دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

حفر چاه و تونل

بخش اصلی این جزوه تلخیصی از ترجمه کتاب

Tunnelling
Design , Stability and Construction

می باشد

مترجم ، گردآورنده و مدرس : مهدی یاوری

پائیز ۱۳۷۵

بسم الله الرحمن الرحیم

فصل اوّل - مبانی تونلسازی : هنر و هندسی

تونلها : وظایف و کاربرد

پیشرفتهای تاریخی

هنر تونلسازی

هندسی تونل

تونل و کاربردهای فضاهای زیرزمینی

جنبه های آتی تونلسازی

منابع فصل اول

فصل دوّم - جنبه‌های زمین‌شناسی تونلسازی : بررسی ، ارزیابی و برآورد

مشکلات شرایط زمین‌شناسی

بررسیهای اولیه

گزارگذاری عملیات به روش انگلیسی

اصول و مبانی مراحل مختلف بررسی

تأثیر تغییر شرایط

منابع فصل دوّم

فصل سوّم - تأثیر شرایط زمین‌شناسی بر طراحی و احداث تونلها

محیط زمین‌شناسی

مسائل خاص زمین‌شناسی که در جریان تونلسازی تأثیرگذار هستند : انتخاب شاقول و تمهیدات لازم (remedial measures)

رفتار سنگهای آماسی و تأثیر بر طراحی تونل

تونلهای زیر آبی : جنبه‌های زمین‌شناسی و بررسی

تونلسازی در زمینهای نرم

پدیدهٔ انفجار سنگ در تونلها

ملاحظات و اظهارنظرهای نهائی

منابع فصل سوّم

فصل چهارم - روشهای تونلسازی : شرایط زمینهای نرم

مقدمه

سپرهای باز : علائم ویژهٔ اصلی ساختاری

سپرهای بسته و نیم بسته

ویژگیهای خاص تونلسازی سپری

سپرهای مرسوم تونلسازی

روشهای ویژهٔ تونلسازی سپری

pipe jacking

اظهارنظرهای نهائی

منابع فصل چهارم

فصل پنجم - روشهای تونلسازی : شرایط سنگ در استفاده از چالزنی و آتشباری

ملاحظات مقدماتی

تأثیر اندازهٔ تونل

چالزنی و آتشباری : عملیات اصلی

حفر تونل با استفاده از مواد منفجره

برشهای آتشباری

به حداقل رساندن لرزش زمین

آتشباری با چاشنیهای غیر برقی

بازدهی آتشباری پیشرفته

مرایب (عوامل) قابلیت حفاری سنگ

چالزنی ضربه‌ای

آتشباری آرام

چالزنی با کمک کامپیوتر

پیشرفت تونلسازی با چالزنی و آتشباری

ملاحظات و اظهارنظرهای نهائی

منابع فصل پنجم

فصل ششم - روشهای تونلسازی : شرایط سنگ در استفاده از ماشین حفار کله گاوی

مقدمه

کله گاوی ها : عمل و تجربهٔ تونلسازی
اصول و مبانی برش کله گاوی ها : شیار یا شخم زنی (ripping) در مقابل خرد کردن (milling) عقبگی
کله گاوی ها : انعطاف و انطباق پذیری نسبت به شرایط تونلسازی
و ویژگیهای خرسنگ در ارتباط با کله گاوی ها
طراحی، کنترل و هدایت کله گاوی ها
حفر تونل با جکشهای خرپای هیدرولیک
کله گاوی ها : اجرا در شرایط مختلف زمین شناسی
اظهار نظرها و ملاحظات نهائی
منابع فصل ششم

فصل هفتم - روشهای تونلسازی : شرایط سنگ در استفاده ماشینهای حفر تونل
مقدمه
ماشینهای حفر تونل (TBM) : پیشرفت و تجربه
عملیات اصلی ماشین حفر تونل
کار با TBM و ویژگیهای زمین
تونلهای با قطر کوچک : حفر با TBM
کاربردهای TBM در معادن زغالسنگ
کار با TBM در سنگ
بررسی و مطالعه نحوهٔ اجرای برندهٔ دیسکی
نتایج عملیاتی برندهٔ دیسکی : ماسه سنگهای با مقاومت متوسط
نتایج عملیاتی برندهٔ دیسکی : سنگهای آذرین و رسوبی
ملاحظات و اظهار نظرهای نهائی
منابع فصل هفتم

فصل هشتم - شرایط بد زمین : تأثیر بر تونلسازی
مقدمه
اثرات شرایط بد : موارد عمومی
شرایط بد زمین شناسی و مشکلات تونلسازی با TBM
اثر شرایط بد زمین شناسی بر کار ماشینهای تونلسازی
ملاحظات و اظهار نظرهای نهائی
منابع فصل هشتم

فصل نهم - بهسازی زمین در تونلسازی

مقدمه
کنترل زمین : کلیات
خشک اندازی یا آبگیری زمین
Electro - osmosis
تزریق (دوغاب) (grouting)
انجماد زمین
تکنیکها و وسیله انجماد
ملاحظات و اظهارنظرهای نهائی
منابع فصل نهم

فصل دهم - مخاطرات تونلسازی

مقدمه وکلیاتی در مورد مخاطرات تونلسازی
ریزشهای تونل
تجارب انگلستان در مورد مخاطرات تونلسازی
ایمنی در تونلسازی ، BS 6164 : ۱۹۸۲
خطرات متان در عملیات تونلسازی
گازهای محتوی جو (اتمسفر) تونل
خطرات آتش سوزی در تونلسازی : جلوگیری و کنترل
کار در فضاهای بسته ، تونلهای مسدود (unoccupied) و مناطق (stagnant)
خطر زمین لرزه
نشست گیری
منابع فصل دهم

فصل یازدهم - طراحی و نگهداری تونلها : ملاکها و مبانی عملیاتی و انواع اصلی نگهداری

مقدمه
تونلهای راهسازی یا عمرانی : ملاحظات طراحی
ملاحظات ژئوتکنیکی طراحی
انواع وسائل نگهداری معمول مورد استفاده در تونلهای راهسازی
تونلهای معدنی

انواع وسائل نگهداری معمول مورد استفاده در تونلهای معدنی
روشهای طراحی
اظهار نظرها و ملاحظات نهائی
منابع فصل یازدهم

فصل دوازدهم - نگهداری تونلها: وسائل نگهداری فولادی و قطعات چدنی

مقدمه
پوشش یا آستربندی تونل با قطعات چدنی پیش ساخته
انواع پوشش یا آستربندی
زمینهٔ کاربرد قطعات چدنی برای پوشش
وسائل نگهداری فولادی
وسائل نگهداری RSJ
وسائل نگهداری فولادی تسلیم شو
توزیع بار برروی وسائل نگهداری فولادی
پوششهای ثانویه فولادی
اظهار نظرها و ملاحظات نهائی
منابع فصل دوازدهم

فصل سیزدهم - نگهداری تونلها: تقویت یا استحکام سنگ

مقدمه
مکانیزم نگهداری
امکانپذیری استحکام یا تقویت سنگ
جنبه های فیزیکی تقویت یا استحکام سنگ
اقلام فرعی یا کمکی
مشخصات (Bond)
نقش زمان در تقویت یا استحکام سنگ
تکنولوژی نصب
حوزهٔ کاربرد روشهای تقویت یا استحکام سنگ
اظهار نظرها و ملاحظات نهائی
منابع فصل سیزدهم

فصل چهاردهم - نگهداری تونلها : پوشش یا آستر بندی با بتن و اندود بتنی

مقدمه

نگهداری با قطعات (بلوک ساخته) بتنی

نگهداری با بتن ریزی درجا

ضد آب کردن پوششهای بتنی

اندود بتنی یا بتن پاشی

اظهار نظرها و ملاحظات پایانی

منابع فصل چهاردهم

فصل پانزدهم - نگهداری تونلها : روش جدید تونلسازی با آستر بتنی (NATM) Austrain

مقدمه

کلیاتی در مورد NATM -

شرح کاربرد NATM

NATM : کاربردهای سنگی تونلسازی

NATM : کاربردهای آن در تونلسازی در زمینهای نرم

اظهار نظرها و ملاحظات نهائی

منابع فصل پانزدهم

فصل شانزدهم - تنشها و جابجائیهای مربوط به حفر تونلها

مقدمه

تنشهای زمین

تأثیر شکل تونل بر میدان تنش

بارگذاری ثقلی تونلهای نزدیک به سطح زمین

توزیع مجدد تنش در تونلهای عمیق

جابجائیها و ریزش تودهٔ سنگ

تأثیر تونلها بر یکدیگر

نتیجه گیری ها

منابع فصل شانزدهم

فصل هفدهم - طراحی تونلها : زمین نرم

مقدمه
ملاحظات کلی طراحی
تأثیر نوع پوشش یا آستربندی بر روشهای طراحی
طراحی پوشش تونل در ارتباط با بارگذاری سپر
طراحی پوشش تونل نسبت به بارگذاری زمین
رفتار و طراحی پوشش کوتاه مدت
محدودیتهای تکنیکهای طراحی عددی ← روشهای دیگر طراحی
رفتار پوشش بلندمدت تونل
نشست سطحی در ارتباط با تونلسازی در زمینهای نرم
ابزاربندی و کنترل (monitoring)
اظهارنظرها و ملاحظات نهائی
منابع فصل هفدهم

فصل هیجدهم - طراحی تونلها : شرایط سنگ

مقدمه
طراحی تونلها با توجه به ساختار سنگ
سیستمهای دسته‌بندی توده سنگ
دسته‌بندی ژئومکانیکی
نرخ‌بندی توده سنگ (RMR)
سیستم Q
نظرات کلی در مورد کاربرد روشهای دسته‌بندی توده سنگ
مقایسه دسته‌بندیهای مختلف توده سنگ
شیوه‌های دیگر طراحی : ناپایداری ساختار سنگ
کاربردهای نگهداری به منظور کنترل ویژگیهای ساختاری توده سنگ
طراحی تونلها : تنش ایجاد کننده (closure) و ناپایداری
رفتار تنش - کرنش سنگ
تحلیل تنش تونلها
رفتار توده سنگ
پوشش‌ها، مشخصات نگهداری در طراحی عددی
روشهای طراحی غیرعددی

طراحی تونل و تنشهائی که موجب ناپایداری و (closure) می شوند.
اظهارنظرها و ملاحظات نهائی
منابع فصل هیجدهم

فصل نوزدهم - تونلسازی : دورنمای پیشرفت، ابداع و روند آینده
مقدمه
پیشرفت در تونلسازی
ابداع در تونلسازی
منابع فصل نوزدهم

فهرست موضوعی
فهرست مکانی
فهرست مؤلفین

فصل اوّل

مبانی تونلسازی: هنر و صنعت

تونلها: وظایف و کاربرد

تونلها سازه هائی زیرزمینی هستند که به منظور دستیابی به حمل و نقل راحت و بی دردسر در شرایطی که مشکلات طبیعی یا خطرات خاصی در مسیر وجود دارد، احداث می شوند. غلبه بر موانع طبیعی نظیر رشته کوهها، رودخانه ها و دریاها، از طریق تونلها، امکان یک حمل و نقل بی دردسر و ایمن را در کلیه مواقع، بدون توجه به شرایط آب و هوائی، فراهم می آورد. تونلها گذشته از این که به صورت شبکه های جدید حمل و نقل، امکان برقراری یک جریان پیوسته مسافر و کالا را فراهم می آورند، به صورت یک نیاز یا ضرورت مهم اجتماعی برای توسعهٔ شهرنشینی در انتقال نیز در آمده اند. بنابراین، وظیفه تونلسازی برقراری و تضمین آسودگی و راحتی حمل و نقل مستقیم، همراه با ایمنی، کارائی و پیوستگی عملیات می باشد.

در عملیات معدنکاری زیرزمینی، تونلها راههای دسترسی به کانی، استخراج آنها و در نهایت بیرون کشیدن و جابجا کردن کانیها از معدن می باشند.

تونلها بخش عمده ای از زندگی هر روزهٔ جوامع کشورهای توسعه یافته را تشکیل می دهد و خدمت و دامنه عمومی کاربرد آنها همراه با گسترش نیازهای جوامع مختلف، رو به رشد می باشد.

در جدول ۱-۱ موارد دی از دامنهٔ عمومی کاربردهای تونلها آورده شده است. در سالهای اخیر، توجه بر توسعه و گسترده کردن وظیفه و کاربرد تونلها به منظور تأمین نیازهای رو به تزاید جوامع بدون استمرکز بوده است.

پیشرفتهای تاریخی

رهیافتها و پیشرفتهای قابل توجه سه هزار سال گذشته را در ترقی و پیشرفت تونلسازی امروزه، نمی توان نادیده انگاشت. تونلهائی با قدمت صدها و هزاران سال که هنوز یا برجا مانده اند، نشانگر عبارت قابل ملاحظه در هنر احداث تونل هستند که در آن زمان وجود داشته است.

جدول ۱-۱ دسته بندی کلی از کاربردهای تونلها

دستهٔ اصلی	کاربردهای تونلها
۱- تونلهای عبور و مرور (ترابری) (۱)	۱- تونلهای راه آهن ۲- تونلهای ارتباطی بزرگراهها و جاده ها (۲) ۳- تونلهای عابر پیاده (۳) ۴- تونلهای کانالهای کشتیرانی (۴) ۵- تونلهای مترو زیر زمینی یا مترو (۵)
۲- تونلهای انتقال (۶)	۱- تونلهای ایستگاهها یا تیرو ماشینهای برقابی (هیدروالکتریک) (۷) ۲- تونلهای انتقال آب (۸) ۳- تونلهای آب ضروری همگانی: معبر و تونل خط آب، برق و گاز... (۹) ۴- تونلهای فاضلاب (۱۰) ۵- طرحهای صنعتی: تونلهای حمل و نقل (۱۱) (۱۲)
۳- تونلهای اکتسابی	۱- ذخیره برداری یا استخراج: راه و آمد و بارگیری، راهروها (۱۴) (۱۵) (۱۶) آبافتها (۱۷) (تا عمر کم) ۲- تونلهای خدمات رسانی (۱۸) ۳- تونلهای زهکشی (۱۹) و (۲۰)

Main classification	Tunnel applications
1. Traffic tunnels	1. Railway tunnels 2. Highway and road connections 3. Pedestrian tunnels 4. Navigation tunnels 5. Subway tunnels
2. Conveyance tunnels	1. Hydroelectric power plants/stations tunnels 2. Water supply tunnels 3. Public utilities: intake and conduits 4. Sewer tunnels 5. Industrial plant: transportation tunnels
3. Mining tunnels	1. Access and arterial tunnels (long life) 2. Tunnels for exploration purposes 3. Exploitation: drivages, galleries and rooms (short life) 4. Service tunnels 5. Drainage adits and relief tunnels

برخی از صاحبنظران اظهار داشته اند که شواهد قدیمی دال بر وجود کارهای احداث تونل در تمدنهای قدیمی، منعکس کننده رشد فرهنگ تمدنها و بویژه رشد تکنیکی و توان اقتصادی آن جوامع است.

تونلها نقش مهمی در توسعه تمدنها بازی کرده اند. تمدنهای قدیمی به ارزش تونلها پی برده بودند، ولی انسانهای نخستین در تلاشهایشان به منظور توسعه حفرات طبیعی یا بزرگ کردن راهروها یا گذرگاههای زیرزمینی ایجاد شده توسط آبهای زیرزمینی، دریافته بودند که بالقوه مهارتهایشان را در ایجاد حفریات زیرزمینی، البته نه به مفهوم امروزی تونل، گسترش بخشیده. غارها یا سراهایی که انسانهای اولیه به منظور سکونت انتخاب کرده یا ساخته بودند، مبین این نکته هستند که آنها در تلاشهایشان جهت ایجاد حفریات به دنبال راههایی برای بهبود شرائطی که در آن زندگی می کرده اند، بوده اند. غارهای طبیعی در ۴۰۰۰۰ سال قبل از میلاد در استرالیا به عنوان پناهگاه مورد استفاده قرار می گرفتند.

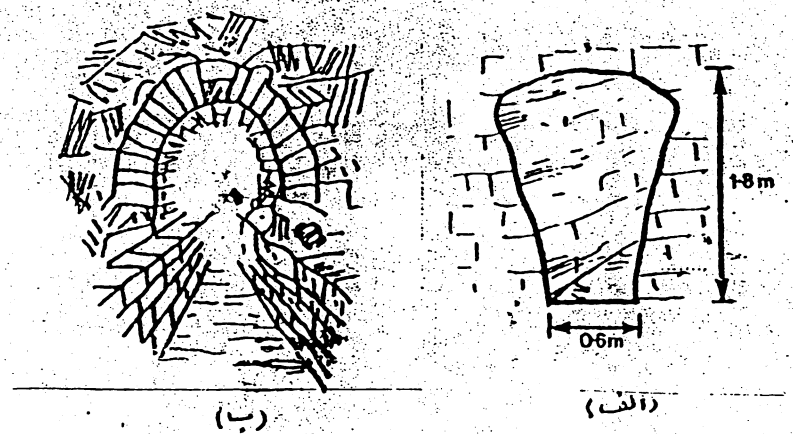
* تمدنهای اولیه بسرعت به اهمیت تونلها به عنوان راههای دسترسی و یا برای دست یافتن به کانیها و مواد طبیعی، نظیر سنگ چخماق[1] به واسطه اهمیتش برای زندگی، پی بردند. استفاده انسان از فلزات نظیر مس، برنز و طلا قدمتی طولانی دارد که استحصال آنها از زمین مستلزم عملیات معدنکاری به صورت سطحی و زیرزمینی بوده است. عملیات معدنکاری بویژه معدنکاری زیرزمینی نقش عمده ای در توسعه و پیشرفت تونلسازی بازی کرده است.

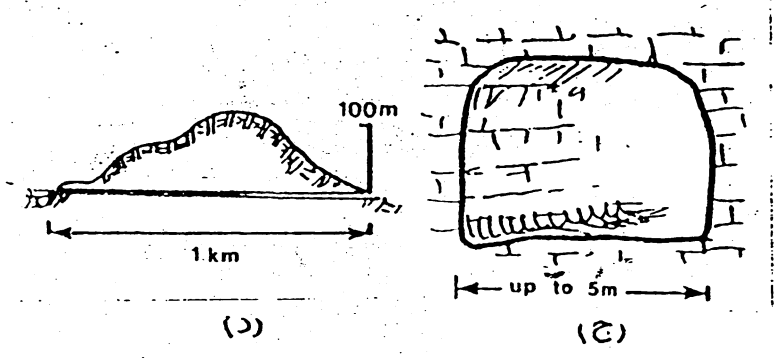
کلیه کاربردهای تونل به وسیله تمدنهای اولیه شناسائی شده بود و این کاربردها دامنه گسترده ای از طاق زدن بر روی قبرها تا تونلهائی به منظور انتقال آب و راهها یا گذرگاههائی جهت رفت و آمد را شامل می شد. کاربردهای نظامی تونلها، بویژه از جهت بالا بردن توان گریز یا راههائی جهت یورش به قرارگاهها و قلعه های دشمن، یکی از جنبه های مهم کاربرد تونلها در تمدنهای اولیه می باشد.

شکل ۱-۱ نمونه هائی از اولین تونلها را نشان می دهد.

1- firestone

افزایش مهارتها و ترقی تونلسازی، ناشی از به کارگیری این سازه‌ها در عملیات معدنکاری بزرگ و پروژه‌های مهندسی عمران می‌باشد. تونلهائی با صدها متر طول به صورتی موفق در هزار سال قبل از میلاد احداث گردیده اند.





شکل ۱-۱ : پیشرفتهای اولیه - تونلهای تاریخی : الف - تونل معادن رومیها . ب - تونل فاضلاب (سیوا، آسور، ۷۰۰ سال قبل از میلاد) . ج - کارهای معدنی رومیان در اسپانیا. د - تونل آب یونانیان در Samos، ۶۰۰ سال قبل از میلاد.

تونلسازی همزمان با انقلاب صنعتی، بویژه به منظور حمل و نقل، تحرک قابل ملاحظه‌ای یافت. تونلسازی به گسترش و پیشرفت کانال سازی کمک کرد و این امر در توسعه صنعت بویژه در قرون ۱۸ و ۱۹ میلادی در انگلستان سهم بسزائی داشت. تونلسازی نقش اصلی در توسعه راه آهن داشت و دستاوردهای مهندسی قابل ملاحظه‌ای در احداث تونل در میان رشته کوههای بزرگ از این رهگذر حاصل آمده.

تونلهای زهکش بزرگ، نظیر تونلی با طول ۷ کیلومتر در Hillcarn انگلستان، اهمیت زیادی در توسعه صنعت معدنکاری داشته اند. همچنین کانالهای زیرزمینی، مانند حدود ۷۰ کیلومتر کانال زیرزمینی که به عنوان ذغالبر در Worsley عمل می‌کرد، وجهه عطیی از معدنکاری قرن ۱۸ و ۱۹ انگلستان

را تشکیل می دهد.

استخراج کانسارهای واقعاً عمیق تنها از طریق شبکه تونلها امکانپذیر است و موفقیت چنین پروژه هائی به پیشرفت تکنیکهای حفر و نگهداری تونلها به منظور غلبه بر شرایط مشکل روبرو از زمین شناسی، بستگی دارد. در افریقای جنوبی تونلهای معدنی در اعماق بیش از ۳ تا ۴ کیلومتر زیر سطح زمین با موفقیت حفر شده اند.

حمل و نقل از طریق تونلهای تحت فشار زیاد آب از جمله تونلهای واقع در زیر رودخانه های بزرگ، دریاچه ها و دریاها، به دلیل منافع خاصی که این گونه سازه ها دارند، در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است.

پیشرفت در تونلسازی: بررسی تاریخچهٔ پیشرفتهای تونلسازی مبین این هستند که پیشرفتهای اصلی در امر تونلسازی از این قرن شروع شده اند، هر چند عمل حفر اصولاً با استفاده از چکش[1] و

[illegible] [2]

یا شیدن آب سرد بر روی سنگهای داغ شده توسط آتش، صورت می گرفت.

هنر تونلسازی

تاریخ تونلسازی دوره ای طولانی از زمان را در بر می گیرد. دستاوردهای اخیر در چنین سازه هائی از افزایش و تن دادن به مهارتها در هنر تونلسازی ناشی می شود. این مهارتها با افزایش آگاهیهای انسان از کار در استخراج سنگ چخماق شروع شد و سپس با استخراج سنگهای ساختمانی و نما توسعه یافت. هنر شکافتن سنگ توسط گوه[3]، مقدمه ای بر استخراج لایه های سنگ از طریق اعمال یک نیروی کششی ضعیف گردید که در دوره های اخیر حاصل آمده است. این امر مبنای هنر تونلسازی را تشکیل داد، یعنی این که انواع سنگها را با قرار دادن گوه یا تیغهٔ کلنگ[4] در صفحات ضعیف موجود در سنگ یا خطوط ضعیفی که به طور عمد توسط یک وسیله در سنگ ایجاد شده اند، می کنند و عمل حفر انجام می شود و کیلومترها تونل تاکنون با چنین روشهائی حفر شده اند. هنر

1-hammer ; 2-chisel ; 3-wedge ; 4-pick

بیشتر عملیات تونلسازی اخیر نیز هنوز شدت بر مهارتها در هنر تونلسازی متکی هستند. افراد داخل در کار تونلسازی تنها می توانند مهندس باشند بلکه هنوز هنر در این بخش از کار ساختمان سازی زیرزمینی جایگاه مهمی را به خود اختصاص داده است.

مهندسی تونل

به نظر می رسد که حتی در زمانهای قدیم نیز یک جنبهٔ مهندسی در عملیات تونلسازی مدنظر قرار داشته است، و اهمیت طراحی کارهای تونلسازی و مشخص کردن روشهای احداث آنها در پروژه های متعدد توسط روحیان شناخته شده بوده است. بهرحال، مهندسی تونل بیشترین پیشرفتش را در ۲۰ سال گذشته در تشخیص عملیات حفر[1] و نگهداری[2] و کنترل عوامل محیطی (فعالیتهای جنبی)[3] و ارائهٔ یک طرح مناسب متمرکز کرده است.

موارد مختلفی از جنبه های متفاوت مهندسی تونل که در صد سالهٔ اخیر در تکامل و پیشرفت تونلسازی تأثیر گذاشته اند، به صورت خلاصه در جدول ۱-۲ آورده شده است.

انواع سپر تونلسازی[4]: همان طور که در جدول ۱-۲ مشاهده می شود، پیشرفت کار تونلسازی بشدت با پیشرفت در زمینهٔ تکنیک حفر وابسته می باشد. کنترل مؤثر زمین با استفاده از وسائل نگهداری بهتر و بکارگیری تزریق دوغاب[5] همراه با پیشرفتهای در زمینهٔ فعالیتهای جنبی یا محیطی نیز نقش مهمی در انجام پروژه های موفق تونلسازی تحت شرایط سخت زمین شناسی، بازی کرده اند. سرعت حفر تونل تحت تأثیر عوامل مندرج در جدول ۱-۲، پیشرفت زیادی داشته است. اظهار شده است که اختراع سپر مهمترین پیشرفت در هنر تونلسازی در دوره های اخیر بوده است. سپرها بیشترین کمک را در حفر تونل در مواقعی که زمین نرم و روانی یا بسیار در شرایطی که زمین آبدار بوده مورد استفاده از سپرها دو مزیت عمده در بر دارد: ۱) تأمین حفاظی در برابر ریزش زمین و ۲) حفاظی با حداقل مخارج نگهداری با استفاده از [illegible] تونل.

1-excavation ; 2-support ; 3-environmental factor ;
4-tunneling shield ; 5-grouting ; 6-timbering

جدول ۱-۲ : عوامل مؤثر در پیشرفتهای مهم در تونلسازی طی صد سالهٔ اخیر

عملیات تونلسازی	عوامل اصلی
۱- حفر	۱- پیشرفت ماشینی یا مکانیزه : انرژی و تجهیزات
	۲- پیشرفت تکنیکهای آتشباری و مواد منفجره
	۳- پیشرفت در بارگیری[1] و باربری[2] مواد کنده شده[3]
	۴- پیشرفت در استفاده از انرژی : برق و هوای فشرده[4]
۲- نگهداری	۱- پیشرفت در پوشش دائمی یا آستربندی[5] : بتن[6] و قطعات چدنی[7]
	۲- پیشرفت در کنترل زمین از طریق تزریق دوغاب تحت فشار[8]
	۳- استفاده از سپرهای تونلسازی که پیشرفت در کنترل زمین در جبهه کار تونل را به دنبال داشت
۳- محیط کاری (عوامل محیطی)	۱- پیشرفت تهویه[9]
	۲- پیشرفت در روشنائی محیط[10]
	۳- کنترل بهتر بر آبهای زیرزمینی به واسطه پیشرفت در پیپها و وسایل آببندی
	۴- کاهش در جریان آب با استفاده از گیره های هوائی[11] فشرده در تونلها

تونلسازی و استفاده از هوای فشرده : در رابطه با آب در تونلها اظهار شده است که ابداع و استفاده از هوای فشرده انقلابی در کار احداث تونلها بود. این ابداع بر این حقیقت استوار بود که فشار هوای داخل تونل را می توان به بیش از فشار اتمسفر و تا حدی افزایش داد که در تعادل با فشاری قرار گیرد که باعث جریان یافتن آب به داخل تونل می شود. جلوگیری از نفوذ یا نشت[12] آب به داخل تونل با این روش امکان پذیر می شود که عملیات احداث تونل در شرایطی مشابه شرایط کاملاً خشک به پیش برود. گفته می شود که هوای فشرده یک راه حل قابل قبول برای مشکل آب می باشد. فشار لازم حداکثر ۲/۱۷ bar (۳۵-۴۰ lbf/in²) بالای فشار اتمسفر و کمتر از فشاری است که افراد تحت آن فشار می توانند کار کنند؛ این فشار برابر است با ارتفاع معادل فشار ۲۴/۴-۲۷/۴ متر آب. محدودیتی

1-loading ; 2-haulage or clearance ; 3-debris ; 4-compressed air ; 5-lining ; 6-concrete ; 7-cast iron ; 8-pressure grouting ; 9-ventilation ; 10-lighting ; 11-lock

که در برابر این پدیده وجود دارد، وجودشان و یا سه‌های نفوذ پذیر در برابر آب یا مواد ثقیل آن است که باعث افت فشار هوای قشده به دلیل نشت[1] هوا می‌شود.

ماشین حفر سنگ: برخی از صاحب نظران تونلسازی اظهار داشته‌اند که پیشرفت عظیم در مهندسی تونل با افزایش کاربرد ماشین آلات حفر جبهه کار به صورت پیوسته و تخلیه مواد کنده شده به داخل نوار نقاله بدون ایجاد انقطاع در پیوستگی عملیات حفر، ایجاد شده است. برخی دیگر نیز با غلو و ظهور صنعت تونلسازی را مورد بحث قرار داده‌اند و توجه را بر پیشرفت ماشینهای مختلف تونلسازی در سنگ معطوف داشته‌اند. این ماشینها تنوع بسزائی در حفر مکانیکی سنگ و توسعه و پیشرفت کار تونلسازی داشته‌اند. عملیات نگهداری در بسیاری از موارد از عملیات حفر جدا و منفک شده است، زیرا طراحیهای خاص نگهداری بگونه‌ای صورت می‌گیرند که امکان دهند نصب آنها به صورت پیوسته در پشت سپرهای طراحی شده، انجام شود.

علاوه براین، می‌توان از وسائل نگهداری تکمیلی[2] مانند پیچ سنگها[3] استفاده کرد و بدون این که نصب آنها مزاحمتی در جریان پیشروی عملیات حفر تونل ایجاد کند، آنها را از درون سوراخهائی که در سپرها وجود دارد، نصب نمود. در نتیجه، سرعت حفر تونل در حد بسیار زیادی افزایش یافته است و ماشینهای حفر تونل تمام رخ قدرتی[4] در شرایط بسیار متفاوت و برای دامنهٔ معاوم‌ای گسترده‌ای از سنگها به کار گرفته شده‌اند. مهندسی تونل منجر به مسیری برای طراحی سپرهای بزرگ و قدرتی شده است بگونه‌ای که تونلهای بزرگ مقطع را می‌توان در یک مرحله یا یک عملیات منفرد حفر نمود. شرایط زمین هنوز به صورت محظور یا مانع عمده برای پیشرفت تونلسازی مطرح و موجود است. زمینهائی که خاصیت مچاله شوندگی زیادی دارند[5] می‌توانند باعث گیر افتادن ماشینهای تونلسازی شوند و نیز نشت شدید آب نیز می‌تواند مانع پیشروی ماشینهای مدرن گردد.

نقش آگاهیها و دانش زمین شناسی: با توجه به پیشرفتهای اخیر مهندسی تونل، آگاهیها و دانش زمین شناسی (ساختگاه) مربوط به شرایط محل عملیات[7]، نقش و جایگاه مهمی یافته است.

1-leakage ; 2-supplementary support ; 3-rock bolt ;
4-powerful full-facer tunnel boring machine ;

ماشینهای جدید تونلسازی نسبت به تغییر شرایط زمین شناسی حساس هستند و این امر ایجاب می کند که برای هر شرایط خاصی طرق مناسب با آن شرایط تهیه گردد. Legget بررسیهای زمین شناسی[1] را مقدم بر مرحله احداث و اجرا دانسته و اظهار داشته است که در میان کلیهٔ کارهای مربوط به تونل، این بررسیها در درجهٔ اول اهمیت قرار دارند. وی اظهار داشته است که مقاطع صحیح و دقیق زمین شناسی همراه با اطلاعات مربوط به مشخصات سنگها از اولین ضروریات کار تونلسازی هستند.

Legget اظهار می دارد که داده های زمین شناسی، مهندس را نسبت به شرایط تونلسازی آگاه خواهد ساخت و همچنین امکان اصلاح و بهبود برآوردهای مربوط به پیشرفت پیش بینی شده کار را به وی خواهد داد. از طرف دیگر، پیمانکاران یا افرادی که با ساخت تونل سروکار دارند، باید داده ها و اطلاعات زمین شناسی، که در اخذ تصمیم راجع به برنامه های احداث و روشهای انتخاب شده وی نقش حیاتی و اساسی دارند، را آماده کنند. آگاهی قبلی راجع به شرایط زمین شناسی تنها روش برای مقاومت در بارهٔ احتمال وقوع خطرات تونلسازی، نظیر آب زیرزمینی می باشد.

البته مسلم است که ملاحظات اقتصادی در تهیه برنامهٔ لازم برای تعیین شرایط زمین شناسی محلهای خاصی که قرار است تونلسازی در آنها انجام گیرد (ساختگاه)، وارد می شوند. بهرحال، Legget با استدلال بیان کرده است که اکتشافات صحیح جهت ایجاد اطمینان نسبت به طرح و روش احداث انتخاب شده انجام شود؛ اولین وظیفه مطالعات و بررسیهای زمین شناسی برای چنین پروژه هائی این است که تعیین کنند آیا شرایط زمین شناسی برای طراحی و احداث تونل مناسب هستند یا نه. این بحث یعنی بررسی و مطالعه شرایط زمین شناسی، مسئله های بالادست[2] در برگیرندهٔ تونل که در اثر ایجاد حفره و حفاری رخ ها اغتشاش می شوند، را نیز در بر می گیرد. مقاومت سنگ[3]، پتانسیل ریزش[4] و فشار سنگ نیز نیاز به بررسی و مطالعه دارد.

1-geological investigation ; 2-immediate rock surrounding tunnel ; 3-rock strength ; 4-collapse potential

کاربرد تونلها و فضاهای زیرزمینی

فضای زیرزمینی، گذشته از تقاضای عمومی برای حفاظت از فضای سبز، وضع و اخذ حقوق و عوارض بسیار زیاد برای ایجاد فضا و تأسیسات سطحی در مناطق شهری دارای تراکم، باعث افزایش و ترویج استفاده از فضاهای زیرزمینی شده است.

کارها و پیش گوئیهای انجام شده در مورد مناسب و مطلوب بودن فضاهای زیرزمینی، همراه با پیشرفتهای فنی صنعت تونلسازی در امر حفر سریع فضاها، این گزینه زیرزمینی را به صورتی بسیار جذاب در آورده است. در مقام مقایسه، بحث تا آنجا پیش رفته است که فضاهای زیرزمینی بسو قابل توجهی ارزانتر از فضاهای سطحی مشابه خود تمام می شوند. مقایسه انجام گرفته در مورد یک مخزن ذخیره سازی نفت نشان می دهد که گزینه زیرزمینی آن ۷۱٪ هزینه مخزن سطحی بوده است [illegible]

و زمان کاری پیش بینی شده برای آن نیز ۳۰ سال بیشتر از مخزن سطحی بوده است.

شایان ذکر است که فضاهای زیرزمینی که برای ذخیره سازی مواد خطرناک و زیان آور نظیر نفت و گاز به کار می روند، از ایمنی بالاتری برخوردار هستند. فنلاند در عمل در زمینه صنعت احداث فضاهای زیرزمینی رشد بسزائی داشته است.

در فن ضایعات رادیو اکتیو مستلزم ارائه طرحهای زیرزمینی خاصی است که در آن میان، تونلها نقش مهمی ایفاء می کنند

Willett اظهار داشته است که استفاده و توانایی فعلی از فضاهای زیرزمینی به دلایل [illegible]

۱- عایق سازی (۱): سنگهای مزاگیر یا درونگیر فضا دارای ویژگیهای عالی عایق بودن هستند.

1-insulation

۳- محدودیت کمتر در احداث سازه‌های بزرگ : امکان احداث سازه‌های بزرگ زیرزمینی بدون نیاز به استفاده از وسایل نگهداری عمده در مقایسه با این چنین سازه‌ای در سطح زمین بیشتر است.

۴- کمتر بودن تأثیرات زیست محیطی : احداث سازه‌های زیرزمینی این فرصت را فراهم می‌آورد که تأثیرات عینی در وضعیت محیطی را کاهش داد ولی نمی‌توان این تأثیرات را حذف کرد.

به منظور تحقق توسعه فضاهای زیرزمینی پاره‌ای نیازها باید تأمین و مد نظر قرار گیرند. عواملی نظیر تهویه، اطفاء حریق و غیره نیازهائی هستند که باید در بررسی هر فضای زیرزمینی، بدقت مطالعه و ارزیابی شوند.

تونلهای ذخیره سازی نفت زیر دریائی نروژ : گزارش شده است که اولین تونل نفت زیر دریائی نروژ با بیش از ۲ کیلومتر طول و در ۸۰ متری زیر بستر دریا با روش چالزنی و آتشباری حفر شده است. مغارهای[1] ذخیره سازی بزرگی به طول ۳۱۴ متر، عرض ۱۹ متر، ارتفاع نوک طاق کوبی شکل یا تاج آن ۳۳ متر و ارتفاع دیواره قائم جانبی ۲۸ طراحی شده و قرار است که در تشکیلات پرکامبرین حفر گردد. تونل اصلی حمل و نقل این مغارها با عرض ۱۰ متر، ارتفاع نوک طاق ۸/۳ متر و سطح مقطع ۷۵ متر مربع طراحی گردیده است.

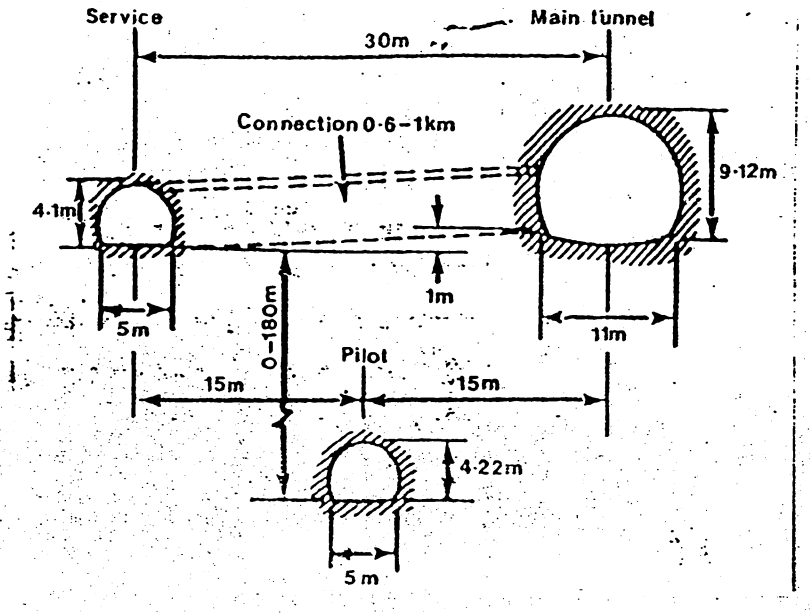
این تسهیلات ذخیره سازی زیر دریائی، جانشین مخازن بر منظر ذخیره سازی سطحی خواهد شد. عایق سازی این مغارها از طریق سنگهای فراگیر تأمین می‌شوند که در غیر این صورت مسئله عایق کردن مخازن با توجه به اختلاف دمای بسیار زیاد بین تابستان و زمستان می‌تواند موجب بروز مشکلاتی گردد.

تونل سیکان[2] : سازه عظیم زیر دریائی : اتمام تونل سیکان در سال ۱۹۸۳ نشان داد که مهارتهای تونلسازی تا بدانجا پیش رفته که قادر است بر شرایط سخت فیزیکی و زمین شناسی غالب آید. این تونل ۵۴ کیلومتری راه آهن ارتباط بین جزایر Hokkaido و Honshu در ژاپن را برقرار کرده

1 - cavern , 2 - Seikan

بهرحال، شرایط زمین بدتر شد و این امر ایجاب نمود که به منظور تقویت زمین و سنگهای فرا گیر تونل دوخاب اجام شود. استفاده از تونل دوخاب موجب کندر گذاشتن TBM و دور آوردن به روش حفاری و آتشباری شده. تونل هادی در مسیر خود در زیر دریا با انواع سنگها از قبیل سیلتستون ماسه ای[1]، شیل[2]، توف[3]، توف - برشی[4] و گل سنگ[5] مواجه بود.

شکل ۱-۳ یک مقطع قائم از بخش زیر دریائی تونل سیکان را نشان می دهد. در نظر گرفته شده بود که تونل هادی[6] به عنوان محل جمع آوری آب برای تونل اصلی[7] عمل نماید. آبهای نفوذی به پمپ واقع در ته چاه مایلی[8] منتقل می شد. تونل خدمات رسانی[9] به عنوان راه دسترسی به تونل اصلی مورد استفاده قرار می گرفت و پس از اتمام عملیات (در حین عملیات) برای مقاصد تعمیر و نگهداری[10] در نظر گرفته شده بود. هجوم و طغیان آب به داخل تونل در حین عملیات احداث، ضرورت تهیه طرحی برای تخریق دوخاب را نشان داد، که این کار انجام شد و نقش آن در کنترل جریان آب به داخل تونل به اثبات رسید. تونل هادی و خدمات رسانی در ابتدا احداث شدند تا بتوان با ... شرایطی که به طور غیر قابل پیش بینی در حین احداث تونل اصلی پیش می آمد، به دست داد.

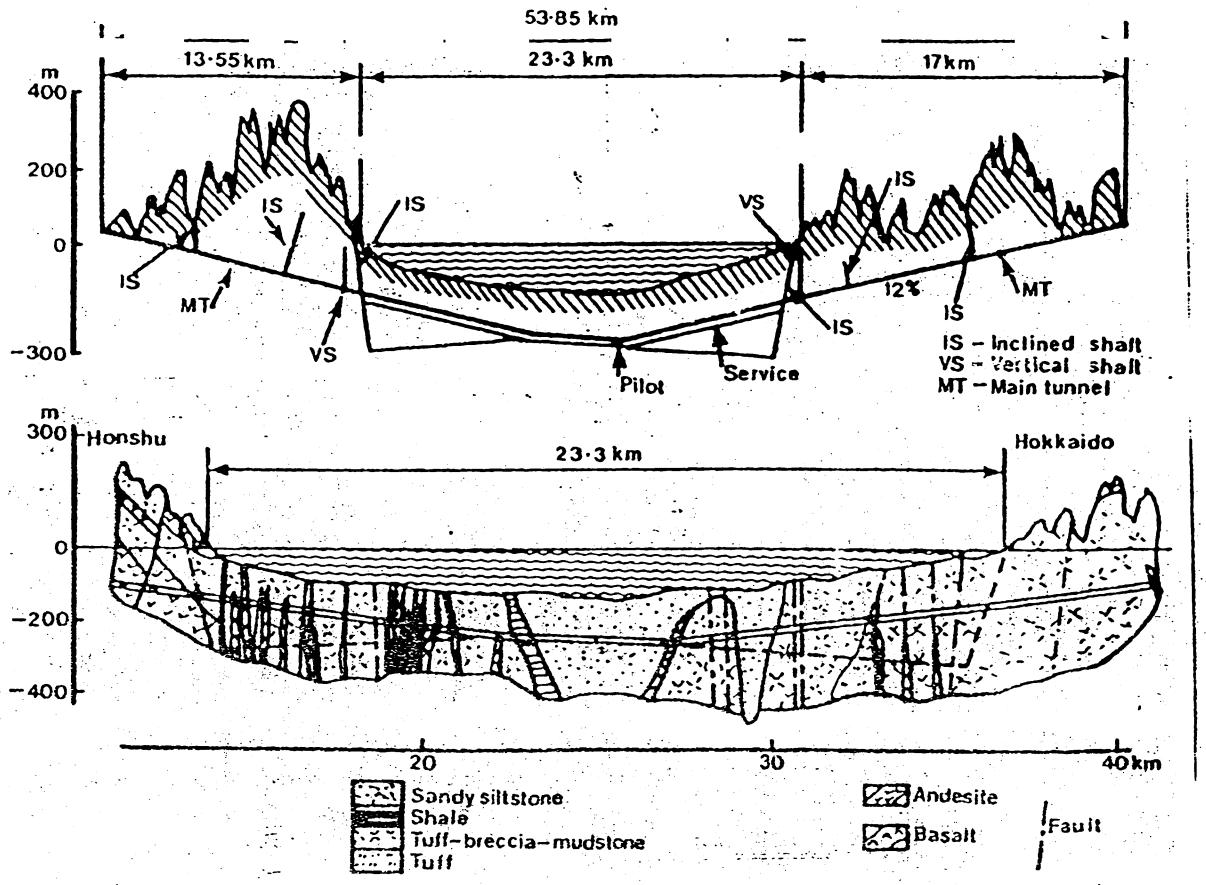


شکل ۱-۳ : مقطع قائم از بخش زیر دریائی تونل سیکان

1-sandy siltstone ; 2-shale ; 3-tuff ; 4-tuff-breccia ; 5-mudstone ; 6-pilot tunnel ; 7-main t. ; 8-inclined shaft, 9-service t. ; 10-maintenance

است و ۲۳ کیلومتر آن در زیر دریا قرار دارد. عامل دانگیزهٔ اصلی احداث تونل سیکان به فاجعه غرق شدن کشتی مسافری براثر طوفان سخت در سپتامبر ۱۹۵۴ برمی گردد که منجر به مرگ ۱۴۳۰ مسافر کشتی شد. احداث این تونل به عنوان یک پروژه بزرگ در مهندسی تونل، بخصوص از جنبهٔ محیط زمین شناسی سخت و نامناسب و مشکلات طغیانهای بزرگ، تلقی می شود. موفقیت تونل سیکان راه را برای اجرای چهار پروژه تونل بعدی، که بخش زیادی از آنها زیر دریا بودند، باز کرد. دورهٔ ۱۹ سالهٔ حفر تونل هادی با مشکلات خاص همراه با گسلهای زمین شناسی زیادی مواجه بود.

شکل ۱-۲ یک مقطع زمین شناسی از تونل سیکان را همراه با گسلهائی که در زیر دریا در سمت هوکایدو با تونل برخورد کرده است، نشان می دهد. در مراحل اولیه حفر تونل هادی برای این که امکان حفر سریع داشته باشند و همچنین از ایجاد اعتشاش و بهم خوردن زمین در مقایسه با وقتی که از اکتشاری استفاده می شود، از یک ماشین حفر تونل (TBM)[1] استفاده کردند.



شکل ۱-۲ : مقطع طولی تونل سیکان

1-Tunnel Boring Machine

پیشرفت تونلسازی: ماشینهای حفر تونل امکان دسترسی به رکوردهای جدیدی در سرعت پیشروی یا حفر[1] همراه با ایمنی کلی عملیات در حین احداث تونل را فراهم آورده‌اند. یکی از TBM های Robbins به سرعت حفر ۱۲۸ متر در روز در اسلو رسید. در خلال دهه ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ کیلومترها تونل در آمریکا و چین حفر شده‌اند.

احداث شیروگاههای برقابی (هیدروالکتریک) سهم قابل ملاحظه‌ای در پیشرفت تونلسازی داشته‌اند. پیشرفتهای عمده در امر حفر، طراحی و روشهای نگهداری مدیون احداث موفقیت آمیز پروژه‌های شیروگاههائی نظیر معدن اصلی شیروگاه برقابی Gitaru در کنیا و ... می‌باشد. انجام چنین پروژه‌هائی مستلزم حفر تونلهای متعدد، منظورهای متفاوت از جمله تونلهای لازم برای راه دسترسی، تونلهای شیروگاه و تونل انحراف رودخانه در زمان احداث سد، می‌باشد.

ملاحظات آتی تونلسازی

افزایش سرعت حفر تونل - Robbins اظهار داشته است که رسیدن به سرعتهای بالاتر حفر تونل به وسیله ماشینهای TBM یکی از چشم اندازهای آتی این صنعت است. وی تا کید می‌کند که قابلیتهای برش یا حفر این ماشینها بنحو فزاینده‌ای برای انواع سنگهای سخت‌تر افزایش می‌یابد و متعاقب آن سیستمهای حفر مکانیکی بزرگتر به جای روش حفاری و آتشباری به کار گرفته می‌شود. وی همچنین عقیده دارد که گاوبها[2] برای کار در داخل مقاومتی گسترده‌تر سنگها سبارگارتری می‌شوند.

نقش طراحی و برنامه ریزی در پروژه های تونلسازی - Muir Wood در مورد ملاحظات آتی توجه را بر اهمیت زمان و کار در تونلسازی معطوف داشته است که با وجود کارشناسان و متخصصان خبره به عنوان عامل کلیدی و مهم موفقیت عملی خواهد شد. برنامه ریزی[3] از جنبه بهینه سازی[4] عملیات، یکی از اساسی ترین کارهای هر پروژه است و بهینه سازی هزینه ها از یکی از بحثهای مهم کار است، که هشتر می دهد. Muir Wood نتیجه می‌گیرد که تونلسازی به دست افراد بدون تخصص و غیر کارشناس، این کار را به یک کار پرهزینه، غیر قابل پیش بینی و حادثه بسیار تبدیل می‌کند.

1- rate of drivage , 2- roadheader , 3- planning , 4- optimisation

تونلسازی یک مبارزه است و بصیرت و دوراندیشی کافی امکان دسترسی به موفقیت را میسر می سازد و ملاک ارزیابی موفقیت ارزش کل پولی است که در این مبارزه حاصل می شود.

تونلهای قطر کوچک - این پیشرفت هم به طور مشخص فقط در یک دورهٔ زمانی بسیار کوتاه حاصل شده است. تونلهای قطر یا ابعاد کوچک که به آنها میکروتونل[1] گفته می شود به تونلهائی اطلاق می گردد که ابعاد آن بحدی کوچک است که فقط یک نفر می تواند از آن عبور کند و در انگلستان به تونلهای با قطر داخلی کمتر از ۹/۰ متر گفته می شود. این نوع تونلها به عنوان یک جایگزین یا گزینهٔ جذاب برای کانالهای روباز که لوله ها را در آن قرار می دهند، بویژه در شهرهای متراکم، درآمده است. کشورهای ژاپن و آلمان در این زمینه تحقیقاتی انجام داده اند و در ژاپن، جز این تونلها با ماشینهای تونلزنی تمام رخ کنترل از راه دور به پیشرفتهائی نائل آمده است. بهرحال، به نظر می رسد این روش پرهزینه تر از لوله گذاری باشد و در صورتی که به عنوان یک سیستم جایگزین مطرح باشد نیاز به ارزیابی دقیق خواهد داشت.

تکنیکهای ویژه - کاربرد تکنیکهای خاص حفر چاه[2] و تونلسازی در بازیابی موفقیت آمیز ماسه های نفتی آلبرتا[3] توسط Stephenson و Luhning توضیح داده شده است. این افراد به نقش مهم تونلسازی در توسعه و گسترش "ذخایر قابل بازیافت نفتی"[4] که قبلاً با تکنولوژی مرسوم استحصال آنها امکانپذیر نبود، بوضوح تأکید کرده اند.

دستیابی به پیشرفتهای آتی در تونلسازی - پیشرفت در غلبه بر مشکلات تونلسازی باستی انجام شود. با این وجود، پیشرفتهائی در هنر و مهندسی تونلسازی به طور پیوسته از طریق ارزیابی دقیق و کسب دانش روز وجود داشته و خواهد داشت. در جمع بندی نتایج و آگاهیهای حاصل از روشهای تونلسازی جدید آنچه مشخص می توان اظهار داشت که انتخاب روش تونلسازی همواره یک هنر و مهارت است و مشکل می باشد ولی باید افزود که پیوند دو عامل هنر و مهندسی مستلزم تجربه، تحقیق و فکری خلاق و باز است.

1- micro-Tunnel ; 2- shaft sinking ; 3- Alberta
4- recoverable oil reserve

فصل دوم

جنبه‌های زمین شناسی تونلسازی: بررسی[1]، ارزیابی[2] و برآورد[3]

مشکلات مشرایط زمین شناسی

هر پروژهٔ تونلسازی یک هدف کلی دارد و آن این است که با موفقیت بر مجموعه‌ای از مشکلات زمین‌شناسی که با آن روبرست، فایق آید. هر محلی مشکلات زمین شناسی خاص خود را دارد و در یک محل نیز جابه‌جای آن مسائل متفاوت است. به تجربه دریافته‌اند که نوع مشکلات را نیز می‌توان پیش‌بینی نمود. محیط زمین‌شناسی موضوع مبارزهٔ اصلی طراحان و سازندگان تونل است تماماً. علاوه براین، اغلب عدم اطمینانهائی نسبت به سازگاری و انطباق پذیری روش تونلسازی انتخاب شده با توده سنگ وجود دارد. بهرحال، هرچند یک شناسائی کلی و تصدیق عمومی نسبت به اهمیت اطلاعات درمورد جنبه‌های زمین‌شناسی پروژه‌های تونلسازی وجود دارد، عمق جمع‌آوری اطلاعاتی و میزان صحت آنها با توجه به محلهای خاص، اغلب موجب بروز اختلاف نظرهائی می‌شود. براین اساس است که گفته می‌شود برای هر پروژهٔ تونلسازی بایستی بررسی، ارزیابی و برآوردهائی از جنبه‌های زمین‌شناسی محل تونلسازی صورت گیرد.

جایگاه و اهمیت دانش و اطلاعات زمین‌شناسی

با اهمیت محیط و شرایط زمین‌شناسی محل تونلسازی، تأثیر عمده‌ای بر انتخاب روش → احداث، بسیاری از مسائل مربوط با ایمنی، طراحی و خدمات بعدی، عملیات و تعمیر و نگهداری دارد. عوامل تفضیلی (جزئی) زمین‌شناسی به‌طور اساسی بر انتخاب روش خاص تونلسازی مؤثر است و در بعضی موارد امکان دارد که کل پروژه را تحت تأثیر قرار دهد. از مدتها قبل تشخیص داده شده است که آگاهیها و اطلاعات قبلی و تفضیلی

1 - investigation ; 2 - evaluation ; 3 - appreciation

از مشخصه های زمین شناسی محل تونلسازی یک شرط لازم اولیه برای موفقیت در طراحی، احداث و عملیات اکثر چنین پروژه هائی می باشد.

گستره اطلاعات اولیه در مورد جنبه های زمین شناسی محل مورد نظر برای تونلسازی، غالباً متأثر از ملاحظات اقتصادی است. درصورتی که انجام اکتشافات محلی برای تهیه اطلاعات اساسی جهت قضاوت در مورد پیشنهادات طرح تونلسازی مورد موافقت قرار گرفته باشد، بایستی امکانات و هزینه های لازم برای انجام اکتشاف مقدماتی جهت تدارک برگزاری یک ارزیابی کامل از عوامل زمین شناسی مختلف مرتبط با پروژه مدنظر قرار گیرد. در واقع، در بسیاری از پروژه های تونلسازی اطلاعات تفصیلی اصلی زمین شناسی فقط در فاز احداث تونل بدست می آیند. این اظهار بمنظور تأکید بر نقش مهمی است که جمع آوری و ارزیابی مناسب چنین اطلاعاتی در حین احداث تونل بازی می کنند.

[illegible] : سوابق مشاهدات زمین شناسی و [illegible] آنها نقش مهمی در کلیه مراحل انجام پروژه تونل از ملاحظات مقدماتی طرح تا ارزیابی و انتخاب طرح نهائی گرفته تا برآورد و انتخاب روش احداث و در نهایت مراحل عملیاتی و اجرای تونل ایفاء می کنند. طراحان تونلها موظف هستند که برای تجدید نظر در تفکراتشان نسبت به طرحهای نهائی در پرتو نوری که در مرحله طراحی از اطلاعات زمین شناسی پدیدار می شود، آماده باشند. پروژه عظیم تونلسازی Alpine نمونه جالبی در راستای این پیشنهاد، بویژه با توجه به ضرورت تجدید نظر در طرح به دنبال تجارب ذیقیمتی که در جریان احداث تونل Loetschberg بدست آمده، می باشد.

هدف بررسیهای زمین شناختی : Legget برانجام مطالعات زمین شناسی در تونلسازی بدلیل منافع زیادناشی از تأثیر گذاری مسائل زمین شناسی بر طراحی و احداث، تأکید کرده است. در حقیقت کلیه تونلها، به استثنای تونلهای لوله ای غرقابی (۱) و ترانشه ها (۲)

1- immersed tube tunnel ; 2- trenche

که در نهشته‌های سطحی[1] حفر می‌شوند، همگی در پیوستهٔ زمین حفر می‌گردند. طبیعی است که خصوصیات فیزیکی - مکانیکی سنگ درونگیر بلاواسطه تونل و شرایط حین عوامل طبیعی نظیر فشار سنگ، آب موجود و قابلیت کلی سنگ برای هوازدگی، منجر زیادی بر سهولت یا سختی احداث و نوع نگهداری مطلوب تونل به منظور پایداری کوتاه یا دراز مدت تأثیر عمده می‌گذارد.

نتیجه‌گیری Leggett در نهایت این است که مهمترین کار در تونلسازی این است که قبل از شروع کار احداث تونل، بررسی و مطالعهٔ زمین‌شناسی صورت گیرد و مقاطع قائم زمین‌شناسی (عرضی) در طول مسیری که قرار است تونلسازی در آن انجام شود، تهیه گردد. علاوه بر این، مشخصه‌های رفتاری مهندسی سنگ نیز از نظر Leggett اهمیتی معادل ویژگیهای زمین‌شناسی دارند. بنابه گفتهٔ Leggett این اطلاعات مبنائی برای انجام قضاوت در مورد امکان سنجی اقتصادی و فنی پروژه به دست می‌دهند. وی اظهار می‌دارد که سنگهای پرکامبرین و انواع سنگهای قدیمی از نظر زمین‌شناسی، به دلیل بالا بودن

را افزایش می‌دهند.

برعکس، سنگهای جوانتر از نظر زمین‌شناسی مانند سنگهای پالئوزوئیک[2]، به دلیل پائین بودن مقاومت، آسانتر حفر می‌شوند و در نتیجه حفر سینه‌های احداث پائین می‌آید. با این وجود، با کاهش سن سنگها و رفتن به سمت تشکیلات جوانتر، نظیر نهشته‌های سُن و ماسه‌ای جدید، ممکن است به تکنیکهای خاصی نظیر تزریق دوغاب یا حتی انجماد[3] نیاز باشد، که در نتیجه می‌تواند به افزایش هزینه‌های تونلسازی منجر شود.

مطالعات و بررسیهای همزمان با احداث: هدف کلی بررسی و مطالعهٔ زمین‌شناسی مقدماتی این است که طبیعت یا خواص فیزیکی - مکانیکی زمین تشکیل دهندهٔ مسیر تونل را نشان دهد و مقاطع مناسب زمین‌شناسی تهیه گردد. غالباً مشکل است که اطلاعات زمین‌شناسی

1 - superficial deposite ; 2 - Paleozoic ; 3 - frezzing

سطحی را با آنچه در طول مسیر برنامه ریزی شدهٔ تونل پیش می آید، مرتبط و منطبق کرده. مواردی از آنگونه مشکلات در تونلهای زیر آبی، تونلهائی که از زیر شهرهای با ساخت و ساز زیاد عبور کرده اند و تونلهائی که در زیر رشته کوههای مرتفع حفر شده اند، پیش آمده است.

تونل Simplon قرار بود در زیر رشته کوههائی حفر شود که بیش از ۲۱۰۰ متر ضخامت سنگهای پوشاننده تونل بود و حفر چاه گمانه های اکتشافی معمول از سطح زمین غیر عملی می نمود. سوابق احداث تونل و اطلاعات حاصل از حفر تونل هادی و گمانه های اکتشافی حفر شده در سینه کارهای تونل هادی، اطلاعات زمین شناسی مهمی به دست داد که می توانست هم در جهت اصلاح و هم در جهت تأیید نقشه برداری زمین شناسی قبلی انجام شده عمل نماید.

هزینهٔ تنسیبی اکتشافات زیرزمینی - هزینهٔ این چنین کارهای مقدماتی یا اولیه ای که نقشه برداریهای زمین شناسی، آزمایشها، حفاریها، نقشه برداریها و مطالعات ژئوفیزیکی و هرگونه اندازه گیری لازم در یک محل خاص را در بر می گیرد، نسبت به کل هزینهٔ پروژه های مشخصی توسط [illegible] است. وی اظهار داشته است که [illegible]

می تواند بین ۱٪ تا ۲٪ باشد و نقل نموده که این رقم برای دو تونل احداث شده در کانادا (Bridge River) ۰/۳٪ و برای تونل Vancouver، که مشکلات غیر معمول موجب انجام برداشتهای بیشتری گردید، ۷/۳٪ از کل هزینه بوده است. وی برای نتیجه گیری در مورد کارهای مقدماتی و اکتشافی توجه را به موارد متعدد برنامه های اکتشافی زیرزمینی که به طور موفق انجام شده اند، معطوف می دارد و همچنین به موارد خاصی اشاره می کند که علیرغم انجام کارهای اکتشافی بسیار دقیق، شرایط و مسائل غیر قابل تصوری پیش آمده یا اتفاق افتاده است.

Legget تأکید می کند که در اکتشافات زیرزمینی تجربه نشان داده است که یک مهندس با شرایط غیر قابل رؤیتی که غالباً در زیرزمین وجود دارد، روبرو می باشد و بنابراین تا زمان اتمام عملیات حفر نمی تواند با اطمینان مطلق راجع به شرایطی که پیش خواهد آمد، اظهار نظر و عمل نماید. وی همچنین اظهار می دارد که در مناطق پوشیده شده با نهشته های یخچالی[1]، عدم اطمینان بیشتری

1-glacial deposit

نسبت به اطلاعات حاصل وجود دارد و درصورتی که قرار باشد مطالعات زمین شناسی در چنین مناطقی صورت گیرد، بایستی در اسناد مناقصه یا مناقصه به صورت تذکر اکید درج گردد.

West مقایسه هائی بین شرایط زمین شناسی واقعی و پیش بینی شده در تونلسازی انجام داده و مثالهائی از موارد مطالعه شده را آورده است. وی هزینه نسبی بررسیهای محل تونلسازی را نسبت به کل هزینهٔ احداث برای پنج پروژهٔ تونلسازی بزرگ مقایسه کرده است که یافته‌های اصلی وی به صورت خلاصه در جدول ۲-۱، ارائه می گردد. مشاهده می شود که هزینه کار بررسی و مطالعه محل تونل به طور اساسی از طبیعت یا خواص فیزیکی مکانیکی زمین و عمقی که تونل در آن حفر می شود تأثیر می پذیرد. اولین ردیف از مثال West در جدول ۲-۱ نشانگر یک محیط زمین شناسی نسبتاً ثابت و شناخته شده است که شرایط می تواند با قطعیت یا اطمینان بالاتری پیش بینی شود. دو ردیف دیگر به محیطهای زمین شناسی پیچیده تری مربوط می شوند که به بررسیهای تفصیلی تری [illegible] تونلسازی در رسوبات [illegible] شرایط متوسط. از نظر پیچیدگی برای اجرای پروژه دارد، در نتیجه میزان کار مطالعات و بررسیهای محلی آن از جنبهٔ ثبات نسبی محیط این گونه تشکیلات رسوبی، می تواند کاهش یابد.

جدول ۲-۱: هزینه نسبی مطالعات و بررسیهای محلی برای تونلهای مختلف

نوع و موقعیت تونل	زمین شناسی	عمق (m)	قطر (m)	طول (km)	هزینه بررسی محلی (٪ هزینه احداث)
قطار زیرزمینی (Liverpool)	ماسه سنگهای Keuper	۱۰-۳۰	۵	۵	۰/۱۴
Loop and Link	and Bunter				
قطار Wapping-Woolwich	چاک، ماسه و رسهای لندن	۱۰-۲۰	۴	۱۷	۰/۱
(Jubilee line)	(۵ رودخانه را قطع می کند)				
کابلهای تلفن - تونل کابل	مارن Keuper	۱۲	۲/۵	۱/۵	۰/۳
انحراف حریان آب رودخانه	تشکیلات آبرفتی	۱۸۰-۲۰۰	۶	۲/۲	۱/۹
(تونل انحرافی Dinorwic)					
انتقال آب (تونل Kielder	ماسه سنگ، گل سنگ	بالای ۳۰۰	۳	۲/۸	۲
Aqueduct)	و سنگ آهکهای کربنیفر				

بررسیها و مطالعات مقدماتی

جدول ۲-۲ یک برنامه اکتشافی را نشان می دهد که اساساً بر مبنای پیشنهاد Dodds تنظیم شده است. وی اظهار می دارد که بررسیها باید طی یک فرآیند کلی به جزئی، با توجه به این که هر مرحله نقش مهمی بازی می کند، تنظیم و برنامه ریزی گردد. وی توجه را براهمیت تجزیه و تحلیل و قضاوت در ارزیابی برنامه اکتشافاتی معطوف نموده است، زیرا برنامه اکتشافاتی برگستردگی دامنه کار و جنبه های تفصیلی کل پروژه تونل سازی تأثیری گذارد. بسیاری از دست اندرکاران تونلسازی نیز بر این نقطه نظر تأکید کرده اند، برای مثال Edmund اظهار داشته است که هرچه اطلاعات اولیه راجع به سنگهائی که تونل از آن عبور می کند، کاملتر باشد، فرآیند یک تونلسازی واقعی رضایت بخش تر خواهد بود.

Zaruba و Mencl دربحث راجع به وظیفه و ویژگیهای بررسیهای زمین شناسی سه مرحله مشخص را پیشنهاد کرده اند:

۱- شناسائی و بازدید مقدماتی[1] به منظور شروع مطالعه

۲- مطالعه و بررسی امکانپذیری[2] برای مرحله طراحی

۳- بررسی و مطالعه در حین احداث که به منظور کنترل نتیجه گیریهای مراحل اول و دوم و در صورت لزوم اصلاح طرح صورت می گیرد.

کارهائی که در شناسائی مقدماتی و بررسی و مطالعه بعدی انجام می گیرد:

بررسیهای زمین شناسی نقش بسیار مهمی در پروژه های تونلسازی بوژه بواسطه تأثیر قطعی اطلاعات حاصل از این بررسیها بر انتخاب مسیر و روش احداث، مبنای از تأثیری که بر هزینه ها و ایمنی تونلسازی می گذارند، بازی می کنند. Zaruba و Mencl در میان وظایف شناسائی مقدماتی و بررسیهای تفصیلی، مسائل ذیل را شایان مطالعه در این مرحله دانسته اند:

1- reconnaissance ; 2- feasibility

ج ۲-۲ : عناصر اصلی یک برنامهٔ اکتشافی برای پروژه‌های تونلسازی

عناصر اصلی	توضیحات
۱- بررسی نوشتجات	۱- مطالعه مطالب و اطلاعات منتشر شده یا منتشر نشده در مورد منطقهٔ پروژه
	۲- مطالعهٔ تاریخچهٔ عمومی منطقهٔ محلی که قرار است تونل در آن احداث شود
	۳- بررسی کلی کارهای ساختمانی و طرحهای هم قبلی مربوط با محل
۲- مطالعهٔ عکسهای هوائی[1]	۱- عکسهای هوائی یک دید کلی از منطقهٔ پروژه به دست می دهد
	۲- بافتین عکسهای هوائی جنبه‌های ژئومورفولوژیکی[2] شناسائی می شود
	۳- شناسائی جنبه‌های نظیر توپوگرافی، آرایش آبراهه‌ها[3]، پوشش گیاهی، کاربری زمین و منابع بالقوهٔ مصالح ساختمانی
	۴- زوج عکسهای هوائی[4] (که امکان دید سه بعدی را فراهم می آورند) بویژه سودمند هستند.
	۵- دیواره‌های شیبدار توپوگرافیکی را می توان شناسائی کرد
	۶- عوارض دیگری مانند زمین لغزش[5]، گسلهای اصلی، تاقدیس[6]، ناودیس[7] و ساختارهای گنبدی[8] شناسائی می شود
	۷- عکسبرداری مادون قرمز قادر به شناساندن مسیر آب و چشمه‌ها می باشد
	۸- رادار اسکنینگ[9] می تواند باعث شناسائی جنبهٔ هائی از سطح زمین که به دلیل شرایط جوی و آب و هوائی امکان شناسائی آن با سایر روشها میسر نشده است، گردد.
۳- شناسائی و بازدید مقدماتی از زمین شناسی سطحی	۱- نقشه برداری سطحی زمین شناسی
	۲- آنچه از بررسی نوشتجات و مطالعه عکسهای هوائی بدست آمده است، در این مرحله مدنظر باشد.
	۳- ساختمان سازندها و ویژگیهای ساختاری، انواع سنگها و جنبه‌های ژئومورفولوژیکی و هوازدگی بررسی کلی شوند.
۴- مطالعات و بررسیهای ژئوفیزیکی	۱- این بررسیها مزایائی از جمله غیرمخرب بودن، سرعت نسبی و بطور کلی هزینه تمام شده پائین، دارد با این وجود دقت آنها کم است.
	۲- ویژگی و ماهیت خاص روشهای ژئوفیزیکی تعیین محل ناهنجاریهائی[10] است که مستلزم شناسائی و بررسیهای تفصیلی با روشهای مستقیم می باشد.
	۳- روشها شامل لرزه‌ای انعکاسی و انکساری[11]، الکتریکی مقاومت سنجی[12]، ثقلی[13] و مغناطیسی[14] است.
	۴- کاربردهای مطالعات لرزه‌ای عبارت است از:
	(الف) شناسائی نوع مصالح و مواد
	(ب) تعیین محل ناهنجاریهای زمین شناسی مانند دره‌های مدفون[15]

1-aerial photographic; 2-geomorphology; 3-drainage; 4-stereoscopic pairs of photographs; 5-landslide; 6-anticlinal; 7-synclinal; 8-dome structures; 9-radar scanning; 10-anomaly; 11-seismic reflection and refraction;

ادامهٔ جدول ۲-۲

عناصر اصلی	توضیحات
	مناطق برشی و مناطق هوازده[1]
	(ج) تعیین محل احتمالی شکستگی شده
	(د) کمک در انتخاب محل گمانه حفاری
	۵- روشهای ژئوفیزیکی درون گمانه ای[2] یا چاه پیمائی شامل چگالی نوترونی[3]، تعیین سرعت امواج صوتی و لرزه ای، روشهای گاما-گاما و مقاومت الکتریکی. این روشها در مطالعه لایه بندی، ساختارهای زمین شناسی، نوع سنگها و احتمال وجود حفرات و کارهای قدیمی معدنی بسیار مفید هستند. دوربین های درون گمانه ای در تکمیل مطالعات ژئوفیزیکی درون گمانه ای در موارد خاص نتایج مفیدی به دست داده اند.
۵- حفاری اکتشافی[4]	۱- حفاری معمولترین روش اکتشافی مورد استفاده در کارهای عمرانی است و اطلاعات زمین شناسی مخصوص از منظم و محدودهٔ گمانه حفاری به دست می دهد.
	۲- تعیین موقعیت گمانه های حفاری مستلزم ملاحظات دقیق از جهت کسب حداکثر اطلاعات ممکن می باشد و این بدین معنی است که گمانه ها را نمی توان به طور دلخواه در فواصلی در طول خط تونل حفر کرد.
	۳- گمانه ها و موقعیت آنها باید بگونه ای در نظر گرفته شود که امکان اکتشاف تفصیلی دهانه ها[5]، فرورفتگیهای توپوگرافیک[6]، موقعیتهائی که عمق هوازدگی عمیق انتظار می رود، محلهای آبدار[7]، ساختارهای فشرده، مناطق برشی... امید بیشتری
	۴- حفاری محلهای تونل عمیق اطلاعات راجع به انواع سنگ و شرایط زمین شناسی خاص افقی که تونل در آن حفر می شود به دست می دهد؛ و این اطلاعات در تهیه مقاطع زمین شناسی کمک کننده است.
	۵- اکتشاف خاک و زمینهای نرم به طور کلی به منظور تعیین ضخامت، نوع و خواص مربوط به موقعیت محل تونل انجام می شود.
	۶- برنامه حفاری سنگ مستلزم ذکر خصوصیات واضح ملزومات می باشد، چون هدف حفاری می تواند موارد ذیل را شامل شود:
	(الف) شناسائی انواع سنگها، لایه بندی و ساختار زمین شناسی در افق تونل
	(ب) تعیین خواص فیزیکی سنگها
	(ج) به دست آوردن اطلاعات مربوط به آرایش درزه ها برای انواع سنگهای اصلی
	(د) تعیین نفوذپذیری[8] و شرایط آبهای زمین
	(هـ) جمع آوری اطلاعات در مورد سطوح تنش برجا[9]
	(و) ارزیابی مشخصات تغییر شکل سنگ در ارتباط با آکتشاری یا حفر مکانیکی

2- Down-hole ; 3- neutron density ; 4- exploratory drilling ; 1- weathering
5- portals ; 6- topographic low ; 7- water-bearing ; 8- permeability ;
9- in-situ stress level

(ز) تهیه برخی اطلاعات به منظور ارزیابی وسائل احتمالی نگهداری
(ح) تأمین راهی برای انجام عملیات پیمایش[1] یا آزمایشهای درون گمانه‌ای

۷- احتمالاً مهمترین جنبهٔ منحصر بفرد کار بررسیهای محل تونل تهیه نمودارهای (لاگهای) صحرائی از اطلاعات زمین شناسی است. ضروری است که کلیهٔ اطلاعات موجود ثبت شود و به صورتی مناسب جهت تسهیل انجام تحقیقات و بررسی اطلاعات خاصی که بعداً ممکن است به صورت نموداری یا توصیفی در آید، نشان داده شود. اطلاعاتی که همراه با نمودارها یا لاگهای حفاری باید آورده شوند عبارتند از:

(الف) توصیفات زمین شناسی سنگها یا دیگر مواد موجود
(ب) اطلاعات مربوط به هرگونه آزمایش صحرائی انجام شده
(ج) جزئیات گرافیکی مواد مغزه[2] مانند لیتولوژی[3] (لایه بندی یا خواص مکانیکی سنگها) و ساختار
(د) جزئیات مربوط به طول مغزه بازیابی شده برای هر مغزه
(هـ) نحوه اجرای حفاری و عملکرد کلی در عمقهای مختلف
(و) ارزیابی عینی از سیال حفاری برگشتی (خارج شده از گمانه) نظیر شرایط و مقدار
(ز) اظهار نظر راجع به محلهائی که گل حفاری (سیال حفاری) و مغزه افت داشته یا بازیابی نشده است.
(ح) شرایط آب زیرزمینی
(ط) هرگونه ملزومات خاص راجع به لوله گذاری جداری[4] یا سمنت کاری[5]
(ی) توضیحات و جزئیات مربوط به محل مغزه در جعبه‌ها

۶- حفریات و تونلهای آزمایشی[6]

۱- راههای دسترسی مستقیم به مناطق خاصی که می خواهد در آن تونل حفر شود، حفریات و تونلهای آزمایشی امکان بازرسی و رؤیت شرایط مستقیم و انجام هرگونه آزمایشی را فراهم می آورد.
۲- ارزیابی‌های کاملی می‌تواند انجام شود
۳- پیمانکاران با وجود این حفریات یا تونلهای آزمایشی، تصویر ملموسی از شرایط مورد انتظار تونلسازی به دست می آورند.

