نگهداری در معادن

مؤلف:

دکتر حسین جلالی فر

تهیه و تنظیم:

مازیار قبادی غلامرضا ایمانی فرزاد فرزین نسب

طراحی جلد:

محمد موحد

۱۳۹۲

فهرست

عنوان صفحه

۱- شناسایی تنش های زمین و علت عدم تعادل..... ۱

۲- انواع تنش ها و نقش هرکدام در ناپایداری و عوامل ناپایداری..... ۳۸

۳- تنش های القایی و توزیع تنش های القایی در اطراف تونل ها..... ۵۵

۴- منحنی های عکس العمل زمین، تغییر شکل طولی و سیستم های سایرت..... ۸۸

۵- رفتار زمین های مچاله شونده..... ۹۹

۶- تمارین..... ۱۱۴

۷- منابع و مأخذ..... ۱۱۷

فصل اول

شناسایی تنش های زمین و علت عدم تعادل

انواع کاربردهای فضاهای زیرزمینی:

- تونل های راه و حمل و نقل
- تونل های زهکشی و تزریق
- تونل های ذخیره سازی و مغارها
- تونل های راه و حمل و نقل و ذخیره سازی
- تونل های معدنی
- تونل های نیروگاه

نکته: در تونل های انتقال آب آرماتور بسته می شود اما در تونل های معدنی اصلاً آرماتور بسته نمی شوند.

نکته: مغارهای ذخیره سازی نفت معمولاً در سنگهای گرانیتی حفر می شوند اگر نبود در سنگ های آهکی حفر می شوند.

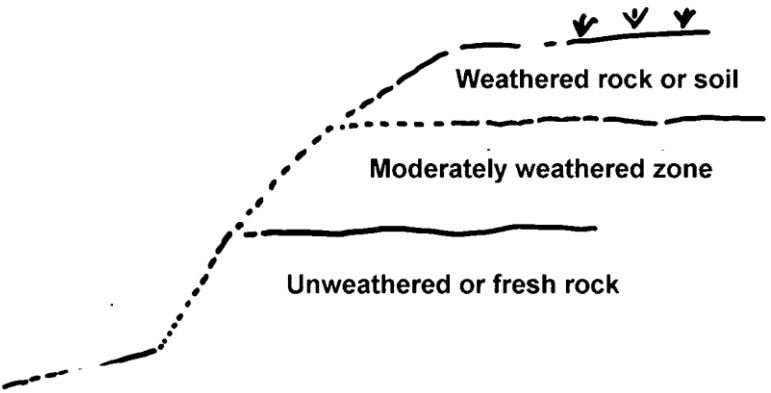
نکته: در تونل های مترو معمولاً لاینینگ استفاده می شوند.

نکته: در تونل های مترو به دلیل اینکه ضربات دینامیکی زیاد است، لرزشهایی در مترو ایجاد می کند اگر آماتور نباشد

تنشهای کششی و برشی را تحمل نمی کند و تونل تخریب می شود.

نکته: در تونلهای مترو قبل از لایینگ بتونی در حین اجرا بولت می زنند که اجازه دهد تونل بایستد (فضا بزرگ است) بعد از آن برای نگهداری در ازمدت آرماتوربندی می کنند و لایینگ را می بندند.

Vertical geological section



بررسی از لحاظ کیفیت سنگ ها:

هرچه از سطح زمین به سطح عمیق تر می رویم سنگها شرایط بهتری پیدا می کنند و بکر تر می شوند چون فشرده تر و محکمتر می شوند.

بصورت کلی در زمین های نرم بایستی بلافاصله نگهداری انجام شود و نگهداری لایینگ صلب نصب شود و در زمین های نرم بولت نمی زنند فقط در زمین های سنگی بولت می زنند.

نکته: اگر قرار است تونلی حفر شود بهتر است در زون سنگ های غیر هوازده حفر گردد.

نکته: احتمال ریزش تونل هایی که در نزدیکی سطح زمین حفر می شوند زیاد می باشد.

۱- سنگ های نزدیک سطح زمین هوازده یا خاک ها (weathered rock or soil) :

اگر در سنگ های هوازده تونلی حفر شود تونل می ریزد چون تمام بار بالا روی سقف تونل وارد می شود در زون (۱) زمین نرم می باشد یعنی اگر شکستگی داشته باشند شکستگی ها فشرده تر شده و بسته نشده اند چون زمین خود نگهدار نیست و بلافاصله بایستی نگهداری نصب شود در چنین حالات زمین تمایل دارد به سمت داخل شروع به حرکت کند تنش هایی به وجود می آورند اگر بخواهیم نگهداری کنیم ،لایینگی بکار می بریم که تغییر شکل ندهد صلب و سفت باشد.

۲- زون نسبتاً هوازده (moderately weathered zone) :

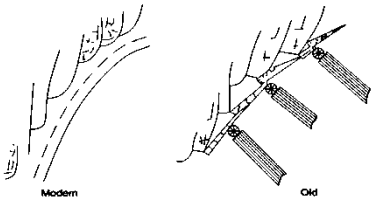
در این زون، سنگها دائماً سخت شده چون به دلیل فشار بیش از حد لایه ها که در بالا قرار دارند و به سنگهای زیرین فشار می آورند

درزه ها بسته شده و خاک ها به هم چسبیده و قفل شدگی زیاد شده است و چسبندگی بالاتر رفته و در واقع مقاومت سنگ ها بیشتر می شوند اگر در این زون تونلی حفر شود تمام بار بالا وارد نمی شوند کسری از ارتفاع بار بر روی تونل وارد می شوند. زمین به اندازه کافی مقاومت دارد تا اجازه دهد که فضا ایجاد کنیم پس سیستم نگهداری را نصب می کنیم چون سنگ مقاومت دارد همین که اجازه می دهید سیستم نگهداری نصب کنیم مقداری تنش آزاد می شود فشار نگهداری کم می شود پس در این حالت وقتی تنش آزاد می شود تنش مقداری می میرد کسری از فشار زمین بایستی نگهداری شود علی رغم اینکه تونل در عمق بیشتری حفر شد ولی ارتفاع بار مرده کمتر از زون (۱) است زیرا در زون (۲) زمین تقریباً خود نگهدار است

۳- سنگ های غیر هوازده یا تازه (un weathered or freshrock):

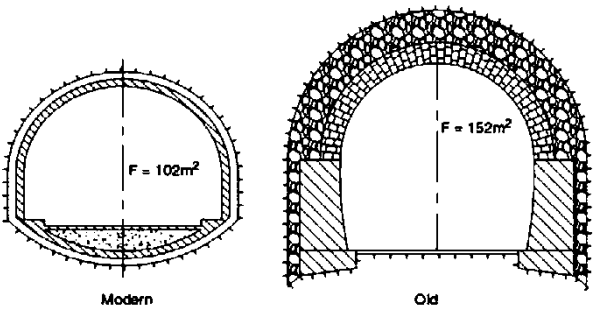
در این زون سنگ سخت است چون زمین قادر است پایداری حفره را حفظ کند به طوری که یک پوشش نازک لایینگ کفایت می کند (شاتکریت ۵ سانتی متر کافی است) هرچه از سطح پایین تر رویم ارتفاع زیادی می شود ارتفاع بار مرده کم می شود.

نگهداری در تونل های سست ونرم :



۱- سیستم قدیمی ۲- سیستم جدید

وقتی تونلی در زون (۱) حفر می شود نمی توان از سیستم نگهداری قدیمی استفاده کرد زیرا لایه وسط بین دو ستون آنقدر محکم نیست که بتواند بار خود را به ستونهای مجاورش منتقل کند این سیستم در گذشته اشکال داشته است و بهتر است پوشش یک دست (سیستم جدید) در سنگ های سست ونرم زده شود.



نکته: به شکل موضعی در تونل های ضعیف سیستم نگهداری نصب نکیم در این زمین ها برای سیستم نگهداری باید یوسته باشد.

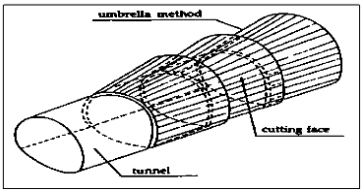
در لایینگ گذاری ۲ سیستم وجود دارد:

۱- سیستم قدیمی: ضخامت لایینگ بتونی زیاد وجود داشته است.

۲- سیستم جدید: ضخامت لایینگ بتونی کم است و سیستم نگهداری قوی می باشد این سیستم یک سیستم نگهداری تقویتی است مثل اینکه میله ها به آن کمک می کند تلفیق راک بولت با لایینگ در این سیستم وجود دارد.

نکته: مقاومت کششی بتونی حتی اگر ضخامت ۱۰ متر باشد صفر می باشد مقاومت کششی و برشی بتون بدون میلگرد صفر است و با اضافه کردن میلگرد مقاومت کششی و برشی بالا می رود بتون بدون میلگرد فقط مقاومت کششی دارد.

روش چتری:

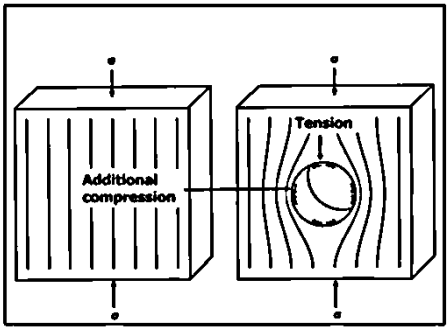


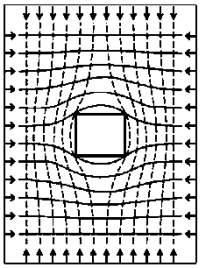
قبل از اینکه تونل حفر شود تحت زاویه ۳۰ درجه به سمت بیرون تونل، یکسری چاله هایی می زنند و این در چال ها در واقع دو غاب می ریزند و سنگ سفت می شود کمان مقاومتی به وجود می آورند و زیر یک چتر مقاوم حفاری می کنند و پیش می روند و تونل ریزش نمی کند

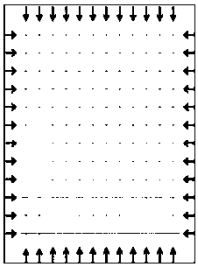
نکته : قبل از حفر تونل تنش های عمودی وافقی طبیعی وجود دارند درواقع زمین درحال تعادل است.

نکته: باحفر فضای زیرزمینی تعادل به هم می ریزد پس از حفر در بعضی جاها تمرکز ودر بعضی جاها بازشدگی به وجود می آید. درصورتی می توان پایداری حفره را مورد بررسی قرار داد که بتوان مقدار کشش وفشار موجود در اطراف حفره را تشخیص داد.

نکته : دراین شکل حفره دایره ای شکل بهترین حفره از لحاظ توزیع تنش ها می باشد زیرا تنش ها به دور حفره می چرخند زیرا خیلی ضربه ای به حفره ایجاد نمی کنند و معمولاً تنش که اثر می کند فشار می باشد







پارامترهای موثر از حفاری :

۱- اولین محصول ایجاد فضاهای زیرزمینی از قبیل تونل، مترو، مغارو. . . . . جابه جایی است وقتی سنگ ها از درون حفره برداشته شود در واقع تکیه گاه لایه های بالایی را برداشتیم در نتیجه لایه های پایینی به سمت پایین حرکت کرده و جابجا می شوند

۲- دومین اتفاق پس از ایجاد فضای زیرزمینی، چرخش تنش ها دور حفره است که حفره شبیه یک کانال زهکش آب است یعنی هرچه آب زیرزمینی اطراف حفره باشد همه به سمت فضای خالی ایجاد شده هجوم می آورند در واقع جریان فعال می شود و این جریان اشکالاتی را روی مقاومت برشی در زه ها به وجود می آورند.

دلایل عدم تعادل : بار روی کف و دیواره ها و سقف حذف شود و تکیه گاه سقف برداشته شود.

نکته: برای حفظ تعادل یا برگرداندن زمین به حالت اولیه استفاده از سیستم نگهداری صورت می گیرد.

تغییر شکل به دلیل تغییر شکل پیش رونده ای که دارد به واسطه عدم تعادل انجام می شود و آرام شدن صورت می گیرد یعنی در واقع زمین آرام می شود.

زمین آرام می شود؟ یعنی باری که روی کف وجود داشته باشد و حالا که تنش با تغییر شکل تبدیل شده و تنش به سمت صفر میل می کند. وقتی تنش آزاد می شود کو یم تنش به تغییر شکل تبدیل می شود و حالا که تنش به تغییر شکل تبدیل شده، تنش به سمت صفر میل می کند در واقع تنش می میرد ولی صفر نمی شود.

$$\tau \geq c_0 + \sigma_n \tan \varphi$$

تغییر شکل چه زمانی اتفاق می افتد؟ وقتی که تنش های برشی در طول تا پیوستگی ها از مقاومت برشی بیشتر می باشد.

نکته: در سنگ های درزه دار تعداد زیادی ترک وجود دارد که ناپایداری را تشدید می کند.

عوامل ناپایداری: مقاومت سنگ شکسته شده، خاصیت شکل پذیری و جهت داری درزه، تعداد سیستم های شکستگی دور تونل، اندازه و شکل حفره و درزه ها، جهت حفره نسبت به جهت شکستگی ها، روش حفاری، وضعیت تنش ها.

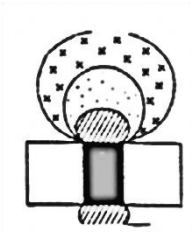
نکته: روش حفاری در میزان تغییر شکل خیلی موثر است یعنی اگر آتشباری داشته باشیم تغییر شکل تونل را بالا می برد زیرا آشفتگی زیادی ایجاد می کند سنگها را خرد می کند اما اگر حفاری TBM ,road header باشد سنگ آشفته نمی شود آرام روی سنگ خرده می شود.

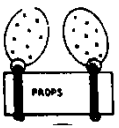
نگهداری: علمی است که رفتار توده سنگ را در انتقال از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر مورد مطالعه قرار می دهد در واقع زمینه را برای طرح اقتصادی توأم با ایمنی به منظور جلوگیری از ریزش سقف و دیواره ها انجام می گیرد. به عبارت دیگر علمی که می تواند دوباره تعادل اولیه را توسط سیستم های نگهداری (ارزان، مطمئن) را بر زمین برگرداند.

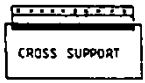
روش نگهداری به ۲ صورت می باشد: (internal ، external)

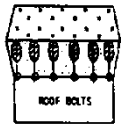
۱- سیستم نگهداری در دل سنگ نفوذ می کند و خواص سنگ را بالا می برد مانند راک بولت .

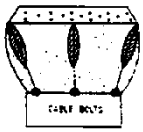
۲- سیستم نگهداری روی سنگ قرار داده می شود .











نکته: در سیستم (externally) انتظاری از اینکه سنگ خودش بار ببرد یا کمک کند نداریم کل بار وارده در این سیستم به وسیله وسایل نگهداری کنترل می کنیم.

نکته: سیستم (internally) یک سیستم تقویتی است یعنی سنگ را تقویت می کنیم مقاومت برشی

سنگ را با تقویت کردن افزایش می دهیم.

نکته: وسایل نگهداری برای نفوذ در دل سنگ: بولت ها، کابل ها، بتن پاشیده شده (شاتکریت)

نکته: راک بولت در سنگ ها کاربرد دارد و در خاک ها و زمین های نرم لاینینگ می زنیم.

نکته: به سیستم external نگهداری support و internal تقویتی leinforce گویند.

نکته: وسایل نگهداری برای روی سنگ: قاب های فولادی و چوبی، بتن ریزی برجا، (لاینینگ)، شکمت.

سیستم تقویتی: راک بولت ها تولید پیش تنیدگی در سنگ می کند و بلوک ها را در هم قفل می کند این پیش تنیدگی مقاومت برشی را افزایش می دهد این سیستم اصطکاک را بالا می برد اصطکاک بالا رود بلوک ها روی هم نمی لغزند و قفل می شوند.

نکته: اگر در این سیستم ها سنگ حرکت کند فعال و در غیر اینصورت غیر فعال باقی می مانند.

نکته: اگر در جایی سیستم نگهداری نصب کردیم و غیر فعال باقی ماند بی فایده است و اصلاً به سیستم نگهداری نیاز نیست و بهتر است نصب نشود مگر اینکه سنگ حرکت کند.

مکانیزم های نگهداری:

۱- فعال (جک های هیدرولیکی): سیستم نگهداری پیش تنیده یک سیستم فعال می باشد.

۲- غیرفعال (قاب های فولادی)

نکته: همه سیستم های نگهداری غیرفعال یک روزی فعال می شوند.

نکته: ۹۰٪ سیستم های راک بولت از همان لحظه اول فعال هستند.

نکته: بالارفتن مقاومت برشی جلوی لغزش گرفته می شود و حسن تقویت همین است که با دوختن ناپیوستگی ها به هم اجازه نمی دهد که روی هم بلغزند به همین علت بهتر است سیستم های تقویتی بلافاصله بعد از حفاری تونل نصب شود زیرا اگر زمان زیاد بگذرد سنگ ها حرکت کرده و دندانه های ناپیوستگی ها خرد و صاف می شود و مقاومت برشی پایین می آید.

نکته: اگر تونل تغییر شکل پیدا کرد نصب سیستم تقویتی بی فایده است بطور کلی قبل از هرگونه جابه جایی در تونل سیستم تقویتی (راک بولت) باید نصب شود و گرنه مقاومت برشی سطوح شکستگی در اثر جابه جایی های بلوک ها از بین می رود

نکته: اصول سیستم های تقویتی خود نگهدار کردن سنگ است نه بار بردن به سنگ.

نکته: با نصب سیستم های نگهداری تقویتی از گسیختگی های پیش رونده جلوگیری می شود.

نکته: بولت را باید در جهتی زد که همه نیروهای بولت باعث افزایش مقاومت شود نه که درصدی از نیروی آن باعث لغزش شود.

نکته: وقتی راک بولت می زنیم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بالا می رود و در نتیجه مقاومت برشی بالا می رود و می تواند تنش برشی را خنثی کند.

نکته: اگر می خواهیم سیستم تقویتی خوب جواب دهد بلافاصله آن را نصب کنیم (قبل از اینکه تغییر شکل صورت گیرد)

نکته: بولتی را که در سنگ فرو می کنیم اطرافش را به وسیله (دوغاب، ملات سیمان، رزین) تزریق می کنیم زیرا دوغاب به داخل سنگ ها نفوذ می کند و راک بولت را به سنگ ها جوش می دهد و دیگر اگر بلوک سنگی بخواهد حرکت کند نمی تواند.

مراحل طراحی نگهداری تقویتی:

۱- شناسایی دقیق زمین شناسی ۲- ارتباط بین زمین شناسان و مهندسین ۳- موارد تاریخی که در محل به وقوع پیوسته

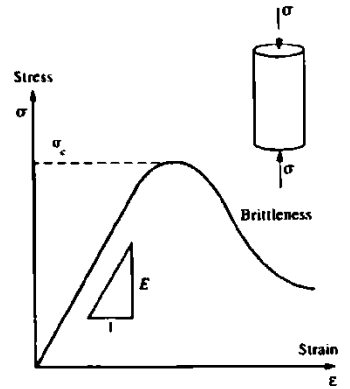
۴- آزمایشات آزمایشگاهی هم روی سیستم تقویتی و روی سنگ ۵- وضعیت تغییر شکل را آنالیز کنیم

نکته: اگر می خواهیم تونل هایدار بماند باید سیستم نگهداریمان را سریعاً نصب کنیم نباید اجازه داد سنگ تغییر شکل پیدا کند.

نکته: معمولاً سنگ هایی که رفتارشان غیر الاستیک باشد کرنش دائمی آن به وجود می آید هر چه زمان نصب سیستم نگهداری طولانی تر شود این کرنش دائمی سریعتر به وجود می آید.

نکته: ما نباید اجازه دهیم کرنش دائمی به وجود آید زیرا اگر چنین شود ترک ها زیاد می شوند.

نکته: در سنگهای بسیار نرم سعی شود تا سیستم نگهداری شکل پذیر نباشد مگر اینکه شکل پذیری تا آستانه حد مجاز باشد در این ایرادی ندارد زیرا سیستم نگهداری همراه با سنگ ها تغییر شکل می دهد.



زمان تصمیم گیری برای نصب سیستم نگهداری در منحنی تنش- کرنش:

۱- جایی که باید سیستم نگهداری نصب کنیم (قبل ازاینکه سنگ دچارکرنش شود)

۲- در رفتار الاستیک کرنش این سنگها صفراست چون اگر بار برداریم سنگ به حالت اولیه خود برمی گردد.

۳- اگر خواستیم کمی تنش را بمیرانیم تافشار کمترشودو سیستم نگهداری ارزان تر شود بعداز منطقه الاستیک نصب کنیم.

۴- نباید درانجا سیستم نگهداری نصب کرد.

۵- در منطقه غیرالاستیک حالت کرنش دائمی به وجود آید زمانی که بار رابرداریم مقداری کرنش در سنگ باقی می ماند.

۶- نباید درایجا سیستم نگهداری نصب شود.

نکته: برای اینکه سیستم نگهداری ما تسلیم نشودو بار بر باشد پیش تنیدگی می کنیم یعنی بولت راکه نصب کردیم شروع به ایجاد کشاور (چرخاندن بولت بافشار روبه جلو) در آن ایجاد می کنیم و تنش کششی در بولت ایجاد کرده درواقع داریم بلوک ها را به هم قفل می کنیم.

نکته: مهار انتهایی چال باید محکم باشد.

