

## تنش در حفریات معدنی<sup>۱</sup>

### ۵-۱- آشنایی

از آنجا که در این فصل و فصلهای دیگر، با مفهوم تنش<sup>۲</sup> و تنجش<sup>۳</sup> سر و کار خواهیم داشت لذا در ابتدا به شرح این مشخصه‌ها می‌پردازیم:

هنگامی که جسمی تحت تأثیر نیروهای خارجی قرار گیرد، در مقاطع مختلف آن نیروهایی موسوم به نیروهای داخلی به وجود می‌آید که با نیروهای خارجی در حال تعادل اند و همین نیروهای داخلی است که تغییر شکل جسم را سبب می‌شوند.

شدت نیروهای داخلی مؤثر بر هر مقطع یعنی حاصل تقسیم نیروی داخلی بر سطح مقطع به نام تنش نامیده می‌شود. اگر تنش به حالت عمودی بر سطح اثر کند آن را تنش عمودی ( $\sigma$ ) و در حالتی که مماس بر آن عمل کند، به نام تنش برشی ( $\tau$ ) خوانده می‌شود. اگر تنش عمودی سبب به هم فشردن جسم شود، آن را تنش فشاری و در حالتی که باعث جداشدن قطعات آن شود، آن را تنش کششی می‌گویند. تنش برشی سبب بریده شدن در امتداد تنش اعمالی می‌شود.

از سوی دیگر، جسمی که تحت تأثیر تنش قرار گیرد، تغییر شکل می‌دهد. اگر طول اولیه جسم  $l$  باشد و پس از اینکه تحت تأثیر تنش قرار گرفت، طول آن به اندازه

$\Delta l$  تغییر کند (اعم از کوتاه یا بلند شدن)، طبق تعریف نسبت  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$  را تغییر شکل

نسبی یا تنجش می‌گویند. اگر جسمی را در امتداد محورش بکشیم، تنجش طولی آن  $\epsilon$  خواهد بود و در عین حال جسم در امتداد عمود بر محور خود کوتاه می‌شود. اگر

تنجش عرضی را با  $\epsilon'$  نشان دهیم، طبق تعریف  $\nu = \frac{\epsilon'}{\epsilon}$  را نسبت پواسون می‌گویند.

اگر منحنی تغییرات تنش اعمال شده نسبت به تنجش حاصله را رسم کنیم،

۱- این فصل جزء برنامه درسی نیست و برای تکمیل اطلاعات علمی هنرجویان علاقه‌مند آورده شده است. همکاران محترم می‌توانند متناسب با درک و فهم هنرجویان کلیاتی از درس را در کلاس بیان نمایند.

منحنی تنش - تنجش حاصل می‌شود. اگر این تغییرات به شکل خط مستقیم باشد، تغییرشکل را الاستیک<sup>۱</sup> یا کنسسان می‌گویند. این امر به معنی آن است که اگر تنش را حذف کنیم، جسم به حالت اولیه خود برمی‌گردد و تغییرشکل یا تنجش در آن باقی نمی‌ماند. اگر تنش اعمالی از این حد بیشتر شود، تغییرشکل حاصله دیگر الاستیک نیست یعنی با حذف تنش نیز بخشی از آن در جسم باقی می‌ماند. این مرحله را تغییرشکل خمیری<sup>۲</sup> یا مومسان می‌گویند. حداکثر تنشی را که جسم می‌تواند تحمل کند، مقاومت نهایی آن می‌گویند و اگر تنش مؤثر از این حد هم تجاوز کند، جسم می‌شکند.

در حالت کلی، در توده‌های سنگی موجود در اعماق زمین، تنش‌هایی موسوم به تنش‌های برجا<sup>۳</sup> اثر می‌کنند. عامل اصلی تنش‌های برجا، وزن طبقات و فعالیت‌های تکتونیکی منطقه است. پس از احداث تونل یا حفاریات دیگر، وضعیت تنش‌های موجود به هم می‌خورد و وضعیت تنش در اطراف حفره، آرایش جدیدی پیدا می‌کند که با وضعیت اولیه آن متفاوت است. تنش‌های حاصله در اثر حفر تونل را تنش‌های القایی<sup>۴</sup> می‌گویند.

آگاهی از وضعیت تنش‌های برجا و القایی، از جمله ضرورت‌های اصلی طراحی تونل و سایر سازه‌های زیرزمینی است زیرا در بسیاری موارد، ممکن است اندازه تنش‌های القایی، از حد مقاومت سنگ تجاوز کند و اگر فکری برای آن نشود، امکان دارد که خرابی سازه را در پی داشته باشد.

واضح است که این امر یعنی اغتشاش در وضعیت تنش‌های برجا، فقط تا فاصله معینی از محور حفره ادامه دارد که این فاصله را شعاع تأثیر می‌گویند و در ماورای آن، وضعیت تنش‌ها همچنان دست نخورده باقی می‌ماند. باید توجه داشت که علاوه بر شکل و ابعاد حفره، شیوه و سرعت حفر آن و همچنین مرحله بندی حفر اجزای مختلف مقطع (در مواردی که مقطع حفره در چند مرحله حفر می‌شود) نیز در آرایش تنش‌های القایی مؤثراند و سیستم حفاری باید به گونه‌ای طراحی شود که کمترین ناپایداری را در پی داشته باشد.

اگر بخشی از یک توده سنگ را به شکل مکعب مستطیل، مجزا از بقیه توده سنگ در نظر گیریم، در حالت کلی بر سطوح آن هم تنش عمودی و هم تنش برشی اثر می‌کنند (شکل ۵-۱). اگر این قطعه به گونه‌ای در داخل توده سنگ توجیه شود که بر سطوح آن فقط تنش‌های عمودی اثر کند، در این صورت این تنش‌های عمودی را به نام

۱- Elastic

۲- Plastic

۳- Insitu

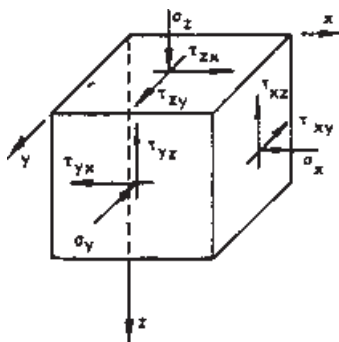
۴- Induced

تنشهای اصلی می خوانند و امتداد سطوح مکعب مستطیل در این حالت، به نام سطوح اصلی خوانده می شوند. تنشهای اصلی را با  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  نشان می دهند که به ترتیب تنشهای اصلی ماکزیم، متوسط و مینیم نام دارند.

## ۵-۲- تنشهای برجا

منشأ اصلی تنشهای برجا مؤثر بر توده های سنگی، وضعیت و تاریخ زمین شناختی آن است. البته عواملی همچون فرسایش، ایزوستازی، سرد شدن توده های مذاب و تبلور دوباره نیز در این مورد نقش دارند. در بین این عوامل، عمق سنگ نسبت به سطح زمین، وضعیت توپوگرافی زمین، و وضعیت ساختاری، نقش اصلی را به عهده دارند. وجود ناپیوستگی ها در توده های سنگی نیز از جمله عوامل دیگری است که در آرایش تنشهای برجا نقش دارد و چه بسا که به علت متفاوت بودن شرایط ساختاری دو توده سنگی که در عمق یکسانی قرار دارند، وضعیت تنشهای برجا به کلی متفاوت باشد.

برای توجیه وضعیت تنشهای برجا، می توان مؤلفه های آنرا نسبت به یک دستگاه محورهای مختصات سه بعدی مشخص کرد. با معلوم بودن این مؤلفه ها، می توان تنشهای اصلی برجا را نیز مشخص ساخت (شکل ۵-۱).