۷- آزمایشهای برجا[7]

۱- بررسیها و آزمایشهای برجای مکانیک سنگی موارد ذیل را میسر می سازد:
(الف) ارزیابی وسائل نگهداری و تقویت سنگ در مراحل نگهداری موقت و دائم
(ب) ارزیابی پایداری سنگ
(ج) برآورد و ارزیابی مناسب بودن روشهای مختلف حفر و احداث
۲- آزمایشهای بارگذاری صفحه‌ای، ارزیابی رفتار تغییر شکل پذیری برجای سنگهائی که در آن ها تونل حفر می شود را میسر می سازد و راهنمائی در مورد بارگذاری

1-logging ; 2-core ; 3-lithology ; 4-casing ; 5-cementation
6-test pits and drift ; 7-in situ testing

مورد انتظار و توزیع بزروی سیستم نگهداری به دست می دهد.

۳- اندازه گیریهای تنشهای برجا، شدت و جهت تنشهای که در مرحله طراحی تونل باید منظور شود را مشخص می کند؛ روشهای جک تخت[1] و آزاد سازی تنش[2] آزمایشهای مناسبی برای بررسی های اولیه تونل می باشند.

۴- الگوهای تغییر شکل[3] اطراف تونل را می توان با استفاده از ابزار بندی[4] در داخل حفره یا مونیتورینگ[5] رفتار نمونه های واقع در سنگهای فراگیر تونل ارزیابی کرد. اندازه گیریهای تغییر شکل سنگ در بررسی وسائل نگهداری و ارزیابی کارآیی سیستمهای مختلف نگهداری مفید هستند.

۵- ارزیابی بارگذاری بر سیستمهای نگهداری با استفاده از load cell و دیگر شکلهای ابزار بندی.

۸- کارهای آزمایشگاهی

۱- تعیین مقادیر مقاومتی سنگ و رفتار تغییر شکل پذیری در شرایط تنش یک و سه محوره برای موقعیتهای قبل و بعد از گسیختگی[6]

۲- تعیین ضریب الاستیک[7] سنگها

۳- بررسی مشخصات رفتاری خزش یا وادادگی[8]

۴- تعیین مقادیر مقاومتی درزه سنگها و تأثیر پرشدگی درزه ها (در صورت وجود)

۵- تعیین مقادیر تغوذ پذیری و تخلخل[9]

۶- تعیین چگالی و بررسی قابلیت افت مقاومت در رابطه با هوازدگی و سایر عوامل

۷- خواص سختی[10] و ساینگی[11] سنگ

۹- آزمایش مدل

۱- مدلهای بزرگ مقیاس در بعضی موارد جهت ارزیابی و بررسی قابلیتهای جنبه های خاص از طرح تفصیلی مورد استفاده قرار می گیرد.

۲- مدلهای کوچک مقیاس برای آزمایش جنبه های خاصی از طرح مفید هستند و در قسمتی یک ابزار یا روش نسبتاً کم هزینه در اختیار می گذارند.

۳- مدلها در ایجاد یک تصویر عینی از محیط زمین شناسی در طول مسیر تونل مفید هستند

۴- یک طرح منطقی بر مبنای اطلاعات حاصل از مراحل قبل می توان ایجاد کرد:

(الف) ارزیابی مسیر تونل

(ب) بررسی و ارزیابی روش خرد کردن سنگ[12] و احداث

(ج) ارزیابی نگهداری تونل و جنبه های کنترل زمین

(د) بررسی نرو تراوی خاص نظیر آبگیری یا آبگیری[13] بهسازی زمین، مشکلات گاز و غیره

۵- روشهای مدلسازی[14] خاصی جهت کمک در ارزیابی طرحها وجود دارند که عبارتند از:

(الف) مدلهای تجربی[15]

1-flat Jack ; 2-overcoring ; 3-deformation ; 4-instrumation ; 5-monitering (رفتارسنجی)
6-failure ; 7-elastic ; 8-creep ; 9-porosity ; 10-hardness ; 11-abrasive ;
12-rock breakage ; 13-dewatering ; 14-modeling ; 15-empirical model

۱- بررسی و مطالعه شرایط زمین شناسی و ویژگیهای سنگها

۲- مطالعات آب شناسی در طول مسیر تونل

۳- مطالعات تفصیلی جنبه‌های کنترل کننده ساختار واقعی تونل نظیر مناطق گسله و هوازده

۴- تعیین موقعیت دهانه تونل با توجه ویژه براین نکته که دیواره‌ها در جریان احداث برشهای پایداری یا ایجاد دسترسی به هم نخورد.

۵- ارزیابی فشارهای پوشش تونل بدین منظور که بتوان هزینه‌های احداث تونل را به طور واقعگرا یا نه‌ای پیش بینی نمود.

۶- مطالعه و بررسی ویژگیهای حفاری و حفر سنگها

۷- تعیین مصولات دستیابی به مواد و مصالح لازم برای پوشش یا آستر بندی تونل

۸- ارزیابی تأثیرات حفر تونل بر مناطق اطراف، بویژه جنبه‌هائی نظیر تغییرات در سطح آب زیرزمینی، آبکشی از چاهها و سرچشمه‌های آبهای سطحی و احتمال وقوع نشست سطح زمین

این افراد بحث مفیدی در مورد جنبه‌های مختلف مربوط با مطالعات تفصیلی زمین شناسی مهندسی مربوط به تونلها در شرایط گوناگون ارائه می دهند. اساس شناسائی مقدماتی بر نقشه‌های زمین شناسی که برروی آن نتایج مطالعات تفصیلی صحرائی نوشته شده، استوار است. آنها اظهار می دارند که اطلاعات تفصیلی زمین شناسی که فوراً از سینه کار تونل اصلی برداشت می شوند، نقش مهمی در پیشروی تونل بازی می کنند. بهرحال، آنها با توجه به کاربرد ماشینهای حفر تونلسازی نظیر TBM ها که امکان برداشت فوری از سینه کارها وجود ندارند، اظهار کرده اند که به جای استفاده از برداشتهای فوری سینه کارها، در تونلهای نسبتاً کم عمق از گمانه‌های قائم و در تونلهای عمیق از گمانه‌های افقی که در جبهه کار تونل حفر می شوند، استفاده می گردد.

نکته مهم دیگری که توسط Zaruba و Nenek بر آن تأکید شده است، شرایط آب شناسی است که به دلیل خطرات جدی که آبهای زیرزمینی در عملیات تونلسازی ایجاد می کنند، مستلزم انجام مطالعات تفصیلی می باشد.

(ب) مدلهای فیزیکی

(ج) مدلهای ریاضی

۶- مدلهای تجربی که براساس اندازه گیریها یا تجارب قبلی ایجاد شده اند، ابزار مفیدی که جواب را به سئوال مرتبط می سازند

۷- مدلهای فیزیکی چه مدلهای کامل یا مدلهای خلاصه شده می توانند جهت بررسی جنبه های مختلف طرح مورد نظر به کار گرفته شوند، چنین مدلهائی اغلب نتایج کیفی بدست می دهند تا نتایج کمی، البته روشی نسبتاً کم هزینه جهت بررسی و ارزیابی است که یک دید عینی کلی از محیط زمین شناسی مسیر تونل به دست می دهد.

۸- مدلهای ریاضی بر مبنای فرضیاتی ساخته می شوند که مهندس باید با این فرضیات آشنا باشد. چنین مدلهائی می توانند جهت بررسی دامنه گسترده ای از موقعیتهای محتمل مورد استفاده قرار گیرند، ولی به طور کلی محدودیتهائی برحسب دقت کلی نتایجشان دارند.

۱۰- مرحلهٔ واقعی احداث

۱- بررسی تفصیلی و تیپ گیریهای زمین شناسی در حین مرحله واقعی احداث باید انجام شود و ثبت گردد و در به روز کردن اطلاعات و سوابق موجود از آنها استفاده شود، به این امر مستلزم بازرسی منظم و سیستماتیک جبهه کار تونل توسط یک زمین شناس است.

۲- تمام ودرک تغیرات در انواع سنگها و شرایط آنها، در ساختار زمین شناسی و تیپ گیریهای هیدرو ژئولوژیکی[1] مستلزم آشنا خصص توسط یک زمین شناس در رابطه با هر قدم کلی تونلسازی و کارهای وابسته و مرتبط با آن می باشد.

۱۱- رفتار سنجی پس از احداث و اجراء

۱- رفتار سنجی جهت قضاوت در مورد این موضوع ها صورت می گیرد که آیا شرایط تونل پس از احداث، پایداری پیش بینی شده را ارضای کند؟ اجرا و سطوح ایمنی آنچنانکه توسط طرح پیش بینی شده است، یک بخش مهم از پروژه کلی را تشکیل می دهد.

1- hydrogeological

اکتشافات زمین شناسی: Szechy تجارب خود در مورد جنبه های زمین شناسی تونلسازی را به تفصیل در کتابی تحت عنوان همین موضوع به رشته تحریر در آورده است. وی بر اهمیت مشاوره بین مهندسین و زمین شناسان در زمان تهیه طرحهای پیش نویس تونل و در جریان مراحل بعدی پروژه تأکید دارد. اکتشاف زمین شناسی طبق نظر Szechy موارد ذیل را شامل می شود:

۱- تعیین و شناسائی سنگها و شرایط آنها

۲- بررسی و مطالعه اطلاعات آب شناسی، اطلاعات مربوط به گازهای زیر زمینی و دمای خاک

۳- تعیین خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومتی سنگهای مربوط به مسیر مورد انتظار تونل

۴- تعیین ویژگیهای زمین شناختی مربوط به مقدار فشار پیش بینی شده سنگها در افقی که تونل بدان حفر می شود

Szechy اظهار می دارد که مرحله اکتشافات باید تا عمق پوشش مطالعه شود، وضعیت و کیفیت سنگهای زیر زمین بررسی گردد، شرایط آبردهای سطحی مطالعه، وضعیت و نوع و حجم آب و گازهای موجود در سنگهای زیر زمین بررسی و مطالعه و اطلاعاتی در مورد خصوصیات فیزیکی و حفر سنگها در طول مسیر تونل جمع آوری گردد. وی بویژه بر ضرورت انجام مطالعات زمین شناسی در حین حفر تونل یا احداث آن، [illegible] صحیح است یا نیاز به بازنگری یا جرح و تعدیل دارد، تأکید کرده است. وی نیز مدت از اکتشافات در حین حفر تونل و از جبهه کارهای تونل از طریق حفر تونلهای هادی یا سایر روشها، و گرفتن نمونه های سنگی به منظور انجام آزمایش علاوه بر اندازه گیریهای برجای ژئوتکنیکی طرفداری می کند.

اطلاعات لازم طراحی: Knill اظهار می دارد که هدف مطالعه و بررسی، تولید اطلاعاتی است که امکان طراحی و برنامه ریزی پروژه را فراهم کند، ولی از آنجائیکه مرحله طراحی به طور کلی با بخشی از مطالعات و بررسیها همپوشی دارد، برخی از اندازه گیریها اطلاعات لازم اولیه برای طراحی را به دست می دهند. وی بر اهمیت مشورت بین زمین شناسی مهندسی و مهندس طراح به دلیل مهم عمده اطلاعات ورودی زمین شناسی در پروژه، تأکید دارد. وی مطالعات و بررسیهای اولیه را برای تونل در زمینه تهیه اطلاعاتی در مورد: وسائل نگهداری در حریان احداث، روش حفر، جریان آب زیر زمینی، خطرات خاصی نظیر گاز و دمای بالا، مشکلات خاص حفر مانند سنگ تخت

وسنگهای آماسی، ضروری می‌داند. هرچه عمق وطول حفر تونل کمتر باشد، درمقایسه با دیگر تونلهای عمیقتر وطویلتر به اطلاعات قبل از احداث کمتری نیاز دارد. بهرحال، حفر تونل هادی در جلوی تونل اصلی امکان آزمایش پیشاپیش زمین را میسر می‌سازد و فرصتی برای فرآیندهای بهسازی زمین و تزریق دوغاب که باید انجام شود، فراهم می‌آورد.

ارتباط ویژگیهای زمین با تونلسازی: Muir Wood اظهار می‌دارد که مطالعات و بررسیهای محل تونل باید در جهت تعیین ویژگیهای زمین به منظور انتخاب روش تونلسازی و برآورد مشکلات احداث سوق داده شود. وی تأکید می‌کند که زمین شناسی، مهمترین عامل در تعیین خواص فیزیکی ومکانیکی، نوع و میزان نفوذ پذیری تونل می‌باشد و پیشنهاداتی در مورد مسائلی که باید در جریان مطالعات و بررسیهای محل تونل مدنظر قرار گیرد، در جدول ۲-۳ ارائه داده است.

مشخصات محلی: Bieniawski در کتاب خود تحت عنوان «طراحی تکنیک سنگی در تونلسازی» مشخصات زمین شناسی محلی را به تفصیل مورد بحث قرار داده است. وی بر اهمیت وجود اطلاعات ورودی قابل اعتماد برای طراحی سازه‌ها تأکید کرده است، ولی اظهار می‌دارد که این وظیفه‌ای مشکل است که زمین [illegible] حل پیچیدگیهای موجود در روشهای طراحی پیچیده معطوف داشته است. او بر سه نکته مهم در اطلاعات حاصل از مطالعات و بررسیهای محلی تأکید ویژه دارد:

۱- کیفیت طراحی مهندسی به کیفیت اطلاعات و عوامل ورودی بستگی دارد.

۲- قضاوت کامل و برنامه ریزی صحیح مستلزم توجه بر روشها یا شیوه‌های کسب اطلاعات ورودی پروژه‌ها هستند.

۳- از جنبهٔ طراحی، گرچه بیشتر بررسیها بر اطلاعات کمی معطوف شود، اطلاعات کیفی نباید و نمی‌تواند مشاهدات و اندازه گیریهای مکانیک سنگی را برای تعیین ویژگیهای محلی به تفصیل توضیح می‌دهد و اهمیت دانسته گذارده ای از روشهای آزمایش را نشان می‌دهد. او مثالهائی از آزمایشهای صحرائی انجام شده در مورد پروژه‌های بزرگ ارائه داده و مناسبت انجام چنین آزمایشهائی با

جدول ۲-۳ : موارد و ملاحظات مورد نظر در مطالعات و بررسیهای محلی

ملاحظات اصلی	اظهارنظرها و توضیحات مربوطه
۱- مطالعه زمین‌شناسی محلی	۱- تاریخچه زمین‌شناسی محل ۲- جابجائیهای تکتونیکی ۳- ارزیابی و تعیین زمان حوادث زمین‌شناسی
۲- سطوح عدم اطمینان	۱- تشخیص و تعیین مقتضی عدم اطمینان در ساختارهای زمین‌شناسی مربوط به پروژه
۳- مطالعه و بررسی محل پروژه	۱- ضرورت تکمیل اطلاعات موجود در مورد ساختار و ژئوهیدرولوژی[1] ۲- استفاده از نمونه برداری[2]، آزمایش و ثبت و بایگانی به منظور تعیین سیستمهای محتمل تونلسازی ۳- بررسی استفاده از گمانه‌های قطر بزرگ (با ارائه مثال) برای مقاصد زیر : الف - بررسی و آزمایش مستقیم ب - آزمایش برجا ج - در دسترس قرار دادن محل برای بازرسیهای بعدی توسط بخشهای ذینفع نظیر پیمانکاران
۴- برنامه آزمایش و سنجش	۱- تعیین ارزش و مقادیر پارامترهائی که بطور مستقیم در طراحی و احداث تونل قابل کاربرد هستند. ۲- دسته‌بندی و زون (منطقه) بندی زمین به مناطق و انواع مختلف با استفاده از آزمایش و روشهای پیمایش ژئوفیزیکی ۳- تعیین و بررسی تغییرپذیری زمین‌شناسائی شده با انجام آزمایشهای دقیقتر
۵- گمانه‌های اکتشافی	۱- فرض می‌شود که ارائه قانون خاصی برای تعیین فاصله یا تناوب گمانه‌ها امکانپذیر نباشد. ۲- در صورتی که شکلهای رسوبی تکتونیکی موجود باشد، عقل است برای شناسائی لایه یا بستر راهنما[3] و تأیید هیوستگی به تعداد اندکی گمانه نیاز باشد. ۳- پیچیدگیهای زمین‌شناسی شکلهای آذرین نفوذی و دگرگونی ممکن است صرفنظر از مطالعات و بررسیهای اولیه زمین، استفاده از یک روش تونلسازی قابل انطباق با چنین تغییرات و پیچیدگیهائی را ایجاب نماید.
۶- شرایط سنگ	۱- ضرورت تعیین میزان درزه‌داری و خردشدگی زمین : RQD[4] شکل مفیدی برای تعیین کیفیت سنگ است و به بررسی چنین جنبه‌هائی نظیر گسترش، تراوش در طول سطوح لایه‌بندی گمانه‌ها کمک می‌کند.
۷- شرایط تنشها	۱- شرایط تنش برجای و طبیعت خردشدگی و درزه‌داری سنگ تأثیر می‌گذارد، در رابطه عملیات تونلسازی و نگهداری، و وضعیت تنش بر شکل طاق زدن طبیعی و منطقه ضعیف تأثیر دارد. ۲- وضعیت تنش می‌تواند ترکیبی از عوامل تکتونیکی و خواص رفتاری سنگ نظیر خاصیت آماسی و خزش سنگ باشد.

1-geohydrology ; 2- sampling ; 3- marker bed ; 4- Rock Quality Designation

* باطرح مورد نظر را مورد بحث قرار داده است.

* توضیحات مربوط به دستورالعمل انتخاب آزمایشهای مختلف برای تعیین مشخصات زمین شناسی محل پروژه توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM)[1] در ۱۹۷۵ ارائه شده است. نشریات مهم متعدد دیگری نیز در رابطه با کارهای مطالعاتی و بررسیهای محل تونل بویژه تونلهائی که در غرب احداث شده اند، منتشر شده است. این نشریات بویژه بر تأثیر مطالعات و بررسیهای محل تونل در عملیات واقعی پرداخته اند و جنبه های مهم متعددی از این بررسیها نظیر گمانه های اکتشافی، نمونه برداری و آزمایشها که کاربرد مؤثرتری در عمل دارند را روشن ساخته اند.

آئین نامه های عملیاتی انگلستان (BCP یا BSCP)[2]

* CP ۲۰۰۱ (۱۹۵۷) - این ماده اهداف بررسیهای محلی (محل اجرای پروژه) را بشرح ذیل بیان داشته است:

۱- ارزیابی محل اجرای پروژه از جهت مناسب بودن برای کارهائی که انتظاری رود انجام شود.

۲- تهیه اطلاعات به منظور آماده کردن یک طرح مناسب و اقتصادی

۳- پیش بینی و تهیه مقدمات لازم برای مقابله با مشکلاتی که ممکن است در جریان احداث پیش بیاید و آن مشکلاتی وابسته به زمین و شرایط محل باشد.

۴- بررسی حوادث یا عواملی که موجب تغییر در شرایط و هرگونه نتایج حاصل از آن می شود.

یک جنبهٔ مهم که در این آئین نامه بدان اشاره شده است، ضرورت بررسی محلی در رابطه با گزارش ایمنی کارهای موجود و در بررسی زیر شهرهای احتمالی یا اتفاق افتاده در جریان کار احداث می باشد.

در این ماده تحت عنوان شرح حفریات[3] مطالعه و بررسی زمین شناسی، طرق و روشهای کلی شرح زیر تعریف شده اند:

ا- نقشه های محل اجرای پروژه

۲- انطباق اطلاعات کلی

۳- آشکاف محل اجرای پروژه

1- International Society for Rock Mechanics ; 2- British Standard Code of Practice ; 3- Scope

آن مورد نظر است باید در نظر گرفتن تأثیرگذاری آن سازه بر تونل.

۶- تأثیر کارهای معدنی: وجود کارهای معدنی اعم از سطحی یا زیرزمینی فعال یا تعطیل لازم است که بویژه از جنبهٔ وجود گازمتان و سابقهٔ اطلاعات مربوط به آن مدنظر قرار گیرد.

۷- آب و هوا: تأثیرات احتمالی شرایط آب و هوای محلی بر احداث تونل باید در نظر گرفته شود.

۸- گمانه‌ها: گمانه‌ها باید بنحوی و در محلهائی حفر شوند که اطلاعات زمین‌شناسی موجود که از نقشه‌ها و سوابق ثبت شده بدست آمده اند را تکمیل نمایند، حتی گمانه‌هائی را می‌توان هم به صورت قائم و هم شیبدار حفر نمود. لازم است گمانه‌هائی نیز به منظور کنترل مناطقی که ابهاماتی راجع به آنها وجود دارد، حفر گردد.

۹- کاوش در جلوی جبهه کار (یا حفر تونل هادی)[1]: از طریق کاوش در جلوی جبهه کار عملیاتی می‌توان اطلاعات با ارزش زیادی بدست آورد و انجام این کار در کلیهٔ تونلها امکانپذیر است. این کار می‌تواند به منظور تهیه اطلاعات در مورد خواص فیزیکی و مکانیکی و رفتار زمین واقع در جلوی تونل اصلی صورت گیرد و در نتیجه امکان اندازه گیری مقادیر مربوط به نگهداری و خصوصیات فیزیکی را فراهم می‌آورد. این کار می‌تواند به کاهش خطرات بالقوه نظیر ریزشهای زمین، آبهای زیرزمینی، کاهش ایمنی پوشش‌های بالای سر و حوادث ناشی از گازمتان نیز کمک کند.

۱۰- بررسیهای ژئوفیزیکی: این کار در جهت تکمیل اطلاعات حاصل از گمانه‌ها در رابطه با تشکیلات لایه‌ها و ساختارهای زیرزمینی کمک می‌کند.

۱۱- نقشه برداری سطحی و زیرزمینی: یک نقشه برداری دقیق از محل اجرای پروژه به منظور جانمائی و احداث تونل ضروری است.

۱۲- نقشه برداری ساختاری یا سازه‌ای: سطح زمین و دیگر سازه‌هائی که بر اثر احداث تونل تحت تأثیر قرار می‌گیرند، باید در رابطه با وضعیت قرارشان در قبل، در حین و بعد از عملیات تونلسازی از نظر ساختمانی نقشه برداری شوند.

1- probing ahead

الف- بررسیهای زمین شناختی : خاکها ، شیب لایه‌ها و ضخامتها ، ساختار یا زمین ساختار

ب- نمونه برداری از خاکها و سنگها به منظور تعیین خواص فیزیکی

ج- بررسی و مطالعه آبهای زیرزمینی یا زمین

۴- اطلاعات خاص برای مقاصد طراحی نظیر آب و هوا و زمین لرزه

۵- بررسی در دسترس بودن مصالح مورد نیاز برای احداث

BS5930 (1981) - این ماده از آئین نامه اجرائی مطالعات و بررسیهای محلی ادارهٔ استاندارد انگلستان به جنبه‌های مختلف بررسیهای محلی و بویژه به بررسی مناسب بودن محل برای اجرای کارها و سازه‌های مهندسی می پردازد. این آئین نامه طرز عمل بسیار دقیقی در مورد موضوعات و شیوه‌های قابل استفاده در جریان انتخاب روشهای مطالعه و بررسی محل ارائه می دهد. آئین نامه توجه خاصی به نمونه برداری ، پیمایش و آزمایشهای درون گمانه‌ای و برداشتهای صحرائی با تأکید بر آزمایشهائی همچون مقاومت سنجی ، مینیدول داشته است. سنجشهای آزمایشگاهی ، گزارشها و تعبیر و تفسیر ، کوصیف خاکها و سنگها همراه با دسته بندی برای مقاصد مهندسی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته اند.

BS 6164 - این ماده که به بحث ایمنی در تونلسازی در صنعت ساختمان سازی مربوط است ، [illegible] را بر [illegible] هائی از ایمنی که بطور اجرائی بر بررسیهای کافی و تعبیر و تفسیر دقیق اطلاعات حاصل از آن متکی است ، معطوف داشته است.

این ماده جنبه‌های متعددی از مطالعات و بررسیهای محل که شایان توجه خاص مهندس است را تشریح زیر بیان داشته است :

۱- توپوگرافی : استفاده از نقشه‌های نظامی و جغرافیائی

۲- زمین شناسی : نقشه‌ها و اطلاعات از سازمان زمین شناسی انگلستان

۳- آب شناسی : سطح آبهای سطحی و سیلاب ، وضعیت بالا و پائین رفتن سطح آبها

۴- خدمات موجود : اطلاعات در مورد گمانه‌ها و چاههای مجاور و نزدیک محل ، تسهیلاتی شامل کابلهای برق ، خطوط لوله و دیگر تونلهائی که می تواند خدمات یا اطلاعاتی در دست دهند.

۵- ساختارها یا سازه‌های موجود : اطلاعاتی در مورد سازه‌های نزدیک تونلی که حفر

۱۲- آزمایشهای مربوط به آبهای زیرزمینی: سطح آبهای زیرزمینی در منطقه به طور طبیعی متغیر است، در ضمن ممکن است در نتیجه عملیات تونلسازی تحت تأثیر قرار گیرد، بنابراین ثبت و برداشت سطح آبها در چاههای قابل بررسی باید قبل، در حین و بعد از احداث تونل انجام شود. در صورت امکان جدول نشست آب[1] و اثرات آن زمین[2] باید تعیین و تهیه شود. آزمایشهای نفوذپذیری در گمانه‌های واقع در زمینهای آبدار می‌تواند اطلاعات با ارزشی به دست دهند. تجزیه شیمیائی آبهای زیرزمینی در درون گمانه‌های قابل بررسی نیز ممکن است اطلاعات مفیدی در موقعیتهای خاص به دست دهند.

۱۳- گاز: در صورتی که حدس زده می‌شود که گاز طبیعی یا دیگر گازهای خطرناک در زمینی که باید توسط چاه یا تونل باز شود، وجود داشته باشد باید آزمایشهائی جهت بررسی شکل و ماهیت حادثه و خطری که احتمال وقوع آن در اعماق تونلسازی می‌رود، انجام گیرد.

۱۵- مطالعه و بررسی زمین در حین یا بعد از احداث: تداوم مطالعه و بررسی زمین در جریان احداث شاید ضروری باشد. این کار می‌تواند بخشی از عملیات کاوش در جلوی جبهه کار باشد.

* اجزای اصلی کار بررسی محل پروژه

جدول ۲-۲ جنبه‌های اصلی مطالعه و بررسی مقدماتی محل یک پروژه تونلسازی را شامل می‌شود. اطلاعات ارائه شده در این جدول نمونه‌ای است که برای اکثر پروژه‌های تونلسازی قابل کاربرد است، ولی همانطور که در توضیحات آورده شده است ممکن است لازم باشد جنبه‌های خاصی که از وضعیت زمین‌شناسی و شرایط فیزیکی عمومی تونل ناشی می‌شود، توجهی ویژه مبذول گردد.

از اطلاعات مندرج در جدول ۲-۲ مشاهده می‌شود که کار مطالعه و بررسی محل مستلزم این است که از دقت بسیار بالائی برخوردار باشد و این امر ایجاب می‌کند که بین زمین‌شناس و مهندس در کلیهٔ مراحل تونلسازی ارتباطی نزدیک وجود داشته باشد.

مرور و بازنگری مداوم اطلاعات زمین‌شناسی، ماهیت کار بررسی و مطالعه محل، مرور و بازنگری اطلاعات مربوط به جنبه‌های زمین‌شناسی پروژه را در مراحل مختلف از کارهای

۱- مقاومت مصالح : بررسیهای مقدماتی زمین می‌توانند جوابها یا نتایج گمراه کننده‌ای از مقاومت مصالح اصلی بدست دهند. روش تعیین مقاومت مصالح ممکن است برای دامنهٔ کامل مقاومتهای مقطع مغزهٔ زمین‌شناسی قابل کاربرد نباشد.

۲- ناپیوستگیها[1] : فاصله‌های آشکاری که در نشان دادن چنین ساختارهای سنگی صنعتی گزارش شده است، محسوس می‌باشد و جهت حصول اطمینان و استاندارد کردن آنها در صورت امکان ضروری می‌باشد. Hawkins اظهار می‌دارد که حتی آزمایش نه چندان پیچیدهٔ RQD که کاربرد گسترده‌ای هم دارد، فاصله داری ناپیوستگی[2] برای هر امقدار مشابه RQD کاملاً متفاوت نشان می‌دهد.

۳- آب : تأثیر آب در تونلسازی عبارت است از :

الف- هجوم ناگهانی آب[3] داخل تونل

ب- متلاشی از آلکالی شدن یک جریان عمده

ج- سطح پیزومتریک یا فشار[4]

آب مانع عملیات تونلسازی می‌شود و به‌عنوان عامل مهمی از جنبهٔ ایجاد تغییر در اجرای

این نکات بر اهمیت مطالعات و بررسیهای محل پروژه، نه فقط از جنبهٔ دستیابی به یک طرح تونل ایمن و اقتصادی، بلکه از جهت وارد کردن شرایط زمین‌شناسی در تحلیل ریسک، به‌عنوان یکی از عناصری تأثیر فوق العاده زیادی در برآوردهای مربوط به طرح و احداث می‌گذارد، تأکید دارد.

ملاحظات و اظهارنظرهای نهائی

هدف مطالعات و بررسیهای (زمین‌شناختی) محل پروژه، ارزیابی مناسب بودن کلی آن محل برای کارهای مورد نظر می‌باشد. در معلوم کردن ماهیت تفصیلی مطالعات و بررسیها در کلیه موقعیتها به قضاوت صحیح نیازی هست.

1-discontinuity ; 2- spacing ; 3- inrush ; 4- piezometric

مقدماتی گرفته تا احداث و تکمیل پروژه، ایجاب می نماید. مرور و بازنگری مداوم اطلاعات زمین شناسی و تعبیر و تفسیر مربوط آنها با طرح تونلسازی، مستلزم ارتباط بسیار نزدیک بین مهندس و زمین شناس و در جریان تطبیق اطلاعات در کلیه مراحل پروژه می باشد.

تأثیر تغییر شرایط

شرایط ممکن است در جریان احداث نسبت به شرایطی که قبل از احداث و در حین مرحله مطالعات و بررسیهای اولیه نشان داده شده است، تفاوت نماید. Knill اظهار می دارد که لازم است نسبت به شرایط تغییر یافته بویژه از جهت اعمال اصلاحات در طرح و روش احداث توجه کافی مبذول شود.

چنین شرایط تغییر یافته ای لزوم تجدید نظر در طرح را از باب تأثیر گذاری بر پیشرفت جریان احداث ایجاب می کند، زیرا ممکن است باعث افزایش هزینه و در نتیجه ادعای پیمانکاران طبق قرارداد پیمانین گردد. در چنین شرایطی سؤالاتی در رابطه با این که آیا بررسیهای اولیه و تعبیر و تفسیرهای مربوط با آن برای پروژه تونلسازی کافی بوده است یا نه، بروز خواهد کرد.

مطالعات انجام شده توسط West در زمینهٔ مقایسهٔ شرایط واقعی و پیش بینی شدهٔ زمین شناسی در پروژه های تونلسازی انتخاب شده، نشان می دهد که اطلاعات اولیهٔ مرحلهٔ مطالعه و بررسیهای محل پروژه رضایت بخش بودند و مجالی برای بهسازی (اطلاعات و طراحی) بانویسه بگمانه ها، نمونه ها و بخش های برجا (آزمایشگاهی) به دست می دادند. علاوه بر این، از نتایج آزمایشها بیشترین استفاده به عمل می آمده. West استفاده از گمانه ها و چاههای اکتشافی را به دلیل یا از دست دادن (ی حایل) در شرایط مقتضی پیشنهاد می کند.

اطلاعات حاصل از مطالعه و بررسی زمین: حوزه های مسئله ساز یا مشکل

انجمن تونلسازی انگلستان (BTS)[1] اطلاعات حاصل از بررسیهای زمین در ارتباط با تونلسازی مورد بحث قرار داده است. سه حوزهٔ مهم در میان این اطلاعات تشریح شده اند که مشکلاتی را به بار می آورند:

1- British Tunnelling Society

۱- در مراحل اولیه اطلاعات متعاوتی وجود دارند که باید پیدا و برآورد نمود و آنها را با هدف کار و هفت وجود کرد. مطالعه و بررسی در مراحل مقدماتی مستلزم تعداد زیادی آزمایشهای بسیار دقیق و تعبیر و تفسیر آنها می باشد. این آزمایشها و تعبیر و تفسیرها سپس می توانند در برنامه ریزی یک مطالعه و بررسی مؤثر کمک کنند و با این برنامه ریزی، در جهت تولید اطلاعات ملکفی و مناسب، از طریق شیوه های موجود در اختیار زمین شناس استفاده خوبی به عمل آورند. همین اطلاعات ملکفی و مناسب است که به مهندس امکان تهیه یک طرح اقتصادی را می دهد.

۲- بدون شک، سؤالاتی در رابطه با محدوده و میزان کار مطالعه و بررسی محل پیش خواهد آمد. بهرحال، شکی وجود ندارد که انجام یک بررسی و مطالعه بسیار محدود که اطلاعات غیر ملکفی بدست دهد، پیش بینی های فوق العاده غیر واقعی و عدم اطمینان بسیار یا لائی را موجب خواهد شد که می تواند از بابت ایجاد تأخیر در اجرای عملیات و وارد نمودن خسارات اضافی هزینه ها را شدت افزایش دهد.

۳- دستیابی به یک طرح اقتصادی و شایسته، مستلزم یک کار مطالعه و بررسی ساختگاه است که بخوبی برنامه ریزی شده باشد، برنامه ریزی دقیقاً اجرا شده باشد، و نتایج بدقت بررسی و [illegible] باشند. و [illegible] که باید در یک کار مطالعه و بررسی برای یک پروژه بزرگ تونل مد نظر قرار گیرند، ضرورت به کارگیری مهارتهای تخصصی گوناگون شامل زمین شناسی مهندسی و مکانیک سنگ همراه با مهندسی تونل را ایجاب می نماید.

۴- توانائی پیش بینی مشکلات بالقوه و ارائه راه حلهائی برای مقابله با آنها، یا معرفی شیوه هائی جهت کنترل آنها، نشانگر حیطه وسیع کار مطالعه و بررسی و وسعت نظر آن در ارزیابی عمیق جنبه های حاشیه ای و تفضیلی ای که در کار احداث تونل مؤثر است، می باشد.

۵- در جریان احداث تونلی که طرح آنها برمبنای یک مطالعه و بررسی جامع ساختگاه تهیه شده، نیاز به مرور و بازنگری اطلاعات حاصل در جریان مرحله مقدماتی (۱) پروژه می باشد. دقت در به روز کردن اطلاعات مستلزم انجام کار بررسی و مطالعه مداوم از طریق آزمایش، حفر تونلهای اکتشافی و اندازه گیری

(۱) updating

همراه با ارزیابی و بررسی دقیق متعاقب آن می باشد. کیفیت مرور و بررسی مداوم شرایط زمین متأثر از میزان جزئیات و اطلاعات تفصیلی حاصل شده و کیفیت سیستم گزارش نویسی (ثبت اطلاعات) اتخاذ شده، است.

۶- وقوع تغییر شرایط (نسبت به شرایط پیش بینی شده) و علل آنها در جریان تونلسازی احتمالاً به پیش بینی و درک مسائل کمک می کند و در بعضی موارد از طریق گزارش نویسی تفصیلی رفتارنگاری و ارزیابی مداوم مطالعات و بررسیهای در حال انجام در حین تونلسازی، وقوع تغییر شرایط قابل پیش بینی می باشد.

۷- گزارش نویسی در مورد ایمنی کارهای موجود و اقدامات انجام شده جهت تأیید عوامل ریزش، ضرورت مطالعه و بررسی محل را ایجاب می کند. انجام مطالعات و بررسیهای پیشتاز در جریان تونلسازی به شکل گرفتن مبنائی برای انجام کارهای مطالعه و بررسی بعدی کمک می نماید و این امر استانداردهای ایمنی را بالا می برد و در نهایت به یک اجرای پیشرفته و بهتر در احداث و تونلسازی منجر می گردد.

۸- مطالعه و بررسی مشخصات برای پروژه های تونلسازی به تهیه مقاطع زمین شناسی مسیری که تونل از آن عبور می کند، منتهی می شود. قطع نظر از مهارت هندسی زمین شناس، برنامه های اکتشافی با وجود این نیاز به قضاوت و تعبیر و تفسیر دارد و در نتیجه تا حدی ارزیابی کمی و کیفی در آن دخالت دارد. بنابراین همیشه احتمال وجود مقداری ریسک در مواجهه با شرایط پیش بینی نشده زمین در تونلسازی، وجود دارد. با وجود این، از طریق برنامه ریزی، رفتارنگاری و بررسی دقیق شرایط زمین و جنبه های مرتبط با آن می توان تا حد زیادی از تأثیر چنین ریسکهائی بر جریان و پیشروی تونلسازی کاست.

در این فصل تمرکز بر روی ارائه و معرفی جنبه های مهم از مطالعه و بررسی محل که در پروژه های تونلسازی تأثیر دارند، معطوف شده است، ولی در کلیه مراحل لازم است که برای اطمینان از این که عوامل مناسب مطرح و مورد توجه قرار گرفته اند، بازدیدی از محل و موشکافانه با موضوع برخورد کرد.

1- ongoing investigation

فصل سوم

تأثیر شرایط زمین شناختی بر طراحی و احداث تونلها

هدف مطالعه و بررسی ساختمان، نشان دادن طبیعت زمینی است که قرار است تونلسازی در آن انجام شود. این مطالعات و بررسیها مبنائی برای طراحی تونل و انتخاب روشهای حفر و نگهداری به دست می دهند که این دو راه حلهای لازم برای مشکلات خاصی که ممکن است در رابطه با مسائل و جایابهای زمین شناختی پیش بیایند را پیش بینی می کنند. جنبه های اساسی بررسی، ارزیابی و مطالعه این کار مقدماتی در فصل قبل مورد بحث قرار گرفت. بهرحال، مشکل ها از جنبه های خاص زمین شناسی متعددی وجود دارند که در عملیات تونلسازی با آن مواجه می شوند. این جنبه های زمین شناسی می توانند باعث بروز مشکلاتی بویژه از جهت تأخیر انداختن در پیشرفت عملیات و یا افزایش خطرات عملیات شوند. آگاهی از تأثیر شرایط زمین شناسی بر عملیات تونلسازی، نتیجه و گسترش طبیعی مطالعه و بررسی محل می باشد.

این فصل به بررسی شرایط و ویژگیهای زمین شناختی خاصی که ضرورت اتخاذ شیوه های تونلسازی خاص یا اقدامات پیشگیری کننده ویژه ای را پیش می آورند، می پردازد. تغییر در شرایط زمین شناسی که از کاهش مقاومت و کیفیت سنگهای فراگیری که باید حفر شوند، ناشی می شود، اغلب علاوه بر تأثیر بر جنبه های ایمنی و عملیاتی، موجب افزایش هزینه های تونلسازی می گردد. در نتیجه، ارزیابی دقیق و عمیق شرایط زمین شناختی نقش مهمی در طراحی و برنامه ریزی، احداث و کارهای احتمالی و عملیات تونل بازی می کنند.

محیط زمین شناختی

تونلها در واقع در کلیه انواع سنگهای اصلی حفر شده اند. Wahlstrom جنبه های زمین شناختی[1] مرتبط با عملیات تونلسازی را به تفصیل مورد بحث قرار می دهد و توجه را به اهمیت جنبه های سنگ شناختی[2] و دگرسانی معطوف می دارد.

1- petrography , 2- alteration

سنگهای آذرین[1]

طبیعت بلورین سنگهای آذرین نشانگر مقاومت فشاری[2] بالائی است که مشکلات بالقوه‌ای را در فرآیند حفر سنگ ایجاد می‌کنند، ولی همین ویژگی از جهت نیاز به نگهداری کمتر برای دستیابی به تونل قابل قبولی از پایداری یک ضربت به حساب می‌آید.

سنگهای آذرین را می‌توان به دو دسته سنگهای آذرین بیرونی[3] و درونی[4] تقسیم‌بندی کرد. اندازهٔ بلورها (عموماً به عنوان اندازهٔ دانه به آنها اشاره می‌شود) چنین سنگهائی به طور کلی به اندازه و تاریخچهٔ زمین‌شناسی توده‌ٔ آذرین بستگی دارد. سنگهای آذرین درونی (نفوذی) نسبتاً ناودک تا کم ضخامت، در مقایسه با دیگر انواع سنگهای آذرین درشت دانه هستند و ترکیب کانی‌شناسی، معمولاً روشن و با چگالی کم است. این سنگها به استحکام بالا و مقاومت قابل توجه در برابر هوازدگی[5] می‌باشند. توده‌های آذرین درونی دامنه گسترده‌ای از باتولیتهای گرانیتی[6]، که منطقه‌ای به وسعت بیش از صدها کیلومتر مربع را می‌پوشاند، تا دسته دایکها[7] و سیلها[8] و نفوذیهای کنترل شده توسط ساختارهای طبیعی محل را در بر می‌گیرد. چنین سنگهای نفوذی علاوه بر مشکلاتی که در زمینهٔ حفر ایجاد می‌کنند، می‌توانند به صورت راهی برای هدایت آب به داخل تونل عمل نمایند.

سنگهای آذرین بیرونی به حالت مذاب از داخل زمین بیرون ریخته‌اند، به عنوان مثالهائی از این نوع سنگها می‌توان [illegible] نام برد که [illegible] تشکیل داده‌اند. انباشتگی‌های ریزدانه گدازه‌ها[9] و توفها[10] و آگلومراها[11] نیز از سنگهای آذرین بیرونی هستند که در ایالات متحده جریان بازالتی که منطقه‌ای به وسعت بیش از ۶۰۰۰۰ کیلومتر مربع را پوشانده و ضخامت آن تا بیش از ۱۲۰۰ متر رسیده است، وجود دارد. این سنگهای آذرین بیرونی که از آتشفشانها و گنبدها[12] می‌توانند نسبت به سنگهای دگرگون و تخلخل[13] یافته سست و ضعیف‌تر باشند و معمولاً مقاومت کم و آسان حفر شدنی هستند، آنهائی که از جریان گدازه‌ها تشکیل شده‌اند و همراه با خلل و فرج هستند، باید بیش از نوع سنگهائی که توانائی تشکیل حفرات قابل توجهی در ارتباط با کانالهای زیرزمینی ایجاد کنند.

1- igneous rock ; 2- compressive strength ; 3- extrusive ; 4- intrusive ; 5- weathering ; 6- granitic batholith ; 7- dyke swarm ; 8- sill ; 9- rhyolite ; 10- basalt ; 11- volcanic Tuff ; [illegible]

سنگهای رسوبی[1] :- سنگهای رسوبی توسط Wahlstrom به دو دسته تقسیم شده اند:

۱- آنهائی که به طور عمده کلاستیک یا آواری[2] هستند (توسط یک ماتریکس ترکیم یا سیمان سیلیسی به هم چسبیده اند) : مثالهائی در این مورد عبارتند از ماسه سنگها[3] و دیگر رسوبات سیلیسی تشکیل شده ، کربناتها و اکسیدهای آهن .

۲- آنهائی که به طور عمده بلورین هستند : مثالهائی در این مورد عبارتند از نمک سنگ ، گچ[4] ، انهیدریت[5] ، سنگ آهکهای[6] بلورین خاص .

انواع سنگهای رسوبی به طور کلی از نظر مقاومتی ضعیفتر از بیشتر سنگهای آذرین و دگرگونی[7] هستند . در نتیجه ، این سنگها به طور کلی از جنبه ژئوفیزیکی در ابتدا با محدودیتی مواجه نیستند ، هر چند تاثیرات تنش و بیشرفت هوازدگی و کاهش مقاومت تحت تاثیر آب می توانند باعث بروز مشکلاتی ، بویژه در جائی که چنین سنگهائی حاوی مقادیر قابل توجهی کانیهای رسی باشند ، شوند . در سنگهای رسوبی حاوی لایه های رسی که در برابر آب غیر قابل نفوذ هستند ، مقدار نفوذپذیری در امتداد گسترده ای تغییر می کند ، در حالی که در سنگهای رسوبی کاملاً نفوذپذیر و حتی حاوی آب هستند ، انتشار از لایه ها وابسته است . نسبت به تنش که موجب ریزش و تغییر شکل در سطوح پائین تنش در انواع متفاوت سنگهای رسوبی می شود ، در امتداد گستره ای تغییر می کند . در عملیات تونلسازی ، وجود لایه های سنگهای رسوبی در سازندهای مربوط به آنها ، مشکلات احاطه و مدنظر قرار دادن است . این نوع لایه ها غالباً پتانسیلهای پائینی از نظر مقاومت برشی از خود نشان می دهند . این نکته از نظر امکان کار بدون نصب وسائل نگهداری که در زمانهای اسپانی قابل ملاحظه اتفاق می افتد ، حائز اهمیت است .

سنگهای دگرگونی :- این سنگها تحت یک فرآیند زمین شناسی در دما و یا فشار بالا و به صورت تبلور کامل یا بخشی تشکیل شده اند . این سنگها نسبت به فرآیند دگرگونی سنگهای دگرگونی غیر از تبلور نیز از خود نشان می دهند که اصطلاحاً بافت[9] و ساختار[10] نامیده می شوند .

انواع سنگهای نظیر کوارتزیت[11] ، مرمر[12] ، مرمر دولومیتی[13] و هورنفلس[14] که از نظر کاربردهای سنگ شناسی حاوی کانیهای

1- sedimentary rock ; 2- clastic ; 3- sandstone ; 4- gypsum ; 5- anhydrite
6- limestone ; 7- metamorphic r. ; 8- aquifer ; 9- foliation ; 10- schistosity ;
11- quartzite ; 12- marble ; 13- dolomitic marble ; 14- hornfels

مختلفی می باشند، با حداقل تورق و حتی در بعضی موارد بدون تورق، و دیگر گونهای مقاومتی خود را از خود نشان می دهند. برخی از سنگهای دگرگونی، نظیر اسلیت[1]، فیلیت[2] و میکاشیست[3] حاوی مقادیری از کانیهای میکائی[4] هستند که می توان آنها را در امتداد صفحات کاملاً بارز ضعیف میکا بسهولت از هم جدا کرد. ورقه های میکا تأثیر بسیار مهمی در مقاومت هوازدگی سنگهای دگرگونی خاص دارند و حائز اهمیت می باشند.

دگرسانی سنگ[5] - فرآیندهای طبیعی هوازدگی موجب دگرسانی سنگ می شود که این امر می تواند در تونلسازی اهمیت بسزائی داشته باشد. هوازدگی مقاومت سنگها را کاهش می دهد و تحت تأثیر حرکت آبهای زیرزمینی عمق هوازدگی به زیر قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. علاوه بر نوع سنگ و ساختار، شرایط آب و هوائی و توپوگرافی بر عمق هوازدگی تأثیر دارند. Wahlstrom فعالیتهای بیولوژیکی و زمان را نیز بعنوان عوامل مؤثر در عمق هوازدگی مطرح کرده است.

فرسایش[6] مواد هوازده را اغلب جابجا می کند، ولی کانالهای عمیق و دره های باریک غالباً توسط مواد هوازده که آنها را پر می کنند از نظر دور پنهان می شوند. بنابراین مناطق مدفون شده[7] سنگهای هوازده ممکن است در زیر مواد منفصل وجود داشته باشند. مناطقی که سنگهای شدیداً هوازده در آنها مشاهده می شود معمولاً حاوی آب بسیارند و می توانند تحت یک فشار (ارتفاع معادل فشار) هیدرواستاتیک قابل ملاحظه باشند. در نتیجه، اگر حفاریهای تونلسازی در زیر یا در مجاورت این مناطق انجام گیرد، این سنگها قابلیت آن را دارند که بسرعت به داخل فضای حفر شده جریان پیدا کنند. احتمال مشکلات هوازده در انواع سنگهای رسوبی و دگرگونی زیادتر وجود دارد.

جدول ۲-۱ خصوصیات هوازدگی سنگ در انواع مختلف سنگها را نشان می دهد.

تغییر شکل[7] توده سنگ بر اثر چین خوردگی[8] - محسوسترین شکل تغییر شکل توده های سنگی از چین خوردگی ناشی می شود و این امر در ساختارهای سنگی لایه ای آشکارتر است. چین خوردگی در کلیه انواع سنگها اتفاق می افتد. چین ها در طول موجهای مختلف[9] از چند سانتیمتر تا چند کیلومتر

1-slate ; 2-phyllite ; 3-schist ; 4-micaceous ; 5-alteration ; 6-erosion ; 7-deformation ; 8-folding ; 9-fold

جدول ۳-۱ : جنبه‌ها یا عوامل هوازدگی سنگ با توجه به عملیات تونلسازی

جنبه/عامل اصلی	توضیحات
۱- کانیهائی که قابلیت بالائی برای هوازدگی شیمیائی دارند.	۱- سنگهائی که محتوی مقدار زیادی منیزیم، کلسیم و بویژه آهن هستند ۲- آهن در سنگها به صورت اکسید یا هیدراته باقی می ماند: منیزیم و کلسیم به صورت محلول حل یا به صورت کربناتها تشکیل می شوند ۳- کم تحرک ترین عناصر سنگهای هوازده عبارتند از آلومینیم، سیلیس و آهن ۴- معمولترین محصولات حاصل از هوازدگی شیمیائی کانیهای رسی یا کانیهای سیلیکاتی همراه با هیدروکسیدهای آلومینیم و آهن هستند ۵- در مناطق گرمسیری فقط اکسیدهای آهن و هیدراتهای آلومینیم معمولاً باقی می مانند که در اصطلاح لاتریتها[1] نامیده می شوند.
۲- سنگهای غنی از فلدسپات با مقاومت کم در برابر هوازدگی	۱- معمولاً مربوط با محلهای هوازدگی، این سنگها از تجزیه سیلیکاتهای آهن-منیزیم و تجزیه فلدسپاتها تولید می شوند. ۲- این محصولات هوازده از طریق هالههای آهن زنگ زده، سستی و تردی شان شناخته می شوند. ۳- شستشو موجب نقل مکان اجزای قابل حل سنگ تحت تأثیر عمل آب می شود و در نتیجه لایه‌ای از سنگ هوازده که در سطح است تدریج به خاک تبدیل می گردد.
۳- مشخصه عمومی سنگهای هوازده	۱- سنگهای هوازده از خرده سنگهای[2] سست و بستاً درشت دانه و زبر تا رسوبات ریز دانه از خود خواص پلاستیک نشان می دهند ۲- دانه های رسی در عمق به دلیل فشرده شدن و از دست دادن آب درون خلل و فرج به سمت نرم شدن می روند، نتیجه کلی این عمل افزایش مقاومت برشی[3] به دلیل بهتر شدن چسبندگی[4] است که پایداری و استحکام کلی را افزایش می دهد.
۴- اثرات تجزیه و انحلال آب زیرزمینی.	۱- تعقب هوازدگی عمقی که تا اعماق دهها یا حتی صدها متری اتفاق افتد، مستلزم وجود آبهای زیرزمینی فعالی است که اکسیژن و مواد شیمیائی آلی را که منشاء سطحی دارند، با خود حمل می کنند. ۲- بطور کلی آبهای زیرزمینی نیاز به یک سیر هیدرولیکی مناسب به منظور سیر جریانی با مقاومت پائین، مثلاً یک منطقه خرد شده یا صفحات گسل، دارند. ۳- هوازدگی عمقی (عمیق) در مناطقی که از نظر توپوگرافی مرتفع و دارای درجه حرارت یا دمای بالا و آب و هوای مرطوب باشند، محتمل‌تر است

1- laterite ; 2- aggrgate ; 3- shear strength ; 4- cohesion

دسته بندیهای مختلفی در مورد گسلها وجود دارد، ولی همه آنها را می توان به طور گسترده ای تحت گسلهای نرمال یا عادی[1]، گسلهای معکوس[2] و گسلهای امتداد لغز[3] دسته بندی کرد. در گسلهای عادی، جابجائی نسبی در طول صفحه گسل باعث می شود که لایه ها به طور افقی از یکدیگر فاصله بگیرند. در گسلهای معکوس جابجائی افقی باعث همپوشانی لایه ها بر روی یکدیگر می شود و علت این امر این است که جابجائی سنگها در طول سطح صفحه گسل، لایه هائی که قبلاً به هم وصل بوده اند را بر روی یکدیگر قرار می دهد. گسلهای امتداد لغز از طریق جابجائی نسبی افقی مشخص می شوند. نکات زیر در مورد گسلها توسط Wahlstrom مورد بحث قرار گرفته است، البته صاحبنظران دیگری ملاحظاتی را در ارتباط با تونلسازی بدان اضافه کرده اند.

۱- در جاهای متعدد بویژه جاهائی که فعالیتهای آتشفشانی یا تکتونیکی هنوز وجود دارد، به طور متناوب جابجائیهای تکراری صورت می گیرند.

۲- گسلها غالباً به صورت مسیرهای برای حرکت آبهای زیرزمینی عمل می کنند ولی ممکن است به عنوان دیواره آب بند نیز عمل نمایند. در نتیجه فرسایش داخلی بویژه در سنگهای خاصی نظیر سنگ آهکها می تواند اتفاق بیفتد، در حالی که در مورد دیگر انواع سنگها مانند ماسه سنگها، فلدسپاتها و سنگهای آذرین درگرسانی قابل توجه سنگ دیواره محتمل است.

۳- اثرات اصطکاکی جابجائی در طول صفحه گسل علاوه بر واکنش شیمیائی ناشی از برخورد آب می تواند موجب دگرسانی سنگ دیواره گردد و دگرسانی آن را تشدید کند.

۴- عرض منطقه گسله به سوابق تکتونیک و زمین شناسی و نوع سنگها وابسته است. حتی در جاهائی که به طور نسبی جابجائی کوچکی بین لایه ها اتفاق افتاده است، عرض مناطق گسله می تواند به چندین ده متر برسد و این مسئله نشان دهنده برگشتهای متعدد در جابجائی در طول دوره های زمانی متمادی می باشد.

۵- مشخصات پرشدن بین گسلها و مواد پرکننده[4] به طور کاملاً شخصی متفاوت هستند و علت

1- normal Fault ; 2- reverse f. ; 3- strike slip f.

4- gouge (مواد دانه ریزی که بین دیواره های یک گسل وجود دارد و در اثر حرکت سایشی خود گسل ایجاد شده است)

میزان تأثیر جابجائی آب زیرزمینی را منعکس می‌کنند.

۹- خصوصیات مواد پرکننده (۱) بین صفحات گسل به خصوصیات و طبیعت قطعات و فرده سنگهای بستر بستگی دارد که منشاء آنها سنگهای بستر مقاوم هستند و بدانجا حمل شده‌اند. فضای بین صفحات گسل می‌تواند فقط توسط قطعات برشی پر شود، ولی اغلب مواد دانه ریز را نیز شامل می‌شود. قطعات برشی و مواد دانه ریز همراه آنها نسبت به تیروی محرکهٔ ایجاد کنندهٔ جابجائی منشاء در مواد پرکننده، می‌تواند اثرهای بالا تر یا پائین تر باشد.

۷- سنگهای دانه ریز و پودر و خرد شده‌ای که بر اثر عمل سائیش ناشی از حرکت نسبی دیواره گسل در طول صفحهٔ گسل ایجاد شده اند را اصطلاحاً gouge می‌نامند. آب به تجزیه چنین سنگهائی کمک می‌کند و مواد پرکننده مذکور (gouge) اغلب می‌تواند حاوی کانیهای رسی باشد که این کانیها می‌توانند موجب تغییر شکل پلاستیک در درون حفرات زیرزمینی، بر اثر خواص رفتاری وابسته به زمان و اثرات فشاری آماس یا تورم (۲) شوند. در نتیجه شرایط مرطوب (۳) و تماس آب با مواد پرکننده گسل (gouge) می‌تواند دیوارهٔ تونل را تحریک به ریزش کند. این مواد پرکنندهٔ قدرت محدود شوندگی (۴) کم یا ناچیزی دارند و زمان ایستائی (۵) آن ضعیف است. خصوصیت دانه ریزی این مواد اغلب موجب ویژگی نفوذ ناپذیری آن به طور عمده می‌شود، اگرچه ایجاد نیم راه آب یا زه آب (۷) نوعیدان قابل توجه از درون این مواد به داخل تونل، بمرور زمان می‌تواند یک مسیر جریانی برای آب و تخلیه‌های آبدار (۸) در مقادیر قابل توجه برای پروژه، ایجاد کند. تونلی که منطقه‌ای عریض در زیر مواد پرکننده را قطع کند و در مجاورت با آب باشد می‌تواند مواجه با هجوم سیلاب یا تخلیه‌های آبدار در داخل تونل شود. پیش بینی عرض مواد پرکنندهٔ گسل مشکل است و مشاهده، بررسی و رفتاری و مطالعه‌ای دقیق را در حالی که تونلسازی در حال انجام است می‌طلبد. به منظور کنترل خواص مواد پرکنندهٔ گسل و تغییر خواص آن و یا تونل به پرشدن این خصوصیات لازم است که اندازه گیریهای تکمیلی مؤثری صورت گیرد.

1-breccia ; 2-swelling ; 3-humid ; 4-bonding strength ;
5-stand up time ; 6-impermeable ; 7-seepage ; 8-water born debris

۸- جابجائی در سنگ توده سنگ توسط خزش، تراکم و متعاقب در سطح گسل ها ایجاد انرژی می نماید. انرژی های زیاد جابجائی را نشان دهنده وجود پتانسیل های زیاد ریزش از جهت نشان دادن صفحات یا اصطکاک بسیار بالائی که بسهولت تحریک به جدایش و لغزش در داخل فضای تونل می شوند بسیار حائز اهمیت می باشند.

۹- گسلها و ساختارهای اتصال دهنده[1] امکان جریان آب زمین و نفوذ آن به اعماق زیر سطح و دیواره های حفاری را میسر می سازند. این امر موجب تر شدن سنگهای دیواره و هوازدگی عمقی می شود که با افت استحکام سنگها تا اعماق قابل ملاحظه ای از سطح زمین همراه است.

۱۰- جهت گسل در ارتباط با خط تونل حائز اهمیت زیادی است چون این مسئله طول تونل متاثر از گسل و محدوده ای از تونل که با منطقه گسله همراه است را مشخص می کند.

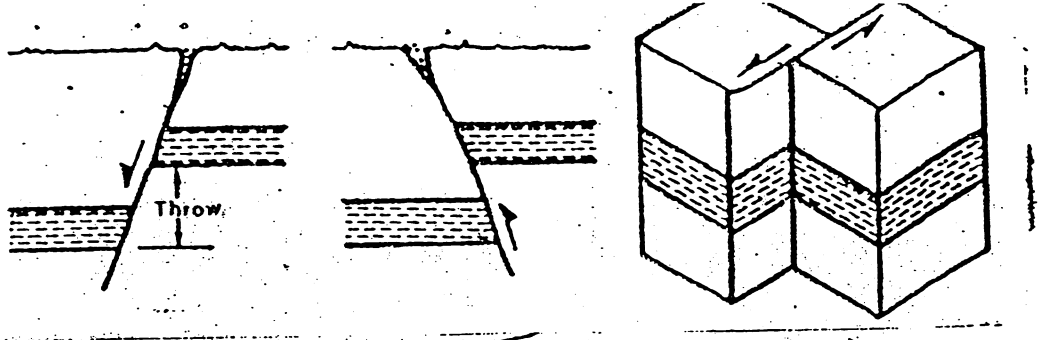
شکل ۳-۲ جنبه های مختلف گسلها در ارتباط با پایداری تونلها و عملیات حفر را بتصویر کشیده است.

ترزاقی[2] اظهار داشته است که از جنبه مهندسی تونل، مقدار افت یا جابجائی قائم[3] گسلها چندان هم نیست زیرا گسلهای با جابجائی قائم زیاد معمولاً فقط با لایه های نازکی از مواد پر کننده (gouge) همراه هستند. برعکس گسلهای دیگری با جابجائی قائم کوچکتر در درون همان سنگها با سنگهای خرد شده بسیار بیشتری در هر دو صفحه گسل همراه هستند. بهرحال، از جنبه تجربی در ارتباط با تونلهای زیرآبی، ترزاقی اظهار داشته است که اگر ضخامت سنگ شبتاً محکم واقع بین تونل و بستر دریا به طور عمده ای کم باشد، افت یا جابجائی قائم گسل می تواند بسیار حائز اهمیت و توجیه باشد.

واژه بندی و ارتباط آنها با تونلسازی - در طبقه بندی سنگها منظور از آن جابجائی نسبی قابل ملاحظه در صفحه گسل است که در اثر آن صفحات در تماس یکدیگر قرار می گیرند. برعکس در یک گسل، یک صفحه گسلی یا لغزش در سنگ است که جابجائی نسبی در آن صورت می گیرد.

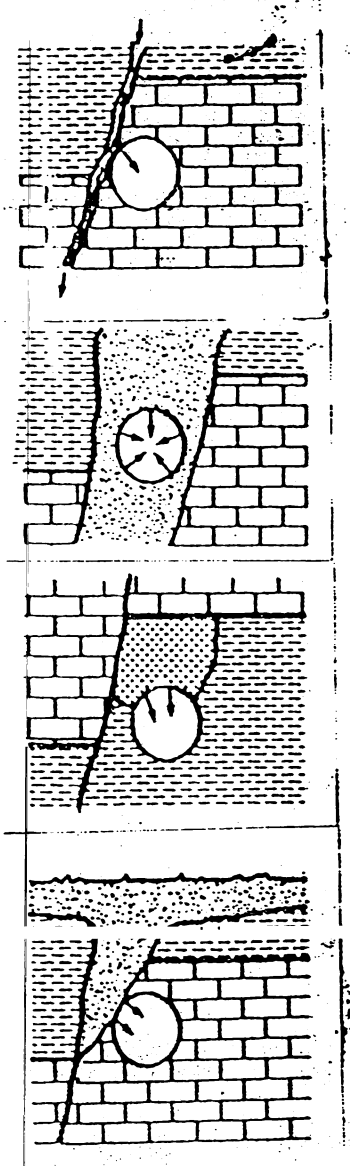
یادستدای
درزه ها به صورت مجموعه ای هستند. درزه های یک مجموعه درزه، موازی یکدیگر می باشند و معمولاً بیش از دو دسته درزه وجود دارد که نسبت به هم تحت زاویه ثابتی قرار می گیرند.

1-interconecting structure ; 2- Terzaghi ; 3- Throw



امتداد لغز　　معکوس　　نرمال (عادی)

(الف) انواع اصلی گسلها : گسلها در نزدیکی سطح زمین احتمال دارد که تحت تأثیر هوازدگی قرار گرفته باشند.



با توجه به وجود آب، گسلها یکی از مهمترین مسیرهای عبور آب می باشند. علاوه بر این گسلها سنگ است تحت جابجائیهای پی در پی زیادی قرار گیرند تراکم این امر محتمل تر به قابل ملاحظه ای از خلل و فرج برخوردار می باشد.

پیش بینی موضع منطقه گسله یا خرد شده مشکل است و این عوض ممکن است در طول گسل تغییر کند. مواد خرد شده بین دیواره های گسل استحکام پائین دارند و فرسایش آنها بسیار کم می باشد.

صفحات گسل دارای اصطکاک نسبتاً پائین و چسبندگی ضعیفی هستند و در نتیجه مناطقی به وجود می آورند که پایداری آنها کاهش و احتمال لغزش عمده افزایش یافته است.

مناطق گسله اغلب مسیر مرجحی برای انتقال آب زمین هستند در نتیجه امری کاملاً معمولی است که با هوازدگی عمیق و موضعی نوع مواجه در مناطق نزدیک سطح زمین مواجه شویم. مشکل قابل ملاحظه ای در حفر تونل در تکه های فاقد استحکام اشباع از آب بر اثر عبور آب و هوازدگی وجود دارد.

شکل ۳-۲ : گسلها و اثرات آنها بر پایداری تونلها

ترزاقی گزارش کرده است که سیستم درزه ها در سنگهای آذرین درشت دانهٔ زبر، بویژه گرانیت به طور معمول سه دسته هستند و ایجاد بلوکهای کم و بیش منشوری می کنند. وی اظهار داشته است که سنگهای رسوبی نیز به طور معمول دارای سه دسته درزه هستند که یک دسته معمولاً به موازات صفحات لایه بندی می باشند و دو دسته دیگر صفحات لایه بندی را با زاویهٔ تقریباً قائمه قطع می کنند. فاصله داری درزه ها در لایه های سنگ آهک و ماسه سنگ معمولاً در حد متر است، ولی در شیل فاصله ها کمتر می باشد. سنگهای دگرگونی معمولاً دارای دو دسته یا بیشتر درزه هستند و اغلب یک دسته درزه صفحات رخ یا کلیواژ[1] را با زاویهٔ تقریباً قائمه قطع می کند. ترزاقی اظهار می کند که فرسودگی و شکستگی زیادی علاوه بر مشکلات ناشی از آب به سیستم درزه ها نسبت داده اند و نتیجه می گیرد که در تونلسازی درزه ها باید همیشه به طور خاص مورد ملاحظه قرار گیرند. فاصله داری درزه ها با افزایش عمق نسبت به سطح زمین افزایش و عرض یا دهانه درزه ها با افزایش عمق کاهش می یابد.

درزه ها: به وجود آمدن و آرایش - منشاء ایجاد درزه ها در ساختارهای سنگی در اصل به تاریخچهٔ تکتونیکی منطقه برمی گردد. تناوب و حدت یا شدتی آنها به طبیعت و اهمیت تنشهای زمین و حالات فشاری و کششی آنها مربوط است و چین خوردگی[2] و گسل خوردگی[3] تنشها در ضمن در این میان بازی می کنند. در نزدیکی محور چین خوردگی سنگهای شدیداً چین خورده و مجاورت [illegible] ملاحظه درزه ها را در نظر داشت. با این وجود،

موقعیتهای بسیاری وجود دارند که ایجاد درزه ها در آنجا را نمی توان به طور مستقیم به ساختارهای بزرگتر نظیر چین ها و گسلها ربط داد. این امر حاکی از این است که عوامل محلی در زمانهای گوناگون در ایجاد و گسترش دسته درزه ها نقش دارند.

آرایش و شکل قرارگیری درزه هائی که در سنگهای سطح زمین مشاهده می شود، با آنچه در تونلها مشاهده می کنیم، به استثنای دهانهٔ تونلها، مشابهت چندانی ندارند. درزه هائی که در سنگهای سطحی مشاهده می شوند، ممکن است تحت تأثیر هوازدگی و شرایط جوی مثلاً فرآیند انقباض

1- cleavage , 2- folding , 3- faulting

واشباط ایجاد شده باشند و در نتیجه احتمال می رود که دارای عمق نفوذ کمی در زیر سطح زمین باشند

شکل ۳-۳ تأثیرات مختلف درزه های سنگی در رابطه با پایداری تونلها را به تصویر

کشیده است.

اصولاً آرایش درزه ها تأثیر صنعتهای ساختمانی در توده سنگ هستند و بطور عمده بر زمان

ایستائی انواع مختلف سنگ تأثیر می گذارند. تأثیر آرایش درزه ها و شکل آرایش آنها بر شکل

ریزش یا گسیختگی سنگ و بیشتر پتانسیل ریزش آنها در جریان عملیات حفر تونل محتمل است.

در نتیجه، آرایش درزه ها در جریان انتخاب و کاربرد وسائل نگهداری و بویژه برای نگهداری

موقت مستلزم تحلیل توجه خاص می باشد. آرایش درزه های سنگ باستی در مرحله طراحی

تونل و در زمان انتخاب سیستم نگهداری موقت مدنظر قرار گیرد.

تأثیرات آب زیرزمینی - وجود آب در مقادیر بسیار زیاد، علاوه بر ایجاد مشکلات اجرائی

در جریان کار احداث تونل، به عنوان یک خطر عظیم شناخته شده است. مشکلات بالقوهٔ

ناشی از جریان آب در خلال تونلسازی را می توان در حد گسترده ای در بسیاری از موقعیتها به

وسیلهٔ مطالعه و بررسی جامع محل مورد نظر برای احداث تونل با بکارگیری گمانه های عمیق پیش بینی

کرد. انواع سنگهائی که در جریان تونلسازی، تونل باید از آنها بگذرد و به عنوان سنگهای

آبدار (یا سنگهائی که بپتانسیل آبدار بودن دارند) شناخته شده اند را می توان به طور کلی شناسائی

کرد و اقدامات مناسب جهت کنترل آب یا مواجهه با مشکلات ناشی از جریان آب اتخاذ نمود.

بهرحال، پیش بینی دقیق مقدار جریان آب احتمالی مشکل است و رفتار نگاری تفضیلی و بازنگری

منظم شرایط، همراه با تفسیر اطلاعات و انطباق آنها با اطلاعات حاصل از اندازه گیریهای خاصی نظیر

آنکرشی و برنامه های تزریق، ضروری می باشد.

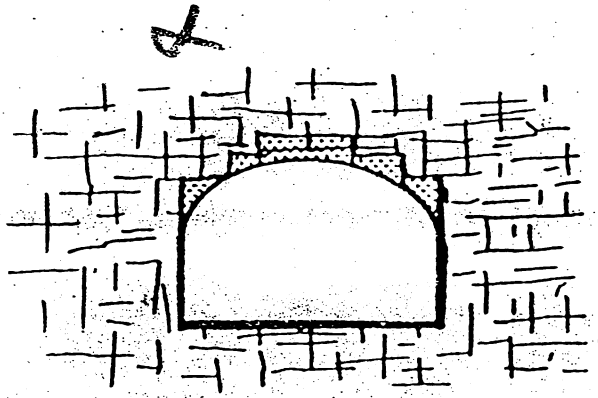
وجود مقادیر زیاد آب در سنگهای سست و ضعیف می تواند منجر به تشکیل سریع حفرات

در اطراف تونل حفر شده شود. این حفرات می توانند موجب سرازیر شدن حجم عظیمی از خاک و سنگ

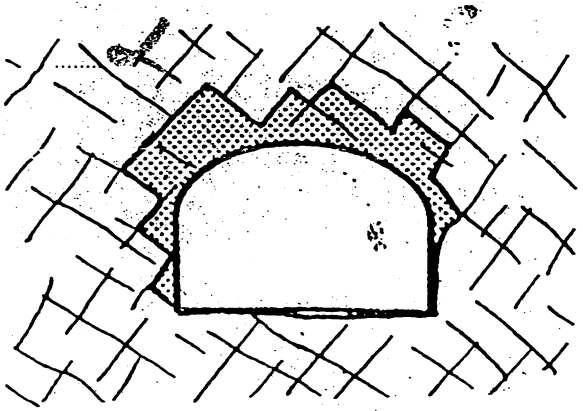
مرطوب و شل به داخل تونل گردند. در نتیجه شناسائی چنین حفرات بالقوه ای در ارتباط با شرایط زمین

غیر العاده حائز اهمیت است.

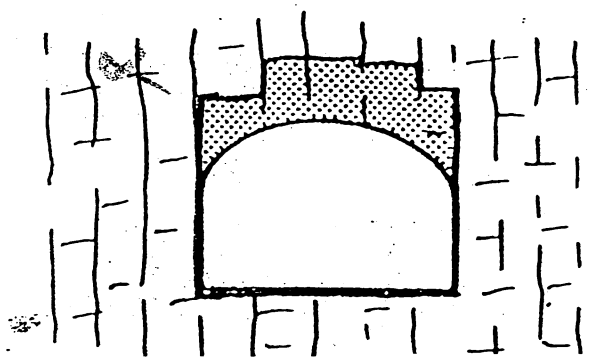
تشکیل درزه ها به صورت دسته هائی موازی یکدیگر و با زوایای ثابت نسبت به هم، معمولترین شکل درزه ها می باشد. این درزه ها ایجاد بلوکهائی مشابه بلوکهای نشان داده شده، می کنند که اگر در وضعیتی مشابه شکل قرار گیرند از جهت رانش این بلوکها به داخل فضای حفر شده، خطر قابل ملاحظه ای بهمراه دارند.



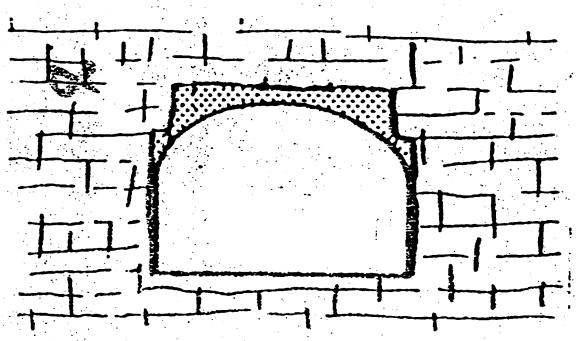
در جائی که دسته درزه ها در جهت صفحات اصلی ضعیفشان به صورت مایل قرار گرفته اند، امکان لغزیدن بلوکهای تشکیل شده به داخل فضای حفر شده وجود دارد. این وضعیت می تواند موجب ناپایداری عمده ای در یک جانب یا در بالای فضای حفر شده گردد. عامل اصلی در این شکل از ناپایداری نیروی وزن (بلوک) است.



در جائی که به طور عمده لایه بندی قائم وجود داشته باشد، دسته درزه هائی توانند وضعیتی به وجود بیاورند که بلوکها بسهولت جدا شوند و به داخل فضای حفر شده، سقوط کنند. چنین وضعیتهائی ایجاب می کند که توجه خاصی به نگهداری موقت مؤثر، که قبل از بروز خطر ناشی از ناپایداری شود.



وضعیتی که به طور معمول در رسوبات با لایه بندی افقی با آن روبرو هستیم این است که صفحات لایه بندی ضعیف و درزه عمدتاً را تحت زوایای تقریباً قائم قطع می کنند. در نتیجه، جدائی سنگ به شکل قطعه ای مکعب یا ورقه ای موجب بهن و صاف شدن سقف فضای حفر شده ای شود که میزان این پهن و صاف شدگی به ضخامت لایه ها و نزدیکی های کلی سقف آنها بستگی دارد.



شکل ۳-۳ : به تصویر کشیدن تأثیر درزه های سنگ بر پایداری تونلهای حفر شده

برخی از پروژه های تونلسازی مشکل وجود آبهای زیرزمینی نسبتاً گرم (بیش از ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی گراد) میباشد که میتواند موجب آلوده شدن شرایط زیست محیطی داخل تونل شوند، و تجربه کرده اند. وجود چنین آبهائی را میتوان در جریان مرحله مطالعه و بررسی ساختگاه تخمین زد.

