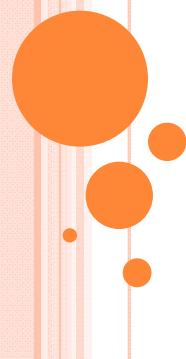


# ROCK MECHANICS

کاربرد در تونل سازی

Hasan Ghasemzadeh



## فهرست عناوین و فصول

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

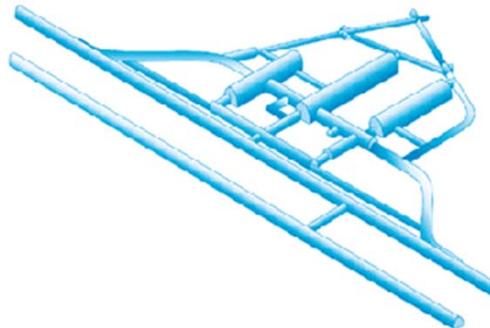
- ۱- پایداری شیروانی سنگی - ریزش سنگ
- ۲- **تونل**
- ۳- پی بر بستر سنگی

Dr. Hasan Ghasemzadeh



## تنش در اطراف تونل

- سنگ با رفتار الاستیک: تنش ها کمتر از نصف مقاومت فشاری سنگ و ترک ها با فواصل زیاد و دهانه های کوچک
- تونل طویل داخل سنگ: تحلیل دو بعدی (از اثرات بعد سوم صرف نظر می شود - کرنش سطح)



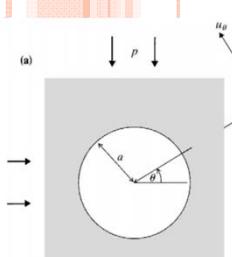
در شرایط کرنش سطح برای یک جسم همگن، همسانگرد، پیوسته و الاستیک خطی از روابط زیر می نواند  
تنش در نقطه  $(r, \theta)$  را بدست آورد

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۳

## تنش در اطراف تونل

Kirsch (1898)



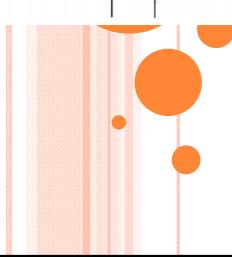
$$\sigma_{rr} = \frac{p}{2} \left[ (1+K) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-K) \left( 1 - 4\frac{a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p}{2} \left[ (1+K) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-K) \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{p}{2} \left[ (1-K) \left( 1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$

$$u_r = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[ (1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right]$$

$$u_\theta = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[ (1-K) \left\{ 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right]$$



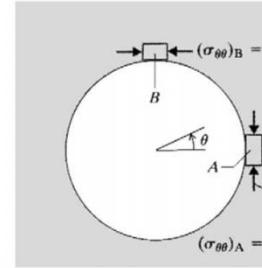
## تنش در اطراف تونل

$$r = a$$

$$\sigma_{\theta\theta} = p[(1 + K) + 2(1 - K)\cos 2\theta]$$

$$\sigma_{rr} = 0$$

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



$$\text{at point A: } \theta = 0, \quad (\sigma_{\theta\theta})_A = \sigma_A = p(3 - K)$$

$$\text{at point B: } \theta = \frac{\pi}{2}, \quad (\sigma_{\theta\theta})_B = \sigma_B = p(3K - 1)$$

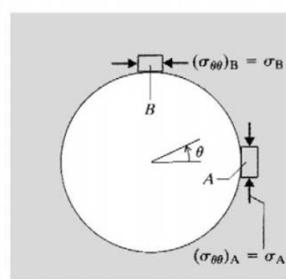
$\theta = 0$ , and  $r$  large

$$\sigma_{rr} = Kp, \quad \sigma_{\theta\theta} = p, \quad \sigma_{r\theta} = 0$$

## تنش در اطراف تونل

Kirsch (1898)

for  $K = 0$



$$\sigma_{rr} = \frac{p}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{p}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{p}{2} \left( 1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta$$

$$\sigma_{\theta\theta,\max} = \sigma_{\theta\theta}(a, \pi/2) = 3p$$

$$\sigma_{\theta\theta,\min} = \sigma_{\theta\theta}(a, 0) = -p$$

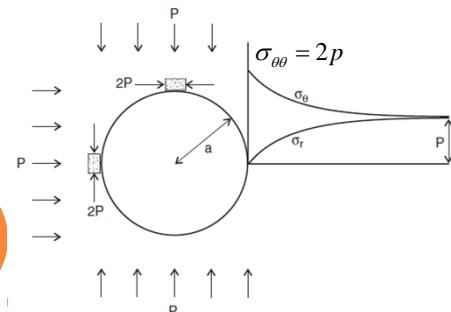
$$\text{at point A: } \theta = 0, \quad (\sigma_{\theta\theta})_A = \sigma_A = p(3 - K)$$

$$\text{at point B: } \theta = \frac{\pi}{2}, \quad (\sigma_{\theta\theta})_B = \sigma_B = p(3K - 1)$$

for any value of  $K > 0$ , the sidewall stress is less than  $3p$ , and the crown stress is greater than  $-p$

## تنش در اطراف تونل

hydrostatic stress field ( $K=1$ )



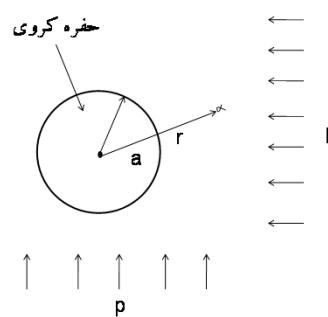
$$\sigma_r = p \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = p \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$$

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

## تنش در اطراف حفره کروی

$$u = \frac{pa^3}{4r^2 G}$$

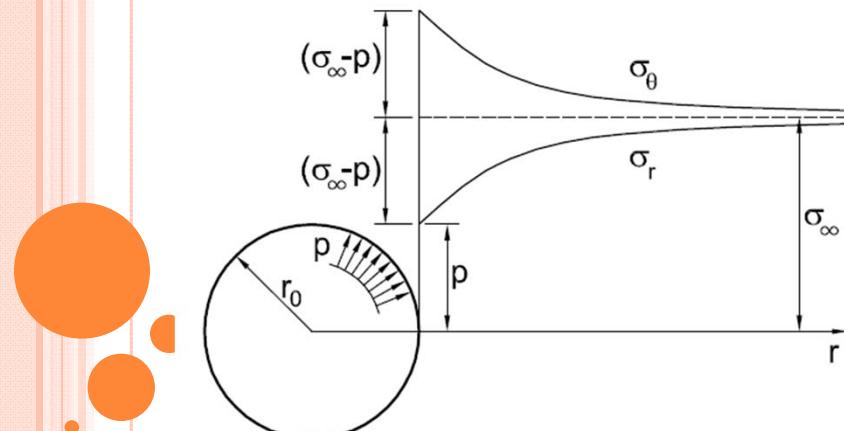


Dr. Hasan Ghasemzadeh

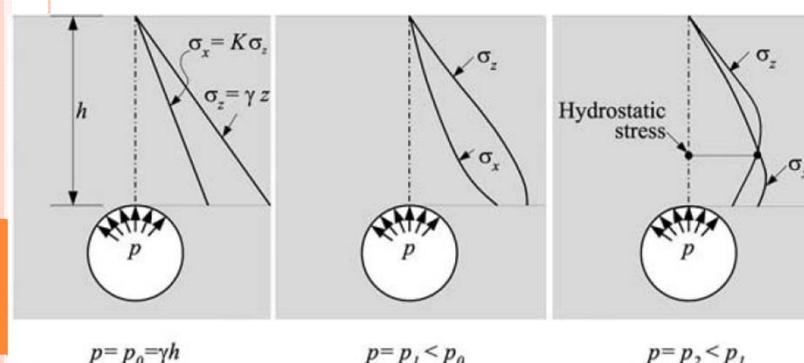
سطح حفره کروی نصف نگیره ای واقع بر تونل دایره ای شکل را همان شعاع می باشد.  
برای مقاطعی که دایره ای نیستند تمرکز تنش در گوشه های با شعاع خلی کم ایجاد خواهد شد برای نمونه تمرکز  
تنش در یک تونل با مقاطع مختلف که تنها تحت اثر تنش اقتم می باشد به شرح زیر است :



## تنش در اطراف تونل



## تنش در اطراف تونل



## تنش در اطراف تونل

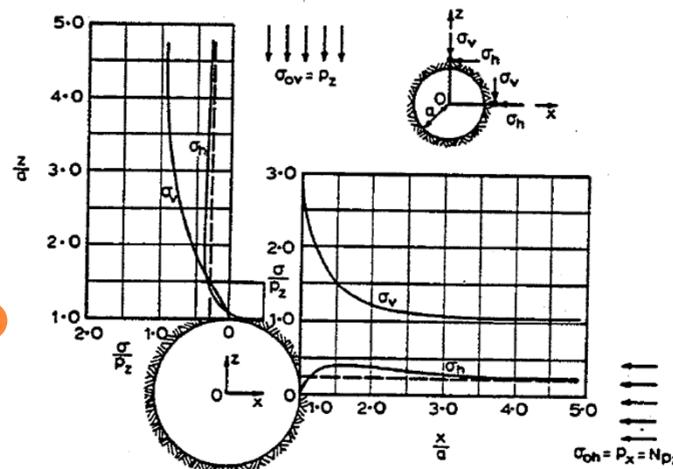


FIG.11.2 Stress distribution around a circular tunnel.  $N=0.25$ . (Terzaghi and Richart, 1952).

## تنش در اطراف تونل

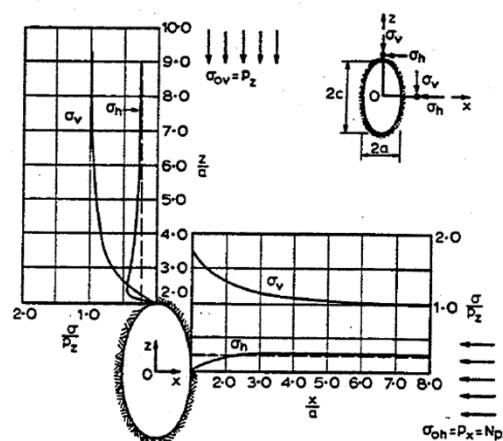
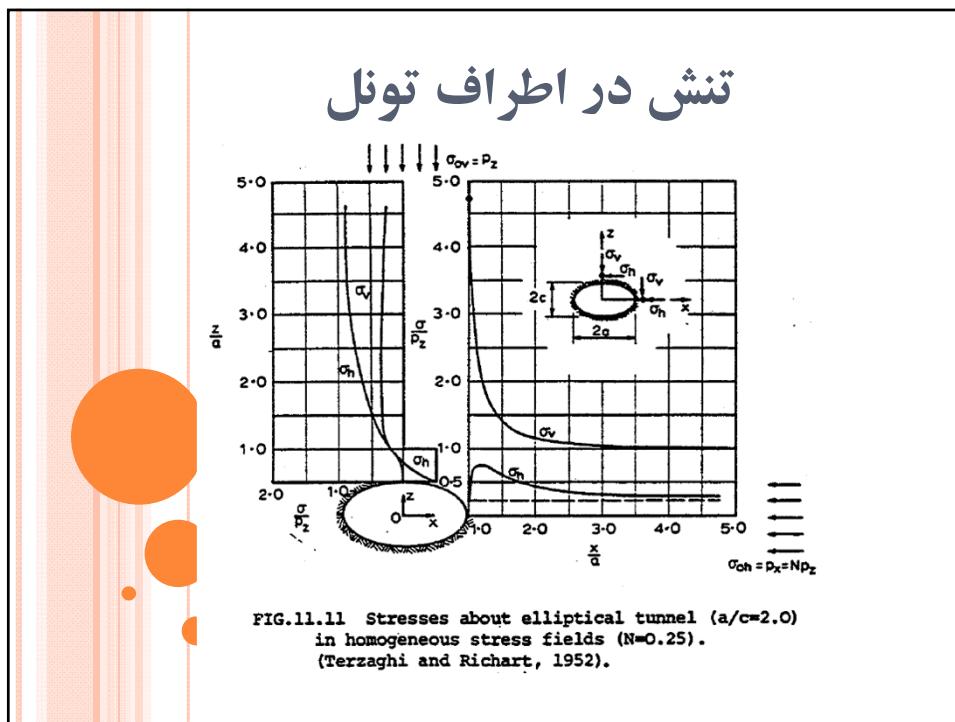
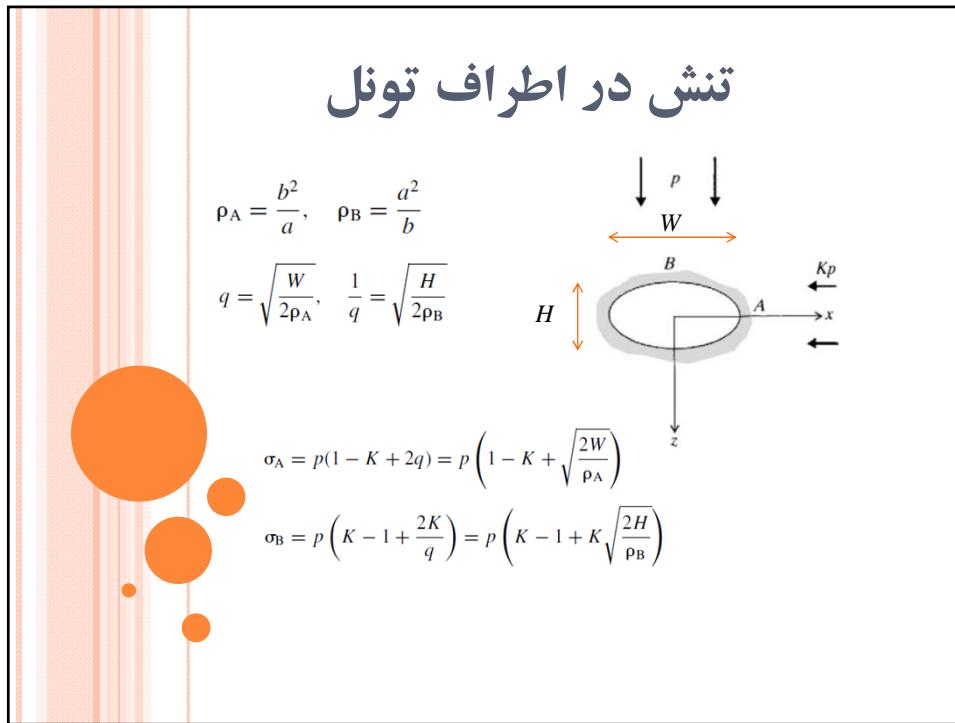
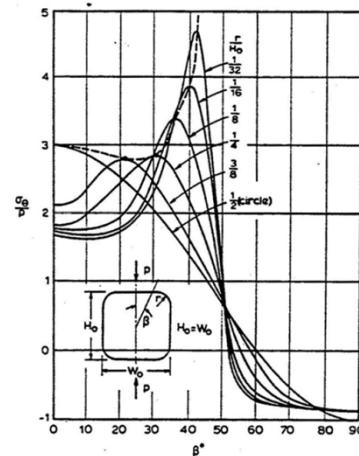