شکل ۵-۱- توجیه تنشهای برجا [۱۰]

## ۵-۲-۱- مقادیر تئوری تنشهای برجا:

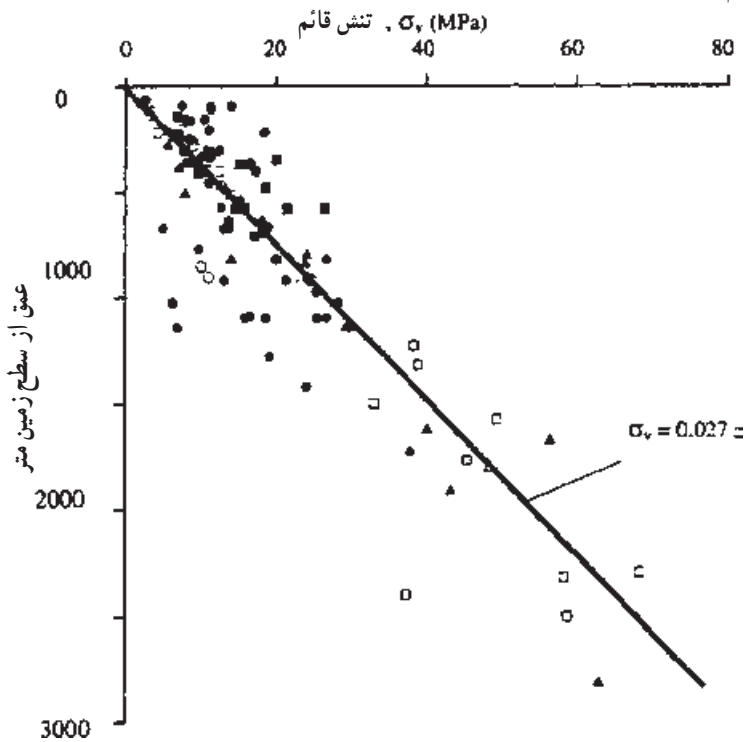
**الف - تنشهای قائم:** از آنجا که عامل اصلی تنشهای قائم، وزن سنگهای

روبی (دوباره) است لذا مقادیر این تنشها را می توان از رابطه زیر پیش بینی کرد:

$$\sigma_z = \gamma Z \quad (۵-۱)$$

که در آن  $\gamma$  وزن مخصوص سنگ و  $Z$  عمق آن نسبت به سطح زمین است. به عنوان مثال اگر یک توده سنگی در عمق  $1000$  متری زمین واقع باشد و وزن مخصوص متوسط سنگهای روباره آنرا  $27 \text{ t/m}^3$  فرض کنیم، اندازه تنشهای قائم معادل  $27 \text{ MPa}$  خواهد بود (MPa به معنی مگاپاسکال و یا یک میلیون پاسکال است).

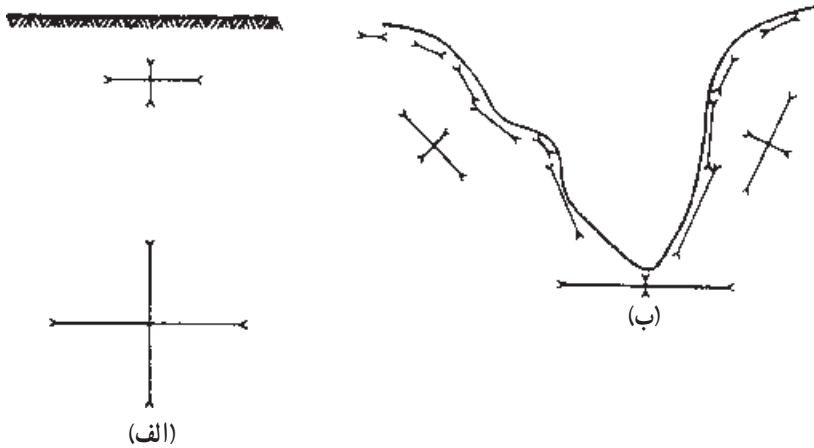
بررسیهایی که در مورد اندازه گیری تنشهای قائم انجام شده، نشانگر آن است که رابطه  $5-1$  به خوبی قادر است تخمین واقعی از تنشهای قائم را به دست دهد (شکل  $5-2$ ). در این شکل، نقاط مختلف، نتیجه اندازه گیری هایی است که در نقاط مختلف دنیا انجام گرفته و بهترین خط، بر آنها برازش داده شده است.



شکل  $5-2$  - تغییرات تنش قائم برجا نسبت به عمق [۹]

از آنجا که بر سطح زمین تنشهای برشی اثر نمی کند، بنابراین همواره سطح زمین را می توان به عنوان سطح اصلی در نظر گرفت که یکی از تنشهای اصلی بر آن عمود است. بدین ترتیب، در زمینهای افقی، در اعماق کم، یکی از تنشهای اصلی برجا قائم و تنش اصلی دیگر افقی هستند. معمولاً فرض بر آن است که در این موارد، این تنشها

در عین حال تنشهای افقی و قائم برجا نیز هستند (شکل ۵-۳-الف).



شکل ۵-۳- نقش توپوگرافی در تنشهای برجا [۱۴]

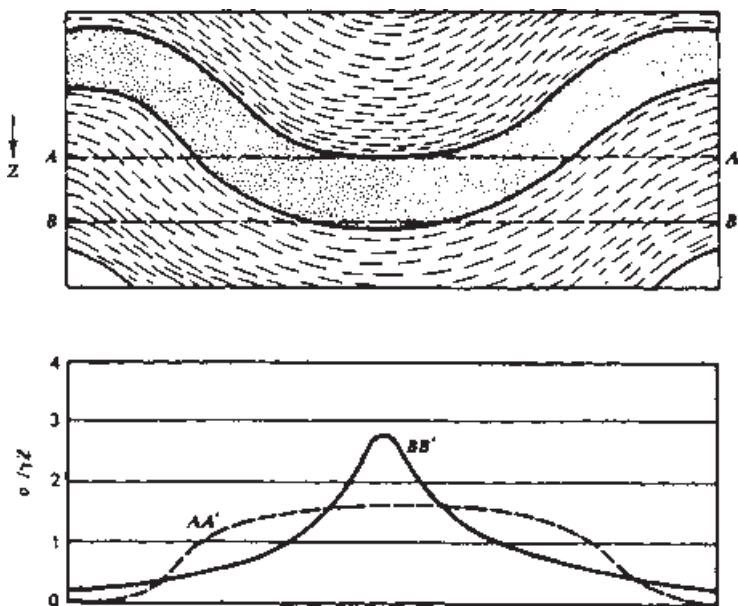
این فرضیات که برای ساده تر شدن مطلب و کاهش مقدار مجهولات فرض می شود، در عمل نیز نتایج قابل قبولی به دست داده است.

باید توجه داشت که در مورد زمینهای غیرافقی، مثلا دامنه دره ها، فرض قائم بودن یکی از تنشهای اصلی، صحیح نیست (شکل ۵-۳-ب). در این موارد، چون سطح زمین (سطح اصلی) شیب دار است لذا یکی از تنشهای اصلی، عمود بر سطح دره و معادل صفر است و دو تنش اصلی دیگر به حالت مورب قرار دارند (شکل ۵-۳-ب). در مواردی که شیب دامنه دره محدب و به سمت بالا باشد، این تنشها نیز اندک اند و به سمت صفر میل می کنند اما در مواردی که مقعر و رو به بالا باشد، مقدار آنها بیشتر می شود [۱۴]. گرچه رابطه ۵-۱ در بسیاری موارد قادر است مقدار تنش قائم را در اعماق مختلف به دست دهد اما اگر عمق سنگها کم و پدیده ساختاری مهمی نیز وجود داشته باشد، با وجود ثابت بودن عمق، ممکن است اندازه تنش قائم در نقاط مختلف یک سطح افقی تغییر کند. به عنوان مثال در شکل ۵-۴، منحنی تغییرات

نسبت  $\frac{\sigma}{\gamma Z}$  در امتداد دو سطح افقی  $AA'$  و  $BB'$  نشان داده شده است و به طوری

که دیده می شود، به علت وجود یک ناودیس، این نسبت ثابت نیست. به عنوان مثال در امتداد سطح افقی  $AA'$ ، اندازه تنش قائم از حدود ۶۰ درصد بیش از  $\gamma Z$  در حوالی

محور ناودیس تا حوالی صفر تغییر می‌کند. اگر تونلی در امتداد  $BB'$  حفر شود، در محدوده شیل، با سنگهای کم تنش مواجه خواهد بود حال آنکه وقتی تونل به محدوده ماسه سنگ برسد، با سنگهایی که تحت تنشهای بالایی قرار دارند، روبرو خواهد شد. از آنجا که وجود پدیده‌های ساختاری ممکن است میزان تنشهای قائم و جهت تنشهای اصلی را تغییر دهد لذا قبل از احداث سازه‌های زیرزمینی، باید ساختارهای زمین شناختی را به دقت بررسی و شناسایی کرد.