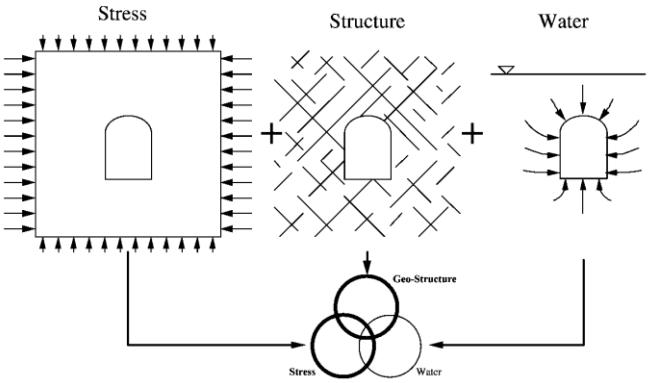
نکته: طول قطر چال باید دو غاب پر شود.

نکته: سطح دیواره ای که روی آن بولت نصب می کنیم باید کاملاً صاف و مسطح باشد و باید روی آن پلیت (صفحه ای که انتهای بولت روی دیواره نصب می گردد) هم بزنیم تا بار را بطوریک دست توزیع کند و در سطح بیشتری پیش تنیدگی اعمال شود.

نکته: اگر فاصله شکستگی ها خیلی به هم نزدیک باشد سیستم سابرت را پیشنهاد می کنیم.

اگر سیستم شکستگی ها فاصله شان به هم خیلی نزدیک باشد مثل قندجه می شود و نمی توان در آن از سیستم تقویتی استفاده کرد چون حتی اگر استفاده شود در آن سر خورده و در می آید در نتیجه باید در چنین محیط هایی از سیستم سابرت استفاده کرد.

نکته: ۷۰ درصد بولت هایی که زده می شود بی فایده هستند فقط ۳۰ درصد بولت ها بار را می برند زیرا فقط بولت هایی موثرند که از شکستگی ها عبور کرده و بلوک ها را به هم قفل کنند و بولت هایی که در داخل سنگ سالم حفر شوند بی فایده می باشند.



نکته: با جریان آب زیرزمینی باعث ناپایداری می شود.

نکته: در طراحی نگهداری سازه های زیرزمینی، تودہ سنگ شکستگی است در این حالت ریزش بلوک ها باعث ناپایداری می شود.

نکته: سنگ یک دست باشد یعنی سنگ بکر است در این حالت فشارهای دور تونل باعث ناپایداری می شود

نکته: ترکیبی از ۳ عامل بالا باعث ناپایداری می شود.

مکانیزم های مختلف گسیختگی در سازه های زیرزمینی: کنترل ساختاری و کنترل تنش و یا ترکیب هر دو عامل می باشد.

عوامل ناپایداری سازه های زیرزمینی: ساختارها (شکستگی ها)، تنش ها، آب، زمان

	تنش های کم	تنش های زیاد
توده سنگ	سنگ سالم، تنش کم است و دور تونل هیچ اتفاقی نمی افتد تونل خود نگهدار است 	سنگ سالم، تنش خیلی زیاد است تونل می ریزد.
سنگ های درزه دار	تونل در سنگ های شکسته حفر شده است تنش هم خیلی بالا نیست ناپایداری در اینجا به دلیل شکستگی است نه تنش. 	تونل در محیط شکسته حفر شده است و تنش هم بالا است. ناپایداری هم در اثر شکستگی ها و تنش می باشد
سنگ خیلی درزه دار	سنگ به شکل قندیه (به شدت خرد شده است) تنش واین است بلوک ها دانه دانه می ریزند 	سنگ مثل قندیه است اما در اینجا تنش خیلی زیاد است در نتیجه مثل چوب خمیر به سمت داخل می آید.

نکته: هم شکستگی ها و تنش در ایجاد ناپایداری نقش دارند و ترکیبی از دو حالت می باشد که ناپایداری ها را به وجود می آورد.

نکته: هرگاه تنش ها بیشتر از ۲۵٪ مقاومت می شوند در سنگ ترک به وجود می آید.

نکته: در حوضه سنگهای زیر ۱۵٪ ناپایداری، ساختاری است.

الگوریتم مطالعه پایداری و طراحی سیستم نگهداری:

تعیین فاکتور ایمنی- تعیین پایداری سازه- تعیین تنش های القایی- ساختن مدل

ساختن مدل: تنش های منطقه، مشخصات هندسی سازه و کاربردی، خصوصیات توده سنگ

تنش های القایی: قبل از اینکه تونل حفر شود تنش های نرمال در حال تعادل می باشد و بعد از حفر تونل فشار و کشش دارد

فاکتور ایمنی: عوامل پایداری بر عوامل ناپایداری

تفاوت فاکتور ایمنی استاندارد (SF) با فاکتور ایمنی محاسباتی (S_1F_1):

بطور کلی فاکتور ایمنی محاسباتی بایستی بزرگتر از فاکتور ایمنی استاندارد باشد

۱- اگر (S_1F_1) خیلی بزرگتر از (SF) باشد یعنی تونل خیلی پایدار است و می توانیم آن را بزرگتر کنیم که در اینصورت

باید ابعاد سازه را تغییر دهیم دوباره فاکتور ایمنی جدید بدست می آید.

۲- اگر (S_1F_1) فقط بزرگتر از (SF) باشد (۲ یا ۴).

۳- اگر (S_1F_1) کوچکتر از (SF) باشد تونل می ریزد در این شرایط می توانیم اگر اجازه داریم هندسه سازه را کوچکتر کنیم دوباره (S_1F_1) را محاسبه کنیم بیشتر از (SF) می باشد.

نکته: اگر نشد می توانیم جهت تونل را عوض کنیم تا تونل در جهت شکستگی نباشد باز هم اگر نشد سگمنت ها را با سیستم های تقویتی تقویت می کنیم دوباره (S_1F_1) را محاسبه می کنیم و در آخر اگر نشد از سیستم های نگهداری ساپرت استفاده می کنیم.

نکته: طراحی تمام ← تهیه نقشه اجرایی ← اجرایی تونل.

نکته: اگر $SF < 1$ سازه ناپایدار و $SF = 1$ بحرانی و $SF > 1$ سازه پایدار است.

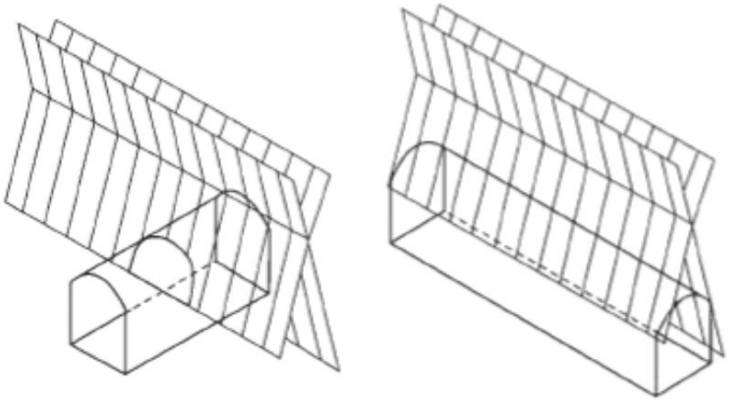
نکته: پایداری با افزایش نسبت ابعاد حفره به میانگین فاصله داری ناپیوستگی ها کاهش می یابد.

نکته: اگر یک سیستم درزه داشته باشد پایداری تابع محور حفره است اگر امتداد محور حفره عمود بر امتداد درزه باشد پایداری افزایش می یابد و اگر امتداد محور حفره موازی امتداد درزه باشد پایداری کاهش می یابد.

نکته: اگر تعداد زیادی سیستم شکستگی داشته باشیم زمانی پایداری ماکزیمم می شود که به موازات سیستم درزه بد حرکت کنیم اگر به موازات سیستم درزه خوب حرکت کنیم ایرادی ندارد.

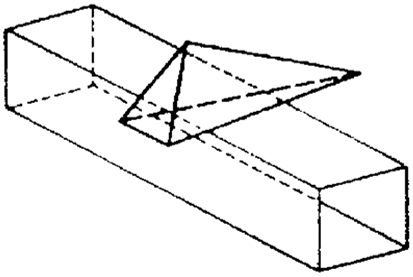
نکته: زمانی که تعداد زیادی سیستم شکستگی وجود دارد بایستی به موازات بدترین آنها حرکت نکنیم.

سیستم درزه بد: کاهش زبری، وجود هوازده، کاهش مقاومت برشی، وجود آب، کاهش زاویه اصطکاک داخلی.

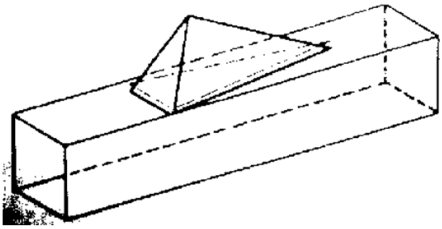


(۲) (۱)

(۱) امتداد تونل موازی امتداد شکستگی ها (جهت بد)، (۲) امتداد تونل عمود بر امتداد شکستگی ها (جهت خوب)



(۱) تشکیل گوه پایدار

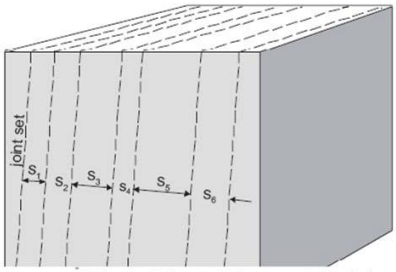


(۲) تشکیل گوه ناپایدار

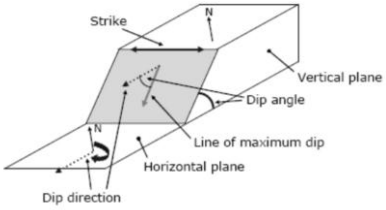
نکته: تغییر راستای تونل می تواند تونل را پایدار یا ناپایدار می کند.

نکته: جایی که شکستگی ها وجود دارد اگر تنش کم باشد احتمال گیرتگی کمتر است و اگر تنش زیاد باشد احتمال گیرتگی بیشتر است

ناپایداری ساختاری (در اثر شکستگی ها): ۱- لغزش ۲- سقوط



$$Sa = (S1 + S2 + S3 + ..+Sn)/n$$

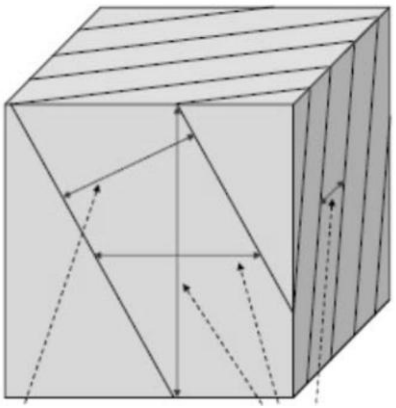


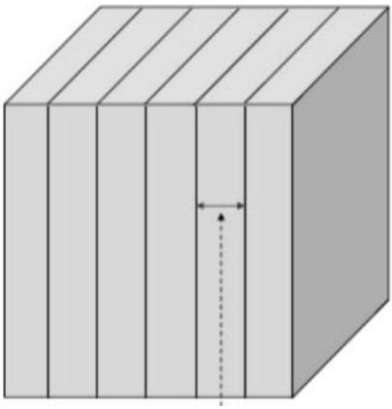
نکته: پایداری تابعی از عکس تعداد سیستم های شکستگی و ابعاد مهندسی می باشد.

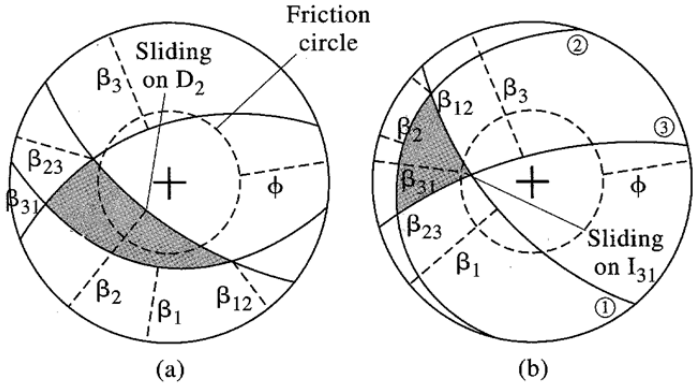
عوامل موثر در ناپایداری ساختاری: شیب ، امتداد، فاصله داری ، زبری .

شبکه استرونت و نمایش درزه ها در آن:

خطوط با شیب ماکزیمم شرایط جهت گیختگی لغزشی را دارند. اگر چه بعضی از صفحات ممکن است شیبی بزرگتر از زاویه اصطکاک داشته باشند چون عملاً لغزش روی آنها انجام نمی گیرد اگر آن صفحه خارج از گوه ای تشکیل شود که از سایر صفحات تشکیل شده اند.







دراین گوه تشکیل شده است در شکل (a)۳ صفحه شکستگی تشکیل شده است اگراین صفحات رسم شده باهم تلاقی کردند فصل مشترکشان (منطقه ماشور خورده) نشان دهنده این است گوه تشکیل می شود اگر تلاقی نکردند اصلاً گوه تشکیل نمی شود. در شکل (a)، $\Phi > \beta_1$ لذا روی صفحه β_1 گیرتگی رخ نمی دهد. اما β_2, β_3 در داخل دایره کوچک قرار می گیرند لذا روی صفحه β_2, β_3 گیرتگی رخ می دهد. امابطور کلی این گوه نمی افتد زیرا شیب تقاط تلاقی صفحات $(\beta_{12}, \beta_{23}, \beta_{31})$ هرسه از Φ کوچکتر است وخارج ازدایره کوچک قرار می دهد.

نکته: دایره کوچک (دایره داخلی) نشان دهنده زاویه اصطکاک داخلی می باشد.

نکته: درشبکه استرونت هرچه کمان به مرکز دایره نزدیکتر باشد مقدار شیب آن بیشتر می باشد.

نکته: برای اینکه کوه بیافتد بایستی بلغزد پس چسبندگی، σ_n، $\tan q$ آن مهم می باشد.

چسبندگی سنگ درزه دار را صفر در نظر می گیریم پس مقاومت برشی موجود فقط $\sigma_n.\tan q$ است σ_n همان وزن کوه است که می تواند در جهات مختلف باشد پس آن را لحاظ نمی کنند تنها عامل پایداری که اجازه نمی دهد زاویه اصطکاک داخلی می باشد.

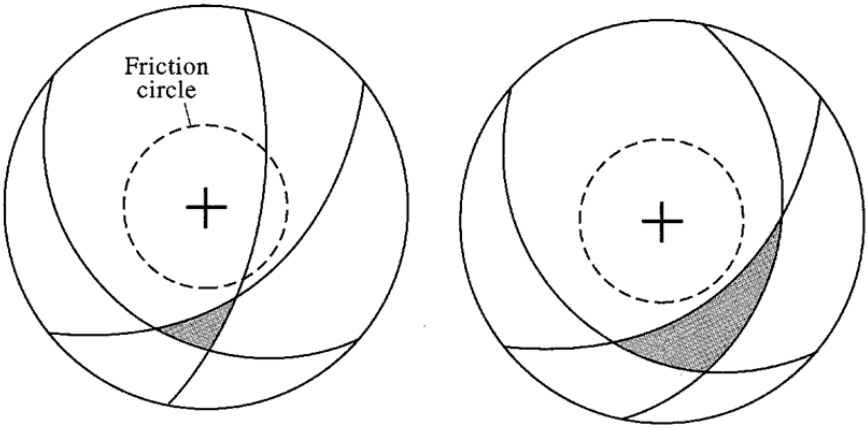
نکته: در شبکه استرونت زاویه اصطکاک داخلی را نسبت به مرکز رسم می کنند مثلاً اگر زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه است نسبت به محیط در شبکه استرونت ۳۰ درجه جدا می کنند دایره ای که به مرکز مبدأ دایره بزرگ و به شعاع ۳۰ درجه رسم می کنند.

نکته: اگر $\alpha > \Phi$ باشد گسیختگی رخ می دهد.

نکته: اگر کوه ای می افتاد می توان جهت سازه را طوری عوض کرد که نیافتد. مثلاً اگر شیب درزه ای از غرب به شرق باشد به محور تونل را روبرو با آن قرار دهیم و به سمت غرب و پیش رویم بطوری که گوه تشکیل شده باید در سینه کار قرار گیرد ونه در دیواره ها تا نگهداری شود و یا تخریب شود برزید. (فقط برای این است که گوه نیافتد)

نکته: اگر گوه خارج از منطقه ترسیمی زاویه اصطکاک داخلی قرار گرفت گوه نمی افتد.

نکته: جهت تونل از شمال به سمت جنوب غربی و می توان به همین صورت محور تونل را عوض کرد تا گوه نیافتد.

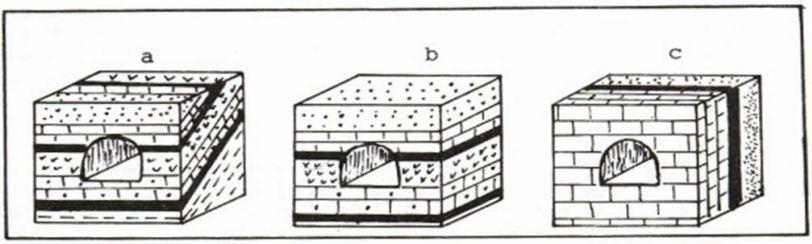


نکته: در شکل بالا در هر دو، گوه تشکیل می شود ولی ناپایدار است.

نکته: بطور کلی گوه های خطرناک هم در سقف و دیواره های حفره می توانند به وجود آیند.

سوال) اگر در منطقه ای ۳ سیستم شکستگی وجود داشته باشد محور تونل بایستی چگونه باشد؟

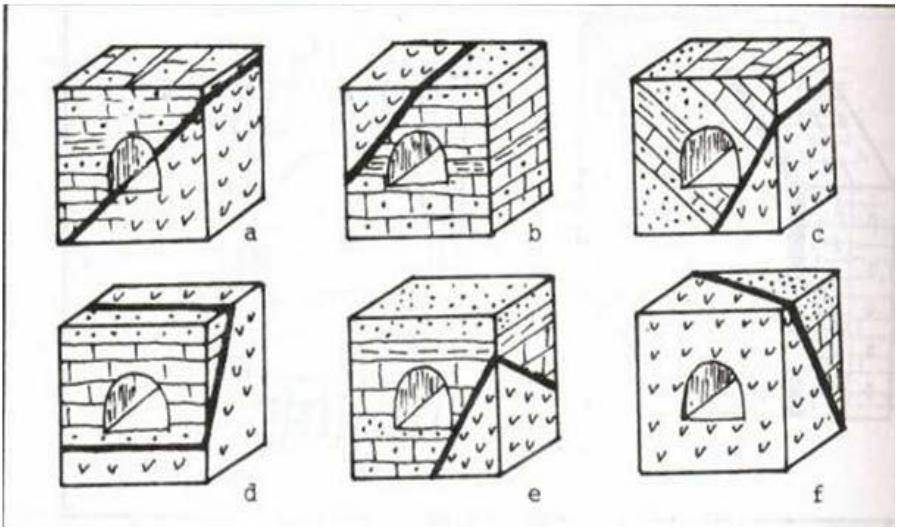
نکته: هرچه طول بولت بیشتر باشد مهارش بیشتر می باشد.



Relation of layers and tunnel direction

نکته: اگر در جایی لایه ضعیفی دیدیم بهتر است سعی کنیم امتداد تونل را عمود بر امتداد آن لایه زمین قرار دهیم.

نکته: بهترین حالت (c) و بدترین حالت (a,b) است



a) شرایط تونل بسیار نامطلوب است اما در این حالت در ۲ سمت تونل ریزش خواهیم داشت احتمال ناپایداری در کل تونل داریم.

b) شرایط بسیار نامطلوب است زیرا زون خرد شده دقیقاً در قسمت بالای تونل قرار می گیرد و حالت ثقلی دارد و سقوط می کند.

c) شرایط از حالت های قبلی بهتر است زیرا گسل زیر تونل افتاده است و زون خرد شده در اثر حرکت ثقلی رو به پایین حرکت می کند و به زیر تونل می رود.

d) شرایط خیلی بد است زیرا جهت شیب گسل خلاف جهت شیب تونل قرار دارد.

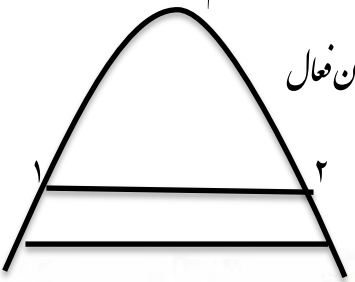
e) شرایط از d بهتر است زیرا گسل در کمر پایین قرار دارد.

