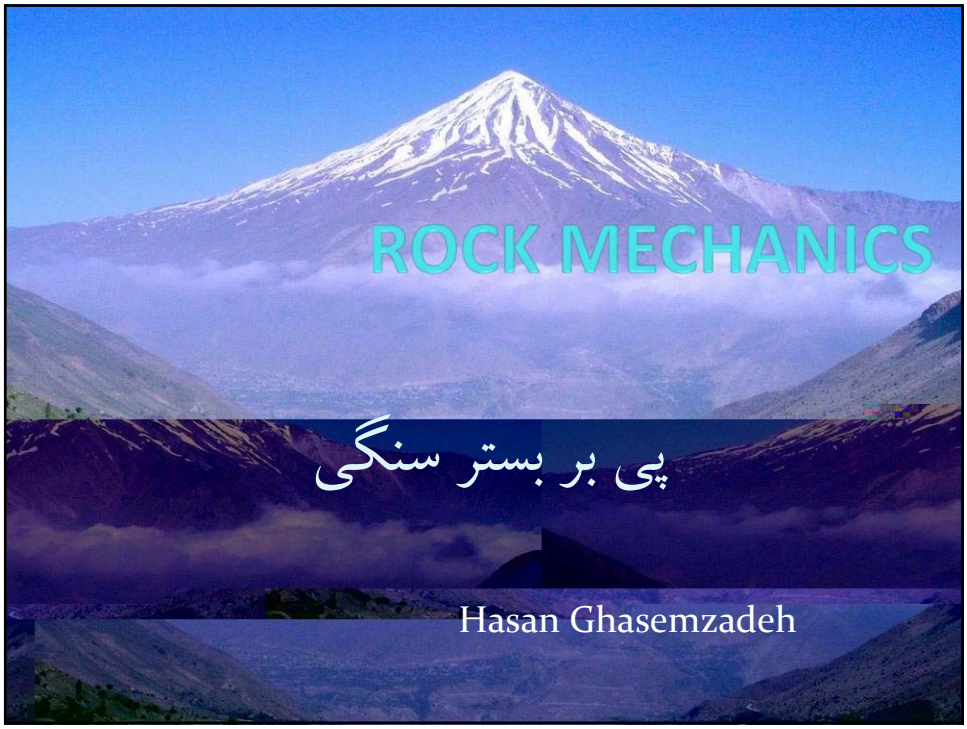


فهرست عناوین و فصول

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

۱- پایداری شیروانی سنگی- ریزش سنگ
۲- تونل
۳- پی بر بستر سنگی

Dr. Hasan Ghasemzadeh 2

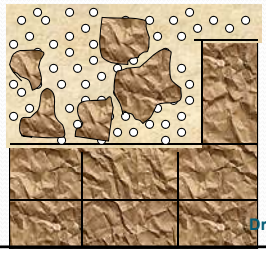
پی بر بستر سنگی

بار های نسبتا" زیاد معمولا به سنگ وارد می شود نظیر بار پایه های پلها، بار ناشی از بدنه سدها بار ناشی از پی آسمانخراش ها

سیستم های مختلف خاک و سنگ که بار پی را می توانند به بستر سنگی منتقل می نماید .

حالت ایده آل

سنگ کاملا" از خاک جدا شده و مرز شخص و افقی دارد. سنگ سالم بوده و مقاومت زیادی دارد.

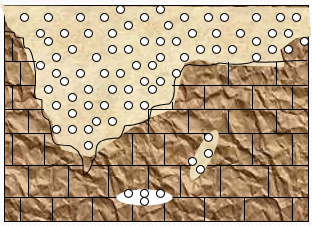


گرافیت هوازده :

مرز خاک و سنگ مشخص نیست و سنگ هوازده دارای مقاومت های متفاوت در نقاط مختلف می باشد.

Dr. Hasan Ghasemzadeh 3

پی بر بستر سنگی



سنگ آهک کارستی:

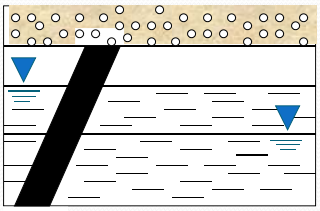
مرز بین خاک و سنگ از شیب و فرورفتگی های بسیار درست شده و عمق خاک و سفره آب زیرزمینی دقیقا مشخص نیست و در هر نقطه‌ای متفاوت است

لایه های متناوب سنگ رس و ماسه سنگ :

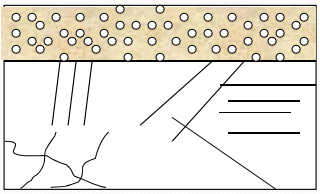
لایه های متناوب سنگ سخت و سنگ نرم تعیین مقاومت و باربری سنگ را مشکل می نماید. لایه سخت در منحنی ممکن است بشکند و استفاده از شمع و حفاری در این سنگ مشکل است.