FIG.11.9 Stresses about elliptical tunnel ( $a/c=1/2$ ) in homogeneous stress fields ( $N=0.25$ ). (Terzaghi and Richart, 1952).



## تنش در اطراف تونل



3.11.13 Boundary stress around square opening with rounded corners (Obert and Duvall, 1967).

## تنش در اطراف تونل

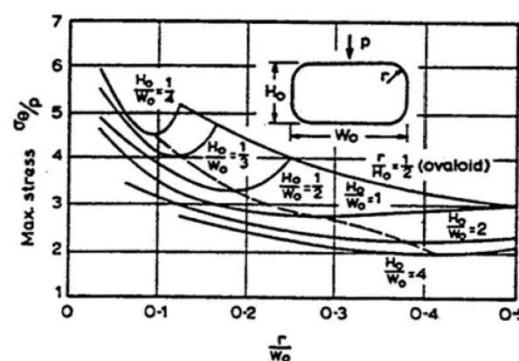


FIG.11.14 Maximum stress for rectangular openings with rounded corners (Heller, Brock and Bart, 1958).

## تنش در اطراف تونل

برای مقاطعی که دایره‌ای نیستند تمرکز تنش در گوشه‌های با شاع خیلی کم ایجاد خواهد شد

شکل تونل	نسبت ارتفاع به عرض	تمرکز تنش	جوانب
بیضی	$\frac{1}{2}$	-1.0	5.0
بیضوی مثل تخم مرغ	$\frac{1}{2}$	-0.9	3.4
مستطیل با گوشه گرد	$\frac{1}{2}$	-0.9	2.5
دایره	1	-1	3
بیضی	2	-1.0	2.0
بیضوی	2	-0.9	1.6
مستطیل	2	-1	1.7

تمرکز تنش در یک تونل با مقاطع مختلف که تنها تحت اثر تنش قائم می‌باشد

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۱۷

## تنش در اطراف تونل-اندرکنش



Dr. Hasan Ghasemzadeh

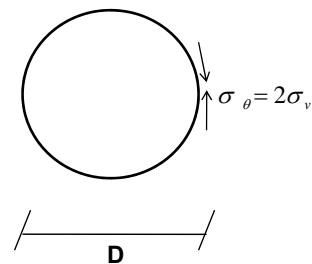
$$l < 2(D_1 + D_2) \Rightarrow \text{اندرکنش داریم}$$

$$l > 2(D_1 + D_2) \Rightarrow \text{از اندرکنش صرفنظر می‌شود}$$

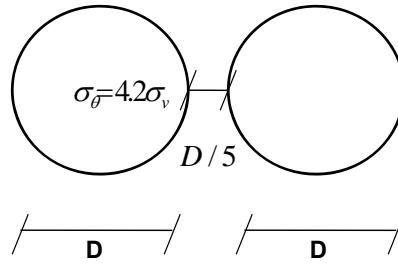
۱۸

## تنش در اطراف تونل-اندرکنش

یک تونل



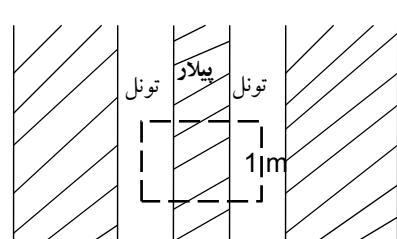
دو تونل



Dr. Hasan Ghasemzadeh

۱۹

## تنش در اطراف تونل-اندرکنش



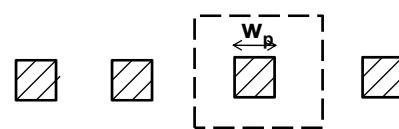
$$\bar{\sigma}_v = \frac{A_t}{A_p} \sigma_v$$

$A_t$  : مساحت نگهداری شده توسط یک پیلارد  
 $A_p$  : مساحت یک پیلارد  
 $\sigma_v$  : تنش قائم در سقف بازشدگی

Dr. Hasan Ghasemzadeh



$$A_t = (w_0 + w_p)^2$$



$$A_p = w_p^2$$

۲۰

## تنش در اطراف تونل-اندرکنش

مقاومت فشاری مجاز پیلار برابر با مقاومت تک محوری سنگ نیست  
 زیرا به دلیل اثرات شکل و اندازه مقاومت کمتری در پیلار خواهیم داشت

### مقاومت مجاز فشار پیلار مستطیلی

$$\sigma_p = (0.875 + 0.25 w/h)(h/h_{crit})^{1/2} q_u$$

$\sigma_p$  مقاومت فشاری مجاز پیلار

$q_u$  مقاومت تک محوری سنگ

$w$  عرض پیلار

$h$  ارتفاع پیلار

$h_{crit}$  ارتفاع که پس از آن کاهش مقاومت ندازیم

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۲۱

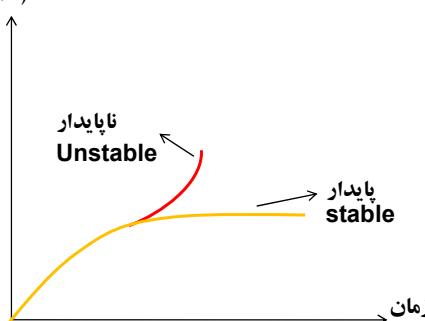
عمولاآ در حفاری معادن زیرزمینی پایداری سقف عرض بازشدگی ها را می دهد و فاصله بین بازشدگی ها از روی مقاومت پیلار تعیین می شود

## تنش در اطراف تونل-رفتار پلاستیک

تغییر مکان دیوارها  
(همگرایی)

هنگامی که تنش های در تونل بیشتر از نصف مقاومت  
فشاری تونل سنگ باشد به تدریج ترک ها شروع به  
گسترش می نماید و تغییر مکان ها و تونل افزایش می یابد

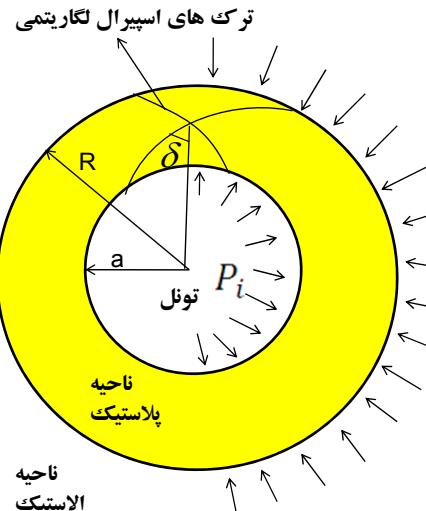
Dr. Hasan Ghasemzadeh



در این حالت یک ناحیه پلاستیک دور  
تونل تشکیل می شود که ما بررسی آن  
می توان پایداری یا ناپایداری تونل را  
تعیین نمود

۲۲

## تنش در اطراف تونل-رفتار پلاستیک



در یک تونل با تقارن محوری Bray فرض نمود ترک های ناحیه پلاستیک یک اسپیرال لگاریتمی باشد این فرض برای سنگ های رس و شل قابل قبول است ولی برای سنگ های لایه ای قابل قبول نیست

Dr. Hasan Ghasemzadeh

زاویه بین اسپیرال و شعاع  
تونل می باشد که در بدترین  
حالت برابر است با (کمترین  
 مقاومت) :

$$\delta = 45 + \varphi / 2$$

مقاومت برشی ترک ها در ناحیه پلاستیک

۲۳

$$\tau_p = s_j + \sigma \tan \varphi_j$$

## تنش در اطراف تونل-رفتار پلاستیک

شعاع ناحیه پلاستیک

Dr. Hasan Ghasemzadeh

$$R = a \left( \frac{2P_i - q_u + (1 + \tan^2(45 + \varphi_j / 2))s_j \cot \varphi_j}{(1 + \tan^2(45 + \varphi_j / 2))(P_i + s_j \cot \varphi_j)} \right)^{1/Q}$$

$$Q = \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \varphi_j)} - 1$$

$$P = \sigma_v = \sigma_h$$

فشار همه جانبه اولیه توده سنگ

$$q_u$$

مقاومت فشاری تک محوری

$$P_i$$

فشار داخلی تونل ناشی از نگهدارنده ها

$$\varphi$$

زاویه اصطکاک داخلي سنگ بکر

$$\delta = 45 + \varphi / 2$$

۲۴

Bray

## تنش در اطراف تونل-رفتار پلاستیک

$$\sigma_r = p - \frac{b}{r^2}$$

در داخل ناحیه الاستیک

$$\sigma_\theta = p + \frac{b}{r^2}$$

$$b = \left( \frac{[\tan^2(45 + \varphi/2) - 1]p + q_u}{\tan^2(45 + \varphi/2) + 1} \right) R^2$$

در داخل ناحیه پلاستیک

$$\sigma_r = (p_i s_j \cot \varphi_j) (r/a)^Q - s_j \cot \varphi_j$$

$$\sigma_\theta = (p_i + s \cot \varphi_j) \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \varphi_j)} (r/a)^\varphi - s_j \cot \varphi_j$$

$$u_r = \frac{1-v}{E} \left( p_i \frac{r^{Q+1}}{a^Q} - p_r \right) + t/r \quad \text{تغییر مکان بسمت داخل تونل برابر است با}$$

$$t = \frac{1-v}{E} R^2 \left[ (p + s_j \cot \varphi_j) - (p_i + s_j \cot \varphi_j) (R/a)^Q \right] + \frac{1+v}{E} b \quad ۲۹$$

Bray

Dr. Hasan Ghasemzadeh

## تنش در اطراف تونل-رفتار پلاستیک

$$\varphi_j = 30^\circ$$

مثال

$$s_j = 0$$

$$\delta = 45$$

$$q_u = 1300 \text{ psi} \quad , \quad \varphi = 39.9^\circ \quad , \quad p = 4000 \text{ psi} \quad , \quad p_i = 40$$

$$\Rightarrow Q = \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \varphi_j)} - 1 = 2.73 \quad , \quad \Rightarrow \begin{cases} R = 3.47a \\ b = 33.73a^2 \end{cases}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

$$\begin{cases} \sigma_r = 40(r/a)^{2.73} \\ \sigma_\theta = 149(r/a)^{2.73} \end{cases} \quad \text{تنش در ناحیه پلاستیک}$$

$$\begin{cases} \sigma_r = 4000 - 33.732a^2/r^2 \\ \sigma_\theta = 4000 + 33.732a^2/r^2 \end{cases} \quad \text{تنش در ناحیه الاستیک}$$