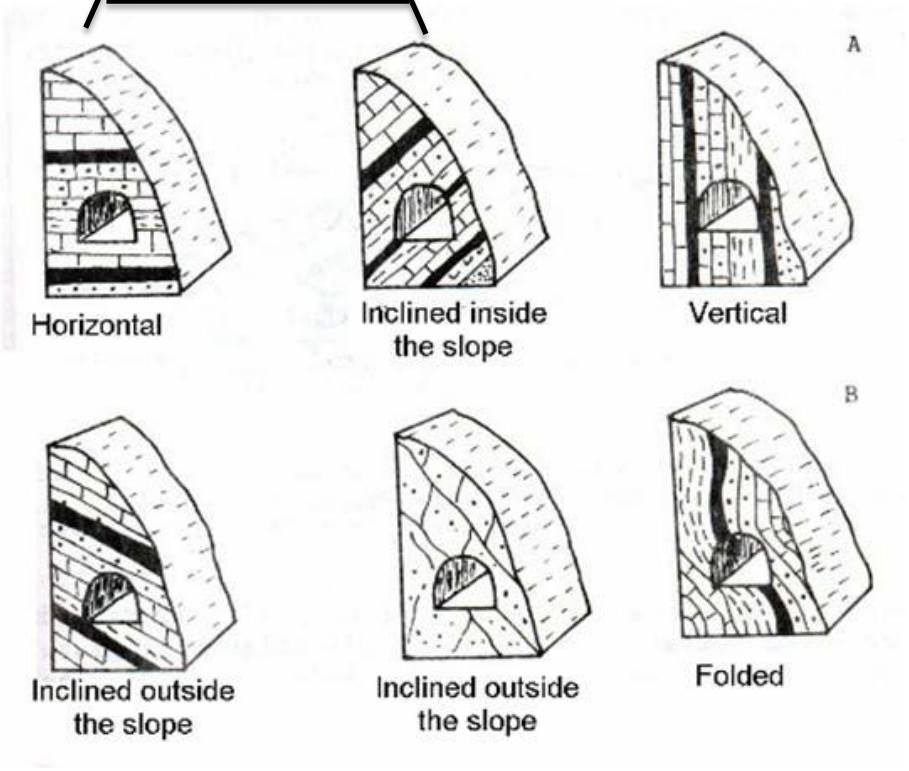
f) شرایط بد و بحرانی است اما شرایط آن بهتر از d است تونل در چند نقطه امتداد گسل را قطع می کند و چون جهت پیشروی تونل در جهت شیب گسل است پس بهتر از حالت d می باشد.

نکته: بایستی از (۲) به (۱) تونل بزنیم. بایستی جهت شیب نه امتداد ناپیوستگی ها هم جهت با جهت پیشروی تونل باشد

این بهترین شرایط است زیرا قبل از اینکه بلوک ها برای افتادن فعال

شوند با استفاده از سیستم تقویتی، نگهداری می شوند.





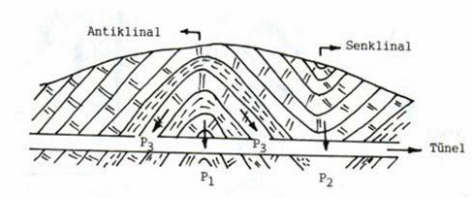
horizontal) : اگر گسل یا ناپیوستگی نزدیک به سقف تونل باشد ناپایداری تا محل ناپیوستگی ادامه پیدا کند.

inclined inside the slope): اگر گسل بالایی نزدیک به سقف باشد اگر بلوک کنده شده وبه داخل تونل می ریزند و نمی توان آنها را به لایه بالایی دوخت چون لایه بالایی ضعیف می باشد.

vertical) : سقف دچار مشکل نمی شود اما دیواره ها با مشکل مواجه می شوند.

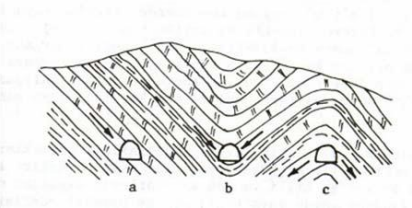
inclined outside the slope) : در این حالت احتمال لغزش بلوک ها به سمت سطح آزاد (بیرون) زیاد است.

نکته: شیب ناپیوستگی ها بایستی به سمت داخل باشد نه به سمت سطح آزاد.



نکته: در این حالت لایه ها که چین می خورند شکستگی هایی در تونل به وجود می آید بلوک ها در سقف تونل سقوط می کنند تونل در قسمتی که به کشش و در قسمت دیگر به فشار می افتد

نکته: در چین خوردگی تنش ماکزیمم افقی است و تنش ماکزیمم عمود بر لولای چین می باشد.



a) در این حالت لایه ها سرمی خورند و به پایین می روند اگر تونل افقی باشد تمام دیواره های سمت چپ ناپایدار است

b) لایه ها از دو طرف دیواره ها به سمت تونل سر می خورند و سقف به فشار می افتد.

c) دیواره ها نیاز به نگهداری ندارد ولی سقف به کشش می افتد.

سوال) جهت تونلی از شرق به غرب می باشد منطقه چین خورده است لولای چین شمالی جنوبی است وضعیت پایداری تونل را در دیواره و سقف معلوم کنید؟

1) $\tau = \sigma_n \tan(\Phi_b + i)$

2) $\tau = \sigma_n \ \tan(\Phi_b + JRC \ \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}))$

3) $JRC_n = JRC_O(\frac{L_n}{L_o})^{-\ 0.02\ JRC_O}$

4) $\tau = C * \ \sigma_n \tan(\varphi_l + JRC \ \log_{10}\frac{JCS}{\sigma_n})$

JCS: مقاومت فشاری تک محوره سنگ درزه دار JRC_n: JRC واقعی (تونل)

JRC_O: آزمایشگاهی L_n: طول درزه در حالت واقعی L_o: حدود ۱۰۰ میلی متر

نکته: برای فرمول (۲) باید در ابتدا JRC آزمایشگاهی را به وسیله فرمول (۳) به JRC واقعی تبدیل کرد و سپس JRC واقعی را در فرمول (۲) قرار داد.

نکته: JRC در تونل را با JRC آزمایشگاهی بدست می آورند.

نکته: برای JCS باید مثل JRC از طریق فرمول (۵) از حالت آزمایشگاهی به حالت واقعی تبدیل کرد و سپس در فرمول (۲) قرار داد.

$$JCS_n = JCS_O \left(\frac{L_n}{L_o}\right)^{-0.03\ JRC_O} \quad (5)$$

رابطه محاسبه چسبندگی:

$$C_i = \tau - \sigma_n \tan \Phi_i$$

C_i : چسبندگی آنی (چسبندگی فعلی وجود دارد)

روابط تنش های برجا:

$$\sigma_n = w \cos\beta \qquad \tau = w \sin\beta$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan\phi \qquad \text{S.F} = \frac{C + \sigma_n \tan\phi}{f}$$

نکته: اگر در سطح درزه آب وجود داشته باشد

$$\sigma_n = w \cos\beta - P$$

$$\tau = w \sin\beta + P$$

P : فشار آب منفذی

نکته: مقاومت نمونه سنگ به جهت ناپیوستگی ها بستگی دارد.

نکته: اگر ناپیوستگی وجود داشته باشد موازی یا عمود بر جهت بارگذاری باشد مقاومت نمونه تابعی از ناپیوستگی می باشد .

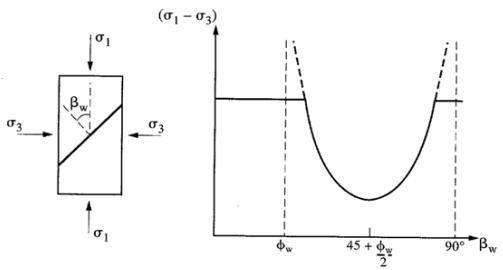
$$|\tau| = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\,\beta_w$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\,\beta_w$$

نکته: هرگاه خط عمود بر ناپیوستگی با زاویه تنش اصلی حداکثر $(45+\frac{\phi}{2})$ باشد کمترین مقاومت را مشاهده می کنیم.

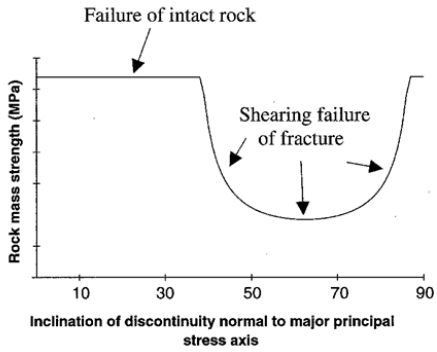
نکته: اگر موازی یا عمود با جهت بارگذاری سازه باشد هیچ تأثیری روی مقاومت ناپیوستگی نمونه ندارد.

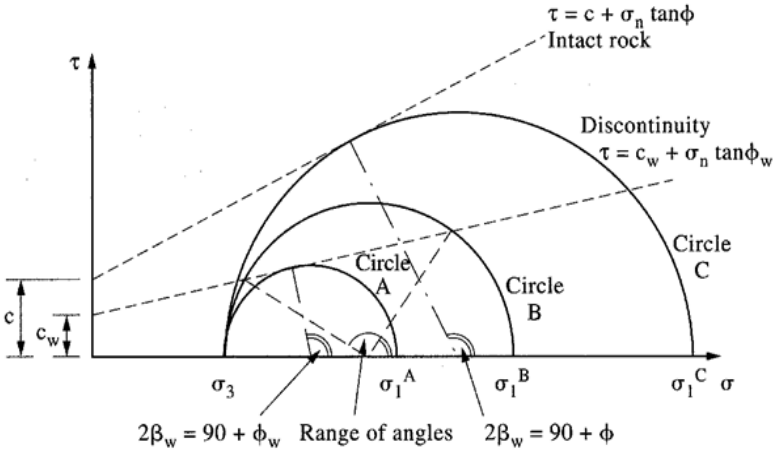
نکته: مقاومت ناپیوستگی یعنی شیب (۰ یا ۹۰) درجه باشد شیب صفر درجه در زه افقی، بارگذاری عمود با شیب ۹۰ درجه در زه موازی با بارگذاری باشد و مقاومت همچنان یکسان است در بعضی از زوایا مقاومت ناپیوستگی به شدت کاهش می یابد.



$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan\phi_w)}{(1 - \cot\beta_w \tan\phi_w)\sin 2\beta_w}$$

مفهوم این فرمول بیانگر این نکته می باشد که بلوک شروع به لغزش می کند.





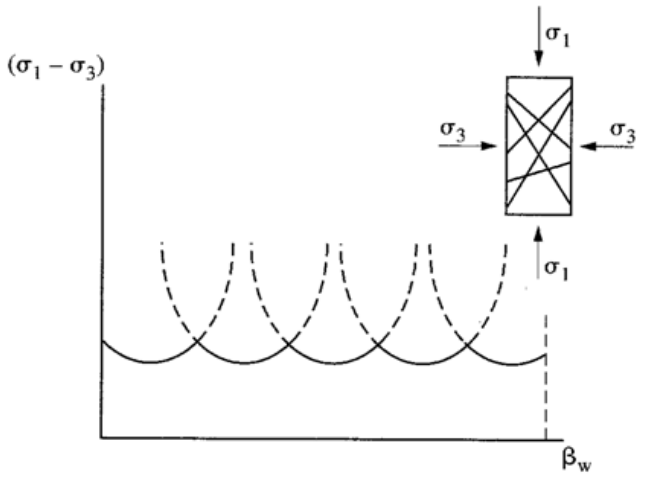
A) این دایره مربوط به حالتی است که یک سطح ناپیوستگی، گسیختگی اتفاق می افتد.

B) این دایره مربوط به محدوده ای از ناپیوستگی ها است یعنی تعدادی از ناپیوستگی ها حضور دارند و روی هرکدام از آنها ممکن است گسیختگی اتفاق می افتد.

C) این دایره مربوط به گسیختگی سنگ بکر است تنش خیلی زیادی لازم است تا سنگ بکر گسیخته شود به همین دلیل دایره آن از دو دایره دیگر بزرگتر می باشد.

سوال) آیا بلوکی که در دیواره است ناپایداری آن روی شکستگی یا سنگ بکر است؟ پوش موهر آن بلوک را رسم کرده هرگاه به پوش شکستگی سطح ناپیوستگی (پوش دایره A) رسید می گوییم ناپیوستگی نقش کلیدی در ناپایداری دارد سپس بلوک گسیخته می شود و هرگاه از آن عبور کند به پوش شکستگی سنگ بکر (پوش دایره C) رسید می گوییم ناپایداری زیر سر سنگ بکر قرار دارد.

نکته: همواره در سنگ بکر تنش زیادتری نیاز به شکستن دارد چون سنگ اولاً باید تنش بالایی داشته باشد تا سنگ بشکند تا سطح شکستگی گسترش پیدا کند و لغزش به وجود آورد.



نکته: زمانی که تعداد ناپیوستگی ها زیاد می شود به دلیل اینکه کمی قفل شده بین آنها ایجاد می شود مقاومتشان کمی بیشتر می شود.

نکته: وقتی بطور زنجیری به هم وصل می شوند مقاومت شان بالا می رود و بین آنها قفل شدگی ایجاد می شود.

فصل دوم

انواع تنش‌ها و نقش هرکدام در ناپایداری

و عوامل ناپایداری

تنش: یکی از اصول مکانیک است که دو شرط اصلی وجود دارد بایستی تنش‌ها در مهندسی مکانیک سنگ فهمیده شوند.

تنش: نیرو بر واحد سطح گفته می‌شود.

۱- به علت وجود تنش‌های اولیه که قبل از ایجاد سازه وجود دارند و ما نیاز داریم آنها را بفهمیم زیرا آنها در آنالیز و طراحی قابل استفاده هستند.

۲- بعد از ایجاد سازه و در اثر حفاری، حالت تنش بطور چشمگیری عوض می‌شود و این به این دلیل است که سنگی که قبلاً تنش را تحمل می‌کرده است برداشته شده و بارها و فشارها آشفته شده و مجدداً در جهت توزیع تنش جدید تغییر حالت می‌دهند

هدف از مطالعه تنش‌های اولیه:

۱- تعیین جهت تنش‌ها

۲- تعیین شکل مقطع

۳- تعیین نوع مقطع

انگیزه اصلی جهت تعیین تنش های برجا:

۱- بدست آوردن دانش پایه از حالت تنش ها (بزرگی و جهت تنش های اصلی).

نکته: جهت تنش ها در جایی که سنگ احتمال گسیختگی دارد.

۲- به منظور بدست آوردن دانش معین و مشخص از شرایط مرزی برای آنالیز تنش ها در طراحی پروژه های مهندسی.

منابع تنش های اولیه:

۱- تنش های ثقلی ۲- تنش های تکتونیکی ۳- تنش های محلی ۴- تنش های گرمایی ۵- تنش های باقی مانده

علت وجود تنش های اولیه:

در یک منطقه زمین شناسی با افزایش رسوب گذاری به مرور زمان وزن طبقات فوقانی زیاد شده تنش وارده بر نقطه مورد نظر افزایش می یابد که بعد از مدتی رسوب گذاری متوقف می شود و سیمانی شدن و تراکم شدن به وجود می آید و مواد به سنگ تبدیل می شود دوباره بعد از مدتی ممکن است عوامل فرسایشی مثل باد، باران، . . . . . اثر نموده و مقداری از ارتفاع طبقات را کم نمایند و در نهایت ضخامت باقی مانده تنشی را در زمین ایجاد می کند که به تنش اولیه موسوم می باشد.

با مطالعه تنش ها می توان جهت آن را در زمین تشخیص داد و در نهایت شکل مقطع تونل و یا سازه زیرزمینی را طوری تغییر و یا انتخاب کرد تا کمترین فشار وارده بر سازه اعمال و یا پایداری سازه را بیشتر نمود در این حالت اگر جهت تنش اصلی ماکزیمم در راستای ثقلی باشد بایستی سعی شود کوچکترین بعد سازه در راستای عمود بر محور تنش ماکزیمم قرار گیرد.

نکته: معمولاً ضلع بزرگ حفاری در امتداد عمود بر تنش اصلی بزرگ قرار داده نمی شود.

چنانچه تنش های اولیه معلوم و شدت تنش های اولیه زیاد باشد بایستی مقطع تونل یا سازه را طوری انتخاب نمود تا کمتر تحت تأثیر تنشهای موجود قرار بگیرد که در اینصورت مقطع دایره بهترین مقطع می باشد به علت اینکه در گوشه های مقاطع جعبه ای تمرکز تنش ایجاد شده و باعث ناپایداری سازه می گردد.

نکات در انتخاب شکل مقطع:

۱- در زمین های نرم و سنگهایی که دارای شرایط تورمی هستند، بهتر است شکل دایره ای انتخاب گردد.

۲- در مناطقی که تنش های اصلی حداقل و حداکثر دارای اختلاف زیادی باشند شکل بیضوی پیشنهاد می گردد به ترتیبی که محور بزرگتر هم امتداد تنش اصلی حداکثر قرار گیرد.

۳- شکل چاهها عمدتاً دایره ای است بالاخص زمانی که مقطع چاه زیاد باشد که این انتخاب به علت ایجاد تمرکز تنش در گوشه های مقاطع غیردایره ای است لذا به ندرت چاهها با مقاطع مربع ویا مربع مستطیل حفر می شوند.

۴- در مناطقی که تنش های افقی زیاد باشد شکل دایره ای با نعل اسبی کامل پیشنهاد می گردد.

۵- در مناطقی که تونل ها با TBM حفر می شوند شکل سازه قطعاً دایره ای کامل می باشد.

۶- در محیط های نسبتاً سخت شکل نعل اسبی اصلاح شده و در تونل های انتقال آب نعل اسبی کاملاً توصیه می شود.

تنش های ثقلی: این تنش ها ناشی از وزن طبقات فوقانی بوده و در راستای قائم اعمال می شوند از آنجایی که ممکن است سنگهای فوقانی بصورت لایه ای و با لایه های افقی و یا شیب دار در محیط های خشک و آبدار واقع شده باشند تنش براساس وزن واحد حجم سنگها و در راستای شاقولی محاسبه خواهد شد بنابراین حالات مختلف در زیر مورد بررسی قرار می گیرد:

۱- اگر طبقات فوقانی از یک لایه تشکیل شده باشند. $\delta_V = \gamma h$

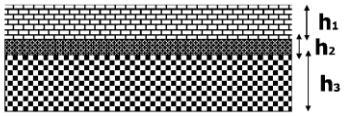
γ: وزن واحد حجم سنگ ها $(\frac{kg}{m^3})$

h: ارتفاع طبقات فوقانی (m)

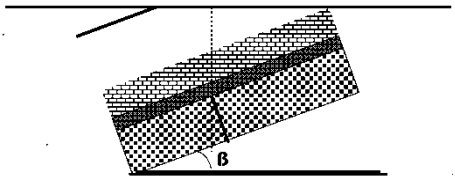
۲- اگر چند لایه مختلف موجود باشد.

$$\sigma_v = \gamma.h$$

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i.h_i$$



۳- طبقات فوقانی شیبدار باشند.



نکته: در صورت شیبدار بودن لایه ها ضخامت ظاهری در تعیین تنش ثقلی لحاظ می گردد.

۴- اگر سفره آب زیرزمینی وجود داشته باشد معمولاً بالای سطوح سفره یک ناحیه اشباع و زیر آن سطح، فشار آب منفذی خواهد بود در این حالت مقدار تنش قائم از رابطه زیر محاسبه می شود. که در این رابطه از سمت چپ به راست سطح است که مربوط به لایه های منطقه بالای ناحیه اشباع، منطقه اشباع، منطقه زیر سطح ایستابی می باشند.

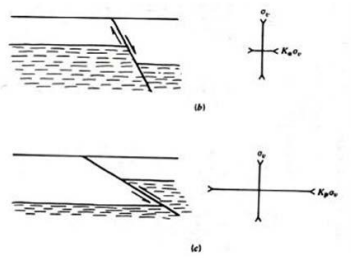
$$\sigma_V = \gamma_i Z_i + \gamma_{sat} Z_{sat} + \gamma_b Z_b$$

تنش های تکتونیکی: این تنش ها ناشی از حرکات کوهزایی و گسل می باشند عوامل تکتونیکی نقش بسیار مهمی در تنش های افقی دارند و تأثیر این عوامل در محل برخورد با پوسته های اقیانوسی و قاره ای مشخص است بطور کلی به علت حرارت فوق العاده زیادی که در گوشه زمین وجود دارد یک جریان کنوکسیونی (رفت و برگشتی) در ماگما پدید می آید. هنگام انجام

فعالیت های هسته ای در گوشه انرژی زیادی آزاد می شود و آثار این انرژی در پوسته زمین ظاهر شده و این آثار می تواند لرزش ها و اصوات قابل حسی تولید نمایند و این پدیده ها سبب به وجود آمدن صدماتی در پوسته زمین می شوند برای تعیین تنش های تکتونیکی روش ریاضی و محاسباتی خاصی وجود ندارد و تنها راه تعیین آنها اندازه گیری آنها می باشد.

تنش های تکتونیکی کره زمین یا در حالت فعال و یا غیر فعال هستند جهت اندازه گیری بایستی شکستگی ها را تشخیص داد و در محدوده های آنها میخ کوبی کرده و با دوربین نقشه برداری جابجایی آنها اندازه گیری می شود اما جهت تنش ها را می توان دقیقاً بدست آورد. در بعضی از مناطق فعالیتهای تکتونیکی منطقه ای نظیر حرکت در امتداد صفحه گسل و یا حرکت کوهزایی ایجاد تنشهای افقی می نمایند که گاهی از تنش های عمودی بیشتر هستند و امتداد آنها را می توان با استفاده از روشهای متداول در زمین شناسی ساختمانی محاسبه کرد این تنشها در مناطق نزدیک به زونهای زلزله خیز و کوهزایی وجود دارند و نکته مهم در مورد تنش های تکتونیکی آن است که تنها جهت تنش های اصلی را می توان براساس وضعیت گسل در منطقه تشخیص داد و مقدار آنها قابل ارزیابی کمی نیست. تعیین تنش های افقی و قائم و جهت آنها زمانی که عوامل تکتونیکی اتفاق افتاده است.

یکی از ساده ترین حالت های تکتونیک نیروهایی هستند که باعث جابجایی پوسته می شوند و گسل به وجود می آورند که ۲ نوع اصلی از گسل ها عبارت انداز:



الف) گسل نرمال

ب) گسل معکوس

گسل نرمال: این گسل با افق زاویه ۶۰ درجه می سازد یعنی شکستگی در امتداد صفحه ای رخ می دهد که این صفحه با افق زاویه ۶۰ درجه می سازد و در حین تشکیل این گسل ها نظر بر این است که تنش اصلی ماکزیمم در امتداد قائم اثر کرده است.