Dr. Hasan Ghasemzadeh 4

پی بر بستر سنگی



گسل :
وجود گسل ممکن است سطح آب زیرزمینی رامتفاوت سازد و ماده نرم داخل گسل مقاومت راکاهش می دهد احتمال هوازدگی وجود دارد

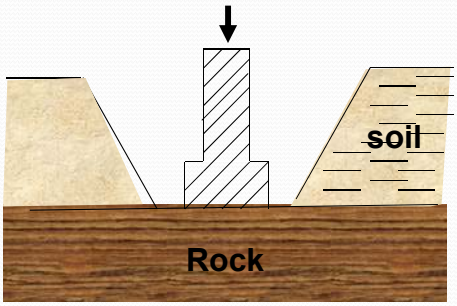


سنگ خورد شده (بسیار شکسته) :
این سنگ کاهش مقاومت فاحشی از خود نشان می دهد

Dr. Hasan Ghasemzadeh 5

انواع پی ها برروی بستر سنگی

پی مستقیم بر بسترسنگ

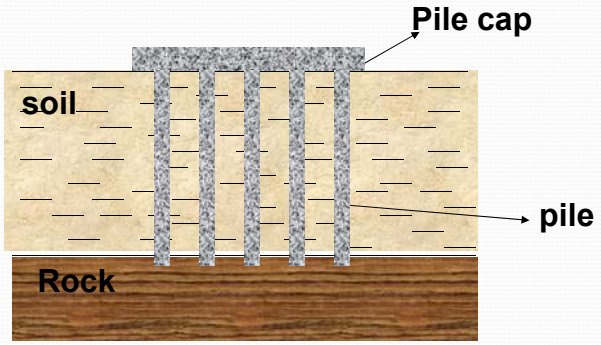


Dr. Hasan Ghasemzadeh 6

انواع پی ها برروی بستر سنگی

پی عمیق بر بسترسنگی

شمع ها

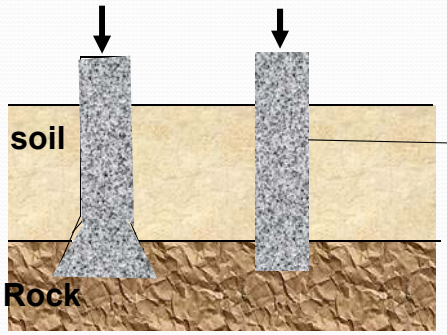


Dr. Hasan Ghasemzadeh 7

انواع پی ها برروی بستر سنگی

پی عمیق بر بسترسنگی

استفاده از پایه های در جا

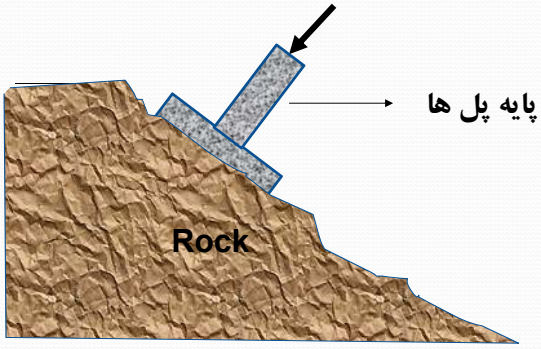


پایه های حفر شده و
بتن ریزی شده در جا

pier

Dr. Hasan Ghasemzadeh 8

انواع پی ها برروی بستر سنگی

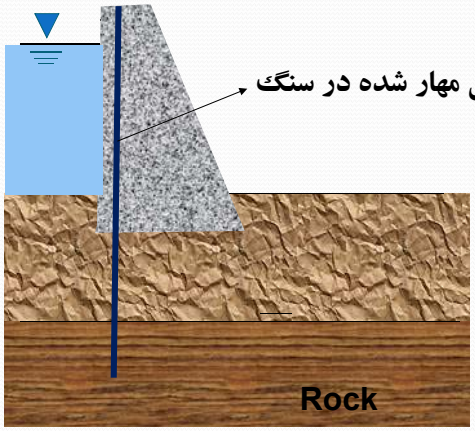


Dr. Hasan Ghasemzadeh 9

انواع پی ها برروی بستر سنگی

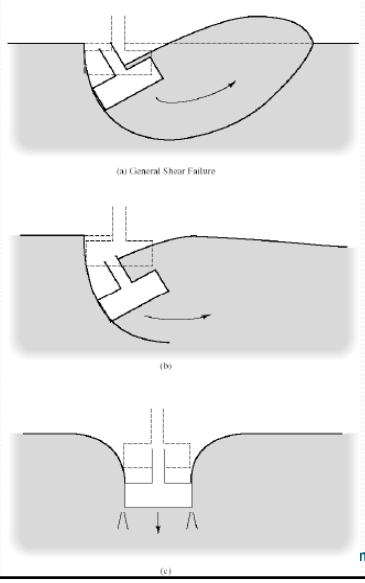
Dr. Hasan Ghasemzadeh 10

انواع پی ها برروی بستر سنگی