۲۶

## تنش در اطراف توغل

روش دوم: تعیین ناحیه پلاستیک

هوک و براون با استفاده از معیار موهر- کولمب ناحیه پلاستیک را تعیین نمودند

Dr. Hasan Ghasemzadeh

معیار موهر- کولمب

$$\tau_p = s_i + \sigma \tan \varphi$$

$$\sigma_1 = \frac{2s_i \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\sigma_1 = q_u + k\sigma_3$$

$$q_u = 2s_i \tan(45 + \varphi/2)$$

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

۲۷

## تنش در اطراف توغل

در توغل دایره‌ای با شعاع  $r_0$  و تحت تنش هیدرولاستاتیک  $P_0$

$P_{cr}$  فشار بحرانی

$$P_{cr} = \frac{2P_0 - q_u}{1 + k}$$

$P_i < P_{cr} \Rightarrow$  گسیختگی داریم (پلاستیک)

$P_i > P_{cr} \Rightarrow$  گسیختگی نداریم (الاستیک)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

در حالت الاستیک تغییر مکان برابر است با

$$u_{ie} = \frac{r_0(1+\nu)}{E}(P_0 - P_i)$$

شعاع ناحیه پلاستیک

$$R = r_p = r_0 \left[ \frac{2P_0(k-1) + q_u}{(1+k)(k-1)P_i + q_u} \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

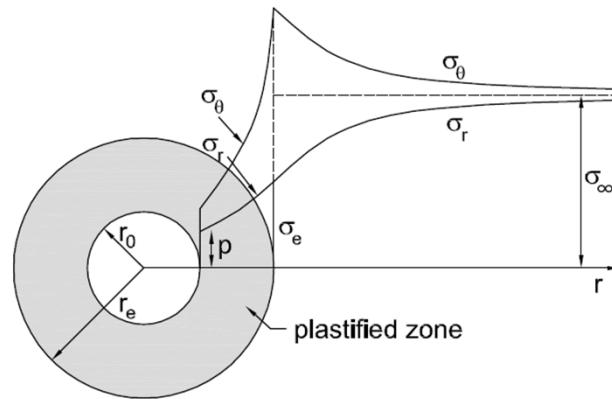
در حالت پلاستیک تغییر مکان شعاعی

رو به داخل توغل برابر است با

$$u_{ip} = \frac{r_0(1+\nu)}{E} \left[ 2(1-\nu)(P_0 - P_{cr}) \left( \frac{r_p}{r_p} \right)^2 - (1-2\nu)(P_0 - P_i) \right]$$

۲۸

## تنش در اطراف تونل



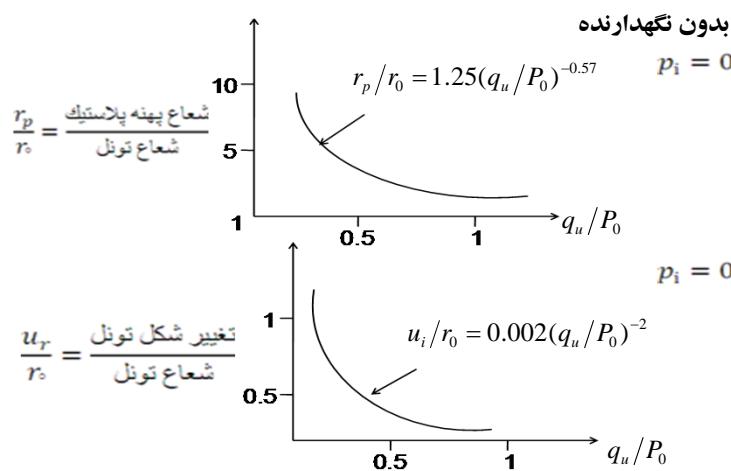
Dr. Hasan Ghasemzadeh

۲۹

## تنش در اطراف تونل

### روش سوم : استفاده از گرافها

جهت تعیین ناحیه پلاستیک و تغییر شکل تونل گرفتهای با استفاده از روش مونت کارلو تهیه شده است که می توان برای حدسهای اولیه از آنها استفاده نمود



Dr. Hasan Ghasemzadeh

۳۰

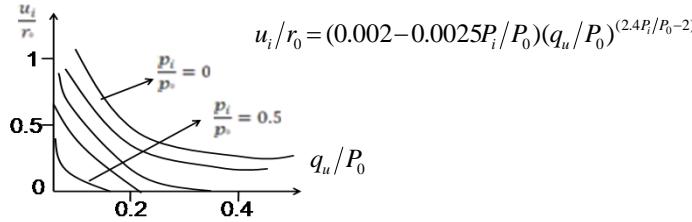
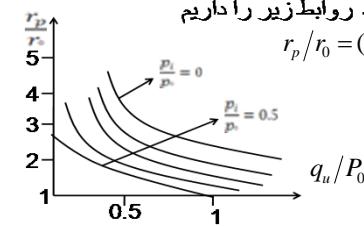
## تنش در اطراف تونل

### روش سوم: استفاده از گرافها

با نگهدارنده

هنگامیکه فشار نگهداری وجود دارد روابط زیر را داریم

$$r_p/r_0 = (1.25 - 0.625 P_i/P_0) (q_u/P_0)^{(P_i/P_0 - 0.57)}$$



Dr. Hasan Ghasemzadeh

۳۱

## تنش در اطراف تونل

### طراحی حایل (نگهدارنده های) تونل

- روش های تجربی (استفاده از طبقه بندی سنگ ها (RMR, Q, GSI)
- روش هایی که بارهای ناشی از زمین (تونه سنگی و خاکی) را صرف نظر از نوع و تغییر شکل های سازه حایل تعیین می کنند.

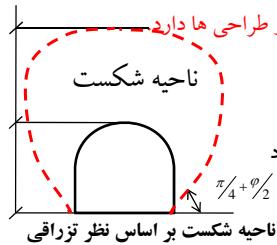
Dr. Hasan Ghasemzadeh

- گسترش ناحیه گسیختگی تعیین می شود

- با فرض استاتیکی بودن مسئله عکس العمل های مورد نیز جهت نگه داری ناحیه گسیختگی تعیین می شوند

- و نگهدارنده ها برای این نیروها طراحی می شوند

در این روش ها روش تعیین ناحیه گسیختگی تاثیر بزرگی در طراحی ها دارد



برای مثال تزرّقی سطح شکست حول یک تونل را به صورت زیر پیشنهاد کرده است

که البته بستگی به مقاومت مکانیکی زمین و پوشش تونل دارد

۳۲

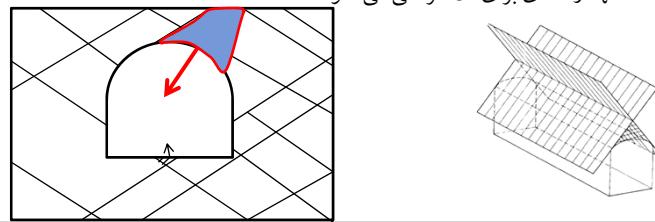
## تنش در اطراف تونل طراحی حایل تونل - روش دوم

کاربرد این روش

- برای سازه های نزدیک زمین یا تراشه های رویاز می توان از این متد استفاده کرد.
- در یک سیستم توده سنگ درزه دار می توان توده های گسیختگی را تعیین نمود و حایل ها را برای آن طراحی نمود.
- اگر تنش ها در سنگ باندازه کافی از مقاومت فشاری تک محوری سنگ کمتر باشد تغییر شکل های ایجاد شده در محیط بر اثر حفاری تونل بسیار کم می باشد. تغییر مکان هایی که سنگ می تواند بدهد مربوط به نایپوستگی توده سنگی است و بلوک های سنگی می توانند ریزش نمایند.
- با یک آنالیز سه بعدی می توان دسته درزه ها و جهت ها را پیدا نمود
- بزرگترین بلوک سنگی ناپایدار را که در حفاری ایجاد می شود یافت
- نگهدارنده ای برای آن طراحی می نمود.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

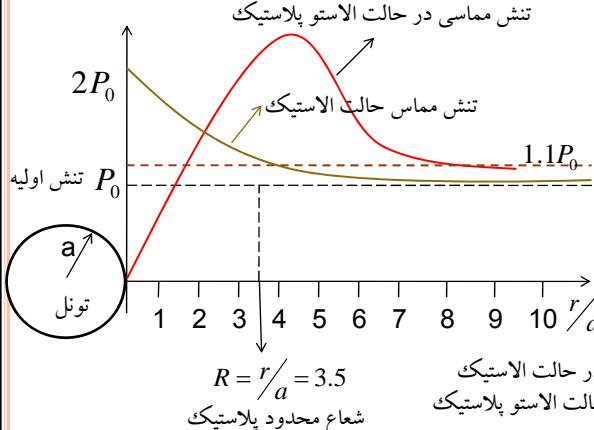
۳۳



## تنش در اطراف تونل طراحی حایل تونل - روش دوم

تشکیل ناحیه پلاستیک اطراف  
تونل سبب گسترش تاثیر تونل  
در محیط اطراف می شود

Dr. Hasan Ghasemzadeh



دو تونل مجاور هم ممکن است در حالت الاستیک  
اندر کنش نداشته باشند ولی در حالت الاستو پلاستیک  
اندر کنش داشته باشند.

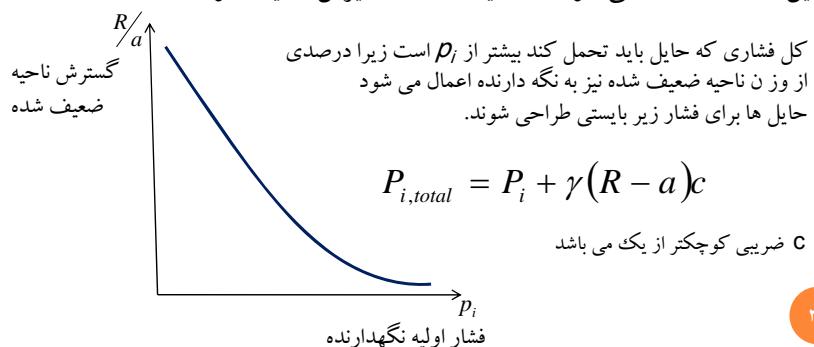
۳۴

## تنش در اطراف تونل

### طراحی حایل تونل - روش دوم

ناحیه پلاستیک ناحیه نسبتاً ضعیفی است و با ایجاد فشار داخلی در تونل ناشی از حایل ها می توان از مقدار این ناحیه کاست

(علاوه بر تنش های ایجاد شده در اثر حفر تونل ، تنش های ناشی از وزن نیز به این محدوده اعمال می شود و در نتیجه احتمال ریزش ناحیه وجوددارد)



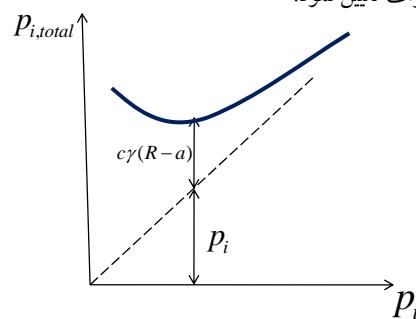
Dr. Hasan Ghasemzadeh

۳۵

## تنش در اطراف تونل

### طراحی حایل تونل - روش دوم

هر چه  $p_i$  بیشتر باشد درصد وزن توده ضعیف شده که حایل تحمل می کند کمتر می شود بنابراین می توان یک مقدار بهینه از روی گراف تعیین نمود.



Dr. Hasan Ghasemzadeh

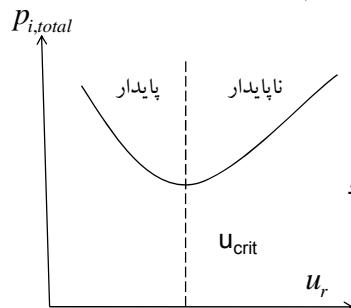
۳۶

## تنش در اطراف تونل

### طراحی حایل تونل - روش دوم

با افزایش  $R/a$  مقدار تغییر مکان دیواره تونل افزایش می یابد

بنابراین برای تغییر مکان نیز از روی گراف می توان مقدار مینیمم را بدست آورد



اگر حایل ها طوری طراحی می شوند که  $U < U_{crit}$  وضعیت پایداری است

$U > U_{crit}$  وضعیت ناپایدار است

چرا که با افزایش تغییر مکان مقدار  $P_i,total$  بیشتری مورد نیاز است اگر شب قسمت صودی منحنی از شب منحنی سختی حایل ها بیشتر باشد نتیجتاً تونل ریزش خواهد نمود لذا بهتر است حایل ها برای  $U < U_{crit}$  طراحی شود.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۳۷

## تنش در اطراف تونل

### طراحی حایل تونل - روش سوم

۳- روش هایی که بارهای ناشی از ناحیه های گسیختگی را به عنوان ورودی می گیرند ولی سختی و تغییر مکان حایل ها و عکس العمل های زمین را نیز در نظر می گیرند. در حقیقت تکمیل شده روش های سری دوم هستند

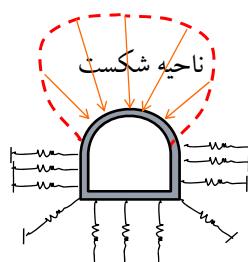
یکی از این روش ها روش عکس العمل های هیبراستاتیکی می باشد. در این روش سازه نگه دارنده به صورت المان های سازه ای و عکس العمل های به صورت یک سری فندر نظر گرفته می شوند. بارهای روی سازه از ناحیه گسیختگی و عکس العمل های زمین جهت حفظ تعادل حایل ها در این روش بدست می آیند.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

گرچه ابهاماتی در تعیین ناحیه گسیختگی و ناحیه عکس العمل ها وجود دارد این روش زیاد به کار گرفته شده است.