شکل ۵-۴- نقش ساختارهای زمین شناختی در تنش قائم [۱۴]

**ب - تنشهای افقی:** تعیین تنشهای افقی برجا به سادگی تنشهای قائم نیست. در سال ۱۹۵۲ میلادی، ترزاقی و ریچارت سعی کردند که بر مبنای قوانین الاستیسیته، رابطه بین تنشهای قائم و افقی را به دست آورند. بر اساس مطالعات آنها هرگاه مکعبی از سنگ را مطابق شکل ۵-۱ در نظر گیریم و آنرا متجانس و همسانگرد فرض کنیم، تنشهای افقی از رابطه زیر به دست می‌آیند [۱۲ و ۱۳]:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z \quad (2-5)$$

در این رابطه  $\nu$  نسبت پواسون است. اگر ضریب پواسون متوسط سنگهای

منطقه را ۲۵٪ فرض کنیم، خواهیم داشت :

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\sigma_z}{3} \quad (3-5)$$

در عمل، تنشهای افقی اندازه‌گیری شده در بسیاری از نقاط دنیا، با آنچه که از رابطه ۲-۵ یا ۳-۵ به دست می‌آید، چندان سازگار نیست و این روابط امروزه کاربردی ندارند. بنابراین در حالت کلی باید رابطه بین تنشهای افقی و قائم را به شکل زیر نوشت :

$$\sigma_h = K\sigma_v \quad (4-5)$$

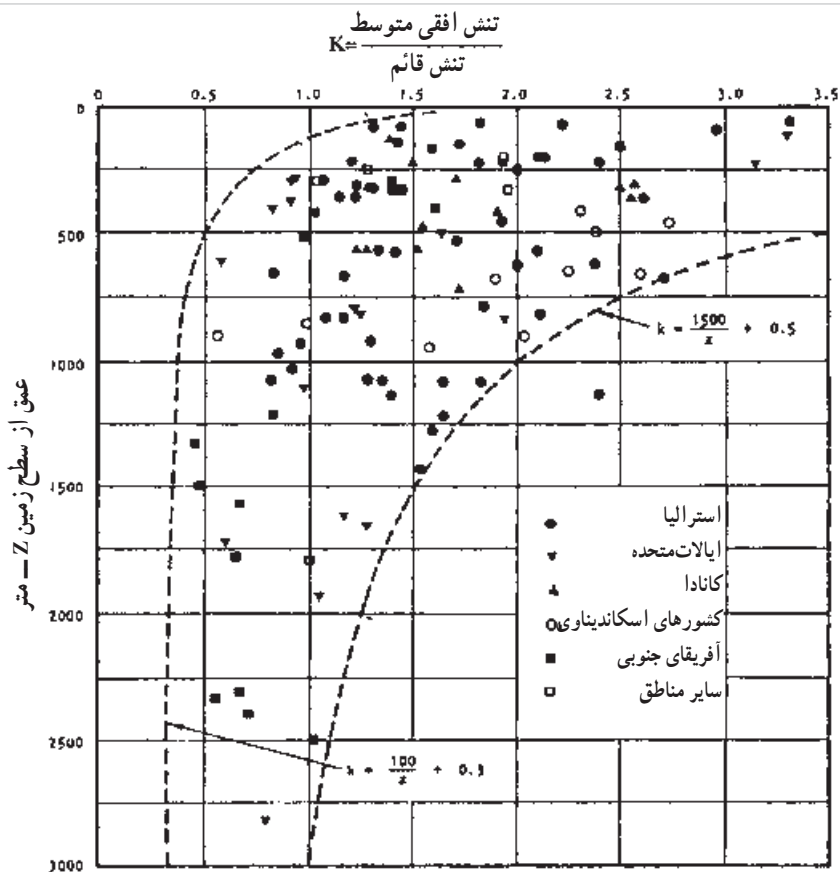
در این رابطه  $\sigma_h$  تنش متوسط افقی،  $\sigma_v$  تنش متوسط قائم و  $K$  نسبت تنش افقی متوسط به تنش قائم متوسط است.

برای تعیین ضریب  $K$  کوششهای فراوانی انجام گرفته است. برای تعیین این ضریب، در نقاط مختلف زمین، تنشهای افقی و قائم اندازه‌گیری شده که حاصل آنها به صورت نموداری در شکل ۵-۵ آمده است.

مطابق شکل، در اعماق کمتر از ۵۰۰ متر، تنشهای افقی بیش از تنشهای قائم است (برخلاف روابط ۲-۵ و ۳-۵). در اعماق حدود ۱۰۰۰ متر، ضریب  $K$  به سمت واحد میل می‌کند و بنابراین در این اعماق، تنشهای افقی و قائم تقریباً مساوی‌اند. این امر از مدتها پیش در سال ۱۹۱۲ میلادی تحت عنوان قانون هیم<sup>۱</sup> توسط وی ارایه شد. مطابق این قانون، طی دوره‌های زمین‌شناختی، وضعیت تنشهای مؤثر بر سنگ به گونه‌ای است که در اعماق، تنشهای افقی و قائم به حال تعادل می‌رسند و با هم برابر می‌شوند. قانون هیم در سنگهای ضعیف نظیر زغال سنگ و بعضی سنگهای تبخیری نتایج خوبی به دست داده است و به نظر می‌رسد که در مورد سایر سنگها نیز در اعماق بیش از ۱۰۰۰ متر، معتبر باشد [۱۰]. شکل ۵-۵، نشانگر آن است که ضریب  $K$  در محدوده‌ای قرار دارد که از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۰] :

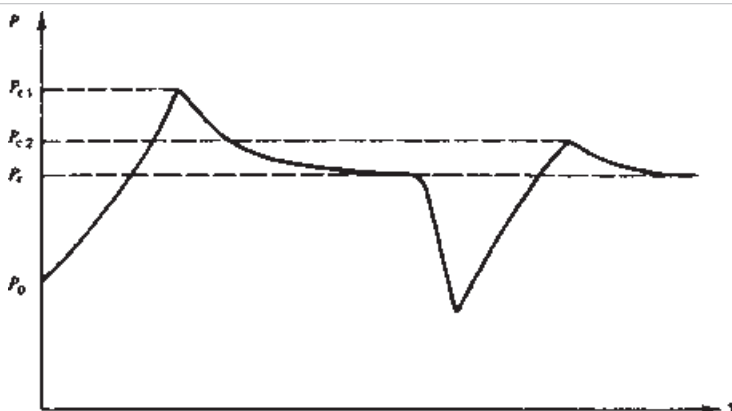
$$\frac{1000}{Z} + 0.3 < K < \frac{1500}{Z} + 0.5 \quad (5-5)$$

۲-۲-۵- اندازه‌گیری عملی تنشهای برجا: برای اندازه‌گیری تنشهای برجا، بسته به امکانات موجود، روشهای متفاوتی وجود دارد که به طور مفصل در کتابهای مکانیک سنگ مورد بحث قرار می‌گیرد. در زیر دو تا از این روشها را به اختصار بررسی می‌کنیم.



**الف - روش شکافت هیدرولیکی (آب شکافت):** با شکافت هیدرولیکی، می‌توان تنشهای برجای سنگ را در اعماق قابل توجه با استفاده از گمانه‌ها برآورد کرد. در این روش، آب به داخل بخشی از گمانه که با مجرا بندهایی مجزا شده است، پمپاژ می‌شود. به موازات افزایش فشار آب، تنشهای فشاری اولیه مؤثر بر دیواره‌های گمانه کاهش می‌یابد و در بعضی نقاط به حالت کششی درمی‌آید. وقتی که میزان تنش به  $T_c$  می‌رسد، ترک خوردگی اتفاق می‌افتد و فشار آب در پایین گمانه در این نقطه،  $P_{c1}$  است (شکل ۵-۶). اگر پمپاژ آب به داخل گمانه ادامه یابد، این ترک گسترش می‌یابد و در نهایت فشار در قسمت پایین گمانه به میزان مقدار ثابت  $P_s$  که گاه آن را «فشار انسداد» می‌نامند، افت می‌کند.