طبق رابطه موهر- کولمب:

$$\frac{\delta_3}{\delta_z} = ka \qquad \delta_1 = \delta_c + \delta_3 \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$$

$$\delta_1 = \delta_z \rightarrow \delta_z + ka\, \delta_z \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$$

$$\frac{\delta_z}{\delta_z} = \frac{\delta_c}{\delta_z} + ka\, \frac{\delta_z}{\delta_z} \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$$

$$1 = \frac{\delta_c}{\delta_z} + ka \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \rightarrow ka = \frac{1 - \frac{\delta_c}{\delta_z}}{q}$$

$$q = \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$$

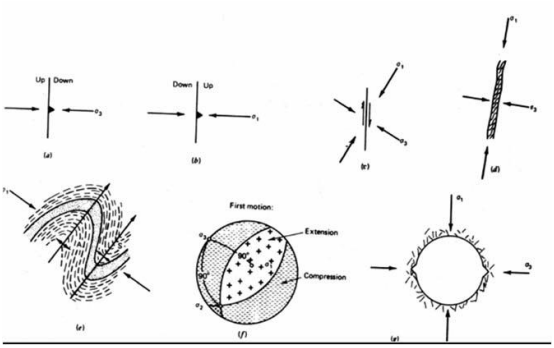
گسل معکوس: شکستگی در امتداد صفحه ای رخ می دهد که این صفحه با افق زاویه ۳۰ درجه تشکیل می دهد.

طبق رابطه موهر- کولمب:

$$\delta_1 = \delta_c + \delta_3 \, tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \rightarrow \delta_1 = \delta_c + \delta_3 q$$

$$kP \; \delta_z = \delta_c + \; \delta_z q \rightarrow kP = \frac{\delta_c}{\delta_z} + q \qquad ka < k < kP$$

وضعیت جهت تنش ها نسبت به ساختارها:



۱- اگر در زمین دایک موجود باشد δ_3 عمود بر صفحه دایک می باشد δ_1 در امتداد آن می باشد.

۲- اگر چین خوردگی داشته باشیم می توان حدس زد δ_1 در امتداد لایه هایی است که چین خورده اند.

۳- اگر چین خوردگی در عمق زمین باشد تنش قائم در زیر ناو تقریباً ۶۰ درصد بیشتر از حالت طبیعی است.

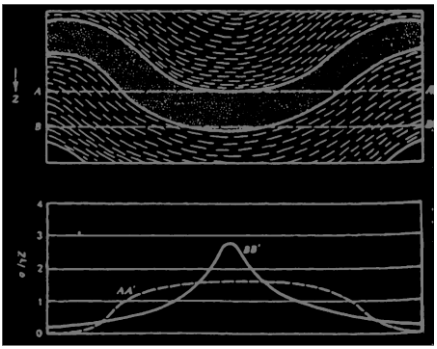
۴- اگر لایه ها افقی باشند با افزایش ضخامت لایه ها شدت تنش ها بیشتر می شوند.

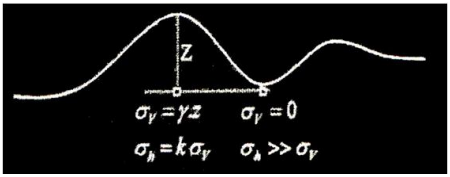
۵- اگر لایه ها به شکل ناودیس درآمده باشند ماکزیمم شدت تنش در زیر ناو می باشد.

۶- اگر لایه ها به شکل طاق درآمده باشد حداقل تعداد تنش در زیر طاقدیس می باشد.

۷- اگر گسلی در منطقه اتفاق افتاده باشد شدت تنش ها در محل گسل افزایش می یابد.

جهت تنش ها در زمین و نقش ساختارها در توزیع تنش ها:





فاکتور تکتونیکی: پارامتری است که مقدار کرنش جانبی تولیدشده در اثر نیروهای تکتونیکی در داخل زمین را بیان می کند این فاکتور با تقسیم کردن تنش جانبی تکتونیکی بر مدول الاستیسیته بدست می آید.

σ_1: تنش جانبی ماکزیمم υ: ضریب پواسون

σ_V: تنش قائم E_M: مدول الاستیسیته اندازه گیری شده

$$TF = \frac{(\frac{\sigma_1 - \sigma_V \upsilon}{1 - \upsilon})}{E_M}$$

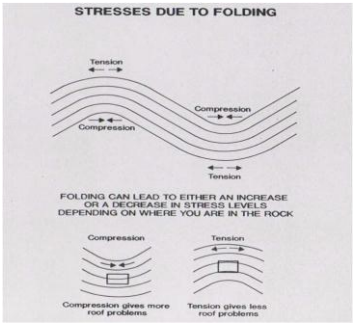
نکته: فاکتور تکتونیکی با افزایش عمق، افزایش می یابد که این حالت برای حالت کرنش بیشترکه در عمق های بیشتر وجود دارد سازگار است.

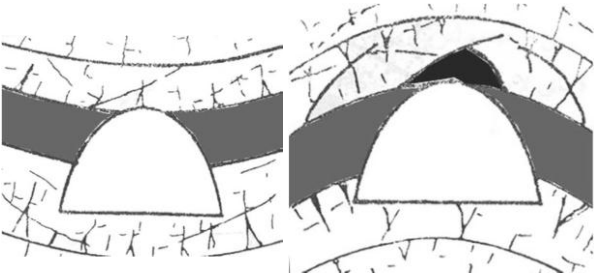
وضعیت تنش ها در واقع چه پارامترهایی را مشخص می کند:

ناپیوستگی ها، غیرهمگن بودن سنگ، خصوصیات متمرکز در محل سازه زیرزمینی.

تنش های محلی: این تنشها به علت عدم یکنواختی در پوسته جامد زمین به وجود می آیند بطوری که در قسمت طاقدیس تنشهای کششی وجود دارد و در گودی ها و نادیس ها تنش ها فشاری می باشند. همچنین در گنبدهای نمکی به علت عدم یکنواختی جنس گنبد نمکی و سنگهای اطراف یک توزیع تنش نامتقارن بر روی گنبد نمکی به وجود می آید. بطور کلی تا زمانی که در منطقه ای پوسته زمین دچار لغزش و شکستگی نشده است تنش های تکتونیکی برای آن منظور نشده و به جای آن تنش های محلی که ناشی

از تغییر شکل پوسته زمین است را در نظر می گیرد از جمله مناطق چین خورده می باشند.





تنش های گرمایی: این تنش ها به علت اختلاف جنس مواد و سنگهای اطراف و همجوار توده ها و رگه های نفوذی ماگما که از اعماق زمین به طرف سطح زمین حرکت می نمایند ناشی می گردد گفتنی است که میزان و جهت تنش ها قابل محاسبه و پیش بینی نمی باشند.

تنش های باقیمانده: منشأ اینگونه تنش ها به تبلور کانی ها باز می گردد مقدار این تنش ها بسیار جزئی است بطوری که در ناپایداری تونل ها نقشی ندارند اما در حفاری به منظور انتخاب سرمته ها بایستی در نظر گرفته شوند.

نکته: بزرگی تنش های جانبی به سختی سنگ بستگی دارد.

سنگ هایی با سختی بالاتر نسبت به سنگ هایی با سختی کمتر تنش های بیشتری را جذب می کنند. هنگام متقاوت بودن لایه ها با سختی های متقاوت، توزیع تنش در داخل سنگ متناسب با سختی انجام می گیرد

نکته: با افزایش عمق تنش های جانبی افزایش می یابند بطوری که زمینه لازم را برای انتقال تنش های افقی بیشتری به داخل زمین در اثر حرکت در طول ناپیوستگی ها مهیا می سازند.

زمانی که تنش تولید شده از مقاومت سنگ بیشتر شود سقف گسیخته می شود به محض گسیخته شدن لایه های مجزا در سقف، لایه ها خمیده می شوند و به سمت پایین فشار می آورند بطوری که باعث تغییر شکل سقف می شوند. زیرا اساساً تنش های اولیه به واسطه این لایه های مجزا کنترل و حمل می شدند اگر این تنش های تولید شده از مقاومت تک تک لایه ها بیشتر باشند پس گسیختگی های جدید تری در قسمت بالاتر سقف ایجاد می شود این پروسه گسیختگی ادامه دارد تا سنگ به حالت تعادل برسد.

محاسبه تنش های افقی: از آنجایی که تنش های افقی به تنش های قائم وابسته هستند لذا قبل از بررسی سایر منابع تنش های اولیه تنش های افقی را مطرح می نمایم.

بطور کلی اگر جنس لایه ها متفاوت باشد در یک عمق یکسان δ_h های مختلف بدست خواهد آمد که این در واقع به خاطر این است که δ_h به دو عامل بستگی دارد: الف) δ_V ب) جنس سنگ ها

چون در یک عمق یکسان ولی در جاهای مختلف ممکن است هم δ_V و هم جنس سنگ ها متفاوت باشد بنابراین δ_h های مختلف بدست خواهد آمد. تنش های افقی ممکن است بصورت کششی و یا فشاری واقع شده باشند.

۱- نظریه هیم : طبق این قانون سنگ ها در اعماق زیاد قادر به تحمل اختلاف تنشها نیستند به همین علت بعد از مدت زمان معینی تنش های افقی به مقدار تنش های قائم می رسند و یا با آن مساوی اند این تساوی یک حالت هیدروستاتیک را به وجود می آورد این قانون تقریباً کاربرد خوبی در سنگ های ضعیف و زغال سنگ و سنگ های تبخیری دارد.

فرضیات این نظریه برای زمانی که سنگ ها با تنش های وارده مواجه شوند به صورت زیر می باشد:

۱- اختلاف تنش های اصلی حداکثر و حداقل باعث ناپایداری احتمالی سنگ می شود.

۲- رفتار سنگ در طول زمان ثابت نبوده و متناسب با زمان مقاومت سنگ نسبت به تنش های وارده کم می شود.

۳- اگر تنش های وارده بیش از ۵۰ درصد مقاومت نهایی باشد داخل سنگ ترک های موئی ایجاد می شود. رفته رفته با

افزایش عمق این شرایط منجر به حالتی می شود که تنش های افقی برابر تنش قائم در توده سنگ می شود(k=1) که مشابه رفتار خمیری یا شکل پذیری کامل است.

۴- برای مناطق نزدیک سطح زمین مقدار k برابر با صفر می باشد.

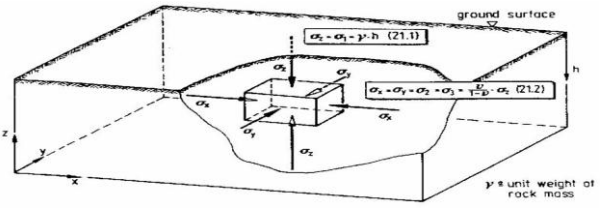
۵- برای مناطق با عمق متوسط (حالت الاستیسیته یا رفتار الاستیک) مقدار k از رابطه ترزاقی بدست می آید.

۶- برای مناطق عمیق (حالت خمیری- لیتوالاستیک) مقدار k=1 می باشد.

۲- نظریه ترزاقی وریچارد: این افراد در نظریه خود سنگها را همو ژن وایزوتروپیک والاستیک فرض کرده اند، وقتی المانی از سنگ در اعماق زیاد تحت تأثیر تنش های مختلف ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$) قرار بگیرد طبق تئوری الاستیسیته مقدار تغییر شکل در این المان سنگ برابر است.

$$k = \frac{\upsilon}{1-\upsilon}$$

بر طبق این نظریه در زیر زمین المانهای سنگ آزاد نیستند و در امتداد های y و x نمی توانند تغییر شکل پیدا کنند.



تنش در مناطق دارای توپوگرافی غیر مسطح:

تنش اصلی حداکثر نزدیک سطح زمین تقریباً به موازات شیب می باشد و در نزدیک قعر دره یا عمیقترین نقطه دره بصورت عمود بر جهت شیب اثر می کند و همچنین با افزایش عمق مقدار آن افزایش می یابد.

در یک حالت خاص و در صورتی که سطح زمین دارای توپوگرافی مسطح نبوده و شامل یک سری توده و دره های پی در پی باشد چگونگی تنش های اولیه بستگی به توپوگرافی منطقه و نحوه توزیع بار ناشی از آن دارد.

در صورتی که مقدار تنش بر جا در نقطه ای در عمق Z از سطح زمین و در زیر کوهی به ارتفاع قله H مورد نظر باشد جهت اصلاح مقدار تنش روابط بصورت زیر تصحیح می شوند.

$$\sigma_V = \gamma . Z + \Delta\sigma_V$$

$$\Delta\sigma_V = n . P \qquad \rightarrow \qquad P = \gamma . H$$

Z: فاصله قائم مورد نظر در قله کوه تا سطح زمین H: فاصله سطح زمین تا قله کوه

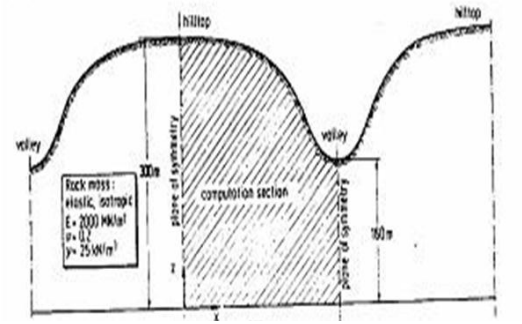
n: ضریب بر حسب نسبت Z به فاصله افقی تصویر قله کوه بر روی سطح زمین.

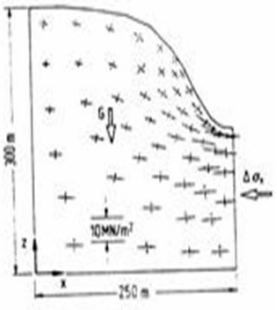
بطور مشابه جهت تخمین تنش افقی می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\sigma_H = K.(z.\gamma) + \Delta\sigma_H$$

$$\Delta\sigma_H = n.p$$

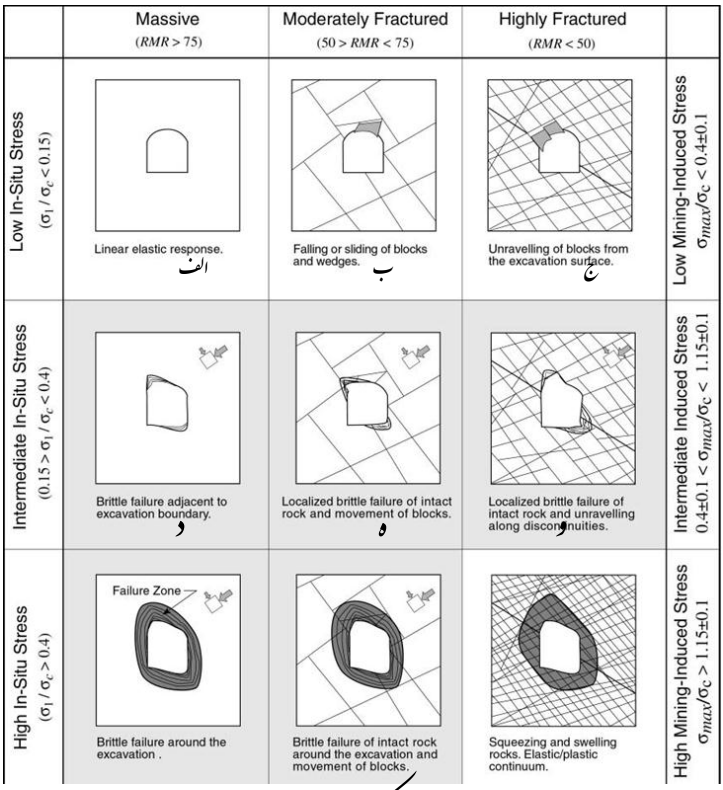
درصورتی که نقطه مورد نظر در زیر رأس کوه نباشد یک روش تخمینی جهت تعیین تنش های افقی وقائم برجا در نقطه مفروض بکار برده می شود.





فصل سوم

تنش های القایی و توزیع تنش های القایی در اطراف تونل ها



الف) برای این تونل هیچ اتفاقی نمی افتد در چنین محیطی سنگ بکر است و تنش پایین است و نیاز به هیچ سیستم نگهداری ندارد.

ب) ناپایداری در اثر شکستگی ها می باشد زیرا تنش کم است به محض حفر تونل در اثر تلاقی شکستگی ها اولین بلوک آزاد می شود یا سقوط یا می لغزد.

ج) تعداد قطعات بلوک های ناپایدار بیشتر می شود و باز هم تنش کنترل کننده تونل نیست. شکستگی ها کنترل کننده تونل اند

د) تونل را گرد حفر می کنند که مشکل لپ پر شدن آن حل شود.

ه) گوشه های تونل بیشتر می پرد.

و) ناپایداری ترکیبی از شکستگی ها و تنش می باشد.

ز) در مقطع تونل زون خرد شده است و گیرکنندگی اطراف تونل رخ می دهد.

ک) در اطراف تونل شکستگی هایی رخ داده که در اثر تنش به های تونل می پرد.

ر) مثل چون خمیر عمل می کند (مچاله شوندگی)

نکته: $\frac{\sigma_1}{\sigma_C} = 0.15$ یعنی تنش ۱۵ درصد مقاومت می باشد که در اینجا تنش پایین می باشد.

نکته: $0.4 > \frac{\sigma_1}{\sigma_C} > 0.15$ با بالا رفتن تنش گوشه های تونل می پرد.

نکته: اگر تنش بزرگتر از مقاومت شود شکست ایجاد می شود.

نکته: در محیط تنش پایین که میزان تنش ها کمتر از ۱۵٪ مقاومت سنگ بکر باشند و محیط دارای شکستگی باشد پایداری تونل تابع فاصله داری شکستگی ها است و تنش ها هیچ نقشی در ناپایداری تونل ندارند.

نکته: زمانی که RMR<50 باشد و تنشها بیشتر از ۴۰٪ مقاومت شوند رفتار سنگ مثل رفتار محیط های خمیری است مانند حفر تونل در محیط رسی می شود.

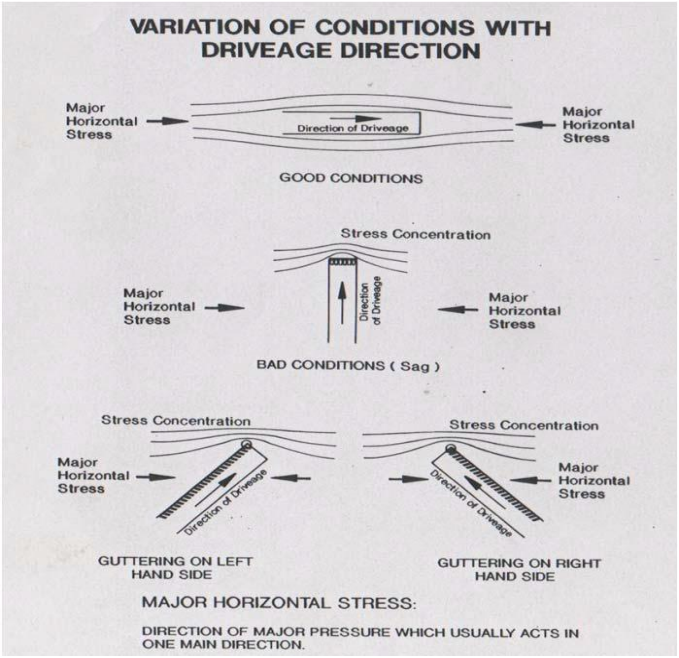
نکته: RMR زیر ۵۰ باشد مثل قندجه می باشد.

نکته: در طراحی نباید اجازه داد تا تنش بیشتر از ۲۵٪ شود.

(۱) برای اینکه پایداری تونل خیلی زیادتر می شود بهترین راستای تونل این است که محور تونل به موازات تنش اصلی ماکزیمم قرار بگیرد و در اینجا شرایط خوب می باشد.

(۲) در اینجا پدیده سگینگ رخ می دهد یعنی شکم می گیرد و خم می شود پس در اینجا شرایط بد می باشد

نکته: اگر محور تونل عمود بر تنش اصلی ماکزیمم حرکت کند سقف دچار پدیده سگینگ می شود و همچنین باعث این می شود



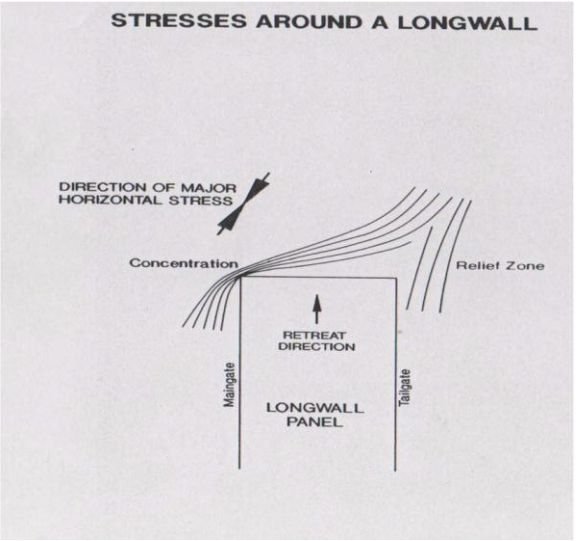
(۱)

(۲)

(۳)

که در گوشه ها تمرکز تنش داشته باشیم و خمش در سقف و ناپایداری و شکم دادگی در دیواره ها داشته باشیم.

(۳) اگر تونل ها نسبت به تنش اصلی ماکزیمم زاویه دار باشد سقف و دیواره ها ورق ورق کنده می شوند و به پایین می ریزد برای حل این مشکل باید با بولت های بلندتر و محکم تر با تقویت بیشتر از ریزش جلوگیری کرد.