Dr. Hasan Ghasemzadeh 11

مدهای خرابی پی



a) General Shear Failure

Most common type of shear failure; occurs in strong soils and rocks

b) Local Shear Failure

Intermediate between general and punching shear failure

سنگ هایی که مقاومت برشی کمی دارند مثل شیل های هوازده و سنگ های آتشفشانی هوازده

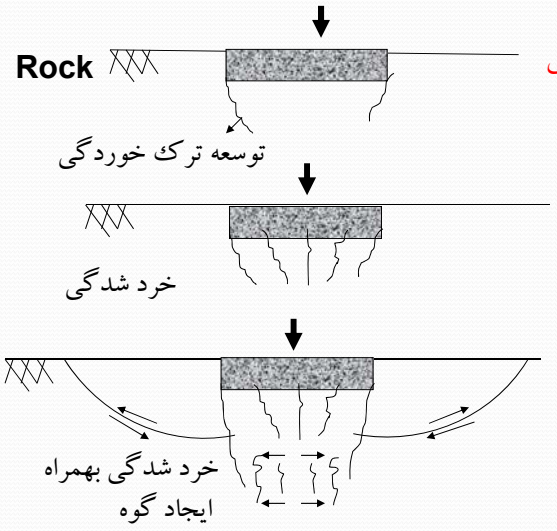
c) Punching Shear Failure

Occurs in very loose sands weak clays

سنگ های بسیار متخلخل و با دارای سیمانته ضعیف

nzadeh 12

مدهای خرابی پی بر بستر سنگی



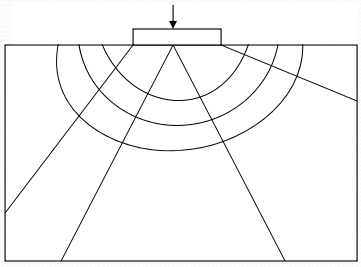
توسعه ترک خوردگی و خرد شدگی

مد خرابی پی بر بستر سنگی

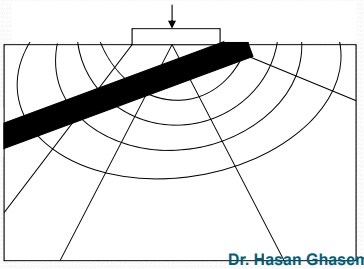
به دلیل وجود درزه‌ها ممکن است با مد خرابی پی بر خاک متفاوت باشد

Dr. Hasan Ghasemzadeh 13

مدهای خرابی پی بر بستر سنگی



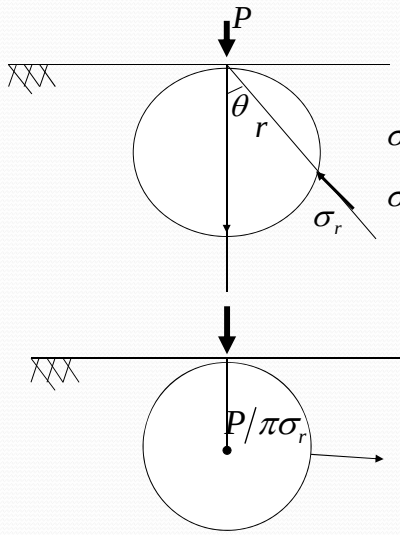
سنگ همگن بصورت دستی یا با روش های عددی براحتی قابل تحلیل است



وجود لایه های ضعیف تر یا قوی تر محاسبات دستی را پیچیده می کند ولی با روش های عددی می توان براحتی محاسبات را انجام داد.