تعیین سختی فنر کار حساسی می باشد این روش در تونل های کم عمق زیاد به کار می رود زیرا در این حالت تعیین ناحیه گسیختگی راحت می باشد.

۳۸



## تنش در اطراف تونل طراحی حایل تونل - روش چهارم

۴- روش های جدید که اندرکنش کامل زمین - حایل را در نظر می گیرند.

در این روش ها با استفاده از روش المان محدود یا تفاوت محدود یا روش المان های مجزا زمین و نگهدارنده به صورت همزمان مدل می شوند و معمولاً مدل ها سه بعدی هستند

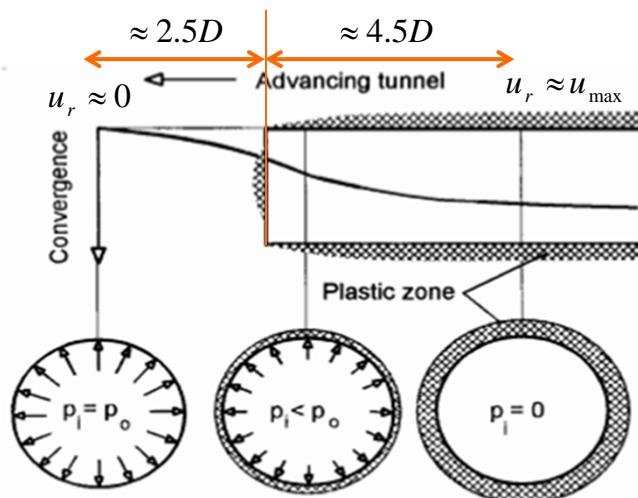
این روش ها می توانند در بر دارنده موارد ذیل باشد:  
 سازه نگهدارنده و معادلات ساختاری برای این سازه ها  
 توده اطراف تونل و معادلات ساختاری مربوطه  
 فاز حفاری تونل و نصب حایل ها

مزایای این روش غیر قابل انکار بوده و پیشرفت چشمگیری دارد.  
 از مشکلات این روش می توان عدم قطعیت در تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی زمین را نام برد.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۳۹

## کرنش در اطراف تونل



Dr. Hasan Ghasemzadeh

۴۰

# طراحی تونل

طراحی حاصل تونل - روش چهارم

## روش همگرایی - تحديد Convergence – Confinement

مرحله: طراحی اصلی

سال پیشنهاد: ۱۹۸۰

نوع محیط: پیوسته، هموژن و ایزوتروپ

محیط تنش: یکنواخت، هیدرواستاتیک

قطعه تونل: دایره ای

نوع رفتار زمین: الاستو پلاستیک

عمق: نیمه عمیق و عمیق

همگرایی تونل در راستای یک خط مفروض: تغییر مکان نسبی قطری دو نقطه مقابل هم از این خط که روی دیواره های تونل قرار دارد.

همگرایی به دلیل کاهش فشار محصور کننده (رشار تحديد) تونل به هنگام حفاری و پیشروی تونل ایجاد می شود و به عوامل زیر بستگی دارد:

۴۱

## روش همگرایی - تحديد Convergence – Confinement

همگرایی به عوامل زیر بستگی دارد:

- فاصله مقطع اندازه گیری تا پیشانی کار (X)

- زمان سپری شده بعد از آنکه پیشانی کار از مقطع مجبور عبور کرده است (t)

- طول مهار نشده از پیشانی کار (d)

- سختی حاصل ها ( $K_s$ )

$$C = C(x(t), t, d, k_s)$$

همگرایی ها معمولاً بر حسب فاصله تا پیشانی کار و زمان رسم می شوند با نصب ادوات اندازه گیری معمول همگرایی در پشت و روی پیشانی کار را می توان اندازه گیری نمود.

این روش برخلاف دیگر روش‌های تحلیلی می تواند مسائل زیر را در نظر بگیرد:

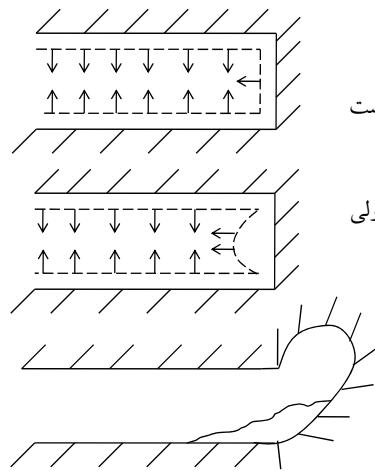
- اندرکنش توده زمین و حائل بندی

- نحوه و زمان اجرای حائل بندی

۴۲

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

برای تونل سه حالت متصور است.



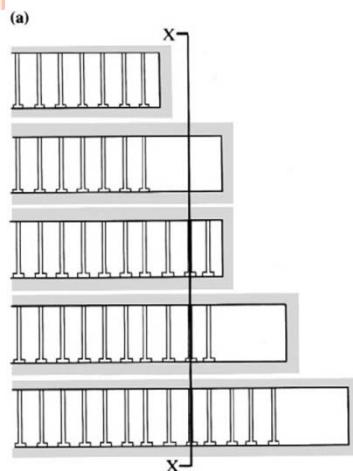
۱- جبهه کار با حرکت اندک بسمت داخل تونل پایدار است

۲- جبهه کار حرکت نسبتاً زیادی بسمت داخل تونل دارد و لی پایدار است

۳- جبهه کار ریزشی است و پایدار نمی باشد

برای دو حالت اول روش همگایی - تحدید قابل استفاده است و در مورد سوم بایستی جبهه کار نیز آنالیز شود و سیستم نگهداری آن تعیین شود که نیاز به آنالیز سه بعدی می باشد.

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement



فشار محدود کننده (تحدید) از طریق  
حایل ها به دیواره ها سقف و کف تونل  
وارد می شود پس از حفاری اولیه  
مقداری تغیر مکان داریم



اگر در این حالت حایل ها را نصب  
نموده و به حفاری ادامه دهیم تغیر مکان  
بیشتری رخ می دهد. و نتیجتاً حایل ها  
تحت فشار قرار می گیرند



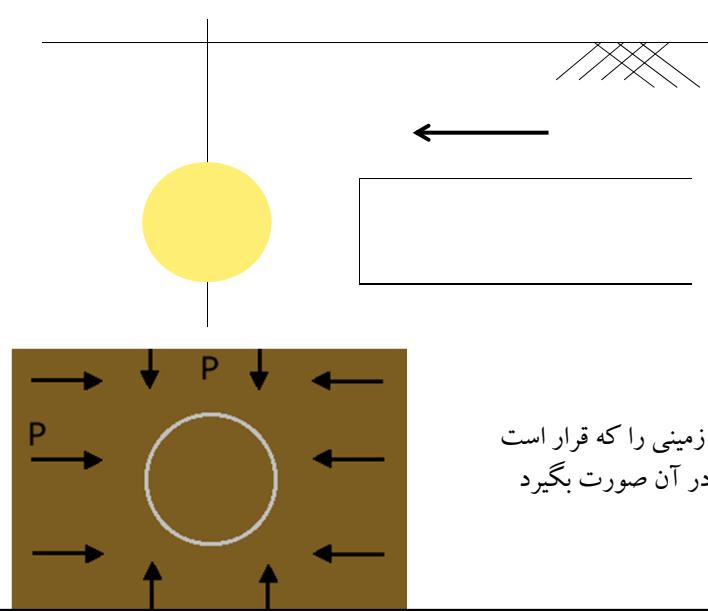
فشار وارد شده به حایل ها به طول  
معکوس به جداره های تونل وارد می  
شود و  $p_i$  نام دارد.



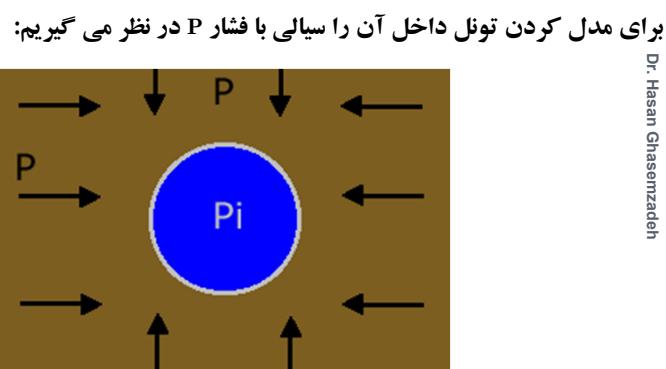
section X-X

٤٤

## روش همگایی - تحدید

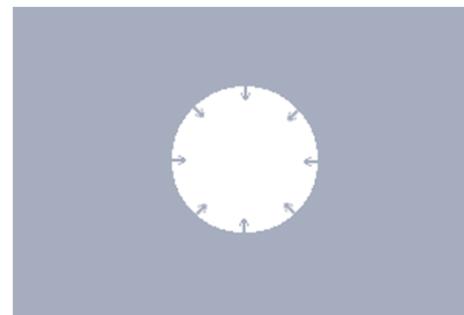


## روش همگایی - تحدید



## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

نودیک شدن و عبور مقطع حفاری تونل از این مقطع را می‌توان با کاهش فشار درون این مقطع مدل نمود:

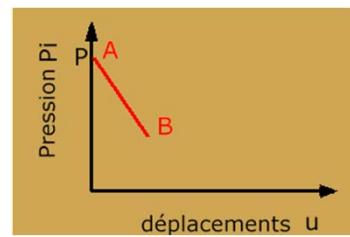


Dr. Hasan Ghasemzadeh

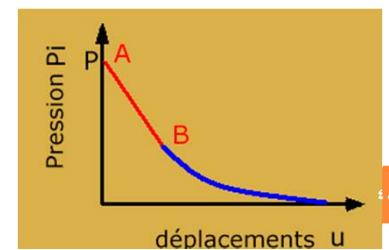
۴۷

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

این کاهش فشار باعث تغییر شکل شعاعی  $U$  در جداره میگردد که در ابتدا نسبت به  $P$  خطی و با شروع تغییر شکل‌های خمیری از حالت خطی خارج می‌شود:



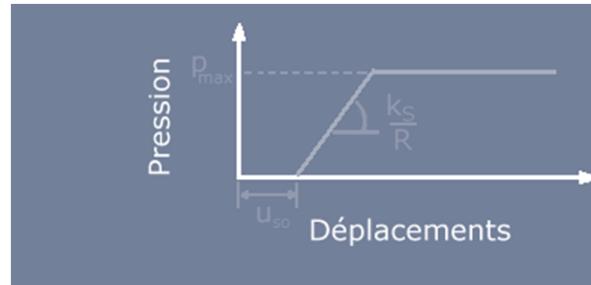
Dr. Hasan Ghasemzadeh



۴۸

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

به همین ترتیب فشار وارد بر حائل بندی نیز باعث تغییر شکل شعاعی آن می شود:

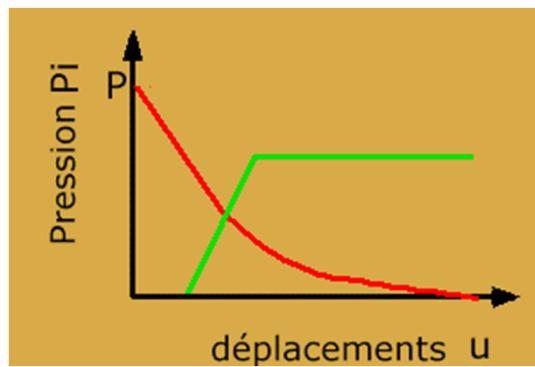


Dr. Hassan Ghasemzadeh

۴۹

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

محل تقاطع این دو منحنی نقطه تعادل زمین و حائل بندی است که از روی آن فشار وارد بر حائل بندی بدست می آید:



Dr. Hassan Ghasemzadeh

۵۰

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

رسم منحنی مشخصه رفتار زمین:

$$\sigma_0 \leq q_u / 2$$

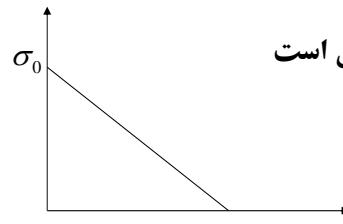
الف) حالت الاستیک

$$\sigma_c = q_u = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

مقاومت تک محوری

فشار اولیه  $\sigma_0$

Dr. Hasan Ghasemzadeh



منحنی مشخصه رفتار زمین کاملاً خطی است

$$u_{e_1} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_0 a = \frac{\sigma_0 a}{2G}$$