از آنجائیکه گزارشهای محتوی آبهای زیرزمینی ممکن است بر پروژه تونلسازی تأثیر بگذارند، Wahlstrom توجه را به این موضوع معطوف نموده است چنین گزارشهائی در صورت حرکت آبهای زیرزمینی و همراه با آن ذرات سنگها عبور می کنند و آنها را تحت تأثیر قرار می دهند.

وضعیت زمینهای آماسی و مچاله شونده - زمینهای مچاله شونده مصالح سنگی ضعیف و پلاستیکی اطلاق می شوند که تحت تأثیر تنش و بر اثر گرادیان فشار تنش اطراف فضای تونل، به داخل فضای حفر شده حرکت می کنند. در زمینهای آماسی، سنگ اطراف تونل بر اثر تغییر حجم ناشی از جذب یا دفع آب مصالح سنگی، به داخل تونل حرکت می کند.

در شکل ۳-٤ جنبه هائی از رفتار زمینهای آماسی و مچاله شونده در ارتباط با فضاهای زیرزمینی تصویر کشیده شده است.

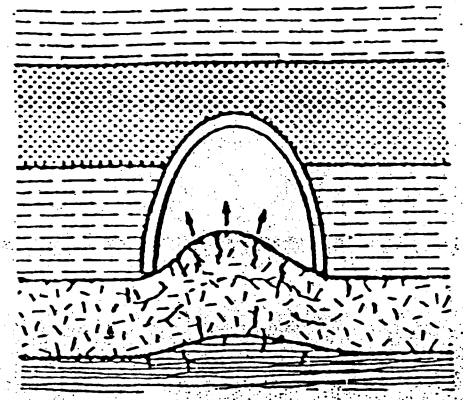
تأثیر مچاله شوندگی فوراً در جریان حفر آشکار می شود و بر جبهه کار تونل اثر می گذارد[1] ولی زمینهای آماسی برعکس زمینهای مچاله شونده، به آهستگی و کندتر تأثیر می گذارند و ممکن است تا وقوع یک تغییر شکل قابل ملاحظه [illegible] مچاله شوند. مکانیزم زمینهای مچاله شونده به پدیدهٔ تنش تغییر شکل مربوط است و با استعاده از سیستمهای نگهداری مناسب قابل کنترل می باشد. سنگهای پلاستیک[2] و نیمه پلاستیک[3] که به تغییر شکل و گسیختگی تحت تأثیر سطوح تنش نسبتاً پائین حساس می باشند، احتمالاً رفتار مچاله شوندگی از خود نشان می دهند. سنگهای عمده از این نوع عبارتند از: رفتار مچاله شوندگی، تکلیه و گلهای آماسی خمیرمانند خود را بروز می دهند. مواد خرد شده رس گونه، سنگهای گل سنگی[4]، گل سنگها[5] و سنگهای شدیداً آلتره (دگرسان) شده پیروکلاستیک[6] و انواع سنگها نیز بطور کلی انتظار می رود که خواص آماسی یا نورمی شدیدی از خود نشان دهند.

1-face ; 2-plastic ; 3-semi-plastic , 4-claystone ;
5-mudstone ; 6-pyroclastic (آذرآواری)

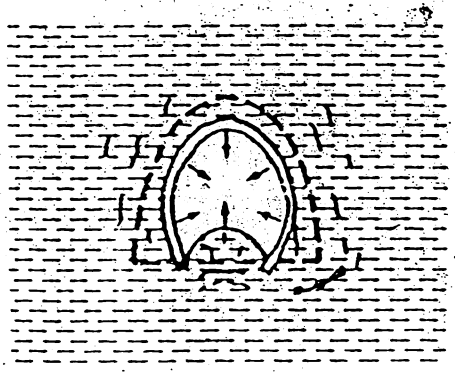
برآمدگی[1] کف پدیده‌ای است که عموماً در تونلهای بویژه تونلهای عمیق شده در سنگهای لایه‌ای رسوبی ضعیف اتفاق می‌افتد. براثر برآمدگی کف، اغلب مسائل زیر بروز می‌کند:

۱- بستر سنگی کف تونل تضعیف و ضعیف علاوه بر قابلیت وارد آوردن فشار براثر هم فرو رفتن و سائل نگهداری و ضعیف کردن تونل تحت تأثیر آب، به تغییر شکل حساس هستند.

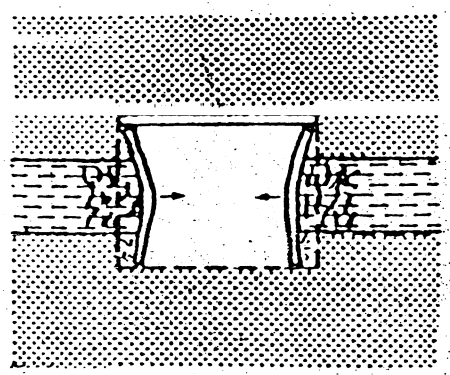
۲- هم آمدگی[2] فضای حفر شده براثر بالا آمدن کف ضعیف از حجم عمده خط همگرایی مقاومت را نشان می‌دهد.



برآمدگی یا بالا آمدن جانبی اطراف فضای حفر شده کج شدگی کلی سیستم نگهداری را موجب می‌شود و اغلب باعث وارد آمدن خسارت به وسائل نگهداری در جاهای خاص در اطراف فضا می‌گردد. علاوه براین هم آمدگی زمین می‌تواند در اطراف وسائل نگهداری فولادی (که معمولاً قوسی شکل هستند) انحناء بیفتد.



تأثیرات زمینهای آماسی و بالا آمدن بر روی تونلها با سطح مقطع چهارگوش به صورت خمش[3] عمده در قسمتهای از وسائل نگهداری واقع در سقف و کف تونل و تسلیم دادن[4] اجزای واقع در دیواره تونل بروز می‌کند. هم شدن[5] کلی ماههای نگهداری گاه می‌تواند از ناپایدار شدن ناشی شود، بویژه وقتی که درزه‌ها در جریان فرآیند تغییر شکل دچار پیچش، خمش یا برش می‌شوند.



وقتی که کل لایه‌های سنگ به تنش برشی یا آب در بین لایه‌هائی که تونل [illegible] تنش می‌تواند موجب هم آمدن تونل و وارد آوردن خسارات موضعی به قاب نگهداری گردد. این شکل هم آمدگی موضعی می‌تواند باعث شکستگی قابل ملاحظه سیستم نگهداری تونل گردد.

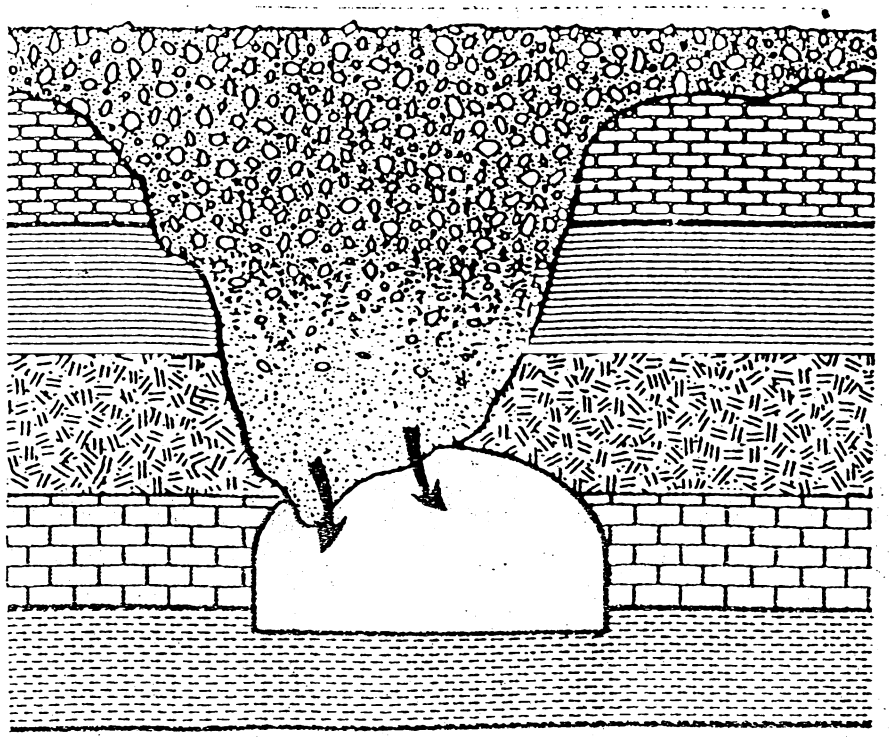
شکل ۳-۴ : حبابهائی از رفتار زمینهای آماسی و مچاله شونده در ارتباط با فضاهای تونل حفر شده

1-heaving ; 2-extrusion ; 3-bending [illegible]

رفتار آماسی حاکی از حساسیت سنگ نسبت به وجود آب است. یک آزمایش ساده برای تعیین آماسی بودن سنگ این است که یک قطعهٔ سنگ را در ظرف آبی انداخته و رفتار آن نسبی بر وارفتن[1] یا عدم تغییر آن را مشاهده نمائیم. بعضی از گل سنگها نسبتاً سریع وا می روند و افزایش حجمی بیش از ۲۵٪ می یابند و فشار تورمی بالای ۵،۷۵ بار (bar) ایجاد می کنند.

زمینهای جریانی یا روان شونده[2] — در جائی که زمینها قابلیت جریان یافتن خطوط آزاد را داشته باشند، مثلاً در زمینهای ماسه‌ای فاقد تماسک، مشکلات خاصی در زمینهٔ نگهداری و کنترل زمین بروز می کند. حفر تونل در زمینهای جریانی فاقد آب مانند مناطق خشک و گرم باز زمینهای سست فاقد استحکام است. بهرحال، بطور کلی زمینهای جریانی از آب اشباع هستند و وجود آب می تواند این زمینها را وقتی که براثر فعالیتهای تونلسازی وضعیتشان به هم می خورد، تحریک به جریان یافتگی و روان شدن نماید.

در شکل ۳-۵ حالت معمول جریان یافتن یا رانش[3] در تونلی که در زیر مسیر یک رودخانهٔ قدیمی حاوی مواد فاقد تراکم و استحکام نظیر شن و ماسه حفر شده، نشان داده شده است. این نوع مواد وقتی در چنین وضعیتی قرار گرفته باشند، معمولاً اشباع از آب هستند.



شکل ۳-۵ : شکل معمول رانش در تونل واقع در زیر مسیر یک رودخانهٔ قدیمی حاوی مواد فاقد تراکم و در یک حالت اشباع

1-running ground ; 2- inrush

ایجاد حفره در بالای تونلهائی که در لایه های فاقد تراکم و اشباع از آب حفر شده می تواند در مراحل بعد و گسترش حفره ایجاد شده خطر به بروز شرایطی مشابه شرایط رخنه‌ای برساند. یک مثال در مورد چنین پدیده‌ای در شکل ۲۰-۶ به تصویر کشیده شده است. در این شکل مراحل تبدیل و گسترش یک حفره به یک فرورفتگی دهانه‌ای نشان داده شده است که در نهایت به یک لایه آبدار رسیده است.

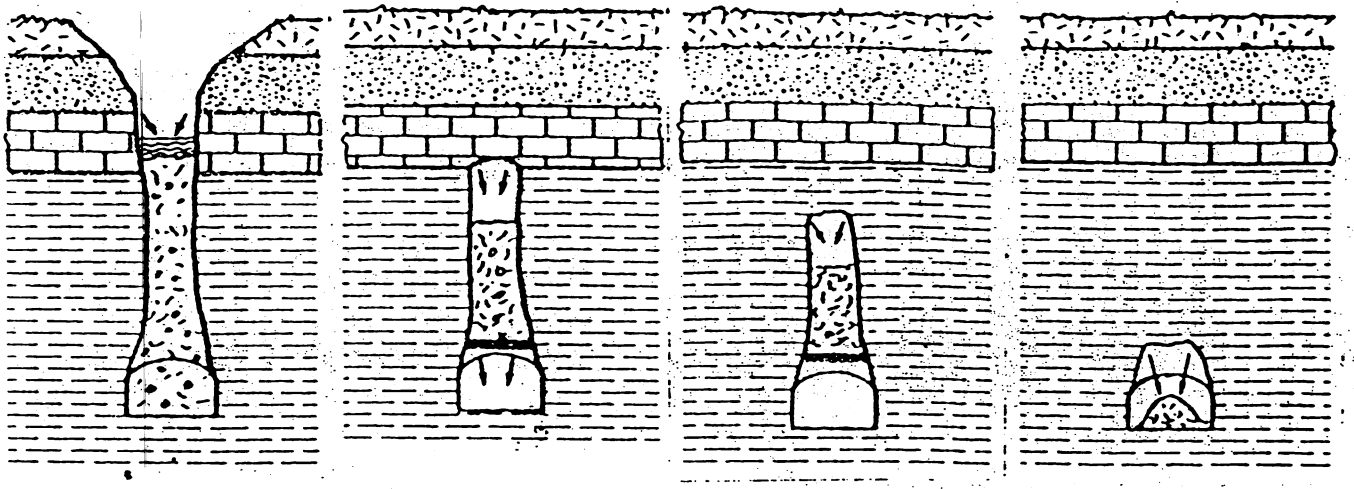
گازهای موجود در تونلها - Wahlstrom توجه را بر گازهای طبیعی موجود در تونلها معطوف داشته است و آنها را شرح زیر فهرست نموده است: دی اکسید کربن، متان، دی اکسید گوگرد، سولفید هیدروژن و بندرت هیدروژن. وی اظهار می دارد که CO_2 در جریان فرآیند اکسیداسیون مواد حاوی کربن تولید می شود، ولی می توان وجود آنها را در ارتباط با آبهای گرم دارای منشاء عمیق و جاهائی که فعالیتهای آتشفشانی جدید اتفاق افتاده است نیز دانست.

هرچند متان به عنوان گاز مخصوص کانسارهای ذغالسنگ و نفت شناخته شده و در آنها فراوان است، والستروم اظهار می دارد که دیگر محیطهای رسوبی نیز حاوی مقادیر قابل ملاحظه‌ای متان هستند که از تجزیه مواد آلی حاصل شده اند. وی اضافه می کند که متان می تواند در مسافتهای زیادی هم در جوانب و هم به سمت بالا حرکت کند و در لایه‌های متخلخل تجمع پیدا نماید. در جریان حفر تونل بزرگ آپنین[1] مقادیر زیادی گاز متان منقطع شده و منجر به انفجار و متعاقب آن آتش سوزی گردید.

دی اکسید گوگرد بر اثر اکسیداسیون سولفورها یا سولفیدها تولید می شود و در کانسارهای رسوبی و - [illegible] حاوی مقادیر زیادی سولفید [illegible] سولفید هیدروژن [illegible] حاوی [illegible] است و می تواند از آبهای گرمابی با منشاء عمیق منقطع شود.

Szechy در مورد وجود گاز در تونلها اشاره کرده و به انفجار گاز متان در تونل بزرگ آپنین اشاره نموده است. او همچنین اضافه می کند که متان می تواند در سنگهای دولومیتی و آهکی گیر بیفتد و امکان مواجهه با متان در چنین سنگهائی نیز وجود دارد و اظهار می دارد که در شرایط زمین شناسی خاصی که لایه نفوذ ناپذیری مانند رس وجود داشته باشد باعث مهاجرت گاز در جوانب از طریق درزه ها در سنگهای مجاور و به فاصله زیاد می شود.

1- Great Appennine Tunnel



شکل ۳-۶ - تأثیر گسترش فرورفتگی تا رسیدن به یک لایه آبدار که موجب رانش و بروز شرایط زمینهای جریانی می‌شود.

مرحله ۱ : در شکل ریزش بزرگ زمین که اتفاق افتاده، نشان داده شده است.

مرحله ۲ : به منظور جلوگیری از ریزش سقف و کنترل زمین فضای حفر شده، نگهداری موقت نصب شده است ولی همانطور که در شکل نشان داده شده، پیشروی فرورفتگی دودکشی شکل به سمت بالا ادامه دارد، فرورفتگی دودکشی به طور طبیعی بایستی تحت تأثیر خاصیت افزایش حجم سنگهای خرد شده متوقف و مسدود شود، ولی همانگونه که در شکل نشان داده شده، ممکن است تا رسیدن به یک لایهٔ آبدار قبل از متوقف شدن فرورفتگی ادامه یابد.

مرحله ۳ : شرایط نشان داده شده در اینجا گویای رسیدن [redacted] است. این امر موجب می‌شود که مواد خرد شدهٔ داخل دودکش از آب اشباع شوند و احتمالاً تحت فشار هیدروستاتیک حرکت کنند، در نتیجه، فشار افزایش یافته آب بر روی سیستم نگهداری موقت اعمال می‌شود که می‌تواند موجب رانش و در نتیجه شکستن وسیلهٔ نگهداری گردد.

مرحله ۴ : در مواردی که یک رانش اتفاق افتاده و لایه آبدار [redacted]

دمای سنگ - امکان انجام عملیات تونلسازی در سنگهائی با شرایط نسبتاً دارای دمای بالا وجود دارد. مثالی در این مورد تونل سیمپلون[1] است که وقتی در اعماق ۲۱۳۶ متری زیر سطح زمین رسید با آبهای دارای دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد مواجه گردید. گرمای سنگها و آبهائی که در جریان عملیات تونلسازی با آن مواجه می‌شویم از منابع متعددی نظیر گرمای پوسته‌ای زمین[2] و سرد شدن مواد درون، انتقال گرما در تسمتهای عمیق به آبهای زیرزمینی،

1- Simplon Tunnel ; 2- Earth's crustal heat

و محلولهای گرمابی آتشفشانی و رادیواکتیو دارد مشاهده گرفته اند. بطور کلی چشمه های آب گرم فعال به عنوان شاخصهای مفیدی برای شناسائی هرگونه ناهنجاری گرمائی زمین و در مسیری که تونلی قرار است حفر شود، تشخیص داده شده اند. گمانه های اکتشافی قادر به تأمین اطلاعاتی در مورد دمای سنگها در افقی که قرار است تونل در آن حفر شود، هستند و بدین ترتیب می توان در مورد شیب زمین گرمائی (1) محل برآورد و بررسیهائی به عمل آورد.

Szechy دمای سنگ از جنبه ارتباط با تونلها در اعماق مختلف پوسته زمین مورد بحث قرارداده و اظهار داشته است که بسته به شرایط خارجی نظیر موقعیت جغرافیائی، تأثیرات آب و هوائی و فصلی و غیره، دماهای گوناگونی می تواند وجود داشته باشد. نکته یا جنبه مهمی که Szechy بدان اشاره کرده این است که اغلب دمای سنگها در جائی که کانسارهای کانی وجود دارند، افزایش می یابد.

آبهای حاصل از بارندگی می توانند باعث تغییر قابل ملاحظه ای در دمای سنگها گردند. وی به تجاربی که در جریان احداث تونل بزرگ آپنین اشاره کرده و مواجهه با یک افزایش ناگهانی دما را در موقعیتی که سازه در یک لایه شیلی - رسی قرار گرفته بود را به عنوان مثال ذکر نموده است. در این موقعیت دما از $27^{\circ}C$ به طور ناگهانی به $45^{\circ}C$ و به طور تصاعدی به $63^{\circ}C$ افزایش یافته بود و در این چنین شرایط موقعیتی بود که گازمتان نیز به ناگهان آزاد شده بود.

شیب زمین گرمائی می تواند به وضوح متفاوت باشد و این به تاریخ زمین شناسی و پایداری تکتونیکی نسبی ناحیه مورد نظر بستگی دارد.

Wahlstrom اظهار می دارد که دمای سنگها در اعماق ۲۰ تا ۲۵ متری به طور معمول بین ۴ تا ۱۰ درجه سانتیگراد می باشد. پس از این عمق، در شرایط و نواحی پایدار زمین شناسی به ازای هر ۶۰ تا ۸۰ متر حدود $1^{\circ}C$ دما افزایش می یابد و در نواحی و موقعیتهائی که فعالیتهای آتشفشانی وجود داشته است یا وجود دارد به ازای هر ۱۰ تا ۵ متر $1^{\circ}C$ از دمای سنگها افزوده می شود. دمای آبهای گرمائی ضرورتاً با شیب زمین گرمائی انطباق ندارد.

مشکلات خاصی که در جریان تونلسازی بروز می کند: انتخاب ساختگاه (1) و اندازه گیریها و اقدامات اصلاحی (2) یا تمهیدات

زمین شناسی

1- site selection ; 2- remedial measures

عملیات تونلسازی با دامنه گسترده‌ای از شرایط زمین‌شناسی مواجه می‌شود. این گستردگی شرایط زمین‌شناسی هم در خارج از موقعیت تونل و هم در محدوده بلافصل فضای تونل اتفاق می‌افتد. در این قسمت توجه بر مشکلات خاص زمین‌شناسی متمرکز می‌شود. نظراتی در مورد شیوه‌های خاص طراحی و احداث که پذیرفته شده است، ارائه می‌گردد و در بعضی موارد که کارهای اصلاحی یا اقدامات جبرانی برای کاهش یا جلوگیری ساختن اثرات چنین مشکلاتی لازم باشد، مطرح می‌گردد.

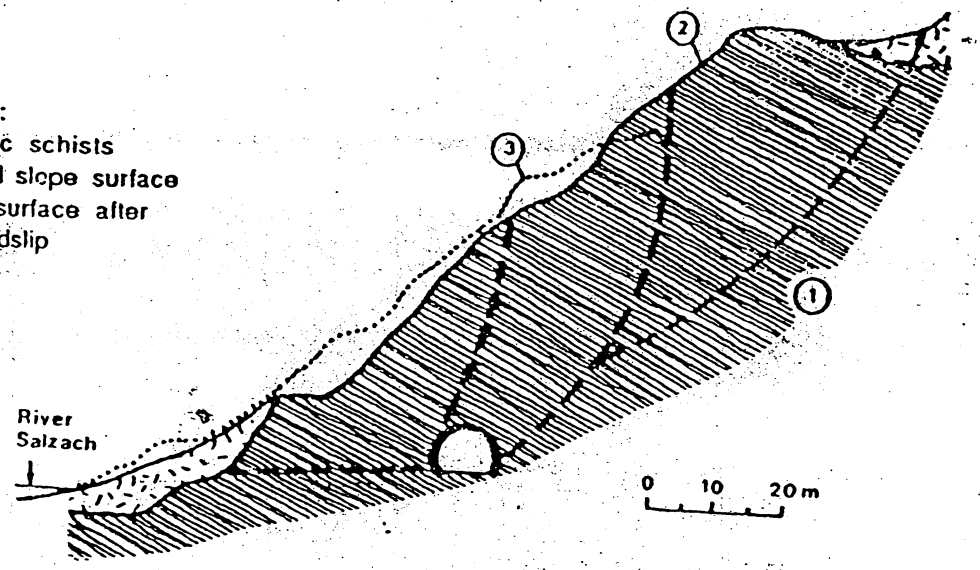
شیب‌های پایدار سطح زمین - برخی از پروژه‌های تونلسازی بدلیل شیب‌دار بودن سطح زمینی که تونل در زیر آن قرار گرفته است، مواجه با ناپایداری می‌باشد. چنین زمینهائی بدون این که هیچ گونه آشفتگی بواسطه احداث تونل در آنها ایجاد شود، ذاتاً ناپایدار هستند. با این وجود، در برخی از موقعیتها، تونل ممکن است در شرایط پایداری دیواره شیبدار سطحی تغییراتی ایجاد نماید. شرایط آبهای زیر زمینی نیز ممکن است تغییر کند. حفر تونل در نزدیکی منطقه‌ای که پتانسیل زمین لغزش یا زمین رانش[1] دارد، می‌تواند اثر تضعیف کنندگی عمده‌ای داشته باشد.

در شکل ۳ - ۷ زمین رانش اتفاق افتاده در تونل اونترشتین[2] به تصویر کشیده شده است که به نظر می‌رسد در صورت تداوم زمین لغزش، تونل نیز در سطح لغزش قرار گیرد. به نظر می‌رسد حفر تونل در این موقعیت موجب تضعیف پایداری دیواره شیبدار شده باشد.

شرایط آب شناختی زمین و تأثیر بر احداث - طبق گزارشهای احداث تونلهای راه آهن ... شرایط بسیار سخت زمین‌شناسی شده است.

لی[3] اظهار داشته است که اگر موقعیت تونل در زمینی باشد که مناسبترین وضعیت ساختاری از نظر زمین شناسی و کمترین خطرات از جهت مشکلات زمین‌شناسی برای آن پیش‌بینی شده است، ولی در عمل با مشکلاتی از این بابت روبرو گردد، باید هزینه زیادی برای مقابله با آنها پرداخت گردد. جدول ۳-۲ مختصری از تاریخچه موارد قبلی از تونلهای راه آهن چین که از جهت به حداقل رساندن تأثیرات ناشی از مشکلات زمین‌شناسی خاص مستلزم ملاحظات ویژه بوده، آورده شده است.

1- landslip ; 2- Unterstein Tunnel ; 3- Li



شکل ۳-۷ : ناپایداری دیواره شیبدار مربوط به تونل اونتراشتین

مشخصات کارستها : گسترش کارستها یکی از بارزه های اختلال در سنگ آهک است و به سنگهای کربناته مربوط می باشد و ایجاد حفره ها و چاله‌هائی (۱) در این سنگها می نماید که آب می تواند از میان آنها جریان یابد. مشکلات ناشی از کارستها به صورت گسترده ای در چین بوتزه در استانهای جنوب غربی آن وجود دارد و طبق گزارشهای ما این کارستها در سنگ آهکهای بلودین و به میزان کمتری در سنگ آهکهای دولومیتی و دولومیت و به تعداد بسیار کمتر در مارن تشکیل شده اند. ساختار زمین شناختی عامل کنترل کننده مهمی در گسترش کارستها در بوتزه می باشد در مناطق گسله و مناطق خرد شده و کشیدگی که جریان آب امکان باز شدن درزه ها و صفحات گسل را میسر می سازد، امکان مواجه شدن با کارستها افزایش می یابد. در مناطق برشی اغلب امکان تشکیل کارستها وجود دارد. محورهای تاقدیسها نیز مناطق مستعدی برای تشکیل کارستها و مسیر چاله‌ها می باشند. ساختارهای ناودیسی می توانند محل مناسبی برای تشکیل حفره های افقی باشند که این حفره ها به عنوان مسیری برای عبور آبهای زیرزمینی عمل می نمایند.

ما خطرات ناودیسها را در ذخیره سازی آب گوشزد کرده و اظهار داشته ایم که ساختارهای تاقدیسی امکان آبگیری از چنین ساختارهائی را میسر می سازند. وی همچنین اظهار می دارد که تجربه در چین نشان می دهد که گسلهای (۲) نرمال و امتداد لغزی که با برشهای گسله و مواد خرد شده (gouge) پر شده اند، اغلب خاصیتهای ناتراوائی از خود نشان می دهند، در حالی که گسلهای عادی و کششی بدون پرشدگی بین گسلی اجازه عبور و انتقال آب در حد بسیار زیاد را می دهند و مسیرهائی برای عبور آب تشکیل می دهند.

۱- sinkhole ... impermeable

جدول ۳-۲ : جنبه‌های آب شناختی تونلهای راه آهن درچین : مختصری ازمشکلات زمین شناسی خاصی که ازجنبهٔ طراحی ، تعیین مسیر واحداث مستلزم ملاحظات ویژه بوده است .

تونل	مشکلات زمین شناسی اصلی	نظرات واقدامات اصلاحی
Leandi	مناطق بزرگ گسله ، دیواره های سنگی شیبدار ناپایدار ، لغزش وسقوط سنگها	به منظور تأمین مسیری ایمن وقابل اعتماد واجتناب از مناطق ناپایدار زمین شناسی که بخشی از آن را دره های رودخانه‌ای درطول مسیر طراحی شدهٔ راه آهن تشکیل می دادند ، تونل (۴۶۰۳ متر طول) حفر شد .
Funbi	جریان شدید آب از درزه‌های شدت گسل	به منظور اجتناب از برخورد با مناطق گسله اصلی ، تونل (۴۲۷۳ متر طول) حفر شد ، ولی با این وجود تونل با گسلها برخورد داشت . تبن کاری با قالبسازی برجا در منطقهٔ گسل ضروری بود .
Shanshuijen	منطقهٔ کارستی : حفرات ایجاد شده براثر انحلال سنگ آهک و شواهد گود رفتگی های سطحی	انحراف تونل به منظور جلوگیری از درنیک راستا قرار گرفتن تونل با حفرات بزرگی که براثر انحلال به وجود آمده بودند و بوضوح زیاد در طول مرز بین سنگهای قابل انحلال و غیر قابل انحلال وجود داشتند . تجلسب نشان داد که گسترش کارستها در امتداد لایه بندی بود ، ودر نتیجه امتداد تونل در سرتاسر منطقه حتی الامکان برروی خطی نزدیک به Strike بود .
Shenzeihe	منطقهٔ کارستی : سنگهای کربناتهٔ تریاس . بررسی ومطالعات حفاری شواهدی مبنی برگسترس عمدهٔ کارستها را نشان نداده بود ، ولی درجریان حفر با حفرات زیادی انحلالی مواجه شدند که کار حفر را تکمیل حاوی حفرات انحلالی به مناطق خرد شدهٔ گسله مربوط نمودند .	وسائل نگهداری خاصی از جمله تبن ریزی برجا ضروری بود .
Bashienshih	جریان شدید آب از گسل نزدیک به دهانهٔ تونل به میزان ۶۰ تا ۷۰ میلیون لیتر در روز ، دهانهٔ شمالی گسل را شکل داد و برخی از گسلها به داخل تونل امتداد یافتند . بارگذاری شدید و ناگهانی برروی وسایل نگهداری ، موجب خرابی وسائل نگهداری و وارد آمدن خسارت به برروی تونل گردید .	حفر تونل (۲۳۴۰ متر طول) موازی با تونل اصلی به منظور آگاهی و شناسائی بیشتر شرایط زمین شناسی انجام شد . تجربه نشان داد که گسلها را با بالاترین حداقل به منظور کمترین مواجهه با مناطق وزمینهای سخت ، باروباهای تند قطع کرد .

ادامه جدول ۳-۲

تونل	مشکلات زمین‌شناسی اصلی	نظرات و اقدامات اصلاحی
Samuldou	جریان شدید آب: تونل (۶ کیلومتر طول) از محدوده‌های تاقدیس و ناودیس عبور می‌کند و با خطوط گسله و درزه دار مواجه می‌شود. شدت جریان تا بالای ۳۷ میلیون لیتر در روز رسید.	محلهائی که شدت جریان آب عمده بود به قابهای فولادی نیاز داشت. به منظور کاهش فشار و میزان شدت جریان آب یک تونل هادی در طول حفر شد. گانه‌های کاهش دهنده فشار و تزریق کودهای ضروری بود.
Lousoi	فشار یا هجوم شدید آب به پوشش تونل	این ۴۷۶ متر تونل از ماسه سنگ، شیل و گل سنگ همراه با لایه‌های متعدد غالسنگ عبور می‌کند، در ضمن پیریت، ژیپس و سنگهای کربناته نیز وجود دارد. زمینهای گسل خورده و سنگهای بسیار هوازده موجب بالا آمدن جریان شدید آب از پشت پوشش تونل می‌شوند. پوشش دچار خوردگی قابل توجهی فقط در یک سال پس از احداث شد و بمرور زمان ترک دار و شل شد و فرو ریخت. واکنشها سولفاته و اسیدی بود.
Ludusha	خوردگی پوشش تونل بر اثر محتوای نمکی، گچی و مقداری پیریت لایه	پوشش تونل در معرض تراوش آبهای حاوی سولفات و باز (سودا) قرار گرفته بود. اقدام اصلاحی جاگزینی پوشش با استفاده از شن و ماسه‌های مخصوص و بکارگیری آبهای غیر آلوده در جریان اختلاط بتن و استفاده از سیمان ضد سولفات و مالچهای مناسب برای کاهش تخلخل بود.
Gajialen	خرابی پوشش در ارتباط با تأثیر سولفات و تغییر شکل آهسته در رابطه با فشارهای ناشی از آماس. از آنجائیکه احداث تونل تکمیل شده بود، برآمدگی کف در طول ۱۰ سال بعد از آن به ۶۰۰ mm رسیده بود.	تونل در تناوبی از دولومیت، سنگ آهک دولومیتی و لایه‌های انیدریتی قرار گرفته است. بخشهائی آزمایشگاهی بر روی انیدریت فشار آماسی برابر ۰/۳۴ MPa را بعد از ۲۳۰۰ ساعت نشان می‌داد. اقدامات اصلاحی شامل قرار دادن یک لایه بتن مسلح بر روی سنگ کف تونل بود که توسط پیچ سنگها با پوشش تمام محیط تونل که از بتن بود، جفت گردیده بود.

رفتار سنگهای آماسی و تأثیر بر طراحی تونل

بروز مشکلات زمینهای آماسی از جمله مهمترین مشکلات فضاهای زیرزمینی هم در جریان احداث و هم پس از اتمام و تکمیل پروژه می باشد. Einstein و Bischoff بالا آمدگیهای بالای ۲۵۰ میلیمتر در سال را گزارش کرده اند، و حتی در جاهائی که بمرور زمان آماس کاهش یافته است، سرعت بالا آمدگی ۵ تا ۱۰ میلیمتر در سال امری عادی گفته اند می باشد، در این صورت برای تونلی با قدمت ۷۵ تا ۱۰۰ سال مجموع بالا آمدگی به حدود یک متر می رسد. آنها مشکلات ناشی از این بالا آمدگیها تأکید کرده اند، زیرا آماده کردن و حفر مجدد ورودیها الزامی است، در عین حال در برخی از موقعیتها به منظور کاهش بالا آمدگی و رساندن آن به یک حد قابل قبولی لازم است که قوسهای منظوری با ضخامت ۱ تا ۲ متر به کار گرفته شود. بهرحال، آماس در جریان احداث می تواند به ۱۰ میلیمتر یا بیشتر در روز برسد و موجب خم شدن قابهای فولادی و وارد آمدن خسارت به کانالها و لوله های آنکشی گردد.

پدیدهٔ آماس - انیشتین و بیشاف آماس را به تغییرات تنشها، افزایش محتوای آب و یا ترکیبی از این دو مربوط می دانند که موجب افزایش حجم سنگ و خاک حواره تونلها در ارتباط با زمان می گردند. حفر تونل به طور طبیعی موجب تغییر تنش می شود و افزایش حجم سنگهای پیرامون تونل در ارتباط با زمان یک نتیجه طبیعی می باشد. بعضی از سنگها قابلیت رفع یا جذب آب دارند که با توجه به میزان تغییر تنش حول حفره می تواند تشدید شود و در نتیجه در ارتباط با زمان موجب افزایش حجم گردد.

شرایط زمینهائی که اغلب در تونلهای سنگی رفتار آماسی از خود نشان می دهند عبارتند از:

۱- زمینهائی که بر اثر تغییرات تنش شل و سست شده اند.

[illegible] (۱) [illegible] (۲) [illegible] (۳)

هستند.

۳- شیلها، گل سنگها و مارنهای حاوی مواد دارای خاصیت آماسی نظیر مونت موریلونیت و ایلیت

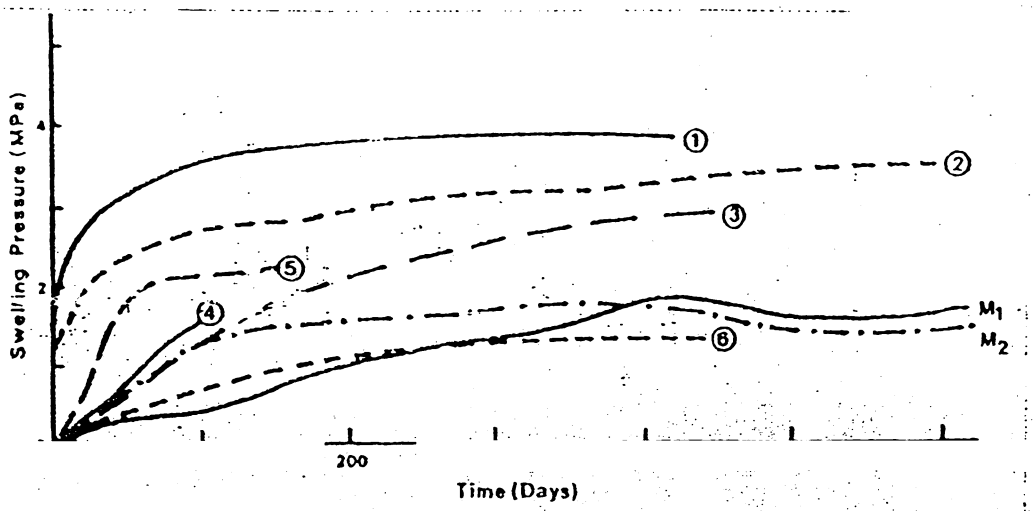
۴- انیدریت که بر اثر هیدراسیون و تبدیل به ژیپس (گچ) آماس می کند. تحت شرایط آزمایشگاهی افزایش حجم [illegible] می رسد

۵- مواد خرد شدهٔ گسلی، دیواره های پرشده و مواد پرکننده درزه ها و سنگهای دگرسان شده که می توانند بر اثر هوازدگی - نخبندانی و[illegible] آماس کنند.

1-montmorillonite ; 2-illite ; 3-Kdolinite ; 4-horst action

رفتار آماسی انهیدریت - مارن (آهکرسی) : اینستین و بوشکف توجه را بر تجارب تونلهای حفر شده در جنوب آلمان و سوئیس معطوف داشته اند. این تونلها در میان سنگهای انهیدریتی که سطح سنگ به قطر خشک مدرسه حفر شده اند. اظهار گردیده که آب از درون توده سنگ نشأت می گیرد. آماس یکی از ویژگیهای بارز و قوی این سنگهای با

شکل ۳ - ۸ مشخصات فشار آماس برحسب زمان که مربوط به تونل Belchen است که در تشکیلات سنگی انهیدریتی - مارنی حفر شده است، نشان می دهد. در این تشکیلات، انهیدریت به صورت رگه های چند میلیمتری یا سانتیمتری در میان یک بستر مارنی وجود دارد و به نظر می رسد که انهیدریت در حال تبدیل به ژیپس می باشد. این فرآیند یک فرآیند در زنگی طبیعی[1] است که در نتیجه آن میزان بستن آب و به تبع میزان فشار آماس را محدود می کند. شکل ۳ - ۸ بوضوح نشان می دهد که فشار اندازه گیری شده در سر زمین به میزان زیادی کمتر از فشار اندازه گیری شده در آزمایشگاه بر روی نمونه های گرفته شده می باشد. بهرحال، سنگهای انهیدریتی - مارنی سر زمین، فشار آماسی نسبتاً کمتری در شرایط حجم ثابت ایجاد می کنند که مؤید این مطلب است که دسترسی آب به انهیدریت بسیار کمتر بوده است و این در مقایسه با نمونه های بکر گرفته شده ای است که دسترسی آب به آنها آسانتر و بیشتر بوده است.



شکل ۳ - ۸ : ارتباط زمان - فشار آماس برای سنگهای انهیدریتی - مارنی مربوط به تونل بلچن

توضیحات: الف - منحنی های ۱ تا ۳ نتایج بدست آمده از نمونه های بکر گرفته شده در آزمایشگاه در شرایط حجم ثابت است.
ب - منحنی ۵ تا ۶ نتایج حاصل از آزمایشهای انجام گرفته بر روی نمونه های زمین در شرایط حجم ثابت است.
ج - M_1 و M_2 متوسط اندازه گیریهای سر زمین را نشان می دهند.

1- natural sealing process

رفتار آماسی سنگ در تونلها - اینستین و بوشکف اظهار می دارند که بیشترین جابجائی ناشی از آماس بصورت بالا آمدگی کف تونل بروز می کند که اغلب با محاسبات مسیر تونل پیش بینی می شود. پایین ترین قسمت پوشش دیواره همراه است.

آنها توصیه های زیر را برای کاهش تأثیرات آماس در رابطه با تونلها ارائه داده اند:

۱- پیمایش قوسی شکل معکوس[1] - یک وسیله (نگهداری) قوسی شکل معکوس قابلیت کاستن از تأثیرات آماس و جلوگیری از بالا آمدن کف را دارد و شکل قوسی بهتر از وسیله (نگهداری) تخت یا افقی عمل می کند و مؤثرتر است.

۲- ورقه های مقاوم[2] - این ورقه ها باید به سنگهای واقع در زیر منطقه آماسی اصلی بیچ شوند، ورقه های معکوس فشار آماس را با عمل تنش متقابل کاهش می دهند.

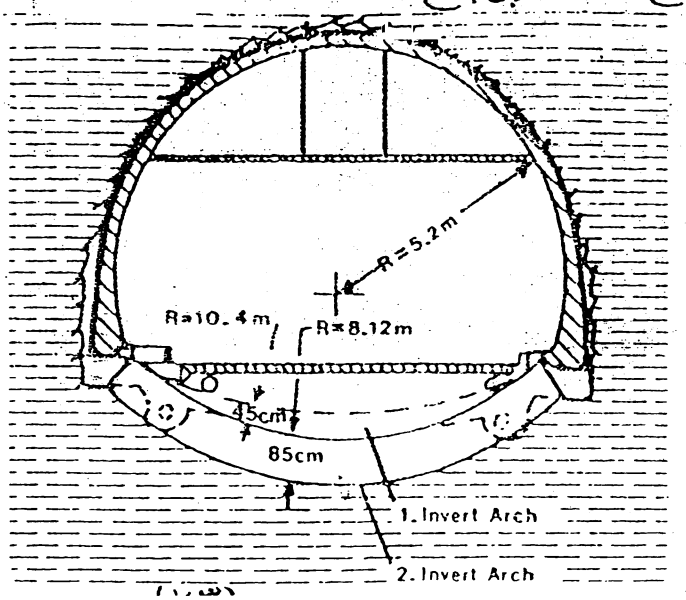
۳- تعویض کردن کف - برای جلوگیری از تأثیر گذاری بالا آمدگی کف بر پوشش پایین ترین قسمتهای دیواره جانبی تونل تمیزکاری و صاف کاری کف تونل، ارزانترین روش است. هرچند این کار در تونلهای معدنی امری معمول است، ولی اغلب اوقات بدلیل مشکلات اجرائی این کار مورد تونلها مطلوب نمی باشد.

۴- پر کردن با مصالح ضعیف یا نگهدارنده های تراکم پذیر[3] - درصورتی که اجازه داده شود مقدار کوچکی تسلیم شدگی کنترل شده اولیه اتفاق افتد، این امر می تواند به کاهش فشار آماسی بالقوه که بر تونل اعمال می شود، کمک کند.

۵- تزریق دوغاب - تزریق دوغاب می تواند در کاهش دسترسی آب به سنگهائی که خاصیت آماسی دارند و بویژه در پر کردن مسیر جریان آب مانند ناپیوستگیها، کمک کنند.

۶- زهکشی یا آبگیری[4] - روشهای مؤثر آبگیری از خطرات سنگهای آماسی که بشدت توسط آب بر میزان تونل تأثیر می گذارند، ممانعت می کنند یا آن خطرات را کاهش می دهند.

شکل ۳-۹ مقطع قائم تونل بلچین با طرح اولیه و وسائل قوسی شکل معکوس نشان می دهد.



تونلهای زیر آبی : جنبه‌ها و بررسیهای مقدماتی زمین‌شناختی

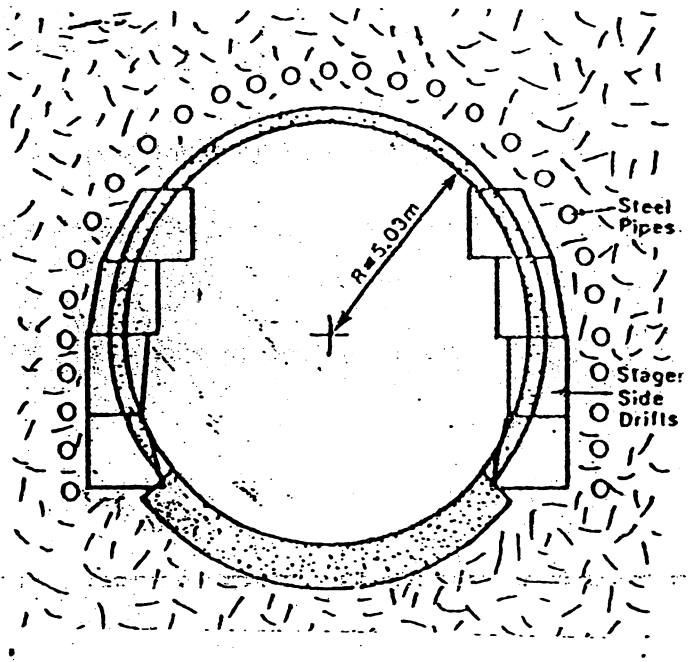
تعدادی از تونلهای زیر آبی تحت شرایط کاملاً متفاوتی احداث شده اند . در اینجا توصیه‌ها و پیشنهاداتی در مورد جنبه‌های زمین‌شناختی خاصی که مستلزم بررسی و توجه ویژه است، ارائه شده است .

احداث تونل زیر دریائی (و رودخانه‌ای) ـ Fujita تاکید زیادی بر اعمال دقت قابل ملاحظه در تونلسازی در زیر دریا موقعی که تونل از مناطق گسله می گذرد، داشته است . در زمانی که زهکشی در زیر چنین تونلهائی باید صورت بگیرد، مشکلات زیادی جهت تعیین میزان آب زیرزمینی وجود دارد . وی به روش "طاق زنی با لوله"[1] (شکل ۳-۱۰) در تونلهای زیر آبی که از مناطق خرد شده گسله می گذرد، اشاره دارد که در این روش لوله‌هائی در چالهای اطراف تونل کار گذاشته می شود . بدین ترتیب جداره های جانبی و سقف تونل تقویت می شود و امر پایدارسازی با تزریق دوغاب تکمیل می گردد . در مثال ارائه شده، عمق دریا ۲۰ متر و ضخامت روباره تونل ۳۰ متر بود . این روش بهسازی زمین بخصوص در منطقه گسله خرد شده را تقویت و پایدار کرد . برای حفر این تونل (سیکان) ابتدا طرفین تونل حفر و جداره‌های اصلی آن بتن گردید، سپس طاق تونل حفر و نگهداری شد و پس از آن عملیات حفر بسمت مرکزی تونل انجام گردید .

اولین تونل زیر آبی ، تونلی بود که در زیر رودخانه تایمز حفر شد و در سال ۱۸۴۳ به اتمام رسید . این تونل یک شاهکار مهندسی بود و بوضوح اهمیت سپرهای[2] تونلسازی در زمان حفر تونل در سازندهای ضعیف، که معمولاً در زیر رودخانه‌ها وجود دارد، را نشان داد . این پروژه مشکلات تونلسازی با پوشش غیر ملکی را نشان داد و نتیجه عدم بکارگیری پوشش کافی، سیلاب در جریان حفر بود .

[illegible] ۱۰۰ خانه ـ در مواجه با سنگهای متخلخل[3] در زیر رودخانه یا دریا، راه حل مناسب برای غلبه بر مشکل، تزریق دوغاب می باشد . Leggett اظهار داشته است که تزریق دوغاب سیمان در مقیاس وسیع، عامل عمده‌ای در تحقق موفقیت آمیز پروژه های تونلسازی زیر آبی، بویژه در سنگهای تجزیه و خرد شده نظیر سنگهائی که در مجاورت گسلها هستند، می باشد .

1- pipe roofing , 2- shield , 3- porous rock



شکل ۳-۱۰ : روش طاق زنی با لوله یکی از روشهای مهسازی زمین است که با موفقیت در تونلهای زیر دریائی در ژاپن به منظور بهتر کردن کنترل زمین و کاهش جریان آب به داخل فضای حفر شده، بکار گرفته شد.
تذکر : قطر چالهای نشان داده شده در تصویر فاقد مقیاس است.

در کتاب مرجع از صفحه ۵۹ تا ۶۳ به بحث در مورد شرایط سنگهای تخریب شده و گسل خورده در زیر رودخانه‌ها پرداخته و مشکلات حفر تونل زیر آبی در چنین شرایطی را در قالب مثالهای متعددی مورد بحث قرار داده است. دانشجویان محترم در صورت نیاز به این موضوع می توانند به کتاب مرجع مراجعه فرمایند.

تونلسازی در زمینهای نرم

تعداد زیادی از تونلها با شرایط زمینهای نرم روبرو می شوند که این شرایط مستلزم بذل توجه به جنبه های خاصی است که انتخاب روش تونلسازی، شکل کنترل زمین و وسایل نگهداری را شامل می شود. توجه بیشتر بر مشکلات زمین شناسی وابسته به تونلسازی در زمینهای نرم که جنبه معمولتری دارند، معطوف شده است.

شرایط زمین : ارزیابی کلی - یک بررسی تفصیلی از جنبه‌های تونلسازی در زمینهای نرم توسط Bartlett مشکلات بر بررسی و مطالعه ساختگاه معطوف بوده است، زیرا در این زمینها [illegible]

قطر کوچک گمانه‌ها موجب بازیابی ضعیف مغزه می گردد. آنها استفاده از گمانه‌های قطر بزرگ (بالای یک متر) را توصیه کرده اند، البته علیرغم مزایای مطرح شده، استفاده از چنین قطرهائی برای گمانه‌ها در پروژه‌های کوچک از جنبه اقتصادی توجیه پذیر نمی باشد. موقعیت گمانه‌ها برای پروژه‌های تونلسازی بایستی به دقت تعیین شود. دقت معادلی نیز برای پر کردن گمانه‌ها لازم است، زیرا ارتباط این گمانه‌ها با تونل آتی می تواند به عنوان راهی برای نشت هوای فشرده [illegible] برای ورود آب از منابع بالاتر از تونل به داخل تونل عمل نماید.

نکته مهمی که توسط آنها بدان اشاره شده این است که زمینهای نرم در حین تونلسازی حرکت می کنند و چوب بستگاری و نصب ستونهای چوبی در جلوگیری از ریزش سینه کار کمک می کند. جابجائیهای وابسته به زمان (خزش) در زمینهای چسبنده اتفاق می افتد، در ضمن مشخصات برخی لایه ها نظیر لایه های ماسه ای و مارنی وقتی در معرض هوا قرار می گیرند، تغییر می نماید. آنها در نتیجه گیری اظهار می دارند که انجام کار اکتشافی پیشتاز در جبهه کار تونل برای آگاهی از خطرات و مشکلاتی در آینده پیش خواهند آمد، لازم و کافی است. حفاری پیشتاز به منظور شناسائی شرایط در جلوی جبهه کار تونل باید بگونه ای تنظیم شود که گذشته از دادن اطلاعات کافی موجب تأخیر در انجام عملیات تونلسازی نگردد.

مشکلات زمین های نرم - وجود قلوه سنگ[1] در تشکیلات رسی و تغییر اندازه این قلوه سنگها مشکلات متعددی در حفر تونل در زمینهای نرم ایجاد می کند. عملیات و شیوه های اجرائی بشدت از تغییر شرایط زمین متأثر هستند. با انجام مطالعه و بررسی دقیق ساختگاه می توان به میزان زیادی در مشخص کردن میزان تغییرات احتمالی شرایط زمین کمک کرد و بدین ترتیب اطلاعات لازم برای انتخاب روش حفر و برآورد پارامترهای اجرائی تونلسازی را به دست آورد.

"فشار منفی منفذی"[2] بر پایداری کوتاه مدت جبهه کارهای تونلی در زمینهای نرم تأثیر می گذارد و در برخی موارد پایداری کوتاه مدت وابسته به آن می باشد. خاکهای ذرهای باعث کاهش فشار منفذی می شوند و زمان پایداری یا ایستائی بلندمدت تری از خود نشان می دهند، البته این عامل در سنگ، عامل مهمی نمی تواند باشد.

بالاست آبدار - بالاستها یا خرده سنگهای آبدار مشکلات را در امر احداث تونل ایجاد می کنند. راه حل عملی برای مقابله با این شرایط pipe jacking است که با موفقیت در چنین شرایطی با پایدارسازی و تقویت مقاطع کار گرفته شده و جریان آب را کاهش داده و در بعضی موارد حذف کرده است.

موفق و پاو یافت تونل : انجماد زمین[4] - زمینهای نرم همچنین می توانند موجب ریزشهای عمده به صورت تخریب در تونلهائی شوند که در چنین زمینهائی حفر می گردد، در این صورت کارهای تعمیراتی و مرمتی خاصی با ضعفهای کلی زمین و مشکلاتی که آب در چنین شرایطی به وجود می آورد، مورد نیازی می باشد.

1- boulder ; 2- negative pore pressure ; 3- tunnel recovery ;
4- ground freezing

درمواردی که درحین حفر تونل درزمینهای نرم با نرمش مواجه می شوند، حجم زیادی سنگ وخاک مرطوب به داخل تونل هجوم می آورد که به ناچار بایستی این سنگها وخاکها خارج و عملیات مرمت تونل انجام شود. کارهای مستحکم سازی نظیر تزریق دوغاب و انجماد با استفاده از نیتروژن مایع از جمله راه حلهای مقابله با این مشکل است

دسته بندی شرایط زمینهای نرم در تونلسازی - شرایطی که تونل درزمان حفر درزمینهای نرم با آن مواجه می شود، توسط ترزاقی دسته بندی شده است. وی این دسته بندی را برای کمک به تعیین برخی از خواص رفتاری کلی که چنین زمینهائی از خود نشان می دهند، پیشنهاد کرده است. Heuer دسته بندی ترزاقی را به صورت جدول ۳-۴ اصلاح کرده است.

McCusker تونلسازی درزمینهای نرم را به دلیل سهولت منطقی در جابجائی مواد ومصالح از طریق حفر دستی ترجیح می دهد، هرچند روشهای دیگر را نیز بتوان به کار برد. وی زمان ایستائی را به عنوان عامل اصلی مؤثر بر سهولت یا سختی حفر تونل و هزینه کل می داند. تونلسازی باید بگونه ای صورت گیرد که حداقل تخریب وزاحمت را برای تسهیلات وسازه های واقع در فاصله مؤثر بالقوه چنین ساختمانهائی ایجاد کند.

طبق مشاهدات ترزاقی در تونلسازی در زمینهای نرم مشکلات جادی وجود دارد که به طور مستقیم یا غیر مستقیم به تراوش ونفوذ آب در تونل مربوط است. درنتیجه، جدول ۳-۴ در ارتباط با [illegible] بایستی با توجه به وجود آب درنظر گرفته شود.

پدیده انفجار سنگ[1] در تونلها

وقوع انفجار سنگ در تونلهای عمیق معدنی امری شناخته شده است ومستلزم پیش بینی های خاص در جریان احداث و انتخاب ابزار نگهداری مناسب می باشد. معمولترین شکل بروز انفجار سنگ (ترکیدن سنگ)، تخلیه ناگهانی سنگهای شکسته وجدا شده محیط تونل به داخل فضای تونل می باشد که ناشی از فرآیند آزاد شدن سریع تنش است. انفجار سنگ به شکلهای دیگری نیز بروز می کند که اساساً ناشی از تمرکز شدید تنش سنگ براثر تکتونیک یا دیگر عوامل زمین شناختی ایجاد کننده تنش می باشند.

1- rockburst

جدول ۳-۴ : دسته‌بندی شرایط زمینهای نرم در تونلسازی

دسته‌بندی	رفتار	انواع خاکها
پایدار (Firm)	۱- سینه کار بدون نیاز به نگهداری اولیه پیش می رود.	۱- Loess بالای سطح ایستابی آب
	۲- پوشش نهائی را می توان قبل از شروع جابجائی زمین نصب کرد.	۲- رس سفت
		۳- شن و ماسه سیمانته شده که تحت تنش بالائی قرار ندارد.
پیچ خوردن (Ravelling)	۱- پوسته پوسته شدن[1] یا ورقه ورقه شدن[2] محیط تونل بویژه در حداره یا دیواره های جانبی وقوس	۱- خاکها و ماسه های باقیمانده همراه با binder
	۲- پیچ خوردگی سریع در پائین سطح ایستابی و پیچ خوردگی کند در بالای سطح ایستابی آب اتفاق می افتد.	۲- رسهای سفت و خشک با درزه های موئین.
	۳- پیچ خوردگی سریع می تواند در طول چند دقیقه اتفاق افتد.	
	۴- میزان تنش اعمالی در رس بر عمل پیچ خوردگی تأثیر می گذارد.	
مچاله شونده (Squeezing)	۱- تغییر شکل پلاستیک در داخل تونل بدون ترک خوردگی و از دست دادن پیوستگی بصورت قابل رؤیت.	۱- زمینهای با هوا تحت فشار پائین.
	۲- افزایش محسوس در محتوای آب بطور کلی مشاهده می شود.	۲- میزان تنش اعمالی بر سرعت مچاله شوندگی تأثیر دارد.
	۳- تسلیم بصورت پلاستیک و خم شوندگی در جریان یافتگی تحت تأثیر تنشهای بالا.	۳- رسهای خیلی نرم در اعماق کم مچاله می شوند.
		۴- رسهای سفت و خشک بر اثر مچاله شوندگی و پیچ خوردگی می توانند حرکت کنند.
روان شونده یا روانی (Running)	۱- ریزش شیب دیواره های سینه کار یا مواد دانه ای بدون چسبندگی[3] برابر با زاویه قرار[4]	۱- مواد دانه ای [illegible] از خود نشان می دهند.
	۲- ویژگیهای چسبندگی و اصطکاک مواد بر رفتار روان شوندگی تأثیر می گذارند.	۲- ماسه های مرطوب و خاکهای دانه ای که کمی سیمانه شده اند، رفتار روان شوندگی همراه با چسبندگی از خود نشان می دهند، قبل از شکستن و روان شدن در جریان پیچ خوردگی، ممکن است تکه تکه پایدار بمانند.

1- peeling ; 2- flaking ; 3- cohesion ; 4- angle of respona

ادامه جدول ۴-۳

دسته‌بندی	رفتار	انواع خاکها
جریانی یا جریان یابنده (Flowing)	۱- آب و خاک می‌توانند مانند یک سیال وارد حفره تونل جریان یابند. ۲- چنین مصالحی یا موادی می‌توانند از کف یا طرفهای اطراف تونل وارد تونل شوند. ۳- قابلیت جریان یافتن در مواد اصل دیده می‌شود. ۴- در برخی موارد می‌تواند به طور کامل تونل را پر کند.	۱- سیلت، شن و ماسه می‌تواند در زیر سطح ایستابی آب از خود رفتار جریان یافتگی نشان دهند، رس مشبوع در چنین مواردی می‌تواند پلاستیسیته و چسبندگی زیادی داشته باشد. ۲- رسهای دارای حساسیت بالا، وقتی تخریب می‌شوند، می‌توانند خواص جریان یافتگی از خود نشان دهند.
آماسی (Swelling)	۱- افزایش حجم زمین بر اثر جذب آب. ۲- انبساط کند زمین در داخل تونل.	۱- رسهای با شدت متراکم شده با شاخص پلاستیسیته بیش از حدود ۳۰ ۲- اغلب مونت موریلونیت به مقدار زیاد وجود دارد.

ترکیدن سنگ در تونلهای غیر معدنی نسبتاً بندرت اتفاق می‌افتد، که بدون شک در مقایسه با آن وضعیتی در معدن که این پدیده اتفاق می‌افتد، به کاهش عمق تونل نسبت به سطح زمین [illegible] شرایط زمین شناختی دیگری غیر از عمق نیز وجود دارند که زمینه را برای وقوع ترکیدن سنگ آماده می‌کنند، مثلاً جاهائی که به طور تکتونیکی شدت تخریب شده و از شکل افتاده‌اند، یا جاهائی که تحت واکنش سنگهای [illegible] قرار گرفته‌اند

نتایج و تیجه‌گیریهای اصلی

در این فصل سعی شده است تا نشان داده شود که شرایط زمین شناختی چگونه می‌توانند تأثیرات گسترده‌ای بر [illegible]

برای تونلها، به زمین شناسی به عنوان مهمترین عامل در تعیین طبیعت، شکل و هزینه یک تونل اشاره شده است. در بیشتر موقعیتها، مسیر، طرح و احداث به طور اساسی تحت ملاحظات زمین شناختی تعیین می‌شوند. ماهیت متغیر شرایط زمین شناختی و دامنه گسترده موانع فیزیکی که در بررسی ساختگاه با آن مواجه می‌شوند، به میزانی از عدم اطمینان و خطرات گوناگون منتهی می‌شود. این بدین علت است که شناسائی مطمئن شرایط زمین قبل از تونلسازی بدون توجه به میزان تلاش و هزینه‌ای که برای بررسی و مطالعه ساختگاه صورت می‌گیرد، امکان ندارد.

تجارب حاصل از صدها پروژهٔ تونلسازی در سراسر جهان، طراحان و سازندگان تونلها را قادر به شناسائی و درک رفتار چنین سازه هائی در شرایط مختلف زمین شناختی نموده است. با این وجود، عوامل زمین شناختی بنحو قابل توجهی از یک محل به محل دیگر و حتی در یک محل از جائی به جای دیگر در همان محل تغییر می کند. هر ساختگاهی انعطاف و ژرفگیهای زمین شناختی منحصر به خود دارد.

تاریخ نتایج عدم بررسی و شناسائی عوامل زمین شناختی مربوط به پروژه های تونلسازی، از مرحله طراحی تا احداث و گاهی عملیات راننشان داده است. بررسی و مطالعهٔ ساختگاه هم به عنوان مرحله مقدماتی و هم همزمان با احداث، مبنائی برای موفقیت فراهم می کند. بهرحال، همیشه مقداری عدم اطمینان و مجهولات وجود دارد که تحلیل دقیق اطلاعات حاصل از پروژه های تونلسازی قبلی در شرایط مشابه همراه با هشیاری در کلیه مراحل طراحی، تونلسازی و عملیات را ایجاب می کند. یادگیری از تجارب گذشته در ارتباط با شرایط زمین شناختی، و آگاهی یافتن از ویژگیها و مشخصات سنگهای مسیری که تونل قرار است در آن حفر شود، دو عامل اساسی هستند که در موفقیت کلی هر پروژه تونلسازی کمک می کنند.

مقدمه‌ای بر فصل چهارم - تونلسازی در زمینهای سست غیرریزشی (سنگی) و تونلسازی بخشی

با توجه به زمان انتشار کتاب مرجع، که ترجمهٔ سه فصل اول آن ارائه شده است، و پیشرفتهای فزاینده در تکنولوژی سپرها و روشهای حفر تونل، مولف این کتاب بحث را در فصل چهارم با تونلسازی در زمینهای سست و روشهای تونلسازی سپری ادامه داده است. به بیانی دیگر، مولف عمر روشهای کلاسیک را پایان یافته تلقی کرده و کاربرد آنها را منسوخ دانسته است.

در اینجا به منظور آگاهی دانشجویان از روشهای کلاسیک و سنتی تونلسازی، با عنایت به مشابهت این روشها با تونلهای معدنی از بعضی جنبه‌ها و طی یک روال منطقی در توسعه هنر تونلسازی، به اختصار اشاره‌ای به این روشها می‌شود. منابع مورد استفاده در این قسمت عبارتند از:

1- K. SZECHY ; The Art of Tunnelling ; Hungrie Academy of Science, Budapest ; 1966

۲- ژاک ماتیوا و ژان فرانسوا بوگارد (مولفین) ؛ ابوالحسن وکامبیز مهنیا (مترجمین) ؛ روشهای کلی اجرا، تونلهای زیر زمینی، جلد سوم ؛ انتشارات دانشگاه تهران ؛ ۱۳۶۸

تونلسازی در زمینهای سست غیرریزشی (سنگی) و تونلسازی بخشی

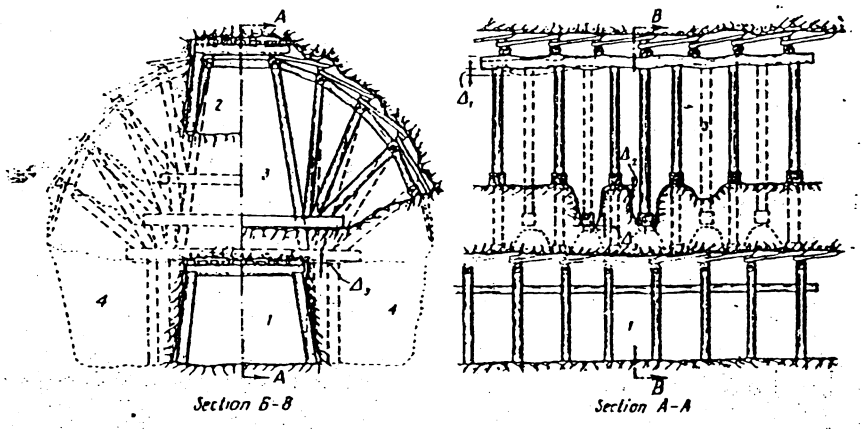
به طور کلی، مهمترین خطر در تونلسازی در زمینهای نرم، نشست زمین بالای قسمت حفاری شده است که با شکم دادن سقف و دیواره‌های جانبی تونل همراه است. این امر موجب ریزشهای موضعی یا حتی تخریب کامل فضای حفر شده می‌شود و ادامهٔ عملیات را مختل می‌سازد. این پدیده در صورت وجود آب شدت بیشتری پیدا می‌کند.

در صورت عدم کنترل این پدیده، علاوه بر مشکلات ایمنی در حین احداث، می‌تواند موجب نشست در سطح زمین و در نتیجه وارد آمدن خسارت به تأسیسات، تسهیلات و ساختمانهای سطحی شود.

روشهای کلاسیک یا سنتی

واضح است که فضاهای زیرزمینی با ابعاد کوچکتر، خطرات کمتری در حین حفر دارند و زمان ایستائی یا خود ایستائی آنها طولانی تر است. در نتیجه، حفر یکبارهٔ تمام رخ مقطع تونل معمول نیست و سطح مقطع تونل با حفر تونلهای پیشرو به قسمتها و یا جبهه کارهای کوچکتر تقسیم می شود. ترتیب و مراحل این تونلهای پیشرو یا جبهه کارها همیشه باید با عملیات لازم برای اجرای آنها (حفر، نصب و احداث و سایل نگهداری موقت و پوشش دائمی و غیره) همراه باشد و بسته به طبیعت سنگ و همچنین شرایط فشار سنگ این مراحل با آنها مطابقت داشته باشد.

شایان ذکر است که احداث تونل به صورت چند بخش، مستلزم نصب، بازکردن و حتی گاهی نمودنهای مکرر و پی در پی وسایل نگهداری موقت مختلف می باشد. در این روش نه تنها کار زیاد و صرف بسیار زیاد و قابل ملاحظه ای از وسائل نگهداری الزامی است، بلکه نشست بیشتر سقف و ول شدن مکرر سنگ بالای فضا و در نتیجه افزایش فشار سنگ را نیز موجب می شوند. نشست سقف و ول شدن سنگ بالای فضا، رفتار لاستیک و غیرقابل اجتناب در هر بازکردن و تغییر و تعویض وسایل نگهداری موقت هستند (شکل ۱).



Δ1 - خزش تیرهای سقف

Δ2 - لغزش براثر فرورفتن یا لوزه دار شدن

Δ3 - مقاومت نامناسب خاک

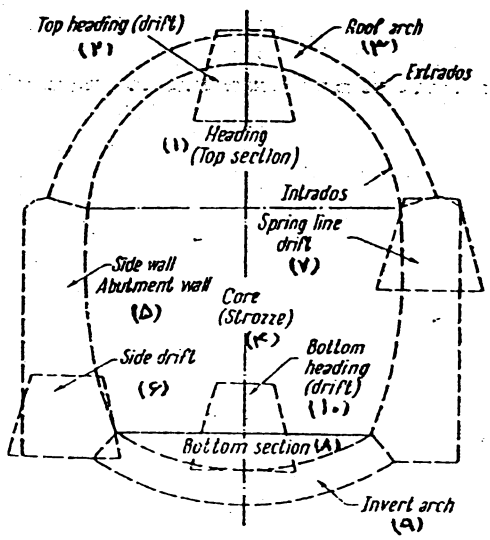
تذکر: Δ2 و Δ3 براثر سست تر شدن سنگ ناشی از وجود آب و آبشاری افزایش می یابند.

۱- تونل یا جبهه پیشرو کف، ۲- تونل یا جبهه پیشرو بالائی، ۳- تعریض تونل بالائی، ۴- تعریض تونل پائینی

شکل ۱- تغییرات و نشست بیشتر براثر نصب و بازکردنهای مکرر وسائل نگهداری موقت در روش اتریشی

با توجه به این معایب، روبرو از کاربرد روشهای تونلسازی کهنی (به طور معمول تونلسازی سنتی یا روشهای معمولی) دیده می شود و گاهی مستهجر می شود و کار تونلسازی امروزه از آن فاصله زیادی گرفته است.

در این روشها سطح مقطع تونل به تعداد سطح مقطع‌های کوچکتر تقسیم می‌شوند و در طول تونل بصورت تونلهای پیشرو با فاصله‌ای نسبت به هم جلوی روند. تونلهای پیشرو یا دوبلهای بالارو یا پائین رو به هم وصل می‌شوند. سطح مقطع تونل به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود: قسمت بالائی (سقف)، قسمت میانی (مخزن) و قسمت کف (شکل ۲). تونل پیشرو بالائی[۱] و تاق قوسی[۲] در قسمت بالائی، دیواره‌های جانبی در قسمت میانی، و تونل پیشرو کف[۳] و کف بند[۴] در قسمت کف قرار می‌گیرند.



۱- قسمت بالائی .....

۲- تونل پیشرو بالائی

۳- تاق قوسی

۴- قسمت میانی

۵- دیوارهٔ جانبی

۶- تونل پیشرو پائین دیواره

۷- تونل پیشرو بالائی دیواره

۸- قسمت کف

۹- کف بند قوسی

۱۰- تونل پیشرو کف

شکل ۲- واژه شناسی قسمتهای تونل

حفر تونلهای با مقطع نعل اسبی، طبق الگوی نشان داده شده در شکل ۳، اجرا می‌شود. روشها بر دو دستهٔ کلی از جنبه یکپارچه یا منقطع اجرا کردن پوشش تقسیم می‌شوند. در حالتی که تمام مقطع حفر شده یکباره در یک مرحله بین ریزی می‌شود، پوشش تونل به یکی از روشهای زیر ایجاد می‌گردد:

الف - روش غالب ایجاد یک دوبل بالارو بین تونل پیشرو کف و بالائی و حفر تمام مقطع در یک طول از قبل تعیین شده است. حفر و تعریض طبق الگوی نشان داده شده در شکل ۳- الف از بالا به پائین صورت می‌گیرد که بار برای (در تونل ۱) و حفر (از تونل ۲ شروع می‌شود) می‌تواند به طور مستقل یا همزمان در این مرحله انجام گیرد. وقتی حفر یک حلقه تمام شد، پوشش از کف تا سقف به صورت پی در پی و برای تمام طول حلقهٔ حفر شده صورت می‌گیرد.

1- Top heading (drift) ; 2- roof arch ; 3- bottom heading (drift) ; 4- invert

مزیت این روش گذشته از تأمین شرایط خوب حمل و نقل، امکان داشتن جبهه کارهای متعدد و در نتیجه سرعت بالای پیشروی می باشد. عیب روش عدم تهویه یا تهویهٔ نامناسب سینه کارهای پیشروی است.

ب- روش دیگری که اغلب مورد استفاده قرار می گیرد، روش پله ای[1] با حفر زیربائی یا رو به پائین طبق مراحل نشان داده شده در شکل ۳- ب می باشد. در این حالت نیز پوشش از کف به سمت بالا در یک حلقه تمام حفر شده اجرا می شود. در این روش، باربری و حفر می تواند به طور کامل جدا از هم صورت بگیرد (به بیانی دیگر، حفر و باربری جدا از هم و یکی پس از دیگری انجام می شود و در نتیجه از سرعت پیشروی کاسته می شود)، ولی شرایط تهویه خوب است.

ج- آخرین و سومین روش از دستهٔ اول، حفر رو به بالا از کف به سمت سقف طبق مراحل نشان داده شده در شکل ۳- ج می باشد. این روش را می توان در سنگهای متوسط سخت که سقف نیازی به نگهداری ندارد، به کار گرفت. احداث پوشش مشابه روشهای قبل از پائین به بالا و یکباره برای یک حلقه حفر شده صورت می گیرد.

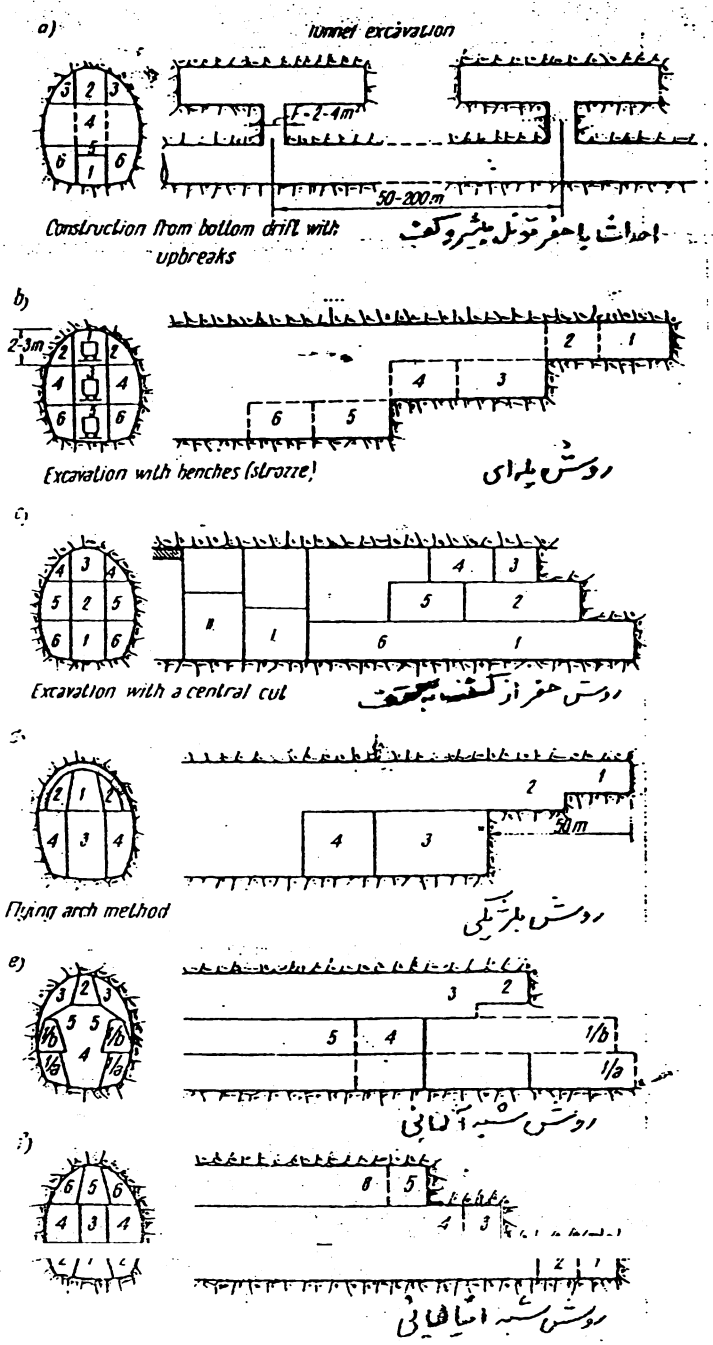
در روشهای دستهٔ دوم، انجام حفر و احداث پوشش در مراحل متناوب و یک در میان اجرای گردد.