Dr. Hasan Ghasemzadeh 14

تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ



بار خطی عمود

بر یک فضای نیمه بی نهایت

هموژن و همسانگرد و الاستیک

$$\sigma_r = \frac{2P\cos\theta}{\pi r}$$

$$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0$$

مکان هندسی نقاط دارای

تنش شعاعی σ_r ثابت

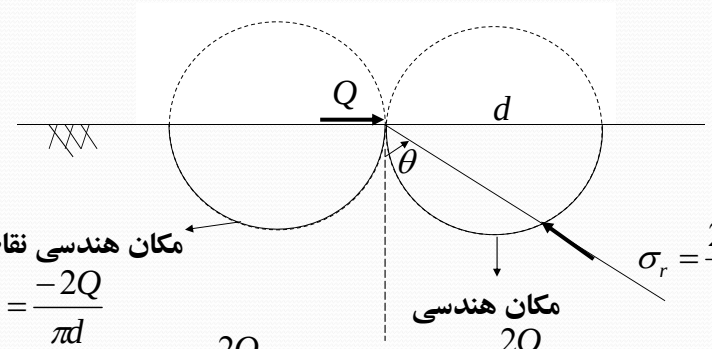
مکان هندسی

$$\sigma_r = Cte$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 15

تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ

بار خطی افقی



مکان هندسی نقاط دارای

$$\sigma_r = \frac{-2Q}{\pi d}$$

$$d = \frac{2Q}{\pi\sigma_r}$$

$$\sigma_r = \frac{2Q\sin\theta}{\pi r}$$

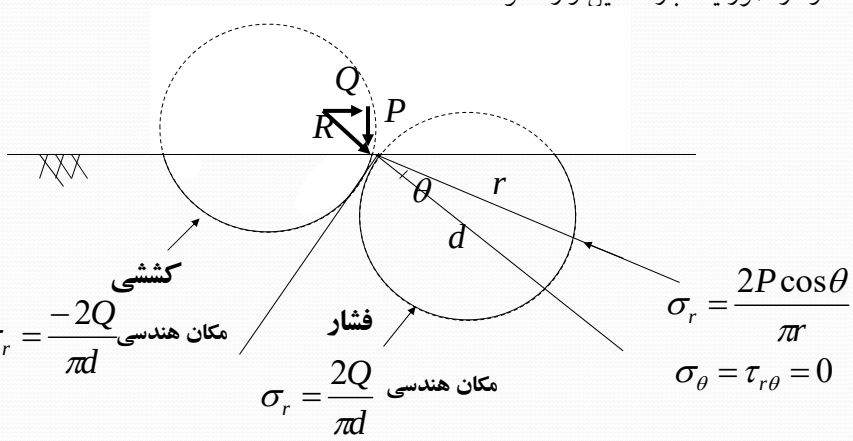
مکان هندسی

$$\sigma_r = \frac{2Q}{\pi d}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 16

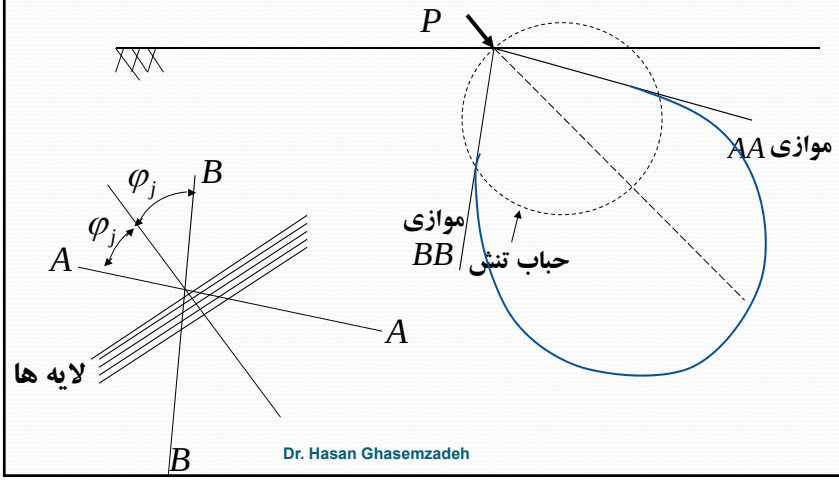
تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ

و در صورتیکه بار متمایل وارد شود

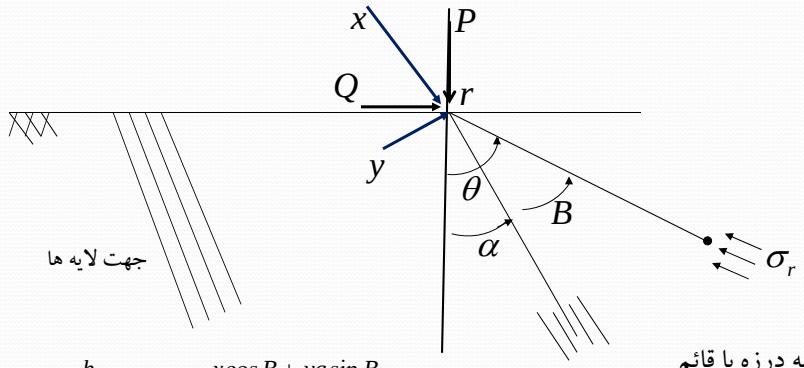


تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ

اگر یک سنگ درزه دار با درزه های منظم داشته باشیم حباب تنش دایره ای نخواهد بود زیرا تنش شعاعی نمی تواند تمام زوایا با صفحه درزه را داشته باشد قدر مطلق زاویه بین σ_r و عمود بر درزه حداکثر برابر φ_j (ضریب اصطکاک درزه) می تواند باشد و لذا حباب فشار نمی تواند از خطوط AA و BB فراتر رود



تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ



$$\sigma_r = \frac{h}{\pi r}\left(\frac{x\cos B + yg\sin B}{(\cos^2 B - g\sin^2 B)^2 + h^2\sin^2 B\cos^2 B}\right)$$

$$g = \sqrt{1 + \frac{E}{(1-v^2)K_n S}}$$

$$h = \sqrt{\frac{E}{1-v^2}\left(\frac{2(1+v)}{E} + \frac{1}{K_s S}\right) + 2\left(g - \frac{v}{1-v}\right)}$$

α زاویه درزه با قائم

$$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0$$

$$B = \theta - \alpha$$

K_n و K_s سختی نرمال و برشی درزه (FL^{-3})

S فاصله متوسط بین درزه ها

Dr. Hasan Ghasemzadeh 19

تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ

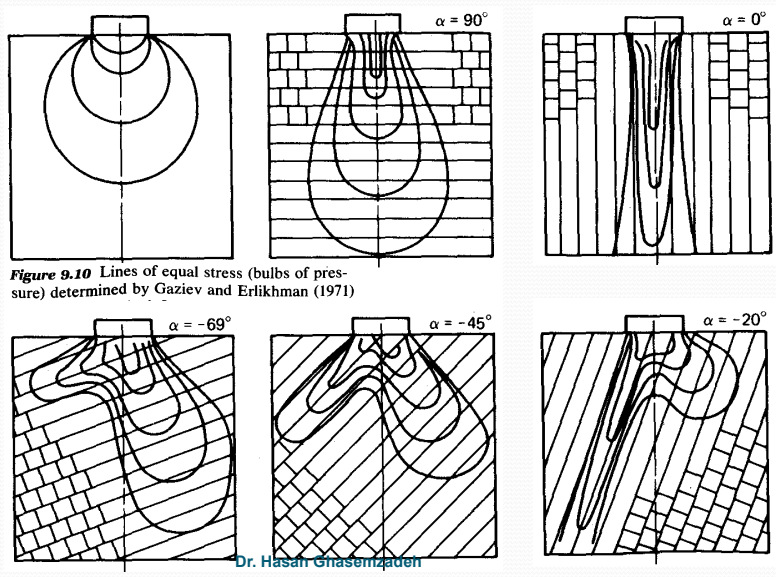


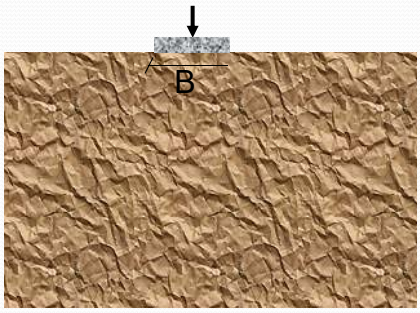
Figure 9.10 Lines of equal stress (bulbs of pressure) determined by Gaziev and Erlikhman (1971)