۵۱

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

رسم منحنی مشخصه رفتار زمین:

الف) حالت الاستیک



Dr. Hasan Ghasemzadeh

$$P_i = \frac{2P - (K_p - 1)H}{K_p + 1} = P_{\lim plastic}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2(\pi/4 + \varphi/2) \quad H = C \cot \varphi$$

$$\sigma_i = P + (P - P_i) \frac{a^2}{r^2}$$

$$u = \frac{1+\nu}{E} (P - P_i) \frac{a^2}{r}$$

۵۲

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

رسم منحنی مشخصه رفتار زمین:

ب) حالت الاستوپلاستیک

$$K_p(\sigma_r - H) - (\sigma_t - H) = 0$$

معیار گسیختگی مور-کولمب

$$\sigma_i = K_p \sigma_3 + R_c$$

$$\frac{\sigma_i - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_i + \sigma_3}{2} \sin \varphi - C \cos \varphi$$

$$\varepsilon_r + \alpha \Delta \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

قانون جریان پلاستیک:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$$

تغییر شکل در حجم ثابت

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

تغییر شکل با افزایش حجم

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۵۳

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

رسم منحنی مشخصه رفتار زمین:

ب) حالت الاستوپلاستیک



$$r_p = R \left( \frac{2(P+H)}{(K_p+1)(R_i+H)} \right)^{\frac{1}{K_p-1}}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

در منطقه الاستیک:

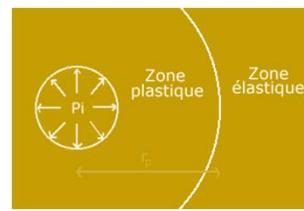
$$\sigma_r = P - \frac{(K_p-1)(P+H)r_p^2}{K_p+1} \frac{1}{r}$$

$$\sigma_t = P + \frac{(K_p-1)(P+H)r_p^2}{K_p+1} \frac{1}{r}$$

$$u = \frac{(1+\nu)}{E} \frac{(K_p-1)(P+H)r_p^2}{(K_p+1)} \frac{1}{r}$$

۵۴

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement



رسم منحنی مشخصه رفتار زمین:

ب) حالت الاستوپلاستیک

$$r_p = R \left( \frac{2(P+H)}{(K_p+1)(R_i+H)} \right)^{\frac{1}{K_p-1}}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

در منطقه پلاستیک:

$$\sigma_r = (R_i + H) \left( \frac{r}{R} \right)^{K_p-1} - H$$

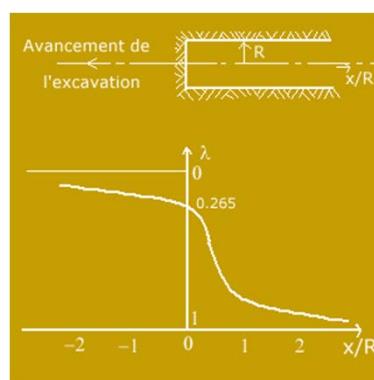
$$\sigma_t = K_p (R_i + H) \left( \frac{r}{R} \right)^{K_p-1} - H$$

$$u = \frac{(1+\nu)}{E} \left[ -(1-2\nu)(P+H)r + \left( \frac{(1-\nu)(1+\alpha K_p)}{(K_p+\alpha)} - \nu \right) \frac{2(P+H)}{K_p+1} \frac{r^{K_p}}{r_p^{K_p-1}} + 2(1-\nu) \frac{(K_p-1)(P+H)}{K_p+\alpha} \frac{r_p^{K_p-1}}{r^\alpha} \right]$$

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

$$\lambda = \frac{P - P_i}{P_i} \quad \text{ضریب وافشده‌گی:}$$

$$u = \lambda u_{e_1} \quad \text{در حالت رفتار الاستیک:}$$



Dr. Hasan Ghasemzadeh

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

رسم منحنی مشخصه رفتار زمین:

(ب) حالت الاستوپلاستیک

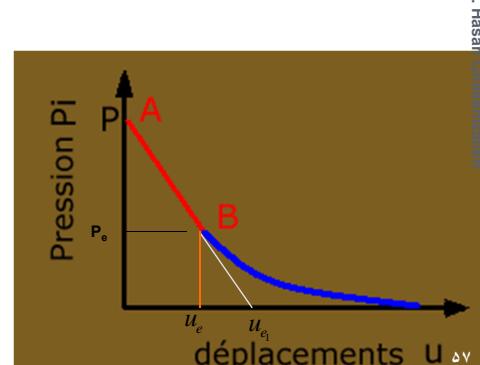
**فشار زمین در حد الاستیک:**

$$P_e = \sigma_0(1 - \sin \varphi) - C \cos \varphi$$

$$= (\sigma_0 - \frac{q_u}{2}) \frac{2}{K_p + 1}$$

$$= (\sigma_0 - \frac{q_u}{2})(1 - \sin \varphi)$$

$$u_e = \lambda_e u_{e_l}$$



## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

رسم منحنی مشخصه رفتار زمین:

(ب) حالت الاستوپلاستیک

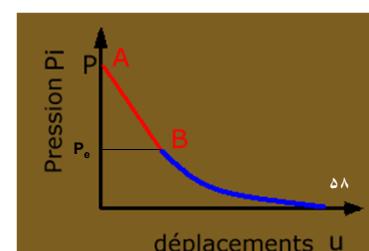
رسم قسمت غیر خطی:

$$\lambda > \lambda_e :$$

$$r_p(\lambda) = R \left( \frac{2}{K_p + 1} \times \frac{(K_p - 1)P + R_c}{(1 - \lambda)(K_p - 1)P + R_c} \right)^{\frac{1}{K_p - 1}}$$

$$u(\lambda) = \frac{1 + \nu}{E} \lambda_e P \frac{1}{\alpha + 1} \left[ 2 \left( \frac{r_p(\lambda)}{R} \right)^{\alpha+1} + \alpha - 1 \right] R$$

$$\text{if } \alpha = 1 \Rightarrow u(\lambda) = u_e \left( \frac{r_p(\lambda)}{R} \right)^2$$



رسم منحنی مشخصه حائل بندی:

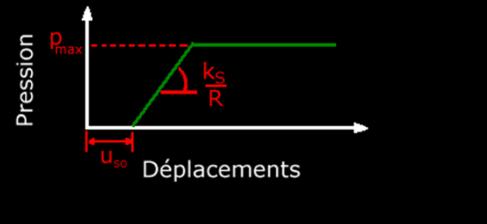
$$P_i = k_{SN} \frac{u_r}{R}$$

در شرایط متقاضی با فرض رفتار حاصل خطی باشد  
رابطه  $P_i$  با سختی حاصل ها به صورت زیر است.

شعاع تونل  $R$   
تغییر مکان شعاعی تونل  $u_r$

سختی حائل :

$$k_{SN} = \frac{\Delta P}{\Delta u} R$$

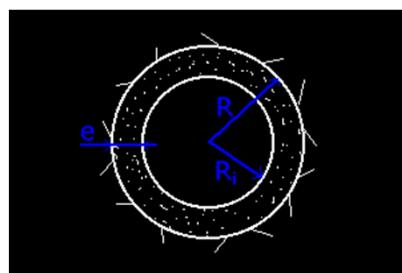


اگر تقارن وجود نداشته باشد باید سختی خمسی را نیز در نظر گرفت.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

رسم منحنی مشخصه حائل بندی:

(1) بنن



Dr. Hasan Ghasemzadeh

$$k_{SN} = \frac{E \cdot e}{(1-\nu^2)R} \approx \frac{E \cdot e}{R}$$

الف) پوشش نازک:

$$k_b = \frac{E_b(R^2 - R_i^2)}{(1+\nu_b)((1-2\nu_b)R^2 + R_i^2)}$$

ب) پوشش ضخیم:

$$p_{b\max} = \frac{\sigma_{b\max} \cdot e}{R}$$

رسم منحنی مشخصه حائل بندی:

### ۲) قاب فولادی

$$k_{SN} = \frac{E_{st} A}{sR}$$

$$k_{SF} = \frac{E_{st} I}{sR^3}$$

-سختی ریبهای فولادی دایروی با فاصله  $s$

با فرض تماس پیوسته قاب و زمین:

$$\begin{matrix} \text{سطح مقطع ریب} & A \\ \text{مدول یانگ فولاد} & E_{st} \\ \text{ممان اینرسی ریب خمیده} & I \end{matrix}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

$$P_{c\max} = \frac{\sigma_a \cdot A}{s.R}$$

### روش همگرایی - تحدید

#### ۳) رینگ قطعه‌ای

$$k_{SN} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \frac{e}{R}$$

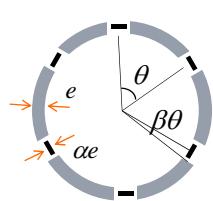
-سختی رینگ دایره‌ای با ضخامت ثابت  $e \ll R$

$$k_{SF} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \frac{I}{R^3} \quad I = \frac{e^3}{12}$$

-سختی رینگ دایره‌ای مشکل از  $n$  قطعه با ضخامت ثابت  $e$

$$E_s = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta) + \beta} E_s$$

$$I = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \frac{e^3}{12} \quad I_j = \frac{\alpha^3 e^3}{12}$$



Dr. Hasan Ghasemzadeh

۶۲

رسم منحنی مشخصه حائل بندی:

#### ۴) میل مهار

برای پیچ سنگ مکانیکی با فاصله های  $s_t$  در طول و  $s_l$  در عرض توزل

$$\frac{1}{k_{SN}} = \frac{s_t s_l}{R} \left[ \frac{4L}{\pi \varphi^2 E_b} + Q \right] \quad \begin{array}{c} L \\ \varphi \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{طول میل مهار:} \\ \text{قطر میل مهار:} \end{array}$$

$$k_{SF} = 0 \quad Q \quad \begin{array}{l} \text{پارامتر سختی میل مهار:} \\ \text{فاکتوری برای تغییر شکل سربالت که از نتیجه بدست می آید:} \end{array}$$

مدول یانگ بلت  $E_b$ :

$$p_{S\max} = \frac{T_{b\max}}{s_l s_t}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

(Hoek & Brown, 1980) :

Bolt diameter (mm)	Bolt length (m)	Anchor type	Rock type	T <sub>bmax</sub> (MN)	Q (m/MN)
16	1.22	Expansion shell	Good rock	0.049	0.160
16	1.83	Expansion shell	Shale	0.058	0.241
16	1.22	Expansion shell	Unknown	0.040	0.053
16	1.22	Expansion shell and resin	Unknown	0.062	0.030
19	1.22	Expansion shell	Good rock	0.051	0.126
19	1.83	Expansion shell	Unknown	0.089	0.024
19	1.83	Expansion shell and resin	Unknown	0.098	0.029
19	3.0	Slotted bolt and wedge	Unknown	0.098	0.074
22	3.0	Expansion shell	Gneiss	0.214	0.032
22	3.0	Expansion shell	Sandstone	0.196	0.042
22	3.0	Expansion shell	Sandy shale	0.127	0.069
22	3.0	Expansion shell	Shale	0.058	0.126
25.4	6.0	Expansion shell	Massive gneiss	0.323	0.051
25.4	1.83	Expansion shell	Granite	0.254	0.143
25.4	1.83	Resin anchor	Granite	0.285	0.018
25.4	1.22	Slotted bolt and wedge	Good rock	0.089	0.064
25.4	1.83	Resin anchor	Shale	0.160	0.020

## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

### ۵) میل مهار تزریق شده

$$\frac{1}{k_{SN}} = \frac{S_t S_l}{R} \left[ \frac{4L}{\pi \varphi^2 E_b} + Q \right]$$

پیچ سنگ های مهار شده در کل طول  
پیچ سنگ (تزریقی یا رزینی)

$$k_{SF} = 0$$

این پیچ سنگ ها بصورت بهبود خواص مکانیکی سنگ عمل می نماید.  
بنابر این نتیجه صفحات ضخیم در ناحیه بلت شده می توانند بکار رود  
ضخامت صفحه ضخیم کمتر از طول بلت در نظر گرفته می شود  
نتیجه هموژنیزاسیون نیز در این محلوده بکار گرفته شده است که با  
دو پارامتر بدون بعد نقش بلتها را در نظر می گیرد.

$$\frac{D_b S_b E_b}{E_s}$$

پارامتر تاثیر بلت ها در سختی ناحیه هموژن شده

$$\frac{D_b S_b \sigma_{yb}}{\sigma_c}$$

پارامتر تاثیر بلت ها در بهبود مقاومت ناحیه هموژن شده

جداول گراف های توانید

تأثیر پیچ سنگ را باید

$$D_b$$

$$S_b$$

$$\sigma_{yb}$$

دانسته توزیع بلت ها

سطح مقطع بلت ها

تنش تسلیم بلت ها

پیچ سنگ ها در کرنش کم و الاستیک تأثیر زیادی بر مقاومت توده سنگی

ندازند ولی هنگامیکه کرنش ها زیاد و پلاستیک (حالت همگرایی) باشد و

همچنین پس از نرم شدن گی بعد از مقاومت ماکریتم تأثیر بسزایی در رفتار

توده سنگ دارند.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

### ۶- بتن پاشی

سختی بتن پاشیده به دو عامل سن و پیوستگی بتن پاشیده شده ارتباط دارد که می توان در جداول مربوطه سختی ها را تعیین نمود.