شکل ۵-۶- تغییرات فشار نسبت به زمان در طول پمپاژ آب به داخل گمانه [۱۴]

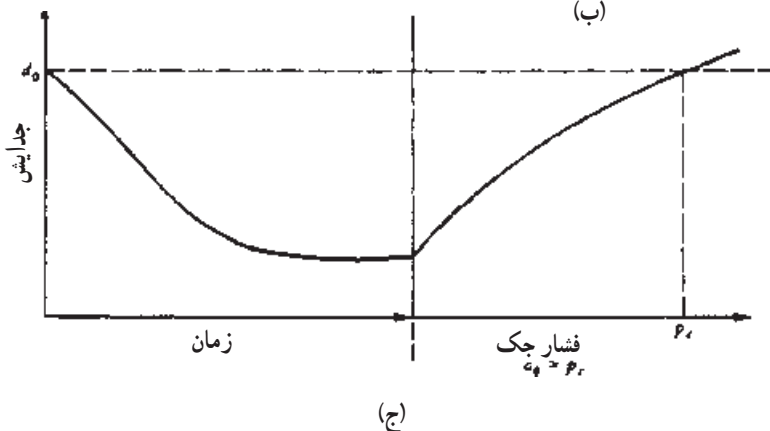
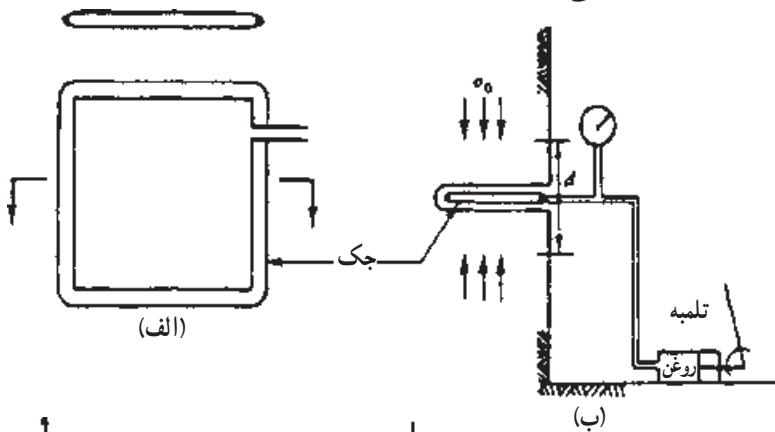
با استفاده از فشار انسداد و به کمک بعضی از روابط ریاضی که شرح آنها موضوع این کتاب نیست، می توان تششهای برجای موجود در محدوده آزمایش را به دست آورد.

ب- روش جک تخت<sup>۱</sup>: روش شکافت هیدرولیکی را فقط می توان در داخل گمانه ها اجرا کرد. اگر جبهه کار سنگ، مثلاً دیواره یک تونل قابل دسترسی باشد، می توان تنش برجا را با استفاده از روش ساده و مطمئن جک تخت برآورد کرد. در این روش جکهای هیدرولیکی تختی که از دو ورق فولادی جوشکاری شده از لبه و یک گریس خور برای ورود روغن به فضای میانی آنها تشکیل شده اند، به کار می روند. با این جکها، می توان به فشاری معادل ۳۴۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع یا حتی بیشتر دست یافت. مرحله ابتدایی کار، برقراری یک یا چند مجموعه نقاط اندازه گیری (نشانه) در جبهه کار سنگ است. فاصله این نقاط معمولاً ۱۵ سانتیمتر است ولی به هر حال باید با طول کشیدگی سنجهای<sup>۲</sup> موجود مطابقت کند. سپس شکاف عمیقی، عمود بر سطح سنگ در بین نقاط مرجع ایجاد می شود (شکل ۵-۷-ب). این شکاف عمیق را می توان با حفر چالهای مجاور هم به کمک چالزن، با به کارگیری یک شابلون برای هدایت مته و یا توسط اره الماسی ایجاد کرد. در نتیجه ایجاد این شکاف، اگر سنگ تحت فشارش اولیه ای عمود بر سطح شکاف واقع باشد، فاصله دقیق بین نقاط از  $d$  به مقادیر کوچکتری کاهش می یابد (شکل ۵-۷-ج). اگر ثابتهای الاستیک سنگ معلوم

۱- Flat Jack

۲- Extensometer

باشد، تنشهای قائم اولیه را می‌توان به کمک جابه‌جایی نشانه‌ها، محاسبه کرد. پس از ایجاد شکاف، جک تخت را در شکاف جاسازی و آن را با دوغاب سیمان در جای خود محکم می‌کنند و تحت فشار قرار می‌دهند. وقتی که نقاط نشانه به فاصله اولیه خود،  $d_0$  بازگشتند، فشار درون جک ( $P_c$ ) به تنش اولیه عمود بر سطح جک نزدیک می‌شود. از لحاظ تئوری، به خاطر تنش اولیه موازی با شیار و تفاوت‌های هندسی بین داخل جک و داخل شکاف، یک ضریب تصحیح مورد نیاز است. اما این تصحیح در بیشتر موارد، در محدوده عدم اطمینان قرار دارد، و چنانچه از شکافهایی استفاده شود که با اَره‌الماسه ایجاد شده‌اند، مقدار تصحیح مذکور در حد قابل چشم‌پوشی کم و کوچک می‌شود. بنابراین  $P_c$  یعنی فشار درون جک، برآورد قابل قبولی از متوسط تنش اولیه مؤثر بر سطح شکاف است.

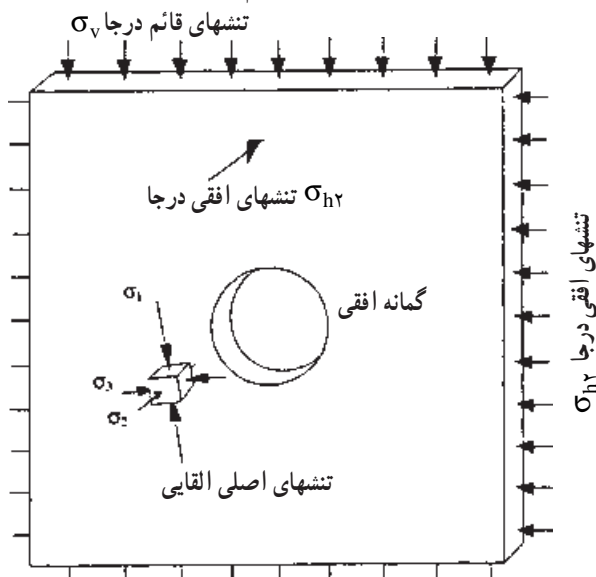


شکل ۵-۷- آزمایش جک تخت [۱۴]

آزمون جک تخت روشی کلی، تقریبی و کم هزینه برای محاسبهٔ یک مؤلفهٔ تنش از تانسور تنش است. این وسیلهٔ اندازه‌گیری تنش را می‌توان درجا ساخت و عملاً خراب نشدنی است؛ نکته‌ای که خود مسئلهٔ مهمی در هر کار ابزاربندی یا برنامهٔ اندازه‌گیری زیرزمینی به شمار می‌آید. محدودیت مهم این روش آن است که تنش اندازه‌گیری شده، در ناحیهٔ به هم خورده تونل مورد نظر برای اندازه‌گیری قرار دارد.

### ۳-۵- تنش در تونلها

وقتی که در داخل توده سنگی که تحت تأثیر تنشهای برجا قرار دارد، تونل یا هر حفره زیرزمینی دیگر احداث شود، وضعیت تنش مؤثر بر سنگها در مجاورت این تونل، به هم می‌خورد و توزیع جدیدی می‌یابد. خارج قسمت تنش جدید در هر نقطه بر تنشی که قبل از احداث تونل در آن نقطه وجود داشت، به نام تمرکز تنش<sup>۱</sup> خوانده می‌شود. برای تشریح مسئله فرض می‌کنیم که در داخل یک توده سنگ متجانس و همسانگرد که تحت تأثیر تنشهای افقی  $\sigma_h$  و قائم  $\sigma_v$  قرار دارد، یک گمانه افقی حفر شود. برای بررسی وضعیت تنشها، ورقه قائمی از این توده سنگی را به حالت عمود بر محور گمانه مطابق شکل ۵-۸ در نظر می‌گیریم.