الف- یکی از روشها حفر قسمت بالائی (بلز یکی) است که در آن قسمت بالائی تونل با شروع یک تونل پیشرو بالائی در یک طول از قبل تعیین شده حفر می شود. پس از آن طرفین تاق یا تونل پیشرو بالائی در همان طول تعریض و سپس تاق تونل با استفاده از سنگ چینی یا دیوارچینی نگهداری می شود. عملیات با حفر یک برش مرکزی تا تراز کف ادامه می یابد و از داخل این برش میانبر یا دستکهائی به فواصل مشخص از هم به سمت دو دیواره به صورت برشهائی باریک حفر می شوند. از داخل دستکها، ابتدا از زیر تاق به صورت گود کنی و شبه ستونی کنده و سپس گودکنی در طول پایه و دیواره ادامه می یابد (شکل ۳- ب).

ب- در صورتی که زمین از استحکام کافی برخوردار نباشد تا تاق را نگهداری کند، ابتدا دیواره های جانبی حفر و نگهداری می شوند. این کار با حفر تونلهای پیشرو در هر دو دیواره در قسمت کف انجام و سپس تونل پیشرو بالائی حفر می گردد و با تعریض دو طرف تونل پیشرو بالائی، تاق قوسی ایجاد می شود. بتن ریزی یا نگهداری دو دیواره قبلاً صورت گرفته است (مانند روش آلمانی). قسمت میانی فقط پس از تکمیل و آماده شدن مقطع تونل برداشته می شود (ش ۳- هـ).

1- benching method

ج - در زمینهای بسیار سست، حفر از قسمت پائینی و تونل پیشرو پائینی شروع و سپس دو طرف آن برداشته و نگهداری دو دیوارهٔ کف تأمین می‌شود (مانند روش ایتالیائی). تونل پیشرو مرکزی به فاصلهٔ بسیار کمی قسمت ۲ در کف شروع و سپس دیواره‌ها حفری می‌شود. با حفر مرحله به مرحله دیواره‌ها، نگهداری آنها نیز انجام می‌گیرد. حفر و ایجاد مرحله به مرحله قسمت بالائی یعنی ابتدا تونل پیشرو بالائی و سپس دو طرف آن تا تاق قوسی تونل پائوش را تکمیل می‌کند (شکل ۳-و).



شکل ۳- روشهای مختلف حفر تونل به صورت بخشی

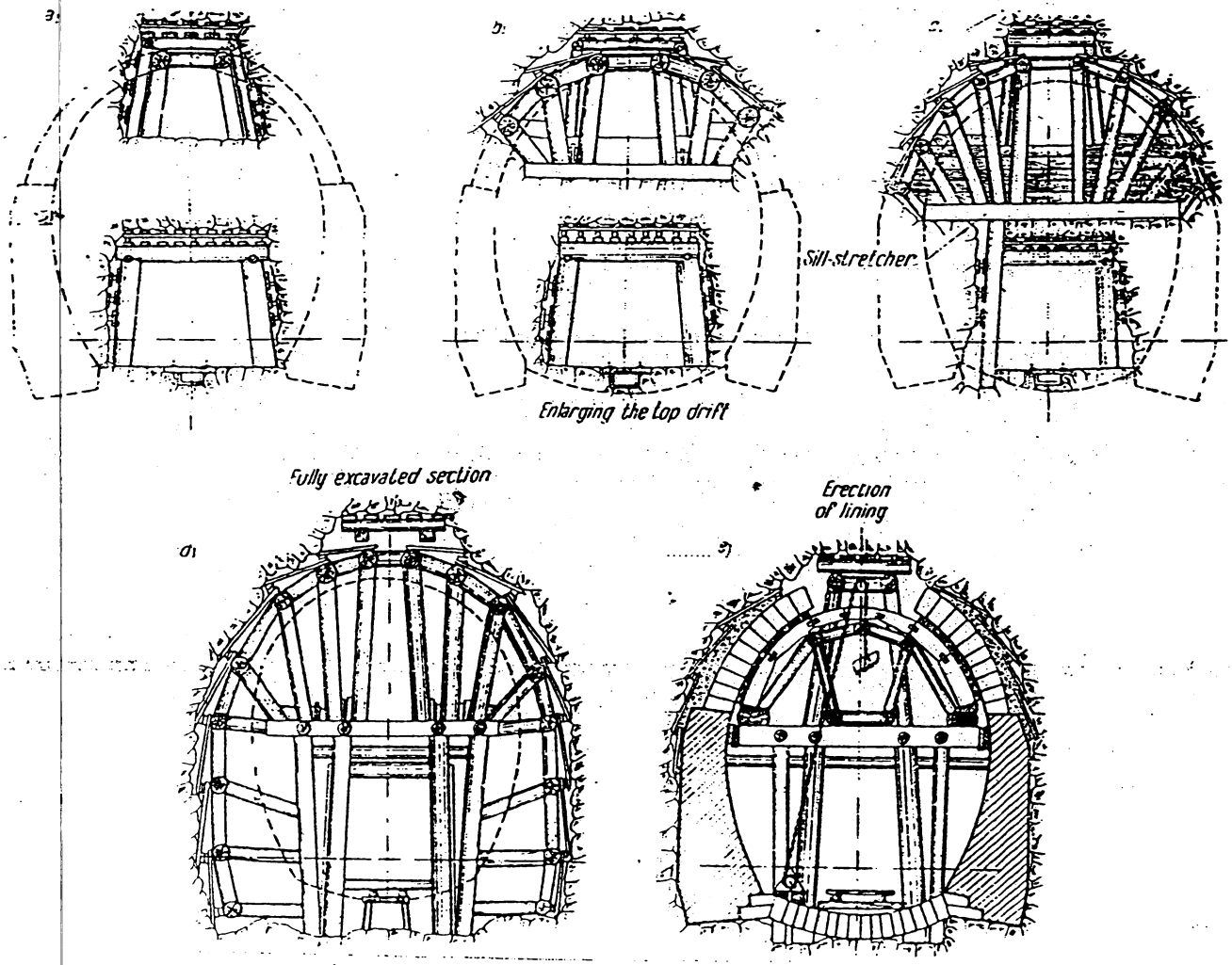
روش انگلیسی

در روش انگلیسی مقاطعی به طول ۳ تا ۶ متر در تمام مقطع از بالا به پائین حفری شوند و سپس اجرای پوشش در تمام مقطع از پائین به بالا صورت می‌گیرد. کار با حفر تونل پیشرو کف (باربری) شروع می‌شود و هر ۵۰ تا ۶۰ متر دویل بالا روئی حفری گردد تا از داخل آنها امکان حفر تونل پیشرو بالائی فراهم شود. تونل پیشرو پائینی، علاوه بر تسهیل زهکشی موقت خوب و کنترل خوب سیر، امکان حفر تونل پیشرو بالائی را در نقاط متعدد فراهم می‌آورد. ابعاد تونل پیشرو بالائی نسبتاً کوچک است (۱٫۵ متر عرض و ۱٫۸ متر ارتفاع) و افقی که این تونل در آن قرار می‌گیرد بگونه‌ای است که سقف تونل پس از حفر با لبه بالائی تاج تونل پس از پوشش تقریباً منطبق باشد. پس از این که سطح مقطع تونل بطور کامل حفر شد به فواصل ۳ تا ۶ متر طول مقطع حفر شده، پوشش اجرا می‌شود. این طول به خواص مکانیکی زمین بستگی دارد، هرچه زمین سست‌تر باشد طول حلقه‌ای که باید پوشش شود، کوچکتر می‌باشد (شکل ۴ - الف).

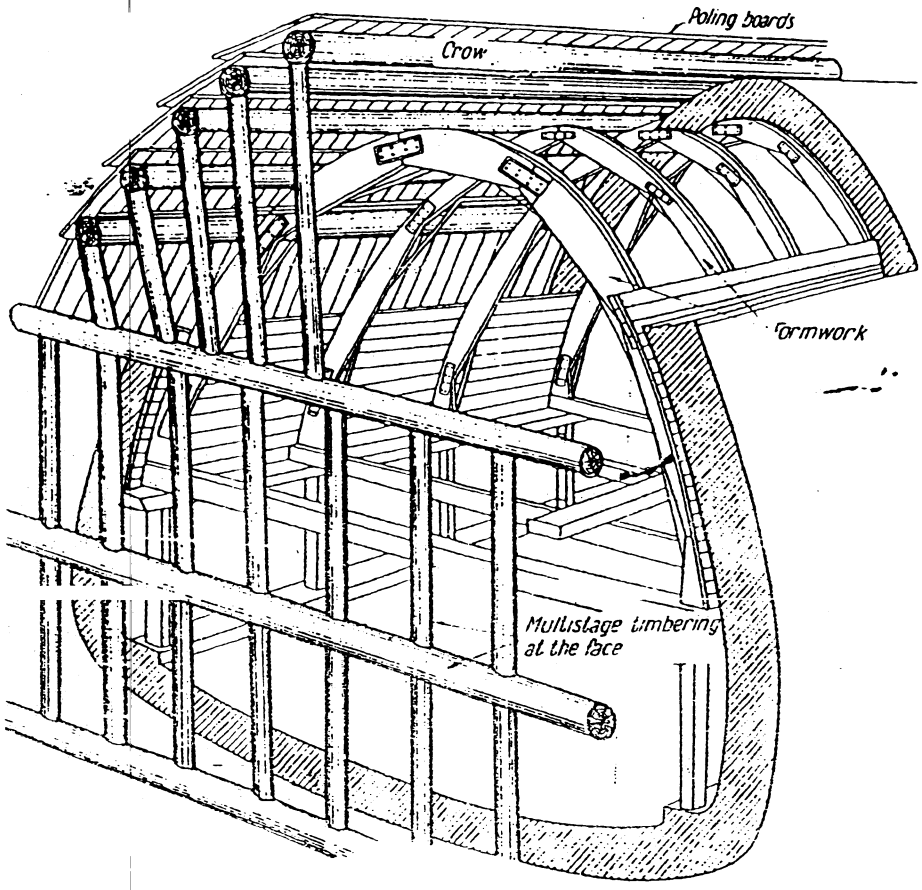
تعریض دو طرف تونل پیشرو بالائی با حفر تونل پیشرو پائینی همراه است، در نتیجه ستونها و حایلهای نگهداری موقت نیز باید به طور پیوسته با ستونها و حایلهای طویلتر جایگزین شوند (شکل ۴ - ب). وقتی کف تعریض شده قسمت بالائی به حد بالائی قسمت میانی رسید، کلیه پایه‌ها یا ستونهای مایل نصب شده در تمام عرض قسمت پائینی بالائی جدید و تعویض شده می‌باشند (شکل ۴ - ج). پس از تکمیل قسمت قوس تاق، دیواره‌های دو طرف تونل پیشرو کف رو به پائین برداشته می‌شود (شکل ۴ - د) و در حقیقت حفر مقطع تکمیل می‌گردد.

پس از تکمیل حفر تمام مقطع اجرای پوشش با شفت چینی کف بند و در غیر این صورت با قالب بندی و بتن ریزی دیواره‌های جانبی شروع می‌شود. امکان شفت چینی دیواره‌های جانبی نیز وجود دارد و این شفت چینی تا اجرای پوشش سقف ادامه می‌یابد (شکل ۴ - هـ). در حین اجرای پوشش، چوب بستهای پی درپی برداشته می‌شوند و برای اجرای پوشش در حلقه بعدی به جلو منتقل می‌گردند.

یک طرف حلقه پوشش ایجاد شده جدید از جلو به حلقه پوشش قبلی و از عقب به سطحهای نگهداری موقت متصل می‌شود. در شکل ۵ یک تصویر سه بعدی از روش انگلیسی نشان داده شده است.



شکل ۴ - مراحل حفر و اجرای پوشش در روش انگلیسی

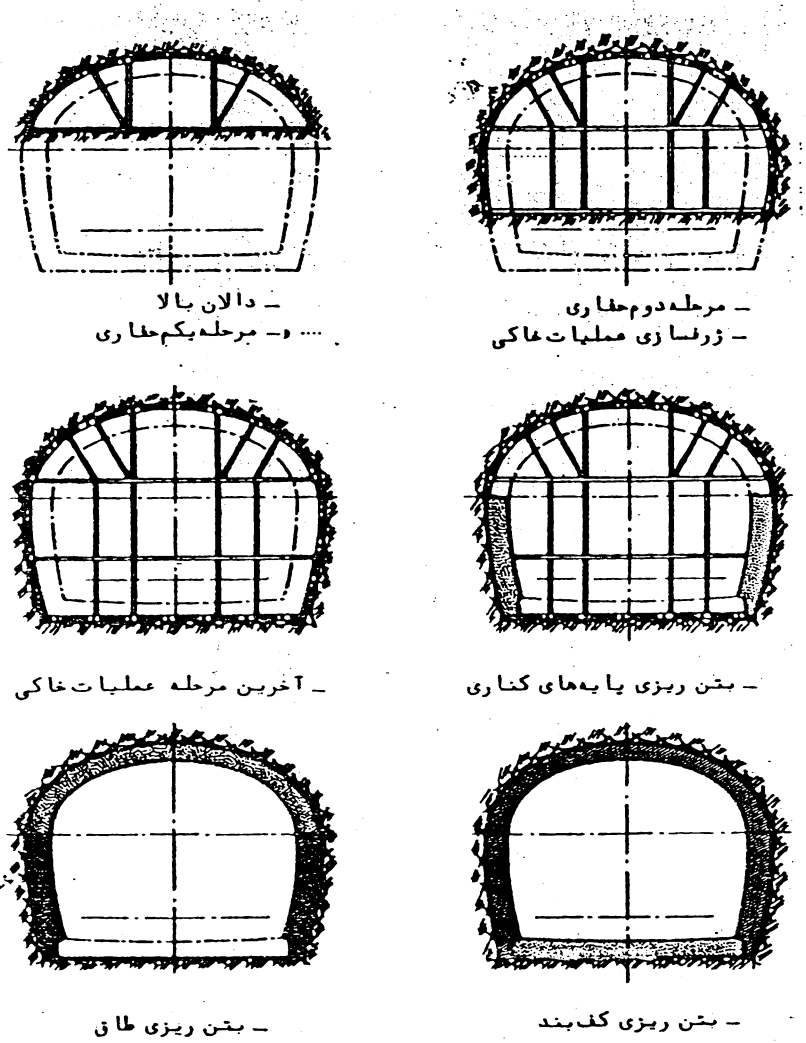


شکل ۵ - تصویر پرسپکتیو از روش انگلیسی از قسمت اجرای پوشش.

۸۹

در منبع شمارهٔ ۲، روش انگلیسی به صورت زیر وصف شده است:

در این روش تمام مقطع به صورت برشهائی افقی از بالا به پائین همراه با نصب وسائل نگهداری موقت، حفر می‌شود. پس از اتمام حفر مقطع، اجرای پوشش از دیواره‌های دو طرف شروع می‌شود، پس از آن تاق با سنگ و ملات سیمان و یا با بتن ساخته و در آخر کف بین احداث می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۶ - مراحل حفر و اجرای پوشش در روش انگلیسی (منبع ۲).

روش چوب‌بستگاری در روش انگلیسی، علیرغم این که شرایط کاری خوب و سرعت پیشروی بالائی را به دست می‌دهد، برای سنگهای محکم مناسب‌تر است، چون در زمینهای سست، چوب‌بستهای تاج تونل قادر به مقاومت در برابر فشارهای سنگ بیشتر نیستند، در نتیجه برای این چوب‌بستهای تاج نمی‌توانند در برابر فشارهای بالاتر مقاومت کنند باید فاصله داری حایلهای تاج و ستونها را کاهش داد یا طول مقاطع را کم کرد. کاهش فاصله داری یا طول مقاطع هر دو هزینه و مصرف چوب را افزایش می‌دهد.

مزیت روش تونلسازی (۱) سهولت عملیات حفر، (۲) چوب‌بستگاری، (۳) بارگیری و نصب و ایجاد پوشش است

و این عملیات از نظر زمان و فضا تداخل ندارند و مشکلی از این جنبه ها برای هم درست نمی کنند. عیب این روش ضرورت حفر سطح مقطعی بزرگتر از سطح مقطع لازم پس از ایجاد پوشش است و این امر مانعی در نظر گرفتن فضاهای لازم برای نصب کلاهک، بغل بندها، ستونها و لاروه هامی باشد. تخریب گهگاه چوب بستها موجب تخریب دیواره و در نتیجه نشست و افزایش فشار می شود.

روش اتریشی

ترتیبات چوب بستکاری این روش در شکل ۷- الف نشان داده شده است. در شکل ۷-ب نیز مراحل وگامهای حفر آورده شده است. کار در این روش نیز با حفر تونل پیشرو یا مغنی که به فاصله هر ۵۰ تا ۱۰۰ متر دوبلی از آن به تونل پیشرو یا بالائی حفر می شود. مانند روش انگلیسی قسمت بالائی تونل از داخل تونل پیشرو بالائی تعریض و در عین حال عمیق می شود، البته در این روش برخلاف روش انگلیسی که لاروه های سقف عمود بر محور تونل است، به موازات محور تونل قرارداده می شوند و تعریض نیز در طولهای کوتاهی انجام می شود و برشها از بالا به پائین و مرحله به مرحله تا خاکبرداری تمام سطح مقطع برداشته می شوند (شکل ۷- الف).

بعد از حفر کف و ایجاد کف بند، پوشش یا تبش ریزی از پائین یعنی از دولوه ها در یک مرحله شروع و تا تاق ادامه می یابد. مراحل وگامهای عملیاتی در شکل ۸ (منبع ۱) و شکل ۹ (منبع ۲) آورده شده و نشان داده شده اند.

روشهای سنتی چند مرحله ای

در میان روشهای سنتی احداث تونل یا روشهای معدنی، روشهائی که پوشش نهائی آنها به صورت منقطع و در چند مرحله ایجاد می شود، عبارتند از:

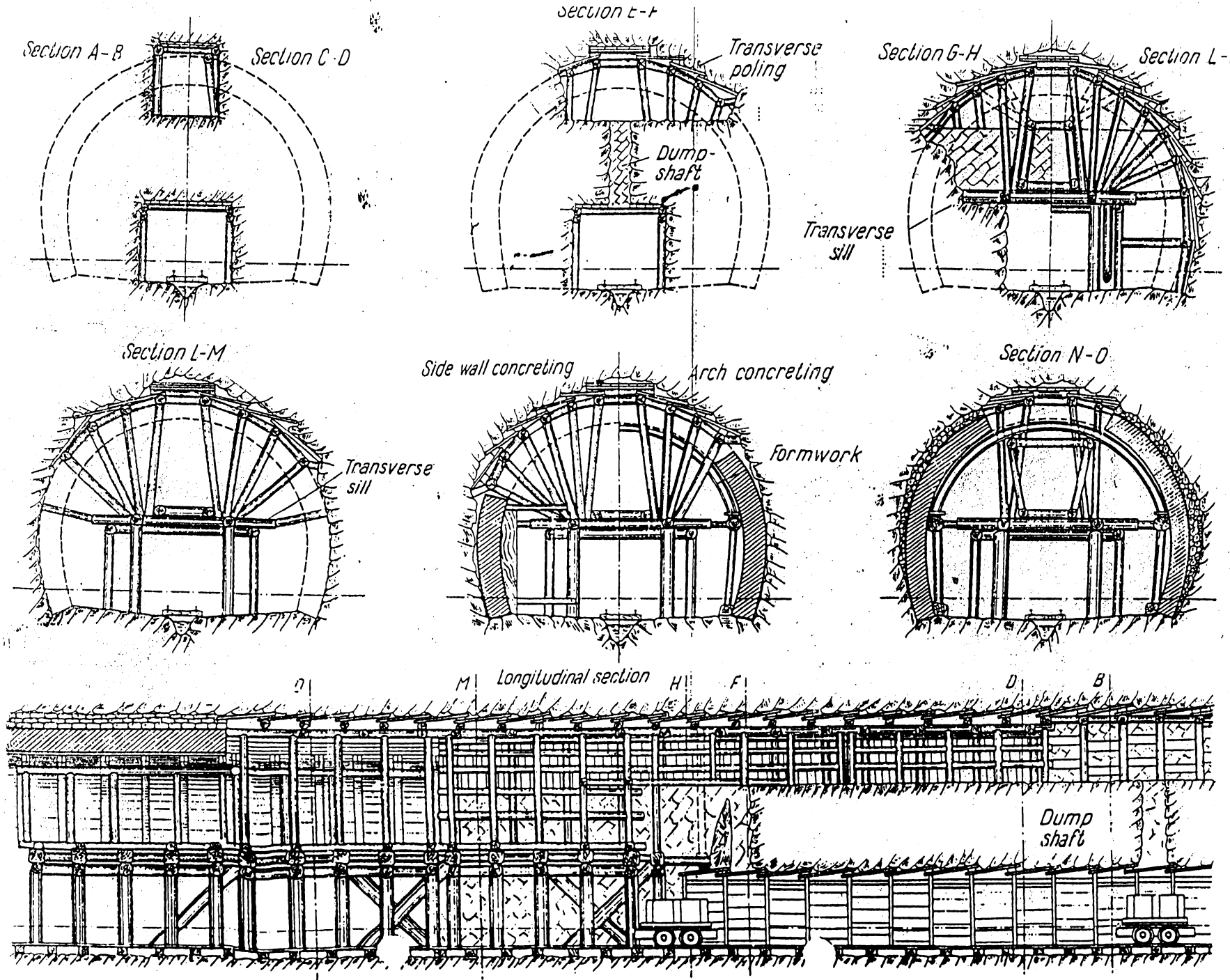
الف - روش گودکنی[1] یا روش بلژیکی — ب - روش جاگذاری میانی[2] یا روش آلمانی

ج - روش کف بند قوسی[3] یا روش ایتالیائی — د - روشهای احداث ترکیبی، که ترکیبی از روشهای فوق

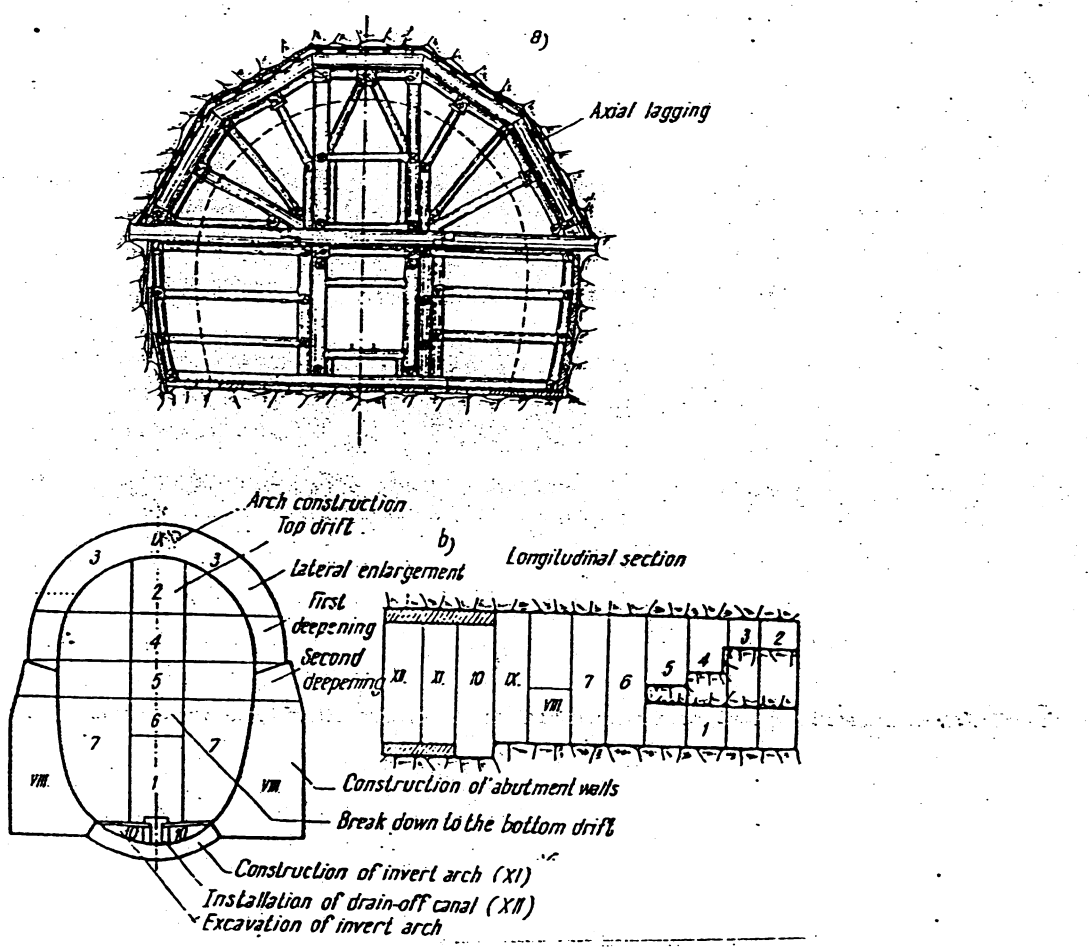
این روشها به طور کلی در زمینهای نرم به کار برده می شوند و عامل مهم در انتخاب آنها، پایدار بودن زمین قبل از زیرا است.

الف - روش بلژیکی به کار برده می شود که زمین واقع در زیر پایه های تاق قوسی به حدّ کافی پایدار باشد که به طور موقت تمام وزن قوسی که توسط فشار سقف باز گذاری شده است را بدون نشست تحمل کند.

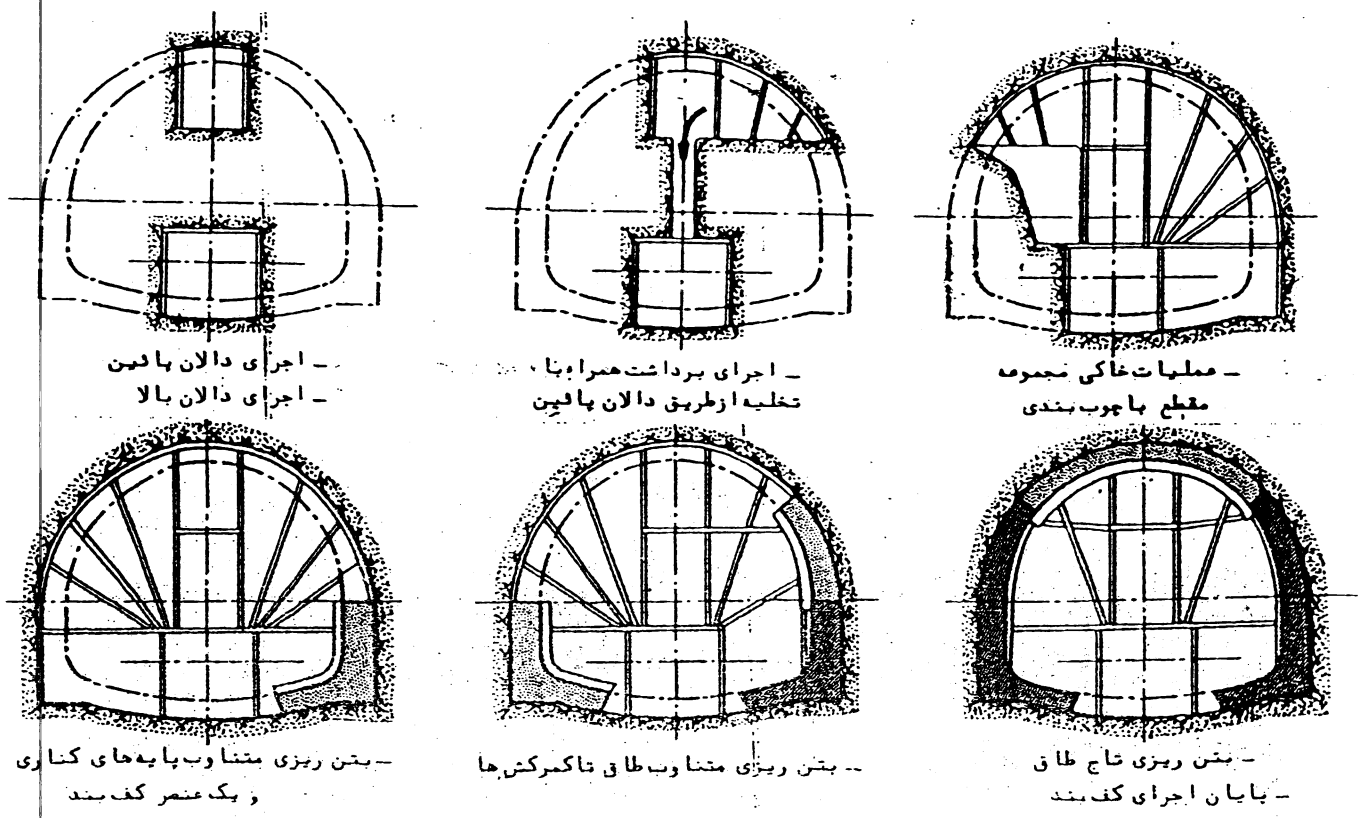
1- underpinning m. ; 2- core leaving m. ; 3- short dak m.



شكل ٨ - مراحل احداث دروبة التربيق



شکل ۷ - توتیبات ساختاری نگهداری موقت و مراحل عملیات در روش اتریشی



شکل ۹ - روش اتریشی

ب - در زمینهائی که تحمل یا ظرفیت تحمل بار کمتری دارند، ولی پایداری کافی برای تحمل بار ناشی از فشار مقاومت بدون جابجائی و نشست عمده در افق پائین یا کف تونل (دیواره های جانبی) داشته باشند، روش آلمانی مورد استفاده قرار می گیرد.

ج - در زمینهای نرمتر که لازم است بمنظور انتقال امین بارها تمام عرض تونل بارگذاری شوند، از روش ایتالیائی استفاده می شود.

روش بلژیکی

این روش شبیه روش انگلیسی است ولی کم هزینه تر از آن است و فقط می تواند در زمینهای نسبتاً سخت به کار گرفته شود. تفاوت اصلی آن با روش انگلیسی آن است که در روش انگلیسی قبل از شروع ایجاد پوشش، تمام سطح مقطع تونل به طور کامل حفر می شود، در حالی که در روش بلژیکی حفر و نصب یا ایجاد پوشش به تناوب صورت می گیرد. این روش به دو صورت اجرا می شود: با یک تونل پیشرو یا دو تونل پیشرو. حفر تونل پیشرو در قسمت بالائی در سنگهای خشک و فقط برای تونلهای کوتاه منطقی است.

در این روش عملیات با حفر تونل پیشرو یا بالائی شروع می شود. تعریض دو طرف [redacted] گودکنی دو طرف تا تکمیل حفر طاق صورت می گیرد. ستونهای چوبی نگهدارنده سقف بر سنگ قسمت میانی تکیه داده می شوند. بتن ریزی یا پوشش طاق قوسی انجام می شود (شکل ۱۰)

پس از تکمیل حفر و ایجاد پوشش طاق، حفر و ایجاد پوشش در بقیه قسمتهای تونل به صورتهای مختلف ادامه می یابد:

۱- با حفر گودالهائی به عرض ۲ تا ۳ متر در دیواره ها و کف تونل و یا آرایشی مطابق شکل ۱۱-الف، بتن ریزی پایه های کناری به طور منقطع و طبق آرایش گودالهای حفر شده انجام می شود. مراحل حفر و بتن ریزی نشان داده شده در شکل ۱۰-الف. در این روش، یک آرایش تخته شطرنجی را نشان می دهد. باید دقت کرد که به طور همزمان در یک مقطع دو گودال در هر دو طرف یا دو پایه راست و چپ حفر نگردند.

گرده میانی باقیمانده را می توان پس از بتن ریزی دیواره در تمام طول تونل یا به طور همزمان با ایجاد یک فاصله منطقی، بنحوی که از سخت شدن و صلب شدن پوشش پایه ها اطمینان حاصل شود، به صورت گودکنی برداشت.

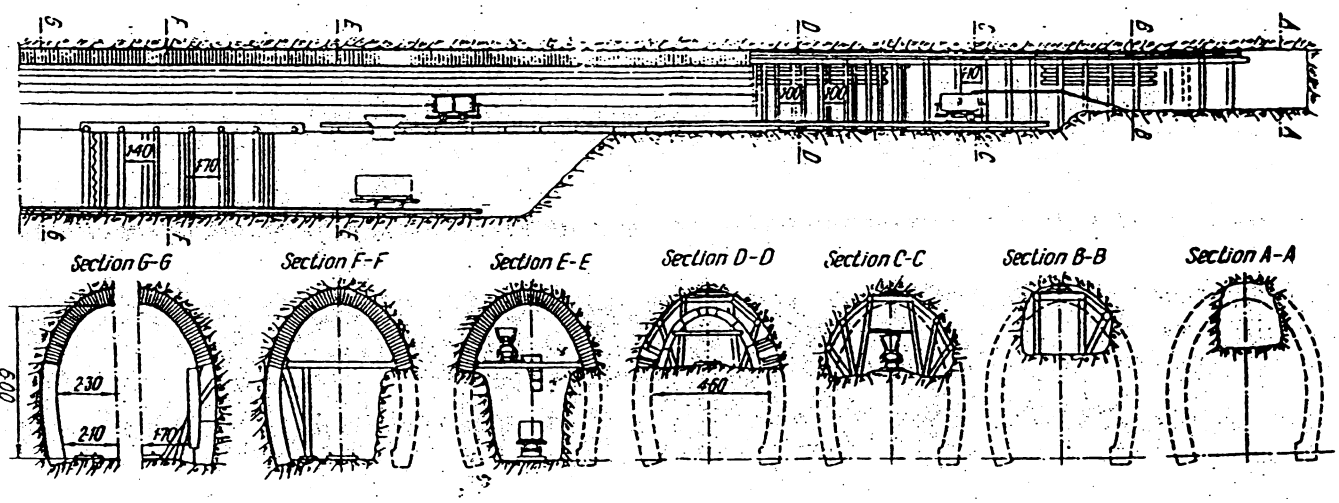
بدیهی است حفر همزمان قسمت میانی با عملیات گودکنی و ایجاد پوشش در پایه‌های کناری سرعت حفر را پیشروی را افزایش خواهد داد.

۲- برای سهولت حمل و نقل مواد و مصالح و شرایط کاری ارجح است که ترانشه‌ای مرکزی در قسمت میانی تاکف تونل حفر گردد. در این حالت دیواره‌های اطمینانی در زیر تاق و در دو طرف دیوارهٔ تونل هر کدام به عرض ۱٫۵ تا ۲ متر به منظور نگهداری تاق استخراج نشده باقی گذاشته می‌شود. از داخل این ترانشه دستکهائی به شیب به سمت دیواره و با آرایشی شطرنجی حفری می‌شود. پس از حفر دستکها، پایه‌های کناری از داخل آنها بتن ریزی می‌شوند. ریل گذاری در کف ترانشه صورت می‌گیرد که با این وجود عملیات بارگیری و بار برای سهولت تحقق می‌پذیرد. این روش قابل به کارگیری در زمینهای سخت تا متوسط است (شکل ۱۱ - ب).

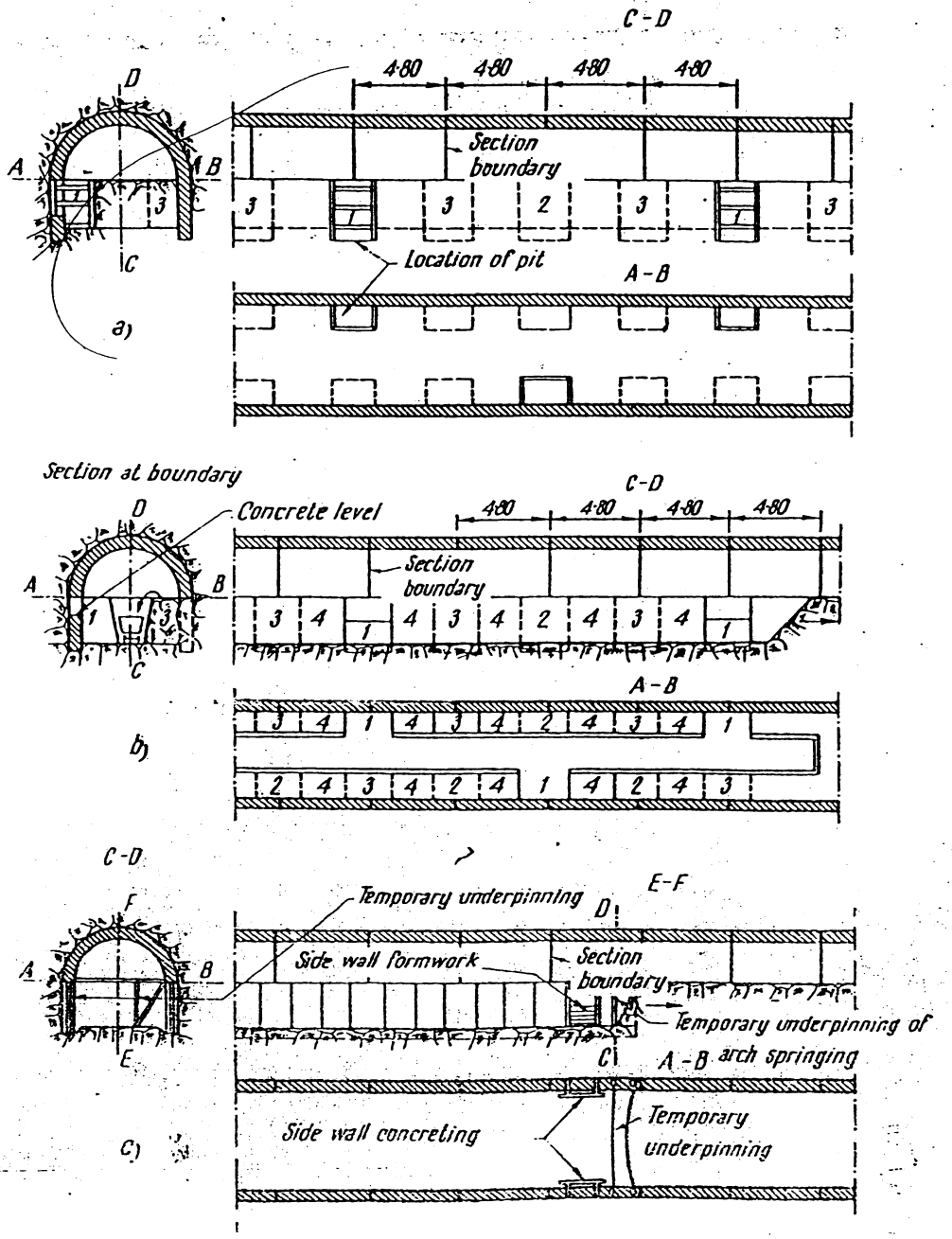
گودکنی زیر تاق کار بسیار حساسی است و دستکهای ایجاد شده نباید همزمان در کنار هم باشند و در حقیقت باید در مقاطع متناوب که بین هر کدام حداقل پایه‌ای از زمین به طور موقت با عرض ۲ تا ۳ متر باقی گذاشته شده است، ایجاد شود. دقت خاصی در زمان بتن ریزی پایه‌ها در دو مقطع مجاور هم باید اعمال شود، زیرا در ایجاد تراکم بین دو قسمت بتن ریزی مشکلاتی بروز خواهد کرد. به همین علت، برای ایجاد صلبیت لازم در پوشش، باید اقدام به تزریق دوغاب سیمان در مراحل بعدی کرد.

پس از کندن دیواره و بتن ریزی پایه‌های کناری، در صورت لزوم عملیات کف کنی و نصب کف بند عمومی صورت می‌گیرد.

۳- دیواره‌های جانبی را می‌توان با عملیات پیوسته متناوب احداث کرد. برای این کار جبهه کار پیشروی در دیواره‌ها و قسمت میانی به طور پیوسته در طول ۳ تا ۴ متر جلو برده می‌شود (شکل ۱۱-ج). در این مورد نگهداری موقت کافی زیر تاقها در دیواره‌ها از مهمترین کارهائی است که باید انجام شود و برای این کار معمولاً از تیرآهن [illegible] تیرآهن‌ها به طور قائم، تیرآهن‌هائی نیز به ارتفاع از زیر تاق بتن ریزی شده تاکف بند به منظور جلوگیری از جابجائی دیواره‌های جانبی نصب می‌شود. این روش امکان نصب کف بند یا بتن ریزی سریع کف را بلافاصله بعد از احداث دیواره‌ها فراهم می‌سازد. در صورتی که ارتفاع دیواره‌های جانبی بیش از [illegible] متر باشد، عملیات گودکنی با بالتی در مراحل مختلف صورت گیرد.

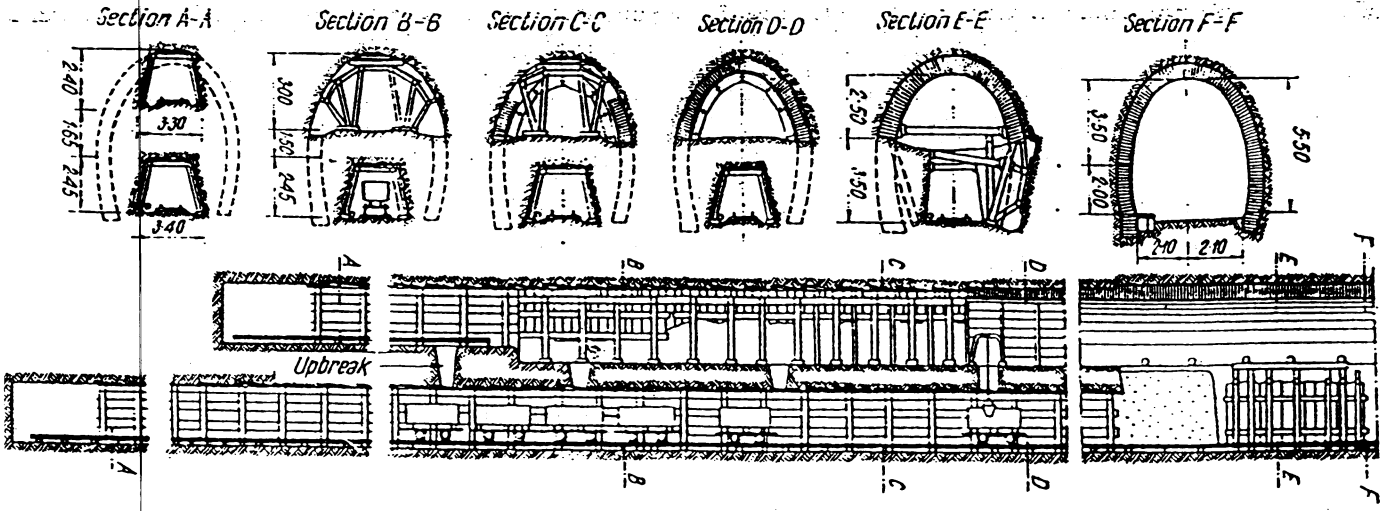


شکل ۱۰ - روش بلبزنکی با شروع از تونل پیشرو بالائی

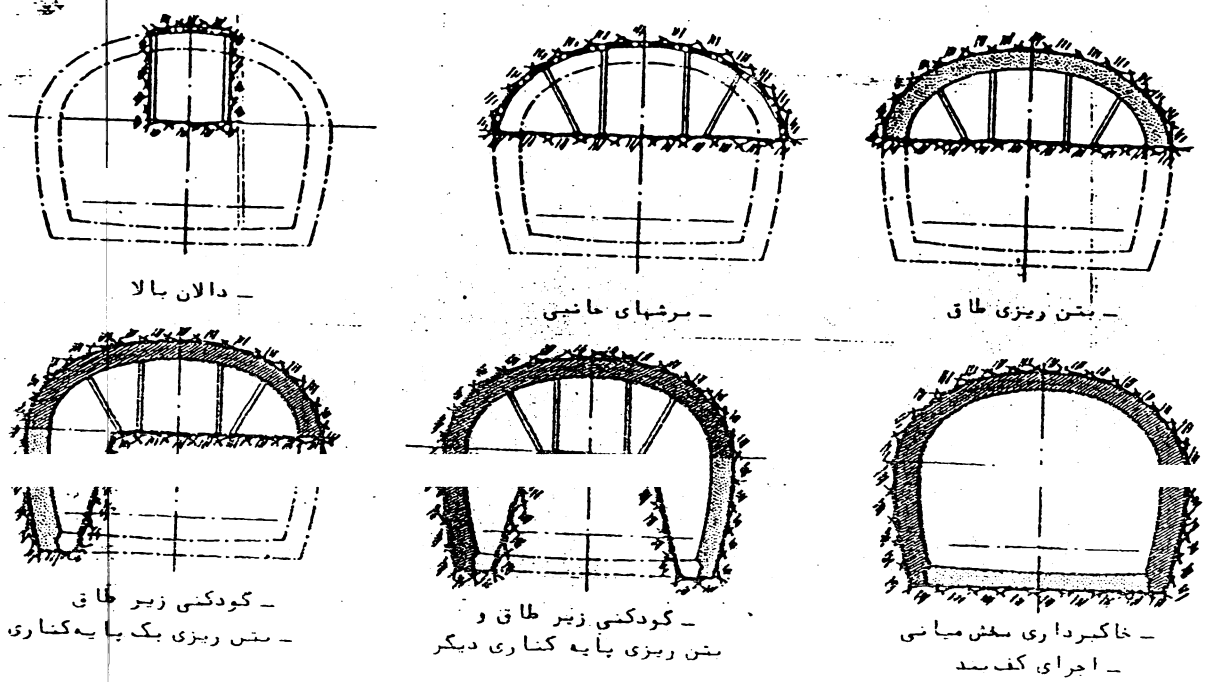


شکل ۹ - حالتهای مختلف احداث دیوارهای جانبی

روش اصلاح شدهٔ بلژیکی، از دو تونل پیشرو بالائی و کف استفاده می کند که جبههٔ کار تونل پیشرو کف جلوتر از بالائی است. فاصلهٔ دو جبههٔ کار پیشروی این دو تونل از یکدیگر فقط ۲۵ تا ۳۰ متر است. این دو تونل توسط دوپلهائی که به فواصل مشخص از هم حفر می شوند، به یکدیگر ارتباط دارند. وجود تونل پائینی مشکلات حمل و نقل، بارگیری و آبکشی را حل می کند، در عین حال عملیات حفر و احداث دیوارهای تونل می تواند بدون هیچ گونه تداخلی با عملیات حمل و بارگیری و آبکشی به طور همزمان انجام شود (شکل ۱۲). پس از حفر و تعریض قسمت بالائی و نصب سیستمهای نگهداری موقت، قالب بندی و بتن ریزی تاق انجام می گیرد. سپس عملیات با عمیق کردن ادامه می یابد و تونل پائینی می تواند در برداشت دیوارهٔ مجموعه‌ی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲ ـ جزئیات روش بلژیکی اصلاح شده یا دارای دو تونل پیشرو



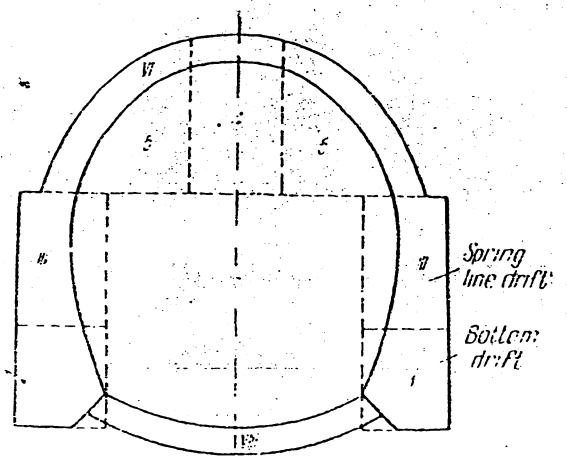
شکل ۱۳ ـ روش بلژیکی به نقل از منبع ۲

روش آلمانی

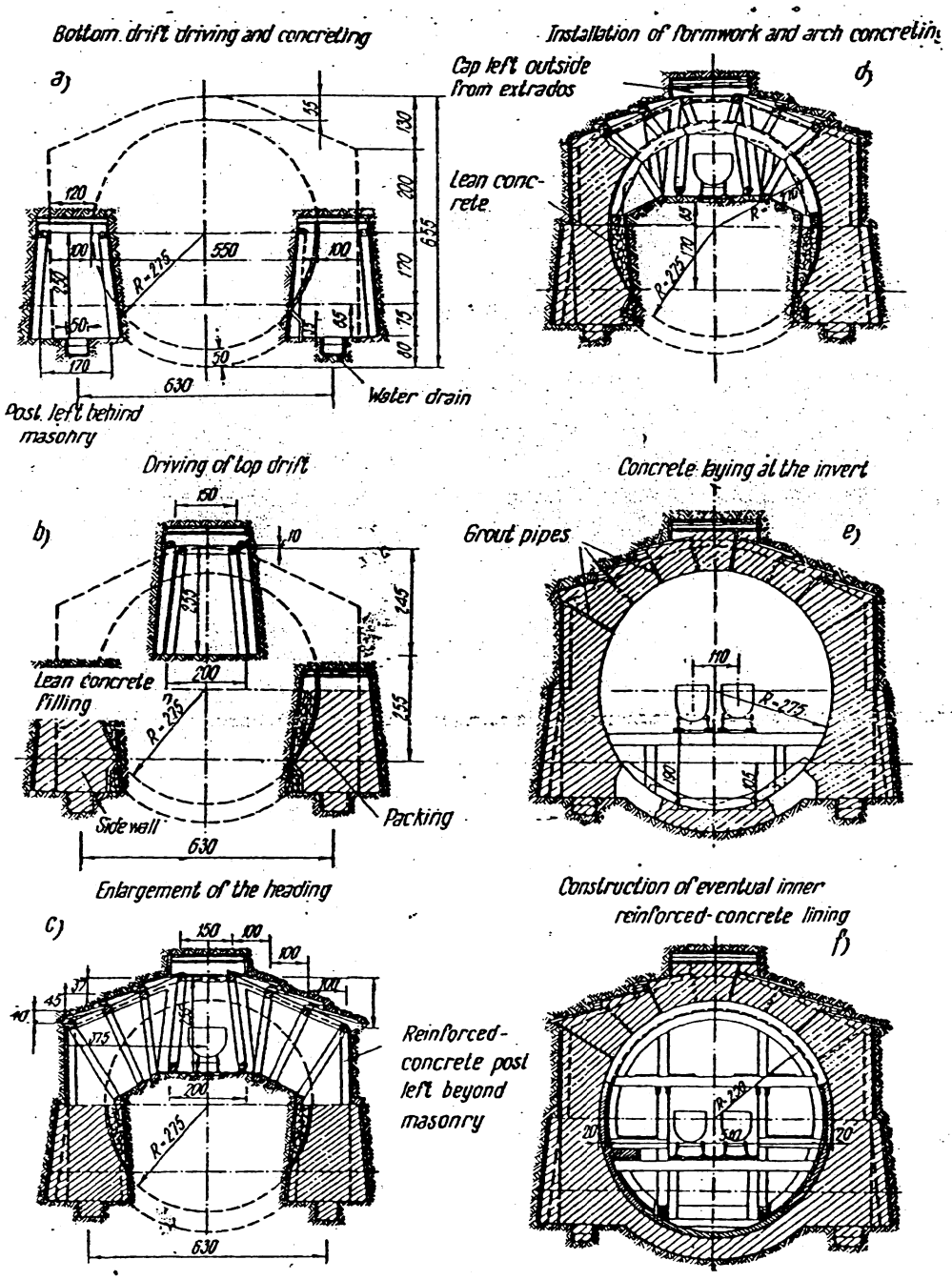
در این روش ابتدا دو تونل پیشرو کف در دو طرف دیواره های جانبی احداث می شود. این دو تونل به طول مشخصی حفر و قالب بندی و بتن ریزی می شوند. و پر گیهای بتن ریزی و پر کردن قسمتی از فضای باقیمانده این دو تونل که بتن ریزی آنها ضرورتی ندارد، توسط خرده سنگ یا نخاله های سیمان در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این خرده سنگها در مرحلهٔ برداشت قسمت میانی، همراه با آن برداشت می شوند. در حقیقت در طول مورد نظر تونل، تونلهای پیشرو کف حفر و جویت بتنکاری می شوند و بتن ریزی تونلها از انتها به سمت ابتدای آنها بتن ریزی تونلها انجام می گردد (شکل ۱۴- شماره ۱). در صورتی که ارتفاع دیواره های جانبی بلند باشد، امکان احداث دو تونل پیشرو میانی بر روی دو تونل پیشرو کف نیز وجود دارد (شکل ۱۴- شماره III).

پس از احداث دیواره های جانبی، تونل پیشرو بالائی حفر می گردد. عملیات تعریض و حفر دو طرف تونل پیشرو بالائی مشابه روش بلژیکی انجام می شود. پس از تعریض سیستم نگهداری موقت نصب می گردد. قالب بندی و بتن ریزی سقف یا تاق ادامه عملیات را تشکیل می دهد. بعد از بتن ریزی سقف، برداشت خاکهای حفر قسمت میانی تا رسیدن به کف بند ادامه می یابد. بتن ریزی کف بند نیز همزمان با رسیدن به کف شروع می شود. در نهایت و در صورت لزوم و به منظور تقویت پوشش ایجاد شده می توان از پوشش های بهسازی نظیر سیمان کاری استفاده نمود (شکل ۱۵).

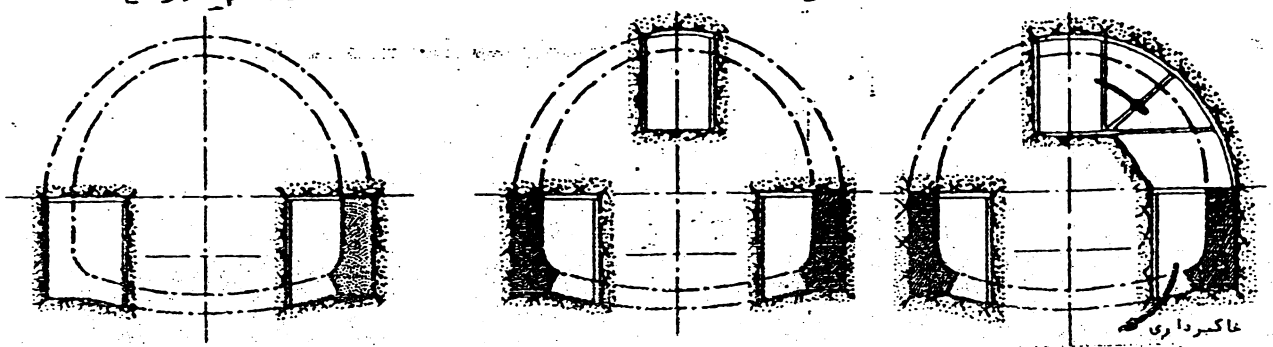
یکی از گزینه های روش آلمانی، عبارت است از حفر دو تونل پیشرو کف در دو دیواره، بتن ریزی دیواره ها، حفر تونل پیشروی بالائی، توسعه و تعریض اطراف تونل بالائی تا رسیدن به دو تونل کف، ایجاد پوشش سقف، برداشتن قسمت میانی (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- مراحل حفر بخش در روش آلمانی



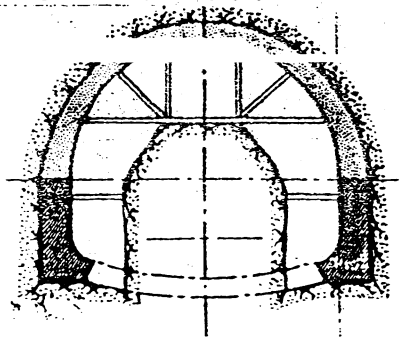
شکل ۱۵ - روش آلمانی بدون استفاده از تونلهای پیشرو میانی



- اجرای دالانهای پائین
- بتن ریزی پایه‌های کناری

- اجرای دالان بالا

- اجرای عملیات از طریق دالان بالا - تخلیه خاکها از طریق دالانهای پائین



- بتن ریزی طاق
- عملیات خاکی بخش میانی
- اجرای کف بند

شکل ۱۶ - روش آلمانی

فصل چهارم

روشهای تونلسازی : شرایط زمینهای نرم

در گذشته روشهای تونلسازی محدود بودند . به طور کلی چالزنی و آتشباری روش غالب بود، البته در زمینهای نرم روشهای حفر دستی به کار برده می شد . ماشینهای تونلسازی بحد زیادی جایگزین چالزنی و آتشباری شده اند، با این وجود روش چالزنی و آتشباری هنوز تنها روش عملی مورد کاربرد در زمینهای بسیار سخت می باشد . حفر با روشهای دستی در زمینهای نرم نیز در حد گسترده ای به کار گرفته می شود .

مقدمه

انتخاب روش تونلسازی تحت تاثیر از عوامل متعددی است که شرح زیر می باشد :

[redacted] - شرایط زمین عامل اصلی است زیرا تنها بر انتخاب روش تاثیر می گذارد، بلکه می تواند محدودیتهای عمده ای برای برخی از روشهای خاص ایجاد نماید.

(الف) زمینهای نرم - رسها ، شنها ، ماسه ها و سنگهای هوازده در حد [redacted] سنگهای مختلف به طور کلی به عنوان مصالحی که برای حفر بوسیله بارو شهای دستی، آسان هستند، طبقه بندی می شوند. البته موقعیت آنها در ارتباط با سطح الیه ای آبهای زیرزمینی و وجود مقادیر زیاد آب ممکن است آنها را به گل یا مصالح غیر مستحکم دارای شرایط جریان یافتگی[1] تبدیل نماید که برای حفر تونل و کنترل زمین مشکلات به وجود می آورند .

(ب) شرایط سنگ - مقاومت سنگها دامنه گسترده ای از سنگهای رسوبی ضعیف (لسنا) با مقاومت ۱۰ الی ۴۰ مگا پاسکال تا سنگهای آذرین سخت با مقاومت ۱۵۰ تا ۳۰۰ مگا پاسکال، در بر می گیرد. سنگهای با مقاومت پائین ممکن است از جهت سهولت حفر دارای مزیت باشند، ولی مستلزم ملاحظات خاص نگهداری هستند. برعکس سنگهای دارای مقاومت بالا از جهت حفر مشکلات بیشتری دارند، ولی به حداقل نگهداری موقت

(ج) شرایط جبهه کارهای مختلط[2] - تونلسازی در سنگهای لایه ای اغلب مواجه با جبهه کارهائی است که در

---

1 - inflow condition ; 2 - mixed face

بالاترین قسمت جبهه کار خاک یا سنگهای شبدت هوازده و در پائین ترین قسمت آن سنگ وجود دارد. این شرایط مشکلاتی را برای ماشینهای تونلسازی و تأمین وانتخاب وسائل موقت ومؤثر نگهداری به وجود می آورد.

۲- قطر تونل - کلیه انواع تونلها از تونلهای کوچک مقطع با قطر کمتر از ۱۹۰ متر تا تونلهای بزرگ مقطع با قطرهای بزرگتر از ۱۲ متر که توسط TBM حفر می شوند، مستلزم یک ارزیابی جامع و فراگیر از شرایط زمین می باشند. افزایش اندازهٔ تونل تغییراتی در مشکلات عمدهٔ خاص تونلسازی ایجاد می کند.

۳- جنبه های زیست محیطی - عملیات چالزنی وآتشباری برای حفر تونل در مناطق شهری محدود شده و در بسیاری موارد ممنوع شده است. فعالیتهای تونلسازی می تواند سطح ایستائی آبها و شبکهٔ زهکشی ها را تغییر دهد و بر سطح زمین تأثیر بگذارد. مشکل دیگری که وجود دارد مواجههٔ متناوب یا مستمر با بیرون زدن آب یا گاز در نزدیکی تونل یا حتی در طول مسیر تونل است. عوامل دیگری نظیر حرارت، رطوبت، تأثیرات فشار اتمسفر (از جمله تأثیرات هوای فشرده) می تواند اثرات عمده ای در انتخاب روش تونلسازی بگذارد.

۴- شرایط و تغییر محلی - دسترسی به نیروی انسانی ماهر، موقعیت فیزیکی ساختگاه، تأسیسات وتسهیلات زیربنائی محلی و غیره، عواملی هستند که می توانند بر انتخاب روش تأثیر بگذارند.

در زمینهای نرم به طور کلی از سپرها به عنوان یک روش وعمل استاندارد و به منظور تأمین ایمنی برای افرادی که در تونل کار می کنند و برای دستیابی به راندمان بالاتر و مؤثرتر حفر، استفاده می کنند.

سپرهای تونلسازی مطابق با روش به کار گرفته شده تغییر می کنند و طراحی می شوند، ولی کار اصلی آنها بدون تغییر مانده است. برخی از تونلهای کوچک در زمینهای نرم، بسیاری از تونلهای معدنی و تونلهائی که در سنگهای سخت حفر می شوند، بدون استفاده از سپر حفر می گردند، زیرا در چنین شرایط تونلسازی استفاده از سپرها ضرورتی ندارد.

فعالیتهای اصلی تونلسازی عبارتند از حفر زمین همراه با کنترل فوری جبهه کار تونل و زمین اطراف محیط تونل با وسایل نگهداری موقت و در پی آن جایگزاری و انتقال مواد کنده شده و نصب سیستم نگهداری دائمی.

تونلهای سپری - روشهای تونلسازی سپری به واسطهٔ موفقیتی که این روشها در حفر تونلهای زیرآبی و یا تونلهائی که در محیطهای آبدار حفر شده، به دست آوردند، رواج یافت. حفر تونل در زمینهای

نرم با استفاده از سپر توسط Marc Brunel به عنوان روشی جهت دستیابی به ایمنی مناسب در جریان حفر ونصب پوشش و آستربندی، صورت گرفت. اولین سپر توسط Brunel ابداع و در احداث تونل تایمز در سالهای ۴۵-۱۸۲۵ به کار گرفته شد؛ این اولین کاربرد سپر در تونلسازی در شرایط زیرآبی بدون استفاده از هوای فشرده بود.

دستاورد مهمی در تونلسازی سپری، طراحی اولین سپر مدور (دایره‌ای) در سال ۱۸۹۶ توسط Greathead بود که با موفقیت در جریان حفر دومین تونل در زیر رودخانهٔ تایمز به کار گرفته شد. این تونل نیز بدون استفاده از هوای فشرده حفر شد. سپر Greathead مبنای سپرهای بعدی و مشابه آنهائی است که امروزه به کار گرفته می‌شوند.

پیشرفت مهم دیگر در امر احداث تونلهای زیرآبی، کاربرد پوششهای چدنی بود که در اتصال با سپر نصب می‌شده استفاده از هوای فشرده گام بعدی در احداث موفقیت آمیز تونلهائی بود که با مشکلات جریان آب در موقعیتهای زیرآبی مواجه می‌شدند. سپرها در دستیابی به موفقیت در ساخت شاهراهها و قطارهای زیرزمینی در شهرهائی چون لندن و نیویورک به میزان زیادی مؤثر بودند. مجاری فاضلاب یا آبگرهای[1] بسیار پیچیده و گسترده بنحو موفقیت آمیزی با استفاده از روشهای سپری احداث شدند. همچنین این روشها موفقیت مهمی در جریان احداث تونلهای شاهراهی (Mayo) کسب نمودند.

شرایط زمینهائی که تونلسازی سپری در آنها به کار برده می‌شود به طور مختصر در جدول ۴-۲ آورده شده است.

مزایای تونلسازی سپری Szechy چهار مزیت عمده را برای تونلسازی سپری برمی‌شمرد:

۱- سطح مقطع تونل را می‌توان در یک مرحله به طور کامل حفر کرد.

۲- هرچند سپرها یک سیستم متحرک هستند، ولی نگهداری ثابتی را برای پیشروی تونل تأمین می‌کنند.

۳- بدلیل نصب فوری پوشش دائمی، نگهداری موقت حذف می‌شود.

۴- پیشرفتهای زیاد در امر بارگیری سنگ کنده شده، به دلیل بالا رفتن سرعت کار احداث ناشی از تونلسازی سپری.

1- Sewer

جدول ۳-۱ شرایط زمین در ارتباط با تونلسازی سپری

دسته‌بندی اصلی خاک	توضیحات
۱- خاکهای ضعیف غیر چسبنده	۱- خاکهای فاقد چسبندگی مشکلات عمده‌ای از جنبه‌ی فنی و زمان حفر با استفاده از روشهای معمولی تونلسازی در زمینهای نرم ایجاد می‌کنند. ۲- کاربرد سپر در هوای آزاد امری معمول است. ۳- سپرها امکان کنترل بهتری را بر روی فضاهائی که بعد از حفر تونل در بالای آن ایجاد می‌شود، فراهم می‌آورند. ۴- این نوع خاکها ماسه‌های روندهٔ[1]، شنهای سست و سیلت را شامل می‌شوند.
۲- خاکهای ضعیف چسبنده	۱- کار با سپرها امکان اعمال بهترین کنترل را بر روی خاکهائی که حاوی آب زیاد هستند و نیز سرعت در موقع کار سیلان پیدا می‌کنند، فراهم می‌آورند. ۲- کاربرد سپر در هوای آزاد امری عادی است، هرچند در موارد خاصی نیز هوای فشرده به کار گرفته شده است. ۳- از جملهٔ این نوع خاکها می‌توان رسهای پلاستیک نرم را برشمرد.
۳- خاکهای واقع در زیر سطح ایستابی آب	۱- خاکهای واقع در زیر سطح ایستابی و خاکهائی که تحت تأثیر فشار آب قرار دارند، موجب بروز مشکلات خاصی می‌شوند. تونلسازی سپری روشی پیشرفته برای حفر موفقیت‌آمیز تحت چنین شرایطی است. ۲- حفر تونل در زیر سطح ایستابی معمولاً مستلزم کاربرد سپر است، مگر این که زمین با تزریق دوغاب مناسب صلبیت کافی یافته باشد یا سطح آب پائین برده شده باشد. ۳- برای احداث تونل در زیر آبهای آزاد، تونلسازی سپری با هوای فشرده امری معمول است، با این وجود استثنائی وجود دارد و آن موقعی است که بین تونل و آبهای آزاد (سطح زمین) سنگ صلبی با ضخامت کافی وجود داشته باشد.

سپر باز[2]: ویژگیهای ساختاری اصلی

اجزای اصلی ساختمان یک سپر باز را می‌توان در سه قسمت تشریح نمود: بدنهٔ سپر[3]، دنبالهٔ سپر[4]، [illegible][5] سطح مقطع تونل اندکی بزرگتر می‌باشد. شکل دایره معمولترین شکل سپرها است و براحتی اجازهٔ نصب قطعات

1- running sand ; 2- open shield ; 3- body ; 4- tail ;
5- cutting edge

پوشش را می دهد. با این وجود، این شکل از سپر در جریان حفر تمایل به غلتیدن و چرخش از خود نشان می دهد، در حالی که سپرهای نعل اسبی یا قوسی شکل به هیچ وجه چنین وژگی از خود نشان نمی دهند. بیشترین تونلهای حفر شده با سپر دایره ای شکل هستند. جبهه کار باز سپر را می توان با تیرآهن و به منظور تقویت سازه و برای کنترل زمین یا مقاصد حفاری شبکه و تقسیم بندی نمود. کاربرد سپرهای باز در زمینهائی که جبهه کار ایجاد شده در آن بدون نیاز به تخته بندی یا وسائل نگهداری پایدار می ماند و یا در جاهائی که جبهه کار تونل نیاز به نگهداری جزئی با استفاده از تخته کوبی دارد، مناسب و مطلوب می باشد. سپرهای باز هم در هوای آزاد و هم در هوای فشرده عمل می کنند.

در شکل ۴-۱(الف) قسمتهای اصلی یک سپر باز و در شکل ۴-۱(ب) یک سپر بسیار بزرگ نشان داده شده است.

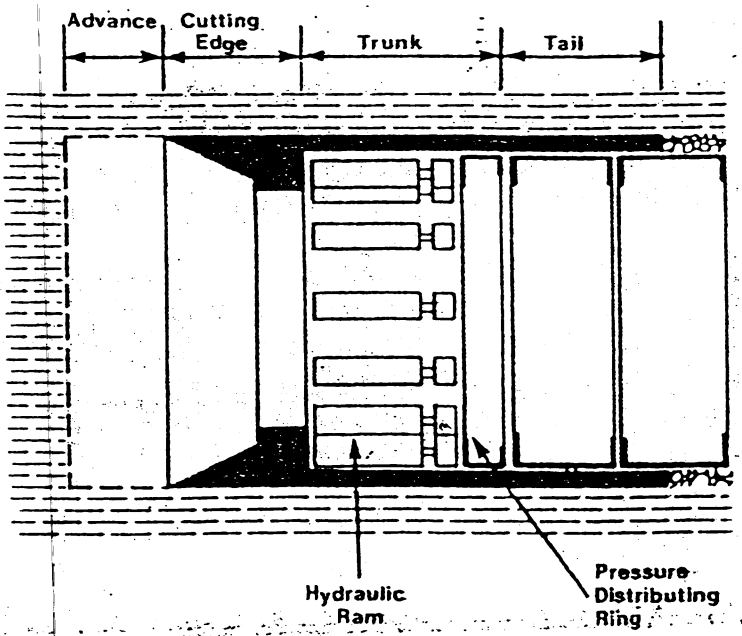
بدنهٔ سپر : این قسمت یک پوستهٔ استوانه ای شکل فولادی است که بخوبی مناسب با تسمه کشی و نهار بندی و نسبت زنی محکم شده است. در داخل بدنه سپر تجهیزاتی مانند جکها و پمپهای هیدرولیک برای عمل دادن سپر به سمت جلو قرار دارند. طول بدنهٔ سپر حدود ۲ متر است، البته این طول به قطر تونل بستگی دارد.

دنبالهٔ سپر : قسمت دنباله در پشت بدنهٔ سپر قرار دارد و فضای لازم برای نصب قطعات پیش ساخته پوشش را در مرحله آستربندی تونل فراهم می نماید. عرض دنباله به طور معمول حدود یک و نیم برابر عرض هریک از قطعات پیش ساخته پوشش است. علاوه بر این اضافه عرضی حدود ۲۵ میلیمتر بین دنباله و آخرین حلقه پوشش لازم است تا از ایجاد مشکل ناشی از کم آمدن جا در موقع تنظیم و اصلاح قطعات پوشش جلوگیری شود.

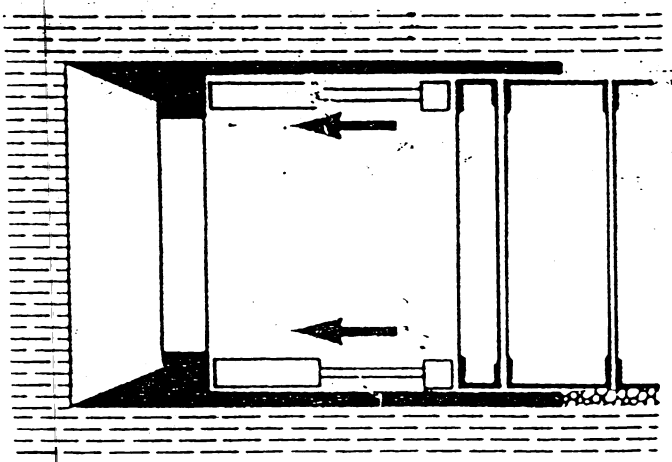
لبهٔ برشی : این قسمت لبه نفوذ کنندهٔ سپر است که با یستی با ورقهای فولادی بشدت تقویت شود. لبه برشی غالبا با یک مادهٔ مقاوم در برابر سائیش برای کمک به برش در زمینهای سخت تر، پوشش داده می شود.

[illegible]

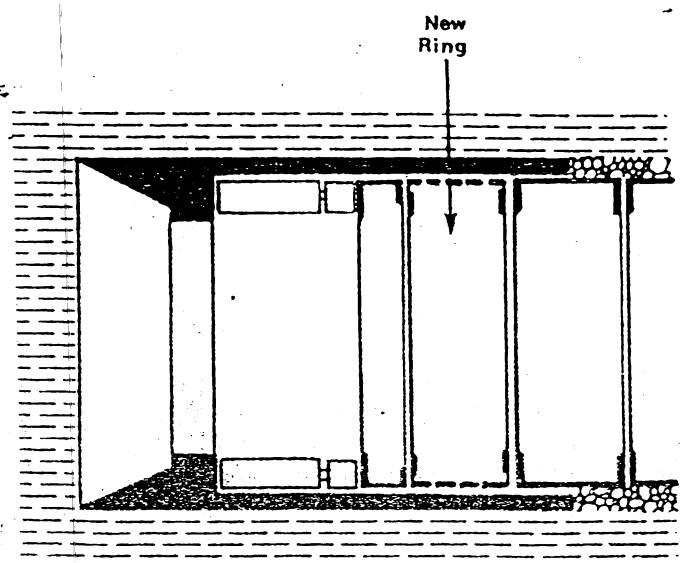
از لبه برشی سپر معمول است. البته در همه پروژه های تونلسازی سپری از کلاهکهای نصب شده بر لبه برشی استفاده نمی شود. در شکلهای ۴-۲ (الف)، (ب) و (ج) طرحهای مختلفی از سپرهای تونلسازی با سیستمهای حفار مختلف نشان داده شده است.