نکته: برای اینکه پایداری تونل بیشتر می شود جهت تونل را عوض کرده و به موازات تنش اصلی در جهتی که در شکل بالا نشان داده شده است پیشروی نمود اما در اینجا به دلیل اینکه روش جبهه کار طولانی است نمی توان جهت را عوض کرد پس بایستی به کمک وسایل تقویتی نقاط مورد نظر را محکم کرد تا ریزش نکند.

نکته: اگر تنش اصلی را زیاد کنیم لایه ها به سمت فضای خالی می شکنند و می ریزند.

در پدیده (Static Roof) صفحات لایه بندی سالم باقی می مانند و سقف به عنوان یک توده یکپارچه عمل می کند

انبساط الاستیکی سقف فقط جابه جایی های کوچک ایجاد می کند و خود نگهداری به خاطر چسبندگی بین لایه ها و فشار درزه های قائم که به وسیله تنش های افقی اعمال می شود می باشد.

نکته: اگر ۴ لایه زیر هم داشته باشیم در اینجا بایستی با راک بولت لایه های پایینی را به بالایی بدوزیم زیرا با توجه به خصوصیت مان خمشی این لایه ها با هم خم نمی شوند.

BUILD A STRUCTURAL ROOF

نکته: در اینجا پدیده سگینگ (شکم دادگی و خم شدن) رخ می دهد.

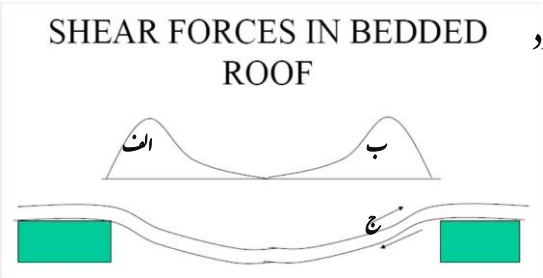
نکته: وقتی که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از بین برود در واقع مقاومت برشی از بین رفته و زمانیکه مقاومت برشی از بین می رود و در نهایت سقف نا پایدار می شود.

:Buckling Roof (Slender Columns)

۱- گیرگتگی کشش (نبود چسبندگی صفحات) صفحات لایه بندی ۲- سقف به واحدهای مستقل کوچکتر تقسیم می شود.

۳- جابجایی سقف زیاد می شود ۴ - به عنوان محصولی از جابجایی های قائم، برش در صفحات لایه بندی ایجاد می شود

نکته: جایی که ممکن است معان ماکزیمم شود تنش برشی صفر می شود.



الف) تنش برشی در تونل های لایه ای در اینجا ماکزیمم می باشد.

ب) دیاگرام تنش برشی روی سقف بدین شکل می باشد.

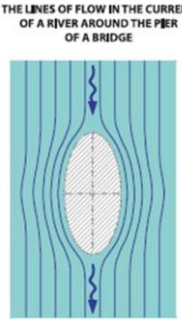
ج) زمانی که لایه ها خمیده می شوند قسمت های نشان داده شده به برش می افتد.

نکته: اگر در تونلی دو عدد بولت داشته باشیم بهتر است که آن را در گوشه های تونل بزنیم نه در وسط تونل چون در وسط بی فایده می باشد.

نکته: اگر برای نگهداری، چوب در اختیار داشته باشیم بهتر است آنها را کمی جلوتر از دیواره ها و در گوشه ها نصب کنیم و نه در زیر سقف.

تنش های القایی: تنش هایی هستند که در اثر ایجاد حفره تبدیل به تنش های القایی می شوند.

تنش های القایی تابعی از: تنش های اولیه، عمق سازه، شکل هندسی سازه، فاصله از دیواره سازه، جنس سنگ ها.



نکته: معمولاً تنش القایی از تنش اولیه بیشتر می باشد.

نکته: تنش القایی در بعضی جاها بیش از تنش اولیه قرار دارد و در بعضی جاها کمتر از تنش اولیه می باشد به همین دلیل تنش القایی با مقاومت سنگ سنجیده می شود یعنی اگر بخواهیم فاکتور ایمنی را محاسبه کنیم از تنش القایی استفاده می کنیم.

پدیده (channelling) شکل آن قوسی است که به وجود می آید و تنش القایی را کم می کند و پایداری را در آن منطقه بالا می برد البته اگر کشش بیش از مقاومت کششی سنگ وارد نشود.

channeling به چه عواملی بستگی دارد:

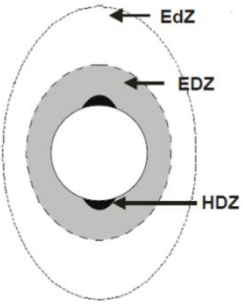
۱- اندازه تنش هایی که در محل وجود دارد ۲- مقاومت سنگ ۳- خواص تغییر شکل زمین به طوری که ممکن است این تغییر شکل نزدیک حفره باشد یا تغییر شکل دور از حفره باشد یا ممکن است اصلاً تغییر شکل تشکیل نشود.

نکته: اگر هیچ تغییر شکلی در دیواره تونل تشکیل نشود یعنی زون آشفته صفر است و زمانی که زون آشفته صفر باشد یعنی تونل خود نگهدار است.

نکته: در سنگ های نرم زون آشفته در فاصله دور دست تشکیل می شود.

نکته: هرچه که ابعاد حفره بزرگتر شود ناپایداری بیشتر می شود.

نکته: هرچه ابعاد حفره کوچکتر می شود قفل شدگی بیشتر می شود پایداری بیشتر می شود.



نکته: هر حفره ای که ایجاد می شود که زون آشفته اطراف آن به وجود می آید.

نکته: داخل این زون آشفته یک قسمت است که تخریب می شود.

نکته: هر زون آشفته ای مثل ساز نیست.

EDZ: زونی است که تغییرات هیدرومکانیکی (نفوذ آب) و ژئوشیمیایی (هوازدگی) بدون تغییرات زیادی در جریان و خواص انتقالی سنگ به وجود می آید. این زون تخریب شده ناشی از ایجاد حفره خطرش خیلی بیشتر از زون آشفته اطراف (EdZ) حفره می باشد.

نکته: این تغییرات می توانند باعث کاهش یا افزایش نفوذپذیری شوند.

نکته: HDZ خطرناک تر از EDZ و EDZ خطرناک تر از EdZ است.

نکته: نفوذپذیری موثر در زون HDZ به علت وصل شدن تمام شکستگی ها به هم خیلی بیشتر است که این بیش از نفوذپذیری موثر سنگ غیرآشفته می باشد.

نکته: زون HDZ جایی وجود دارد که تنش ها به اندازه کافی از مقاومت سنگ بیشتر باشند جایی که تنش ها از مقاومت سنگ خیلی بالاتر رفته باشند یا جایی که روش حفاری باعث خردشدگی زیاد شده باشد.

نکته: پوش زونی که در آن خواص سنگ تغییر کرده و سیستم فراکچرها بطور معنی داری عوض می شوند (خردشدگی زیاد)

نکته: پوش زونی که در آن ترک های بزرگ تشکیل شده و تونل پوسته پوسته می شود و به پایین می ریزد.

نکته: توسعه زون HDZ تابع فراکچرهای ناشی از حفاری و انفجار می باشد.

نکته: تغییر زون HDZ در شکل a,b ناشی از ترک هایی است که از قبل وجود داشته اند.

نکته: تغییرات هر سه زون تابع پترن درزه ها می باشد.

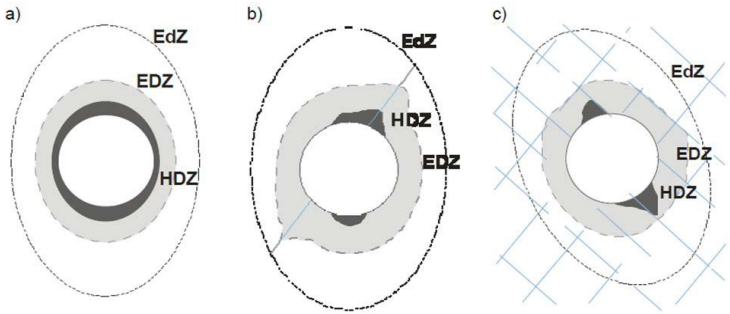
نکته: از زون HDZ هیچ انتظاری نمی توان داشت این زون ریزشی می باشد.

نکته: EDZ زونی است که نیاز به کمک دارد معمولاً این زون می ریزد ولی اگر سیستم نگهداری را بلافاصله اجرا کنیم می توانیم از ریزش این زون جلوگیری کرد.

نکته: زون EdZ یک زون آشفته است نمی تواند ما را خیلی نگران کند. اما اگر قرار است پروژه برای دراز مدت زیر فشار زون آشفته باشد بایستی سیستم نگهداری نصب کرد.

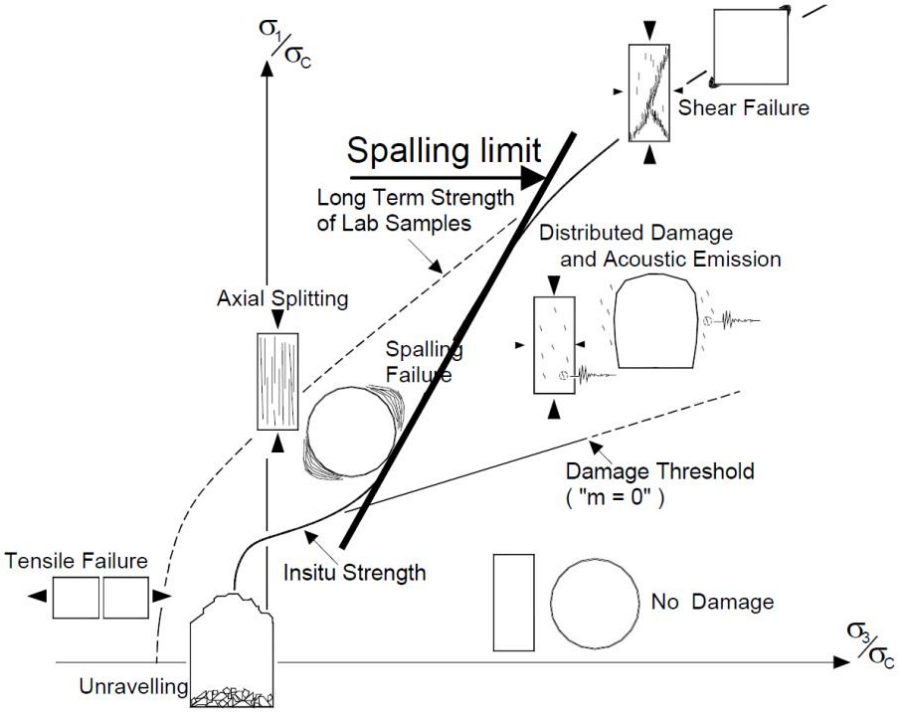
نکته: با بالا رفتن نفوذپذیری آبهای اطراف تونل همه به سمت داخل تونل سرازیر شوند و حتی به سمت داخل تونل می آیند و بلوک های سنگی را نیز به سمت داخل تونل فشار می دهند.

نکته: زون HDZ نفوذپذیری بالایی دارد زیرا خردشدگی در این زون خیلی زیادی می باشد.



در نواحی کشش شرایط بسیار خطرناکی به وجود می آید؟ چرا؟ چون مقاومت کششی ۱۰٪ مقاومت فشاری است پس باید نگران نواحی در اطراف تونل بود که به کشش نیافتد.

چرا سقف ها زودتر می شکنند؟ چون تنش ها به دو طرف می روند و سقف به کشش می افتد اگر سقف به کشش نیافتد به هیچ سیستم نگهداری احتیاج ندارد چون فشاری روی آن نمی باشد و فشارها به دو طرف منتقل شده اند.



اگر σ_1 بالا نرود و فقط σ_3 بالا رود سنگ کیخته نمی شود زیرا σ_3 به تنهایی باعث افزایش مقاومت می شود یعنی با بالا رفتن σ_3 صفحه برش تشکیل می شود البته بایستی σ_1 بالا رود.

در این گراف σ_3 خیلی زیاد نیست تونل به برش می افتد و ترک های برشی در اینجا شکل می گیرند.

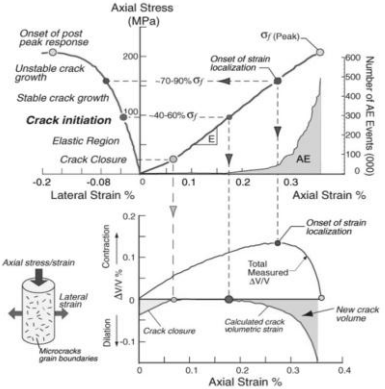
اگر در این نواحی که تحت فشار قرار می گیرد تونلی زده شود در آن بصورت ورق ورق به داخل می ریزند.

نکته: ورق ورق شدن در اثر فشار می باشد و مقاومت فشاری تک محوری صفر می باشد.

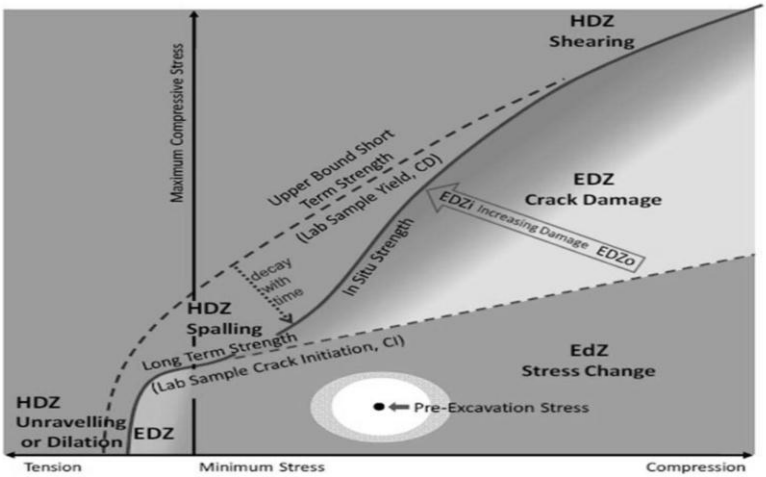
نکته: در این گراف اگر سنگ بخواهد کیخته شود بصورت شکست کششی کیخته می شود و کیختگی بدین صورت است که قسمت های از سقف تونل قطعه قطعه می شود و تحت ترک های شعاعی به پایین می آید.

در این گراف ابتدا ترک ها بسته هستند و در قسمتی بالاتر ترک ها شروع به باز شدن می کنند و به یک جایی که می رسند ترک ها به طور غیر قابل کنترلی رشد می کنند و سنگ در نقطه peak می شکند.

نکته: در اینجا مقدار سطح زیر منحنی مقدار کرنش جمعی می باشد.



در این گراف اطراف تونل ها بسته به مقدار تنش ها و نوع تنش ها است چون ممکن است HDZ در اثر کشش، فشار و یا برش به وجود آید.

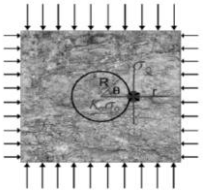


جهت طراحی یک سازه زیرزمینی بایستی طبیعت تنش ها بطور کامل دانسته شود اما گاهی اوقات مشکلاتی وجود دارد که به ناچار فرضیاتی را باید لحاظ کرد از جمله: پیوسته بودن سنگ، همگن، ایزوتروپیک و رفتار الاستیک خطی داشتن است.

روش های تعیین تنش های القایی:

۱-روش تحلیلی ۲- روش عددی ۳- روش فیزیکی ۴- روش تجربی

نکته: روی دیواره تونل اگر R=r باشد تنش برشی



صفر می باشد.

در مکانیک سنگ معادلات کرچ، به صورت گسترده قابل کاربرد و پذیرش می باشند این معادلات بر اساس تئوری الاستیسیته استوار است با استفاده از آنها می توان تنش ها و تغییر شکل های اطراف حفریات دایره ای را بدست آورد.

چون شرایط بررسی وضعیت کرنش صفحه ای است بنابراین در مقطعی از تونل صادق است که کاملاً دور از ابتدا و انتهای تونل باشد و در حقیقت از تأثیر شرایط مرزی دور باشد. تأمین این شرط را می توان در مقطعی به فاصله ای بیش از ۳ برابر قطر تونل از ابتدا یا انتهای تونل مطمئن بود.

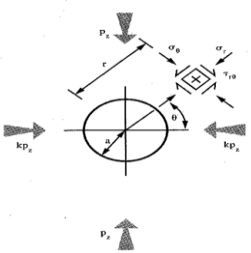
1) $\boldsymbol{\delta_r = \frac{\delta_V(K+1)}{2}\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right) + P_i\ \frac{a^2}{r^2} + \frac{\delta_V(K-1)}{2}\left(1-4\ \frac{a^2}{r^2}+3\ \frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta}$

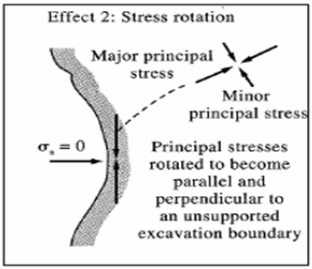
2) $\boldsymbol{\delta_\theta = \frac{\delta_V(K+1)}{2}\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) + P_i\ \frac{a^2}{r^2} + \frac{\delta_V(K-1)}{2}\left(1+3\ \frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta}$

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

δ_V : تنش ثقلی a: شعاع تونل r: فاصله المان از مرکز تونل k: نسبت تنش افقی به قائم

$$\text{K=1}\rightarrow \begin{cases} \boldsymbol{\delta_r = \delta_V\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right) + P_i\ \frac{a^2}{r^2}} \\ \boldsymbol{\delta_\theta = \delta_V\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) - P_i\ \frac{a^2}{r^2}} \\ \boldsymbol{\tau_{r\theta} = 0} \end{cases}$$





با استفاده از این معادلات می توان فهمید که تنش روی مرز حفره برابر است با (r=a)

همانطور که مشخص است اولین تنش صفر است زیرا هیچ فشار داخلی وجود ندارد و تنش آخری نیز برابر با صفر است زیرا مرزی وجود ندارد.

$$\text{r=a} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \boldsymbol{\delta_r = P_i \ \rightarrow \delta_r = 0} \\ \boldsymbol{\delta_\theta = \delta_V(k+1) - P_i - 2\delta_V(k+1)\cos 2\theta} \\ \boldsymbol{\tau_{r\theta} = 0} \end{array} \right\}$$

نکته: روی دیواره تونل تنش القایی شعاعی صفر می باشد اما تنش القایی مماسی داریم.

نکته: اگر $\mathbf{r=\infty}$ باشد یعنی در فاصله ای خیلی دور از محور تونل داریم: $\mathbf{r=\infty} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} \boldsymbol{\delta_r = \delta_V} \\ \boldsymbol{\delta_\theta = \delta_V} \end{matrix} \right\}$

نشان دهنده این است که تنش های القایی به تنش های اولیه رسیده اند و با هم برابر شده اند.

سوال) در چه جاهایی تنش افقی بیشتر از تنش عمودی است؟ $\sigma_1 > \sigma_3$

در مناطقی که چین خوردگی دارند یا مناطقی که تحت تأثیر گسل معکوس قرار دارند.

نکته: در شرایط هیدروستاتیک نسبت تنش ها (k=1) است هیدروستاتیک یعنی $(\sigma_1 = \sigma_3)$

سوال) مقدار تنش های القایی در کجای تونل دو برابر تنش اولیه می باشد؟ چرا؟

در همه جای تونل چون اگر در جای جای اطراف تونل متغیر شد زاویه θ باید در فرمول زیر لحاظ می شود با توجه به این که

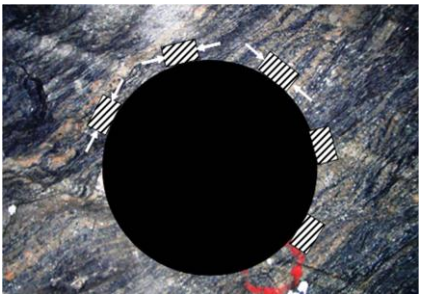
$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_0\left[(1+K_0) + 2(1-K_0)\cos 2\theta\right]$$

شرایط هیدروستاتیک است k=1 که در فرمول مورد نظر اثر زاویه θ نامیده گرفته شد پس در نتیجه اطراف تونل تنش های القایی ۲ برابر تنش اولیه می باشد.

نکته: در حالت هیدرواستاتیک مقدار تنش های القایی مماسی (δ_θ) ۲ برابر تنش اولیه است.

نکته: تنش های القایی شعاعی (δ_r) عمود بر محور تونل می باشند.

سوال) کدام تنش های القایی در ناپایداری تونل ها مخرب هستند؟ تنش های القایی مماسی، زیرا تنش های القایی شعاعی برابر صفر است و تنش های القایی مماسی دو برابر تنش اولیه است که باعث تخریب می شوند.



در این شکل روی دیواره تونل تنش شعاعی صفر است و فقط تنش مماسی داریم و با چرخش المان دور تونل تنش مماسی نیز در حال چرخیدن می باشد.

فاکتور ایمنی: تقسیم عوامل پایداری بر روی تنش القایی مماسی .

نکته: اگر تنش القایی مثبت بود بایستی در صورت کسر مقاومت فشاری را قرار دادو اگر منفی بود باید در صورت کسر مقاومت کششی را قرار داد.

نکته: اگر نسبت تنش ها مخالف ۱ باشد و اما اگر r=a در نظر بگیریم تنش القایی شعاعی برابر صفر می شود.