بلت مکانیکی $\Phi=18mm$ $S_F S_L=1m^2$	H140 پروفیل هر یک متر	شات کریت 10cm	رشنگ ۶ تکه ای بتنی با ضخامت 30 cm	رشنگ بتنی متر ۴۰ سانتی متر رشنگ بتنی	حال سختی حایل
60	150	210	750	850	$K_{SN}$ (MPa)
0	$7 * 10^{-3}$	$5 * 10^{-3}$	0.13	0.45	$K_{SF}$ (MPa)
-	$1 * 10^{-3}$	$3.3 * 10^{-3}$	$1.5 * 10^{-3}$	$2.5 * 10^{-3}$	Max( $u_r / R$ )

Dr. Hasan Ghasemzadeh

در صورتی که چند نوع حایل همزمان به کار روند می توان تمام آنها را تحت تغییر مکان پکسان ناشی از زمین قرار دارد.

در صورتی که حایل های مختلف با فواصل زمانی نصب شوند باید از آنالیز همگرایی تحدید استفاده نمود.

۶۶

## نیروهای اضافی در طاق

مطابق این روش هر چه نصب حائل بندی را به تعویق بیاندازیم فشار کمتری به آن وارد خواهد شد در صورتیکه در بعضی از زمینهای اگر نصب حائل بندی را به تعویق بیاندازیم نیاز به حائل بندی سنگین خواهیم داشت.

علت این تناقض اینست که در روش بحث شده نیروهای وزن بصورت غیر مستقیم (تنشهای اولیه) در نظر گرفته می شوند.

در زمینهایی که وافشردگی غیر خطی در آنها ایجاد میشود نیروهای اضافه ای در طاق ایجاد می شوند که ناشی از وزن قسمتهای وافشده می باشند و بایستی به فشار بدست آمده از مرحله قبل اضافه شوند.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۶۷

## نیروهای اضافی در طاق

$$\Delta P_s = \gamma(r_p - R) \quad \text{بسیار محافظه کارانه}$$

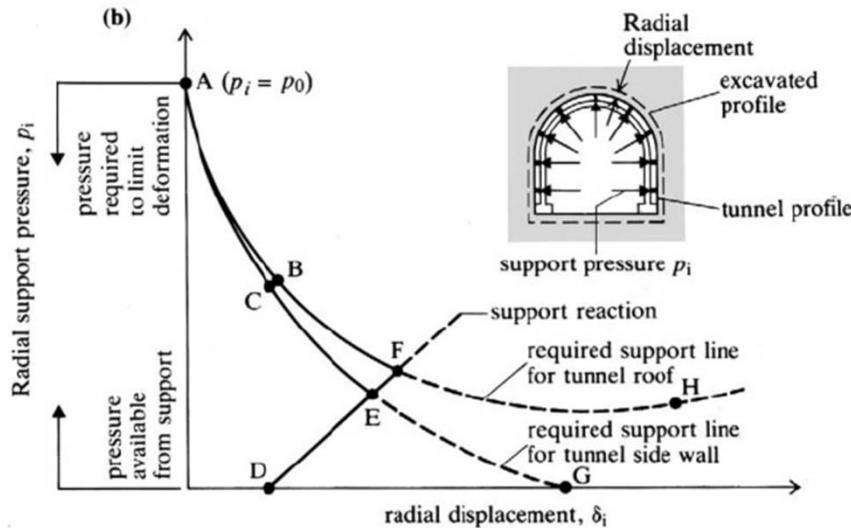
$$\Delta P_s = \frac{\gamma \cdot r_p}{K_p - 2} \left[ \frac{R}{r_p} - \left( \frac{R}{r_p} \right)^{K_p-1} \right] - \frac{R_c}{K_p - 1} \left[ 1 - \left( \frac{R}{r_p} \right)^{K_p-1} \right]$$

$$\Delta P_s = \gamma R \ln \frac{r_p}{R} - R_c \left[ 1 - \left( \frac{R}{r_p} \right)^{K_p-1} \right] \quad : K_p = 2 \text{ گل}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

اگر رفتار حائل خطی باشد رابطه  $p_i$  با سختی حائل ها به صورت زیر است.



## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

### اصول روش همگایی - تحدید

در این روش تنش زیر به جداره ها وارد می شود.

$$\sigma = (1 - \lambda)\sigma_0$$

$\sigma_0$  تنش های محیط می باشد  
 $\lambda$  پارامتری است که در هنگام حفاری از صفر تا یک تغییر می کند

$\sigma$  با حفاری به تدریج کاهش می یابد و نتیجاً تغییر مکان آن را در جداره داریم و **معادله همگایی زمین** به صورت زیر می تواند نوشته شود:

$$(1) \quad f_m(\sigma, u) = 0$$

## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

### اصول روش همگرایی - تحدید

به همین ترتیب با اعمال تنش روی حایل ها معادله همگرایی حایل ها :

$$f_s(\sigma, u) = 0$$

از آنجا که بلافاصله پس از حفاری حایل ها نصب نمی شوند و حایل ها در فاصله  $d$  از پیشانی کار نصب می شوند تغییر مکان  $u_d$  قبل از نصب حایل ها اتفاق می افتد. که متاظر با آن کاهش فشار تحدید را خواهیم داشت:

Dr. Hasan Ghasemzadeh

بنابراین معادله همگرایی حایل ها برابر می شود با

$$(2) \quad f_s(\sigma, (u - u_d)) = 0$$

۷۱

## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

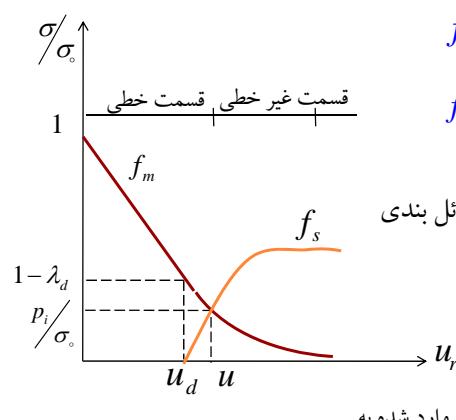
حالت تعادل از اندرکنش زمین - حایل بدست می آید که به صورت عددی از حل دستگاه معادلات زیر بدست می آید.

$$f_m(\sigma, u) = 0 \quad (1)$$

$$f_s(\sigma, (u - u_d)) = 0 \quad (2)$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

**$u_d$**  با توجه به زمان نصب حائل بندی قابل تعیین است



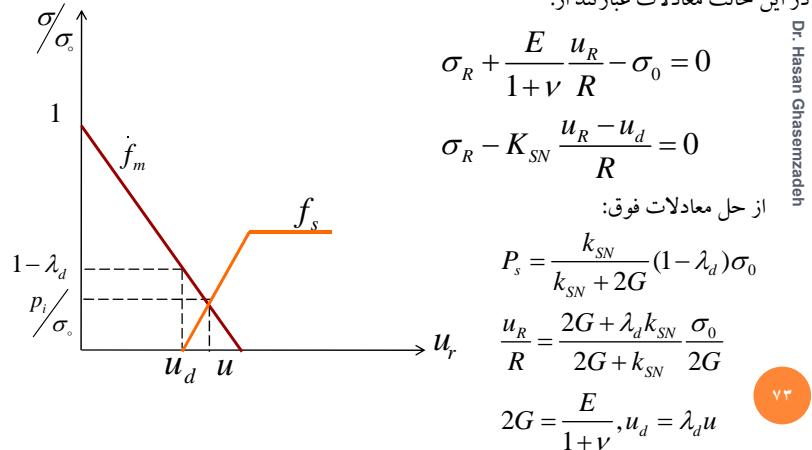
با افزایش تغییر مکان اولیه  $u_d$  مقدار تنش وارد شده به حایل با ضریب  $\lambda$  کم می شود

$$\sigma = (1 - \lambda) \sigma_0$$

## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

### رفتار الاستیک برای زمین و حائل:

معادله همگرایی در حالت تقارن محوری است و تغییر مکانها شعاعی است  
در این حالت معادلات عبارتند از:



## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

### زمین الاستو پلاستیک در حالت تقارن محوری:

انتهای ناحیه الاستیک  $\lambda_e$

$$F(\sigma_1, \sigma_3) = 0$$

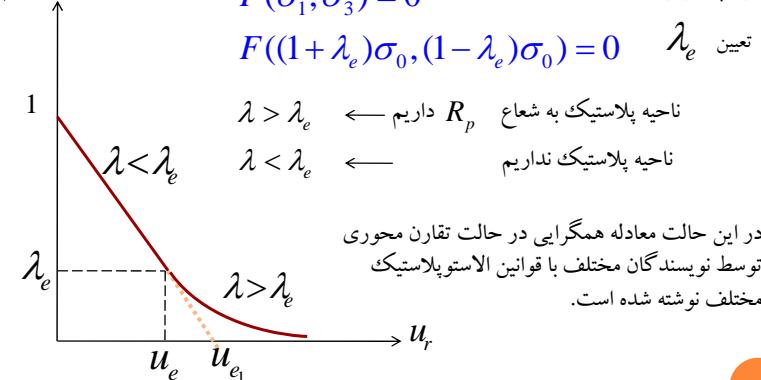
$$F((1 + \lambda_e)\sigma_0, (1 - \lambda_e)\sigma_0) = 0$$

معيار پلاستسيته

Dr. Hasan Ghasemzadeh

$\lambda > \lambda_e$  داريم

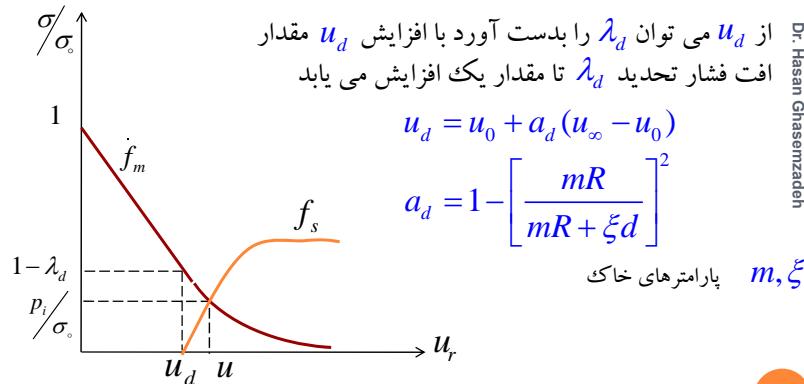
$\lambda < \lambda_e$  نداريم



## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

$\lambda_d$  ضریب افت فشار تحدید (در حالت نصب حاصل) و از معادله همگرایی بدست می‌آید

$$f_m((1-\lambda_d)\sigma_0, u_d) = 0$$



۷۵

## روش همگرایی - تحدید Convergence – Confinement

زمین الاستیک در حالت بدون در نظر گرفتن حاصل:

$$u_\infty = \frac{\sigma_0 R}{2G}$$

$$u_0 = \alpha u_\infty \quad a_0 = 0.25; m = 0.75; \xi = 1$$

$$\lambda_d = 1 - 0.75 \left[ \frac{0.75R}{0.75R + d} \right]^2$$

$$d = 0 \Rightarrow \lambda_d = 0.25$$

در واقع

۷۶

$$0.2 < \nu < 0.5 \Rightarrow 0.2 < \lambda_d < 0.3$$

$$d / R > 0.25 \Rightarrow \lambda_d \text{ تابعی از ضریب پواسون نیست}$$

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

زمین الاستو پلاستیک در حالت بدون در نظر گرفتن حاصل:

$$u_{\infty} = \frac{1}{\xi} \frac{\sigma_0 R}{2G}$$

$$a_d = 1 - 0.75 \left[ \frac{0.75R}{0.75R + \xi d} \right]^2$$

$$u_d = u_{\infty} \left[ 1 - 0.75 \left[ \frac{0.75R}{0.75R + \xi d} \right]^2 \right]$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۷۷

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

با در نظر گرفتن حاصل (روش ضمنی):

$$A = 1 - \frac{u_{\infty}}{u_{ns\infty}}$$

پارامترها

$$B = 1 - \frac{u_d}{u_{nsd}}$$

در حالت بدون حاصل

$u_{\infty}, u_d$

$u_{ns\infty}, u_{nsd}$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

$$B = A [0.45 + 0.42 A^2] \Rightarrow u_{\infty}, u_0$$

۷۸

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

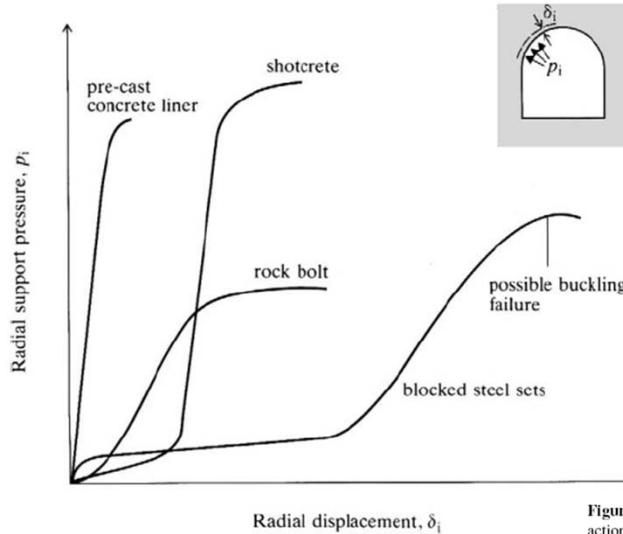


Figure 11.4 Non-linear support reaction curves observed for some support types.