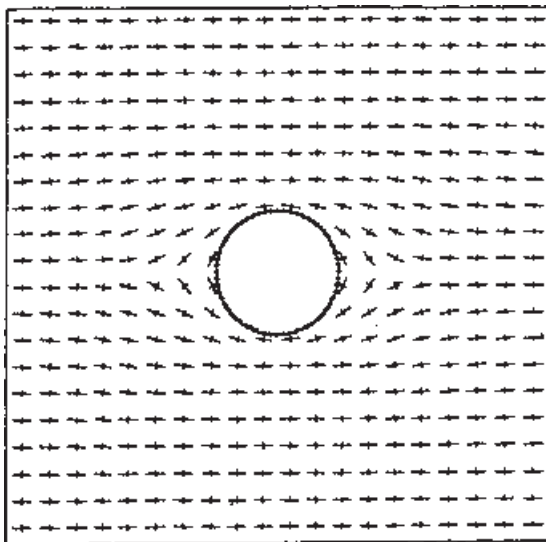


شکل ۵-۸- وضعیت تنشهای اصلی در یک گمانه افقی [۹]

قبل از احداث گمانه، تنشهای برجای  $\sigma_v$ ،  $\sigma_{h1}$  و  $\sigma_{h2}$  به حالت یکنواخت در ورقه یاد شده، توزیع شده بودند. پس از حفر بخشی از سنگها و ایجاد گمانه مورد نظر، وضعیت تنشها در این ورقه به هم می خورد و تنشهای جدیدی در اطراف حفره به وجود می آید. هرگاه جزء کوچکی از ورقه را مطابق شکل ۵-۸ در نظر گیریم، تنشهای اصلی مؤثر بر آن  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  خواهد بود.

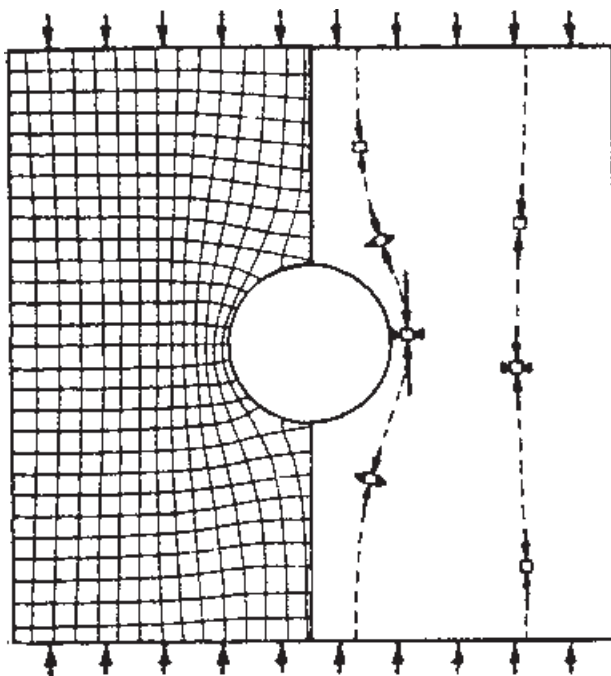
در مکانیک سنگ، تنشهای فشاری را مثبت و تنشهای کششی را منفی در نظر می گیرند. همچنین بزرگترین تنش اصلی را با  $\sigma_1$  (بدون در نظر گرفتن علامت) و کوچکترین آنها را با  $\sigma_3$  نشان می دهند.

سه تنش اصلی مؤثر بر جز مورد بررسی بر هم عموداند اما وضعیت آنها نسبت به تنشهای برجا ممکن است موازی یا متمایل باشد. این امر در شکل ۵-۹ تشریح شده و طی آن جهت تنشهای اصلی مؤثر بر سنگها در اطراف گمانه مورد نظر نشان داده شده است. در اینجا فرض شده که تنشهای افقی برجا ( $\sigma_{h1}$ ) سه برابر تنشهای قائم برجا ( $\sigma_v$ ) باشد. در شکل ۵-۹، خطوط بزرگتر در هر منطقه نشانگر تنش ماکزیمم  $\sigma_1$  و خطوط کوتاه نشانگر تنش مینیمم  $\sigma_3$  است. در این مثال خاص، تنش متوسط  $\sigma_2$  با تنش برجای  $\sigma_{h2}$  موازی است اما تنشهای اصلی نسبت به  $\sigma_{h2}$  و  $\sigma_v$ ، حالت مورب دارند.



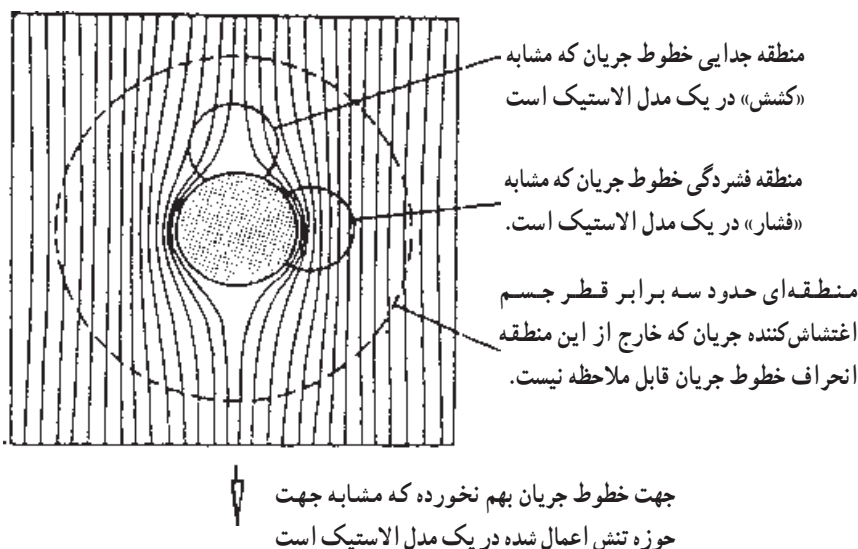
شکل ۵-۹- جهت تنشهای اصلی در توده سنگ در اطراف یک گمانه افقی. در این مورد تنشهای برجای افقی سه برابر تنشهای برجای قائم فرض شده است [۹]

یکی از روشهای نمایش وضعیت تنش پس از احداث حفره‌های زیرزمینی، نمایش مسیر تنشهای اصلی، قبل و بعد از احداث حفره است. مقصود از مسیر تنشهای اصلی خطوط فرضی است که تنشهای اصلی در امتداد آن اثر می‌کنند. قبل از حفر سازه زیرزمینی، مسیر تنشهای اصلی به صورت خطوط منظم و موازی عمود بر هم است اما پس از احداث تونل، این خطوط دچار اغتشاش می‌شوند. در شکل ۵-۱ مسیر تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم در یک توده سنگی متجانس و همسانگرد که تحت تنش الاستیک تک‌محوری قرار دارد، نشان داده شده است. در سمت راست این شکل، دو امتداد مسیر تنشهای اصلی به صورت خط چین نشان داده شده است. به طوری که دیده می‌شود، در فاصله کافی از محور تونل، مسیر تنشهای اصلی به حالت اولیه دست نخورده باقی مانده، حال آنکه در نزدیکی تونل، مسیر منحرف شده است. در این خطوط، اندازه تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم متناسب با طول بردارها، نشان داده شده است.