(۱) حفر زمین به منظور آماده کردن سپر برای پیشروی

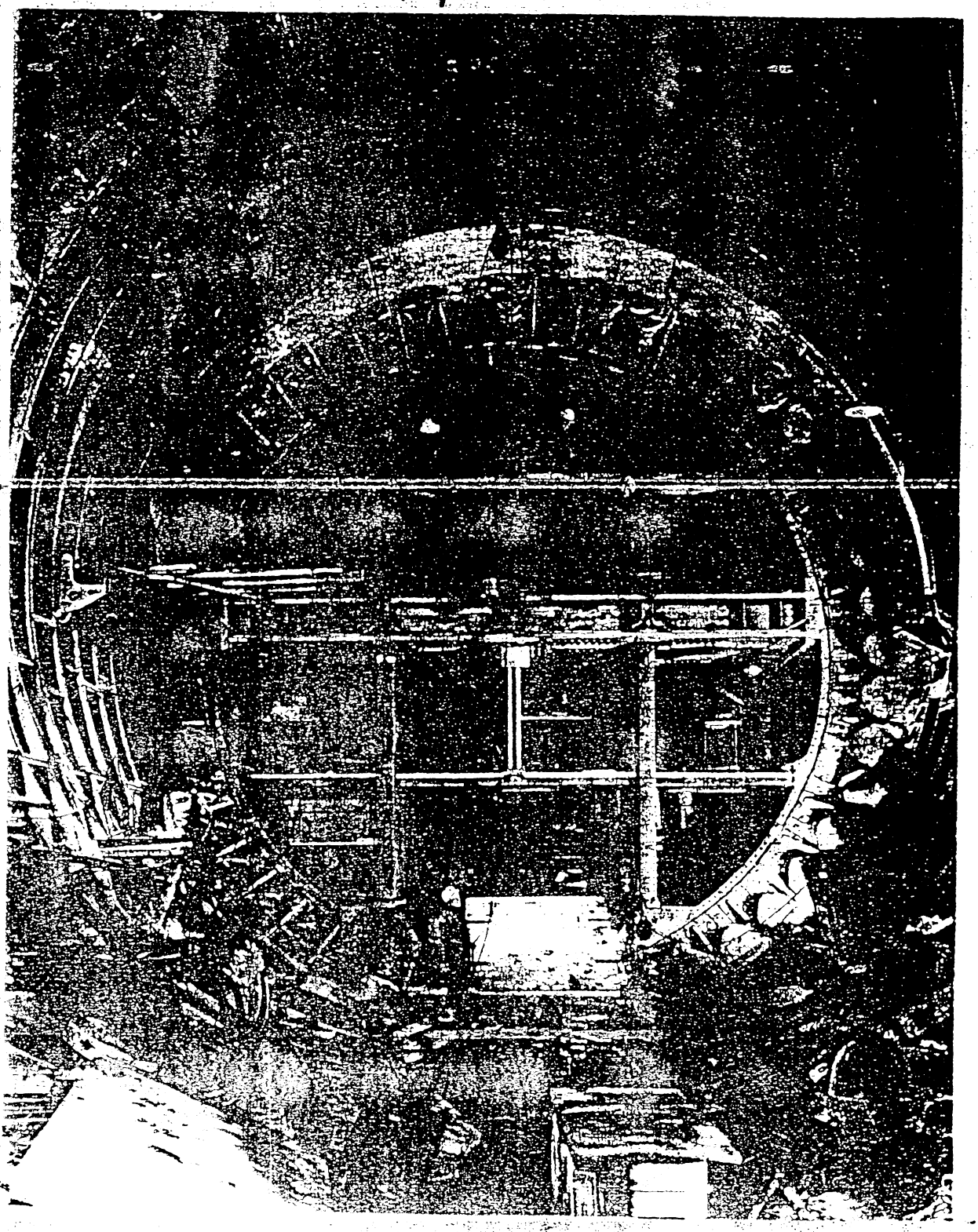


(۲) سپر با استفاده از جکهائی که به حلقه‌های نصب شده در داخل بدنه متکی هستند، در خلاف جهت پیشروی به جلو هل داده می‌شود.



(۳) بسته شدن جکهای هل دهنده و نصب حلقه بعدی قطعات نگهدارنده

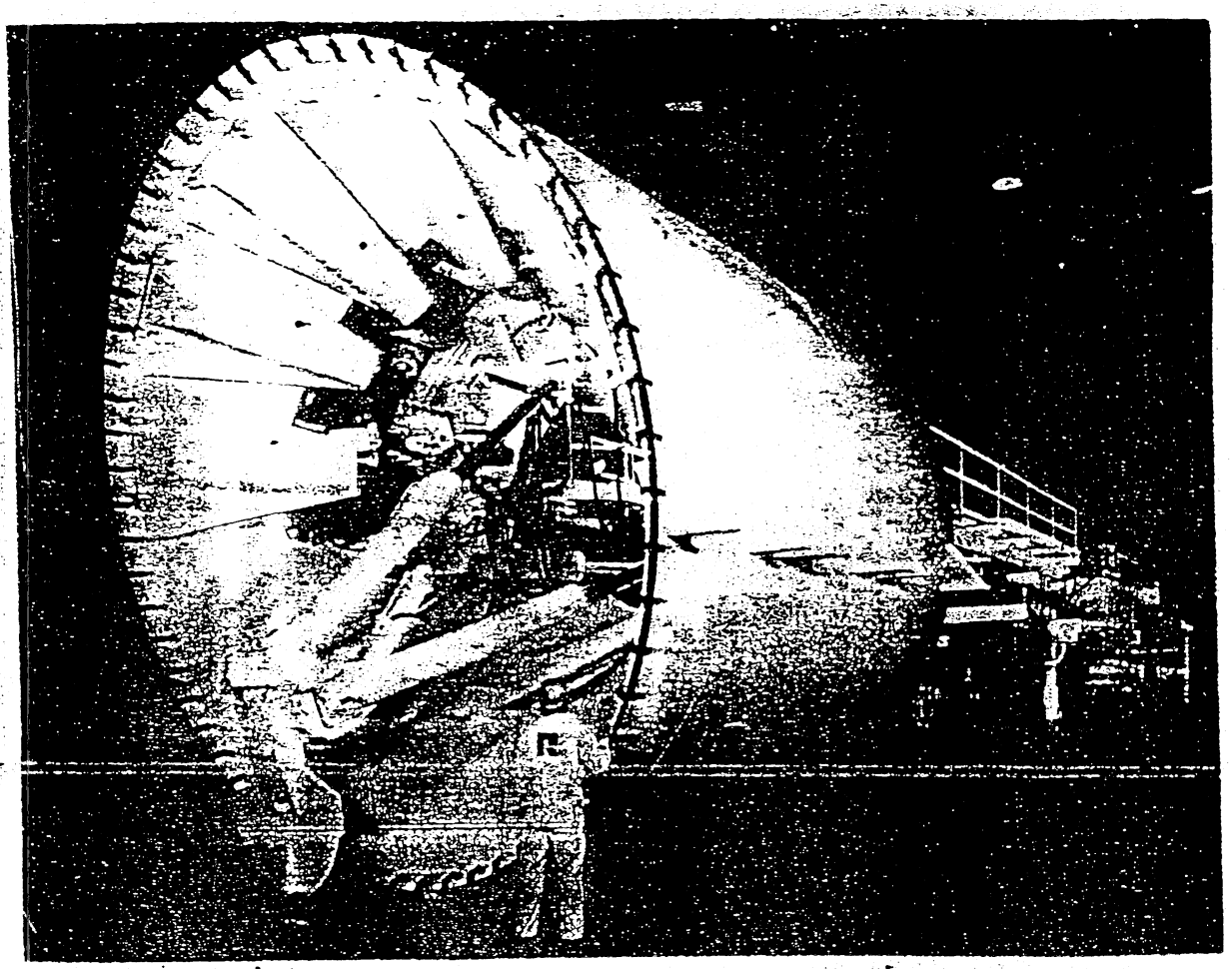
شکل ۴-۱ (الف) : قسمتهای اصلی یک سپر باز



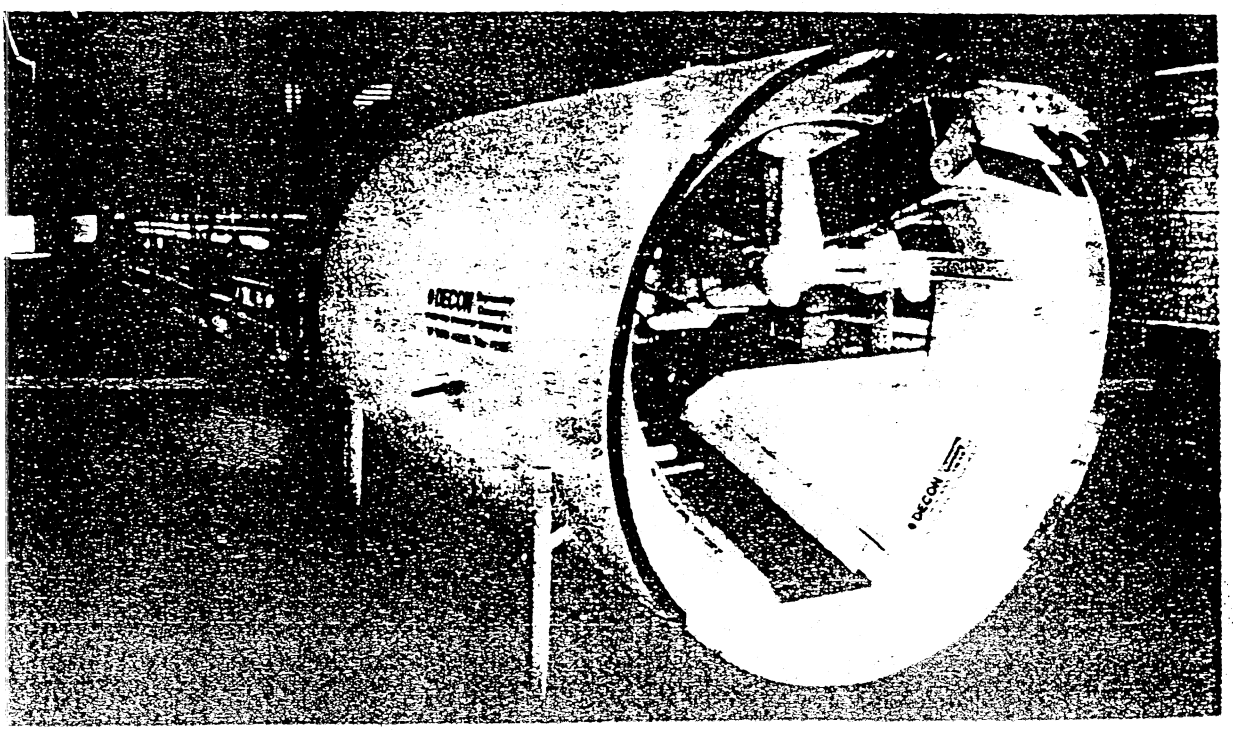
شکل ۴-۱(ب) سپر مورد استفاده در حفر تونل Tyne Road (Wutall)

مشخصات و ابعاد تونل : بزرگترین تونل زیر آبی احداث شده در انگلستان بعد از تونل مرسی (۱۹۶۶-۶۲) که بعد از ۳۰ سال تکمیل شد. طول آن ۱۹۴۶ متر و پوشش آن قطعات چدنی است. قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۹/۱۵۲ متر

وجود داشت. حداقل پوشش سنگی در بالای تاج تونل نسبت به کف رود خانه ۵ متر بوده است.



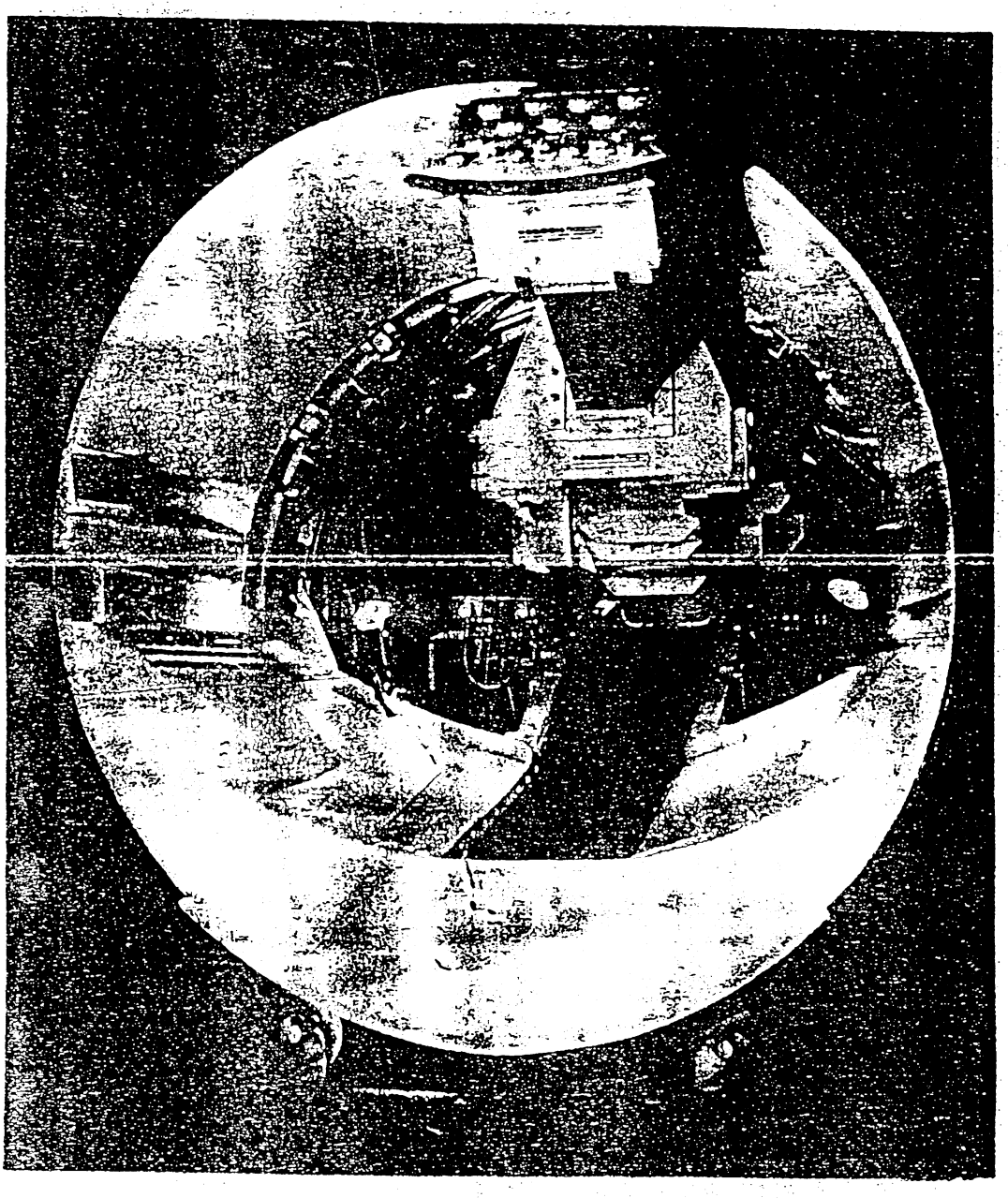
(الف) سپر توونلسازی در زمینهای سست (نرم) (Robbins)



(ب) سپر توونلسازی در زمینهای سست (Decon)

قطعات [illegible] چرخهای توونلسازی در زمینهای [illegible]

حفر مختلف



شکل ۴-۲(ج) : سپر تونلسازی مخصوص عملیات pipe jacking با قطر خارجی ۱٫۸ متر. این سیستم درضمن دارای یک بازوی حفار نصب شده ۱۳ تنی می باشد.

سپرهای بسته و نیم بسته

در شرایطی که زمین بسیار سست باشد و با رس نرم، سیلت یا ماسه های روان مواجه شوند، درعمل استفاده از سپرهای بسته امری نسبتاً معمول است. پیشانی سپر با یک صفحه فولادی صلب بسته می شود، البته بر روی این ورقهٔ فولادی دریچه هائی تعبیه شده است که امکان انتقال خاک حفر شده [illegible] فراهم می آورد. این دریچه ها به صورت گروهی تعبیه شده اند.

سپرهای نیم بسته گهگاه در عملیات حفر تونل در شرایط نسبتاً مطلوب نظیر زمینهای خشک یا آبگشی شده به کار برده می‌شود. در مناطق کم عمق (که روش ترانشه باز مجاز نیست) از تکنیک سپر نیم بسته استفاده می‌شود و این سپر توسط تیرآهنهای موقتی که بر روی پایه‌های فولادی یا دیواره‌های بتنی قرار گرفته است، نگهداری می‌شود.

جنبه‌های خاص تونلسازی سپری

Mayo جنبه‌های مختلف تونلسازی سپری را مورد بحث قرار داده است. سپرها توسط جکهای هیدرولیک که در اطراف تونل (سپر) نصب شده‌اند، به جلو هل داده می‌شوند. این جکها باید حداقل ظرفیت فشار دهندگی یا حداقل قدرت هل دهندگی‌ای برابر ۷۲ تن بر متر مربع جبهه کار تونل داشته باشند.

معمولاً در داخل سپرها، جکهای به منظور تخته بندی کردن سینه کار تونل تعبیه می‌شود. جکهای صفحه‌ای نیز اغلب برای ایجاد مسکوی کار در داخل سپرها تعبیه می‌شوند که تعداد و اندازهٔ آنها به ابعاد تونل بستگی دارد.

یک قسمت مهم سپر، بازوئی است که قطعات (پیش ساخته) پوشش را تلبید می‌کند و در بخشهای مختلف محیط تونل قرار می‌دهد تا پس از آن با پیچها محکم شوند.

یک دروازه گیر لاستیکی به طور معمول در پشت سپر نصب می‌شود که از ورود خاک، شن، دوغاب و آب جمع آوری شده از دیواره‌ها به داخل فضای کاری سپر جلوگیری می‌کند.

فضای خالی دنباله (از آنجا که قطر لبهٔ برشی کمی بیشتر از قطر بدنه سپر است، بعد از نصب قطعات پوشش بین دیوارهٔ تونل و بدنه خارجی پوشش یک حلقه یا فضای خالی به وجود می‌آید - مترجم) به منظور کنترل و نگهداری مؤثر زمین، توسط شن و یا تزریق دوغاب سیمان پر شود.

مقدمات تونلسازی سپری - یک محفظهٔ فولادی (فضای مناسب) را برای حفر و شروع عملیات تونلسازی آماده می‌نماید که با ستونهای ورقه‌ای فولادی ساخته می‌شود. یک سقف بتنی پایهٔ و فونداسیون محلی برای پوشش موقت اولین مرحله به دست می‌دهد، در عین حال حصار ستون ورقه‌ای فولادی به عنوان یک تکیه‌گاه مناسب برای جکهای هل دهنده عمل می‌نماید.

چنانچه ممکن است موثرترین راه برای ساختن فضاهای زیرزمینی و ترمی به حق یا موفقیت شروع برای تونلسازی سپری، بویژه برای تونلهای زیر آبی می‌باشند. روشهای کاری که استفاده از هوای فشرده لازم

الزامی باشد، جاههای قائم امکان نصب و کارگذاشتن تسهیلات لازم برای محبوس کردن هوای فشرده را فراهم می آورند.

کنترل سپر - Mayo جنبه های مختلف اجرائی تونلسازی سپری را با توجه به تجاربش در امریکای شمالی مورد بحث قرارداده و نحوهٔ پیشروی و هدایت سپرها را بیان داشته است. وی اظهار می دارد که پوزهٔ بیشتر سپرها سنگین هستند و در نتیجه در حین کار تمایل دستگاه تحت تاثیر وزن پوزه به پائین افتادن نسبت به افق تونل می باشد، البته جکهای هل دهنده می توانند عمل مناسب برای اصلاح و هدایت صحیح سپر را ممکن سازند. تمایل سپرهای مدور به چرخیدن در حین کار را می توان با اخذ اقدامات خاص نظیر پره های جانبی قابل حرکت، گوه های قابل جمع شدن، صفحات قابل تنظیم، استفاده از جکهای اضافی و کلیه راههائی که امکان کنترل هر خش سپر (استوانه) را با شیوه های مختلف می دهند، رفع نمود.

حفر - شنها و ماسه های روان در هنگام حفر تونل مستلزم سپرهای کلاهکی[1] و کنترل جبهه کار تونل می باشند. جکهای مخصوص تخته بندی و تخته بندی به طور معمول برای کنترل فرآیند حفر به کار گرفته می شوند. روشهای کنترل پیچیده تری نیز به کار گرفته می شوند. مشکل اصلی جلوگیری از جریان یافتن شن و ماسه های روان به داخل تونل است که معمولاً در شرایط آبدار بودن این مشکل پیچیده تر می شود و ممکن است پیشرفت را در زمان پیش بردن تخته بندی جبهه کار بسیار کند نماید.

در صورتی که پائین بردن سطح الیتابی از طریق چاه امکانپذیر نباشد، در نتیجه عملیات هوای فشرده یا تزریق شیمیائی و یا دیگر شکلهای صلب سازی[2] زمین از سطح زمین یا از داخل سپرها نیز ممکن است مدنظر قرار بگیرد. انتقال یا جابجائی شن و ماسه در جریان حفر نسبتاً ساده است و روشهای مکانیزه متعددی برای این منظور به کار برده می شود، هرچند روشهای دستی در تونلهای کوچک هنوز عمومیت دارد.

رس سخت تا خیلی سخت، شن و ماسه هائی که به صورت ضعیف سیمانه شده اند، سیلت خشک یا نرم بسهولت با استفاده از بیلچه های مخصوص کندن رس که با هوای فشرده کار می کنند، کنده می شوند. برای انتقال خرده سنگها و مواد کنده شده اغلب از یک کج بیل هیدرولیکی[3] استفاده می شود. این نوع زمینها برای حفر مکانیزه با استفاده از [illegible] (به نقاله) یا با تمام رخ[4] مناسب است، البته اخذ تصمیم در این مورد به اندازه و [illegible] تونل، وجوه اقتصادی برای پذیرش چنین روشهائی بستگی دارد.

1-hooded shield, 2-solidification, 3-hydraulic backhoe, 4-full face m.

نشستها - وقوع نشست در ارتباط با تونلهائی که توسط سپر حفر می‌شوند، به طور اساسی به عوامل زیر بستگی دارد :

۱- خوب پر نشدن فضای خالی دنباله (منظور فضای اضافی بین جداره تونل و بدنه دنباله سپر است).

۲- افت زمین در جبهه کار تونل.

۳- کنترل ضعیف زمین در سپر بدلائلی نظیر تأخیر در نگهداری و غیره

۴- جنبه‌های غیر مستقیم نظیر خسارات عمده آب که موجب تشکیل حفره و ریزشهای موضعی بعدی زمین می‌شود.

شرایط زمین می‌تواند مشخصاتی از جنبه کنترل زمین در جریان حفر ایجاد نماید و در نتیجه هرچند عمل تونلسازی خوب اجرا شده باشد، برخی نشستها ممکن است با این وجود اجتناب ناپذیر باشند. در بین دو عامل تحت فشار در پشت پوشش دائمی احتمالاً مؤثرترین کار احتیاطی قبل از حفر برای کاهش نشست ناشی از تونلسازی می‌باشد.

پوشش اصلی تونلهای سپری - Hall کاربرد پوششهائی از قطعات چدنی ریخته گری شده را مورد بحث قرار داده و اظهار داشته است که در شرایط زمینهای نرم [redacted] بسیار خوب و رضایت بخش عمل کرده اند. قطعات چدنی بویژه آنهائی که در برابر خوردگی[1] مقاوم هستند و باروام می‌باشند علاوه بر نفوذ ناپذیر بودن، تحمل خوب تنش فشاری و سهولت نسبی جابجا کردن و نصب، مزایای زیادی به عنوان پوشش تونل دارند.

Mayo اظهار داشته است که پوشش اصلی در تونلهای حفر شده با سپر برای دو منظور عمده الزامی است :

۱- کنترل زمین و تأمین نگهداری تونل.

۲- تأمین تکیه گاهی برای سپر تا جکهای هل دهنده با اتکاء به آنها بتوانند سپر را به جلو هل دهند.

پوشش معمول قطعات چدنی است، هرچند پایه‌های فولادی، صفحات فولادی و قطعات پیش ساخته بتنی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

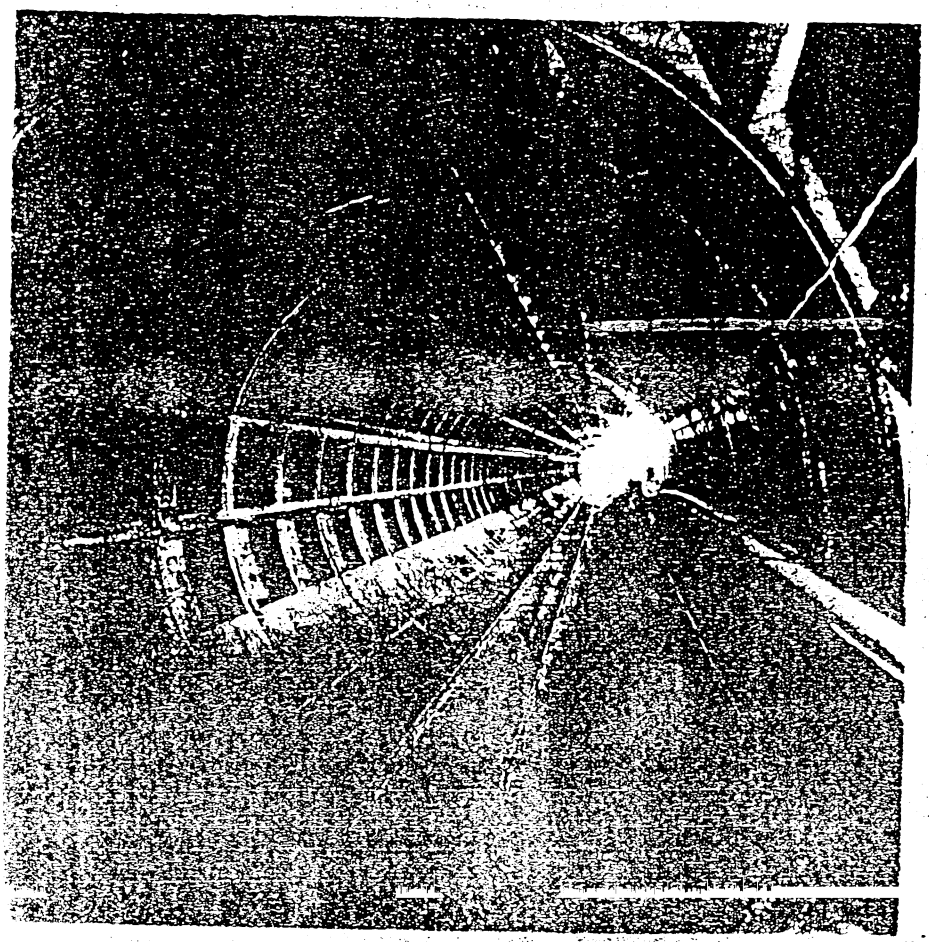
Mayo به عمومیت کاربرد قطعات چدنی و پوششهای فولادی پرس شده در ایالات متحده اشاره کرده است [redacted] تأکید می‌کند که پوشش با قطعات پیش ساخته بتنی، بدلیل سنگینی قطعات و عدم آب بندی و نیاز به پوشش ثانویه، تکنیک

1- corrosion

در ایالات متحده مورد استفاده وسیع یافته است. بهرحال، احداث مترو در اروپا، مکزیک و ژاپن که با قطعات پیش ساختهٔ بتنی پوشش و سپس با واشرهای neoprene آب بندی شده اند، نتایج بسیار رضایت بخشی به دست داده اند. قطعات پیش ساخته بتنی مانند قطعات چدنی نصب و سپس به یکدیگر پیچ می شوند. وی همچنین اظهار می دارد که اگر جریان آب جزئی باشد (کمتر از ۱۵ لیتر در دقیقه به ازای ۱۰۰ متر طول تونل) در ساختمان مترو ها نیازی به پوشش ثانویه نمی باشد.

درزگیری پوششهای قطعه ای در شرایطی که زمین تحت فشار زیاد آب قرار گرفته باشد، مستلزم توجه خاص می باشد. درزگیری و آب بندی با سرب در پوشش با قطعات چدنی و فولادی مؤثر بوده است. در پوشش با قطعات پیش ساختهٔ بتنی، درزگیری با استفاده از تکنیکهای مختلفی منجمله پاشیدن یا تزریق ترکیبات صمغی[1] و استفاده از neoprene و مواد مشابه، به طور موفقیت آمیزی جواب داده است. neoprene این فرصت را دارد که با تبدیل به واشرهای فشرده[2] بسهولت در پوشش به کار گرفته می شود.

شکل ۴-۴ تونلی با قطر داخلی ۲٫۴ متر که با قطعات پیش ساخته بتنی و پیچ کردن آنها به هم پوشش شده است را نشان می دهد.



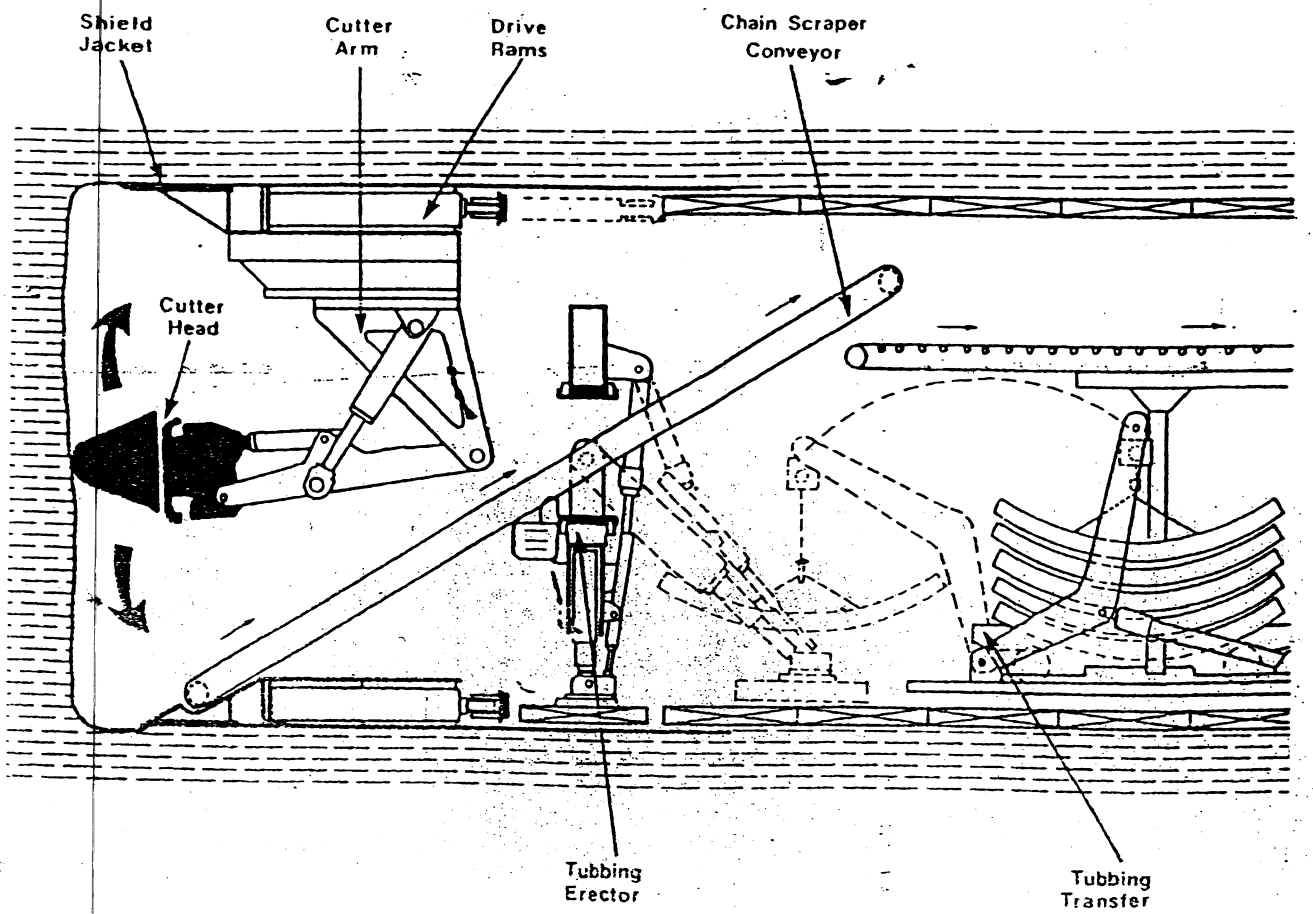
شکل ۴-۴ : پوشش تونل Buchan با قطعات پیش ساختهٔ بتنی پیچ شده با قطر داخلی ۲٫۳ متر

masitic ; 2- compressible gasket

سپرهای تونلسازی مرسوم

Yoshikawa سپرهای تونلسازی را به دو دسته "مرسوم" و "خاص" دسته بندی کرده است. جدول ۴-۲ ویژگیهای کلی مربوط به سپرهای مرسوم را نشان می دهد. وی استفاده روبه گسترش تونلسازی زیرزمینی در ژاپن برای پروژه های مختلف از بوتره متروء فاضلاب و دیگر شبکه های عام المنفعه نظیر شبکه های آب و برق را گوشزد نموده است. سپرهای مرسوم را می توان در شرایط گسترده و میزان متغیری از حفر مکانیزه، مانند آنچه در جدول ۴-۲ آورده شده است، به کار برد.

در شکل ۴-۵ یک سپر باز که یک کله برنده دورانی آویزان از سپر برای حفر مکانیزه در آن بکار گرفته شده است، نشان داده شده است. این روش تونلسازی بطور خاص برای استفاده در زمینهای نسبتاً خرد شده طراحی گردیده بود. در این سیستم قسمتها و تجهیزات مختلف که کارهای گوناگونی انجام می دهند به صورتی جمع و جور قرار گرفته اند و امکان جابجائی و نصب سهل و راحت قطعات پیش ساخته بتنی نگهداری توسط بازوی نصاب مکانیکی را فراهم می آورند.



شکل ۴-۵ : سپر باز مجهز به سیستم حفر مکانیزه و بازوی جابجاکننده و نصاب قطعات بتنی پیش ساخته نگهداری

جدول ۴-۲ : انواع سپرهای تونلسازی مرسوم

نوع	توضیحات
دستی: ۱- نوع باز	۱- مناسب برای خاکهای سخت غیرریزشی یا خاکهای نیمه سخت.
	۲- مجهز با وسایل نگهداری جبهه کار و حکمهائی برای نگهداری آن.
	۳- تجهیزات خاصی نظیر کلاهک متحرک، سکوهای متحرک و غیره، درصورتی که شرایط استفاده از آنها را ایجاب کند، در دسترس است.
۲- نوع بسته	۱- مناسب برای خاکهای سیلتی و نرم حاوی مقدار نسبتاً کمی ماسه.
	۲- میزان مواد حفر شده با تنظیم نسبت دهانه به نسبت سرعت تونلسازی کنترل می‌شود.
نیمه مکانیزه	۱- معمولترین نوع نیمه مکانیزه که مرحله کاملتری از نوع باز دستی است، سپری می‌باشد که با یک بازو و صندوقه کج بیلی مجهز است که بنحو موفقیت آمیزی زمینهای خاکی را با شرایط مختلف می‌تراشد و بارگیری می‌کند.
مکانیزه	۱- پیشانی برشی دورانی تمام رخ یکی از انواع معمول است.
	۲- این نوع اساساً نوع تمام مکانیزهٔ انواع باز و بستهٔ دستی است.

تذکرات:

۱- تونلسازی با استفاده از هوای فشرده اغلب در ارتباط با انواع سپرهای مرسوم به منظور کنترل یا جلوگیری از [illegible] شدن آب و خاک در داخل جبهه کار استفاده می‌شود.

۲- تونلهای سپری با قطر خارجی ۱ را تا ۱۲ متر بنحو موفقیت آمیزی با این روشها حفر شده‌اند.

روشهای تونلسازی سپری خاص

روشهای تونلسازی سپری مرسوم می‌تواند به دلیل نیاز به چوب بستکاری فشرده و نزدیک بهم در جبهه کار مواجه با محدودیت شود. عدم توجه به تأمین نگهداری کافی در جبهه کار تونل می‌تواند موجب حرکت کردن زمین و نشست همراه با خسارت احتمالی به تأسیسات و تسهیلات سطحی شود. استفاده از هوای فشرده به طور کلی در مواقعی که تونلسازی در زیر سطح ایستابی صورت می‌گیرد، با شکوی مشابهی هست، هرچند فرآیندهای پیچیده‌ای نظیر حفر پائین آوردن سطح [illegible] مزریق دوغاب و انجماد[3] [illegible] موثری در کنترل موقت جریان ناشی آب

1- ground treatment , 2- groundwater lowering , 3- freezing

ومشکلات ناشی از آن در پروژه های تونلسازی سپری به حل می آورند. این ملاحظات صنعت تونلسازی را به سمت نیاز به ماشینی برای تونلسازی در زمینهای غیرچسبنده هم زیر سطح ایستابی و هم در بالای آن سوق داد، البته بدون این که از شرایط محیطی متأثر شود و علاوه براین، بدون این که از هوای فشرده استفاده گردد.

ماشین تونلسازی بنتونیتی، نگهداری جبهه کار را توسط دوغاب thixotropic تأمین می کند. این ماشین قادر است در شرایطی که قبلاً برای کنترل جابجائی زمین در خاکهای دانه ای واقع در بالا و زیر سطح ایستابی نیاز به تمهیدات و اقدامات ویژه بود، نتیجه موفقیت آمیز تونل احداث نماید.

تونلسازی سپری دوغابی: مشخصه اساسی روشی که به عنوان تونلسازی سپری دوغابی به آن اشاره می شود عبارت است از تزریق مخلوط دوغاب تحت فشار به داخل آبادی یا فضای واقع در جلوی جبهه کار. در نتیجه دوغاب در خاکهای واقع در جلوی جبهه کار تونل نفوذ می کند و درجه رضایت بخشی خاکها را مستحکم می کند که برای حفر توسط کار برش دهنده[1] ماشین مناسب باشد. دوغاب و مواد کنده شده به صورت معلق (در نقطه مقابل محل تزریق دوغاب) دوغاب از بالای جبهه کار تزریق و از پائین جبهه کار جمع آوری می شود. مخلوط جمع آوری می شود تا تلاطم و تحرک باعث شود که حالت سیالیت کافی و مناسب برای پمپاژ (مواد کنده شده یا ذرات گل دوغاب رسوب نکند و آب آن جدا نگردد - تزریم) دوغاب همراه با ذرات خاک و قلوه سنگ[2] در صورت وجود، به بیرون از تونل فراهم شود. بنتونیت پس از بازیابی به جبهه کار برمی گردد، البته در انواع ماشینهای دیگر که از دوغابهای غیر بنتونیتی نظیر رس thixotropic ممکن است استفاده شود، فقط آب می تواند بازیابی شود.

سپرهای دوغابی تحت فشار برای ماسه و شن و ماسه های اشباع از آب مناسب هستند و هلن است با جعبه سنگی و تخلیه کننده برای جابجائی و جداکردن قلوه سنگها از دوغاب مجهز شده باشد. دروازه گیرهای مخصوصی بین سر برش دهنده و بدنه ماشین به منظور آب بندی و جلوگیری از خروج دوغاب یا گل و آب قرار داده می شود. سرمته های برشی سخت[3] که معمولاً از جنس کاربید تنگستن هستند، بگونه ای بر روی صفحه برشی تعبیه می شوند که بتوان نیاز به منظور پرسنل در جلوی صفحه برشی قابل تعویض باشند. با استفاده

1- cutter head ; 2- cobble ; 3- cutting bits

از سنسور[1] می‌توان به وجود نیرش در جبهه کار پی برد و اینها مفید بودن خود را در نشان دادن نیاز به انجام اقدامی جهت کنترل توسعه حفره بین زمین و سپر به اثبات رسانده اند. تصویر ۴-۶ مقطع سپر دوغابی را نشان می‌دهد.

سپر تعادلی با فشار زمین[2] - این نوع روش سپری در تونلسازی در زمینهای نرم واقع در زیر سطح ایستابی و بدون استفاده از دوغاب به کار گرفته شد. یک صفحه برشی دورانی که با سرته یا دندانه های چنگکی[3] مجهز هستند، قسمت جلوئی ماشین سپر را تشکیل می دهند. مواد کنده شده جمع آوری می‌شوند و در فضا یا اتاق خاصی که بلافاصله در پشت صفحهٔ برشی قرار دارد، فشرده می‌شوند و تشکیل یک پوشش را می دهند که نگهداری جبهه کار را تأمین می‌کند. این مواد فرد و فشرده شده در دهنهٔ ورود آب که برپایداری جبهه کار تونل تأثیر می گذارد، کنترل می‌کند.

مواد فشرده شده هر چند وقت یکبار توسط یک نقاله مارپیچ یا روشهای مشابه از تیغهٔ پشت اتاق دیگر تخلیه و به سیستم انتقال ریخته می‌شوند. از آنجائیکه در این روش از آب یا دوغاب استفاده نمی‌شود، انتقال باطله نسبتاً راحت و عملیات تمیز است.

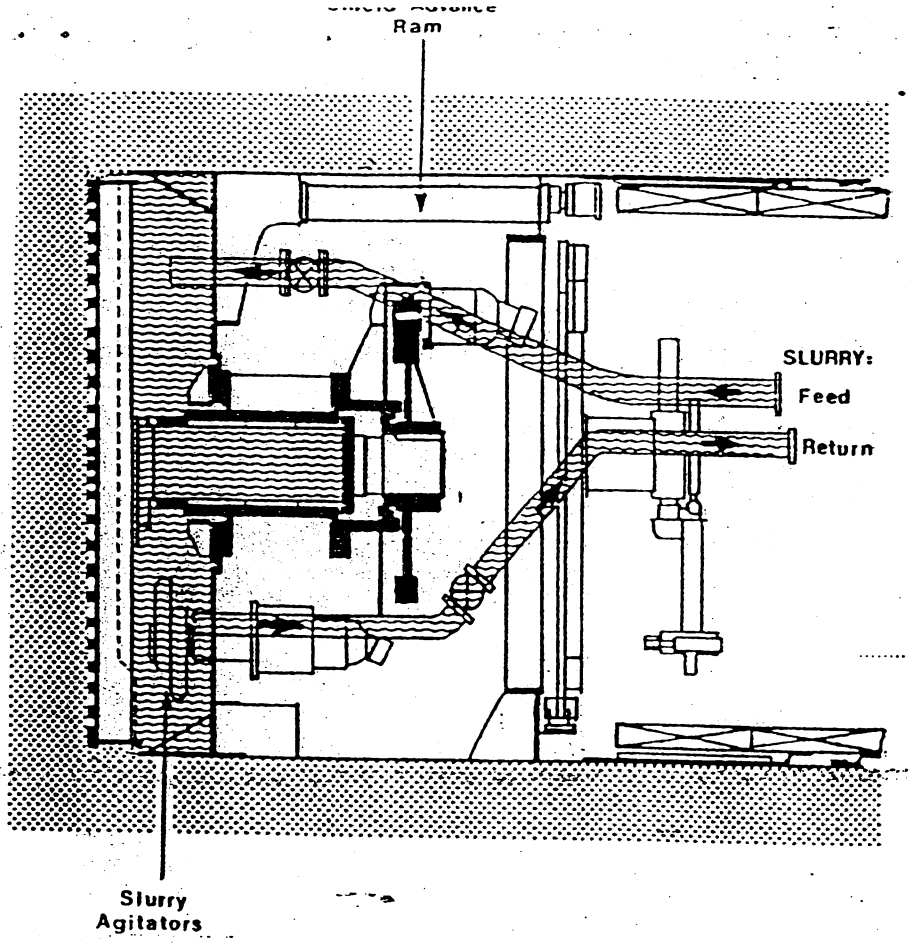
صفحه برشی همیشه در جریان عملیات با خاک دیوارهٔ جبهه کار پر می باشد و در نتیجه به صورت یک صفحه صلب بر دیواره و جبهه کار تونل فشار وارد می آورد که مانع از ریزش زمین می شود و این به افزایش پایداری جبهه کار کمک می‌کند.

این روش در حفر موفقیت آمیز تونل اصلی فاضلاب تولکیوی شرقی با قطر ۸/۱۴۸ متر در زمینهای نرم و بدون استفاده از هوای فشرده به کار گرفته شد. علاوه بر این، نشست یا خسارتی در سطح زمین در طول مسیری که تونلسازی صورت گرفته بود، وارد نیامد. از ویژگیهای عمدهٔ این روش، دستیابی به تونلسازی دقیق و این، و سهولت کنترل و هدایت سپر که با یک نفر پرسنل عمل می‌کرد و در نتیجه کاهش نیروی انسانی، زمان و هزینه گزارش شده است.

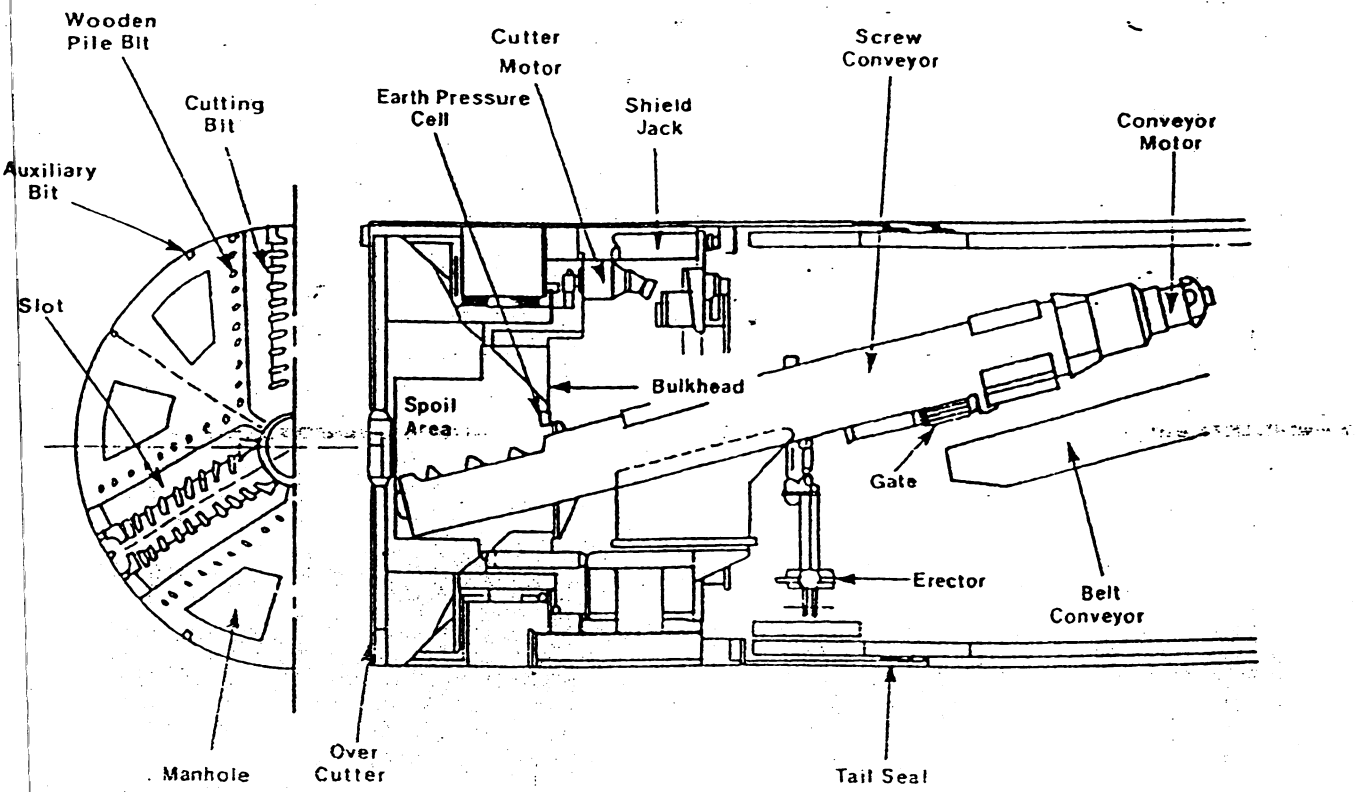
مقطع سپر تعادلی یا متعادل با فشار زمین در شکل ۴-۷ نشان داده شده است (قطر خارجی صفحه ۳/۷ متر).

سپرهای گلی[4] - با تزریق گل به اتاقک خاصی که مواد کنده شده در آن فشرده می‌شدند، روش سپر تعادلی توسعه یافت و متکامل شد و این امر بعین تزریق گل باعث گردید که بتوان این روش را برای تونلسازی در دامنه

1- sensor ; 2- earth pressure bolance shield ; 3- drag picks ;
4- slime shields



شکل ۴-۶ : قسمتهای اصلی دستگاه سپر دوغابی



شکل ۴-۷ : سپر تعادلی یا متعادل با فشار زمین

گسترده تری از شرایط زمین به طور موفقیت آمیز به کار برد. از فرتیهای عمدهٔ استفاده از گل، کاهش ... در صفحهٔ برشی است، و این امر امکان حفر تونل با قطرهای بزرگ را فراهم می آورد.

در جائی که خاکهای ماسه ای (ماسه بادی) همراه با مقدار نسبتاً کمی سیلت و رس وجود داشته باشد، چنین خاکهائی ممکن است مشکلاتی در اثر تاقف مخصوص فشرده شدن مواد خرد شده به صورت جریان یا فتگی پلاستیکی بروز دهند و این امر می تواند مسائلی در رابطه با پیشروی سپر ایجاد کند. برعکس در شرایطی که فشار آب زیرزمینی بالا باشد، اثر کنترل ضعیف ماسه های رونده[1] و آب در طول نقاله های مارپیچی می تواند منجر به ریزش جبههٔ کار گردد. افزودن گل تحت چنین شرایطی سهم عمده ای در بالابردن کارائی عملیاتی سپر و افزایش پایداری جبههٔ کار دارد.

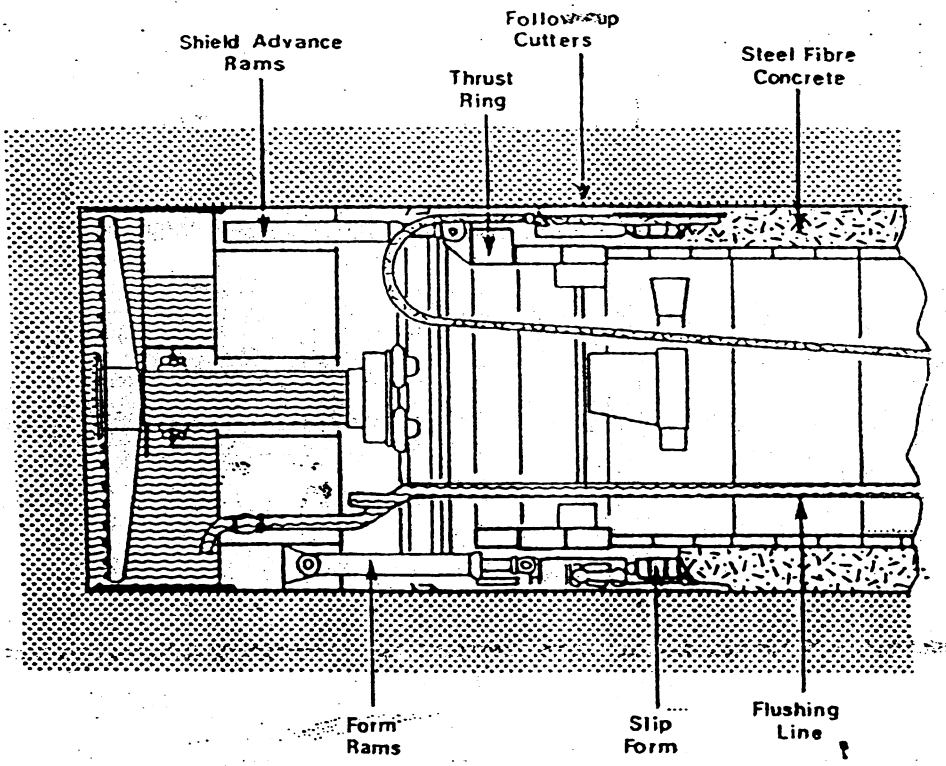
معایر پیشرفتها در سپر و تونلسازی سپری - یک پیشرفت جالب توجه عملیات سپری تمام مکانیزه همزمان با قرار دادن "نگهدارنده های بتن فیبری یا رشته ای فولادی"[2] در آلمان غربی است (شکل ۴-۸). بدین ترتیب با جای دادن بتن فیبری فولادی در پشت مجموعه های اولیه حلقه های نگهداری (حلقه های نگهداری ایجاد شده با قطعات پیش ساخته) یک پوشش بسیار مستحکم به وجود می آید.

سپر آبی[3] Wayss و Freytag و ماشینهای سپری جت آبی[4] که بسیار موفق بوده اند سپر آب بندی و درزه گیری شده اند، سهم عمده ای در تونلسازی موفقیت آمیز در شرایط مشکل و سخت زمین دارا و یا داشته اند. در ماشین Priestley/Nuttal از درزه گیر یا آب بندهای کشی قابل یاد کردن استفاده شده است. طراحی آب بند دنباله سپر و کار آنها نقش عمده ای در عمل موفقیت آمیز ماشینهای تونلسازی و سپرهائی که از دوغاب استفاده می کنند، ایفا می نماید.

در سپر آبی، با لشتکی[5] به منظور نگه داشتن فشار مثبت در جبههٔ کار به کار گرفته شده است. سپر جت آبی دارای نازلهای[6] فشار بالائی در محیط تونل است که در حالی که جتهای آب بسیار قوی، آب را بر جبههٔ کار تونل به طور مستقیم می پاشند، آنها نوسان می کنند.

جابجائی قلوه سنگها و قلوه سنگهای ایجاد شده یکی از مشکلات سپرهای دوغابی و دیگر انواع ماشینهای تونلسازی است که فشار فعالی بر جبههٔ کار اعمال می کرد. در نسل حاضر توجه طراحان برای ایجاد سهولت و تسهیل جابجائی قلوه ها توسط ماشین [illegible] است.

1-running sand ; 2-steel fibre concrete support ; 3-hydroshield ; 4-hydrojet s.m. ; 5-cushion ; 6-nozzle



شکل ۴-۸ : عملیات سپری تمام مکانیزه که همزمان با حفر نگهدارنده های بتنی فیبری فولادی را جای می دهد .

لوله گذاری[11]

در فرآیند لوله گذاری لوله های بتنی یا فولادی همزمان با حفر به داخل سپر جلو رانده می شوند. برای این کار نیروی افقی هل دهنده توسط جکهائی که به یک مانع یا دیواره ٔ قائم تکیه داده شده است به لوله ها اعمال می گردد. جکهای هیدرولیک با ظرفیت بسیار بالا ، لوله ها را به سمت جلو هل می دهند. حفر تونل می تواند با روشهای دستی یا ماشینی صورت گیرد. سپرهای لوله گذار دارای تسهیلات یا وسائل کنترل مسیر هستند.

مزایای اصلی لوله گذاری در مقایسه با روشهای مرسوم احداث تونلهای کوچک قابل مقایسه عبارت است از : استحکام سازه ، جلوگیری از ورود آب به تونل ، وجود درزه های کمتر ، انعطاف پذیری سیستم ، کاهش ولسیک نشست ، عدم لزوم پوشش ثانویه ، تأمین مشخصات جریان یا خوب.

کاربردها - کاربردهای معمول لوله گذاری عبارتند از : احداث تونلهای فاضلاب جدید ، تعویض و پوشش مجدد تونلهای فاضلاب و گاز و آب ، خطوط لوله نفت ، تونلهای خدمات رسانی برق و ارتباطات از راه دور ، آبگذر[12] ، پیاده روهای زیر زمینی ، پیاده روهای حواشی جاده ها و پلها .

1- Pipe jacking ; 2- culvert

لوله گذاری بنحو موفقیت آمیزی برای ماشین روهای زیرزمینی، قطارهای زیرزمینی، کانالها، ساختمانها و Airfields و جاهائی که ایجاد ترانشه در مناطق شهری تخریبهای سطحی غیرقابل قبول ایجاد می کند، به کار گرفته شده است. مقاطع مستطیل شکل را نیز می توان لوله گذاری کرد، به عنوان مثال تونلی با سطح مقطع (اثر) ۹/۷ × ۹/۷ در انگلستان لوله گذاری شده است.

عملیات اصلی - این روش شامل نصب پوشش‌های اصلی با قطر ۹۰۰mm و بیشتر می شود (شکل ۴-۹). بیشتر لوله گذاریها در کانسارهای آلوویال[1] سطحی نظیر ماسه‌ها، شنها و رسهای سیلتی اجرا شده است. حفر دستی در بسیاری از عملیات لوله گذاری در انگلستان بنحو موفقیت آمیزی به کار گرفته شده است.

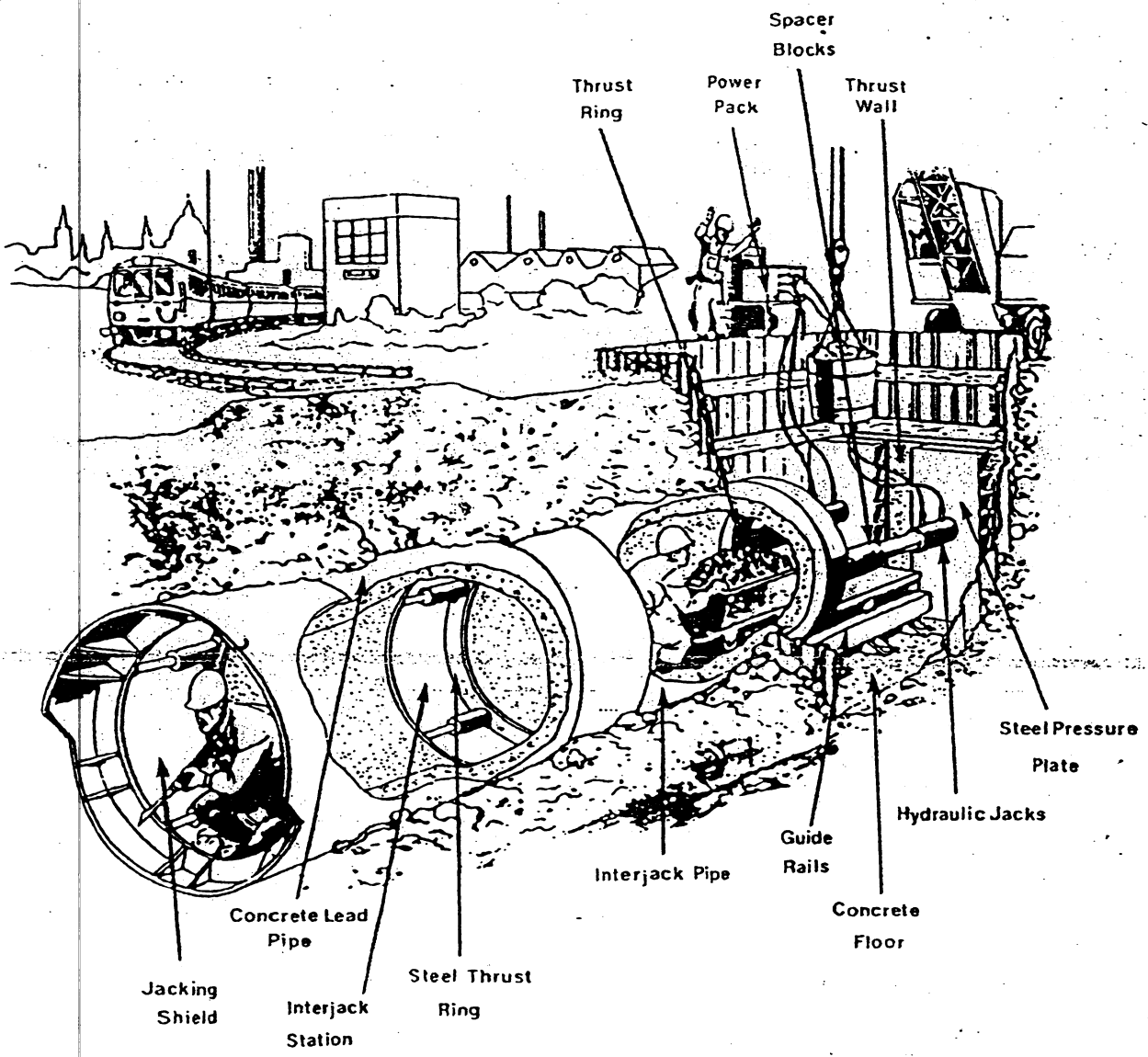
لوله‌های تنی به طور معمول ۱/۲ تا ۲/۴ متر طول دارند و معمولاً در زمین آنها توسط حلقه‌های پلاستیکی پوشیده می شود که انعطاف پذیری خوبی به آنها در جریان نصب می بخشد و آنها را قادر به انطباق با جابجائیهای زیاد زمین که بعد از نصب روی می دهد، می سازد. لوله‌های منفرد به ویژه وقتی که درزه گیری آنها انجام شود یا تر زمین دوغاب صورت گیرد، در برابر ورود آب به داخل لوله بخوبی آب بندی می شوند. لوله‌های فولادی با طولهای مختلفی برای خطوط لوله گاز، آب و نفت مورد استفاده قرار می گیرند، طول این لوله‌ها می تواند بیش از ۱۲ متر باشد.

طول لوله گذاری - جدول ۴-۳ طول لوله گذاریها نسبت به شرایط زمین را نشان می دهد. طولهای لوله گذاری نشان داده در این جدول را با تمهیدات خاصی می توان افزایش داد، ولی ماهیت زمین و محتوای کلی آب زمین، عوامل محدود کنندهٔ اصلی هستند.

جدول ۴-۳: طولهای لوله گذاری در ارتباط با شرایط زمین

انواع زمین در ارتباط با طول لوله گذاری				
قطر لوله (mm)	سنگ (m)	رس سخت (m)	مواد ریزدانه (m)	آلوویال (m)
۹۰۰	۱۳۰	۹۰	۶۰	۶۰
۱۵۰۰	۱۲۰	۹۰	۵۰	۵۰

تذکر: بکارگیری تکنیکهای خاص نظیر استخوانهای حلقهای میانی، روغنکاری، اتصالات یا ارتباطات زیرزمینی و مکانیزه کردن جبهه کار می تواند این طولها را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.



شکل ٤-٩ : عملیات اصلی لوله گذاری برای لوله های بتنی

میزان بار لازم برای هل دادن - بار لازم برای هل دادن به طور اصلی به نیروهای اصطکاکی عمل کننده بر خط لوله وابسته است و چنین نیروهائی تابع شرایط زمین می باشند. نیروهای اصطکاکی براساس سالها تجربه حاصل از هل دادن لوله بین ۱٫۵ تا ۲٫۵ تن بر متر مربع سطح جانبی خارجی لوله ای که باید هل داده شود، به دست آمده اند.

اطلاعاتی در مورد شرایط خاکی - وقتی طراحی و ارزیابی کارهای لوله گذاری در خاکها صورت می گیرد، برای کمک به طراحی اطلاعاتی در مورد مشخصات خاک و سطح ایستابی باید تهیه شود. جدول ۴-۳ مشخصات خاصی که در چنین ارزیابیهائی باید مدنظر قرار گیرد را نشان می دهد.

شرایط ناپایدار زمین - ممکن است برای لوله گذاری در بعضی مواقع نیاز به فرآیندهای بهسازی زمین قبل از تونلسازی باشد. فرآیندهای بهسازی زمین که برای لوله گذاری مناسب تشخیص داده شده اند، عبارتند از :

جدول ۴-۴ : اطلاعاتی در مورد شرایط خاکی برای طراحی و ارزیابی کارهای لوله گذاری

انواع خاک، مواد یا سنگ	مشخصات و اطلاعات کلی که بایستی تهیه شود
۱- خاکهای غیر چسبنده	۱- تجزیه سرندی و توزیع دانه بندی ذرات
	۲- نفوذ پذیری خاک
	۳- چگالی خاک
	٤- آزمایش نفوذ استاندارد خاک (ضریب N)
۲- خاکهای چسبنده	۱- چسبندگی ظاهری یا مقاومت فشاری تک محوری
	۲- چگالی خاک
	۳- آزمایش نفوذ استاندارد خاک
۳- خاکهای مخلوط	۱- اطلاعات ذکر شده برای خاکهای چسبنده
	۲- نشانه ها و مدارک مربوط به چاه آزمایش یا سطح الارضی بالا، و آزمایشهای پیماژ
۴- مواد پر کننده	۱- اطلاعات ذکر شده برای خاکهای چسبنده همراه با اطلاعاتی در مورد منابع ایجاد فشردگی
۵- سنگ	۱- نوع زمین شناختی
	۲- ضریب سختی
	۳- مقاومت خردشوندگی تراکمی (۱)

تذکر : کلیه اطلاعات مورد نیاز در مورد مشخصات فوق بایستی برای پیمانکار لوله گذاری در دسترس باشد تا یک ارزیابی دقیق از تکنیک لازم برای انجام کار داشته باشد.

۱- آبگیری با استفاده از چاههای کم عمق یا عمیق

۲- تزریق ذوغاب با استفاده از سیمان، سیمان/بنتونیت یا پایدارسازهای شیمیایی

۳- انجماد زمین ولی فقط در حالتهای خاص یا وقتی که سایر روشها پاسخگو نباشند.

پایداری و استحکام شرایط زمین - پایداری و استحکام زمین عامل مهم مؤثر در موفقیت لوله گذاری است.

تقویت زمین و وجود شرایط سنگی و خاکی مختلط در طول مسیر لوله گذاری می تواند به نحو محسوسی بر پیشرفت

1- aggregate crushing test (strength)

تأثیر بگذارد. قلوه سنگها و قلوه سنگها در مقادیر زیاد در رسها و مواد مشابه می‌تواند مشکلات زیادی در حفر با سپرهای قطر کوچک در عملیات لوله گذاری ایجاد کند.

جمع بندی و ملاحظات نهائی

سپرهای تونلسازی پیشرفت قابل ملاحظه‌ای را در حفر موفقیت آمیز تونلها در زمینهای نرم موجب شده‌اند. حفاظت تأمین شده توسط سپر تونلسازی امکان کنترل مؤثر جابجائی و حرکت زمین در جبهه کار را فراهم آورده است. علاوه براین، هوای فشرده برای کنترل جریان آب به داخل تونلهائی که در شرایط خطرناک زمینهای آبدار و بویژه در زیر آب حفر می‌شوند، به کار گرفته شده است.

ریزش زمین و نشست سطح زمین به همراه آن و هجوم آب از جمله (مشکلات) و خطرات پذیرفته شده تونلسازی در زمینهای نرم می‌باشد، ولی با پیشرفت در طراحی سپر و روشها و ماشینهای تونلسازی سپری این خطرات تا حد زیادی در موقعیتهائی که وقوع چنین خطرات حفری وجود دارد، کاهش یافته ولی بطور کامل حذف نشده است.

پیشرفتهای عمدهٔ تونلسازی سپری در کشورهای انگلستان، آلمان غربی و ژاپن صورت گرفته است. Oeser برمبنای تجاربش در کار با ماشینهای حفار سپری مختلف بویژه در آلمان در زمینهای نرم، اظهار می‌دارد که تجهیز سپرهای بنتونیتی با پیشانی برشی که برروی آن سرمته‌های چنگکی (۱۵) و تیغه‌ای (۱۴) همراه با سرمته‌های غلتکی (۱۳) نصب شده باشد، به نظر راه حل رضایت بخش تری برای شکستن یا خرد کردن قلوه و قلوه سنگهای موجود در سینه کار تونل می‌رسند. این پیشنهاد اخیراً در حفر تونل مترو برلین به کار گرفته شده است. Oeser اظهار می‌دارد که سپرهای تعادلی با فشار زمین در صورتی که از سرمته‌های غلتکی استفاده شود به نظر مفیدی می‌رسند. سپرهای بنتونیتی در عمل برای کار در خاکهای مختلف در مقایسه با انواع سپرهای تعادلی از سادگی بیشتری برخوردارند.

تونلسازی سپری برای کار در شرایط مختلف زمین روشهای چندی را شامل می‌شود. بررسی و مطالعهٔ جوامع ساختگاه و طبیعت و ماهیت زمینی که قرار است تونل در آن حفر شود، نقش فوق العاده مهمی در کمک به انتخاب مناسبترین روش حفر با توجه به شرایط تونلسازی، ایفا می‌کند. پیشرفتهای عمدهٔ صورت گرفته

در طول چند سال اخیر در تونلسازی سپری، نحو قابل ملاحظه‌ای حوزهٔ تونلسازی زمینهای نرم را تا حفر موفقیت آمیز در سخت ترین شرایط گسترده است.

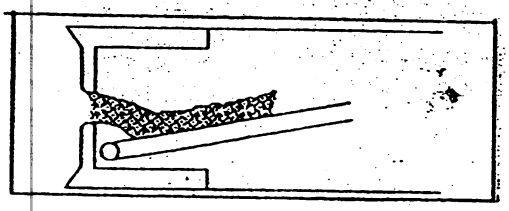
لوله گذاری در احداث فاضلابها و نصب لوله با حداقل تخریب زمین بویژه در سطح زمین، به میزان زیادی کمک کرده است. چند سازهٔ تونلی نحو موفقیت آمیز با روش لوله گذاری در شرایط نسبتاً کم عمق احداث شده اند. در این چند مورد حداقل نشست در سطح زمین ایجاد شده است.

ماشینهای سنگی

نوع : سپر بسته یا سپر کور

توصیف : در زمینهای بسیار نرم و سیلتها، سپرهای ساده با جبهه کار بسته (یا کور) مورد استفاده قرار می‌گیرد. تخلیه مواد جبهه کار (کنده یا ریخته شده) با تسمه‌ای (همانند دریچه و نوع پیشروی کنترل می‌شود.

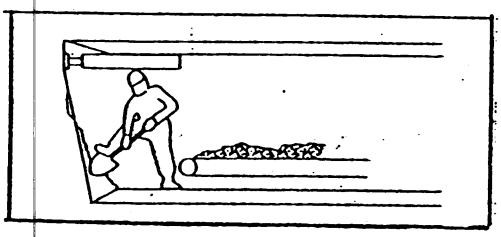
نکته‌های مهم : در سازه‌های زیر رودخانه یا زیر دریائی در خاکهای بسیار نرم استفاده می‌شود. اغلب به یک از خاک در بالای ماشین منتج می‌شود.



نوع : سپر بار با هوا فشرده

توصیف : برای تونلهای کوچک و کوتاه در خاکهای سست غیر زمینی خوب هستند. معمولاً با خاکهائی که به سینه کار فشاری آورند، تجهیز می‌شوند. در صورتی که شرایط خاک ایجاب کند، این سپرها ممکن است دارای کلاهک و یا سکوی متحرک باشند.

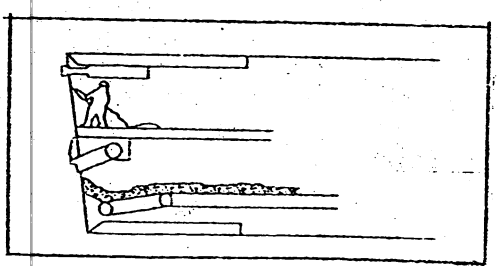
نکته‌های مهم : این سپر از نسل سپر برونل (Brunel) است. در حال حاضر به میزان زیادی با تجهیزات مکانیزه‌تر جایگزین شده است. بیشتر مواقع در حفر قسمتهای تاج تونلهای بزرگ مقطع و تونلهائی که برای لوله گذاری استفاده می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد.



نوع : سپر تسمه مکانیزه

توصیف : مشابه سپرهای باز است، ولی با یک کج بیل، بازوی خفار (رودهدر) یا ابزاری همشابه تجهیز شده است.

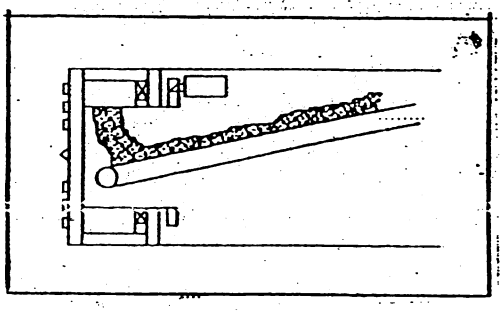
نکته‌های مهم : این سپرها اخیراً بیشترین کاربرد را پیدا کرده‌اند. اغلب با صفحات و ورقهای نگاهدارنده جبهه کار و یک یا چند سکوی کاری تجهیز می‌شوند. در زمینهای نرم، شل و روان ممکن است با مشکل مواجه شوند. برای پایدار سازی جبهه کار در زمینهای ضعیف ممکن است از هوای فشرده استفاده شود.



نوع : شیر مخاتیره

توصیف : این سپرها یک ماشین کاملاً مخاتیره است. عمل حفر توسط یک ماشین حفر تمام رخ و برش دهنده های تخلی یا رسیلی انجام می شود.

نکته های مهم : این ماشینها با انواع ابزار برش دهنده برای انواع خاکهای مختلف در دامنه گسترده ای ساخته شده است. برای کنترل مواد کنده شده که در مقابل پیشروی ماشین قرار گرفته اند، می توان دریچه ها یا تیغه های روی صفحه برش دهنده را تنظیم کرد. همچنین می توان برای پایدارسازی جبهه کار در زمینهای ضعیف از هوای فشرده استفاده کرد.

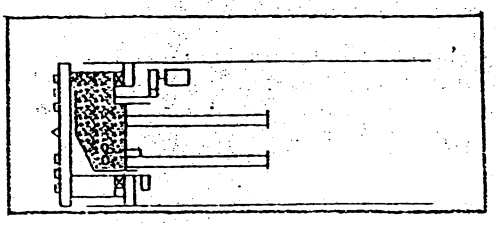


ماشینهای خاص

نوع : سپرهای دوغابی

توصیف : در این سپرها برای ایجاد موازنه و تعادل با فشار خاک و آبهای زیرزمینی در جبهه کار از دوغابهای تحت فشار استفاده می شود. برای حفظ فشار دوغاب در سینه کار، سپر به صورت بسته عمل می کند، مواد دوغابی توسط لوله هایی واقع در پائین سطح مقطع سینه کار به سطح زمین منتقل و پس از بازیافت مجدداً به سینه کار برگردانده می شود. این سپرها ممکن است با یک سنگ شکن برای مواقعی که در سینه کار قلوه سنگهای بزرگ تولید می شود، تجهیز شوند. این ماشینها برای سیلتها و شن و ماسه های آبدار (اشباع از آب) مناسب هستند.