Dr. Hasan Ghasemzadeh 20

ظرفیت باربری مجاز پی های متکی بر سنگ

ظرفیت باربری سنگ بدون درزه

$$q_F = q_u(N_\varphi + 1)$$



$$N_\varphi = \tan^2(45 + \varphi/2)$$

q_u : مقاومت فشاری تک محوری

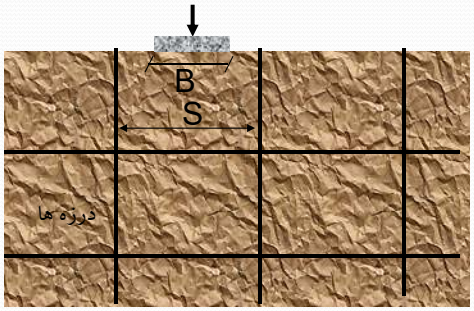
φ : زاویه اصطکاک داخلی سنگ

ظرفیت باربری مجاز پی های متکی بر سنگ

ظرفیت باربری سنگ درزه دار

$$q_F = q_u\left\{\frac{1}{N_\varphi - 1}\left[N_\varphi\left(\frac{S}{B}\right)^{(N_\varphi - 1)/N_\varphi} - 1\right]\right\}$$

با مقایسه این رابطه و رابط قبل مشاهده می شود ظرفیت باربری در محدوده $1 \langle S/B \langle 5$ کاهش می یابد .



$$q_a = \frac{q_F}{5}$$

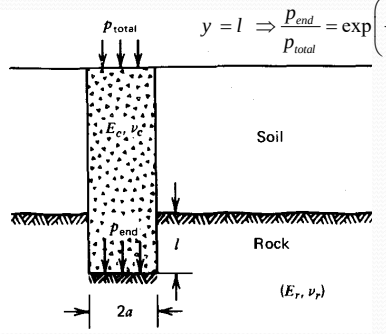
تنش زیر پی عمیق متکی بر سنگ

تنش قایم در عمق y سنگ

$$\sigma_y = p_{total} \exp\left(\frac{-2y}{a}\left(\frac{2\nu_c \mu}{(1-\nu_c)+(1+\nu_r)E_c/E_r}\right)\right)$$

اصطکاک جانبی پایه با خاک صفر بوده و با سنگ برابر μ است

$$y = l \Rightarrow \frac{p_{end}}{p_{total}} = \exp\left(\frac{-2l}{a}\left(\frac{2\nu_c \mu}{(1-\nu_c)+(1+\nu_r)E_c/E_r}\right)\right)$$



تنش برشی در جوانب

$$\tau = \left(1 - \frac{p_{end}}{p_{total}}\right)\frac{F_{total}}{2\pi a l}$$

مقاومت

$$\tau_{bond} = \alpha S_u \quad or \quad \tau_{bond} = \frac{\alpha q_u}{2\tan(45+\varphi/2)}$$

$$\alpha = 0.3 \sim 0.9$$

q_u مقاومت تک محوری سنگ یا بتن هر کدام کمتر باشد

یک تقریب محافظه کارانه $\tau_{bond} = 0.05 q_u$

در طراحی $\tau \le \tau_{bond}$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 23

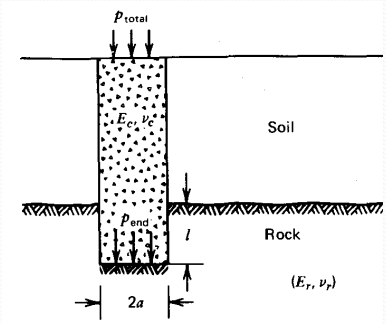
نشست پی عمیق متکی بر سنگ

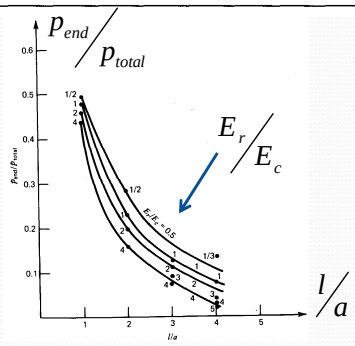
$$\omega_{base} = \frac{(\pi/2)p_{end}(1-\nu_r^2)a}{E_r n}$$