شکل ۵-۱- وضعیت مسیر تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم در اطراف یک تونل دایره‌ای در توده سنگی متجانس و همسانگرد که تحت تأثیر تنش یک محوره قرار دارد [۱۰]

مسیر تنشهای اصلی را می‌توان با وضعیت خطوط جریان یک سیال، شبیه‌سازی کرد. در داخل سیالی که با جریان آرام و یکنواخت حرکت می‌کند، خطوط جریان به صورت خطوط موازی هم‌اند اما وجود یک مانع در مسیر حرکت جریان سبب می‌شود که خطوط جریان از حالت موازی خارج شوند و مانع را دور بزنند و پس از عبور از آن دوباره به حالت اولیه خود باز گردند (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۱- انحراف خطوط جریان در اطراف یک مانع [۱۰]

شکل ۵-۱۱ نشانگر آن است که در بالا دست و پایین دست مانع، سرعت آب کم می‌شود و خطوط جریان از هم فاصله می‌گیرند و پخش می‌شوند. در مورد وضعیت تنش در اطراف تونلها نیز چنین وضعی کمابیش صادق است و در این مناطق یعنی سقف و کف تونل، تنش کششی اثر می‌کند. در دو طرف مانع، خطوط جریان به هم نزدیک و فشرده می‌شوند که معادل با مناطق تحت فشار در دیواره تونلها است.

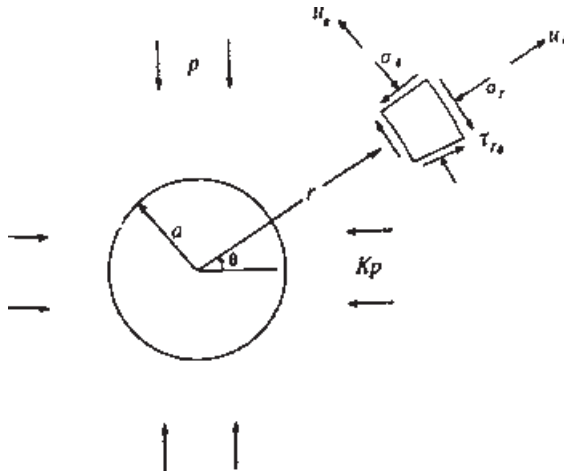
شکل ۵-۱۱ این نکته را نیز نشان می‌دهد که در فاصله تقریباً سه برابر شعاع مانع، خطوط جریان تقریباً به حالت اولیه خود در می‌آیند و این امر نیز در مورد تونلها هم صادق است یعنی در فاصله تقریباً سه برابر شعاع تونل، وضعیت تنش در توده سنگ، همانند حالت دست نخورده قبل از احداث تونل است [۱۰].

## ۵-۴- وضعیت تنش در تونلهای مختلف

برای سهولت کار، در ابتدا فرض می‌کنیم که توده سنگی مورد مطالعه، متجانس، همسان‌گرد و الاستیک باشد. با این فرضیات، موضوع ساده می‌شود و می‌توان روابط ساده‌ای به دست آورد. از آنجا که شکل تونل نیز نقش عمده‌ای در توزیع تنش دارد، لذا مسئله را در مورد مقاطع مختلف بررسی خواهیم کرد.

۵-۴-۱- تونلهای دایره‌ای: مطابق شکل ۵-۱۲، فرض می‌کنیم که در

داخل توده سنگی متجانس، همسان‌گرد و الاستیک، که تحت تأثیر تنشهای قائم  $\sigma_v = p$  و افقی  $\sigma_h = kp$  قرار دارد، تونلی افقی به شعاع  $a$  حفر شود.

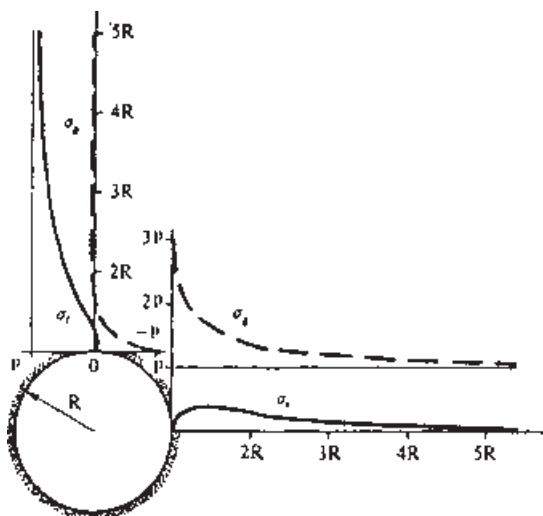


شکل ۵-۱۲- تنش در اطراف تونلهای دایره ای [۱۳]

برای بررسی وضعیت تنش، قطعه کوچکی از سنگ را با مختصات قطبی  $r$  و  $\theta$  مطابق شکل در نظر می‌گیریم و تنشهای عمودی مؤثر بر سطوح این قطعه را  $\sigma_r$  (تنش شعاعی) و  $\sigma_\theta$  (تنش مماسی) می‌نامیم.

اکنون مسئله را در دو حالت تنشهای یک محوره و دومحوره بررسی می‌کنیم.  
الف- تنش یک محوره: در حالتی که توده سنگها فقط تحت تأثیر بار قائم واقع باشند (حالت تنش یک محوره)، در این حالت  $k = 0$  و منحنی تغییرات تنش مطابق شکل ۵-۱۳ خواهد بود [۱۹]. در این شکل تغییرات مولفه‌های  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  در امتداد خطوط قائم و افقی نسبت به محور تونل نشان داده شده است. به طوری که دیده

می‌شود، در این حالت مولفه شعاعی تنش ( $\sigma_r$ ) در محیط تونل در امتداد هر دو خط قائم و افقی صفر است و این وضعیت در مورد تمام نقاط محیطی تونل مصداق دارد. در فواصل کاملاً دور از محور تونل، اندازه تنش  $\sigma_r$  در امتداد محور افقی به سمت صفر و در امتداد محور قائم به سمت  $p$  میل می‌کند. علت آن واضح است زیرا قبل از احداث تونل، تنشهای افقی و قائم به ترتیب برابر صفر و  $p$  بود و بنابراین با فاصله گرفتن از محور تونل، تنشها به سمت مقادیر اولیه خود میل می‌کنند.



شکل ۵-۱۳- توزیع تنش در اطراف یک تونل دایره‌ای در حالت تنش یک محوره [۱۹]

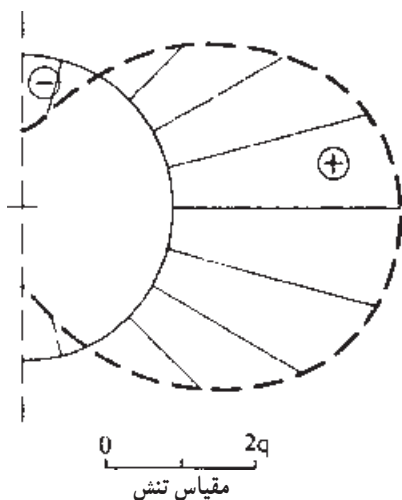
از سوی دیگر، اگرچه مولفه‌های تنش مماسی ( $\sigma_\theta$ ) نیز با افزایش فاصله، به سوی مقادیر اولیه خود تمایل می‌یابند اما در امتداد افقی و مجاورت تونل، اندازه آن به حدود  $3p$  یعنی سه برابر تنشهای اولیه می‌رسد و در طول این خط به تدریج کاهش می‌یابد تا به حد  $p$  یعنی اندازه اولیه تنش برسد. در امتداد قائم نیز مقدار این تنش در مجاورت تونل  $-p$  است و با افزایش فاصله از محور تونل، مقدار آن به صفر می‌رسد. به طوری که دیده می‌شود، احداث تونل سبب تغییرات مهمی در این تنش، نسبت به تنشهای اولیه شده است.

به علت متقارن بودن شکل تونل و نحوه بارگذاری، توزیع تنشها در سمت چپ تونل نیز همانند سمت راست آن است. این وضعیت در مورد سنگهای زیر تونل نیز صادق است یعنی توزیع تنش در زیر تونل، همانند بالای آن خواهد بود.



با توجه به مطالب یاد شده، چنین نتیجه گیری می توان کرد که تمرکز تنش ایجاد شده در محدوده تونل، با افزایش فاصله از محور آن، به سرعت کاهش می یابد و حداکثر تنشهای مثبت و منفی ایجاد شده به ترتیب  $3p$  و  $-p$  است که در دیواره تونل اعمال می شود. بنابراین اندازه تنش مماسی در دیواره تونل از نقطه نظر پایداری آن بسیار اهمیت دارد. نکته مهم آن است که نه وضعیت توزیع و نه اندازه بحرانی، به ابعاد تونل بستگی ندارند.