نکته های مهم : این سپرها برای خاکهای ماسه ای مناسبترین سپرها هستند. در خاکهای رسی منجر به چسبیدگی می شوند. در خاکهای زیر ممکن است سینه کار در دوغاب بریزد (ترش کند). خاکهای زیر به صورت تقریبی تعریف می شوند:



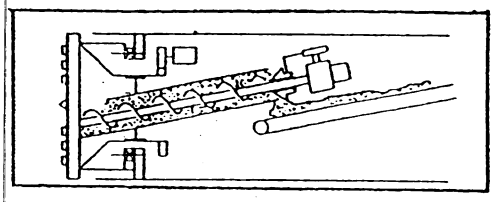
- ٪۶۰ < میزان شن
- ٪۱۰ < میزان رس و سیلت
- ٪۱۸ < میزان آب
- $10^{-2}\ cm/s$ < ضریب تغوذپذیری
- قلوه سنگها بزرگتر از ۸ اینچ

نوع : سپر تعادلی با فشار زمین (EPB)

توصیف : این ماشین یا سپر دارای یک اتاقک جلویی است که برای ایجاد تعادل با فشار آب زیرزمینی و یا خاکهای ریزشی در جبهه کار توسط تماس با آب و مواد و مصالح خاکی پر شده است. در این ماشینها برای کنترل تخلیه مواد کنده شده از جبهه کار و در نتیجه حفظ فشار در داخل اتاقک، بگونه‌ای که با فشار زمین متعادل باشد، از یک تخلیه کننده مارپیچی که دارای مشیر مخروطی و سیستمهای دیگر است، استفاده می‌شود. این ماشینها برای رس و خاکهای ماسه سیلتی و رسی و به طور کلی در زیر سطح آب مناسب هستند.

نکته‌های مهم : این ماشینها برای خاکهای ماسه‌ای، که دارای شرایط قابل قبولی مشرح زیر باشند، مناسبترین هستند:

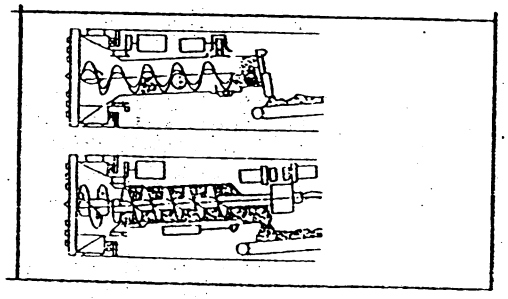
- ۷٪ < محتوای رس و سیلت
- ۷۰٪ > محتوای شن
- خاکهای چسبنده (با کمتر از ۴۰ درصد رس و سیلت) با مقدار N کمتر از ۱۵
- میزان آب در خاکهای ماسه‌ای بیش از ۸ درصد و در خاکهای چسبنده بیش از ۲۵ درصد



نوع : سپر دوغابی فشار تعادلی با فشار زمین

توصیف : این سپر یک ماشین هیبرید است که دوغابی سنگین (بعضی اوقات گل آب نیز نامیده می‌شود) به داخل صفحه برشی یا اتاقک بریدن آن تزریق می‌شود. این ماشین برای جاهائی که خاک پیچیده است، مواد دانه ریز (مانند چسبندگی) و آب برای استفاده از EPB وجود ندارد، یا مواد آبخوان زیر زمینی برای یک سپر دوغابی قابل کاربرد نیستند، استفاده می‌شود.

نکته‌های مهم : در خاکهائی با ۸۵ درصد شن و قلوه سنگها و قلوه سنگهائی با ابعاد ۲۰۸۱۰ x ۷ (اینچ) کار کرده است. در خاکهای شن و ماسه‌ای با ۵۰ تا ۳۵ = N و خاک سیلتی یا ماسه‌ای با ۳۵ تا ۵ = N نیز کار کرده است.



فصل ششم

روشهای تونلسازی: شرایط سنگی برای کاربرد ماشینهای حفار بازوئی یا کله گاوی[1]

مقدمه

حفر سنگ در تونلسازی | توسط ماشین یکی از دو روش اصلی حفر تونل می باشد. روش اول، حفر بخشی توسط ماشینهای حفار بازوئی است که عبارتست از یک بازوئی که برروی آن سر برشی نصب شده و نیروهای حفر سنگ توسط آن اعمال می شود. برروی این سر برشی[2] قلمها یا دندانه[3]های برشی قرار داده شده است. روش دوم یا ماشینهای دسته دوم تونلسازی، حفر تمام رخ[4] تونل توسط ماشینهای حفر تونل یا TBM[5] می باشد. انواع دیگری از ماشینهای حفر تونل نیز ابداع شده اند که بطور کلی کاربردهای ویژه دارند. TBM و کله گاویها یا ماشینهای حفار بازوئی کاربردهای گسترده و عمومی پیدا کرده اند.

حفر سنگ توسط ماشین تونلسازی به طور یکنواختی روند افزایشی داشته است، زیرا پیشرفتهائی که در طراحی این ماشین تدریج صورت گرفته، قابلیت چنین ماشینهائی را برای حفر سنگهائی با مقاومت بیشتر افزایش داده است. این پیشرفتها امکان حفر موفقیت آمیز تونل در شرایط سخت و پیچیده زمین شناسی را فراهم آورده است.

ماشینهای حفار بازوئی: پیشرفت و کاربرد - ابداع ماشینهای حفار بازوئی به طور مشخص در دهه ۱۹۴۰ در اروپا صورت گرفت. تا دهه ۱۹۵۰ انواع قابل توجهی از ماشینهای حفار بازوئی در صحنه تونلسازی پا به عرصه نهادند. پیشرفتهای عمده ای در طول دهه ۱۹۵۰ برروی ماشینهای بازوئی برش دهنده[6] در سوروی صورت گرفت، منجر به معرفی ماشینهای حفار بازوئی مدل PK3 روسی در سال ۱۹۶۱ در انگلستان شد. این نوع از ماشینهای حفار بازوئی مبنائی برای پیشرفتهای بعدی به کار گیری گسترده ماشینهای حفار بازوئی در صنعت معدنکاری ذغالسنگ انگلستان گردید. این ماشینها در استخراج ذغالسنگهای دارای لایه بندی چندگانه

1-roadheader ; 2-cutting head ; 3-pick ; 4-full face ;
5-tunnel boring machine ; 6-boom cutting machine

به‌صورت انتخابی مؤثر بودند. در حقیقت با امکان استخراج انتخابی توسط این ماشینها، لایه‌های ضعیف‌تر حفر و در نتیجه لایه‌های محکمتر سنگی ناپایدارتر و امکان استخراج آنها آسانتر می‌شد. علاوه بر این، سر برش دهنده بازوئی ماشین حفار بازوئی، امکان حفر آسان مقاطعی با شکلهای مستطیلی و قوسی را میسر می‌ساخت. این ماشینهای ماشینهائی با قابلیت اعتماد و جابجائی خوبی هستند و نتایج رضایت بخشی از جنبهٔ سرعت پیشروی تونلسازی در شرایط معدنکاری در تونلهائی با سطح مقطع حدود ۱۰ تا ۲۵ متر مربع به دست داده‌اند.

در سالهای اخیر، توجه قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ظرفیت انواع ماشینهای حفار بازوئی برای دستیابی به سرعتهای بیشتر تونلسازی و افزایش قابلیتهای آنها برای برش دادن سنگهای سخت‌تر متمرکز شده است. این مسائل موجب افزایش قابل توجهی در وزن چنین ماشینهائی گردیده است.

ماشینهای حفار بازوئی به‌عنوان یک ماشین تونلسازی، انعطاف پذیری و قابلیت جابجائی قابل ملاحظه‌ای در شرایط مناسب بویژه در تشکیلات دارای لایه‌بندیهای متناوب که نیاز به ماشینهائی با قابلیت حفر انتخابی وجود دارد، دارا می‌باشند. در عملیات معدنی استفاده از ماشینهای حفار بازوئی برای حفر تونلهائی که در سنگهای ضعیف، مشابه زغالسنگهای دارای لایه‌بندی متناوب و سنگهای رسوبی ضعیف قرار دارند، بشدت توصیه شده است.

ماشینهای حفار بازوئی: عمل و تجربه تونلسازی

ماشینهای حفار بازوئی نقش عمده‌ای در حفر راهروهای زغالسنگی و شرایط سنگی نرم در انگلستان داشتند، ولی زمانی که در لایه‌های محکمتر با مقاومت بیش از ۷۰ MPa به کار گرفته شدند، محدودیتهای این ماشینها آشکار شد. حفر سنگهای سخت‌تر موجب مصرف بیش از حد قلمها یا سرمته‌ها، هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری و آسیبهای زیاد ماشینهای حفار بازوئی قدیمی می‌شد و در نتیجه کاربرد آنها از جنبهٔ اقتصادی مقرون به صرفه نبود.

با ابداع ماشینهای حفار بازوئی سنگین‌تر، دامنهٔ کاربرد این ماشینها برای شرایط سنگی محکمتر گسترش یافت. King در جریان یک بررسی که در سال ۱۹۸۰ انجام گرفت، نشان داد که ماشینهای حفار بازوئی در انگلستان که دارای کاربرد وزنی بین ۲۱٫۵ تا ۸۰ تن می‌باشند، برای حفر سنگهائی با مقاومت ۶۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال توجیه اقتصادی دارند. سر برشی این ماشینها از نوع محوری، توان مصرفی سر برشی ۳۰ تا ۱۰۰ کیلووات و توان حرفی کل ماشین در دامنهٔ ۸۶ تا ۶۲۵ کیلووات بوده و راهروهای معدنی با سطح مقطع قوسی شکل به نظر می‌رسد، عامل عمده‌ای

در کار برد گستردهٔ این ماشینها در معادن ذغالسنگ انگلستان بوده اند.

ماشینهای حفار بازوئی به طور کلی شامل یک بازوی برش دهنده هستند که بر روی یک شاسی کشش ودر حقیقت خود کشش سوار شده اند. بارگیری توسط بازوهای جمع کننده صورت می گیرد و به یک نا و زنجیری منتقل می شود. حرکت مواد خرد شده در خلاف جهت سینه کار تونل و از طریق ناو زنجیری به طور پیوسته به سیستم اصلی انتقال مواد خرد شده هل داده می شود.

در شکل ۶-۱ ماشینهای مختلف حفار بازوئی که برای انجام کارهای متفاوت تونلسازی طراحی شده اند به تصویر کشیده شده است.

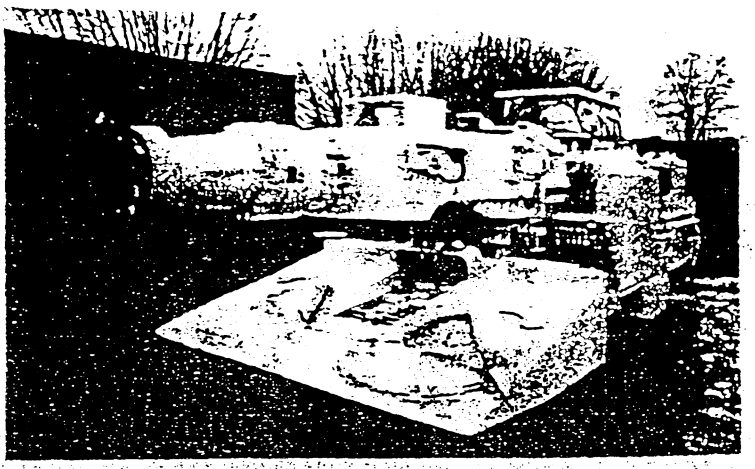
ماشینهای حفار بازوئی: قدرت ۹۰۰ تن - انعطاف پذیری عملیاتی، قابلیت حفر مقاطع تونلی باشکلهای مختلف و قابلیت مانور آن برای ایجاد تقاطعها در راههای تونلی معدن از جمله خصوصیات اصلی ماشینهای حفار بازوئی هستند. ماشینهای سبکتر قدیمی (حدود ۲۵ تن یا کمتر) در حفر سنگهای متوسط - سخت مواجه با عدم موفقیت شدند، زیرا لرزش ماشین باعث وارد آمدن خسارت به سر مته ها و اغلب خود ماشین می شد. در انواع ماشینهای سنگین حفار بازوئی (۹۰ تن به بالا) تمام قسمتها از ساختار پیشرفته تر و مستحکمتری برخوردار شده اند و به تناسب آن قدرت ماشین افزایش یافته و هزینه های تعمیر و نگهداری و زمان سرویس تا حد قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه حفر سنگهای سخت تر توسط این ماشینها از جنبهٔ اقتصادی توجیه یافته است.

ماشین تونلسازی NCB که توسط مؤسسهٔ تحقیقات و توسعه معدن با وزن ۱۵۰ تن طراحی شده است، موتور سر برشی آن با مصرف یا توان ۲۲۵ کیلووات و گشتاور خروجی ۳۱۲ کیلونیوتن متری باشد. این ماشین در حفر تونلهای معدن در انگلستان برای حفر سنگهائی با مقاومت بالای ۱۰۰ مگا پاسکال که در بعضی شرایط به ۲۰۰ مگا پاسکال می رسید، به کار گرفته شد.

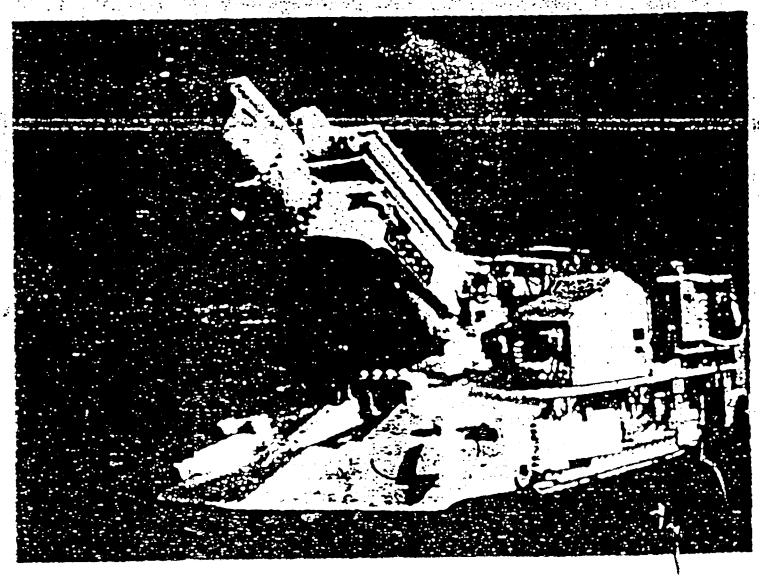
مبانی برش ماشین های حفار بازوئی: طبلکی یا شکافی[1] در برابر مخروطی یا سایشی[2]

ماشینهای حفار بازوئی به طور کلی عمل برش را به دو صورت انجام می دهند: شکافی یا سایشی. در شکل ۶-۲ این دو مکانیزم برش بر روی بازوی یک ماشین حفار بازوئی نشان داده شده است.

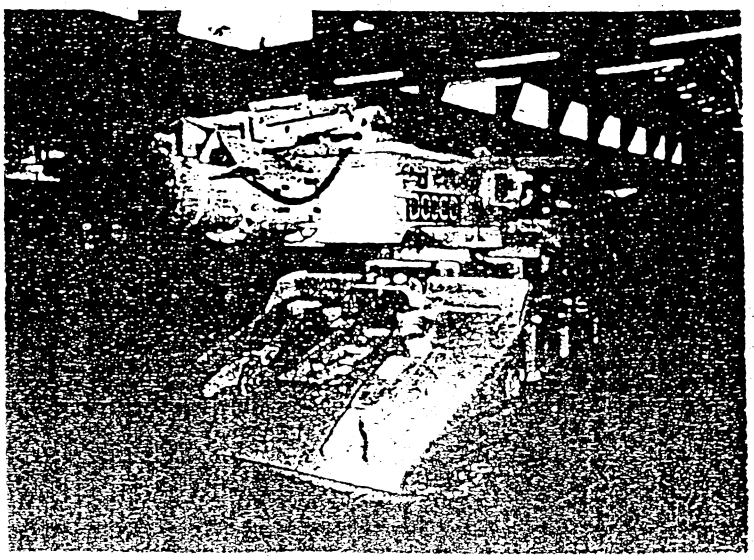
2- milling



الف- Dosco MD 1100 : این ماشین مدل پیشرفته بسیار موفق MK 2A می‌باشد. این ماشین توانائی حفر تونلهای با سطح مقطع قوسی و مربع مستطیل در سنگهائی مانند گل سنگها و سیلتستونهای متراکم را دارد. این یک ماشین جمع وجور با قابلیت خوب مانور است که در معادن زغالسنگ انگلستان برای ایجاد فضاهای آماده سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

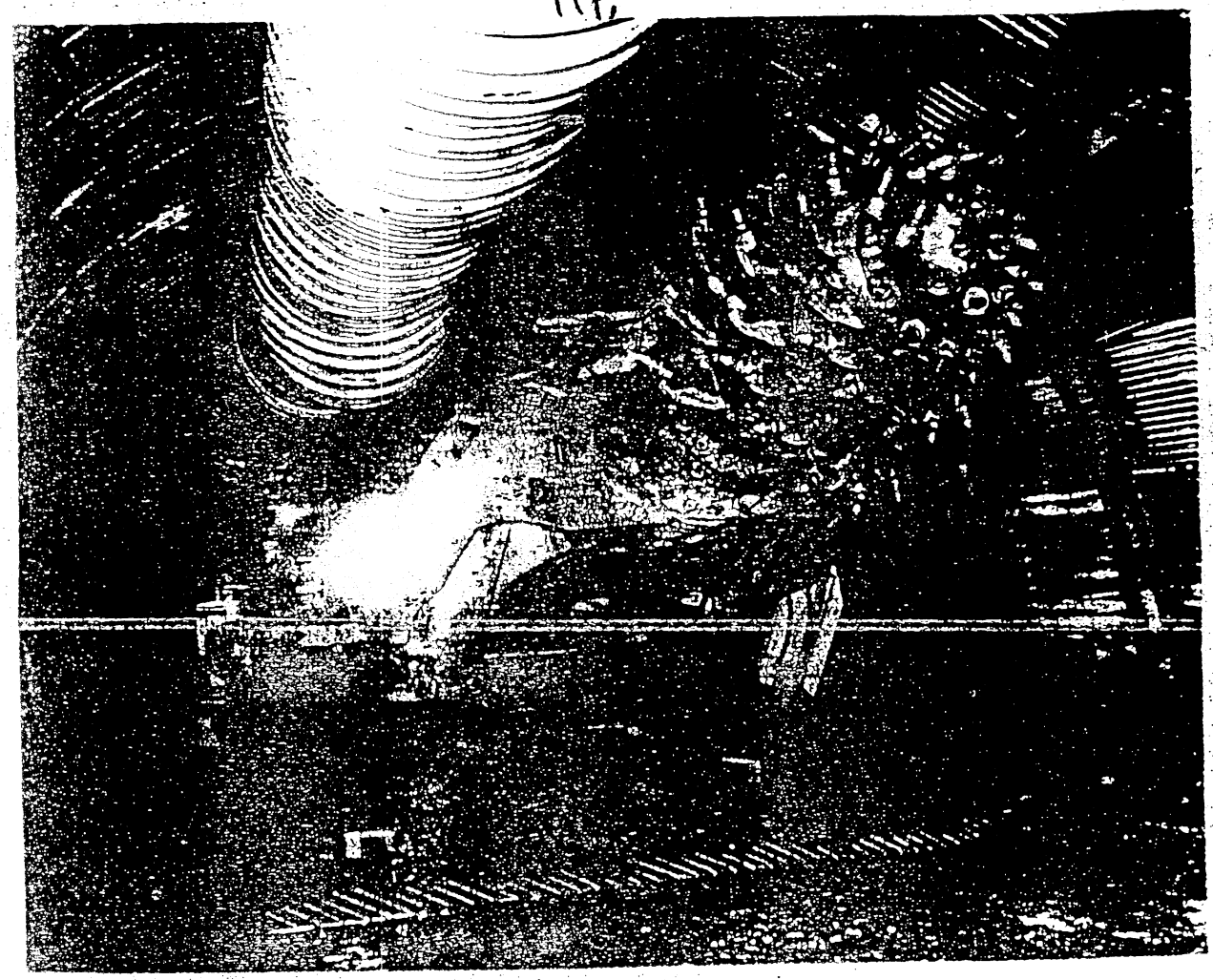


ب- Dosco MK 2B : این مدل از ماشینهای حفار بازوئی برای حفر تونلها و راهروها در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماشین در ردهٔ ماشینهای با قدرت متوسط قرار دارد و قادر به حفر راهروهای با سطح مقطع قوسی در سنگهای لایه‌ای حاوی ماسه سنگهای متوسط تا سخت می‌باشد.



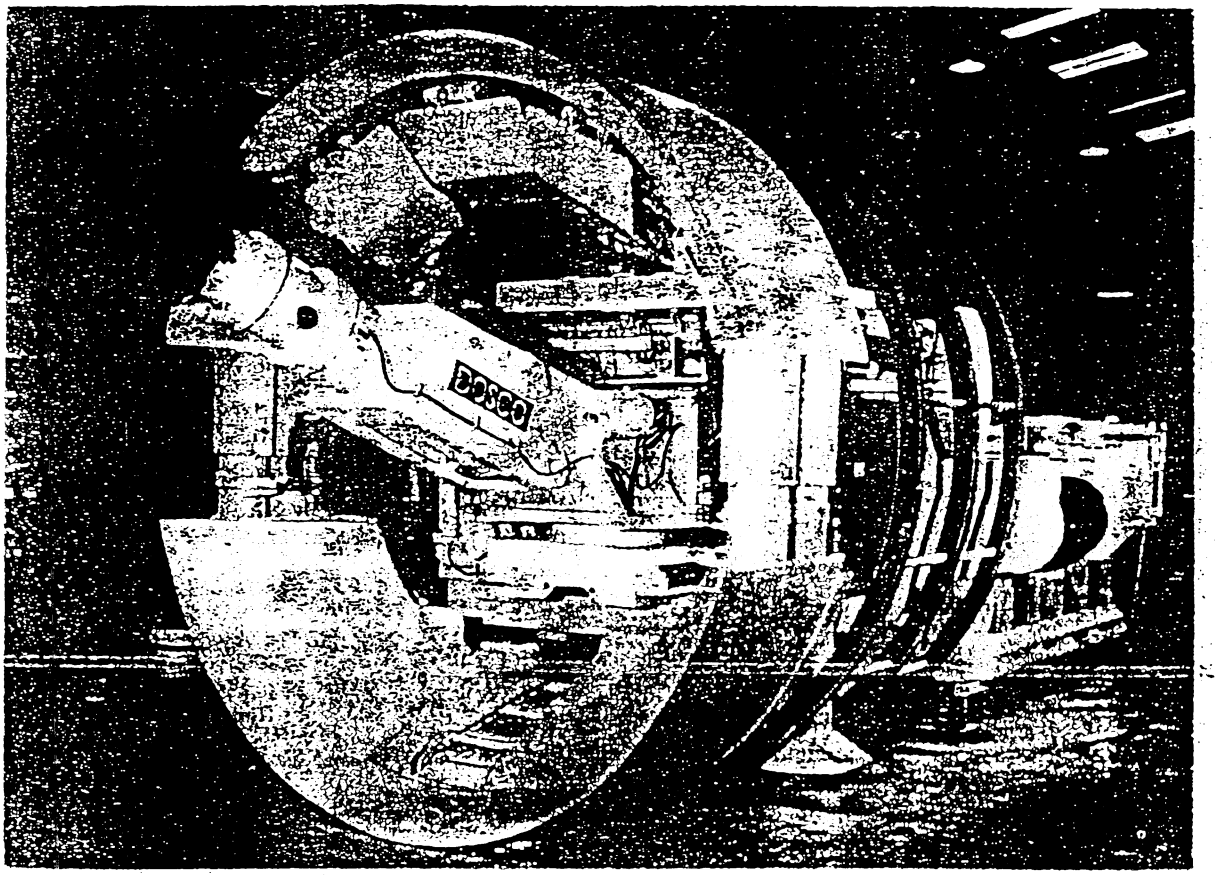
ج- Dosco SL 120 : این نوع برای کار در شرایطی مشابه شرایط مناسب برای مدل MK 2B ساخته شده است. SL 120 جمع وجورتر است و بنابراین قابلیت به کارگیری آن در جاهائی که مواجه با محدودیت فضا هستند، بیشتر می‌باشد. این مدل می‌تواند در کنار یک نقاله در راهروهائی کم مرض یا در یک کاهسار رگه‌ای باریک که رعایت حداقل حفر الزامی است، کار کند.

شکل ۶-۱ : سه شکل فوق نمونه‌های مختلف ماشینهای حفار بازوئی برای تونلسازی در شرایط مختلف زمین شناسی را نشان می‌دهد.

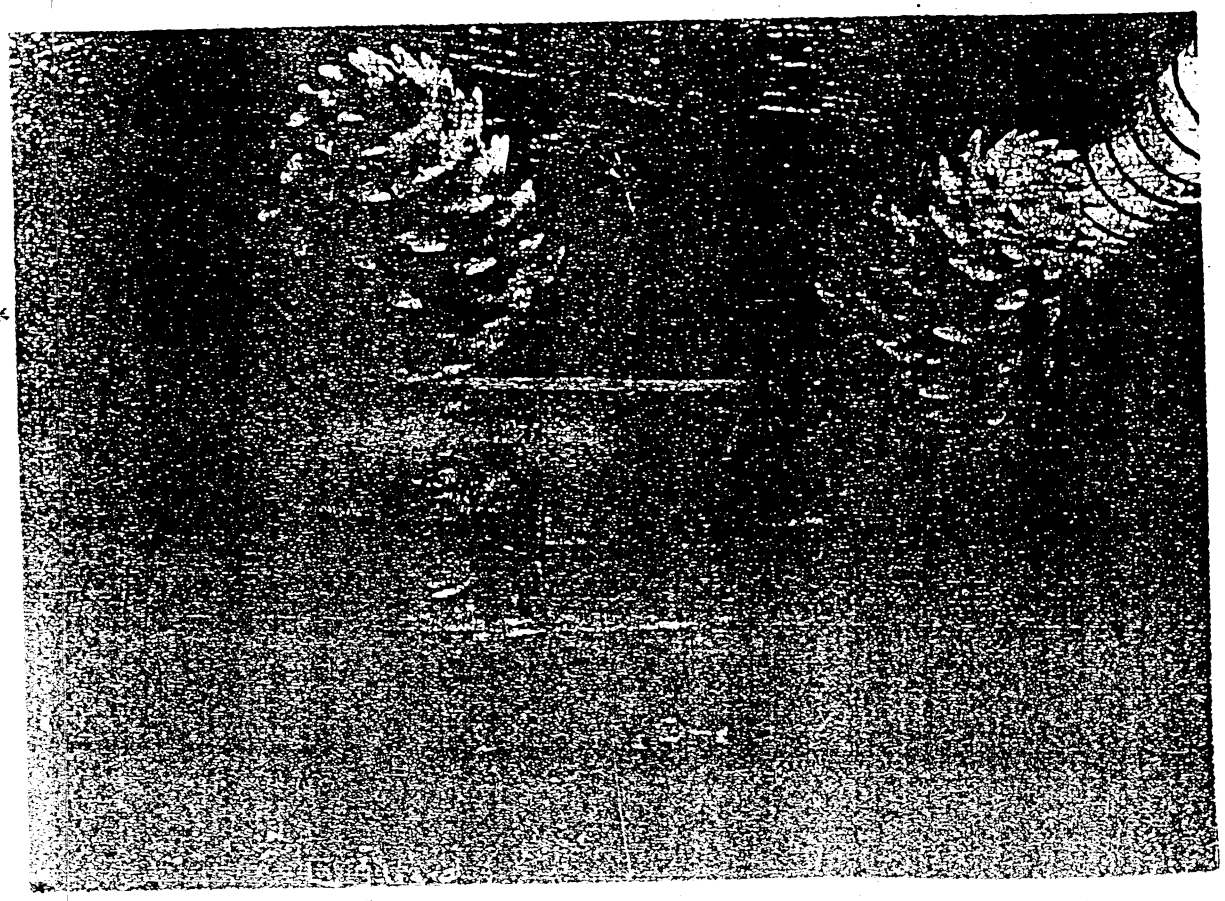


شکل ۶-۱(د) ماشین حفار بازوئی مدل Dosco LH 1300 در معادن ذغالسنگ انگلستان. این مدل برای کار در راهروهای کم ارتفاع طراحی شده است و در نتیجه برای حفر مقاطع چهارگوش نظیر حفر تقاطعهای جبهه کارهای طویل بسیار مناسب می باشد. وزن و قدرت این ماشین قادر به حفر ماسه سنگهای محکم و سیمان شده که اغلب در بالا و پائین لایه های ذغالسنگ وجود دارند، می سازد.

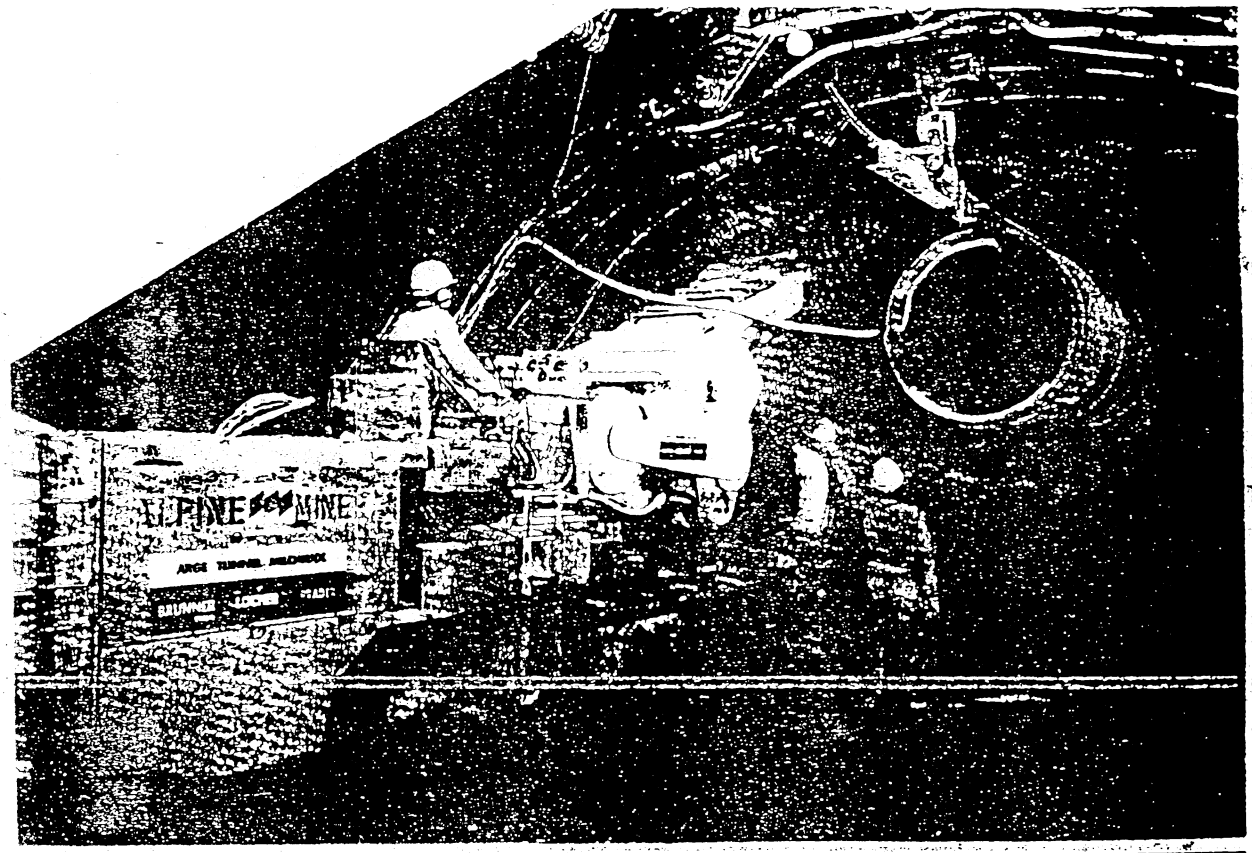
شکل ۶-۱(ه): این ماشین جمع و جور برای حفر کف راهروها در جریان گشاد کردن یا صاف کردن آنها بکار می رود. این ماشین در حفر فضاهای آماده سازی با مقطع چهارگوش موفق بوده اند.



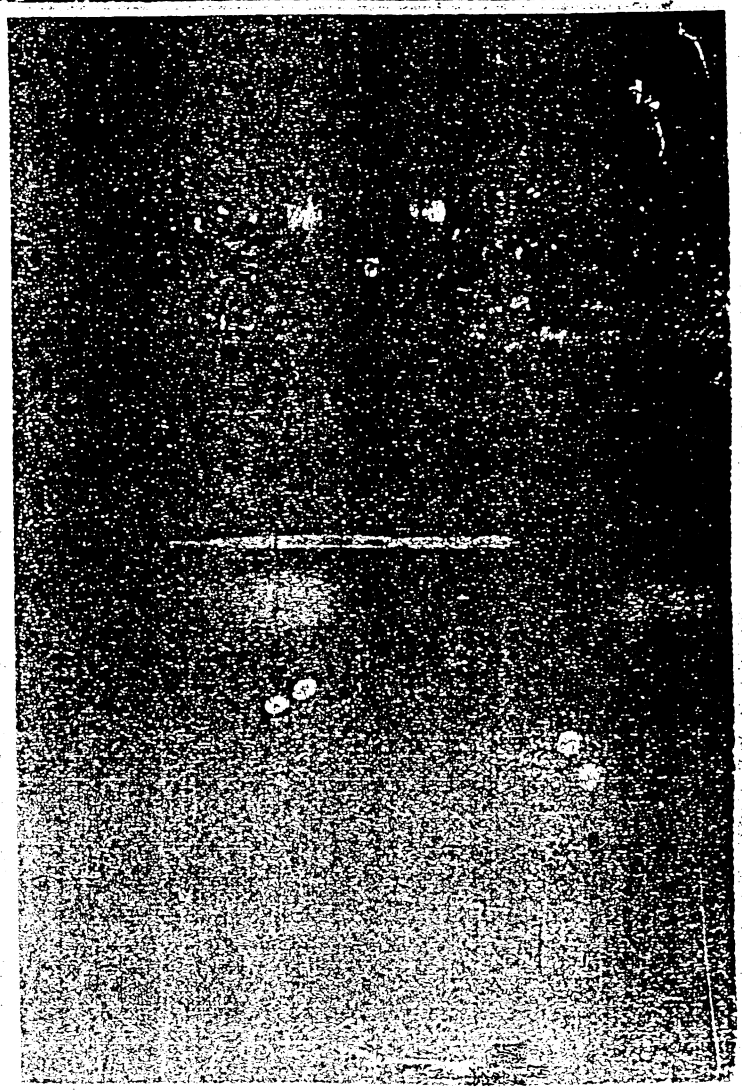
شکل ۶-۱۱(و): سیستم تونلسازی CTM5



شکل ۶-۱۱(ز): ماشین حفار دو بازویی مدل TB 600 مورد استفاده در معادن سنگ آهن انگلستان



شکل ۶-۱۱(ج): Alpine Miner AM 100:
این تصویر توانائی حفر انتخابی ماشین علاوه بر قابلیت مانور آن برای احداث تونل در موقعیتهای پیچیده را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۱(ط): Alpine Miner AM 100
این ماشین در سنگ نمک و تیاس با مقاومت ۳۰ تا ۳۵ مگا پاسکال، ظرفیت حفر متوسط ۲۸۰ تن بر ساعت و ظرفیت حداکثر ۳۸۰ تن بر ساعت را به دست آورده است. عرض برش تا ۱۲ و سطح مقطع حفر به ۷۳ متر مربع رسیده است.

در انگلستان تقریباً کلیه ماشینهای حفار بازوئی مورد استفاده از نوع مخروطی یا سایشی، در آلمان غربی ۶۵٪ از نوع مخروطی و ۳۵٪ از نوع طبلکی یا شکافی و در امریکا، کانادا و مکزیک ۷۵٪ از نوع طبلکی هستند.

سیستم برش نوع مخروطی - معمولترین شکل سر یا تاج برشی در ماشینهای حفار بازوئی، مخروطهائی است که محور محوری در امتداد محور بازوی ماشین دوران می کند. طرح تاج برشی مخروطی و موقعیت و جهت نصب آن بر روی بازو بگونه ای است که در موقعیت بهینه ای جهت اعمال حداکثر نیروی برشی بر جبهه کار تونل قرار گیرد. به همین دلیل این نوع ماشینهای حفار بازوئی توانسته اند قابلیت اجرائی پذیرفته شده ای در شرایط زمین شناسی مشکل و محکم از خود ارائه دهند و کار برد گسترده ای در اروپا پیدا کنند. در روش مخروطی در مقایسه با طبلکی، زمان کمتری صرف خرد کردن یا خرد نمودن اولیه (فرودوی) در یک جبهه کار سخت تونلی می شود. این روش امکان حفر زودتر در جبهه کارهای با سنگ سخت را فراهم آورد صورا اندمان برش در جبهه کارهای تونلی را گسترش داده است. در شرایط سنگی ضعیف که مقاومت کمتری وجود دارد، فرودوی اولیه و تثبیت سر برشی در جبهه کار با مشکل مواجه است، نوع مخروطی احتمالاً از کارآئی بیشتری از جهت به حداکثر رساندن استفاده از نیروهای برشی، برخوردار است - بهرحال، برای برش در شرایط سنگی سخت تر، از سرمته های سر برشی یا تاج حفار مخروطی بهره وری بیشتری صورت می گیرد و حتی بدنه هائی که سرمته ها در آن قرار گرفته اند، در برش سهم دارند.

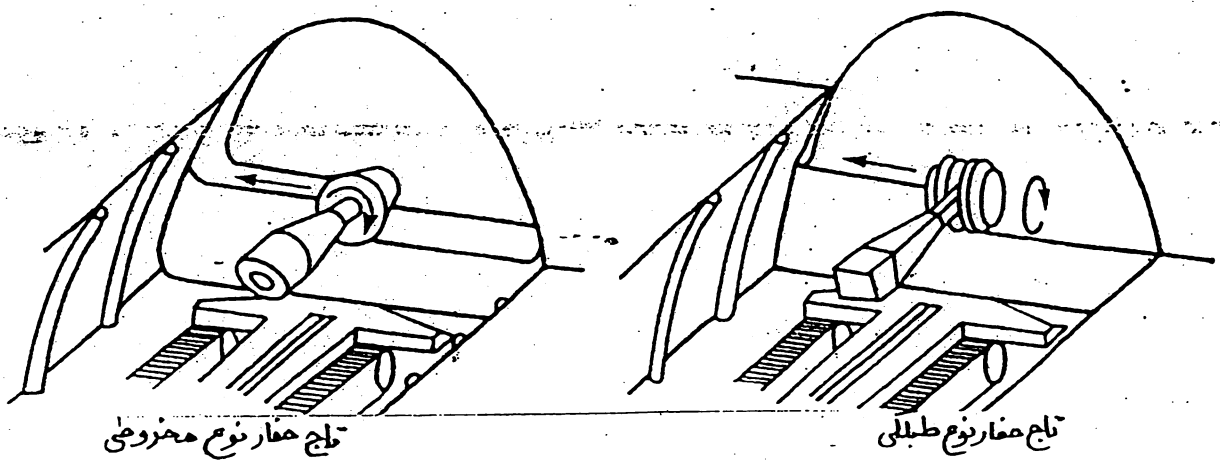
سیستم برش نوع طبلکی - مکانیزم برش شکافی یا برش نوع طبلکی به طور گسترده ای در ماشینهای استخراج پیوسته[1] برای برش شرایط سنگی نسبتاً ضعیف همچون جبهه کارهای ذغالسنگی یا انواع مختلفی از سنگهای رسوبی پذیرفته شده است. برای شرایط سنگی نسبت مناسب، مکانیزم برش شکافی بدون شک سرعت برش خوبی بدست می دهد. مطلوب بودن سرعت برش در این سیستم در مقایسه با سیستم برش نوع مخروطی و بر مبنای زمان مورد نیاز جهت حفر تونلی با شکل مقطع مناسب، مطرح می شود. یک نیروی فشاری یا محوری از طریق بازو، تاج حفار یا سر برشی را به داخل جبهه کار تونل هل می دهد. ماشینهای حفار طبلکی ۲ تا ۳۰ درصد سبکتر از ماشینهای حفار مخروطی با ظرفیت یکسان هستند. شرایط سنگی سخت یا محکم مستلزم تمرکز نیروهای برشی، بویژه در شروع برش جبهه کار تونل، می باشد و سیستم برش نوع مخروطی در این گونه موارد مؤثرتر و کارآتر از سیستم برش نوع طبلکی می باشد. ویژگیهای اصلی سیستم برش نوع طبلکی عبارت است از انطباق پذیری

---

1 - continuous mining machine

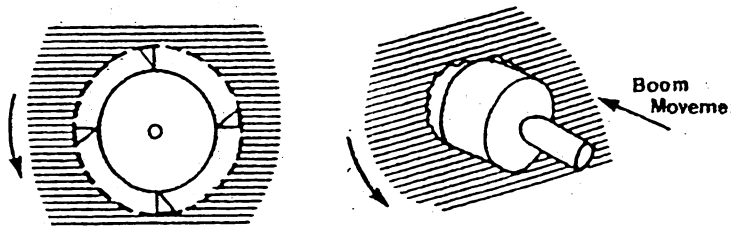
آن با شرایط پیچیده، قابلیت مانور، توانائی برش سطح مقطعهای بزرگ و ظرفیت بالای برش آنها، که این دیگیها بصورت این ماشین را در شرایطی که محصول یا فروش انبوه مطلوب باشد، بسیار جذاب در آورده است و باعث بکار گیری آن در عملیات متعدد معدنکاری شده است.

آنفیشانهای فشار بالا[1] - استفاده از آنفیشانها یا حبت آبهائی که تحت فشار بالای ۷۰۰ بار عمل می‌کنند، طبق گزارشها باعث تقلیل عمده نیروهای برشی سرمته می‌شود. کار بر دیک آنفیشان فشار بالا همراه با سرمتهٔ برشی در شکل ۶-۳ نشان داده شده است.



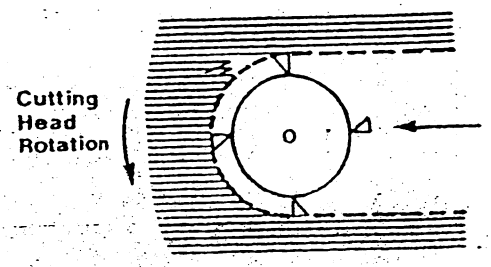
الف- مقایسهٔ دو سیستم برش اصلی

توضیحات:



۱- حالات حرکتی با حفر نشان داده شده بر یک ماشین حفار بازوئی در حفر یک راهروی قوسی شکل با ارتفاع ۳/۴ متر و ۴/۶ متر عرض مربوط است.

۲- فرورویِ[2] به عمق ۰/۸ تا ۱ متر در لایه ذغالی واقع در وسط مقطع تونل. در حرکت عرضی[3] تاج حفار عمق حفر به ۰/۴ متر را سرچارم ارتفاع مقطع طی می‌کند.

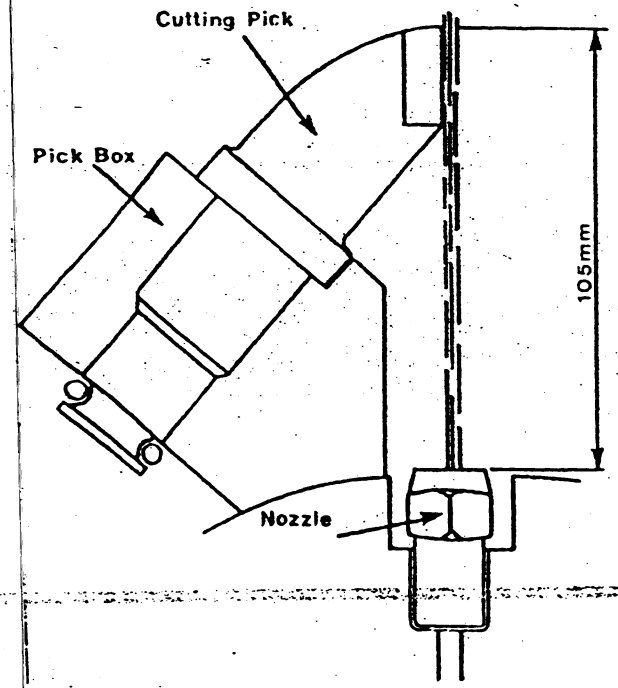


۳- پس از ذغال لایه رس سنگ واقع در قسمت پائین تونل به عمق ۰/۴ متر و با حرکت رو بروی[4] فرو شد.

۴- سپس رس سنگ واقع در قسمت بالا تونل بصورت زیر بری[5] حفر گردید.

۵- مراحل برش تا رسیدن به عمق حفر ۱/۲ متر تکرار و سپس وسیله نگهداری فولادی قوسی نصب شد.

ب- حالات و حرکات حفر در یک ماشین حفار بازوئی با سیستم برش نوع مخروطی. بالائی: حرکت فرورویِ، وسط: حرکت عرضی، پائین: زیر بری (راست)



شکل ۶-۳ : موقعیت قرار گرفتن نازل نسبت به سرمته برشی در یک آبفشان فشار بالا

مطالعاتی بر روی یک معدن سنگ آهک با مقاومت فشاری ۱۰۸ تا ۱۲۷ مگا پاسکال انجام شد. ماشین حفار بازوئی مورد استفاده مدل Dosco Mk.2A بود که در شرایط [redacted] حفر آن به سنگهای با مقاومت ۷۰ مگا پاسکال محدود می شد. بدون استفاده از آبفشان، این ماشین در معدن مربوطه به حفر رضایت بخش سنگ آهک نبود، زیرا سر برشی (تاج حفار) پس می زد و سرمته ها خراب می شدند و در بعضی موارد می شکستند. وقتی این ماشین (قدرت موتور ۴۸۵ کیلووات) با آبفشانهای با فشار ۷۰۰ بار (Bar) شامل ۹ آبفشان که از هرکدام ۴ لیتر آب در دقیقه پاشیده می شد، تجهیز گردید، این ماشین توانست سنگ آهک مذکور را با مصرف قابل قبول سرمته بتراشد و حفر کند.

شکل ۶-۴ نشان می دهد که آبفشان فشار بالا به طور عمده به افزایش نرخ برش[6] یا حفر کمک می کند و در عین حال از انرژی ویژه[7] و میزان تولید گرد و غبار[8] می کاهد.

سرمته های برشی - به بازار آمدن ماشینهای حفار بازوئی سنگین بسرعت مشخص کرد که پیشرفت عمده در سرمته های برشی در زمینه توسعه از روند کندتری برخوردار بوده است. توسعه و پیشرفت سرمته ها به منظور برآوردن نیازها و همپائی با پیشرفت ماشینهای حفار بازوئی به سه نوع خاص سرمته ها را مطرح نمود:

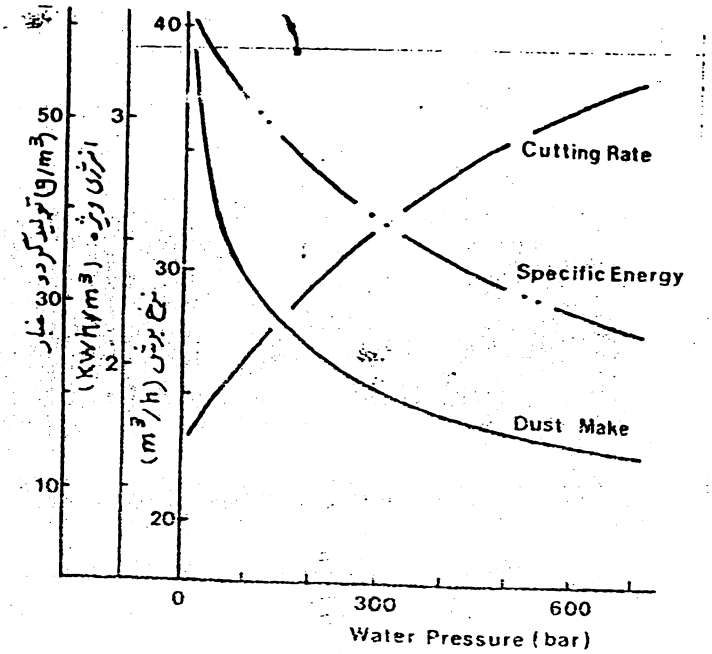
1- high-pressure water jet ; 2- sumping ; 3- traversing ; 4- overcutting ; 5- undercutting ; 6- cutting rate ; 7- specific energy ; 8- dust

سرمته های مخروطی[1]، سرمته های شعاعی[2] بزرگ و سرمته های جلوبُر[3].

سرمته های مخروطی - یکی از ویژگیهای اصلی سرمته های مخروطی، قابلیت چرخش آن در درون پایه تا زمان سائیده شدن آن می باشد. این امر منجر به افزایش زمان بین تعویض سرمته شده است. در مواقعی که میزان بار اعمالی به سرمته و سینه کار بالا و بویژه بار به صورت محوری اعمال شود، سرمته های مخروطی احتمالاً قوی تر از سرمته های شعاعی عمل می کنند. عمل برش انگلونه سرمته ها با تعبیه آنفیشانهای فشار بالا بهبود داده شده است.

سرمته های شعاعی بزرگ - بهترین ویژگی این سرمته ها دسترسی به راندمانهای بالای برش در حین کاهش میزان گرد و غبار حاصل می باشد. اندازه بزرگ این سرمته ها، کاربرد آنها را در شرایط سنگی سخت تا متوسط، مطلوب می سازد. کاربرد سرمته های شعاعی بزرگ در سنگهای سخت، موجب وارد آمدن ضربه سریع می تواند خسارت به سرمته و کاهش راندمان برش و بروز لرزشهای شدید در دستگاه شود.

سرمته های جلوبُر - این سرمته ها گلونه ای طراحی شده اند که در مقایسه با سرمته های شعاعی، نیروی محوری بیشتری را در جریان برش به سنگ منتقل می کنند. پایه سرمته ها[4] جای این که تحمل نیروهای برشی بیشتری را داشته باشند، بنحو مناسبتری تنظیم شده اند. ساق سرمته ها[5] کمتر از ساق سرمته های شعاعی در معرض آسیب پذیری قرار دارند و بهتر قابل انطباق با سرمته های مخروطی هستند. آنفیشانها با موفقیت همراه با سرمته های جلوبر به کار گرفته شده اند.

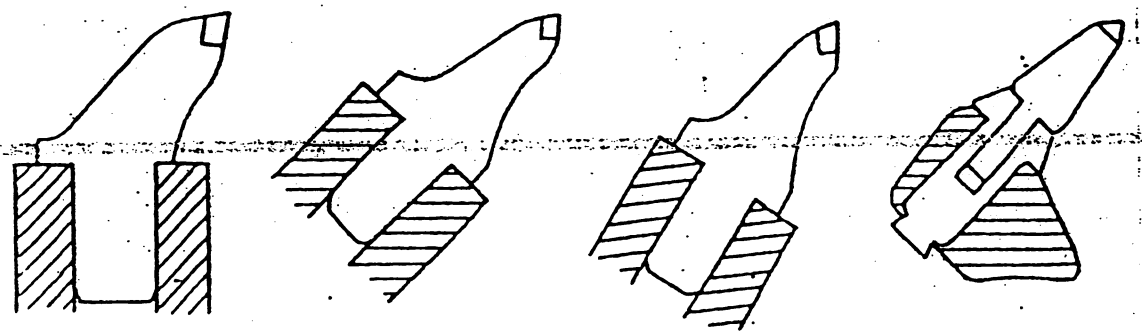


شکل ۶-۴ : بهبود عملکرد برش سرمته ها بواسطهٔ تعبیهٔ آنفیشانهای فشار بالا

1-point attack pick ; 2-radial picks
3-forward attack pick ; 4-pickbox
5-pick shank

Hurt در مورد تاج حفار و سرمته‌های ماشینهای حفار بازوئی اظهار داشته است که سرمته‌های مخروطی با توجه به قابلیت چرخش سرمته‌ها در درون پایه، از این مزیت برخوردارند که تماسایش کامل سرمته، سرمته‌ها کار آئی دارند و در نتیجه از عمر طولانی تری برخوردارند. استفاده از سرمته‌های شعاعی در طبقات ذغالی تراش‌ها[1] نتایج خوبی از جهت سازگاری با سیستمهای جلوگیری از احتراق و تولید گرد ذغال دارد.

در شکل ۶-۵ انواع سرمته‌هائی که بر روی تاج حفار یا سر برش ماشینهای حفار بازوئی نصب می‌شوند، نشان داده شده‌اند.



مخروطی　　نیم جلوبر (۳۰°)　　جلوبُر (۴۵°)　　شعاعی

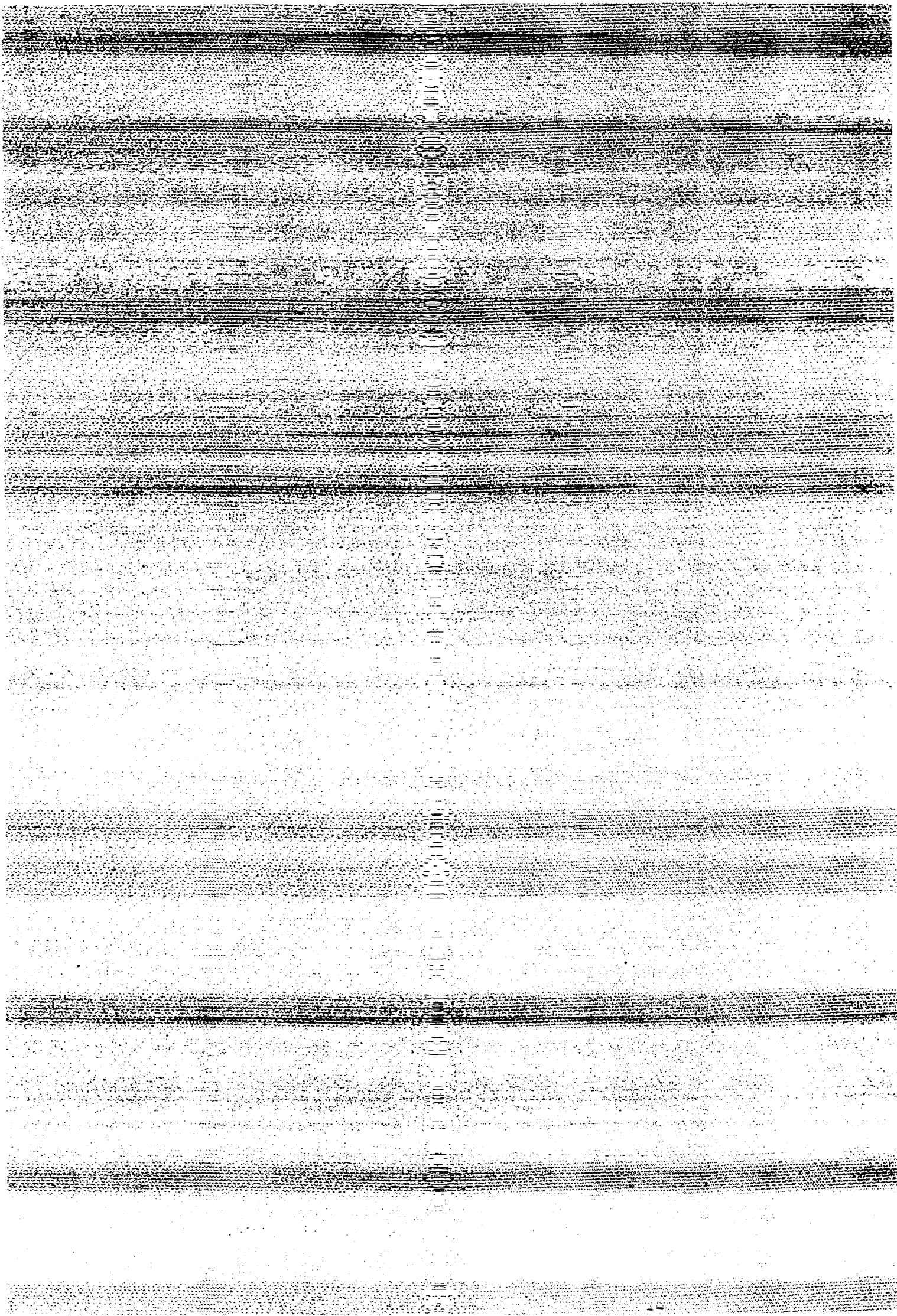
شکل ۶-۵ : انواع اصلی سرمته‌های مختلف مورد کاربرد در ماشینهای حفار بازوئی

توانائی برش ماشین حفار بازوئی - تجارب حاصل در مناطق ذغالی انگلستان نشان می‌دهد که ماشینهای حفار بازوئی قادرند به حفر سنگها با دامنهٔ مقاومتی متفاوت بپردازند، لیکن ضعفهای ساختاری در سنگ نظیر درزه‌ها و صفحات لایه‌بندی می‌توانند محدودیتهائی در جریان حفر به وجود آورند. مطالبی کلی در مورد قدرت و توانائی برش ماشین حفار بازوئی در جدول ۶-۱ آورده شده است.

جدول ۶-۱ : توانائی یا قدرت برش ماشینهای حفار بازوئی

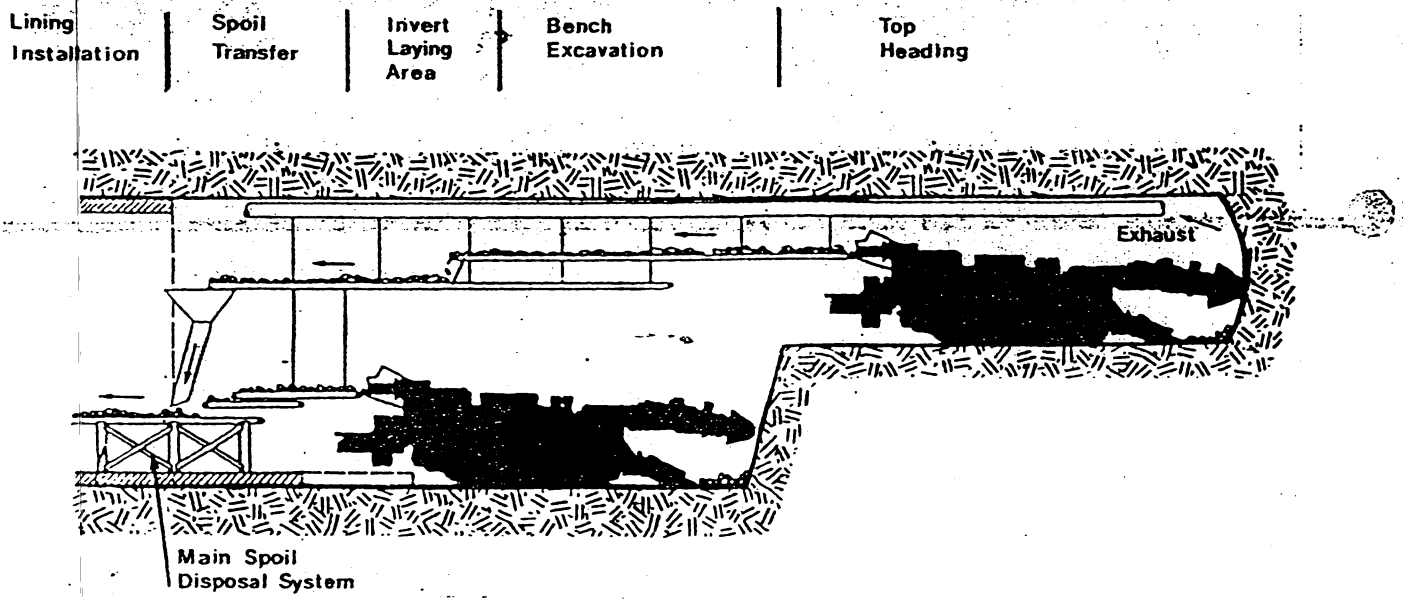
انواع اصلی روهدر	توانائی یا قدرت برش
۱- ماشینهای سبک	۱- قادر به برش سنگهائی با مقاومت ۸۰ مگاپاسکال به نحوی موفقیت آمیزی باشد.
	۲- در سنگهائی با مقاومت بیش از ۸۰ MPa می‌توانند مشکلاتی در برش بروز کنند.
۲- ماشینهای سنگین	۱- حفر موفق سنگهائی با مقاومت تا ۱۰۰ مگاپاسکال
	۲- در سنگهائی با مقاومت بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال و بالاتر نمی‌توان موفق بودن حفر را تضمین کرد.
	۳- سنگ توده‌ای با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال توسط یک ماشین حفار بازوئی انگلیسی - روسی در معدن ذغال Lea Hall با موفقیت حفر شد.

1- Shearer



ماشینهای حفار بازوئی : انعطاف پذیری و سازگاری با شرایط تونلسازی

حفر همزمان چند پله با ماشینهای حفار بازوئی - به منظور افزایش دامنهٔ ارتفاع حفر تونل وقتی که از ماشینهای حفار بازوئی استفاده می شود ، روش معمول حفر همزمان پله ها ، مانند آنچه در شکل ۶-۶ نشان داده شده است ، می باشد . در این شکل چگونگی حفر همزمان دو ماشین حفار بازوئی در نزدیکی هم و ترتیبات پیوسته انتقال مواد کنده شده ، نشان داده شده است .



شکل ۶-۶ : تصویری شماتیک از حفر تونل پشتاز بالائی و پله توسط دو ماشین حفار بازو بزرگ

سپرهای دارای بازوهای حفار : یکی از کاربردهای مهم بازوهای حفار در تونلسازی برای کندن ، بارگیری و تأمین نگهداری ، استفاده از بازوی حفاری است که در داخل یک سپر ، برای انجام عملیات در شرایط استخراجی عمیق ، نصب شده است (شکل ۶-۱۰) . موارد زیر در ساخت این سپر مدنظر قرار گرفته بودند :

۱- جلوگیری از گیر افتادن سپر در حین کار .

۲- به حداقل رساندن طولی از سقف لایه که بطور موقت در جلوی ماشین بدون نگهداری باقی می ماند .

۳- ایجاد قابلیت نصب قابهای نگهداری فولادی دایره ای شکل به فواصل ۱/۵ تا ۱ متر از یکدیگر .

۴- میسر ساختن حفر تونلهائی با قطر ۴/۵ تا ۷ متر .

۵- ساخت ماشین با هزینهٔ نسبتاً کم .

۶- تأمین دسترسی به جبهه کار.

۷- قابلیت استقال آسان و سریع از جائی به جائی دیگر و انعطاف پذیری در حفر تونلهای باطول کم.

ازابتدا معلوم بودکه حفر تونل درمناطق گسلهٔ واقع درعمقهای مکفی در زیرسطح زمین توسط ماشینهای حفر تونل، موجب وارد آمدن تنشهای سنگی بالائی برروی این ماشینهای شود. ماشینهای تونلسازی تمام رخ[1] درشرایطی که زمین دارای خاصیت مچالشوندگی زیادی بود، گیرافتاده بودند و زمان و تلاش زیادی مصروف بیرون کشیدن و رهاکردن آنها شده بود. تحقق موارد فوق مستلزم انعطاف پذیری همیشه درعمل درحین دستیابی به کنترل مؤثر زمین در شرایط سنگی مختلف بود.

سپردارای حفار بازوئی ساخت Dosco مدل GTM5 در سنگهای آهکی کربنیفر با مقاومت ۹۰ تا ۱۳۰ مگا پاسکال دارای سرعت کندن حدود ۱۰ تا ۱۲ متر مکعب در ساعت بوده است.

کاربرد روشهای جدید[2] NATM: تونلسازی به روش NATM به دلیل مقرون به صرفه تر بودن تونلسازی با این روش تحت شرایط مختلف سنگ و دیگر عوامل محیطی، روشی فراگیر و عمومی شده است. کیفیت فضای حفر شده با این روش یک عامل مهم است و ماشینهای حفار بازوئی با توجه به قابلیت کارشان تحت شرایط گوناگون و متنوع زمین شناسی، بنحو موفقی این کیفیت را تأمین کرده اند. ماشین حفار بازوئی AMT 70[3] برای روش NATM طراحی و ساخته شده است. ویژگی مهم این ماشین قابلیت حفر تونلهائی باسطح مقطع ۶۰ متر مربع یا بیشتر می باشد (شکل ۶-۱-ط).

حفر تونل Karawanken بین اتریش و یوگسلاوی باسطح مقطع ۱۰۱ متر مربع به صورت یک راه دوبانده و به طول ۸/۵ کیلومتر در سنگ آهک، دولومیت و ماسه سنگ با روش NATM و با استفاده از AMT70 صورت گرفته است. این تونل در دو مقطع اصلی با شرایط مشکل زمین رو برو شد. اول در یک مقطع شدت خرد شدهٔ آبدار و دوم در یک مقطع دارای شیلهای گرافیتی سیاه با خاصیت خودسوزی و درزه دار. ابتدا قسمت بالائی و سقف تونل باسطح مقطع ۵۳ متر مربع توسط AMT70 حفر شد (با روش NATM) و برای حفر بقیه سطح مقطع نیز از همین ماشین و به صورت حفر پله ای استفاده گردید و در زمان حفر قسمت پائین نگهداری قسمت بالائی تونل (قاب های قوسی فولادی، بیچ سنگها، و بتن پاشی) انجام می گرفت.

1-Full Face T.M. ; 2-New Austrian Tunnelling Method ; 3-Alpine Miner Tunneller ;

ماشینهای حفار چند بازویی - توسعه و پیشرفت ماشینهای حفار دو بازویه ناشی از تقاضای زیاد برای افزایش سرعت پیشروی که در ایجاد قضاهای آماده سازی در معادن تقاضائی معمول است، می باشد. ماشین Dosco TB 600 قادر به حفر و بارگیری ۲۰۰ متر مکعب در ساعت است. این ماشینها نرخ کندن سنگ را افزایش و در نتیجه زمان لازم برای حفر طول ثابتی از تونل را کاهش می دهند، به بیانی دیگر، نرخ حفر با این ماشینها بالای رود. این نوع ماشین برای حفر تونلهائی با سطح مقطع چهار گوش، که کاربرد اصلی آنها در تونلهای معدنی است، و آتاقهای استخراجی بسیار مناسب می باشد (شکل ۶-۱-ز).

در شکل ۶-۷ (الف) یک ماشین حفار دو بازویه Dosco TB3000 و ابعاد و شکل تونل حفر شده با آن نشان داده شده است.

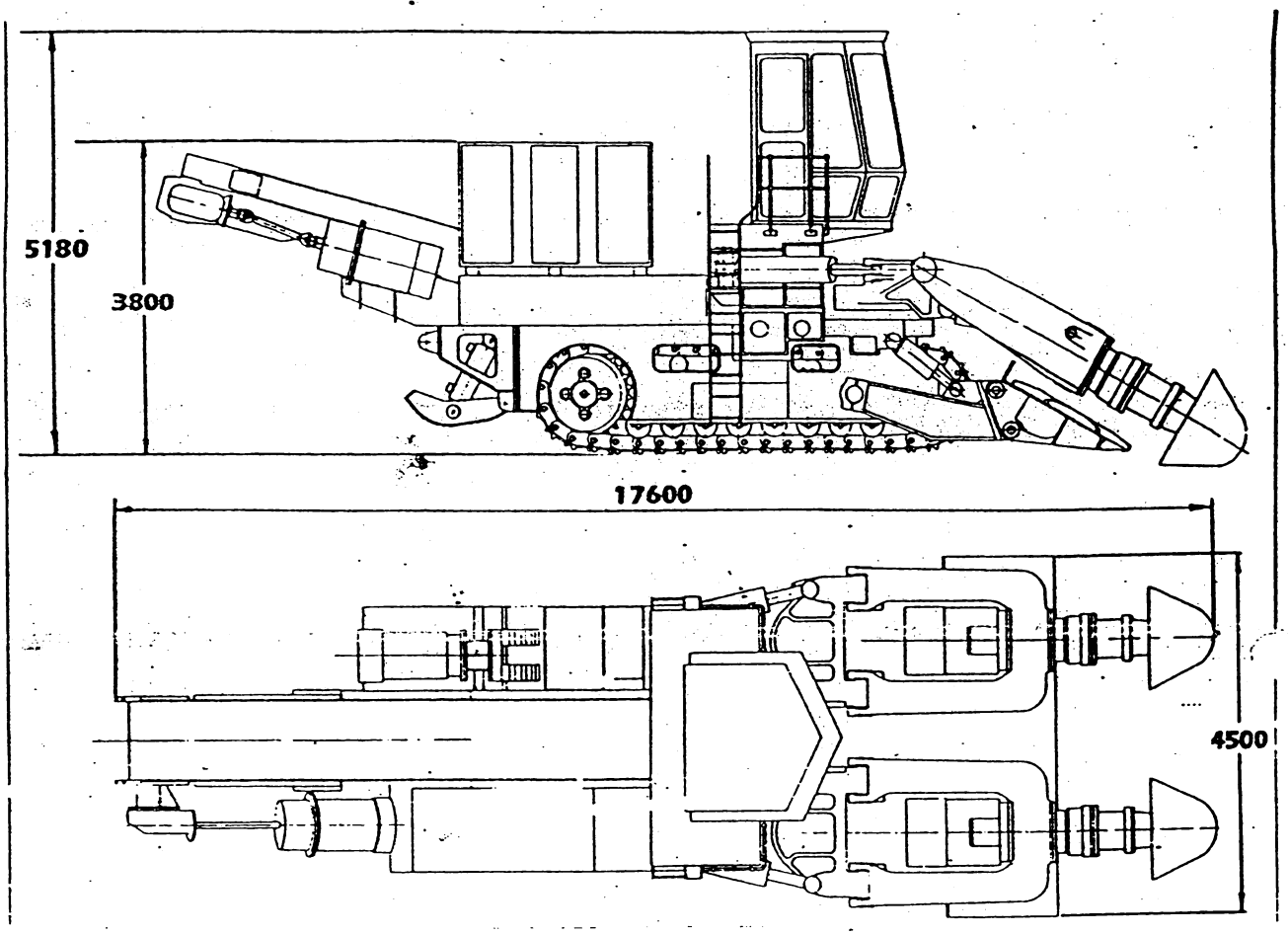
تونل روزنبرگ[1]: حفار چند بازویه - این تونل با سپری به قطر ۱۱٫۴۶ متر و یک سیستم حفار چند بازویه در سوئیس حفر شد. شکل ۶-۷ (ب) سیستم حفار چند بازویه سپری و شکل ۶-۷ (ج) مراحل حفر، حمل و نقل و نصب پوشش در این تونل را نشان می دهد. سطح مقطع حدود ۱۰۰ متر مربع این تونل به طور یکجا توسط چهار بازوی حفار و بدون وجود هیچ گونه خطر برخورد این چهار بازو با هم حفر شد.

تأثیر ویژگیهای حفر سنگ بر عملکرد ماشین حفار بازوئی

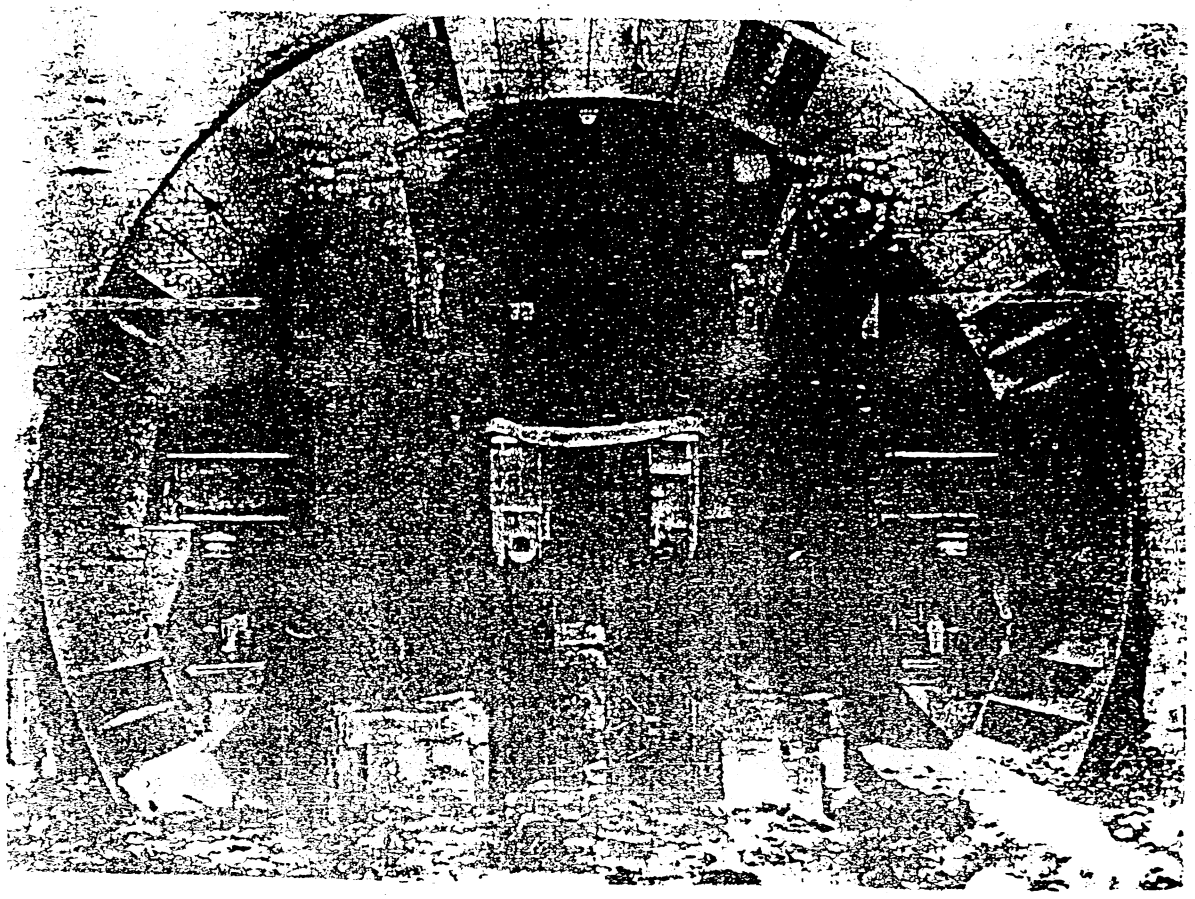
ماشینهای تونلسازی از جنبهٔ قابلیتهای اجرائی حفرشان در شرایط زمین شناسی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته اند. به هر صورت یکی از ویژگیهای مهمی که داشتن ارزیابی در مورد آن ضروری است، عملکرد ماشین در انواع مختلف سنگهای می باشد. تحقیقات در این زمینه بر تعیین شاخصها و ویژگیهای سنگ و برقراری ارتباط بین این شاخصها و نرخ پیشروی متمرکز بوده است.