نشست انتهایی شمع دایروی بر بستر سنگی

Depth Factor n

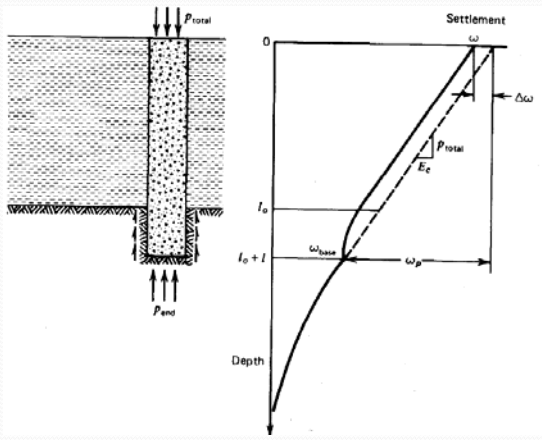
l/a	0	2	4	6	8	14
n: $\nu_r = 0$	1	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4
n: $\nu_r = 0.3$	1	1.6	1.8	1.8	1.9	2.0
n: $\nu_r = 0.5$	1	1.4	1.6	1.6	1.7	1.8





Dr. Hasan Ghasemzadeh 24

نشست پی عمیق متکی بر سنگ



$$\omega = \omega_{base} + \omega_p - \Delta\omega$$

$$\omega_p = \frac{p_{total}(l_0 + l)}{E_c}$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{E_c}\int_{l_0}^{l_0+l}(p_{total} - \sigma_y)dy$$

تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ

روش های عددی در مکانیک سنگ

روش های عددی برای مدل سازی مکانیک سنگ به سه دسته مدل سازی پیوسته و مدل سازی گسسته و مدل سازی ترکیبی تقسیم می شوند.

مدل سازی پیوسته

- روش تفاضل محدود — **FDM Difference Finite Method**
- روش اجزاء محدود — **FEM Finite Element Method**
- روش المان های مرزی — **BEM Boundary Element Method**

تنش و تغییر مکان زیر پی های متکی بر سنگ

روش های عددی در مکانیک سنگ

مدل سازی گسسته

- روش المانهای مجزا **Discrete Element Method** :**DEM**
- روش تغییر مکانهای محدود **Displacement method** :**DDA**

Dr. Hasan Ghasemzadeh 27

Dr. Hasan Ghasemzadeh 28

ظرفیت باربری مطابق توصیه AASHTO

TYPE OF BEARING MATERIAL	CONSISTENCY IN PLACE	Bearing Resistance Mpa AASHTO 2006
Massive crystalline igneous and metamorphic rock: granite, diorite, basalt, gneiss, thoroughly cemented conglomerate (sound condition allows minor cracks)	Very hard, sound rock	7.7
Foliated metamorphic rock: slate, schist (sound condition allows minor cracks)	Hard sound rock	3.3
Sedimentary rock: hard cemented shales, siltstone, sandstone, limestone without cavities	Hard sound rock	1.9
Weathered or broken bedrock of any kind, except highly argillaceous rock (shale)	Medium hard rock	1
Compaction shale or other highly argillaceous rock in sound condition	Medium hard rock	1

ظرفیت باربری فوق برای نشست نیم تا یک اینچ است و فرض اینست که مد گسیختگی برشی حاکم نیست

Dr. Hasan Ghasemzadeh 29

ظرفیت باربری مطابق توصیه AASHTO

مشخصات سنگ

$$C = 5 \times RMR \quad kPa$$

$$\varphi = 5 + 0.5RMR$$

Serafim and Pereira, 1983; Bieniawski, 1989

Design Recommendation for RMR < 50

$$q_n = c\,N_{cm} + \gamma D_f N_{qm}\,C_{wq} + 0.5\,\gamma B\,N_{\gamma m}\,C_{w\gamma}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 30