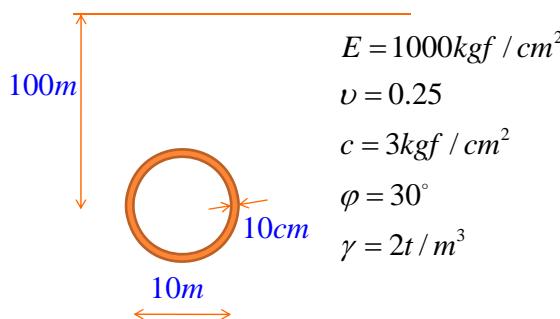
Dr. Hasan Ghasemzadeh

## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

### مثال

تونلی به قطر ۱۰ متر در عمق ۱۰۰ متری پس از سه روز از گذشت زمان حفاری به ضخامت ۱۰ سانتی متر بتن پاشی شده است در این مدت نیمی از تنها آزاد شده است ضخامت پوشش را کنترل نمایید

Dr. Hasan Ghasemzadeh



## روش همگرایی - تحدید

### مثال

$$\sigma_0 = \gamma h = 2 \times 100 = 200 \text{ t/m}^2 = 20 \text{ kgf/cm}^2$$

$$R_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 10.4 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_0 > R_c / 2 = 5.2 \text{ kgf/cm}^2$$

رفتار غیر خطی خاک وجود دارد

$$u_e = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_0 R = \frac{1.25}{1000} \times 20 \times 500 = 12.5 \text{ cm}$$

رفتار غیر خطی خاکها وجود دارد

$$u_e = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_0 R = \frac{1.25}{1000} \times 20 \times 500 = 12.5 \text{ cm}$$

$$k_s = \frac{Ee}{R} = \frac{2 \times 10^6 \times 10}{500} = 40000 \text{ kgf/cm}^2$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۸۱

## روش همگرایی - تحدید

### مثال

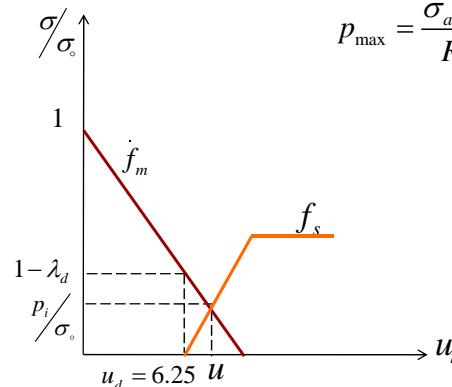
$$\Delta p = \frac{k_s}{R} \Delta u = \frac{40000}{500} = 80 \Delta u$$

$$u_d = \lambda_d u_e = 0.5 \times 12.5 = 6.25$$

$$p_{\max} = \frac{\sigma_{all} e}{R} = \frac{80 \times 12.5}{500} = 2 \text{ kgf/cm}^2$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

۸۲

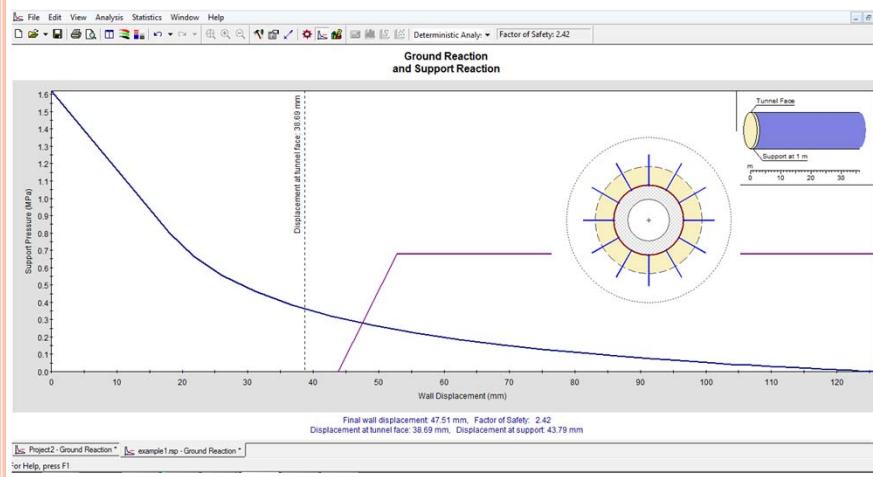


## روش همگایی - تحدید Convergence – Confinement

### RocSupport

### معرفی نرم افزار

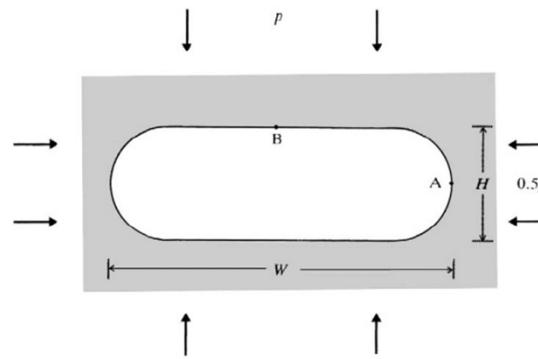
آنالیز تونل دایره‌ای به روش "همگایی-تحدید"



Dr. Hasan Ghasemzadeh

Dr. Hasan Ghasemzadeh

## نحوه استقرار تونل

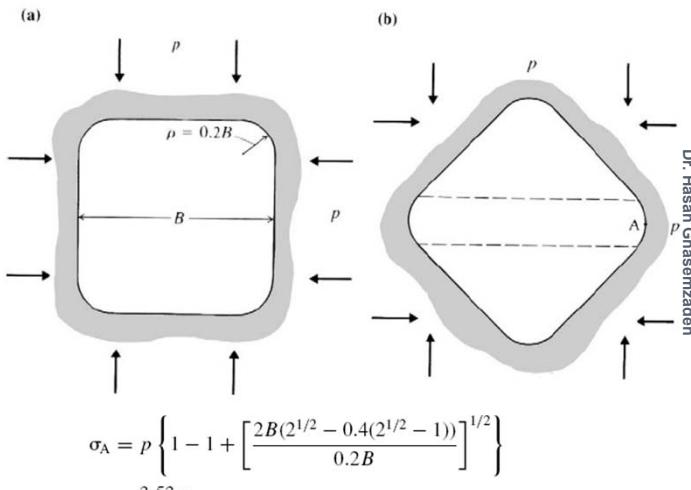


$$\sigma_A = p \left( 1 - 0.5 + \sqrt{\frac{2 \times 3H}{H/2}} \right)$$

$$= 3.96p$$

۳.۹۶

نحوه استقرار تونل

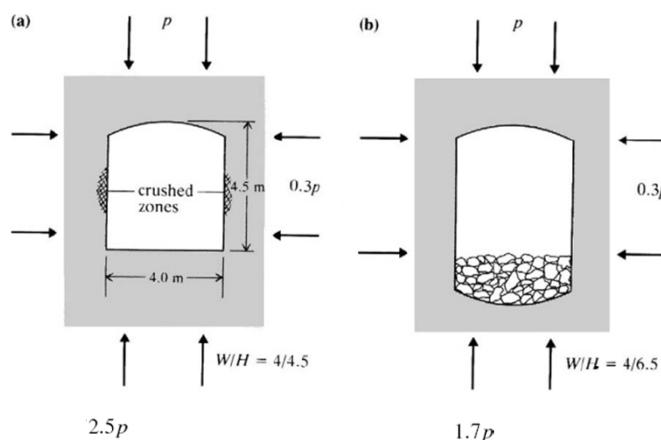


$$\sigma_A = p \left\{ 1 - 1 + \left[ \frac{2B(2^{1/2} - 0.4(2^{1/2} - 1))}{0.2B} \right]^{1/2} \right\}$$

$$= 3.53p$$

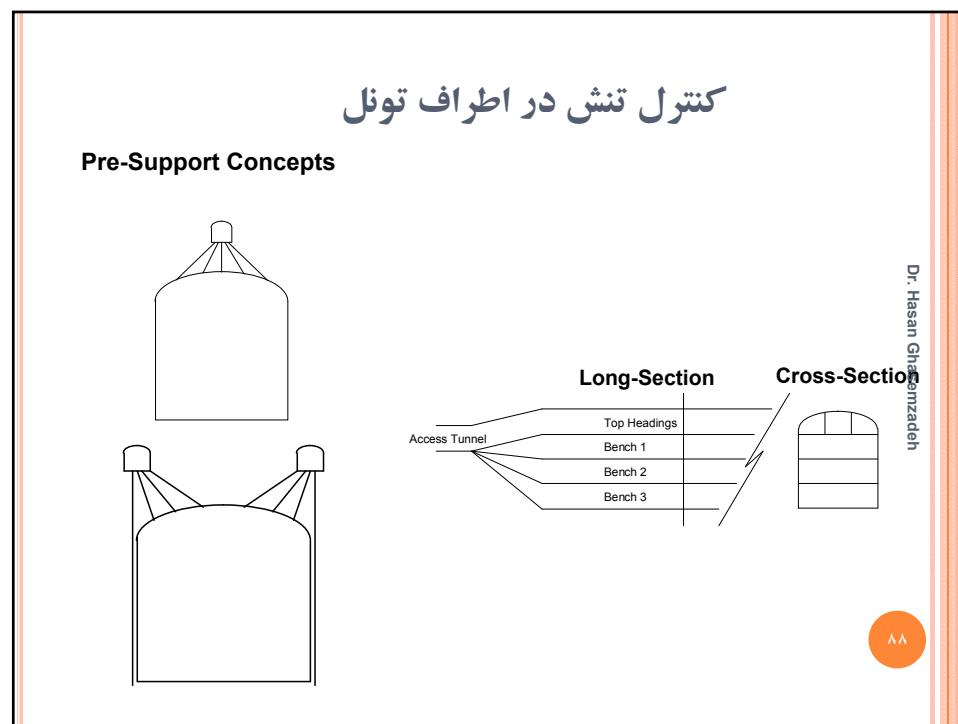
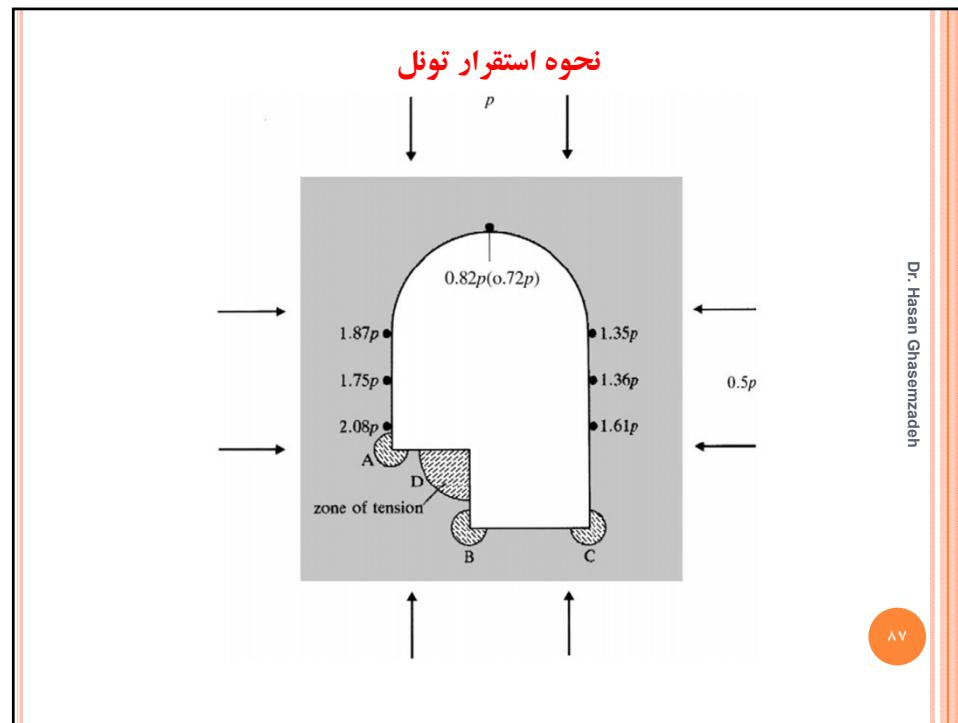
۸۰