آزمایشهای لازم برای تعیین ویژگیهای حفر سنگ: آزمایشهای لازم برای تعیین شاخصها و ویژگیهای رفتاری سنگ در برابر برش و حفر بر نمونه های آزمایشگاهی مختلف نظیر مقاومت، سختی و ساینده گی مبتنی هستند. پارامترهای متعدد مورد بررسی قرار می گیرند و برای قضاوت کلی راجع به رفتار برشی سنگ به صورت تجمعی مورد نظر قرار داده می شوند. بر مبنای نتایج آزمایشگاهی، نسبتهای تجربی از بین نتایج آزمایشگاهی، به منظور انجام یک ارزیابی منطقی از رفتار برشی سنگ، استنتاج می شود.

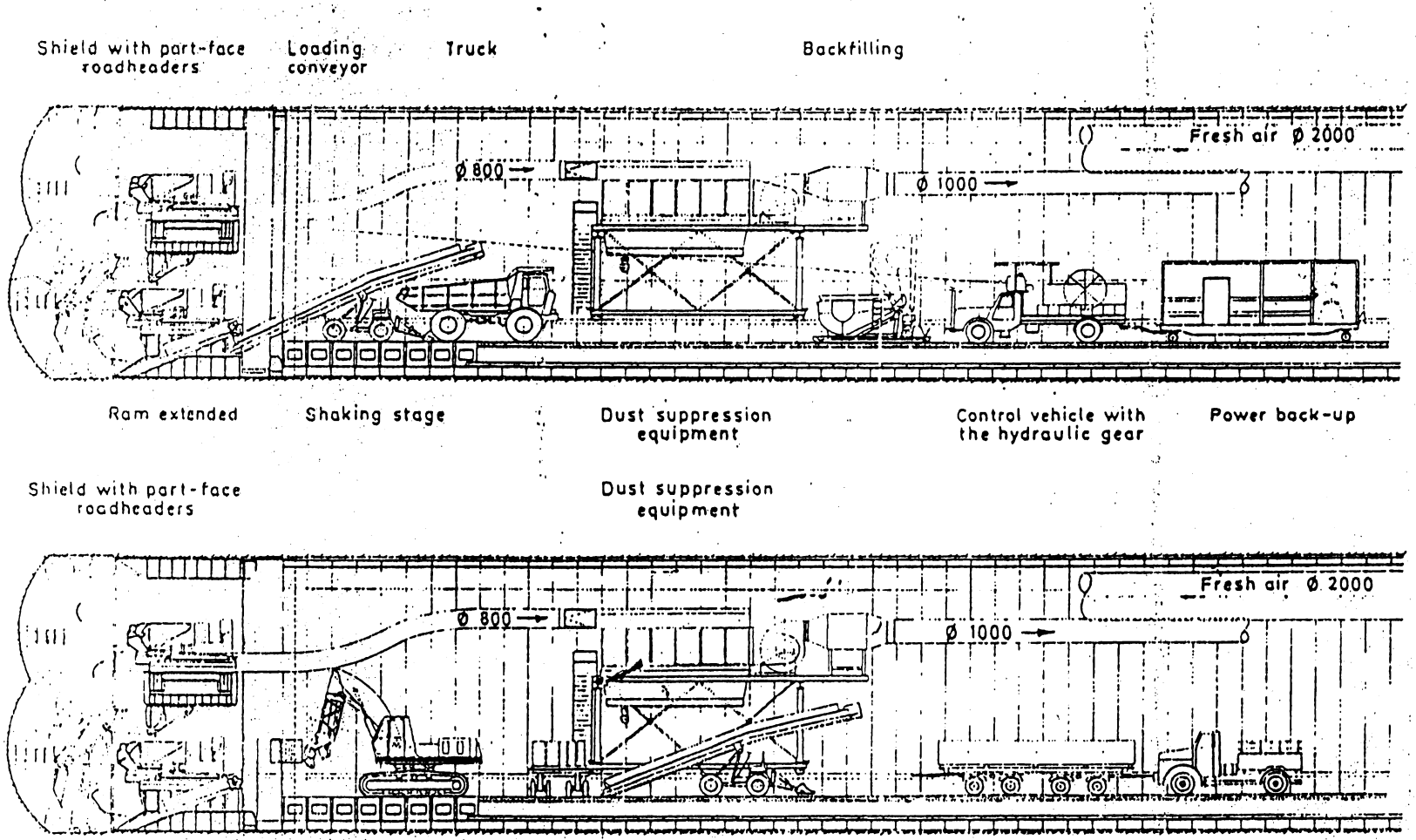
1-Rosenberg Tunnel

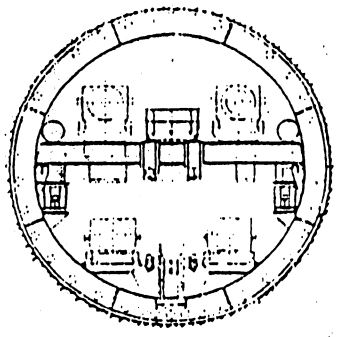


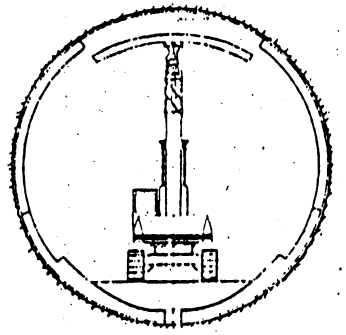
شکل ۶-۷ (الف): ماشین حفار دوبازویی مدل Dosco TB 3000



شکل ۶-۱۴ (ب): سپر با قطر ۱۱/۴۶ متر یک حفار پایلوتی







شکل ۶-۷ (ج) : تصویر شماتیکی از حفر تونل، حمل و نقل و نصب پوشش با ماشینهای متعدد چند بازویی

Roxborough برش سنگ توسط سرمته‌ها را مورد بحث قرار داده و جنبه‌های تئوریک نیروهای برشی سرمته را بررسی و تجزیه و تحلیل نموده است. نتایج تجربی و جوابهای حاصل از بررسیها و محاسبات تئوریک سازگاری و هماهنگی نسبتاً خوبی با هم داشته اند. طبق نظر Evans اعمال نیرو از طریق نوک سرمته سبب ایجاد یک ترک قوسی شکل در سنگ می‌شود (شکل ۶-۸) و میزان نیروی برشی سرمته طبق رابطه Evans برابر است با:

$$F_c = \frac{2\,t\,W\,d\,\sin 0.5(\frac{\pi}{2}-\alpha)}{1-\sin 0.5(\frac{\pi}{2}-\alpha)} \qquad (۱-۶)$$

صف ۳۷ - سمینار رودهدر.
شکل ۴-۲

که:

F_c = نیروی وارد بر سرمته در لحظه برش هنگامی که شکست اتفاق می‌افتد

شکل ۶-۸ : مدل ایوانس برای برش سنگ توسط سرمته*

t = تنش کششی سنگ

W = عرض سرمته $\quad d$ = عمق فرو روی سرمته یا عمق برش $\quad \alpha$ = زاویه گیج قراری[1] سرمته

در شکل ۶-۹ (الف) تأثیر تغییر زاویه گیج قراری بر نیروی لازم برای شکست (F_c) نشان داده شده است. یک حد عملی برای زاویه گیج قراری سرمته وجود دارد که تابع شکل هندسی سرمته است و آن خود بر مقاومت، سر و تیز ماندن نوک سرمته تأثیر دارد. در شکل ۶-۹ (الف) مشاهده می‌شود که برای مقادیر کمتر از حدود ۳۰° برای زاویه α، نیروی لازم برای شکست یا برش به میزان زیادی افزایش می‌یابد.

Roxborough همچنین تحقیقاتی در مورد انرژی ویژه[2] در ارتباط با برش سنگ انجام و معادله زیر را ارائه داده است:

$$SE = F_c' / (W d + d^2 \operatorname{tg}\theta) \qquad (۲-۶)$$ (انرژی ویژه)

که: F_c' = متوسط نیروی برش

θ = زاویه گسیختگی[3] (شکل ۶-۹-ب)

---

* منبع: سمینار کارشناسی ارشد علی فرشچی مقرب، حفر تونل با رودهدر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

1 - rake Angle ; 2 - specific energy (MJ/m³) ; 3 - break out angle

چون از نظر تئوری نیروی برشی (F_c) مربوط است به نیروی برشی سرمته، پس لازم است که نسبتی بین $F(c)$ و متوسط نیروی برشی (F_c) نیز برقرار باشد. Roxborough استدلال کرده است که F_c را می‌توان به عنوان نیروی متوسط سرمته در نظر گرفت و این که بین F_c و نیروی متوسط برش (F_c') رابطه زیر برقرار است:

$$F_c' = F_c / R \qquad (۶-۳)$$

که R برابر است با نسبت بین متوسط نیروی برشی سرمته (F_c) و متوسط نیروی برشی (F_c') در هنگام گسیختگی؛ تجربه و بررسیها نشان داده است که R هیچ‌گاه از ۲ کمتر است (R سنگهای ضعیف نظیر زغالسنگ به مقداری حدود ۲ و سنگهای مستحکم و محکم تر به ۳ برسد).

از ترکیب معادلات ۶-۱، ۶-۲ و ۶-۳، معادله ۶-۴ حاصل می‌شود:

$$SE = K_1/(K_2 + d)$$

که:

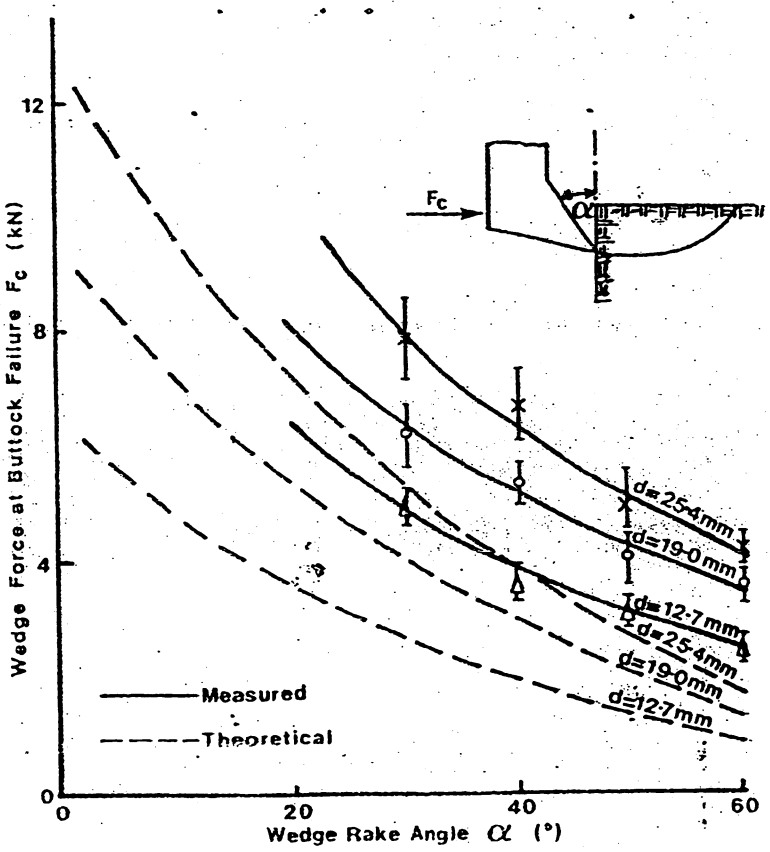
$$K_2 = W/\operatorname{tg}\theta$$

$$K_1 = \frac{2t\, W \sin 0.5(\pi/2 - \alpha)}{R \operatorname{tg}\theta (1 - \sin 0.5(\pi/2 - \alpha))}$$

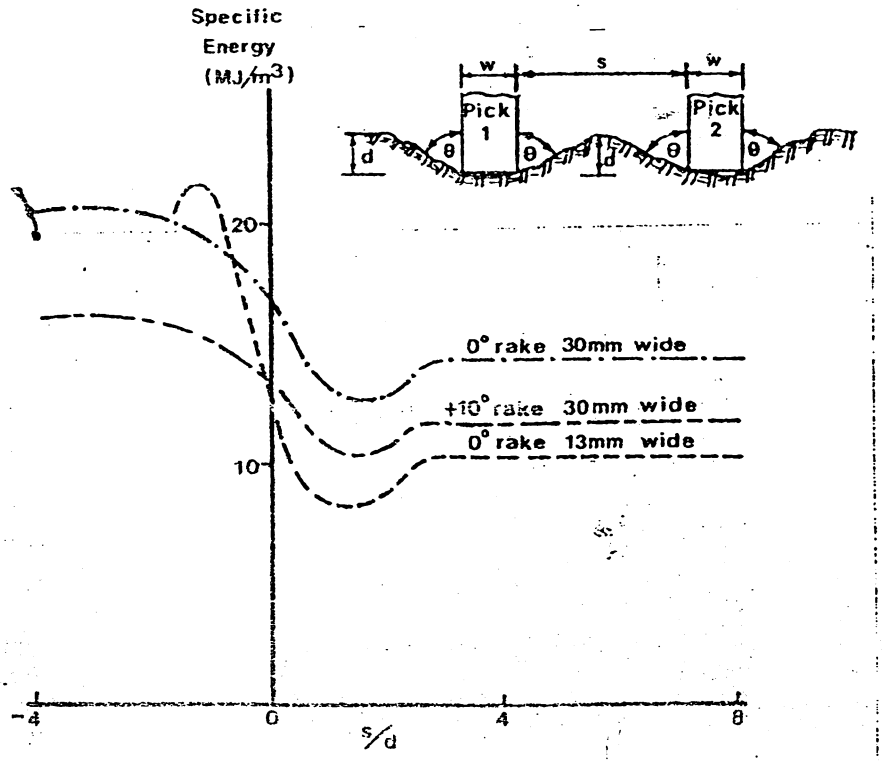
شکل ۶-۹ (ب) با استفاده از روابط فوق توسط Roxborough تهیه شده است و اهمیت فاصلهٔ بین سرمته‌ها، بگونه‌ای که تأثیر متقابل حوزه یا منطقهٔ شکستگی حاصل از هر سرمته یا به بیان دیگر تأثیر متقابل زاویه کنده شدگی بتواند انرژی ویژهٔ مورد نیاز در عمل برش را کاهش دهد، نشان می‌دهد. تأثیر متقابل زاویه کنده شدگی یا منطقهٔ شکستگی حاصل از هر سرمته وقتی شروع می‌شود که $\frac{S}{d} < 2\operatorname{tg}\theta$ یا $S < 2d\operatorname{tg}\theta$ باشد. برای زاویه کنده شدگی ۵۲ درجه (زاویه کنده شدگی انهیدریت)، طبق این رابطه، تأثیر متقابل وقتی تحقق خواهد یافت که نسبت فاصله دو سرمته به عمق فرورویِ سرمته ($\frac{S}{d}$) کمتر از حدود ۲/۶ باشد.

برای سنگ آهک و ماسه سنگ

تأثیر عمق فرورویِ یا برش بر انرژی ویژه و متوسط نیروی برش در شکل ۶-۹ (ج) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که متوسط نیروی برش تقریباً به طور خطی با افزایش عمق برش افزایش پیدا می‌کند. انرژی ویژه با افزایش عمق برش کاهش می‌یابد. روند نمودار نشانگر این نکته است که با افزایش عمق برش، از جایی به بعد انرژی ویژه ثابت می‌شود.



الف - تغییرات نیروی برشی لازم برای کندن برحسب زاویه‌ی قراری سرمته در ماسه سنگ

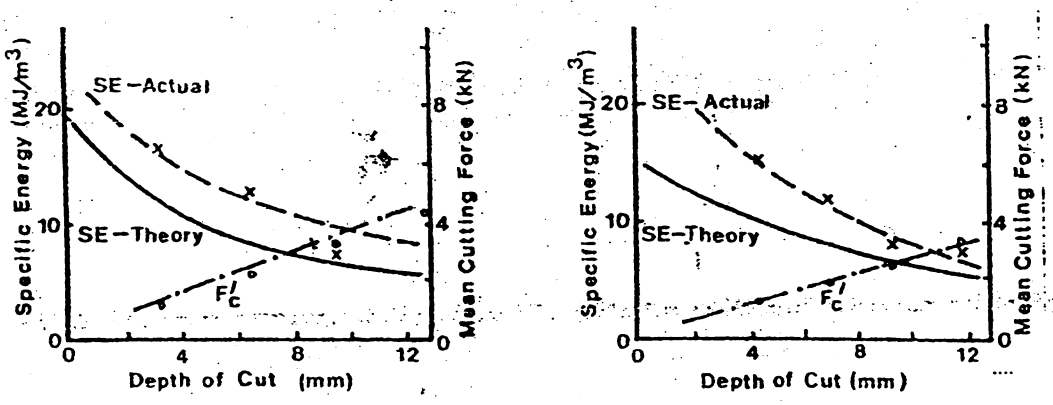


ب - رابطه بین انرژی ویژه (هفر) (SE) ونسبت فاصله بین سرمته‌ها به عمق برش ($\frac{S}{d}$)

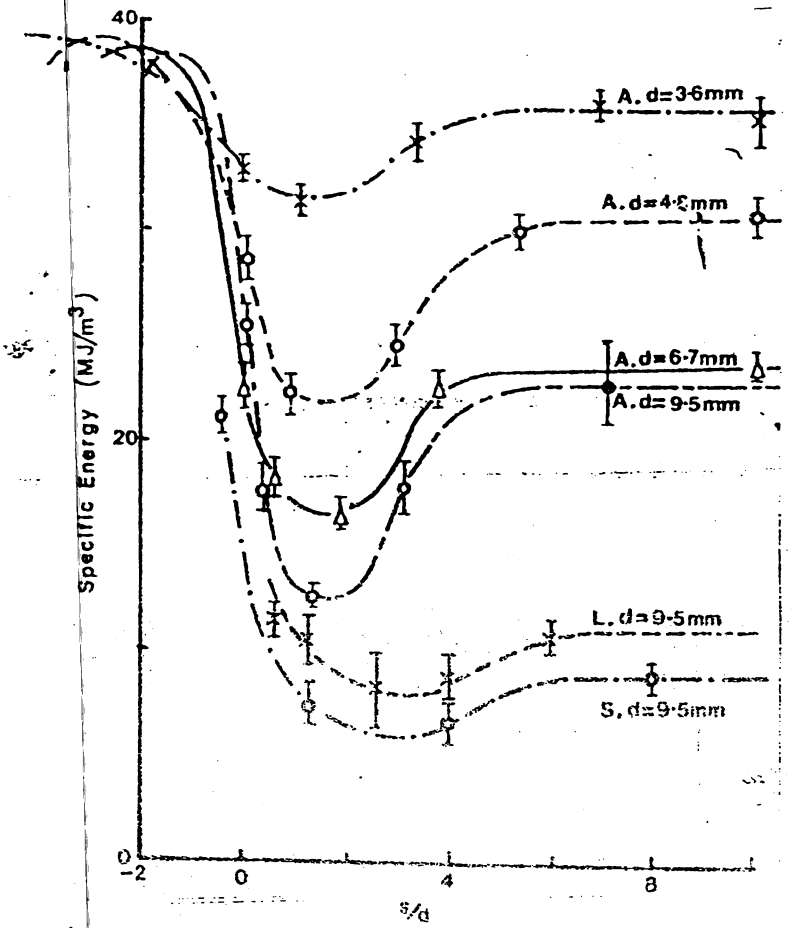
شکل ۶-۴ : نمونه‌ی برشی سرمته و انرژی ویژه‌ی حفر با شکل هندسی سرمته و حالت رابطه متقابل دارند.

برش

در شکل ۶-۹ (د) تأثیر فاصله سرمته‌ها از هم بر انرژی ویژه که برمبنای تجارب آزمایشگاهی بر روی سه نوع سنگ بدست آمده، به تصویر کشیده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تأثیر متقابل سرمته‌ها به عمق برش و نوع سنگ بستگی دارد. این نتایج نشان می‌دهند که تأثیر متقابل سرمته در حالت مناسب وقتی اتفاق می‌افتد که نسبت S/d کمتر از حدود ۴ باشد.



(ح) تأثیر عمق برش بر انرژی ویژه و نیروی برش متوسط
(i) سنگ آهک، ۱۳ میلیمتر عرض سرمته، صفر درجه زاویه کنده شدگی
(ii) ماسه سنگ، " " " " " "



علائم و مقاومتها

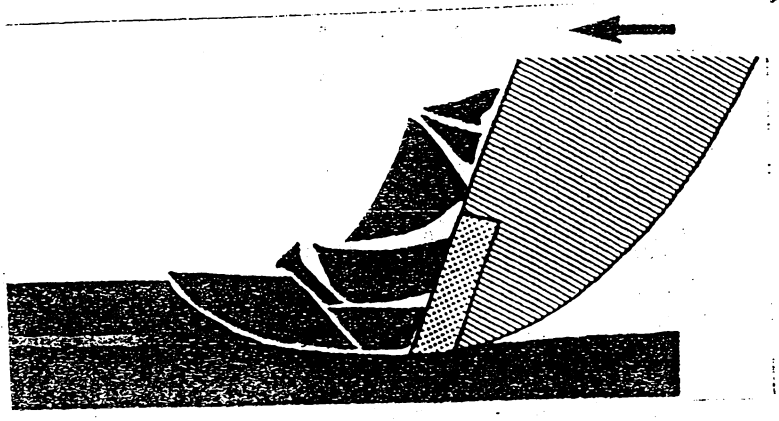
A = انهیدریت
L = سنگ آهک
S = ماسه سنگ
مقاومت فشاری
A = ۱۰۰-۱۲۵ MPa
L = ۱۱۰-۱۶۰ MPa
S = ۳۵-۵۰ MPa
مقاومت کششی
A = ۶/۵-۱۰ MPa
L = ۶/۸-۱۰/۳ MPa
S = ۱/۸-۳ MPa

(د) اثر فاصله بین سرمته‌ها بر انرژی ویژه

شکل ۹-۶ (ادامه): نیروی برش سرمته و انرژی ویژه حفر با شکل هندسی سرمته و حالت برش رابطه متقابل دارند

البته این حقیقت را نباید از نظر دور داشت که این نتایج برمبنای مطالعات آزمایشگاهی بدست آمده اند. آزمایشها بر روی سنگهائی صورت گرفته اند که از محل و محیط زمین شناختی خود یا تونل جدا شده اند، در نتیجه ضرورتاً شرایط یا حالتهائی که سنگ در محل طبیعی خود تحت تأثیر آن قرار داشت را منعکس نمی کنند. بهرحال، این شکل نمونه های آزمایشگاهی، بخش عمده ای از رفتار واقعی سنگ در برابر برش برحسب دامنهٔ آزمایشهای انجام شده و این آزمایش اصولاً با رفتار سرمته بکار گرفته شده برای یک نوع سنگ خاص مربوط است را نشان می دهد. با این وجود، باید در نظر داشت که در صورت امکان برای تکمیل و تأیید مطالعات و نتایج آزمایشگاهی بایستی آزمایشهای برجا[1] انجام داد.

حالت کلی شکست سنگ براثر کار برد یک سرمته چنگکی[2] در شکل ۶-۹ (هـ) نشان داده شده است. این شکل طبیعت قوسی یا منحنی شکل گسیختگی زمین واقع در جلوی سرمته و شکل معمول شکستگی قطعات خرد شدهٔ[3] سنگ گسیخته شده را نشان می دهد. در جریان برش، چنین گسیختگیهای سنگی و تشکیل خرده سنگها متوالی اتفاق می افتد و همین امر موجب بالا و پائین رفتن مقدار نیروی برشی، حتی در مواقعی که عمق فرورفتن یا برش یکسان باشد، می شود.



شکل ۶-۹ (هـ): حالت یا شکل عمومی گسیختگی سنگ در جریان برش با سرمته چنگکی

انرژی ویژه به طور کلی مقدار انرژی لازم برای آزاد کردن یا جدا کردن واحد حجم سنگ از یک تودهٔ یکپارچه و صلب با استفاده از شکلی از مکانیزم برش یا شکستن، می باشد. انرژی ویژه یا انرژی نصب ابزارهای بخش کننده معمولاً برای سرمته ای که بر روی یک لبهٔ سنگی قرار داده شده در یک گیره طراحی شده برش منظور به حرکت درمی آورد، اندازه گیری می شود.

1-in situ testing ; 2-drag bit ; 3-chips

جدول ۶-۲ نتایج مطالعات آزمایشگاهی که به منظور تعیین انرژی ویژه با استفاده از ماشینهای حفار بازوئی در شرایط مختلف زمین شناسی صورت گرفته است را نشان می دهد.

جدول ۶-۲ : کاربرد ماشینهای حفار بازوئی در لایه های توده ای، بسیار درزه دار و انرژی ویژه

انرژی ویژه حفر تعیین شده در آزمایشگاه در رابطه با وزن ماشین حفار بازوئی		توضیح عملکرد برش
سنگین	متوسط (MJ/m³)	
۲۵-۳۰	۱۵-۲۰	استفاده از ماشین تنها وقتی از نظر اقتصادی توجیه پذیر است که رگه یا لایه نازک (کمتر از ۰/۳ متر) باشد. مشاوره های تخصصی و تغییر روشها در برش سنگهای سخت می تواند کمک کننده باشد.
۲۰-۲۵	۱۲-۱۵	عملکرد ماشین ضعیف است. تغییرات منظم سرمته هائی که اندکی فرسوده شده اند موجب افزایش انرژی لازم و کاهش قدرت ساییش سرمته می شود. در این موارد سرمته های فرسوده می توانند عملکرد بهتری داشته باشند و کاهش سرعت موتور برش سودمند خواهد بود.
۱۷-۲۰	۸-۱۲	عملکرد ماشین ضعیف تا متوسط است. در سنگهای ساینده، سرمته ها باستی به طور مرتب بازدید شوند، چون سرمته های کند عملکرد را بهبود می بخشند.
۸-۱۷	۵-۸	عملکرد ماشین متوسط تا خوب و فرسودگی اجزای ماشین کم است. در سنگهای ساینده سرمته ها باید به طور منظم تعویض شوند.
زیر ۸	زیر ۵	ماشین برای این سنگها کاملاً مناسب است. سرعت پیشروی بالائی دارد. گل سنگ که در پائین ترین رده در این نوع سنگها قرار دارد با این ماشینها به جای برش، کنده و شکافته می شود و می توان به سرعتهای بسیار بالای پیشروی در این سنگها دست یافت.

در مطالعاتی که توسط Roxborough و McFeat-Smith برای اندازه گیری توان مصرفی در حالتهای مختلف برش به وسیلهٔ یک ماشین حفار بازوئی شرکت Dosco صورت گرفت، توان جذب شده توسط ماشین بطریق سیستم هیدرولیک

وحجم وسرعت حفر سنگ کنده شده در جریان هریک از حالتهای مختلف برش و برای انواع مختلف سنگها اندازه گیری شد. عوامل و پارامترهای زیر پس از این مطالعات ومقایسه آنها به‌عنوان نتایج اجرائی عملکرد ماشین برش گردید:

شاخص شکستگی[1]: این شاخص تعیین کنندهٔ تعداد متوسط ضعفهای ناپیوستگی (درزه‌ها، صفحات لایه بندی، ترکها وغیره) در هر متر از هر لایهٔ اصلی سنگ می باشد که آن را به طور عمودی یا افقی قطع کرده است.

ضریب تغییر شکل[2]: این ضریب معیاری جهت ارزیابی سختی سنگهای جبهه کار تونل می باشد که توسط جابجائی حاصل از آزمایش مشخص می شود:

$$\text{ضریب تغییر شکل} = (R_c - R_i)/R_c$$

که: R_c = مقدار ثابت جهش بعد از ۲۰ آزمایش

R_i = مقدار جهش اولیه (مقدار جهش در اولین آزمایش)

انرژی ویژه[3]: انرژی مصرفی توسط تاج حفار یا سر برشی برای حفر واحد حجم سنگ برای هر لایه و به طور کلی به صورت انرژی لازم برای واحد حجم سنگ حفر شده تعریف می شود.

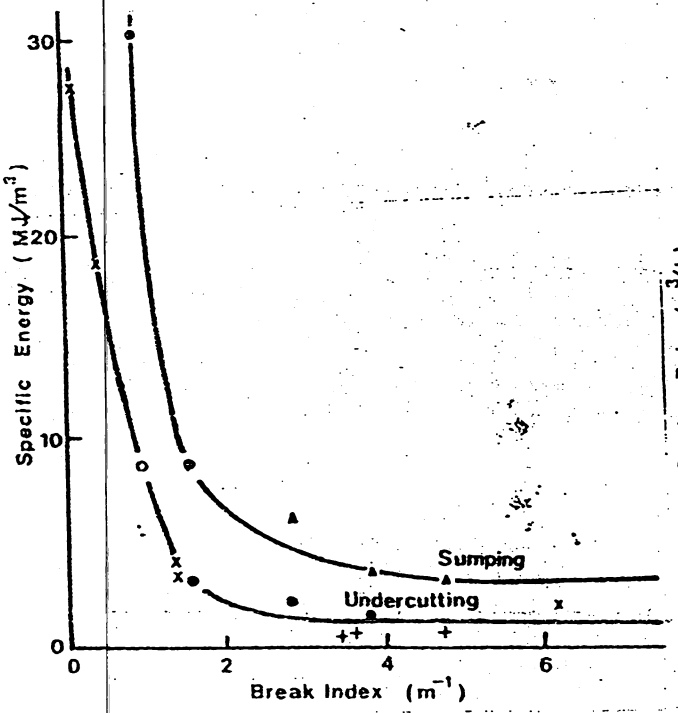
نرخ حفر یا برش[4]: زمانی که برای حفر حجم سنگ حفر شده مصروف گردیده است را به منظور تعیین نرخ حفر اندازه گیری می کنند: حجم سنگ حفر شده در واحد زمان (معمولاً ساعت) را نرخ حفر گویند. شکلهای ۶ـ۱۰ (الف) و (ب) نتایج حاصل از این مطالعات را نشان می دهد.

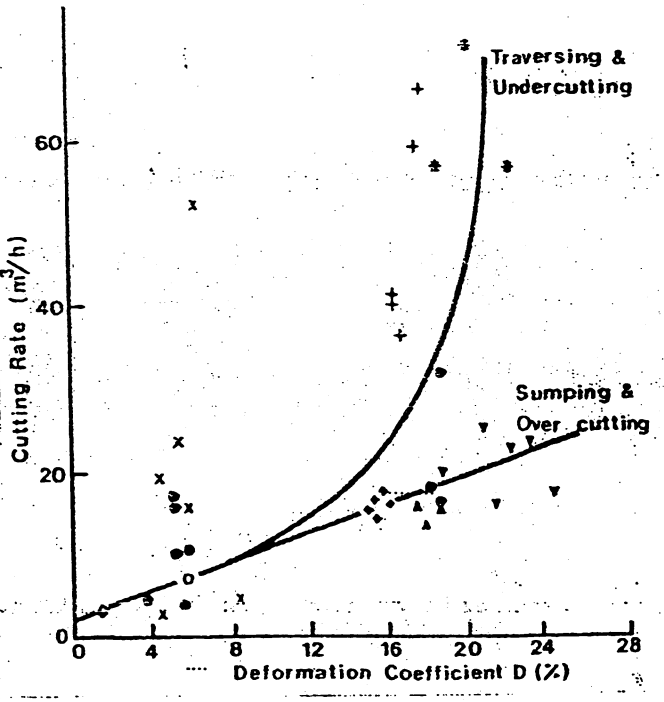
برموارد زیر به‌عنوان نکات مهم حاصل از این نتایج و مشاهدات به‌جای صورت گرفته در جریان این مطالعات تأکید شده است:

۱ـ عملکرد ماشین برش بجز زیادی تحت تأثیر ویژگیهای رفتاری توده و مادهٔ سنگ[5]، مشخصات ماشین، مشخصات تونل و شرایط عملیاتی قرار دارد.

۲ـ در صورتی که عمل حفر در شرایطی انجام گیرد که مشکلات تخلیه مواد حفر شده و شرایط عملیاتی مانع ایجاد نگردد، ویژگیهای مادهٔ سنگ بیشترین تأثیر را در عملکرد برش ماشین از خود نشان می دهد.

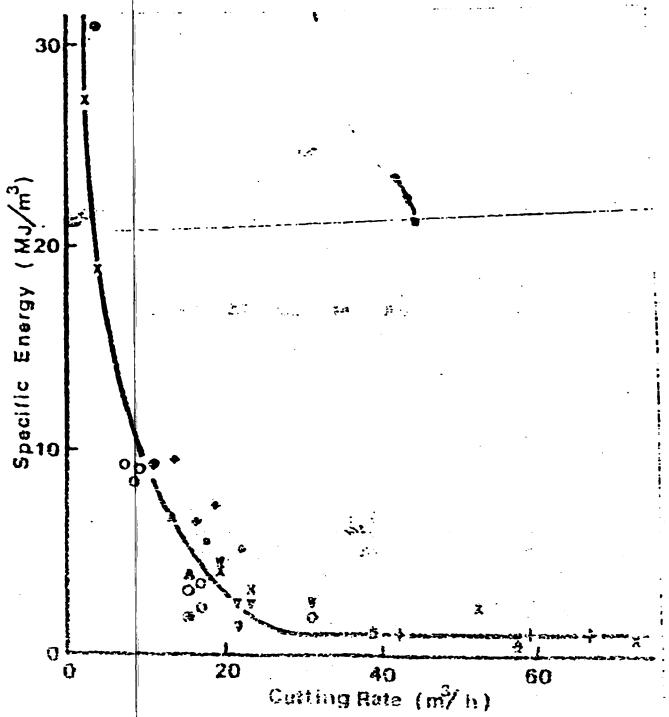
1-Break Index ; 2-Deformation Coefficient ; 3-Specific Energy ; 4-Cutting Rate ; 5-rock material and mass behavioural properties

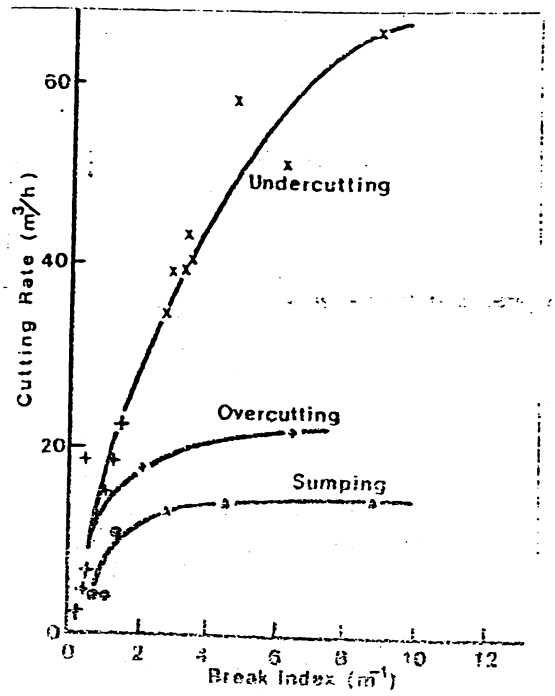




۱- تأثیر ضریب تغییر شکل بر نرخ حفر برای ماسه‌سنگ ♦، ۲- تأثیر شاخص شکست بر انرژی ویژه در لایه‌های گل‌سنگ ذغال‌سنگ ▼، گل‌سنگ ● x +

شکل ۶-۱۰ (الف) : نتایج عملکرد برش ماشین حفار بازوئی: تأثیر پارامترهای مربوط به برش





۳- تأثیر شاخص شکست بر نرخ حفر در لایه‌های گل‌سنگ ۴- ارتباط کلی بین نرخ حفر و انرژی ویژه برای گل‌سنگ و ذغال‌سنگ ▼

شکل ۶-۱۰ (ب) : نتایج عملکرد برش ماشین حفار بازوئی: تأثیر پارامترهای مربوط به برش

۳- ترکهای باز یا دیگر ضعفهای طبیعی در ساختار سنگ به میزان زیادی بر عملکرد برش، همانگونه که در شکل ۶-۱۰ (الف-۲) نشان داده شده است، تأثیر دارد.

۴- مطابق شکل ۹-۱۰ (ب-۲) با افزایش نرخ حفر، انرژی ویژه بشدت کاهش یافته است. همان طور که مشاهده می‌شود نرخ حفر ماشین حفار بازوئی مورد استفاده در این تحقیق در محدودهٔ انرژی ویژهٔ بالای حدود ۱۵ مگاژول بر متر مکعب افت قابل ملاحظه‌ای دارد.

۵- شکل‌های چهارگانهٔ برش (حرکات بازو: فروروی، حرکت عرضی، زیربری، رویبری)؛ نتایج نشان داده شده بر اثر شکلهای چهارگانه برش یا حرکات بازو نشانگر این نکته هستند که با برنامه ریزی درست حرکات بازو می‌توان افزایش راندمان را انتظار داشت. تفاوتهای راندمان برش در هریک از حرکات چهارگانه بازو نشان می‌دهد که با برنامه ریزی و اجرای دقیق مراحل برش می‌توان به بهره وری بسیار خوبی از عملکرد برش دست یافت. علاوه بر برنامه ریزی صحیح مراحل و مهارت اپراتور (اجرای دقیق) شرایط لایه بندی و نوع سنگها نیز در دامنه گسترده‌ای بر عملکرد حفر تأثیر گذار هستند.

طراحی، کنترل و هدایت پیشرفتهٔ ماشینهای حفار بازوئی

کاربرد CAD[1] به منظور طراحی تاج حفار: تاج نقش عمده ای در عملکرد ماشین حفار بازوئی ایفاء می کند و تجربه نشان داده است که طراحی تاج حفار به کمک کامپیوتر منافع زیادی در بر داشته است. طراحی توسط کامپیوتر امکان این که الگوی برش بهتر و مطلوبتر تهیه شود را فراهم آورده است و سطح مقطع سنگ توسط هر سرمته بسته به موقعیت فضائی آن روی تاج حفار بریده یا کنده شود. خروجی برنامه CAD امکان انجام بررسی در مورد یکنواختی کلی برشهای متوالی را میسر می سازد و در نتیجه امکان تعیین توزیع بار بین سرمته ها، که عامل مهمی در رابطه با نرخ فرسودگی یا سایش سرمته ها است، را به دست می دهد. با خروجی چنین برنامه هائی می توان سطوح لرزش تاج حفار را نیز بررسی و بطور کلی تعیین کرد.

منافع حاصل از کاربرد CAD در طراحی تاج حفار ماشینهای حفار بازوئی عبارتند از: توانائی طراحی جهت عملکرد بهتر برش؛ توزیع بهتر بار بین سرمته ها؛ و کاهش عمده میزان لرزش ماشین.

---

1 CAD = Computer Aided Design

هدایت پیشرفته : هدایت اتوماتیک ماشین حفار بازوئی توسط Wallis در حفر یک تونل با استفاده از یک میکروپروسسور به نام ZED MINER پیشنهاد گردید. مزایای استفاده از چنین سیستمی به شرح زیر بیان شده است :

* صرفنظر از موانعی که بازوی ماشین و دیگر اجزای آن بسته به موقعیت قرارگیری شان در برابر دید ایجاد می کنند، عملگر (اپراتور) کنترل بهتری بر جرثقیل کل جبهه کار دارد. در ضمن بدلیل وجود گرد و غبار ایجاد شده در جریان عمل برش، در صورت هدایت مستقیم میدان دید ضعیفی وجود دارد که هدایت اتوماتیک این مشکل را مرتفع می سازد.

حفر تونل با چکشهای ضربه ای هیدرولیک[1]

چکشهای دستی هوای فشرده بخوگسترده ای در عملیات احداث تونل به کار گرفته شده اند و حتی در حفر تونلهای کوچک مقطع، روش اصلی حفر را تشکیل داده اند. به کارگیری چکشهای ضربه ای هیدرولیک به هر حال در تونلسازی تمام رخ[2]، ابتدایی نسبتاً جدید بوده در ایتالیا است که تعدادی از تونلها در آن کشور با استفاده از این روش حفر شده اند. Smith اظهار داشته است که اولین کاربرد عمدهٔ چکشهای ضربه ای هیدرولیک به دههٔ ۱۹۶۰ برمی گردد که این تکنیک در تونلهای بزرگ متعددی به کار گرفته شده. چکشهای ضربه ای هیدرولیک ابتدا در راهسازی و خرد کردن بتن و سیمان به عنوان روش حفر و خرد کردن سنگ در معادن کاربرد عمومی یافتند. این ابزار برای این که در مایر روهای معادن زغالسنگ بتوانند بسهولت و راحتی عمل حفر را انجام دهند، بر روی ماشینهائی نصب شده بودند.

چکشهای هیدرولیکی ۳ تنی با قدرت اعمال انرژی ضربه ای در حدود ۶۰۰۰ ژول، کار بر در این چکشها در حفر سنگ بویژه در تونلسازی تمام رخ بنحو قابل ملاحظه ای افزایش داده شده چکش بر روی نیپ بازوی هیدرولیک مناسب و این مجموعه بر روی یک شاسی متحرک معمولاً ریلی نصب شده است. چکش ضربه ای معمولاً با سرمته های اسکنه ای تجهیز می شود.

---

1. hydraulic impact hammer ; 2. full face tunnelling

۱۵۵

مزایا: حفر با چکش ضربه‌ای هیدرولیکی - مزایای اصلی این نوع روش حفر تونل عبارتند از:

۱- در این روش نیازی به چالزنی و آتشباری جبهه کار تونل نیست.

۲- سنگ خرد شده را می‌توان همزمان با حفر بارگیری نمود، مشروط بر این که سطح مقطع تونل نسبتاً کامل بزرگ باشد.

۳- قطعات بزرگ سنگهای خرد شده را می‌توان با چکش ضربه‌زن خرد تر کرد و به اندازهٔ مورد نظر رساند، در نتیجه امکان انتقال و جابجائی مواد خرد شده با تقریباً کلیهٔ سیستمهای حمل و نقل و بویژه نقاله‌ها (نوار ...) میسر است.

۴- حفر تونل تمام رخ با این روش در بسیاری از شرایط زمین‌شناسی که سطح مقطع تونل از ۳۰ متر مربع متجاوز است، اقتصادی باشد.

۵- محیط تونل با حداقل اضافه حفری با پس‌زدگی حفری می‌شود.

شیوهٔ حفر: مراحل حفر در مرکز جبهه کار از حدود ۱ تا ۵ راستری بالای کف شروع و تا عمق حدود ۱/۵ تا ۲ متر حفری می‌شود. عمل حفر تا دیواره‌های جانبی و کف ادامه می‌یابد و در نتیجه شکافی ایجاد می‌شود که سنگهای قسمت بالای جبهه کار روی آن قرار گرفته است. عمل کندن به سمت بالا تا تکمیل سطح مقطع تونل ادامه می‌یابد.

شرایط مناسب کاربرد: این روش حفر تونل برای چینه‌های بالا به بندی خوب و ترک دار مناسبترین روش است. شرایط سنگی توده‌ای می‌تواند از نرخ پیشروی نامناسب و به یک سرعت پیشروی که از جنبه‌های اقتصادی مقرون به صرفه نباشد، بکاهد. در سنگهای محکم که دارای درزه‌های زیاد باشند و یا رفتاری شبیه لایه‌های دارای باندهای ضعیف در بین لایه‌ها از خود نشان دهند، می‌توان با استفاده از چکشهای ضربه‌ای نجو موفقیت آمیزی اقدام به حفر تونل نمود.

با استفاده از این روش در پنج تونل در ایتالیا، نرخ پیشروی در محدودهٔ ۲ تا ۹ متر در شیفت (۱۲ ساعته) و به طور متوسط ۱ متر در ساعت دست یافته‌اند و حجم سنگ حفر شده بین ۳۰۰ تا ۹۰۰ مترمکعب بوده است.

تونل Rieti در نزدیکی رم به طول ۲/۱ کیلومتر به منظور ایجاد یک راه دوبانده به سطح مقطع ۸۰ مترمربع (ارتفاع ۷/۲ و عرض ۱۱ متر) در لایه‌های آهکی بالا به بندی خوب حفر شد. در هر روز کاری (۲۴ ساعت) طی پنج سیکل، ۸-۷ متر تونل حفر و نگهداری شد و بارگیری مواد خرد شده نیز صورت گرفت. برای نگهداری از قابهای فولادی فلزی چهارتکه که با فواصل ۱/۵ متری از هم نصب شده بودند و برای بارگیری همزمان با حفر از

لودر تخلیه از جلو و برای حفر از چکش ضربه‌ای مدل Liebherr 962 استفاده شد که نرخ پیشروی آن آن ۱٫۵ متر در ۱٫۲۵ ساعت بود.

تونل دیگری که با این روش احداث شد ۷ کیلومتر طول داشت و به منظور ایجاد راه آهن دوخطه سریع السیر در لایه‌های ماسه سنگی، مارنی و شیستهای آرژیلیتی بشدت چین خورده، گسله و تکتونیکی حفر شد. عملیات در چهار سکل و با نرخ پیشروی ۱۰ متر در ۲۴ ساعت انجام گردید. عملیات حفر و بارگیری همزمان انجام می‌شد.

ماشینهای حفار بازوئی: عملکرد در شرایط مختلف زمین شناسی

در جدول ۶-۳ نوع و خصوصیات ماشینهای حفار بکار گرفته شده برای تونل یا معادن مختلف همراه با وضعیت عملکرد آنها و شرایط زمین شناسی که تونلها یا معادن در آن حفر شده اند، نشان داده شده است. اطلاعات نشانگر این است که نرخ حفر تونلها تحت شرایط مختلف در دامنه گسترده‌ای تغییر کرده اند. بهرحال، نکته مهم قابل استنتاج از این اطلاعات، این است که ماشینهای حفار بازوئی می‌توانند ماشینهائی با ظرفیت برش بسیار بالا باشند که این امر مهمی در عملیات معدنکاری که سرعت حفر از مجازی ترین شاخصهای اجرائی است، می باشد.

ملاحظات و اظهارنظرهای نهائی

۱- ماشینهای حفار بازوئی دارای انعطاف پذیری خوب در عملیات و توانائی برش تونلها و راه‌روهای [illegible]

۲- درصورتی که تونل در شرایط سنگی لایه‌ای که دارای باندهای عریض سست در جبهه کار تونل هستند، حفر شود می‌توان در ارتباط اقدام به حفر این باندهای سست نمود. در نتیجه این عمل امکان آزاد شدن فشار و ضعیف شدن سایر لایه‌های تشکیل دهنده جبهه کار را فراهم می آورد که پس از آن می‌توان آنها را بسهولت حفر کرد.

۳- استفاده از آبفشان یا جت آب با فشار بالای ۷۰۰ بار (bar) می‌تواند کاهش عمده‌ای در نیروهای برشی سرمته ایجاد کند.

تونل/معدن	نوع و مشخصات اصلی دستگاه	عملکرد	وضعیت زمین‌شناختی
7. Road Tunnel, Muscat. 13·7 m (height) x 17·5 m (wide) Separate passes of roadheader cutting 4·7 m x 6·8 m profile CSA = 210 m^2	AM 75 M/c wt.= 52 t Power = 290 kW	MCC: Av.= 22·8 m^3/h PC: Av.= 0·155 /m^3	Thickly bedded peridotite and serpentinite, 70-170 MPa UCS
8. Monopol Colliery, FRG. Roadheading CSA = 20·7 m^2	AM 75 M/c wt.= 50·5 t Power = 290 kW	AR: Av.= 9·45 m/day .....Max.= 18 m/day	Coal Measures rocks with approx. 60% sandy clay slate, 50-70 MPa UCS
9. Western Collieries, Australia. Room & pillar mining Rectangular profile Hi: 2·5-2·8 m Width = 5-6·3 m	AM 65 M/c wt.= 32 t Power = 289 kW	MCC: Av.= 170 t/h Max.= 230 t/h	Coal, 18-27 MPa UCS
10. Mines in Selby Coalfield, UK. Roadheadings/ development drivages:			
Wistow	BJD Heliminer	Max.AR = 20 m/shift & 174·2 m/week	Mainly coal drivage
Riccall & Whitemoor	JCM	Max.AR = 10 m/shift & 99·7 m/week	Mainly coal drivage
Riccall	LN 100	Max.AR = 11 m/shift & 102 m/week	Mainly coal drivage
Whitemoor (arch profile)	Dosco Mk.II A	Max.AR = 7 m/shift & 58·3 m/week	Mainly coal drivage
Wistow (arch profile)	Dosco TB 600	Max.AR = 4·7 m/shift & 57·5 m/week	Mainly coal drivage
Wistow (arch profile)	Dosco Mk.III	Max.AR = 8 m/shift & 78 m/week	Mainly coal drivage
Riccall (arch profile)	Dosco Mk.IIB	Max.AR = 6 m/shift & 62 m/week	Mainly coal drivage
11. Mines In Western Coalfield, UK. Roadway drivages			
Holditch	Dosco LH 1300	Av.AR = 40 m/week Max.AR = 102 m/week	In-seam drivage
Littleton	AS RH 25	Av.AR = 45 m/week Max.AR = 123 m/week	In-seam drivage

جدول ۶-۳- عملکرد چند نوع رودهدر در تونلها و معادن مختلف[۲]

تونل/معدن	نوع و مشخصات اصلی دستگاه	عملکرد	وضعیت زمین‌شناختی
1. Balsareny Mine, Spain Room & pillar mining	AM 100 M/c wt.= 96·4 t Power = 500 kW Min.H = 2·9 m Max.H = 6·9 m	MCC: Av.= 352 t/h Max.= 364 t/h	Potash, 24 MPa & rock salt, 31-40 MPa UCS
2. Friedrich Heinrich Colliery, FRG. Roadheading Arch profile Steel supports CSA = 21 m^2	AM 100 M/c wt.= 94 t Power = 450 kW	AR: Av.= 10·4 m/day Max.= 22 m/day	Sandy shale to sandstone, 60-100 MPa UCS
3. Pasquasia Mine, Italy. Room & Pillar mining Max. thickness: 7·2 m	AM 100 M/c wt.= 104·4 t Power = 630 kW	MCC: Av.= 228 t/h Max.= 270 t/h	Potash-salt, 33-53 MPa UCS
4. Greenside Colliery, RSA. Room & Pillar mining Profile cut: H = 5·5 m; B = 7 m M/c capability: H = 6·6 m; B = 9·5 m	AM 100 M/c wt.= 100 t Power = 600 kW	MCC: Av.= 207 t/h Max.= 310 t/h	Coal of 20-60 MPa UCS & stone rolls of up to 150 MPa UCS
5. Saarbergwerke, FRG. Roadheading CSA = 20 m^2	AM 100 M/c wt.= 97 t Power = 500 kW	AR: Av.= 13·4 m/day & 267 m/month (20 days) Max.= 6·4 m/shift & 21·6 m/day MCC: Av.= 34·3 m^3/h Max.= 91·07 m^3/h	Coal Measures, up to 120 MPa UCS
6. By-pass Tunnel, Kouris Dam Irrigation Project Cyprus Full face mechanisation of horseshoe profile CSA = 22 m^2	AM 75 M/c wt.= 52 t Power = 290 kW	MCC: Av.= 21.3 m^3/h AR: Av.= 8·75 m/day PC: Av.= 0·074 /m^3	Horizontally layered limestone & marl, 50-110 MPa UCS

دنباله جدول ۶-۳

تونل/معدن	نوع و مشخصات اصلی دستگاه	عملکرد	وضعیت زمین‌شناختی
12. Sutton Manor Colliery, UK. Roadheading Arched profile	AS RH 22 with high pressure water assisted cutting	Mudstone (35 MPa) MCC: (with jets) = 82·66 m^3/h MCC: (without jets) = 40.66 m^3/h Sandstone (150 MPa) MCC: (with jets) = 7·35 m^3/h MCC: (without jets) = 5·0 m^3/h Av.PC = 0·83/m	Variable Cross-Measures strata
13. Mines in North Yorks Coalfield Headings/drivages		Max.AR (m/week):	
Whitemoor	Joy 12 CM 5	111·5	In-seam drivage
Wistow	BJD Heliminer	172·2	In-seam drivage
Royston Drift	Dintheader	162·4	In-seam drivage
Riccall	Lee Norse 800	113·0	In-seam drivage
Prince of Wales	Dosco LH 1300	108·7	In-seam drivage

AV.MCC= Average machine cutting capacity	ظرفیت متوسط حفاری دستگاه (نرخ حفر)
MAX.MCC=Maximum cutting capacity	حداکثر ظرفیت حفاری دستگاه
AV.AR = Average advance rate	متوسط میزان پیشروی
MAX. AR = Maximum advance rate	حداکثر میزان پیشروی
M/C WT = Machine weigh	وزن دستگاه
AV.PC = Average pick cunsumption	متوسط مصرف بیت
CSA = Cross - sectional area	سطح مقطع حفاری

۴- توسعه و به بازار آمدن ماشینهای حفار بازوئی سنگین در عین حالی که ویژگیهای اصلی برش [illegible] دقیق طراحی خوب تاج حفار حفظ شده است، توانائی برش انواع سنگهای سخت‌تر را افزایش داده است.

۵- دامنهٔ کاربرد ماشینهای حفار بازوئی در شرایط سنگی سخت، بنحو فزاینده‌ای افزایش یافته است. این امر توسعهٔ انواع سنگین ماشینها و در نتیجه افزایش قابل ملاحظهٔ نگارگیری چنین ماشینهای توفسازی را موجب شده است.

۶- مشکلات حاصل از کاربرد CHP در تاج حفار ماشینهای حفار بازوئی به طور عمده عبارتند از: توانائی طراحی برای عملکرد بهتر برش، توزیع بهتر بار بین سرمتهها، همراه با کاهش عمده سطوح لرزش.

۷- آبفشانهای فشار بالا سهم عمده ای در بالابردن نرخ حفر داشته اند و در عین حال از انرژی و تیزه حفر و میزان گرد و غبار تولیدی کاسته اند.

۸- ظهور ماشینهای حفار بازوئی سنگین بسرعت مشخص کرد که سرمته های برشی در زمینهٔ توسعه از رشدی همپای ماشینهای حفار برخوردار نبوده اند.

۹- ماشینهای حفار بازوئی نقش عمده ای در حفر راهروهای ذغالی و شرایط سنگی نرم در انگلستان ایفا کرده اند، ولی وقتی در سنگهای محکمتر با مقاومت بالای ۷۰ مگا پاسکال به کار گرفته شدند، مشکلات و محدودیتهای طرحهای ماشینها آشکار شدند. برش سنگهای محکمتر موجب مصرف بیش از حد سرمته، هزینه های بالای تعمیر و نگهداری و وارد آمدن خسارات عمده به ماشین می شد و در نتیجه استفاده از ماشینهای حفار بازوئی قبلی از جنبهٔ اقتصادی توجیه پذیر نبود. توسعه و پیشرفت ماشینهای حفار بازوئی سنگین منجر به زیادی دامنهٔ شرایط سنگی که با این ماشینهای تونلسازی می توان حفر کرد را گسترش داد.

۱۰- شکل قوسی راهروهای معدنی به نظر می رسد که مهمترین عامل در کاربرد گستردهٔ این ماشینها در معادن زغالسنگ انگلستان باشند.

۱۱- هدایت اتوماتیک ماشینهای حفار بازوئی توانائی حفر مقاطع تونلی و راندن و جلوبردن ماشین را افزایش داده است. با هدایت اتوماتیک می توان پیشروی را علیرغم فقدان دید لازم به دلیل گرد و خاک ایجاد شده، ادامه داد.

۱۲- چکشهای ضربه ای هیدرولیک می توانند نیاز به چالزنی و آتشباری در جبهه کار تونل را حذف کنند. مزیت مهم این روش بارگیری همزمان با حفر است که امکان می دهد تونل سطح مقطع کافی داشته باشد. این روش برای شرایط زمین شناسی که سنگها درزه دار و لایه بندی ها خوب باشند، مناسبترین روش تونلسازی است.

نیاز به ماشینی ارزان، سبک و متحرک برای حفر و نگهداری فضاهائی با هر شکل سطح مقطع احساس می شده است. ماشینهای حفار بازوئی در ترکیب با سپرهای تونلسازی تا حد زیادی به این نیاز پاسخ داده اند.

جدول ۷-۳: پروژه‌های تونلسازی قطر کوچک

پروژه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مشخصات فیزیکی تونل:							
کاربرد	فاضلاب	آب	آب	فاضلاب	فاضلاب	آب	آب
قطر حفرشده (m)	۲	۲/۲	۲/۳	۲/۶	۳/۲	۳/۸	۳/۸
قطر پس از پوشش (m)	۱/۴	۱/۵	۱/۵	۱/۸	۲/۷	۳	۳
طول (کیلومتر)	۵/۴	۰/۳۷	۱/۲	۲/۷	۸/۲	۴/۶	۵/۵
راه دسترسی برای شروع	چاه	تونل	چاه	چاه	شکاف	چاه	چاه
لایه‌های زمین شناختی و مشخصه‌های مقاومتی:							
نوع سنگ	دولومیت	گنایس	گنایس	سنگ آهک	گرانیت-گنایس	گنایس	گنایس
مقاومت سنگ (MPa)	۵۰-۱۵۰	۷۰-۱۴۰	۱۰۰-۲۴۰	<۵۰	۷۰-۲۴۰	۷۰-۱۴۰	۸۰-۱۶۰
شدت جریان آب $\frac{L}{100\,m}$	۱۷	۱۷	۴۵	۲۵۵	۶۸	۱۷	۲۵
ماشین تونلسازی:							
مدل Jarva	Mk6	Mk6	Mk6	Mk8	Mk10	Mk12	Mk12
Strohe (m)	۱/۲	۱/۲	۰/۶	۱/۲	۱/۲	۰/۶	۰/۶
سرعت پیشانی برشی (rpm)	۱۳	۱۲	۱۲/۶	۱۳	۱۲	۱۲	۱۲/۶
نفوذ معمول $(\frac{m}{h})$	۲/۴	۱/۵	۰/۶	۴/۶	۲/۱	۱/۸	۱/۸
پیشروی معمول $(\frac{m}{day})$	۲۲	۱۳	۷	۱۲*	۲۴	۱۸	۱۷
شرایط کاری در تونل:							
شیفت/روز × روز/هفته	۵×۲	۵×۲	۵×۲	۵×۳	۵×۲	۵×۲	۵×۲
ساعت کار/شیفت هفته	۸۰	۱۰	۸	۸	۹	۱۰	۹
تأخیرات عمده	تعمیر و نگهداری TBM	تونل TBM	برش دهنده‌ها TBM	نگهداری سنگ	برش دهنده‌ها TBM	تونل TBM	تونل TBM

پروژه ۱: تقاطع Lement، شیکاگو - پروژه ۲: تونل Woodside، ملبورن

پروژه ۳: W-80، ملبورن - پروژه ۴: فاضلاب شمال شرقی Milwaukee - پروژه ۵: Three Rivers، آتلانتا

پروژه ۶: BL-County West، ملبورن - پروژه ۷: BL-County East، ملبورن (کلیه تونلها در طول سال ۱۹۸۱ حفر شده است.

* ۱۲ متر در روز با نصب قابهای فلزی دایره‌ای شکل. ۳۷ متر در روز بدون نگهداری

اظهار شده است که TBM می تواند در طول عمرش تا ۴۰ کیلومتر تونل حفر کند و در این رابطه به Jarva مدل Mk12 اشاره می کند که ۳۱ کیلومتر تونل در Alpine را در حدود ۵ سال حفر کرد. طول ۴۰ کیلومتر در شرایط سنگی Alpine با سنگهای گوناگون و مقاومتهای بالاتر صورت گرفت.

در مورد فوق قطر ماشین ۳/۵ متر با وزن ۱۵۰ تن و فشار محوری ۶۳۵ تن بود که با آن به نتایج خوبی همراه با قابلیت اعتماد بالا دست یافتند. برای دستیابی به بالاترین پیشروی ماهیانه زمان کاری ۲۴ ساعت در روز و ۷ روز در هفته پیشنهاد شده بود.

در جدول ۷-۴ اطلاعات اجرائی مربوط به کار TBM در شرایط Alpine آورده شده است.

در شرایط سنگی ضعیف ایجاب می کند که TBM در جریان اجرای زمین و تنش پانی و پر کردن حفرات با بتن به عقب کشیده شود و در نتیجه TBM عمل حفر را در مناطقی که با بتن پایدار شده است، انجام دهد.

جدول ۷-۴: عملکرد TBM، مدل Jarva مدل Mk12 با قطر ۳/۵ متر در چهار تونل Alpine

تونل	نوع اصلی سنگ	مقاومت (MPa)	m/h	m/day	بهترین روز (m)	بهترین ماه (m)
Wolla	گنایس (٪۹۵)	۱۶۰ - ۲۲۰	۳/۹	۳۵	۶۳	۱۲۶۱
Drassnitz	گنایس (٪۵۹)	۱۶۰ - ۲۲۰	۳/۳	۳۸	۷۲	۱۳۶۶
Lamnitz	میکاشیست (٪۵۵)	۹۰ - ۱۵۰	۳/۲	۳۵	۹۴	۱۰۲۲
Ponte Gardena		NA	NA	NA	۷۸	۱۵۲۸

کاربرد TBM در معادن ذغالسنگ

تونلهای معادن ذغالسنگ در سنگهای رسوبی با مقاومتهای مختلف و تحت تنشهای بالا، بنحو موفقیت آمیزی با استفاده از TBM ها حفر شده اند. دستیافتهای قابل ذکری در منطقه ذغالی Ruhr در آلمان غربی در حفر تونلهای اصلی و اصل بین چاه و لایه های ذغالی با نرخهای بالای آماده سازی بدست آمده است.

حفر تونل با سیستمی از بازوهای مفصلی: ماشینهای تونلزنی Bowgas از سیستمی از بازوهای مفصلی که هر حفاری یک شکل هادیج دارد، استفاده می کند. از این چنین ماشینهائی برای حفر تونلها با قطر ۲/۹ تا ۵ متر استفاده شده است. این ماشینها ۱۰ متر طول، ۹۰ تن وزن و توان کل ۱۲۰۰ کیلووات

۲۰۴/

و برای حفر یک قطر ۵ متری دارای توان ۸۰۰ کیلووات برای پیشانی برشی هستند. هر یک از چهار بازوی نوسان کننده دارای یک دستک با قطر ۴ متر هستند. سرعت دوران اولیه ۲۵ دور در دقیقه به ۱۵ دور در دقیقه در حین عملیات کاهش می یابد. این ماشین برای حفر تونلی در Arenberg Colliery در شمال فرانسه و در عمق ۹۷۰ متری به کار گرفته شد. نرخ پیشروی ماهیانه طراحی شده برای این TBM ۲۰۰ متر بود. مزیت اصلی ادعا شده برای ماشین این بود که بسهولت شرایط اجرائی ماشین با شرایط سنگ جبهه کار تونل تطبیق می یابد. مزیت عمده دیگر ادعا شده برای ماشین، توانائی برگشت سریع به عقب به میزان چندین متر جهت تسهیل دسترسی به جبهه کار تونل بود. گزارش شده است که ماشین در ۲۰ روز از اولین ماه کار در معدن با نرخ پیشروی ۱۵/۱ متر دست یافته بود که برابر است با ۷/۵۸ متر در روز، البته حداکثر نرخ حفر به دست آمده در این مدت ۱۲/۵ متر در روز بود.

به طور متوسط

بکارگیری TBM ها در آماده سازی معادن ذغالسنگ: از TBM های شرکت Robbins در حفر تونلهای ذغالی در انگلستان استفاده شده است. این تونلها در سنگهای کربنیفر که عمدتاً گل سنگ همراه با معادیر متغیری سیلیستون و ماسه سنگ بوده اند، حفر شده اند. قطر تونلها ۵ متر بوده است و طبق گزارشها با نرخ حفر ۱۱ متر در هفته (۹۰ ساعت) یا ۱/۲ متر در ساعت و در بهترین هفته با نرخ ۱۵۰ متر در هفته رسیده بوده است. در آلمان پیشروی متوسط در ماه ۲۸۰ متر (۳۶۰ ساعت) یا ۰/۸ متر در ساعت بوده است.

در کانادا در معدن Donkin-Morien تونلی با قطر ۷/۶ متر توسط یک TBM از شرکت Lovat حفر شده است. وزن کلی ماشین ۳۵۰ تن با فشار محوری پیشانی برشی معادل ۱۰۸۸ تن و stroke ۱/۷ متر بود. نرخ نفوذ در سنگ با مقاومت [illegible] اقل پیشروی گزارش شده در بیش از چهار هفته پی در پی ۱۰۵ متر در هفته (۱۰۰ ساعت) بوده است. نرخ متوسط پیشروی در تونل مایلی با شیب ۲۰٪ حدود ۱ متر در ساعت گزارش شده است.

عملکرد TBM ها در سنگ

راندمان تونلسازی بر مبنای نرخ پیشروی تحت تأثیر عوامل متعددی در شرایط سنگی مختلف و بویژه قابلیت حفاری شرایط TBM قرار دارد. عوامل مهم دیگر قطر تونل حفر شده، طبیعت و شرایط زمین و بالاخص وجود هم رگبگی یا درزه

تحت فشار بالا و وجود آب زیرزمینی می باشند. عوامل زیادی علاوه بر تعمیر و نگهداری و جنبه‌های اجرائی کلی، زمان برش ماشین تأثیر دارند که همهٔ اینها بر عملکرد کلی TBM اثر دارند.

Parkes عوامل مؤثر بر عملکرد TBM را به پنج دسته تقسیم کرده و آنها را در جدول ۷-۵ آورده است. در ضمن در جدول ۷-۵ اطلاعات اجرائی به دست آمده از مطالعات و بررسیهای ۶۵ تونل آورده شده است. Parkes با توجه به اطلاعات مربوط به عملکرد TBM ها در یا کشور مختلف، پیشنهادات زیر را ارائه داده است:

۱- اهمیت و توجه به بررسیهای اولیه زمین شناختی بیشتر و گسترده‌تر تأکید شود و به ویژه منافع و اثراتی که چنین مطالعاتی بر عملکرد TBM ها دارند، با دستی بیشتر شناسانده شوند و بر آن تأکید گردد.

جدول ۷-۵ : عوامل مؤثر بر عملکرد TBM و نرخهای بالقوهٔ تونلسازی

عوامل ویژه	عوامل مؤثر بر عملکرد TBM ملاحظات
۱- زمین	زمین شناسی، ویژگیهای سنگ و آب زیرزمینی
۲- طرح تونل	قطر، طول
۳- مسایل محلی	مقررات کارگری، ساعات کاری
۴- سیاستهای مدیریتی	نیروی انسانی، استفاده از TBM، تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی شده، سیستمهای حمایتی
۵- قابلیتهای ماشین	فشار محوری، توان، گشتاور، قطر دیسک، تأمین نگهداری

بر مبنای مطالعات صورت گرفته در ۶۵ تونل در امریکا، اروپا، استرالیا و اقیانوسیه، مهمترین عامل مؤثر در نرخ پیشروی TBM، قطر تونل است.

قطر (m)	بهترین نرخ پیشروی TBM (m/h)
۲	۱
۴	۱/۹
۵/۵	۱/۵۵
۸/۵	۱
۹	۰/۹۵
۱۱/۵	۰/۷۵

عملکرد بالقوهٔ TBM

سیستم بندی سنگ	عملکرد پیش بینی یا انجام شده (m/h)
سنگ سخت	۱/۵
سنگ نرمتر، مارلهای نرم	۵/۱

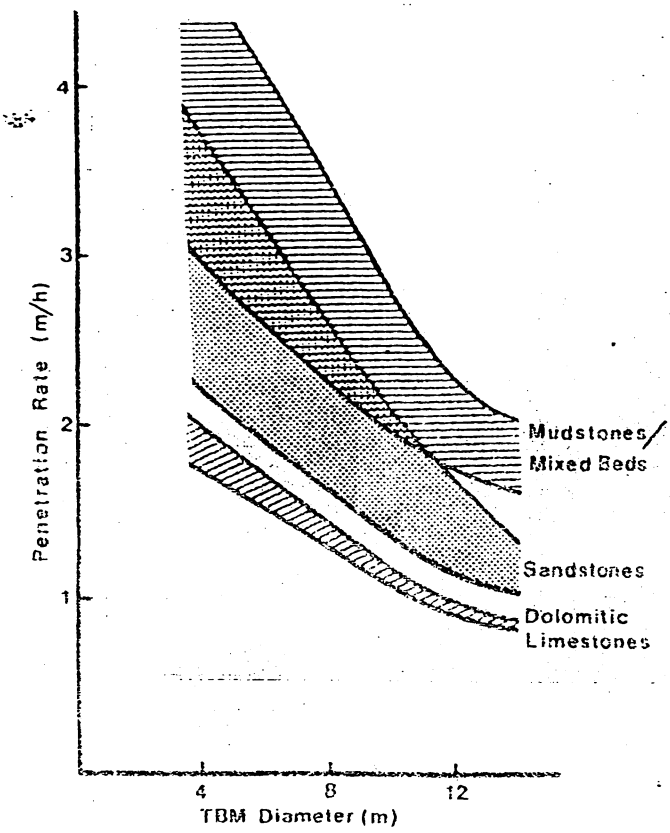
۲- توجه بیشتری برای یافتن تکنیکهای بررسی مقدماتی زمین شناسی قبل از احداث تونل و هم در جریان حفر و احداث تونلهای پیشرو بالستی معمول شود.

۳- تلاش بیشتری جهت کاستن از زمان بیکاری TBM باید انجام شود.

۴- قابلیت کار ماشین برای دامنه گسترده تری از شرایط زمین بویژه قابلیت کار آن در شرایط زمینهای ناپایدار بالستی از طریق توسعه و پیشرفت بیشتر ماشین افزایش یابد.

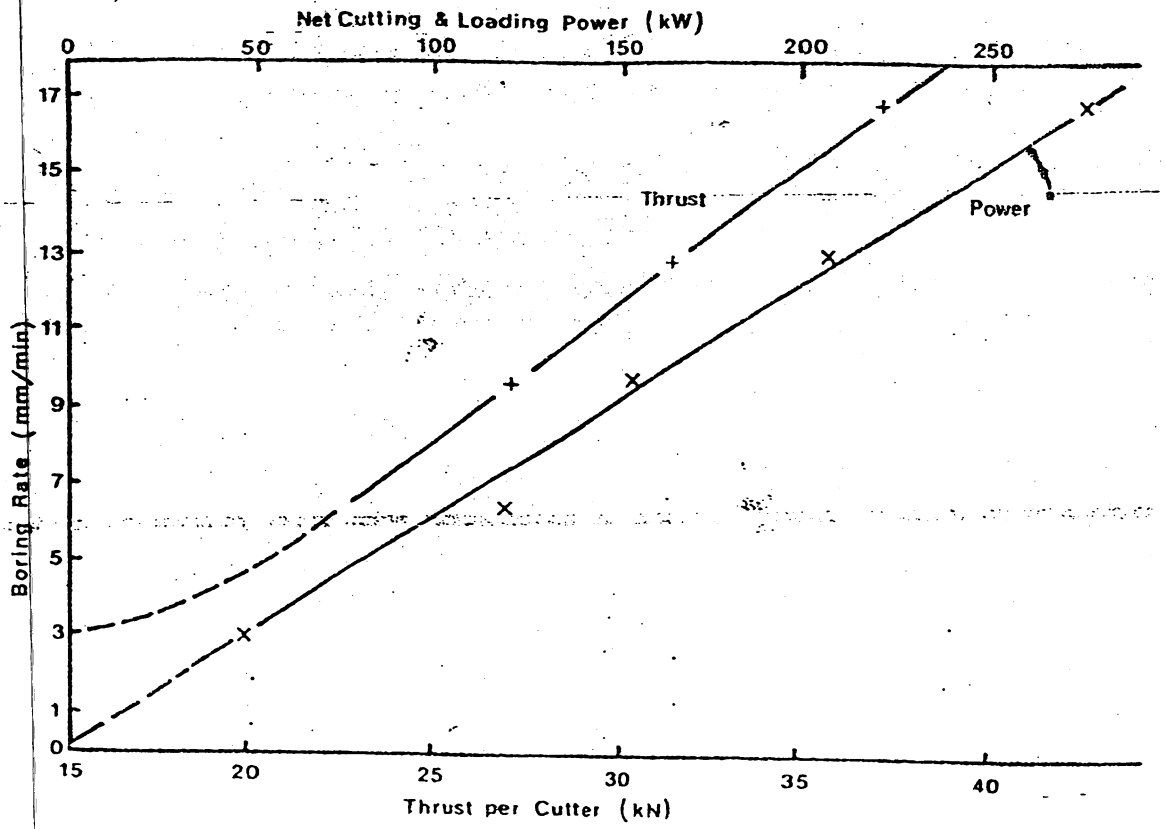
یک جنبهٔ مهم مؤثر بر نرخ نفوذ TBM ، نوع سنگ است که در ارتباط با مقاومت سنگ می باشد. در شکل ۷-۹ ، نرخ نفوذ TBM برحسب قطر تونل و برای چند نوع سنگ رسوبی نشان داده شده است. این نمودار نشان می دهد که نرخ نفوذ برای انواع ضعیفتر سنگهای رسوبی به طور عمده ای بویژه برای قطرهای کوچکتر تونل ، افزایش می یابد.

مقایسه نرخهای نفوذ نشان داده شده در شکل ۷-۹ با نرخهای پیشروی درج شده در جدول ۷-۵ نشان می دهد که نرخهای تونلزنی مورد انتظار می تواند در دامنه نسبتاً وسیعی تغییر کند. شرایط سنگی سخت به طور کلی نرخ نفوذ تونل را کاهش می دهد. بهترین نرخهای پیشروی ارائه شده در جدول ۷-۵ برای انواع سنگها، بیانگر این نکته هستند که عوامل دیگری می توانند تأثیرات اساسی بر نرخ نفوذ ، بویژه برای تونلهای با قطر حدود ۲ متر داشته باشند. تراکم فضای کاری و حفر تونل به نظر می رسد عامل عمده ای برای TBM در این محدوده قطری باشد.