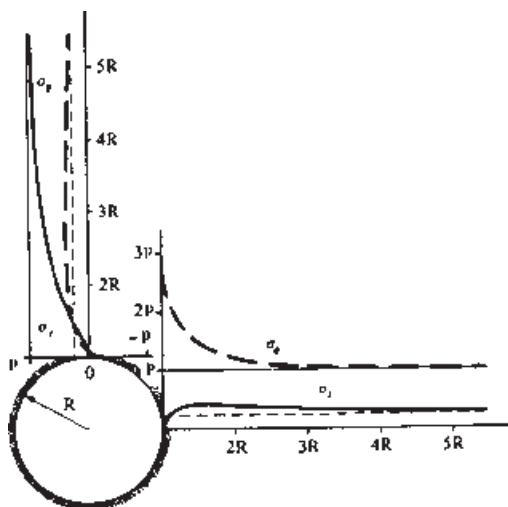
در شکل ۵-۱۴، توزیع تنش های مماسی در دیواره تونل یعنی در مرز تونل و سنگهای اطراف آن نشان داده شده است. در این شکل، اندازه تنش در هر نقطه با طول خطی شعاعی که محیط دایره تونل را به منحنی خط چین بیرونی آن مرتبط می سازد، مشخص می شود. قسمتهایی که در داخل و خارج دایره قرار می گیرند به ترتیب تحت کشش (علامت منفی)، و فشارش (علامت مثبت) قرار دارند [۱۹].



شکل ۵-۱۴- توزیع تنشهای مماسی در مرز یک تونل دایره ای در حالت تنش یک محوره [۱۹]

**ب- تنش دو محوره:** در حالت تنش دو محوره یعنی مواردی که توأمآ تنشهای برجای قائم و افقی وجود داشته باشند، بسته به مقدار  $k$ ، منحنی های توزیع تنش وضعیت های مختلفی خواهد داشت. به عنوان مثال وضعیت توزیع تنشها به ازای  $k = 0/25$  در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. در این مورد نیز وضعیت کمابیش مشابه حالت تنش یک محوره است و همان نتایج را می توان بیان کرد. البته تنشها از

نظر مقدار در این دو حالت متفاوت اند. در این مورد، تنشهای مماسی در مرز بالای تونل  $0/25P$  و در مرزهای کناری آن  $2/75P$  است [۱۹].



شکل ۵-۱۵- توزیع تنش در اطراف یک تونل دایره‌ای در حالت تنش دو محوره  $K=0/25$  [۱۹]

اگر  $k=1$  باشد، به معنی آن است که توده سنگ تحت تأثیر تنش همه‌جانبه (هیدروستاتیک) قرار دارد و روابط تنش به شرح ساده زیر در می‌آیند:

$$\sigma_r = p \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (6-5)$$

$$\sigma_\theta = p \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (7-5)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (8-5)$$

در این حالت طبق رابطه ۶-۵، اندازه تنش شعاعی در هر نقطه از مرز تونل  $(r=a)$  برابر صفر و اندازه تنش مماسی طبق رابطه ۷-۵ برابر  $2p$  خواهد بود.

از مقایسه دو حالت  $k=1$  و  $k=0$  چنین نتیجه می‌توان گرفت که با افزایش  $k$  از صفر تا ۱، اندازه تنشهای بحرانی در جدار تونل از  $3p$  به  $2p$  و از  $-p$  به  $2p$  تغییر می‌کند [۱۹].

به‌ازای مقادیر دیگر  $k$  نیز می‌توان وضعیت تنشها را بررسی کرد. که شرح آن از سطح این کتاب خارج است.

در مرز و جدار تونل یعنی در فاصله  $r=a$  تنشهای شعاعی  $\sigma_r$  و برشی  $\tau_{r\theta}$  هر دو صفراند لذا مهمترین مؤلفه تنش در جدار تونلها، تنش مماسی در جدار است. به ازای  $k=0$ ، تنشهای مماسی در سقف و کف تونل از نوع کششی اند. به ازای  $k=0/33$  تنش در سقف و کف تونل صفر است و به ازای مقادیر  $k > 0/33$ ، تنش مماسی مؤثر بر جدار تونل از نوع فشاری است. در دیواره‌های تونل نیز تنش از  $3p$  به ازای  $k=0$  تا  $2p$  به ازای  $k=1$  تغییر می‌کند [۱۰].

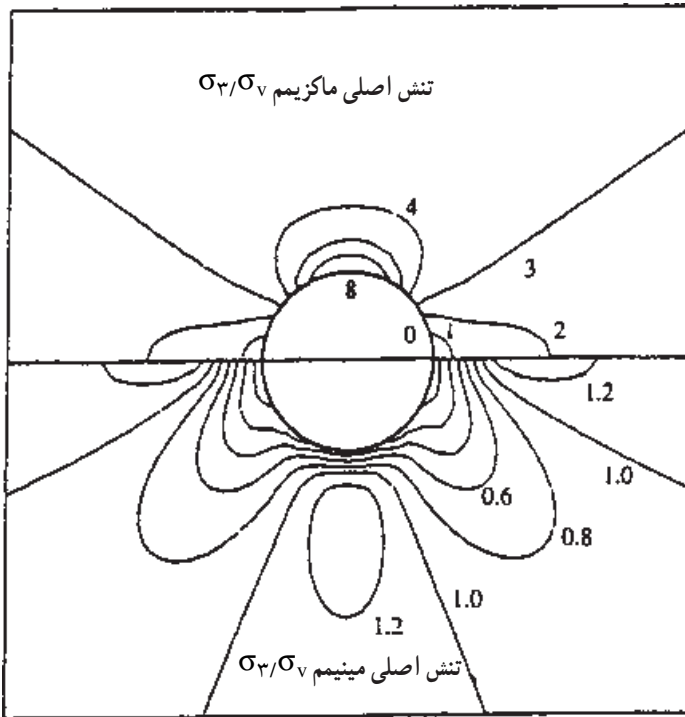
**ج - نتایج کلی در مورد وضعیت تنش در تونل‌های دایره‌ای:** از آنچه که تاکنون گفتیم می‌توان نتایج کلی زیر را در مورد وضعیت تنش در یک تونل دایره‌ای که در سنگهای همگن، همسان‌گرد و الاستیک حفر شده است، بیان کرد [۱۰]:

- وضعیت تنش در چهار ربع یک تونل دایره‌ای حالت متقارن دارد. به بیان دیگر محورهای تونل، محورهای تقارن تنشها نیز هستند و بنابراین بررسی در یکی از ربع‌ها و به ازای مقادیر  $\theta = 0^\circ$  تا  $\theta = 90^\circ$  کافی است تا اطلاعات کاملی از وضعیت تنشها به دست دهد.

- به شرطی که سنگهای اطراف تونل الاستیک فرض شوند، توزیع تنش مستقل از جنس آنها است.

- در روابط ریاضی مربوط به توزیع تنش، شعاع تونل به طور مستقل دخالت ندارد بلکه در این فرمولها، پارامتر بدون بعد  $\frac{a}{r}$  یعنی نسبت شعاع تونل به فاصله، دخالت می‌کند. به بیان دیگر وضعیت توزیع تنش در تونلی به قطر ۵ متر و تونلی به قطر ۱۰ متر کمابیش یکسان است. باید توجه داشت که این تعبیر فقط در موردی که سنگها همگن، همسان‌گرد و الاستیک فرض شده‌اند، اعتبار دارد و در عمل که سنگها این خواص را ندارند، قابل تعمیم نیست.

**د - منحنی‌های تراز تنش اصلی در اطراف تونل‌های دایره‌ای:** یکی از راههای نمایش وضعیت تنش در اطراف تونل‌های دایره‌ای، رسم منحنی‌های تراز تنش اصلی ماکزیمم و مینیمم در اطراف تونل است زیرا پایداری سنگها تا حد زیادی به مقدار این دو تنش بستگی دارد. در شکل ۵-۱۶ نمونه‌ای از منحنی‌های تراز تنشهای ماکزیمم و مینیمم در اطراف یک تونل دایره‌ای در حالت  $k=3$  نشان داده شده است.