ظرفیت باربری مطابق توصیه AASHTO

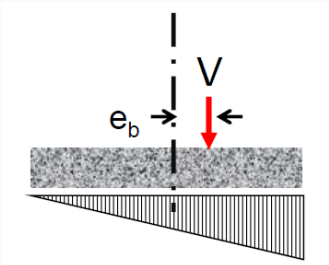
مشخصات سنگ

$$C = 5 \times RMR \quad kPa$$

$$\varphi = 5 + 0.5RMR$$

Serafim and Pereira, 1983;
Bieniawski, 1989

$$q_n = \left[\sqrt{s} + \sqrt{\left(m\sqrt{s} + s\right)}\right] q_u$$



$$\phi q_n > \gamma \frac{V}{B}\left(1 + \frac{6e}{B}\right) \quad LRFD\ Method$$

$$\gamma = 1.4 \quad Average\ Load\ Factor$$

$$\phi = 0.45 - 0.50 \quad \text{Resistance}\ Facor$$

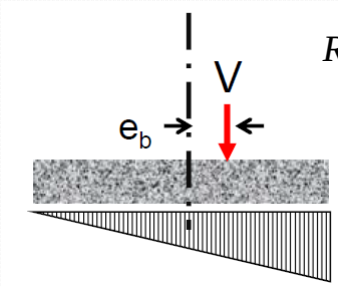
$$FS = \frac{\gamma}{\phi} = 2.8\ to\ 3.1$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 31

ظرفیت باربری مطابق توصیه AASHTO

ظرفیت باربری برای RMR > 50

$$q_n = \left[\sqrt{s} + \sqrt{\left(m\sqrt{s} + s\right)}\right] q_u$$



$$RMR = 100\ Best\ Case \quad s = 1 \quad m = 25$$

$$q_n \approx 6q_u$$

$$RMR = 3 \quad s \approx 1 \times 10^{-7} \quad m = 0.007$$

$$q_n \approx 0.0025q_u$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 32

ظرفیت باربری مطابق توصیه AASHTO

ضرایب m,s

Rock Quality	Constants	Rock Type A = Carbonate rocks with well developed crystal cleavage—*dolomite, limestone and marble* B = Lithified argrillaceous rocks—*mudstone, siltstone, shale and slate (normal to cleavage)* C = Arenaceous rocks with strong crystals and poorly developed crystal cleavage—*sandstone and quartzite* D = Fine grained polymineralic igneous crystalline rocks—*andesite, dolerite, diabase and rhyolite* E = Coarse grained polymineralic igneous & metamorphic crystalline rocks—*amphibolite, gabbro gneiss, granite, norite, quartz-diorite*				
		A	B	C	D	E
INTACT ROCK SAMPLES Laboratory size specimens free from discontinuities CSIR rating: *RMR* = 100	*m* *s*	7.00 1.00	10.00 1.00	15.00 1.00	17.00 1.00	25.00 1.00
VERY GOOD QUALITY ROCK MASS Tightly interlocking undisturbed rock with unweathered joints at 3–10 ft. CSIR rating: *RMR* = 85	*m* *s*	2.40 0.082	3.43 0.082	5.14 0.082	5.82 0.082	8.567 0.082
GOOD QUALITY ROCK MASS Fresh to slightly weathered rock, slightly disturbed with joints at 3–10 ft. CSIR rating: *RMR* = 65	*m* *s*	0.575 0.00293	0.821 0.00293	1.231 0.00293	1.395 0.00293	2.052 0.00293
FAIR QUALITY ROCK MASS Several sets of moderately weathered joints spaced at 1–3 ft. CSIR rating: *RMR* = 44	*m* *s*	0.128 0.00009	0.183 0.00009	0.275 0.00009	0.311 0.00009	0.458 0.00009
POOR QUALITY ROCK MASS Numerous weathered joints at 2 to 12 in.; some gouge. Clean compacted waste rock. CSIR rating: *RMR* = 23	*m* *s*	0.029 3×10^{-6}	0.041 3×10^{-6}	0.061 3×10^{-6}	0.069 3×10^{-6}	0.102 3×10^{-6}
VERY POOR QUALITY ROCK MASS Numerous heavily weathered joints spaced < 2 in. with gouge. Waste rock with fines. CSIR rating: *RMR* = 3	*m* *s*	0.007 1×10^{-7}	0.010 1×10^{-7}	0.015 1×10^{-7}	0.017 1×10^{-7}	0.025 1×10^{-7}

Dr. Hasan Ghasemzadeh 33

سختی درزه‌ها

سختی نرمال درزه

$$K_n = \frac{\delta\sigma_n}{\delta V}$$

$\delta\sigma_n$ تنش عمودی

δV جابجایی عمودی

$$FS = \frac{\gamma}{\phi} = 2.8 \; to \; 3.1$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 34