مقدار تنش القایی مماسی در دیواره تونل در حالت غیر هیدروستاتیک:

(تمرکز تنش در دیواره) $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_V} = 3 - K$ $\sigma_\theta = \sigma_V(3 - K)$

مقدار تنش القایی مماسی در سقف در حالت غیر هیدروستاتیک:

(تمرکز تنش در سقف) $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_V} = 3K - 1$ $\sigma_\theta = \sigma_V(3K - 1)$

$$\delta_\theta = \delta_V(k+1) - P_i - 2\delta_V(k+1)\cos 2\theta$$
$$\theta = 0 \rightarrow \delta_\theta = \delta_V(k+1) - P_i - 2\delta_V(k+1)$$
$$= \delta_V k + \delta_V - 2\delta_V k + 2\delta_V - P_i \rightarrow \delta_\theta = 3\delta_V - \delta_V k - P_i$$
$$= \delta_V(3-k)P_i \rightarrow \delta_\theta = \delta_V(3-k)P_i$$

$$\theta = 90 \rightarrow \delta_\theta = \delta_V(k+1) - P_i - 2\delta_V(k-1)$$
$$\delta_\theta = \delta_V(3k-1)P_i$$

$$P_i = 0 \rightarrow \begin{Bmatrix} \theta = 0 \rightarrow \delta_\theta = \delta_V(3-k) \\ \theta = 90 \rightarrow \delta_\theta = \delta_V(3k-1) \end{Bmatrix}$$

بنابراین ضریب تمرکز تنش از روابط بالا برابر است با:

تمرکز تنش در جداره های تونل $\theta = 0 \rightarrow \frac{\delta_\theta}{\delta_V} = 3 - K$

تمرکز تنش در سقف تونل $\theta = 90 \rightarrow \frac{\delta_\theta}{\delta_V} = 3K - 1$

تمرین) تونل دایره ای به قطر ۴ متر در عمق ۱۰۰ متری در سنگ هایی با وزن مخصوص ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب حفر شده است اگر تونل تحت تنش بیدروستاتیک باشد مطلوب است:

الف) نسبت تمرکز تنش در دیواره و سقف ب) تنش مماسی در سقف و دیواره

نمودار تغییرات تنش مماسی از سقف تا دیواره نسبت به تنش اصلی در اطراف تونل با مقطع دایره ای :

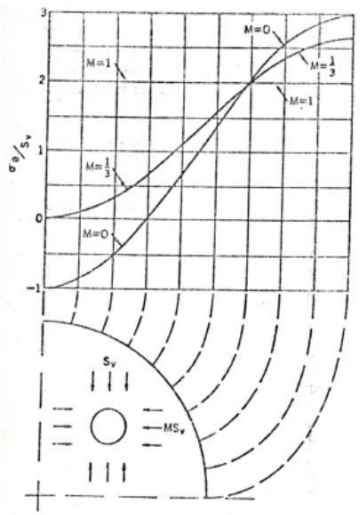
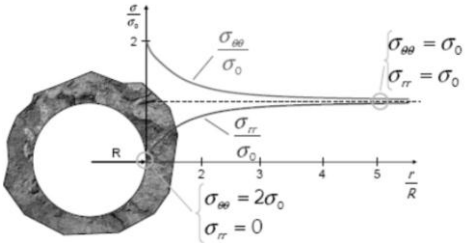


Fig. 3. Boundary stress concentrations for a circular hole in a biaxial stress field.



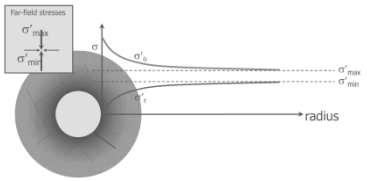
نکته: نباید گرید(همان فریم دور تونل یا قاب اطراف تونل) را در زون اغتشاش بست پس گرید را باید در جایی بست که تنش های القایی تمام می شوند.

نکته: هرچه از دیواره دور شویم تنشهای القایی شعاعی زیادتر می شوند آنقدر افزایش پیدا می کنند تا به حالت اولیه باز گردند

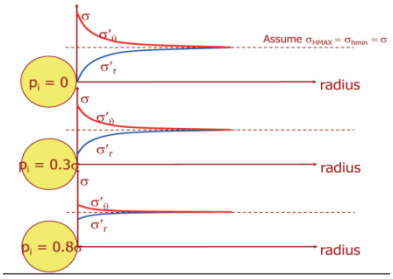
نکته: درصورتی که تنش های افقی وقائم اولیه برابر باشند تنش القایی مماسی بر روی دیواره دو برابر تنش اولیه می شود.

نکته: تونل هایی که موازی با تنش اصلی ماکزیمم ،هستند تمرکز تنش کمتری را شروع می کنیم .

نکته: اگر روی دیواره نسبت تنش برابر با صفر باشد داریم $\frac{\delta_\theta}{\delta_V} = 3$.



الف



ب

نکته شکل (الف): اختلاف بین تنش ها باعث شکست سنگ ها می شود($\delta\theta - \delta V$)

نکته: با قرار دادن سیستم نگهداری در داخل تونل تنش القایی شعاعی را افزایش داده وتنش القایی مماسی را کاهش می دهیم درنتیجه اختلاف بین تنش ها کم می شود پس تونل پایدار می گردد.

نکته: تنش القایی مماسی عمود بر تنش القایی شعاعی است.

نکته: تنش القایی شعاعی عمود بر محور تونل وارد می شود اما تنش القایی مماسی به همه جای تونل وارد می شود.

نکته شکل (ب): با اضافه کردن سیستم تقویتی تنش القایی مماسی پایین می آید.

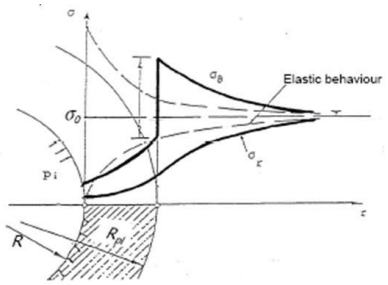
در نمودار اول فشار سیستم تقویتی صفر می باشد.

در نمودار دوم فشار سیستم تقویتی ۰/۳ تنش اولیه است تنش القایی شعاعی متناسب با فشار سیستم تقویتی بالا می رود اما

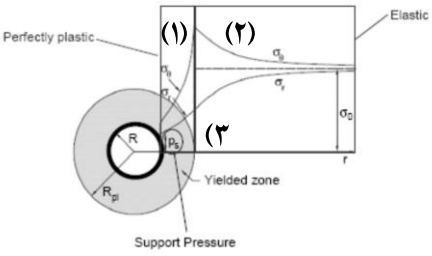
تنش القایی ماسی پایین می آید.

در نمودار سوم فشار سیستم تقویتی ۸ / ۰ تنش اولیه است در اینجا نیز تنش القایی شعاعی بالا رفته و تنش القایی ماسی پایین می آید.

نکته: در تونل ها باید اجازه داد بعد از اینکه تونل ها حفر شدند مقداری جابه جا شوند تا تنش آنها بمیرد و سیستم نگهداری که نصب کنیم ارزان تر و سبک تر باشد.



نکته: بایستی اجازه داد که سنگ های دور تونل کمی تغییر شکل دهند تا تنش بمیرد آن وقت می توانیم سیستم نگهداری سبک تر و ارزان تر را نصب کنیم ولی در بعضی موارد این اجازه را نمی دهیم (مترو ها)



(۱) زمانی که دور تونل یک مقداری از سنگ ها خرد شوند δV ،$\delta\theta$ روی منحنی مثل شکل پایین باشد

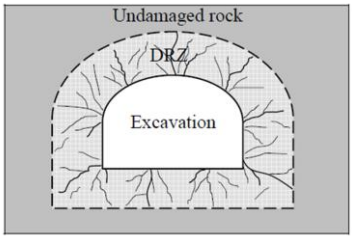
۲-تنش های القایی مماسی و شعاعی در حالت الاستیک قرار دارند.

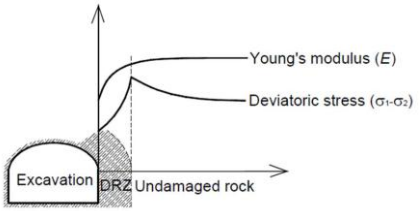
۳-تنش القایی شعاعی آنقدر پایین می آید تا به میزان فشار سیستم نگهداری برسد.

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta(elastic) + \varepsilon_\theta(plastic)$$
$$\varepsilon_r = \varepsilon_r(elastic) + \varepsilon_r(plastic)$$

ε_θ: کرنش های دور تونل (کرنش مماسی) ε_r: کرنش شعاعی

$$\varepsilon_r(elastic) = -N_\Phi . \varepsilon_{\theta P} \qquad N_\Phi = \frac{1+\sin\Phi}{1-\sin\Phi}$$





ب الف

الف) در داخل زون مرده نباید تعریض یا حفاری کنیم کوه پایین می آید اگر خواستیم تعریض انجام دهیم باید کل زون مرده اطراف تونل را بگیریم و سپس وقتی که به زون زنده رسیدیم بلافاصله سیستم نگهداری را نصب می کنیم.

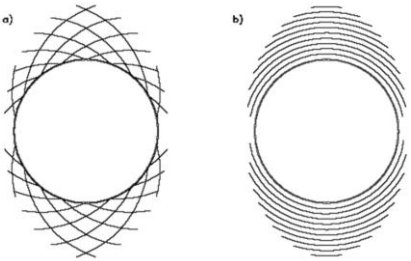
ب) خصوصیات تئوری توده سنگ دور مرز تونل با توجه به مدول الاستیسته و وضعیت تفاضل تنش ها $(\sigma_1 - \sigma_3)$ در شکل (ب) نشان داده شده است.

در شکل اختلاف بین تنش ها در ناحیه الاستیک بالا می رود و به محض اینکه می شکند تنش القایی افت پیدا می کند اما صفر نمی شود. در شکل مدول الاستیسته در ناحیه الاستیک تقریباً صاف است و زمانی که به ناحیه زون DRZ یا همان زون EDZ می رسد مدول به شدت کاهش پیدا می کند و وقتی که مدول کاهش پیدا کند یعنی تغییر شکل زیاد می شود.

1) $\frac{d_f}{a} = 1.25\ \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} - 0.51\ \ (\pm 0.1)\quad \sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$

d_f : عمق شعاع تخریب (ضخامت خردشدگی دور تونل)، a : شعاع تونل، σ_c : مقاومت فشاری تک محوره

نکته: ممکن است دور تونل همه جا خردشدگی یک دست شود و یا ممکن است یکجا زیاد و کم شود و آن به این بستگی دارد که در سقف و دیواره کجا کششی و فشاری باشد.



a) گیختگی برشی

b) گیختگی بصورت ورق ورق شدن

a) فرمول (۱) برای این زون صدق نمی کند. سنگ های اینگونه زون ها مثل چونه خمیر به آهستگی به داخل می آیند.

b) فرمول (۱) برای این زون صدق می کند برای سنگ هایی که مکانیزم شکست آن بصورت ورق ورق است

$$\varepsilon_{er} = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \upsilon(\sigma_1 + \sigma_2)] \qquad (1)$$

ε_{er}: مقدار کرنش پلاستیک (کرنش بحرانی) براساس تنش های غیر هیدروستاتیک

σ_1: مقدار تنش ماکزیمم در لحظه شکست $\sigma_1 = -\frac{E\varepsilon_{er}}{\upsilon} + (\frac{1-\upsilon}{\upsilon})\sigma_3$

فرمول (۱) برای حالت دو بعدی است یعنی به غیر از $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ را لحاظ کرده است.

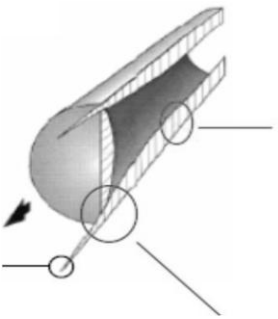
$$\frac{\sigma_1}{UCS} = \frac{(3-K)\sigma_1\ ff}{UCS} \qquad \text{SCF}=\frac{3\sigma_1\ ff - \sigma_3\ ff}{UCS} \qquad (2)$$

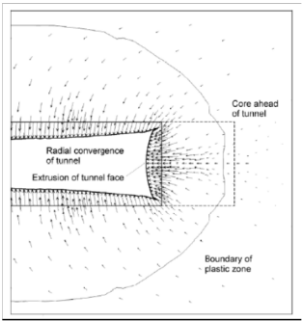
σ_1: در تونل دایره ای مقدار تنش ماکزیمم که باعث شکست سنگ می شود.

در فرمول (۲) اگر می خواهیم گیرداری رخ دهد طرف چپ معادله بایستی بزرگتر مساوی طرف راست شود.

SCF: تمرکز تنش برای تونل های مربعی شکل و $K = 0.5$

نکته: این فاکتور اگر زیر ۱ بدست آید ریزش نداریم اگر بالای ۱ بدست آید ریزش داریم.

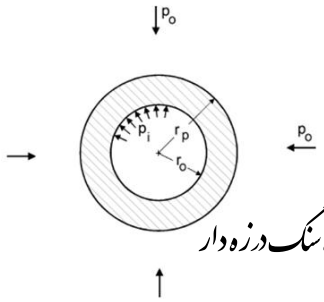




نکته: جابجایی جلوی سینه کار در حدود ۰/۲۵ برابر قطر تونل شروع می شود.

نکته: جابه جایی در سینه کار تونل تقریباً ۱/۳ جابه جایی نهایی است.

نکته: ماکزیمم جابه جایی در جایی اتفاق می افتد که ۴/۵ برابر قطر تونل از سینه کار فاصله گرفته است.



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

P_{cr}: فشار بحرانی σ_{cm}: مقاومت فشاری تک محوره سنگ درزه دار

نکته: فشار سیستم نگهداری بایستی از فشار بحرانی بیشتر باشد.

نکته: اگر فشار سیستم نگهداری بیش از فشار بحرانی باشد هیچ گسیختگی اتفاق نمی افتد بنابراین فشار توده سنگ رفتار الاستیک دارد.

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

u_{ie}: جابه جایی شعاعی الاستیک (یعنی تونل جابه جا شده اما وارد زون آسیب دیدگی ایجاد نشده است)

E_m: مدول الاستیسیته توده سنگ P_i: فشار نگهداری تقویتی

r_0: شعاع تونل υ: نسبت پواسون P_0: تنش برجا

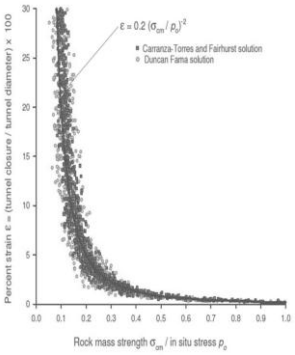
$$r_P = r_0\left[\frac{2(P_0(k-1)+\sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)P_i+\sigma_{cm})}\right]^{\frac{1}{(k-1)}}$$

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

r_P: شعاع زون خرد شده (زون پلاستیک) u_{iP}: میزان داخل آمدن غیر قابل برگشت

سوال) چقدر تونل به سمت داخل می آید و دیگر برنمی گردد؟

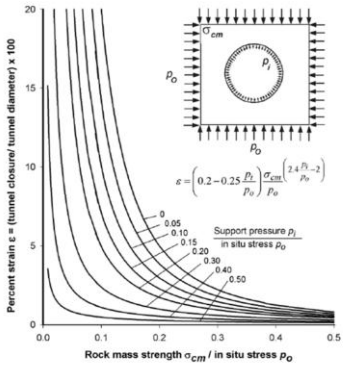
نکته: اگر سنگ مقاومتش کم باشد یعنی کرنش زیاد است و اگر کرنش زیاد باشد یعنی بسته شدن (همگرایی) تونل خیلی زیاد است.



نکته: کرنش داخل تونل (دیواره یا سقف)؛ نسبت میزان بسته شدن (همگرایی) تونل به قطر تونل می باشد.

نکته: با افزایش این نسبت کرنش کاهش می یابد.

نکته: بایستی آنقدر فشار سیستم نگهداری بالا رود تا کرنش بدست آمده از کرنش بحرانی کمتر شود.



$$\varepsilon\% = \frac{ui}{ro} \times 100 = \left(0.2 - 0.25\frac{p_i}{p_o}\right)\frac{\sigma_{cm}}{p_o}\left(2.4\frac{p_i}{p_o} - 2\right)$$

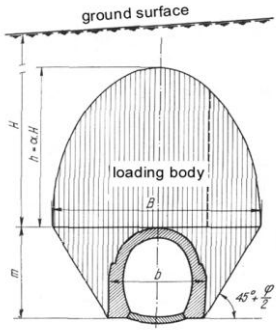
r_0 : شعاع تونل u_{ie}: میزان جابه جایی (تغییر شکل) r_P : بسط کرادیوس

r_P : شعاع زون پلاستیک اطراف تونل

$$\frac{rp}{ro} = \left(1.25 - 0.625\frac{p_i}{p_o}\right)\frac{\sigma_{cm}}{p_o}\left(\frac{p_i}{p_o} - 0.57\right)$$

نکته: اگر سنگ بکر باشد باید به جای σ_{cm}، σ_c را بدست آوریم.

c, ϕ : پارامترهای ذاتی سنگ شکسته شده (توده سنگ)

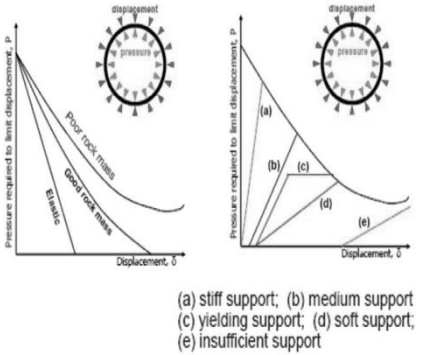


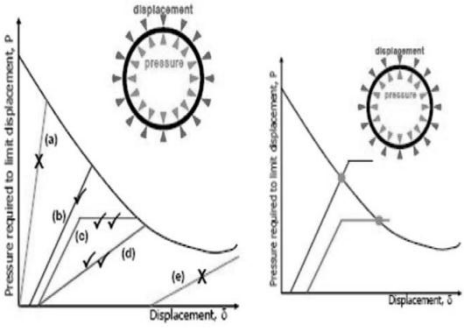
$$\alpha_1 = 1 - \frac{\tan\phi \ .tan^2(45-\frac{\phi}{2})H}{b+2\ m\ .\tan(45-\frac{\phi}{2})}$$

α_1: ضریب بار وارده $\quad$ b : قطر تونل

m : ارتفاع تونل (H و α): بیشترین فشار روی سقف تونل

$$\alpha_1 = \ tan^4(45 - \frac{\phi}{2})$$





(۱) (ب) (۲) (۱) (الف) (۲)

الف-۱) منحنی عکس العمل سنگ: این سنگ ها به نگهداری نیاز ندارند و این سنگ در زون پلاستیکی صفر است

الف-۲) منحنی سیستم نگهداری :

(a): گران (b): سیستم نگهداری از نوع (a) نرم تر است سیستم خوبی است

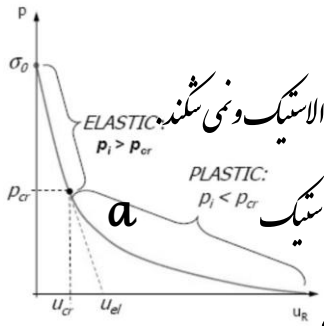
(d): خیلی نرم است (e): بسیار بد می باشد

ب-۱: سیستم نگهداری باید قبل از مینیمم فشار، منحنی را قطع کند.

نکته: اگر سیستم نگهداری سفت باشد می توان دیرتر نصب کرد ولی اگر نرم باشد باید زودتر نصب شود.

ب-۲: سیستم نگهداری باید قادر به تحمل فشار بیشتری از فشار محاسبه شده باشد (فاکتور ایمنی بالای ۲ می باشد).

نکته: سیستم نگهداری باید بیشتر از حدی که منحنی را قطع می کند فشار ببرد.



نکته: هرگاه فشار سیستم نگهداری بیش از فشار بحرانی سنگ شود فتار سنگ الاستیک و نمی شکند

نکته: هرگاه فشار سیستم نگهداری کمتر از فشار بحرانی شود سنگ وارد مرحله پلاستیک می شود و (a) نقطه ای که سنگ از الاستیک به پلاستیک تبدیل می شود.

تونل های زوجی: برای اینکه تونل ها به صورت منفرد عمل کنند باید ضخامت دیوار بین دو تونل برابر با فرمول زیر باشد

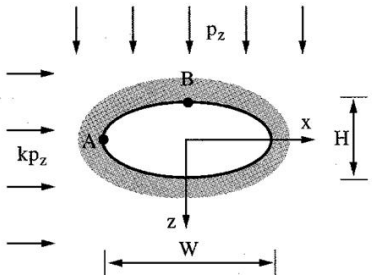
$$(9(R_1 + R_2)) \qquad R: \text{ شعاع تونل}$$

$$k = C + 0.09\{\left(\frac{W_o}{W_P} + 1\right)^2 - 1\}$$

k: تمرکز تنش برای تونل های زوجی W_o: عرض تونل W_P: عرض ضخامت

توزیع تنش در اطراف حفریات بیضی شکل: تنش ها در اطراف حفریات بیضوی (Elliptical Openings) شکل نیز تقریباً شبیه به حفریات دایره ای شکل محاسبه می شود. از نقطه نظر طراحی، جهت تنشها و نسبت عرض به ارتفاع سازه تأثیر شگرفی در پایداری حفره دارد.