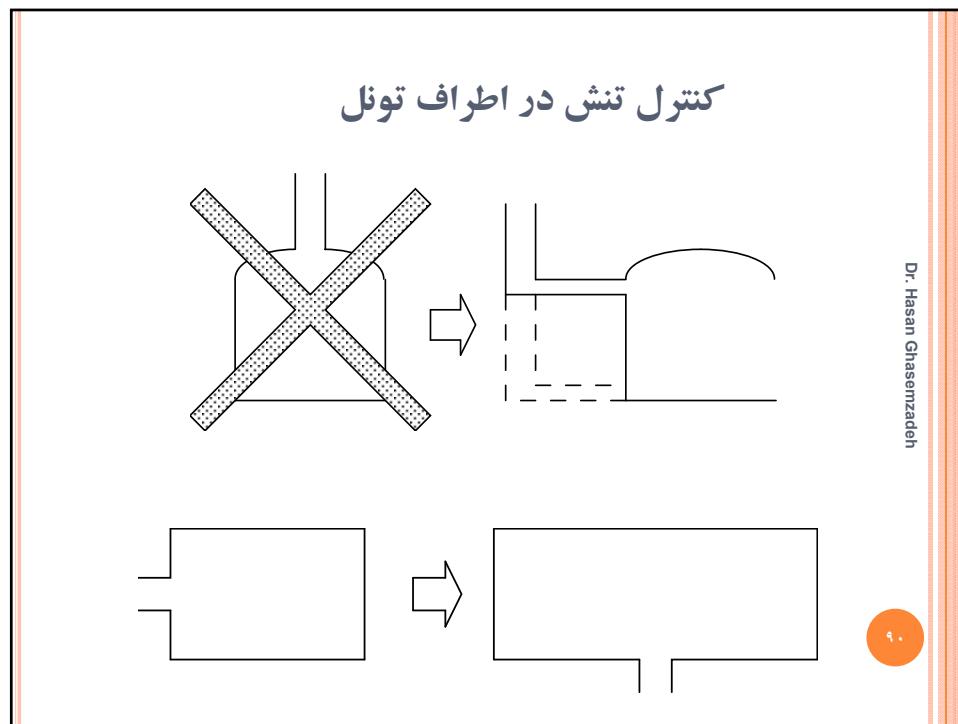
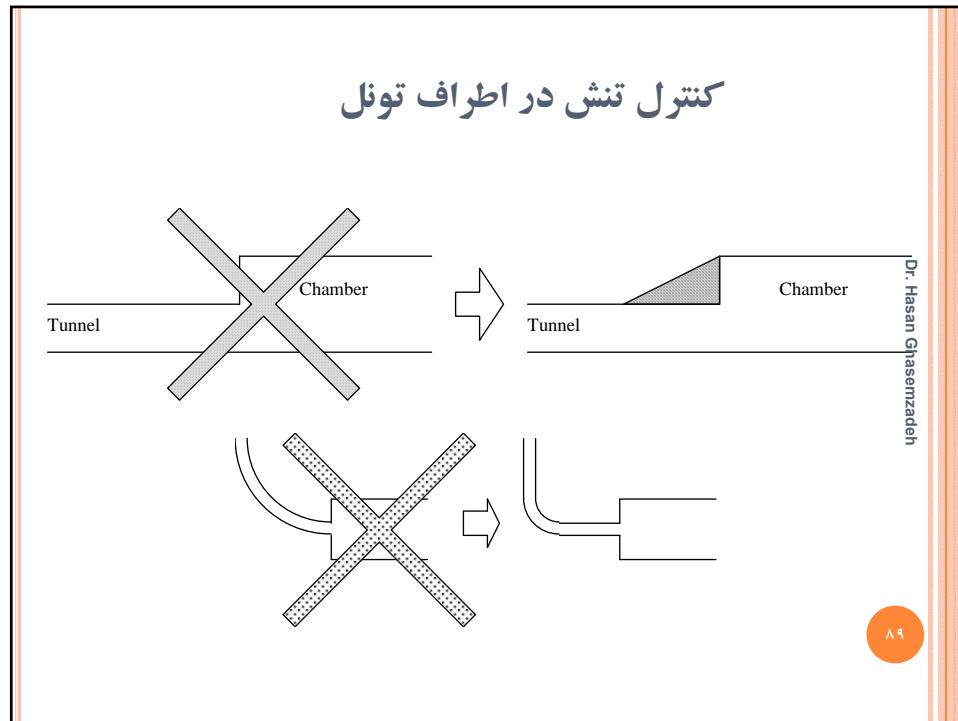
نحوه استقرار تونل



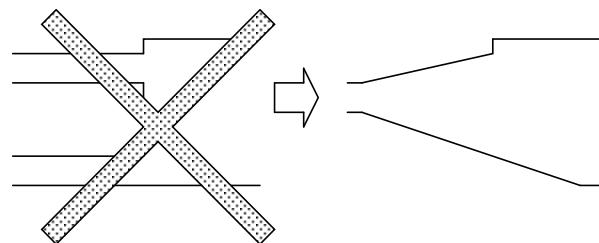
Dr. Hasan Ghasemzadeh

۸۶





## کنترل تنش در اطراف تونل

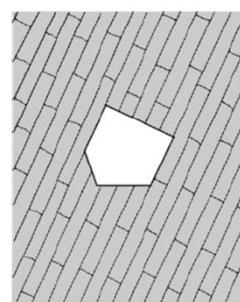


Dr. Hasan Ghasemzadeh

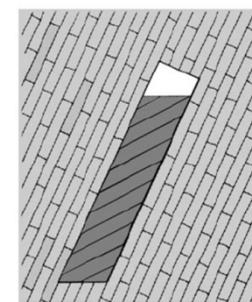
۹۱

## کنترل تنش در اطراف تونل

(a)

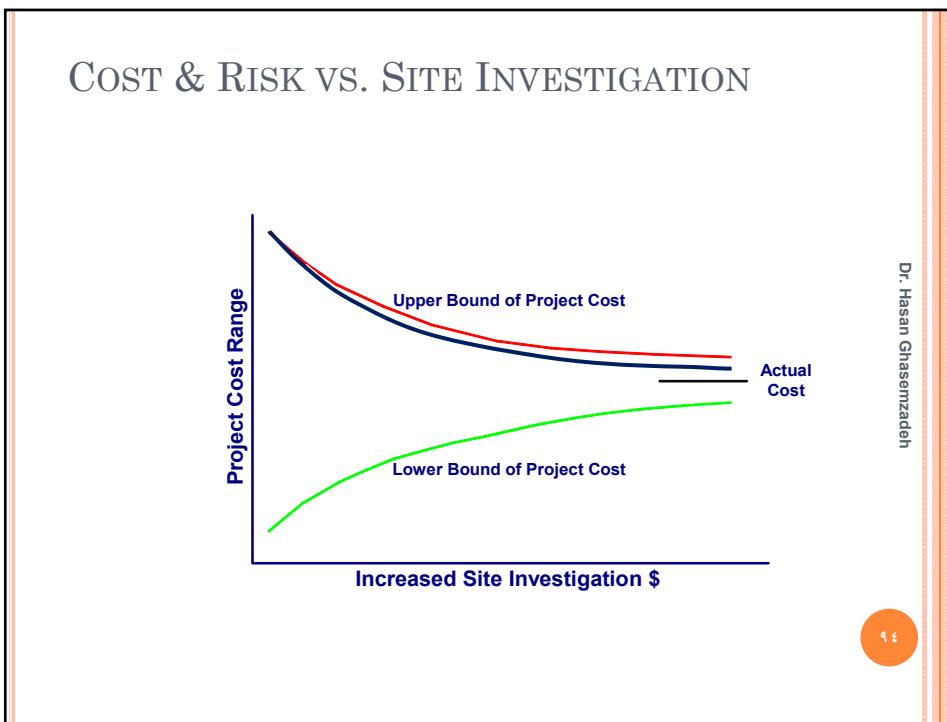
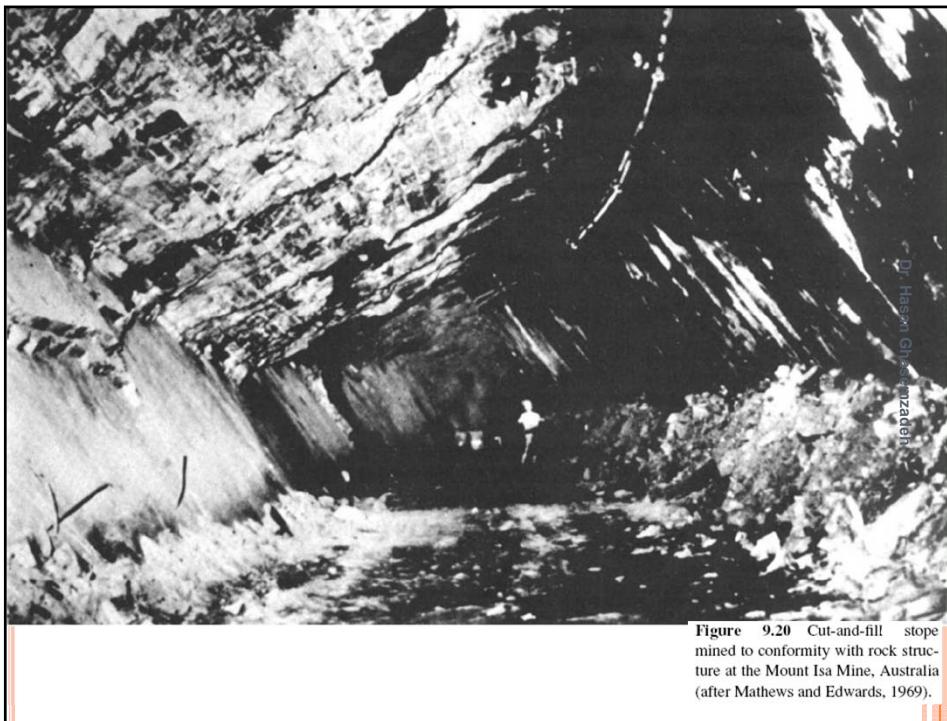


(b)



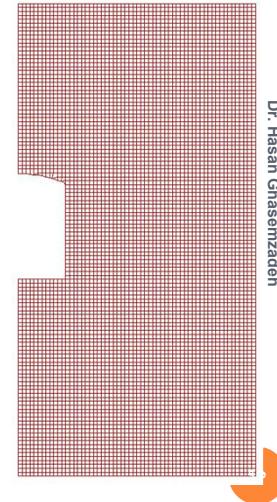
Dr. Hasan Ghasemzadeh

۹۲



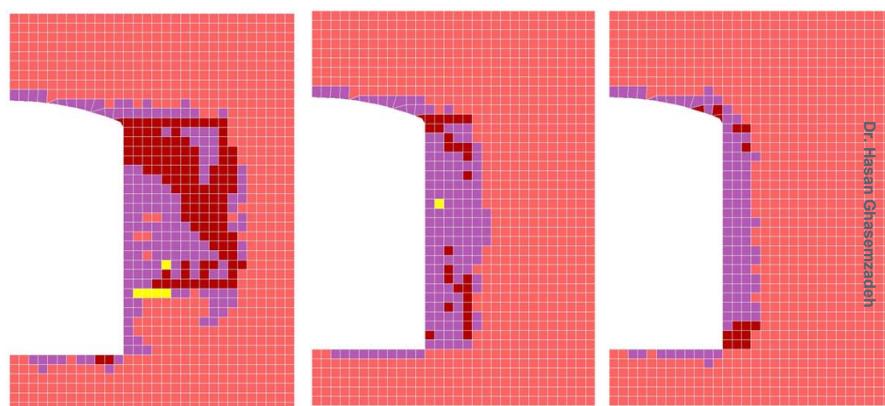
## کنترل تنش به روش عددی

- Continuum model FLAC 2D ○
- 60 x 60 x 180 meters (length ○  
not modeled)
- Curved roof & straight walls ○
- Depth 1300 meters ○
- Stresses  $\approx$  depth ○
- Example rock properties ○
- Sequential excavation ○
- Rock reinforcement ○
- Model permits rock failure ○



Dr. Hasan Ghasemzadeh

## کنترل تنش به روش عددی



Dr. Hasan Ghasemzadeh

EFFECT OF ROCK STRENGTH