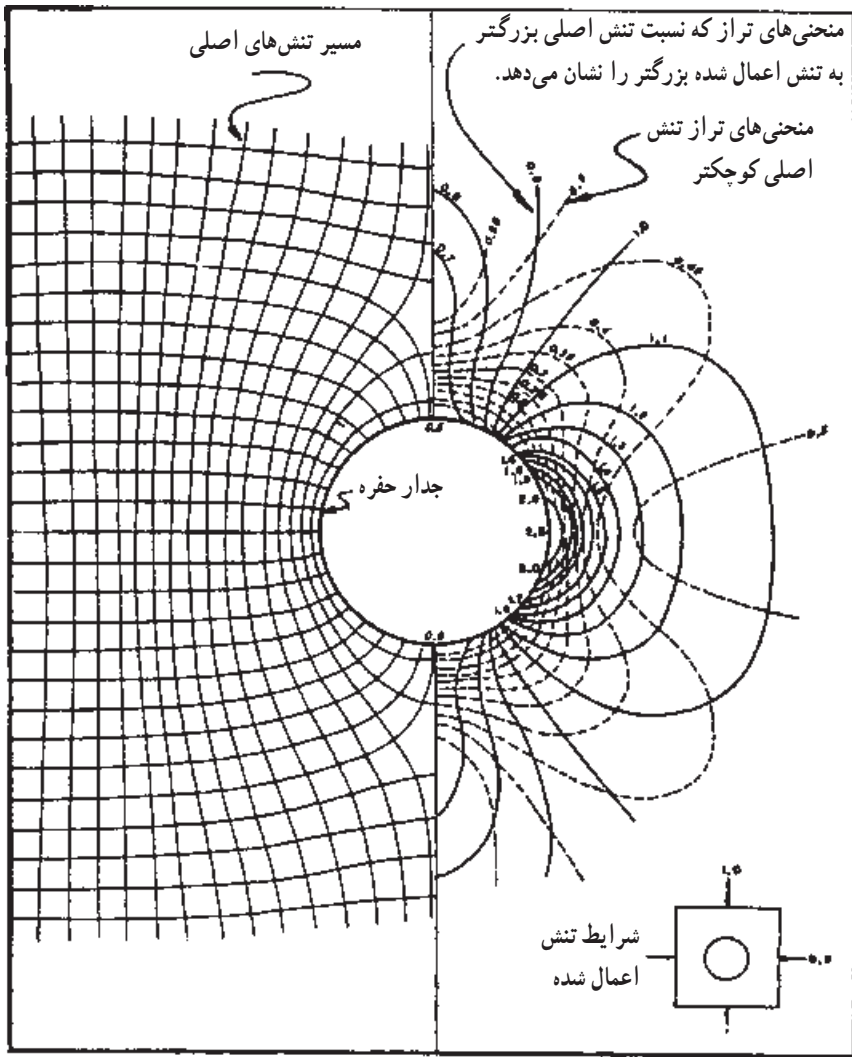


شکل ۵-۱۶- منحنی‌های تراز تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم در اطراف یک تونل دایره‌ای که در سنگهای همگن، همسان‌گرد و الاستیک و با وضعیت  $k=3$  حفر شده است [۹]

در شکل ۵-۱۷ نیز نمونه دیگری از منحنی‌های تراز تنشهای اصلی همراه با مسیر آنها نشان داده شده است. در این حالت  $k=0.5$  و اعداد مندرج در منحنی‌های تراز، نسبت تنشهای اصلی به یکی از دو تنش اعمالی است که از دیگری بزرگتر است.

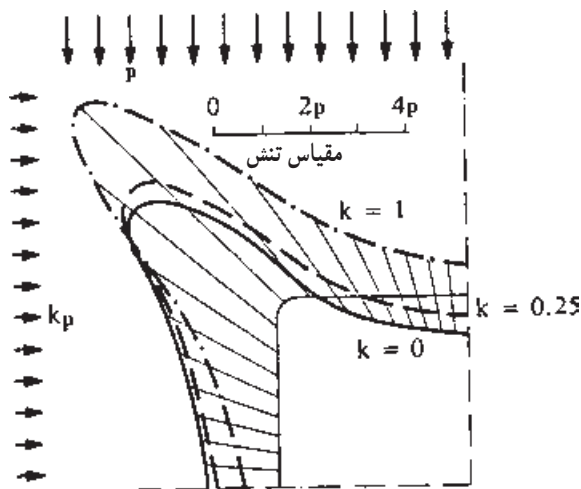
#### ۵-۴-۲- تونلهای با مقاطع چهارگوش: توزیع تنش در اطراف تونلهای

با مقاطع مربع و مستطیل به نحوه جهت یافتگی آنها نسبت به تنشهای اصلی، شعاع انحناى گوشه‌ها و نسبت عرض به ارتفاع مقطع بستگی دارد. از نظر تئوری، در یک گوشه قائمه از مقطع چهارگوش تنش به سمت بینهایت میل می‌کند (زیرا شعاع انحناى این گوشه‌ها صفر است). بنابراین، در عمل از گوشه‌های گرد شده استفاده می‌شود و شعاع انحناى این گوشه‌ها را نسبت به یکی از اضلاع مقطع می‌سنجند [۱۹].



شکل ۵-۱۷- منحنی های تراز تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم در اطراف یک تونل دایره ای به ازای  $k=0.5$  همراه با مسیر آنها [۱۰]

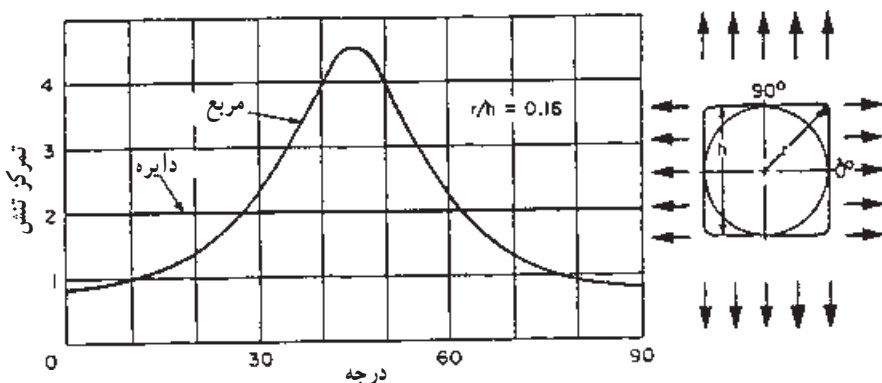
در شکل ۵-۱۸، توزیع تنشهای مماسی در مرز یک مقطع مربع با گوشه های گرد، به ازای مقادیر مختلف ضریب  $k$  نشان داده شده که در این مورد، شعاع گوشه ها  $0.06$  ضلع مربع است. در این شکل به علت متقارن بودن مقطع، وضعیت توزیع تنش فقط در یک گوشه آن نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۸- توزیع تنش‌های مماسی در مرز یک تونل مربع شکل [۱۹]

در شکل‌های ۵-۱۹ و ۵-۲۰ نیز توزیع تنش در مورد مقاطع چهارگوش در میدانهای تنش هیدروستاتیک و یک محوره نشان داده شده است. به منظور بررسی وضعیت تمرکز تنش در مورد مقاطع مستطیل، مقادیر عددی تمرکز تنش در اطراف یک تونل با مقطع مستطیل و با نسبت ابعاد (عرض به ارتفاع) مختلف، در جدول ۵-۱ درج شده است.

وضعیت مقطع نسبت به تنشهای اصلی و زوایای  $\theta$  و  $\alpha$  در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. جدول ۵-۲ نیز نشانگر تمرکز تنش در تونلهای با مقاطع مختلف و ابعاد متفاوت، در یک میدان تنش یک محوره است.



شکل ۵-۱۹- توزیع تنش در اطراف یک تونل مربع شکل با گوشه‌های گرد در میدان تنش هیدروستاتیک [۱۲]