در این شکل ماکزیمم و مینیمم تمرکز تنش ها در اطراف حفره بیضی شکل محاسبه شده اند همانطور که دیده می شود نهایت تمرکز تنش ها در انتهای محورهای ماکزیمم و مینیمم تشکیل شده اند.



$$\sigma_A = \sigma_V\left(1+\frac{2W}{H}\right) - \sigma_h \rightarrow \frac{\sigma_A}{\sigma_V} = \left(1+\frac{2w}{H}\right) - \frac{\sigma_h}{\sigma_V} = 1 + \frac{2w}{H} - K$$

$$\sigma_B = \sigma_h\left(1-\frac{2W}{H}\right) - \sigma_V \rightarrow \frac{\sigma_B}{\sigma_V} = \left(1+\frac{2w}{H}\right) - 1 = K(1+\frac{2w}{H}) - K$$

هردو رابطه ضریب تمرکز تنش را در نقاط (A,B) می دهند و شعاع انحنا (A) در نقطه برابر است با:

$$P_A = \frac{H^2}{2w} \rightarrow H = \sqrt{2P_A w}$$

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_V} = 1 - K + \frac{2w}{\sqrt{2P_A w}} \qquad (1)$$

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_V} = K - 1 + \sqrt{\frac{2H}{P_B}} \qquad (2)$$

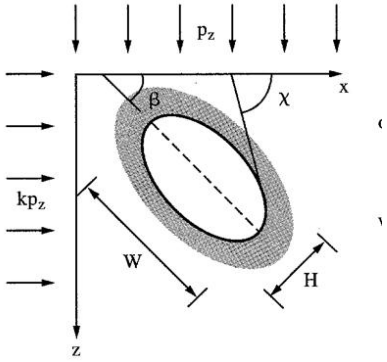
هرگاه در رابطه (۱) شعاع انحنا به سمت صفر میل کند شدت تنش در نقطه (A) بی نهایت می شود یعنی تمرکز تنش بی نهایت می شود.

P_A: شعاع انحنا نسبت به نقطه A $\quad$ P_B: شعاع انحنا نسبت به نقطه B

σ_A: تنش ماسی در دیواره $\quad$ σ_B: تنش ماسی در سقف

بافرض الاستیک بودن سنگ، حفره بیضی شکل با دو خصیصه مشخص می شود: نسبت ابعاد (ماکزیمم و مینیمم) و جهت حفره با توجه به تنش های اصلی.

σ_θ: تونل های مورب



$$\sigma_\theta = \frac{P}{2q}\{(1+k)[(1+q^2)\cos 2(x-B)]$$
$$-(1-K)[(1+q)^2\cos 2x + (1+q^2)\cos 2B\}$$

نسبت تنش در دیواره: $\frac{\sigma_{sidewall}}{\sigma_{vertical}} = 1 - k + 2\left(\frac{\omega}{h}\right)$

نسبت تنش در سقف: $\frac{\sigma_{crown}}{\sigma_{vertical}} = k - 1 + k\sqrt{\frac{2h}{P_{crown}}} = K - 1 + 2K\sqrt{\frac{h}{\omega}}$

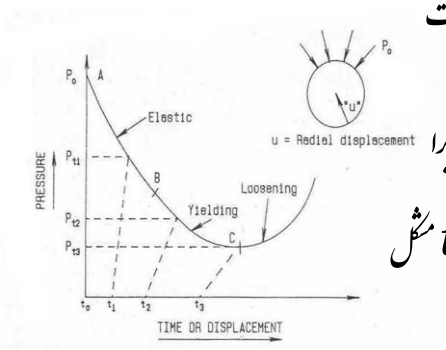
h: ماکزیمم ارتفاعی که می توان در نظر گرفت تا تونل ریزش نکند. $h = \frac{\omega}{4k^2}\left(\frac{\sigma_{sidewall}}{\sigma_{vertical}} = 1-k\right)^2$

فصل چهارم

منحنی های عکس العمل زمین، تغییر شکل طولی

و سیستم های سایرت

نکته: درزمان t_2 برای نصب سیستم نگهداری مناسب است



نکته: درزمان t_3 می توان سیستم نگهداری رانصب کرد زیرا منحنی راقبل از مینیمم فشار قطع کرده است ولی درزمان t_3 مشکل زون سست ونرم شده ای راخواهیم داشت.

نکته: سیستم های نگهداری قویتربار بیشتری راجذب می کنند.

نکته: سیستم های نگهداری نرمترجابه جایی بیشتری راجذب می کنند.

نکته: اگرسیستم نگهداری نرمتردرسنگ باشد بارکمتری روی سیستم ایجادمی شود.

نکته: سیستم های نگهداری نرم مثل قاب های فولادی (چون خمیده می شوند)

نکته: سیستم های نگهداری سفت مثل لایینگ بتونی (اصلاً خم نمی شود)

نکته: برای سنگ های لایه ای افقی بارمرده حدوداً نصف عرض تونل می باشد.

$H_R = 0.5\,w$ عرض تونل w : ارتفاع بارمرده H_R :

$H_R = 0.25\ w$: برای تونل هایی که در محیط با لایه بندی قائم حفر می شوند ارتفاع بار مرده (۱/۴) عرض تونل می باشد.

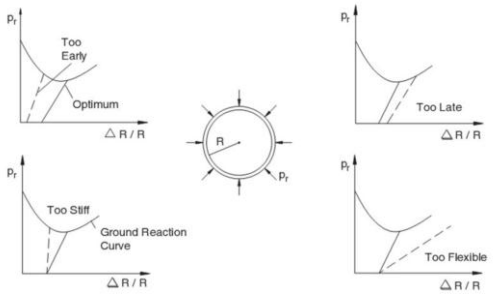
$H_R = 0.5\ \text{TO}\ .025\ \ w$: برای تونل هایی که در محیط های با لایه بندی شیب دار حفر می شوند ارتفاع بار مرده (۱/۴-۱/۲) عرض تونل می باشد.

نکته: تونل هایی که به شکل قطعه قطعه درست می شود بار کمی بر سیستم نگهداری وارد می شود.

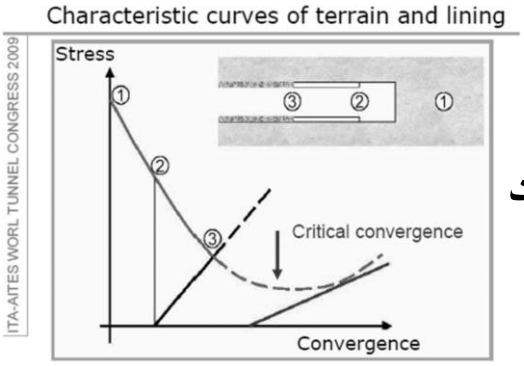
نکته: بار روی دیواره های سیستم نگهداری ۱/۳ بار روی سقف می باشد.

نکته: بار روی کف سیستم نگهداری ۱/۲ بار روی سقف می باشد.

نکته: تونل هایی که به شکل FULL FACE (یعنی یک مرتبه کل مقطع حفاری می کنیم) حفر شوند بار زیادی را در سیستم نگهداری اعمال می شوند.



نکته: سیستم نگهداری نباید زود نصب شود، نه دیر نصب شود، نه خیلی سفت باشد، نه خیلی نرم باشد باید معقول و منطقی باشد.



۱) فشار خیلی بالا می باشد

۲) تونل هموز نشکسته ولی کمی جابه جا شده است

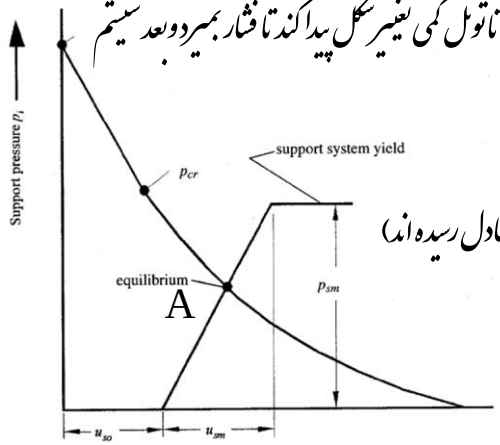
۳) زمانی که سیستم نگهداری را نصب کردیم (تونل دیگر جابه جا نمی شود)

۴) دو مشکل این سیستم نگهداری این است که اولاً خیلی دیر نصب شده است و ثانیاً خیلی نرم می باشد.

نکته: آلیاژی که در این مرحله از نگهداری به کار می برند از جنس آهن ریل قطار می باشد.

نکته: سنگ بکری است که در زیر تراز آب اشباع قرار گیرد ۵۰٪ مقاومت و چسبندگی خود را از دست می دهد و در نتیجه خیلی سریع وارد زون پلاستیک می شود.

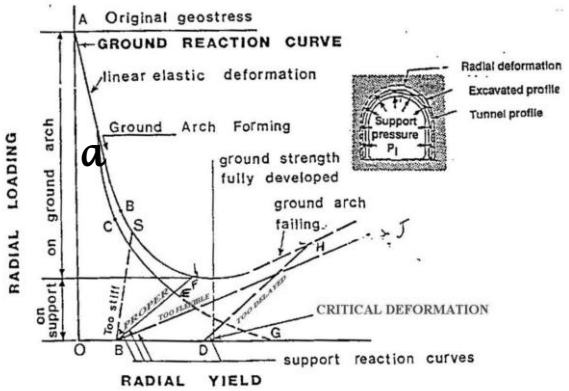
نکته: اگر سیستم نگهداری ضعیفی داریم باید اجازه دهیم تا تونل کمی تغییر شکل پیدا کند تا فشار بمیرد و بعد سیستم نگهداری را نصب کنیم.



نکته: A نقطه تعادل (سیستم نگهداری با فشار زمین به تعادل رسیده اند)

منحنی واکنش زمین:

a: نقطه بحرانی



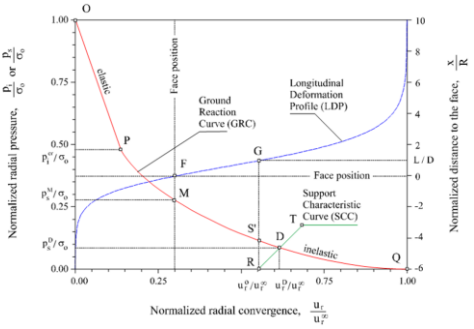
BF: این سیستم خوب می باشد

BH: این سیستم مناسب است.

DH: این سیستم خوب است اما دیر نصب می شود (منحنی را قبل از مینیمم فشار قطع نکرده است)

نکته: سیستم نگهداری را باید همیشه جایی نصب کرد که قبل از مینیمم فشار به منحنی واکنش زمین متصل شود.

منحنی واکنش زمین:

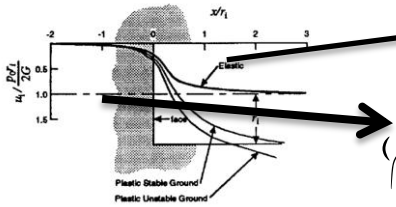


G: منحنی واکنش زمین در راستای طول تونل

OP: منحنی فشار روی سیستم نگهداری یا منحنی واکنش زمین (در راستای شعاعی تونل)

M: جابه جایی در راستای تونل درون سنگ می باشد F: سینه کار در این نقطه می باشد

جابه جایی الاستیک



مرز بحرانی (وقتی که از الاستیک وارد پلاستیک می شویم)

نکته: زمین رفتار پلاستیک دارد ولی متوقف شده است (بار زیاد ندارد) و زمین رفتار پلاستیک نشان داده شده است و سنگ شکسته شده است.

روش های منحنی واکنش زمین: الف) روش دانکن فاما ب) روش کارانزا

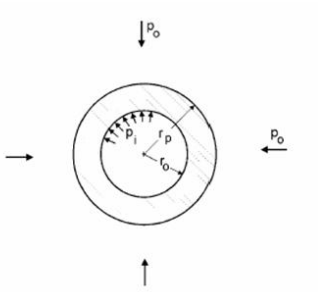
فرضیات این دو روش عبارت انداز:

۱- مقطع تونل دایره ای است. ۲- میدان تنش برجا هیدرواستاتیک است.

۳- توده سنگ همگن، همسانگرد است و گسیختگی به وسیله ناپیوستگی های ساختاری عمده کنترل نمی شود.

روش دانکن-فاما: دراین روش تونلی دایره ای شکل به شعاع r_0 تحت تنش های هیدرواستاتیک برجا P_0 و فشار یکنواخت داخلی نگهدارنده P_i درنظرگرفته می شود و فرض می شود که شرایط معیار موهر کولمب بر توده سنگ اطراف تونل صادق می باشد.

شکست توده سنگ در برگیرنده تونل، زمانی اتفاق می افتد که فشار داخلی که توسط پوشش تأمین می شود، کمتر از فشار بحرانی نگهدارنده باشد که این فشار از رابطه زیر تعیین می شود.



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

نکته: اگر فشار نگهداری داخلی بزرگتر از فشار بحرانی نگهداری باشد شکست اتفاق نمی افتد و رفتار توده سنگ احاطه کننده تونل، الاستیک می باشد.

جابه جایی شعاعی الاستیک دیواره تونل به طرف داخل به وسیله رابطه زیر تعریف می شود:

$$U_{ie} = \frac{r_0(1+\upsilon)(P_0 - P_i)}{E_m}$$

E_m: مدول یانگ υ: نسبت پواسون P_0 : فشار حوضه تنش ها

r_0: شعاع تونل P_i: فشار سیستم نگهداری U_{ie}: جابه جایی الاستیک

درصورتی که فشار داخلی نگهداری، کوچکتر از فشار بحرانی نگهداری باشد شکست اتفاق می افتد و یک منطقه پلاستیک با r_P شعاع در اطراف تونل شکل می گیرد که مقدار آن از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$r_P = r_0\left[\frac{2(P_0(K-1)+\sigma_{cm})}{(1+K)((K-1)P_i+\sigma_{cm})}\right]^{\left(\frac{1}{k-1}\right)}$$

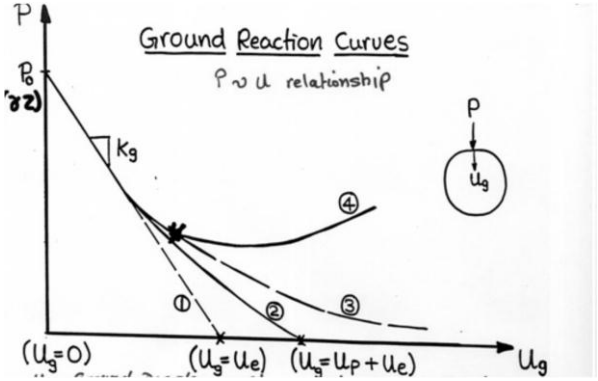
r_P: شعاع زون پلاستیک

در این مورد مجموع جابجایی شعاعی پلاستیک به طرف داخل تونل طبق رابطه زیر می باشد:

$$U_{iP} = r_0 \left(\frac{1+\upsilon}{E}\right)[2(1-\upsilon)(P_0 - P_{cr})\left(\left(\frac{r_P}{r_0}\right)^2\right) - (1-2\upsilon)(P_0 - P_i)]$$

U_{iP}: جابه جایی الاستیک

شعاع زون پلاستیک با جابه جایی پلاستیک متفاوت است شعاع زون پلاستیک بیش از جابه جایی الاستیک می باشد.



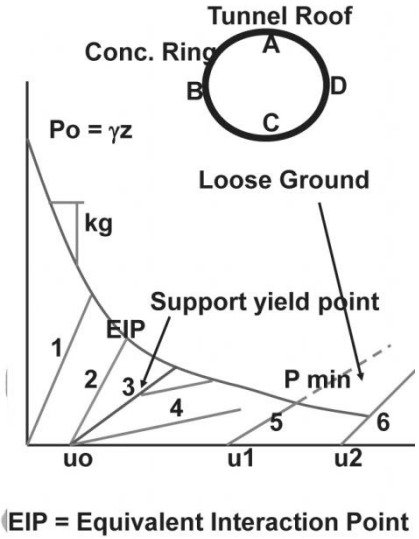
(۱) خیلی خوب است

(۲) خوب است

(۳) بد است

(۴) خیلی بد است

نکته: منطقه در حالت (۱) و (۲) سیستم نگهداری نیاز نیست.



(۱) سیستم خوب ولی گران است

(۲) سیستم خوب است

(۳) این سیستم، سیستم خوبی است با این تفاوت سیستم نگهداری کمی تغییر شکل می دهد و جابه جایی تونل کمی زیاد می شود اما در هر حال جلوی فشار را می گیرد و تونل را نگه می دارد.

(۴) سیستم مناسبی نمی باشد (خیلی نرم است)

(۵) سیستم بدی نمی باشد.

(۶) سیستم خوبی است ولی بد موقع نصب شده است البته اگر قبل از مینیمم فشار جلوی منحنی بگیرد سیستم خوبی است.

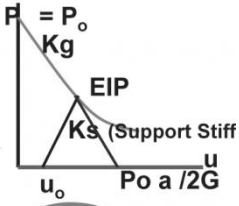
(EIP) : یعنی نقطه تعادل زمین که ما به وسیله سیستم نگهداری آن را به تعادل رساندیم.

$$K_g = \frac{2E_g}{(1+K_o)(1+\nu)a} \qquad Ks = \frac{t\,E_s}{(a-t/2)a}$$

For a deep tunnel with ko = 1

Elastic Displacement (Ue) = Po / Kg

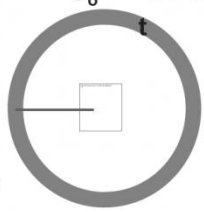
$$U_e = \frac{Po\ (2)(1+\nu)\,a}{2E_g} = \frac{P_o(1+\nu)\,a}{E_g} = \frac{P_o\ a}{2G}$$



Where:

$$G = Shear Modulus = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

ν = Poisson ration



E_g: مدول الاستیسیته زمین k_g : سختی زمین a : شعاع تونل υ: نسبت پواسون

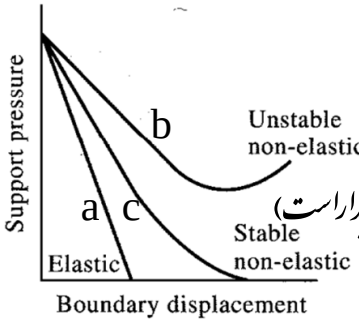
k_s: سختی سیستم نگهداری t: ضخامت بتن مدول بتن k_0 : نسبت تنش ها

u_e : جابجایی الاستیک G: مدول برشی

a): بسیار عالی (خطی)

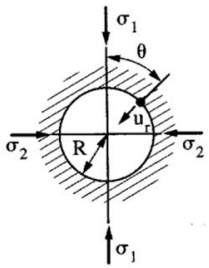
b) : غیرخطی و ناپایدار است

c): سنگ غیرخطی است ولی متوقف شده است (پایدار است)



u_r: جابه جایی تونل R: شعاع حفره

σ_1و σ_2: تنش های برجا σ_3: تنش عمود بر سقف



$$u_r = \left(\frac{R}{E}\right)[\sigma_1 + \sigma_2 + 2(1-\upsilon^2)(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta - \upsilon\sigma_3]$$

نکته: فاکتور ایمنی زیر ۱ فقط در زون ریزشی (HDZ) می باشد.

نکته: لاینینگ های بتونی معمولاً برای زمین های نرم استفاده می شود یا برای جاهایی که سیستم های نرم جواب گو نباشد یا برای جاهایی که نمی خواهیم سنگ تغییر شکل انجام دهد یا تغییر شکل مجاز خیلی کم باشد.

سیستم های ساپورت: چوب، فلز، راک بولت، شاتکریت، بتن ریزی، جک های هیدرولیکی.

فصل پنجم

مچاله شوندگی

مچاله شوندگی زمین(Squeezing): درمحیط هایی اتفاق می افتد که رفتار سنگ ها شکل پذیر باشد و تابع زمان است.

در اینگونه محیط ها باید بلافاصله پس از حفر تونل نگهداری را انجام دهد.

نکته: مچاله شوندگی در سنگ های بسیار ضعیف و سنگ هایی که رفتار پلاستیکی داشته باشند به واسطه وزن لایه ها از سقف باشند و به واسطه فشاری که از پیرامون به دیواره ها وارد می شود وقتی شروع به حرکت می کنند و به سمت داخل تونل می آیند.

نکته: میزان مهارکردن مچاله شوندگی به توانمندی سیستم نگهداری بستگی دارد.

تفاوت بین مچاله شوندگی و متورم شوندگی؛ مچاله شوندگی اصلاً حجم شان زیاد نمی شود یعنی در اثر فشار زیادی که به آنها وارد می شود مچاله می شوند اما سنگ های متورم شونده حجم شان زیاد می شود و علت این افزایش حجم جذب آب می باشد اگر در مجاورت آنها آب وجود داشته باشد آب را جذب می کنند و واکنش شیمیایی از خود نشان می دهند و این واکنش باعث از بین رفتن مقاومت بین توده ای آنها می شود و در نتیجه این سنگ ها حرکت کرده و به سمت داخل می آیند رفتار سنگ های متورم شونده در اثر واکنش شیمیایی آب است که همراه با تغییر حجم است که این نتیجه تابع زمان است ابتدا آب نتوانست نفوذ کند و واکنش شیمیایی انجام دهد هیچ تغییر حجمی هم وجود ندارد و به تدریج به مرور زمان به علت

هیدروهیدرات شدن آب وماده نرم (شیل، رس) متورم می شوند مثل چونه خمیر می شوندونرم می شوند زمانی که نرم می شوندرفتارشان مثل مچاله شوندگی ها می شودیعنی به سمت داخل شروع به حرکت می کند.

مچاله شوندگی درواقع خودش قادربه محدودکردن خودش است وبه شدت اتفاق نمی افتداگر لایه های تحت فشار زیادبه سمت داخل حرکت کرد ممکن است در جاهایی که متوقف شودو دوباره حرکت کندولی متورم شوندگی تازمانی که آب وجوددارد واکنش شیمیایی درحال انجام شدن است واین واکنش شیمیایی باعث می شودتا توده به داخل حرکت کند.

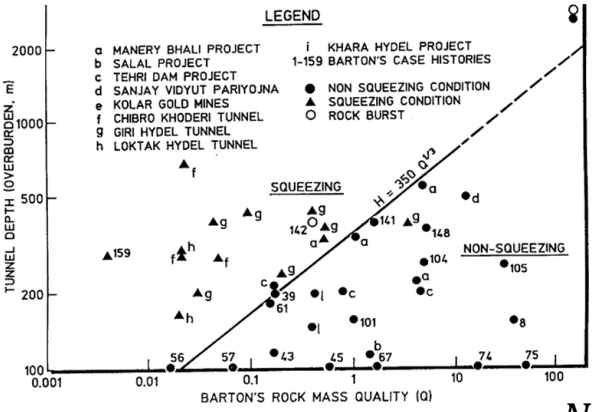
H: عمق تونل از سطح زمین (متر) $H = 350\ Q^{1/3}$

σ_{cm}: مقاومت فشاری توده سنگ (مگاپاسکال) $\sigma_{cm} = 0.7\ \gamma Q^{1/3}$

$H \gg 350\ Q^{1/3}$: اگراین رابطه صدق کند سنگ درنقطه H ازخود رفتار مچاله شوندگی نشان می دهد

$H \ll 350\ Q^{1/3}$: اگراین رابطه صدق نکند در محل پدیده مچاله شوندگی رخ نمی دهد.

نکته: بالای خط نمودار پدیده مچاله شوندگی رخ می دهد و زیرخط نمودار مچاله شوندگی رخ نمی دهد



$$N = (Q)_{SRF=1}$$

$$H = (275\ N^{\ 0.33})B^{-1}\ [m]$$

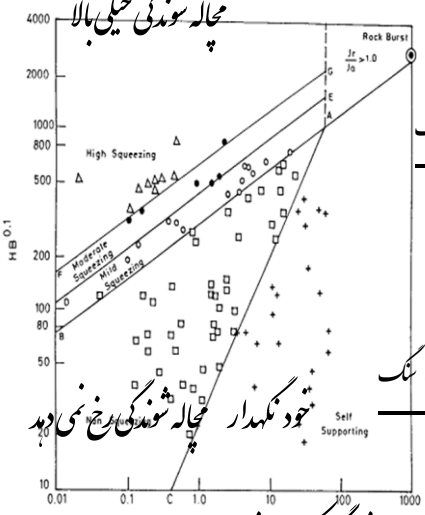
H : عمق تونل

B : دهانه تونل (متر)

مچاله شوندگی رخ می دهد : $H \gg (275\ N^{\ 0.33})B^{-1}\ [m]$

مچاله شوندگی رخ نمی دهد : $H \ll (275\ N^{\ 0.33})B^{-1}\ [m]$

اگر سنگ بکر باشد داریم:



فاکتور متراکم شدگی (فشردگی): $\frac{\text{مقاومت فشاری تک محوری سنگ}}{\gamma h}$

اگر سنگ درزه دار باشد داریم:

فاکتور متراکم شدگی (فشردگی): $\frac{\text{مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ}}{\gamma h}$

نکته: با افزایش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به تنش مچاله شوندگی کم می شود.

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H}$$

$$\frac{p_u}{p_0} = D \cdot M_\phi \left(1 - \sin\phi_p\right) \left(1 - \frac{\sigma_{cm}}{2p_0}\right)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c_p \cos\phi_p}{1-\sin\phi_p}, \alpha = \frac{2\sin\phi_p}{1-\sin\phi_p}$$

$$D = \frac{(R_c/R)^\alpha - (R/R_c)^2}{1-(a/R_c)^2}$$

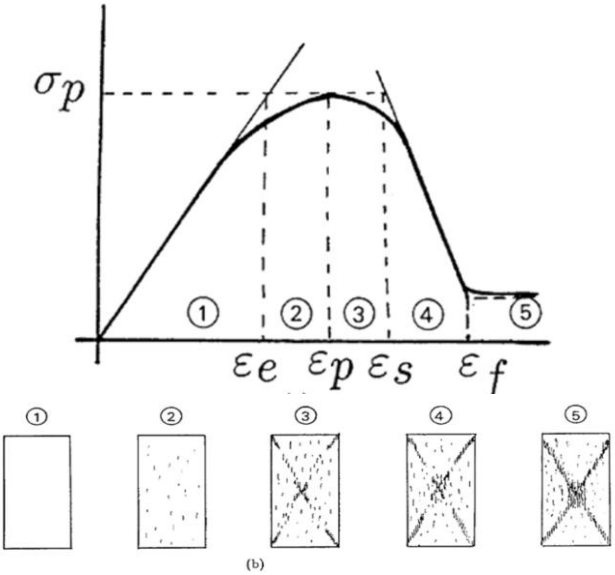
$$M_\phi = (R/R_{pl})^\alpha$$

$$\eta_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e} = 2\sigma_{ci}^{-0.17}, \eta_s = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_e} = 3\sigma_{ci}^{-0.25}, \eta_f = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_e} = 5\sigma_{ci}^{-0.32}$$

P_H : ماکزیمم فشاری که به سنگ وارد می شود P_0 : تنش هیدرواستاتیک

R_c : قسمت توده ای که کاملاً متراکم و در تماس با لایینگ است R_{PL} : شعاع زون پلاستیک

ε_P : کرنش پلاستیک ε_e : کرنش الاستیک

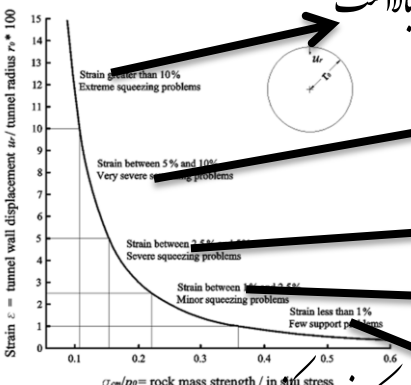


ε_t : کرنش کل (ماکزیمم کرنش) P_0 : تنش هیدرواستاتیک P_i : فشار سیستم نگهداری

$$\varepsilon_t(\%) = 0.15(1 - p_i / p_o)\frac{\sigma_{cm}}{p_o}^{-(3p_i/p_o+1)/(3.8p_i/p_o+0.54)}$$

ε_f : میزان کرنش در سینه کار در حالت فشارهای سیستم نگهداری در فشار موجود می باشد.

$$\varepsilon_f(\%) = 0.1(1 - p_i / p_o)\frac{\sigma_{cm}}{p_o}^{-(3p_i/p_o+1)/(3.8p_i/p_o+0.54)}$$



۱) کرنش از ۱۰٪ بیشتر است و در اینجا به شدت مچاله شوندگی بالا است

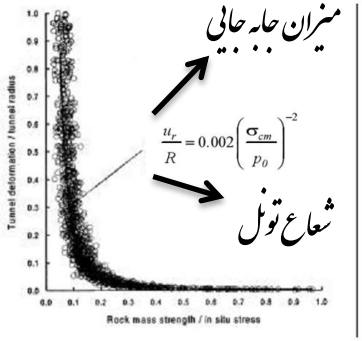
۲) کرنش ۵٪ مچاله شوندگی خیلی بالا داریم.

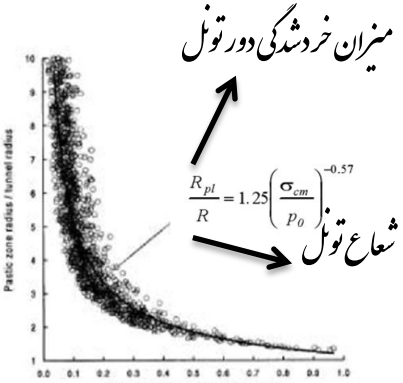
۳) کرنش ۲/۵٪ الی ۵٪ مچاله شوندگی بالا داریم.

۴) کرنش ۱٪ - ۲/۵٪ کمی مچاله شوندگی داریم.

۵) کرنش کمتر از ۱٪ مچاله شوندگی نداریم و باید سیستم نگهداری سبکی نصب کنیم .

نکته: جابجایی سینه کار ۱/۳ جابه جایی نهایی می باشد.





مدول الاستیسیته

$$k_c = \frac{E_c\left(r_i^2 - (r_i - t_c)^2\right)}{r_i(1+\nu_c)\left((1-2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2\right)}$$

$$P_{scmax} = \frac{1}{2}\sigma_{c,c}\left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2}\right]$$

$\sigma_{c.c}$: مقاومت فشاری تک محوری لایینگ

r_i: شعاع تونل t_c: ضخامت لایینگ $P_{Sc\ max}$: ماکزیمم فشار نگهداری

$$P_{scmax} = \frac{A_s \cdot \sigma_s}{r_i \cdot S} \qquad (k_s)^{-1} = \frac{S_{r_i}}{E_s A_s} + \frac{d}{E_c r_i}$$

S_{ri}: فاصله ردیف ها در طول تونل d: میانگین ناحیه شکسته شده ای به وسیله شاتکریت پر می شود

A_s: مقطع عرضی σ_s: مقاومت تسلیم قاب های فولادی

$$p_{bcmax} = \frac{T_{bf}}{s_c \cdot S_l} \qquad (k_b)^{-1} = \frac{S_c \cdot S_l}{r_i}\left[\frac{4l}{\pi d_b^2 E_b} + Q\right]$$

S_c: فاصله بولت ها در محیط تونل S_l: فاصله بولت ها در طول تونل d_b: قطر بولت ها

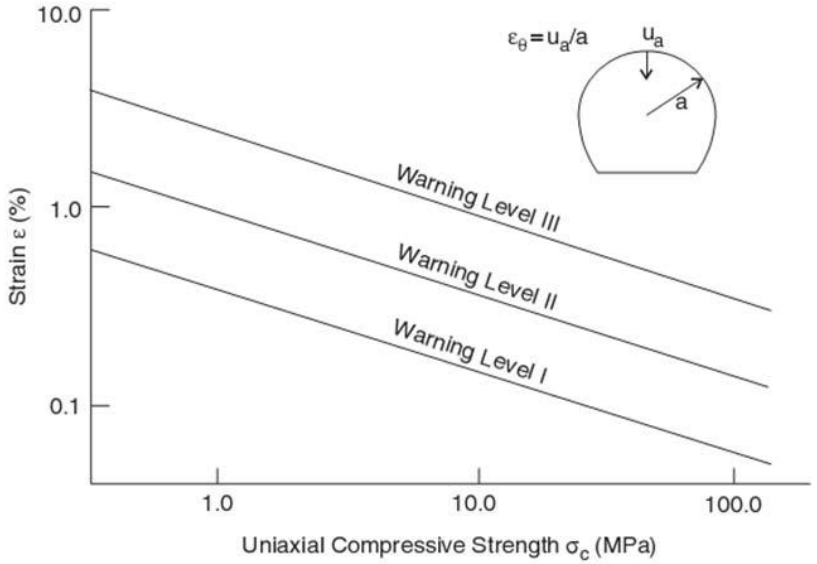
Q: ثابتی است که از روی منحنی بار تغییر شکل بدست می آید T_{bf}: مقاومت ناحیه برای راک بولت ها

رابطه برای پایداری تونل ها در سنگ های الاستیک: $\varepsilon_{mass} = \varepsilon_r[\frac{E_r}{E_d}]^{0.30}[\frac{d}{S_{rock}}]^{0.20}$

ε_{mass}: کرنش بحرانی E_d : مدول توده سنگ $\geq \varepsilon_\theta = \frac{u_a}{a}$

ε_r: نسبت مقاومت فشاری تک محوری به روی مدول الاستیسیته (کرنش پلاستیک)

ε_θ: کرنش القایی اطراف تونل u_a : میزان جابه جایی تونل a : قطر تونل



$$\varepsilon_\theta < \varepsilon_{mass} \text{ or } \varepsilon_r$$

نکته: هرچه به سمت خطوط تراز بالاتر می رویم خطرناک تر است زیرا با ثابت بودن مقاومت کرنش افزایش می یابد.

نکته: بایستی کاری کرد که زیر خط تراز ۱ قرار بگیرد.

نکته: هرچه خط تراز بالاتر رود بحرانی می شود.

voussoir beam

نکته: این پدیده در سنگ های بلوکی اتفاق می افتد که مقاومت کششی به شدت کاهش پیدا می کند و به سمت صفر میل می کند.

نکته: در این تئوری تنش جانبی روی سطح گیرداری به شدت کاهش پیدا می کند و بلوک ها تحت اثر وزن خود به سمت پایین سقوط می کنند.

نکته: در این تئوری درزه های فرعی قائمی وجود دارند که لایه ها را قطع می کنند و لایه را به بلوک های مجزا تقسیم می کنند.

نکته: در این تئوری اگر فشار جانبی به سمت صفر میل کند سقوط آزاد انجام می شود.

نکته: در این شرایط بایستی با زدن یک راک بولت به صورت زاویه دار نگهداری را انجام داد و در واقع باید به وسیله بولت لایه های پایینی را به لایه های بالایی دوخت.

نکته: در جاهایی که ضخامت لایه ها کم باشد شدت این تئوری بالا می باشد.

نکته: در این تئوری بایستی سعی شود با نصب راک بولت لایه های نازک را به لایه های یکپارچه تبدیل کرد.

نکته: ضخامت تیرها حداقل نصف عرض تونل می باشد.

نکته: اگر (rock bridges) زیاد شود مقاومت زیاد می شود.

نکته: در جایی که (rock bridges) وجود دارد آنها می توانند حفظ شوند زمانی که آتشباری کنترل شده باشند در غیر اینصورت با آتشباری نامناسب (rock bridges) تخریب می شود.

نکته: برای تنش های القایی فشاری باید فاکتور ایمنی حداقل ۲ باشد.

نکته: برای تنش های القایی کششی بایستی فاکتور ایمنی حداقل ۴ باشد.

$$F.S. = \frac{\frac{\pi \sigma_h S^2}{4 \tan \alpha} \left(\frac{K_s \cos^2 \alpha + K_n \sin^2 \alpha}{K_s \cos \alpha \cos \phi + K_n \sin \alpha \sin \phi} \right) \sin(\phi - \alpha) + F}{\gamma \frac{\pi S^3}{24 \tan \alpha}} \quad (۱)$$

F.S: فاکتور اطمینان برای نگهداری بلوک ها σ_h: تنش افقی S: عرض تونل

K_s: سختی نرمال برش γ: واحد وزن سنگ ϕ: زاویه اصطکاک داخلی درزه ها K_n: سختی برش

F: نیرویی که سیستم نگهداری از سقف وارد شود یا ظرفیت باربری بولت α: نصب زاویه مخروط

سوال)بلوک مثلثی شکل دوغاب گوه نوک تیزدر سقف تونلی عرض ۶متربا وزن ۱۰تن (حجم یاوزن مخصوص) تشکیل شده است اگر زاویه اصطکاک داخلی سطوح ناپیوستگی ۳۰درجه، زاویه وقوع بلوک ۲۵درجه باشدو سختی نرمال و سختی برش سطح درزه ها به ترتیب $2 * 10^8$ پاسکال بر متروِ $1 * 10^8$ پاسکال بر متر باشد، تنش افقی ۶مگاپاسکال می باشد

۱)به نظر شما فاکتور اطمینان این بلوک چقدر است؟ این بلوک ریزش می کند یا خیر؟ باید با توجه به فرمول (۱) قرار دادن پارامترها فاکتور اطمینان بدست آورید و اگر بزرگتر از ۱ باشد یعنی بلوک نمی ریزد در این قسمت باید $f=0$ را در فرمول صفر قرار داده شود و در قسمت (۲) بایستی لحاظ گردد.

۲) در صورتی که این بلوک ناپایدار باشد و بریزد قرار است جهت نگهداری بلوک از راک بولت استفاده شود اگر ظرفیت باربری راک بولت ها ۱۵تن باشد حساب کنید آیا بلوک ریزش می کند؟

نکته: مقاومت خمشی بولت ها کم می باشد ولی مقاومت کششی آنها بالا می باشد.

نکته: راک بولت هایی که زده می شود بایستی از زون ترک عبور کرده و به زون بکر برسد.

نکته: در واقع کار راک بولت ها این است که اطراف حفریات زیرزمینی به شکل گیختگی زده شود و مقاومت را

تقویت می کنند.

نکته: سیستم های راک بولت در دل سنگ می روند ولی سیستم های سایرت روی سطح سنگ کار گذاشته می شود.

مکانیزم بولت ها:

۱) بار محوری

۲) سختی

۳) راندمان برشی

نکته: در حال حاضر ۸۰٪ بولت ها، بولت های ذوعابی هستند زیرا بار در طول بولت می رود.

نکته: ضخامت زون مرده زیاد نیست بولت بایستی از آن عبور کند.

نکته: طول بولت باید ۵/۰ متر از ضخامت زون مرده بیشتر باشد.

نکته: اگر ضخامت بار مرده بیشتر باشد طول بولت ها را کم کرده ولی تعداد بولت ها را افزایش می دهیم.

نکته: هرچه پیش تنیدگی بیشتر شود بار بری بولت بالاتر می رود.

نکته: پیش تنیدگی یعنی همان که بولت را با پیچ کردن به زور در سنگ فرو می کنیم و جلورا می بندیم.

$$P_a = P[1 + \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}]$$

P_a : میزان فشاری که راک بولت می تواند تحمل کند

ϕ : زاویه اصطکاک داخلی سنگ

$$N = \frac{W*F}{B}$$

N : تعداد راک بولت

W : وزن گوه ناپایدار

F : ظرفیت باربری

B : عرض تونل

فصل ششم

تمارین

۱) تونلی دایره‌ای شکل در عمق ۵۰۰ متری از سطح زمین در سنگ‌هایی با وزن مخصوص ۳ تن بر متر مکعب و ضریب پواسون ۰٫۲ حفر شده است اگر حوزه تنش‌ها طوری باشد که قانون ترزاقی حاکم باشد و در منطقه فشار منفذی آب به میزان ۰٫۲ مگاپاسکال وجود داشته باشد و همچنین مقاومت فشاری سنگ بکر ۴۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۴ مگاپاسکال، چسبندگی سنگ بکر ۸ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی سنگ ۳۰ درجه و اگر فاکتورهای ذاتی باقیمانده سنگ ۳۰ درصد کاهش داشته باشند و فاکتور ایمنی ۱٫۵ مطلوبست:

۱) تنش‌های قائم در محل تونل قبل از حفر ۲) تنش‌های افقی در دیواره قبل از حفر

۳) تنش‌های القایی در دیواره و سقف ۴) وضعیت پایداری دیواره‌ها و سقف

۵) میزان کرنش تولید شده در دیواره و سقف

در صورتی که فشار سیستم نگهداری ۱۰٪ و ۵۰٪ تنش اولیه افقی باشد میزان کرنش تولیدشده در دیواره چقدر کاهش می‌یابد و چه فشاری را برای سیستم نگهداری در نظر بگیریم تا کرنش دیواره به صفر درصد کاهش یابد.

۶) شعاع زون پلاستیک را حساب کنید ۷) تعیین (SCF) از رابطه مذکور

۲) تونلی به شکل دایره ای شکل در عمق ۳۰۰ متری در سنگ هایی با وضعیت غیر بیدرواستاتیک با وزن مخصوص ۲٫۵ تن بر متر مکعب حفر شده است به نظر شما در چه نسبتی از تنش ها در دیواره تونل کشش به وجود می آید و برای از بین بردن این حالت اگر تصور کنید وضعیت نامطلوبی است چه نسبت تنش ها را ارزیابی می کنید.

۳) تونلی بیضی شکل بصورت ایستاده که عرض آن ۳ متر و ارتفاع آن ۶ متر می باشد در عمق ۲۵۰ متری در سنگ هایی با وزن مخصوص ۲٫۵ تن بر متر مکعب و مقاومت فشاری تک محوری ۶۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۸ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰٫۲۵ حفر شده است مطلوبست:

۱) مقدار تنش القایی در سقف و دیواره تونل

۲) تمرکز تنش در سقف و دیواره تونل

۳) وضعیت ناپایداری دیواره ها و سقف

چنانچه تونل دچار ناپایداری شود ابعاد تونل را طوری طراحی کنید تا ناپایداری از بین رود.

نکته: فاکتور ایمنی استاندارد در کشش و فشار به ترتیب ۲ و ۱٫۵ می باشد.

۴) تونلی در سطح زمین با عمق ۴۰۰ متر در سنگ هایی با وزن مخصوص ۲ تن بر متر مکعب و مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۴۰ و ۸ مگاپاسکال حفر شده است. اگر وضعیت تنش ها در منطقه طوری گزارش شده باشد که تنش های افقی ۲ برابر تنش های قائم باشد تعیین کنید:

۱) تنش افقی

۲) تنش القایی شعاعی در دیواره تونل

۳) تنش القایی مماسی در دیواره و سقف تونل

۴) وضعیت پایداری دیواره و سقف تونل

آیا تونل در دیواره و سقف ریزش خواهد کرد چرا؟ میزان خردشدگی تونل را بدست آورید؟

۵) تونلی دایره ای شکل در عمق ۳۰۰ متری در سنگهایی با وضعیت تنش های غیر هیدرواستاتیک و با وزن مخصوص سنگ ها ۲٫۵ تن بر متر مکعب حفر شده است. به نظر شما در چه نسبتی از تنش ها در دیواره تونل کشش به وجود می آید و برای از بین بردن این حالت اگر تصور می کنید وضعیت نامطلوبی است تنش های خوب را ارزیابی کنید؟

منابع و مأخذ

1- Underground excavation, Hoek and Brown.

2- Support underground excavation in hard rock, Hoek-Kaiser, Bawden

3- Introduction to rock mechanics, Goodman.

4- Rock mechanics, Brady and Brown

5- Rock mechanics-Hudson and Harris

6- Underground Structures:Sinha