شکل ۷-۹: نمودار تغییرات نرخ نفوذ برحسب قطر تونل برای انواع مختلف سنگهای رسوبی

اطلاعات اجرائی اندازه گیری شده در مورد TBM ساخت شرکت Bretby با قطر ۵٫۵ متر در معدن دولومیت Breedon در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱۰ : نرخ حفر TBM برحسب فشار محوری پشت هر برش دهنده و انرژی مصرفی برش و بارگذاری. ماشین: Bretby TBM ؛ قطر: ۵٫۵ متر ؛ نوع سنگ: دولومیت

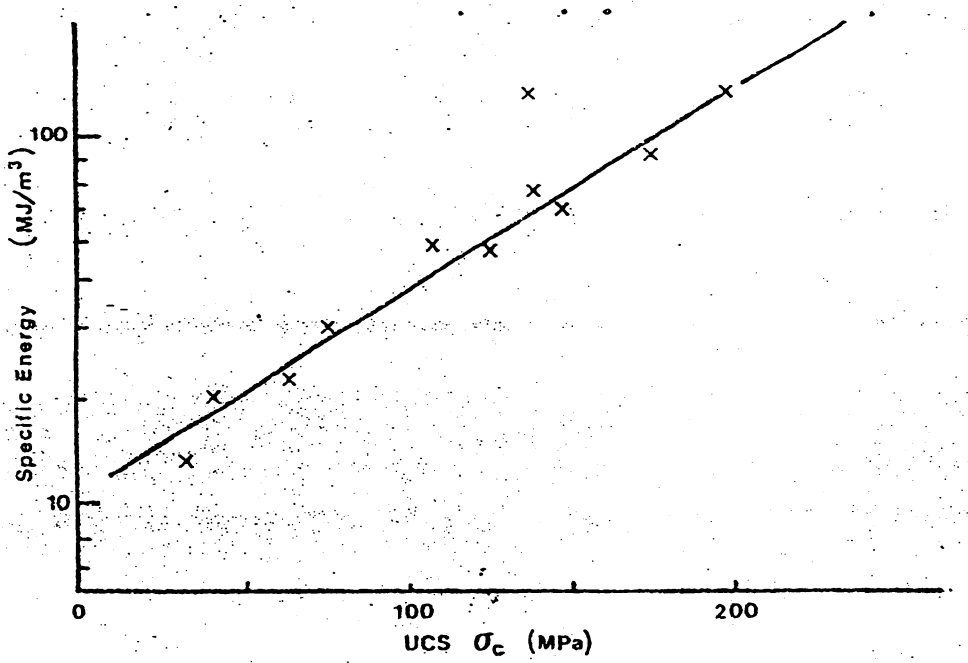
مقاومت سنگ و عملکرد TBM : مقاومت فشاری تک محوره[1] یکی از خواص سنگ است که تأثیر زیادی بر عملکرد برش ماشین تونلسازی دارد. در شکل ۷-۱۱ تغییرات انرژی ویژه برحسب تغییرات مقاومت فشاری تک محوره سنگ در جریان تونلسازی و در شکل ۷-۱۲ عملکرد حفر ماشین برحسب مقاومت [illegible] فشاری تک محوره [illegible]

به عنوان یک راهنمای اولیه مفید برای ارزیابی و برآورد عملکرد ماشین تونلسازی در انواع مختلف سنگ عمل کند.

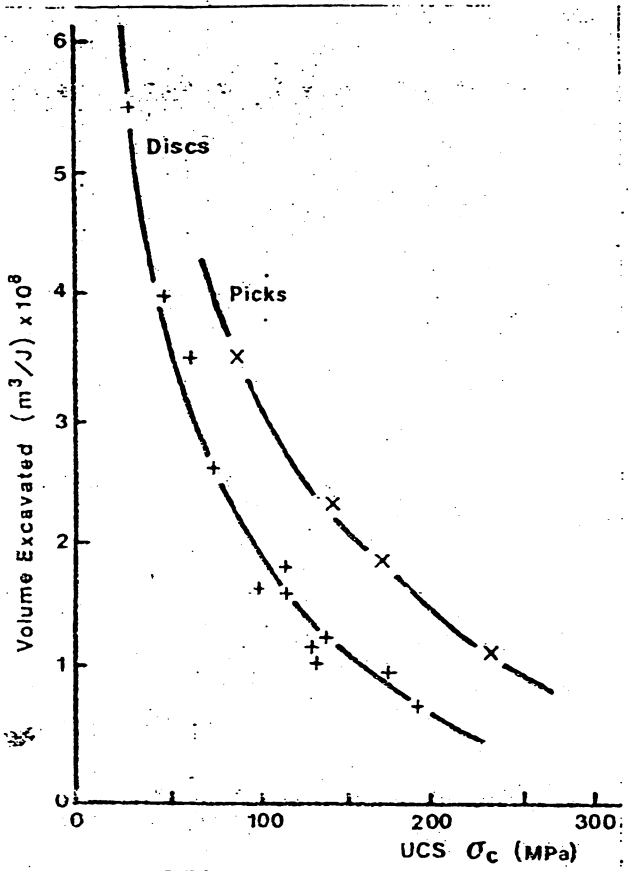
چکش اشمیت[2] وسیله مفیدی برای نشان دادن سختی سنگ است. Takey یک ارتباط خطی تجربی بین نرخ حفر TBM و سختی چکشی برای سنگ آهک و دولومیت نشان داده است.

آزمایش گودال زن مخروطی[3] وسیله ساده‌ای برای ارزیابی سریع سختی سنگ است. در این آزمایش یک [illegible] وسیله نمونه گیری کاربید تنگستن در یک نمونه کوچک سنگ نفوذ می کند. در حالی که یک صفحه فنری بار را کنترل

1- Uniaxial Compressive Strength (UCS) و 2- Schmidt rebound hammer;
3- cone indenter test



شکل ۷-۱۱ : نمودار تغییرات انرژی ویژه بر حسب تغییرات مقاومت فشاری تک محوره.



شکل ۷-۱۲ : نمودار تغییرات نرخ حفر TBM بر حسب تغییرات مقاومت فشاری تک محوره

می کند ، یک اندازه گیر با صفحه مدرج[1] ، تغییر شکل خمش یا خیز[2] ناشی از بار اعمالی را نشان می دهد.

نفوذ / خیز = سختی گودال زن مخروطی

دو سطح استاندارد بار اعمالی وجود دارد : برای سنگهای نرم خیز برابر است با ۰/۶۲۵ mm و برای سنگهای سخت خیز برابر است با ۱/۲۵ میلیمتر.

طرح پیش بینی دهنده دیسکی و نرخهای نفوذ TBM - نمودارهائی بر حسب تغییرات نرخهای نفوذ و سختی سنگ ، که با آزمایش گودال زن مخروطی بدست آمده ، توسط Nelson و Tarkoy و Mcfeat-Smith ترسیم شده

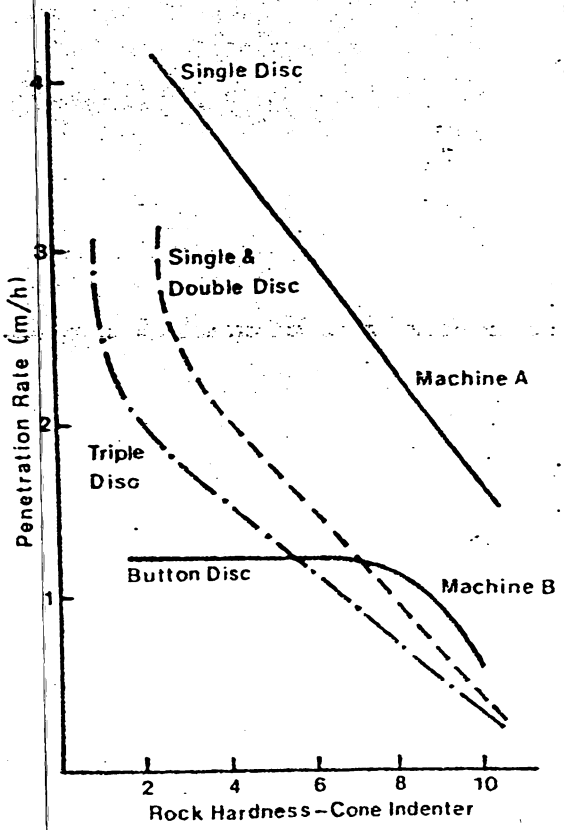
1-dial gauge ; 2-deflection

۲-۸-۱

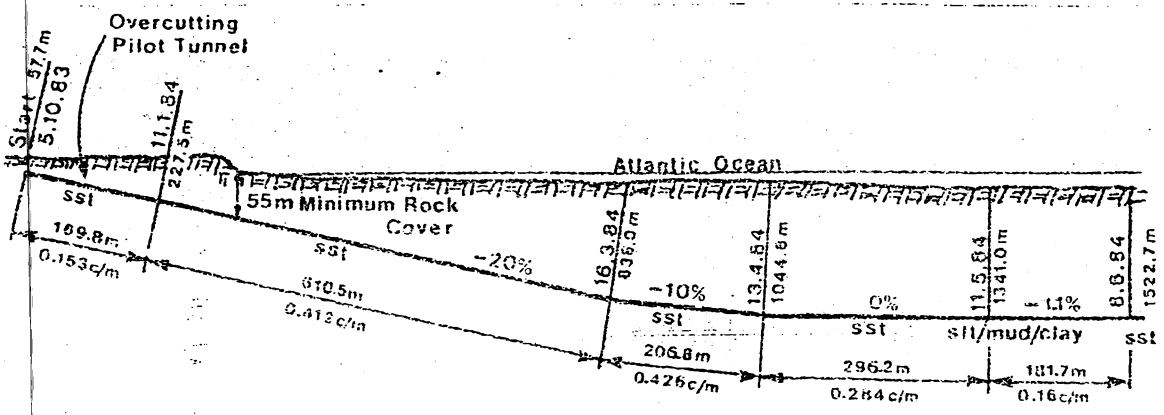
این نتایج در شکل ۷-۱۳ آورده شده است و نشان می دهد که طرحها و ترتیبات قرارگیری مختلف برش دهنده ها می تواند تغییرات عمده ای در نرخهای نفوذ تونل ایجاد نماید. شکل ۷-۱۳ نمایشگر این نکته است که زمان برش به طور کلی با افزایش سختی سنگ، صرفنظر از نوع و آرایش برش دهنده های TBM دستگاهی، کاهش می یابد (کاهش نرخ نفوذ بیانگر افزایش سختی سنگ است).

تونل زیر دریائی Nova Scotia - تجارب حفر:

تونل زیر دریائی Donkin-Morien با TBM در ماسه سنگهائی با مقاومت فشاری تک محوره ۱۰۰ مگاپاسکال حفر گردید (شکل ۷-۱۴). وقتی که TBM در تونل مایل با شیب ۲۰٪ عمل می کرد میزان مصرف برش دهنده برازای هر متر حفر ۰/۴۱۲ بود، درحالی در زمان حفر تونل افقی در همان شرایط سنگی میزان مصرف به ۰/۲۸۴ برش دهنده برازای هر متر حفر تونل تقلیل یافته بود. بیشترین میزان فرسودگی در برش دهنده های لبه ای اتفاق افتاده بود، و این امر ناشی از زاویه معکوس فشار یا بار اعمالی بر روی چنین برش دهنده هائی بود. در نتیجه بیشترین تعویض سرمته ها در برش دهنده های لبه ای و کمترین میزان تعویض برش دهنده ها مربوط به برش دهنده های مرکزی بود. برش دهنده ۵۰٪ سطح مقطع تونل در قسمت میانی آن بود.



شکل ۷-۱۳ : نمایش نرخهای نفوذ TBM برحسب سختی سنگ برای نمونه قرارگیری و ترتیبات مختلف برش دهنده ها.



شکل ۷-۱۴ : مقطع تونل زیر دریائی Donkin-Morien, Nova Scotia، میزان پیشروی و مصرف ویژه برش دهنده (عدد/متر) آورده شده است.

T = کل زمان کاری موجود در هفته (۱۲۰ ساعت = ۵ روز × ۸ ساعت × ۳ شیفت)

M = زمان تخصیص داده شده برای تعمیر و نگهداری (۲۰ ساعت = ۵ روز × ۴ ساعت)

D = تأخیرهائی به جز زمان تعمیر و نگهداری و غیر قابل نسبت دادن به عملکرد ماشین (مثلاً قطع برق)

تونل Selby Coalfield : ویژگیهای برش دهنده های دیسکی - بیش از ۱۲ کیلومتر تونل با قطر ۵/۸ متر در معدن Gascoigne Wood ، در Selby انگلستان با Robbins TBM حفر گردید. پیشانی برشی از نوع تخت بود و با ۳۵ برش دهنده دیسکی منفرد ۱۷ قطر ۳۵۶ mm همراه با ۱ برش دهنده دیسکی دوتایی و یک چهارتائی به قطر ۳۲۰ mm در قسمت مرکزی پیشانی تجهیز شده بود. عمر متوسط یک دیسک ۱۳۸۴ متر مکعب بود. حداکثر تعویض در یک هفته، شش برش دهنده بود که زمانی اتفاق افتاد که جبهه کار در سیلستون / ماسه سنگ با مقاومت فشاری تک محوره ۱۵۰ مگاپاسکالی قرار گرفت.

افزایش پتانسیل اجرائی برش دهنده های دیسکی : تبارگی توجه بر ساخت برش دهنده های دیسکی جدیدی با پتانسیل حفر بیشتر متمرکز شده است. مشاهده شده است که دیسکهای با قطر بیشتر عملکرد پیشانی برشی را برای حفر سنگهای با مقاومت زیادتر، بهبود داده اند. با افزایش قطر یک برش دهنده دیسکی، قابلیت آن برای بارگذاری بیشتر و در نتیجه دستیابی به توان تولید بالاتر، بهبود و افزایش یافته است.

افزایش اندازه برش دهنده ها همچنین می تواند هزینه ها را بدلیل تغییرات و تعویضهای کمتر برش دهنده ها در حین عملیات، کاهش دهد. یک پیشرفت جالب توجه ساخت برش دهنده های دیسکی با قطر ۱۹ اینچ (۴۸۰ mm) بوده است. این برش دهنده ها قابلیت تحمل بار فشاری ۴۰ تن را دارند که عملکرد بسیار بالائی در شرایط سنگی سخت خواهند داشت و در عین حال هزینه های کمتر و توان تولید بالاتری به بار خواهند آورد.

شرکت های سازنده برش دهنده های دیسکی دیگری نیز به نظری رسد از این ایده که قطرهای بزرگتر دیسکها قابلیت تحمل بار فشاری (عمیق) TBM را بالاتر برد و در نتیجه نرخهای نفوذ بیشتری میتوانند حمایت می کنند. بدون شک، افزایش قطر برش دهنده و نیروی محوری ایجاب می کند که بهبود مواد و مصالح لبه برشی و همچنین پیشرفتهای مهندسی های مشابهی در مورد دیسک، یاتاقانها و محورها در نظر گرفته شود.

1-shaft

شکل ۷-۱۴ نشان می دهد که با تغییر شرایط سنگ نرخ مصرف برش دهنده نیز تغییر می کند. تجربه تونلسازی در Donkin-Morien نشان داد که زمان لازم برای تعویض برش دهنده ها، از زمانهای عمده تک شیفت عملیاتی است (جدول ۷-۶).

شکل ۷-۶: تونل زیر دریائی دانکین-مارین: اطلاعات اجرائی TBM و زمانهای تأخیر وصرف شده

عناصر عملیاتی و تأخیر	هفته پایانی ۱۷ مارس ۱۹۸۴ (٪)	متوسط برای دوره ۹ ژانویه تا ۱۷ مارس ۱۹۸۴ (٪)
پیشروی تونل (زمان)	۴۳/۴	۳۶/۸
نگهداری، نصب حلقه‌ها و قطعات	۱۰/۸	۱۰/۲
تعویض برش دهنده‌ها	۲۶/۴	۲۱/۲
سایر (حمل و نقل، تعمیر سنگ‌شکن‌ها، نگهداری راه، نقشه برداری و...)	۱۴/۲	۱۱/۸
توار نقاله اصلی	۲/۵	۳/۴
نقاله اولیه	۲/۳	۲/۲
نقاله ثانویه	۰/۳	۰/۵
برقی	۰/۳	۱/۷
مکانیکی	تذکر ۱	۱/۲
تعمیر و نگهداری	تذکر ۲	۱۱/۱

تذکرات:

۱- اطلاعات جمع آوری نشده

۲- کلیه کارهای تعمیر و نگهداری همزمان با تعویض برش دهنده‌ها در طول هفته انجام شده است.

برای ارزیابی عملکرد TBM با در نظر گرفتن نرخ پیشروی در چهار هفته متوالی در تونل مذکور، فرمولی (رابطه ۷-۱) ارائه و طبق آن میزان پیشروی ۱۰۵ متر در ۱۰۰ ساعت در هفته محاسبه گردید. متوسط پیشروی اندازه گیری شده برای چهار هفته در دوره زمانی فوریه تا مارس ۱۹۸۴ ۹۵/۲ متر در ۱۰۰ ساعت در هفته بود که با توجه به کارکرد TBM در این دوره (شیب ۲۰٪ و اختلاف مقدار محاسبه شده (برای صعود به طرف تونل) با مقدار اندازه گیری شده منطقی به نظر می رسد.

$$\text{پیشروی هفتگی} = [0.5(T+M+B)] \times 100 \qquad (۷-۱)$$

که:

A = پیشروی واقعی در هفته (متر)

مطالعات انجام گرفته در مورد عملکرد برش دهندهٔ دیسکی

عملکرد برش دهنده‌های دیسکی توسط Roxborough و Phillips علاوه بر یک برنامه گستردهٔ همراه تحقیقاتی هدایت شده توسط TRRL انگلستان، مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات به طور کلی در راستای شناخت بیشتر مکانیزم حفر با استفاده از برش دهنده‌های دیسکی، ماهیت نیروها و انرژیهای ویژهٔ دخیل در برش سنگهای با مقاومتهای مختلف و تأثیر فاصله برش دهنده‌ها از هم و عمق نفوذ بر راندمان برش و خردشدگی سنگ، هدف گیری شده بود.

تجزیه و تحلیل تئوریکی نیروهای دیسک: عملکرد یک برش دهندهٔ دیسکی را می‌توان توسط پارامترهای اصلی زیر نشان داد:

۱- نیروی محوری[1] (F_T): متوسط نیروی اعمالی عمود بر جهت غلتش که برای نگهداشتن دیسک در عمق مورد نیاز نفوذ لازم است

$$L = 2\sqrt{(2DP - P^2)} \qquad (۲-۷)$$

$$A = 2PL\,tg\,0.5\phi \qquad (۳-۷)$$

با ترکیب معادلات ۷-۲ و ۷-۳ و تنش مربوط به نیو خواهیم داشت:

$$F_T = 4\sigma\, tg\,\frac{\phi}{2}\sqrt{(2DP^3 - P^4)} \qquad (۴-۷)$$

که: L = طول وتر قوس تماس[2]

ϕ = زاویهٔ لبهٔ دیسک

D = قطر دیسک

σ = مقاومت فشاری تک محوره سنگ

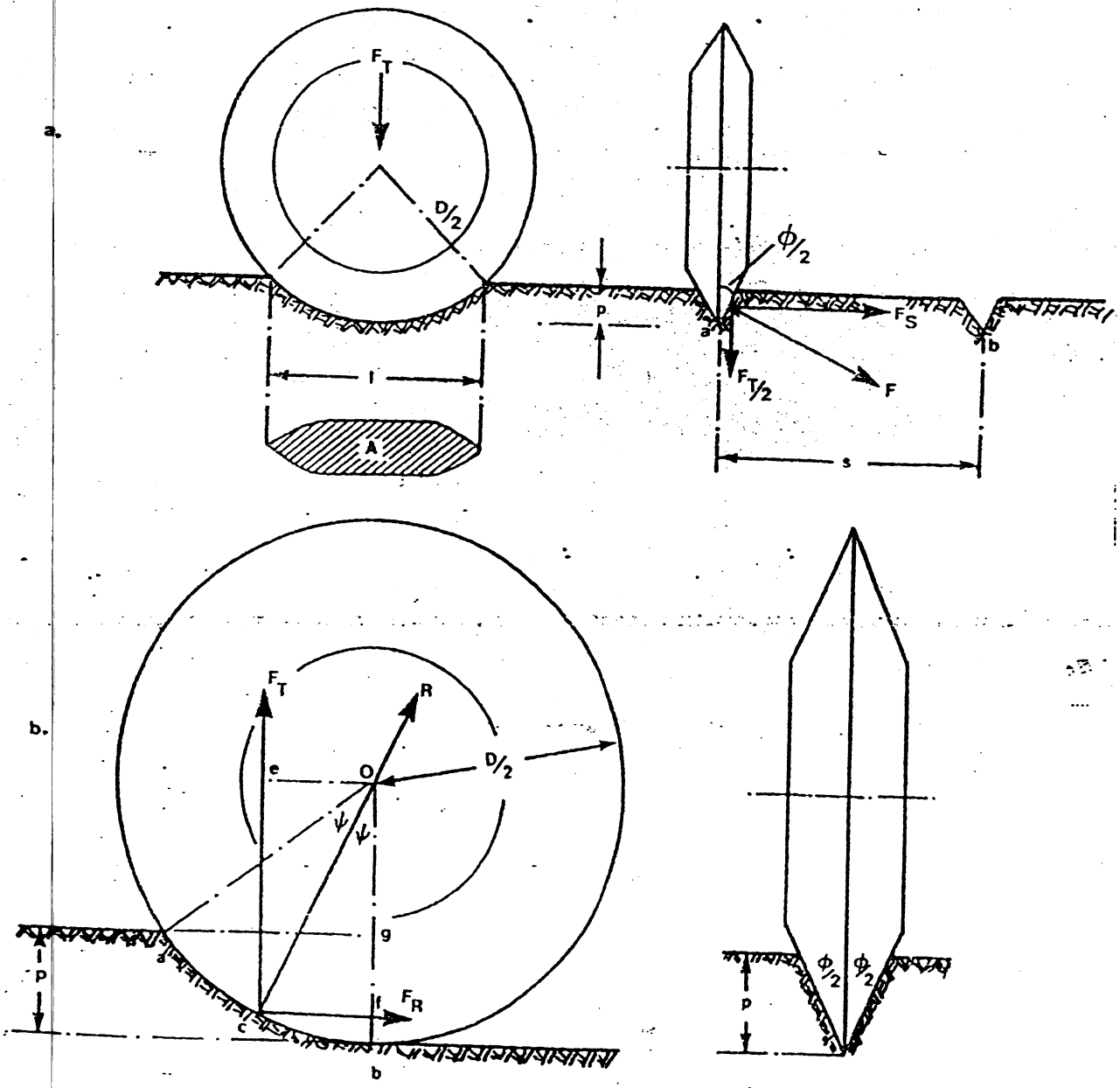
P = عمق نفوذ دیسک

F_T = نیروی فشار محوری

A = سطح تماس دیسک تصویر شده

رابطهٔ ۷-۴ بر این فرض استوار است که مقاومت فشاری سنگ، مقاومت نفوذ را تعیین می‌کند. فرض دیگر در این تحلیل این است که نیروی محوری (F_T) و نیروی غلتش[3] (F_R) و شرط برش دیسک فرض شده برای این تحلیل نشان داده شده است.

1- Thrust force , 2- chord length of contact , 3- rolling force



شکل ۷-۱۵ : نفوذ دیسک و نیروهای مربوطه

$$F_R \cdot \overline{of} = F_T \cdot \overline{oe}$$

$$F_T/F_R = \cot g\,\psi \qquad (۵-۷)$$

$$\overline{og}/\overline{od} = (D/2 - P)/(D/2) = \cos 2\psi = (1 - tg^2\psi)/(1 + tg^2\psi)$$

$$\Rightarrow tg^2\psi = P/(D-P) \quad , \quad F_T/F_R = \sqrt{(D-P)/P} \qquad (۶-۷)$$

با ترکیب معادلات ۷-۵ و ۷-۶ نتیجه می شود که :

$$F_R = 4\,B\,p^{1}\,tg\,\frac{\Phi}{1} \qquad (۷-۷)$$

۲- نیروی غلتش (F_R) : نیروی متوسط اعمال شده در جهت برش و نیروئی است که موجب غلتش دسیک در عمق نفوذ مورد نیاز می شود.

۳- بار (Q) : حجم سنگ خرد شده با برش دهندهٔ دسیکی که برحسب فاصله برش بیان می شود.

۴- انرژی ویژه (SE) : کار انجام شده برای برش واحد حجم سنگ با برش دهنده دسیکی.

تجزیه و تحلیل تئوریکی نیروهای برش دهندهٔ دسیکی که توسط Roxborough و phillips در زیر ارائه شده است، شرط کلی نشان داده شده در شکل ۷-۱۵ (الف) را فرض کرده است.

نتایج عملکرد برش دسیک : ماسه سنگ با مقاومت متوسط

افراد فوق برای تأئید اعتبار اطلاعات تجربی حاصل از آزمایشهای برش انجام شده بر روی ماسه سنگی با دانه بندی زبر و مقاومت متوسط از روابط ۷-۳ و ۷-۷ استفاده کردند. تجارب و آزمایشهای آنها امکان بررسی رفتار اجرائی برش دهندهٔ دسیکی را میسر ساخت.

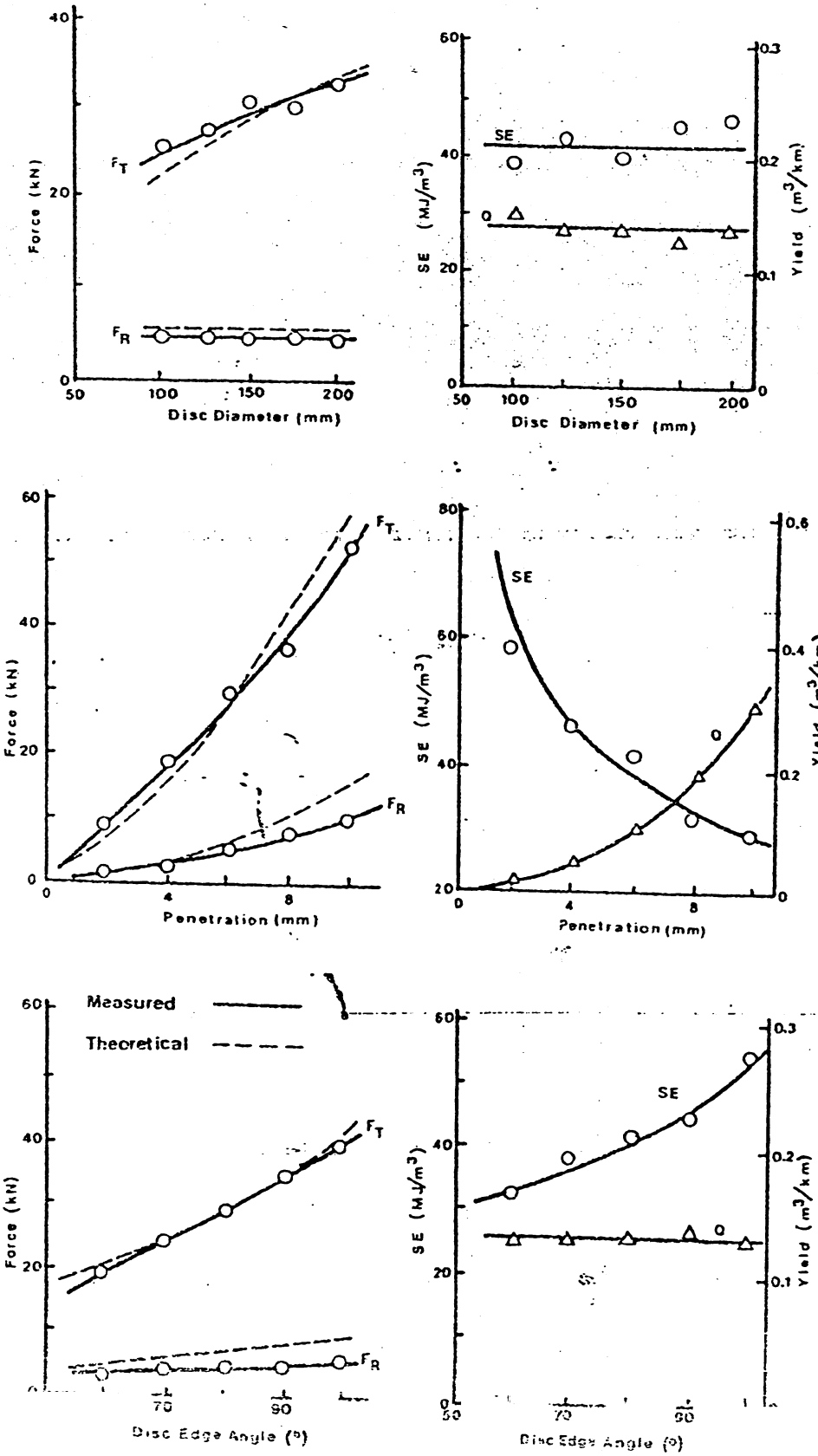
نتایج تئوریک با اطلاعات آزمایشگاهی و تجربی حاصل مقایسه شده اند (شکل ۷-۱۶) که می توان با این مقایسه ها و نمودارها تأثیر عوامل اصلی حاکم بر عملکرد برش دهندهٔ دسیکی را شناسائی کرد.

تأثیر عملکرد دسیک : با افزایش قطر دسیک، نیروی محوری افزایش می یابد، ولی نیروی غلتش تغییری نمی کند. انرژی ویژه و حجم سنگ حاصل یا خرد شده نیز با افزایش قطر دسیک تغییر چندانی نمی نمایند.

تأثیر نفوذ : با افزایش عمق نفوذ هردو نیروی محوری (F_T) و غلتشی (F_R) افزایش می یابند. با این وجود، انرژی ویژه کاهش قابل ملاحظه ای از خود نشان می دهد و بار (Q) با افزایش عمق نفوذ افزایش می یابد.

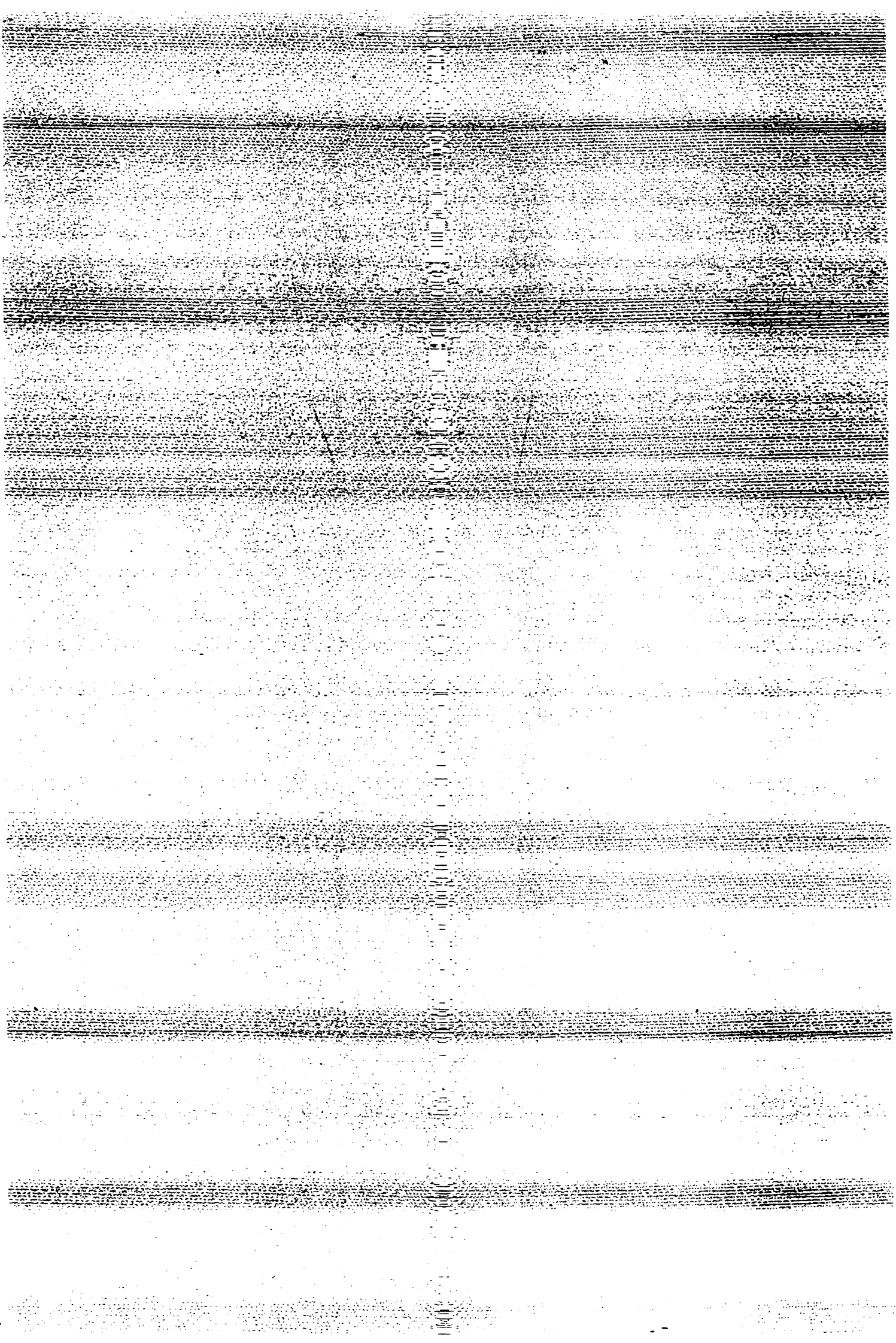
تأثیر زاویه لبهٔ دسیک : با افزایش زاویه لبهٔ دسیک، نیروی محوری افزایش می یابد، ولی افزایش نیروی غلتشی در مقایسه با افزایش F_T جزئی و ناچیز است. بار (Q) از تغییرات زاویه لبهٔ دسیک متأثر نیست، ولی انرژی ویژه با افزایش آن افزایش می یابد.

تأثیر سرعت پیرفتی : برای سرعتهای برش دسیک بیش از ۲۰۰ mm/min، مشاهده شده است که نیروهای محوری و غلتشی افزایش عمده ای و انرژی ویژه و بار افزایش می یابند.



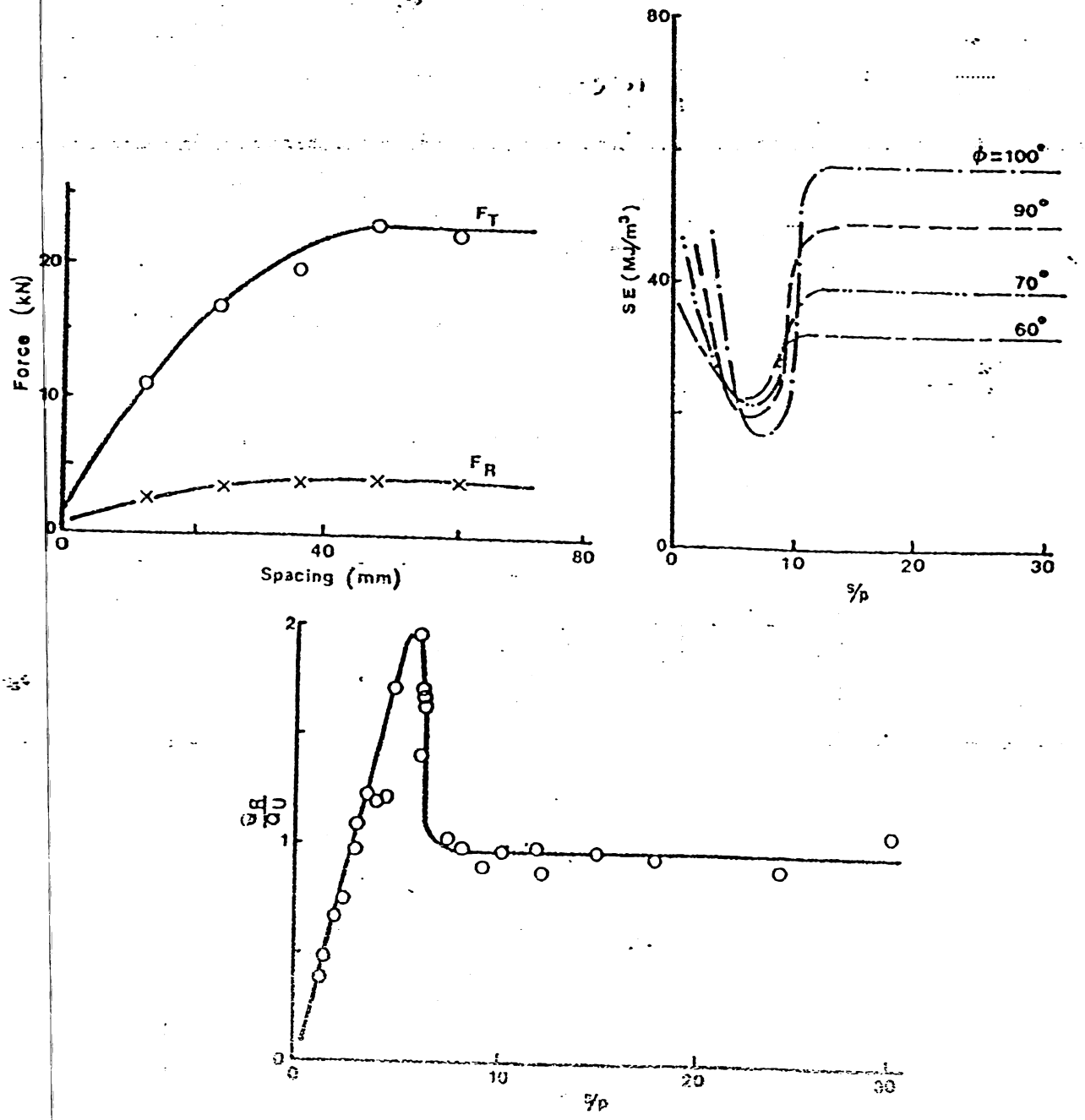
شکل ۲-۱۶ : محاسبه برش دیسک : تأثیر قطر، نفوذ و زاویه لبه دیسک

نوع سنگ : ماسه سنگ با مقاومت فشاری تک محوره ۳۹/۲MPa و مقاومت کششی (برزیلی) ۲/۷۴MPa

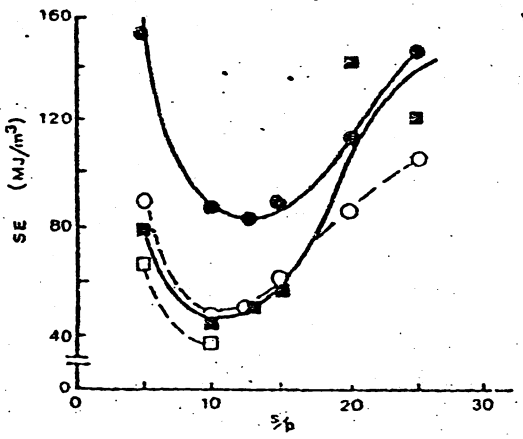


جدول ۷-۷ : ویژگیها و خصوصیات سنگ مربوط به برنامه تحقیقاتی TRRL

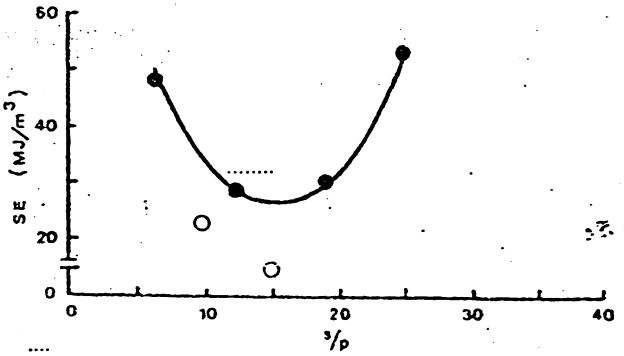
نوع سنگ و محل	توضیحات	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
ماسه‌سنگ، Notter	توده‌ای، دانه‌بندی متوسط، تخلخل زیاد	۵۰	۳/۵۲
گرانیت، Devon	گرانیت دگرسان نشده با دانه‌بندی درشت	۱۷۴/۲	۹/۹۶
دولریت، Belford	دایک با درزه‌های زیاد و دانه‌بندی ریز دگرسان شده	۳۳۹/۸	۲۷/۵۳
سنگ آهک، Clwyd	سنگ آهک کربنیفر بلورین، دانه‌بندی ریز تا متوسط، توده‌ای	۱۵۵/۰	۱۳/۷۲



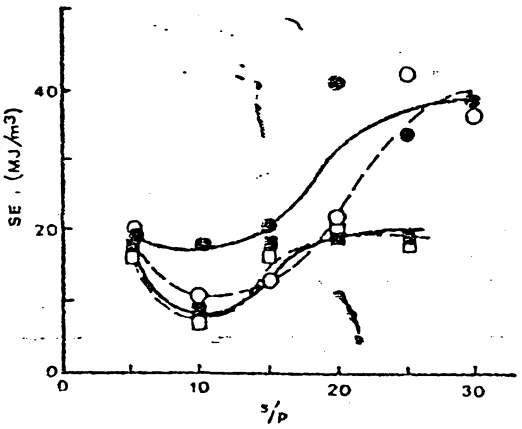
شکل ۷-۱۲ : تأثیر فاصله‌داری برش، عمق‌دهی و جهتگیری بر عملکرد حفر



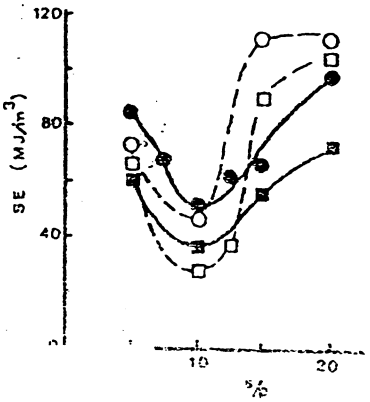
(a) s/p versus SE for dolorite
Penetration:
● = 2 mm
○ = 4 mm
■ = 6 mm
□ = 8 mm



(b) s/p versus SE for Plas Gwilym limestone
Penetration:
● = 4 mm
○ = 6 mm



(c) s/p versus SE for Gregory Sandstone
Penetration:
● = 4 mm
○ = 6 mm
■ = 8 mm
□ = 10 mm



(d) s/p versus SE for Merrivale Granite
Penetration:
● = 2 mm
○ = 4 mm
■ = 6 mm
□ = 8 mm

شکل ۷-۱۹ : تغییرات انرژی ویژه بر حسب تغییرات نسبت فاصله دارق وسیله به عمق نفوذ

در طیه چهار حالت نشان داده شده در شکل ۷-۱۹، انرژی ویژه در یک نسبت خاص S/p، به یک مقدار حداقل کاهش می یابند. این نتایج بوضوح نشان می دهند که نسبتی از S/p که انرژی ویژه به حداقل می رسد در دامنه ۱۰ تا ۱۵ برای این سنگها تغییر می کند که نشانگر گستردگی دامنه هم نوع و هم مقاومت این سنگها می باشد.

بیشتر نتایج نشانگر این هستند که در حدود نسبت S/p برابر ۱۰، حداقل مقدار انرژی ویژه تحقق می یابد. تحقیقات جدیدی در مورد سنگهای بیشتری با دامنه گسترده تر مقاومتی انجام و نتایج در جدول ۷-۸ آورده شده است. این نتایج نشان می دهد که برای سنگهای با مقاومت فشاری تک محوره بیشتر، مقدار نسبت S/p بدست آمده بزرگتر است.

انرژی ویژه برحسب عمق نفوذ: نتایج ارائه شده در شکل ۷-۱۹ بیانگر روند مشابهی را نشان می دهند و آن این که با افزایش عمق نفوذ، انرژی ویژه کاهش می یابد. آزمایشهای انجام شده در مورد ماسه سنگ نشانگر این امر است که با افزایش عمق نفوذ به مقادیر بیش از حدود ۱۰ میلیمتر، کاهشی در انرژی ویژه صورت نمی گیرد. دسترسی به چنین عمق نفوذی برای دولومیت و گرانیت با وسائل آزمایشگاهی فعلی میسر نیست و هر چند برای این سنگها روند مشابهی پیش بینی می شود، ولی فشانه روشنی مبنی بر کاهش انرژی ویژه با افزایش عمق نفوذ برای سنگهای بسیار سخت وجود ندارد.

نیروهای دینامیک برحسب فاصله داری ابزار: ماهیت نیروهای اعمالی در جریان برش دینامیکی گرانیت، از طریق نتایج نشان داده شده در شکل ۷-۲۰ ارائه گردیده است. با افزایش فاصله داری یا فاصله برش دهنده های دینامیکی از یکدیگر، نیروی نرمال به طور قابل ملاحظه ای تغییری کند تا به یک مقدار فاصله داری مشخص که می رسد، نیرو نیز به یک مقدار ثابتی می رسد و با افزایش فاصله داری، نیروی نرمال تغییر نمی کند.

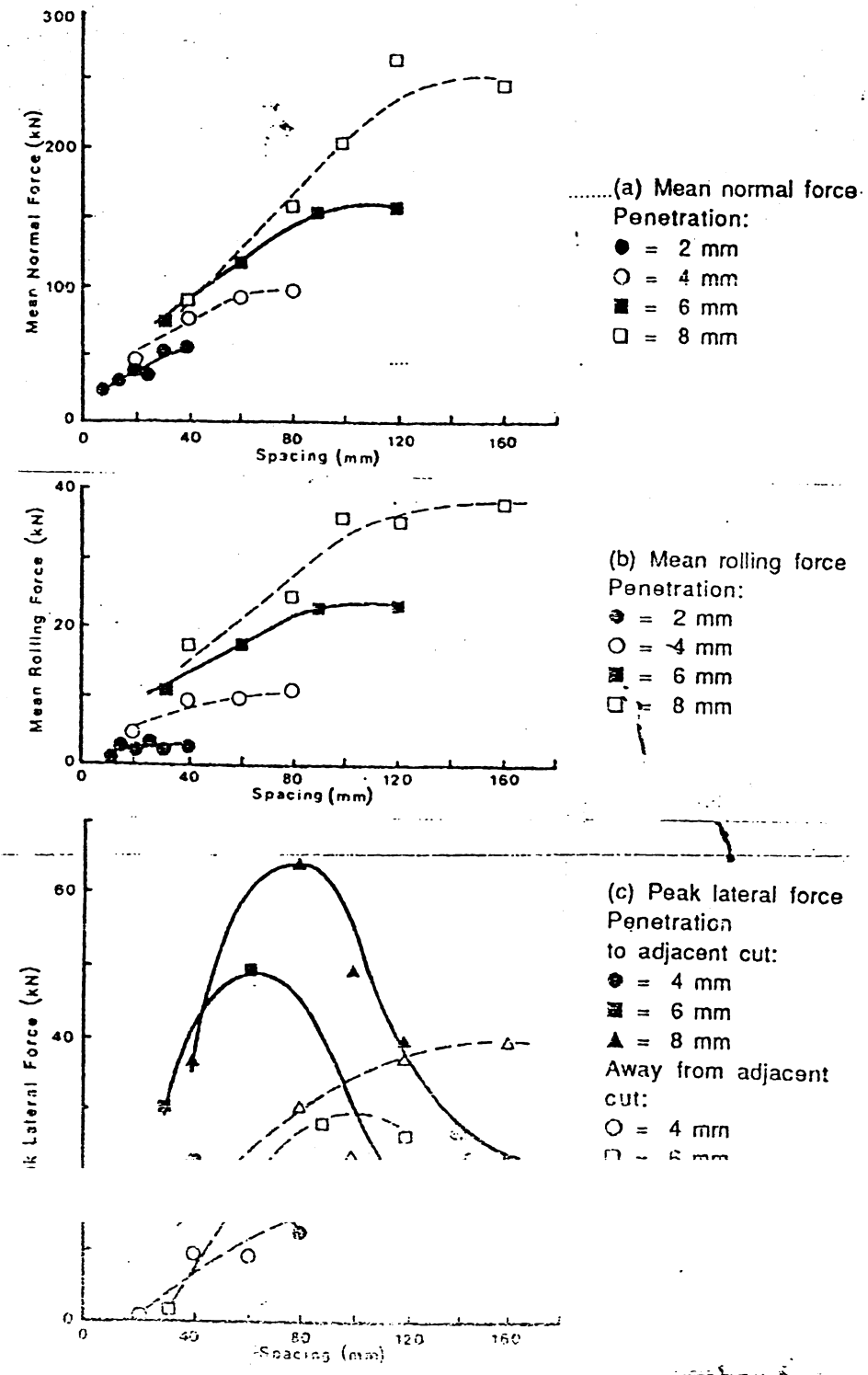
نیروی عکسی نیز روندی مشابه با نیروی نرمال از خود نشان می دهد، با این وجود، میزان نیروی عکسی اصولاً کمتر از میزان نیروی نرمال است و برای برشهای کم عمق مقدار نیروی عکسی به یک دهم نیروی نرمال می رسد.

نیروی جانبی برش دهنده متأثر از حرکت برشی دینامیک است که در برش جابجایی نزدیک به ۱ آن دور می شود. (شکل ۷-۱۸). فاصله داری تأثیر عمده ای بر میزان نیروی جانبی دارد.

صرفنظر از عمق برش،

جدول ۷-۸: تغییرات مؤثرترین نسبت فاصله‌داری به نفوذ ($\frac{S}{P}$) برحسب مقاومت سنگ

دامنه مقاومت فشاری سنگ (MPa)	نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ دسکیک (S/P)	مشخصات مقاومتی سنگ (مشخصات پیشنهادی)
<۲۵	۳	سست تا متوسط
۲۵-۱۰۰	۵-۱۰	سنگی سخت
>۱۰۰	۱۰-۱۵	سنگهای بسیار سخت



شکل ۷-۸: فاصله‌داری دسکیک بر تیرچه‌های تونل (عمود) انگلستان
و حاصل برای سنگ گرانیت

طرح و عمل TBM : بهبود و افزایش عملکرد - کاربرد روزافزون TBM ها جهت حفر سنگهای آذرین و دگرگونی با مقاومت بالا و ویژگیهای سایندگی ایجاب نمود که تلاش تحقیقاتی گسترده ای برای یافتن راههائی جهت بهبود عملکرد چنین ماشینهائی صورت گیرد. بحث قبلی بر بهبود برش دهندهٔ دیسکی برای بالابردن قابلیت برش سنگهای سخت تر متمرکز بود.

بهبود عملکرد TBM در سنگهای سخت و افزایش قابلیت حفر تونلهائی با قطر بزرگتر با نرخهای بالاتر حفر، خود افزایش انرژی مصرفی آنها شده است.

آنفبشان در عملکرد برش دیسک بهبود قابل ملاحظه ای ایجاد کرد و به عنوان روشی که بهبود همه ای در فرآیند حفر و برش ایجاد کرده، مطرح است. این بهبود به طور خاص به نحوی که آنفبشان در تمیز کردن مسیر برش، برش دهندهٔ دیسکی می کند، مربوط است. تأثیرات دیگری که استفاده از آنفبشان در بهبود عملکرد برش دارند ناشی از موارد زیر می باشد:

۱- کاهش نیروهای اصطکاکی برای برش در برش دهنده ها

۲- افزایش عمر برش دهنده ها ناشی از سرد کردن آنها

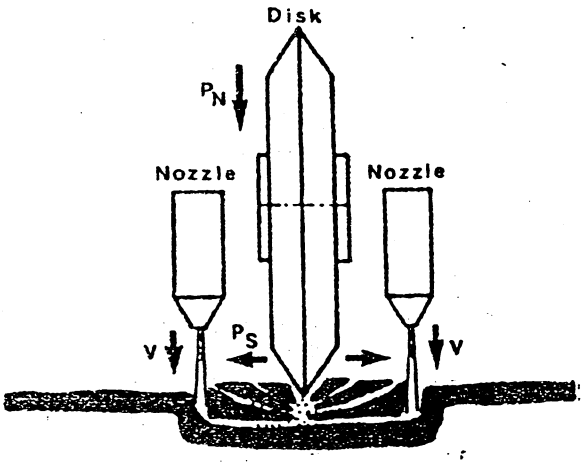
۳- کاهش میزان گرد و غبار تولیدی علاوه بر بالابردن توان انتقال مواد کنده شده.

در شکل ۷-۲۱ مکانیزم اصلی ترک دار شدن سنگ در رابطه با برش دهندهٔ دیسکی و همچنین بهبش آنفبشانهائی که باعث پاشش آب در تمیز کردن محیط برش از مواد کنده شده کمک می کند و عملکرد برش دهنده را بهبود می بخشند، به تصویر کشیده شده است.

در تلاش برای یافتن روشی جهت بهبود عملکرد TBM ها، یکی از مؤثرترین روشها ارزیابی دقیق عملکرد حفر پیش بینی شده در شرایط سنگی است که تونلسازی قرار است در آن انجام گیرد. آگاهی دقیقتر از شکلها [illegible] این آگاهیها بویژه در مورد تعیین نوع برش دهنده و ترتیب قرارگیری و آرایش بهینهٔ آنها بر روی پیشانی برشی مؤثر است.

متغیرهای مهم متعدد دیگری وجود دارند که تغییر آنها می تواند منجر به بهبود عملکرد حفر شود، ولی از آنجائی که کنترل و هماهنگی چنین تغییراتی مشکل است، اقدام به چنین تغییراتی می تواند منجر به بدتر شدن عملکرد حفر [illegible]

(الف) تصویر بکارگیری یک برش دهنده دیسکی برروی هبهه کار سنگی و حالت گسیختگی برشی سنگ. تشکیل تک سنگهای برش خورده، جابجائی و اشغال آنها را تحت عمل آبفشانها که مطابق شکل جهت داده شده اند، تسهیل می کند.



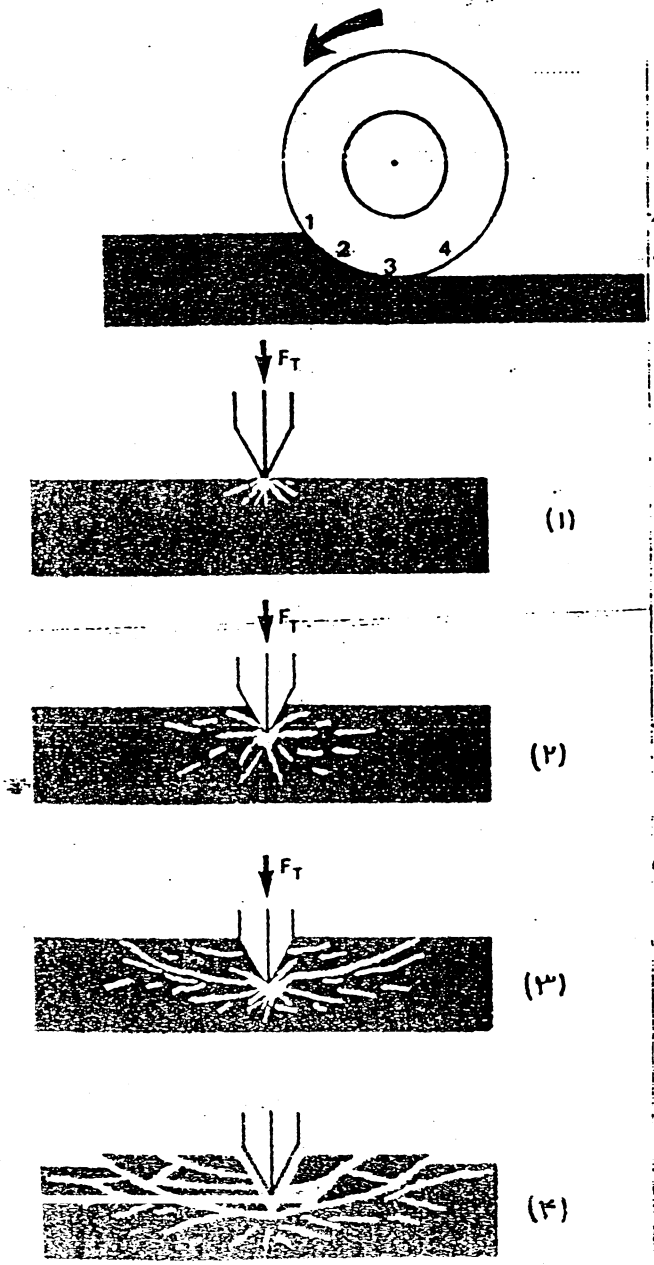
(ب) حالت کلی گسیختگی سنگ در جریان برش سنگ توسط برش دهندهٔ دیسکی

مرحلهٔ ۱ : شروع نفوذ توسط دیسک، ایجاد خردشدگی موضعی در سنگ تحت بار لبهٔ نفوذ کنندهٔ دیسک می کند.

مرحلهٔ ۲ : درحالی که دیسک یک شیار ایجاد می کند، نیروی فشاری اعمالی به سنگ مرتب افزایش است. افزایش نیروی فشاری همراه با جابجائی و حرکت جانبی (دیسک)، ایجاد ترکهای کششی علاوه بر واکنشهای برشی سنگ می کند.

مرحلهٔ ۳ : نفوذ دیسک به حداکثر مقدار خود رسیده و ایجاد ترک گسترده ای کرده که به سطح آزاد رسیده است. شکلهای اصلی گسیختگی، ترک خوردگی کششی و برشی همراه با گسیختگی فشاری تحت تأثیر لبه دیسک است.

مرحلهٔ ۴ : کرنش وقتی اتفاق می افتد که لبه دیسک با دور شدن از درون برش ایجاد کرده به بیرون - [illegible] بیشتر و ورقه ورقه شدن در سطح سنگ ایجاد می کند.



شکل ۷-۲۱ : برش دیسکی - به تصویر کشیدن مکانیزم اصلی ترک دار شدن سنگ

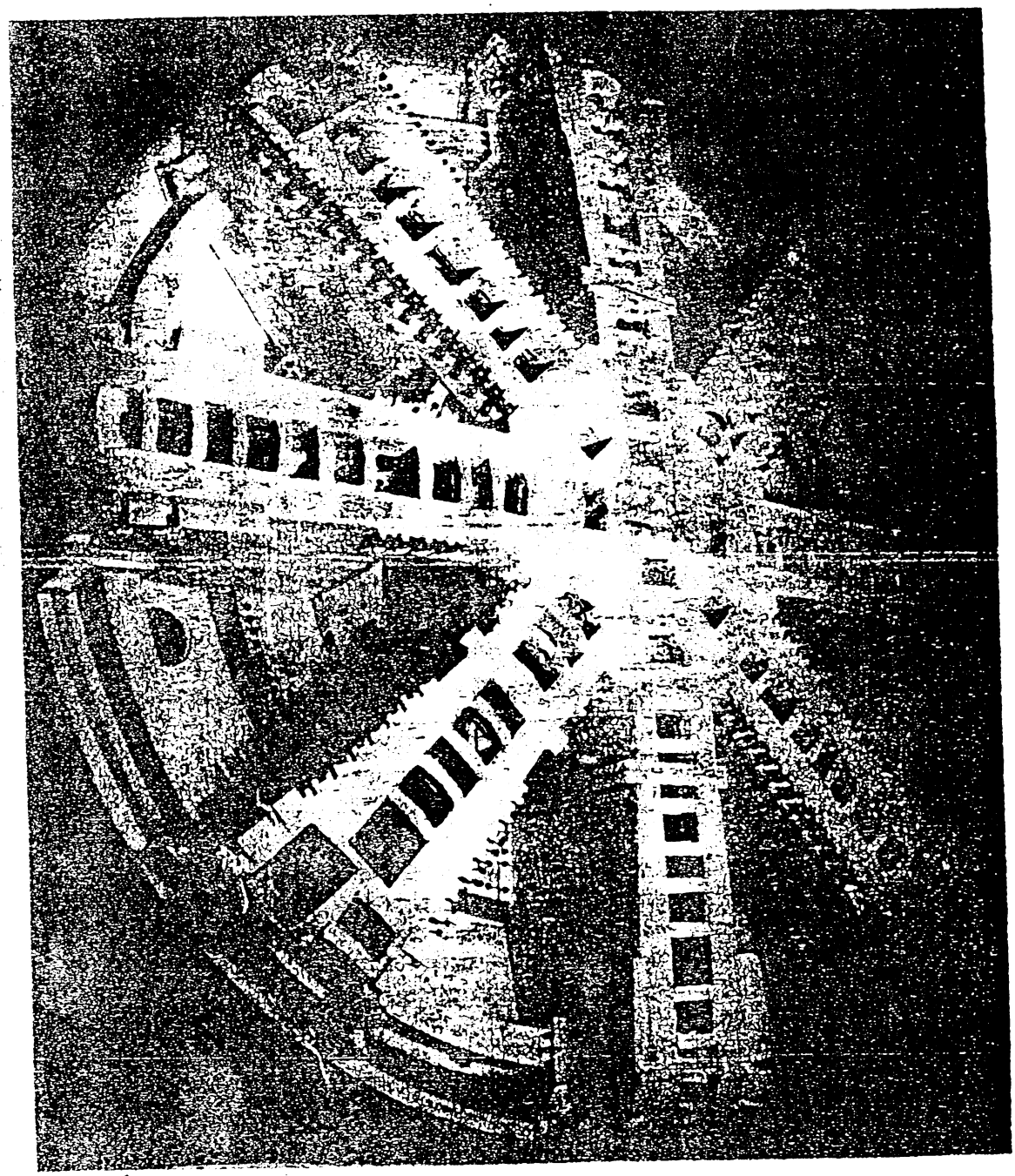
ویژگیهای تونل مورد استفاده در حفر تونل Channel: حفر تونل Channel توسط یازده ماشین تونلسازی تمام رخ صورت گرفت که شش ماشین از سمت انگلستان و پنج ماشین از سمت فرانسه عمل کردند.

TBM های Robbins/kawasaki با سیستم سپری فشاری هیدرواستاتیک در سمت فرانسه به کار گرفته شدند (شکل ۷-۲۲). از آنجا که تونلسازی می بایست تحت فشار عمدهٔ آب انجام می گرفت، طراحی بنحوی صورت گرفته بود که پیشانی برشی و سپر با همدیگر به جلو رانده می شدند و در نتیجه نیروی فشاری محوری می بایست به پوشش تونل منتقل می شد. سپر با بایست تحت چنین شرایط محیطی آب بندی می شد و در عین حال قادر به مقاومت در برابر فشار هیدروستاتیک بیش از ۱۰ بار می بود. پوشش تونل بین دو گام پیشروی نصب می گردید، در حالی که پیشانی برشی پیش برده می شد، سپر ثابت باقی می ماند. این TBM با قطر ۸/۸ متر دارای ظرفیت فشار محوری ۱۱۵۰۰ تن و انرژی مصرفی ۴۸۰۰ کیلو وات بود. پیشانی برشی با ۴۹ برش دهندهٔ غلتشی نوع دیسکی و ۲۳۶ برش دهنده نوع چنگکی تجهیز شده بود. سنگ کنده شده توسط یک نقاله مارپیچ به یک نوار نقاله پلاستیکی و از آن با اسکیپهای ریلی منتقل می شد. نرخ پیشروی پیش بینی شده ۷/۲ m/h و به طور کلی ۵۰۰ m/ماه در چاک با مقاومت نسبتاً پائین بود.

نتایج جالب توجهی از عملکرد TBM در راستا لیا در یک شرایط مرکب و مخلط زمین به دست آمده که در جدول ۷-۹ درج شده است. تونل Lotbinière با قطر ۴/۱۲ متر در شیل و سنگ آهک توسط TBM Robbins حفر شده و در بهترین شیفت به راندمان ۴۴/۲ متر، در بهترین روز ۱۸/۱ متر و در بهترین پنج روز به ۳۰/۶ متر دست یافته اند.

با یک TBM ساخت Robbins مدل ۱۴۱-۲۵۱ در شکلات مکاشیتی رگه ای به نتایج زیر دست یافته اند: ۷۵/۸ متر در یک روز، ۲۹۱/۵ متر در یک هفته در یک تونل با قطر ۴/۳ متر.

[illegible] گزارش کرده است که روشهای حفر جامد در دامنهٔ قطرهای بالای ۳ متر معمول هستند، تعداد متر حفر شده در ۹۰٪ قطر ۴ با ۴/۳ متر حدود ۱۰٪ و در حد بسیار خوب تا حدود ۹ متر قطر در حفر چاهها به کار گرفته شده اند. چاههائی که با ماشین حفر شده اند نتایج جالب توجهی به دست آورده اند. [illegible]



شکل ۷-۲۲: TBM Robbins/Kawasaki با سیستم سپری تمام هیدروستاتیک.

الماس Fremder، چاه با قطر ۶ متر و عمق ۴۸۴ متر، چاه Frank با قطر ۵٫۵ متر و عمق ۱۰۳۳ متر، معدن نیکل Agnes با قطر ۴٫۴ متر و عمق ۷۵۴ متر، معدن Kalgoorlie با قطر ۷٫۱ متر و عمق ۱۱۹۰ متر.

جمع بندی و ملاحظات نهائی

در آینده حفر تونل در ۳۰ تا ۴۰ سال اخیر تغییرات عمده‌ای را شاهد بوده است و بدون شک مهمترین تغییر مربوط به ماشینهای حفر تونل (TBM) با قابلیت حفر در سنگهای سخت و با

قطرهای بالای ۱۱ متر بوده است. این ماشینها امکان حفر تونلهای طویلتر و بزرگتر و با زمان کمتر را میسر ساخته اند. ملاحظات ذیل مهمترین ویژگیهای چنین ماشینهائی را برای حفر تونل بیان می دارد:

۱- اندازه تونل و قابلیت تغییر: TBM ها امکان حفر تونل در مقیاسهای جالب توجهی را فراهم آورده اند. در سالهای ۱۹۶۳ تا ۱۹۶۴، TBM رابینز با قطر ۱۱/۱۸ متر، فشار محوری ۲۷۳ تن و توان ۷۴۶ کیلووات پیشانی برشی به خوبی موفقیت در حفر ۵ تونل که هرکدام ۵۰۳۰ متر طول داشتند، بکار گرفته شد. شرایط سنگی تونلها ماسه سنگ و رس همراه با میان لایه‌های از ماسه سنگ سخت و سنگ آهک بود. این ماشین اصلاح شد و با قطر ۱۳۴ متر برای حفر تونل راه دوبانده ای در زیر رودخانه و در ماسه سنگ که چندین گسل آن را قطع کرده بودند، به کار گرفته شد. این مثال تنها به منظور نشان دادن قابلیت حفر قطرهای بزرگ تونلی برای TBM بلکه برای بیان قابلیت تغییر پذیری آن برای اصلاح و تطبیق با سایر شرایط، ارائه شده است.

جدول ۷-۹: عملکرد TBM و شرایط زمین برای فواصل ۷۱۳۰ تا ۸۲۶۳ متر

شرایط زمین	نرخ پیشروی متوسط (m/shift)	نرخ نفوذ متوسط (m/h)	انرژی حفر متوسط (kJ/m)
بیش از ۲۰٪ طول تونل بازالت و رس	۶/۱۳۴	۲/۹۹	۳۷۱
بازالت شدیداً Vesicular با رس پرکننده vesicle	۷/۹۱	۳/۳۱	۳۹۳
بیش از ۵۰٪ جبهه کار بازالت شدیداً هوازده	۹/۰۷	۴/۲۸	۲۲۳
بازالت با هوازدگی متوسط و خرد شدگی	۹/۲۶	۳/۹۵	۲۴۸

تذکرات:

۱- طول تونل = ۱۵/۳ کیلومتر، قطر = ۵/۵۳ متر

۲- ماشین: Robbins TBM 188-227

۳- شرایط زمین: بازالت توده ای قطع شده با مواد دایکی و ماسه های حرارتی

۴- نکته های اجرائی به دست آمده: ۲ متر در یک شیفت (۸ ساعته) ۱۲ تا ۱۵ متر در یک روز و ۷۰ متر در هفته با ۱۸ شیفت

۵- شرایط سنگ شناسی: انواع سنگهای سخت نظیر سرباتیت، سنگ سبز، چرت، در برش با نرخ متوسط TBM با توجه به سیستمهای سرد کننده با اندازه های کاربید تنگستن، قطر ۱۱/۱۸ متر، فشار محوری ... آن و توان مصرفی پیشانی برشی ۱۱۵ کیلووات حفر شده اند.

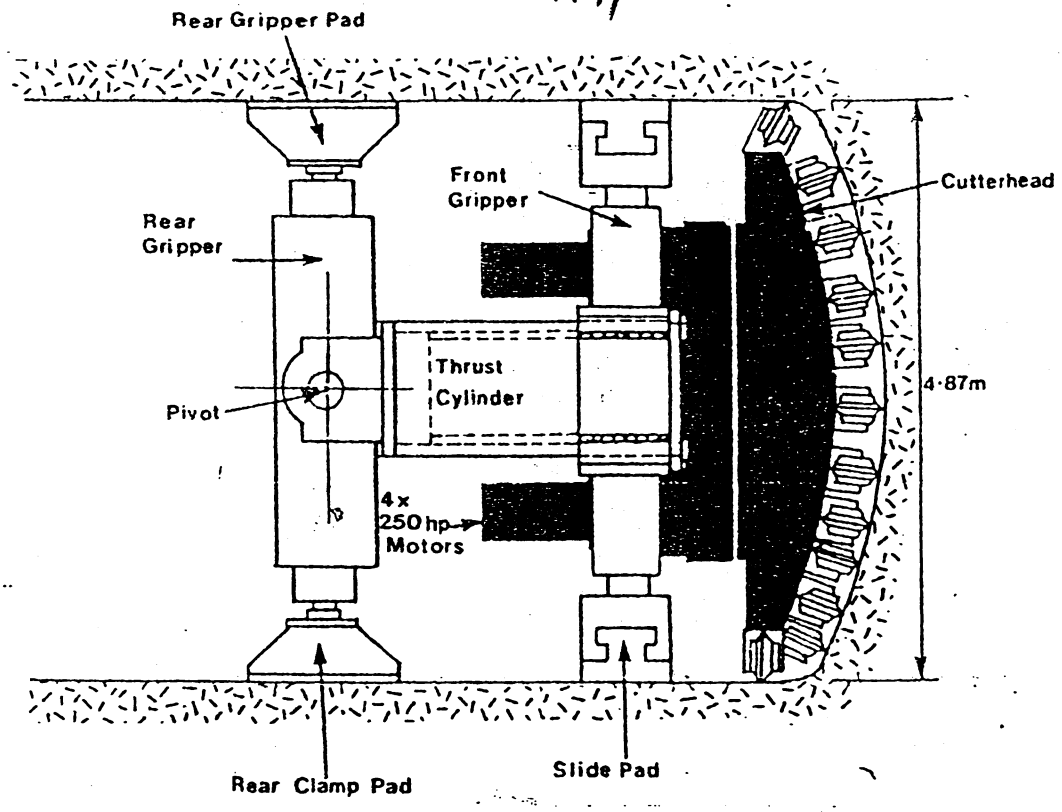
نرخهای نفوذ TBM بالای ۱۰۵ متر در ساعت با نرخ حداکثر ۳۲/۹ متر در روز و ۱۱۱ متر در هفته

با این ماشین به دست آمده بود.

۳- بهبود عملکرد حفر: تونل اتحرافی نیروگاه برقی Vinstra در نروژ با طول ۱۷ کیلومتر با استفاده از دو TBM رابینز به قطر ۴/۷۵ متر، فشار رحوری ۶۳۵ تن و توان پیشانی برش ۸۴۰ کیلووات که با برش دهنده های دیسکی رابینز مجهز شده بود، حفر گردید. سنگها به طور عمده عبارت بودند از فیلیت (مقاومت فشاری تک محوره ۳۵ تا ۶۰ مگاپاسکال) و شیل (مقاومت ۲۰-۴۵ MPa) که در محدوده گسترده ای دگرگون شده بودند و گهگاه لایه های کوارتز و ماسه سنگ نیز در آنها وجود داشت.

انتخاب حفر با TBM در چنین شرایط زمین شناختی بر مبنای کاوش و سائل نگهداری سنگ در مقایسه با روش چالزنی و آتشباری بود. نرخ نفوذ پیش بینی شده ۲/۷۳ متر در ساعت و بر مبنای ۲ شیفت ۱۰ ساعته در روز و ۵ روز در هفته که ۱۰۰ ساعت کاری در هفته را شکیل می داد، بوده برای ضریب بهره وری ۴۰٪ و ۷۰۰۰ متر از طول تونل پیشروی تخمین زده شده برای هفته ۴۰ ساعتی ۱۹ متر در هفته بود (۴۰ m/week × ۲/۷۳ m/h). بهترین رقمهای پیشروی برای یکی از دو TBM، به طور متوسط ۱۹۷ m/week و برای بهترین هفته ۲۷۵ m/week بود و نرخ متوسط نفوذ ۳ m/h بوده. TBM دیگر به پیشروی متوسط ۱۲۹ m/week و در بهترین هفته ۲۱۰ m/week و نرخ نفوذ متوسط ۳/۱ m/h دست یافت. به وضوح مشاهده می شود که نرخ حفر از مقادیر پیش بینی شده، بیشتر بوده است. در روش حفر با TBM نیاز به وسائل نگهداری کمتری است. در مناطق گسله به منظور کنترل مؤثر باید زمین را به نحو مطلوبی نگهداری کرد که این کار با استفاده از قابهای فولادی قوسی، توری فولادی و بتن پاشی سنگ صورت می پذیرد.

۴- ماشینهای کوچک و حجم حفر: طراحی TBM های کوچک و حجم رحوری حفر با دیسکهای آخر این ماشینها را افزایش می دهد. یک گام عمده در این راستا توسط Sandvik صورت گرفته است. در TBM حجم رحوری با قطر ۴/۸۷ متر و قابلیت حفر نواری با شعاع قوس ۲/۲ متر با دیسکهای ۴۳ سانتی متری ساخته شده است (شکل ۲-۲۳). ماشین حجم رحوری این نوع TBM، نه تنها آن را از سطح رقابتی کوچکتر می سازد، بلکه دور راسبکتر، قابلیت مانور را بیشتر و شعاع خرج حفر را کوچکتر می کند. این نوع ماشین تغییر پذیری و انطباق پذیری برای عملیات در راهگذرهای گسترده ای از شرایط زمین را دارا است.



شکل ۷-۲۳: TBM جمع وجور و فشرده. قطر: ۴/۸۷ متر، توان ۷۴۶ کیلووات، فشار محوری ۷۵۰ تن، طول ماشین ۵/۰۳ متر، وزن ۱۳۲ تن، شعاع چرخش ۱۲/۲ متر

۵- دامنهٔ گستردهٔ کاربرد: اطلاعات موجود در حال حاضر بیانگر کاربرد و عملکرد TBM در دامنه گسترده‌ای از انواع سنگها هستند. چنین ماشینهائی را می‌توان برای کار در انواع مختلف شرایط سنگی طراحی کرد، در عین حال شرایط عملکرد و اجرائی را نیز می‌توان با دقت خوبی پیش بینی نمود.

۶- انتخاب پیشانی برشی: طرح پیشانی برشی و انتخاب برش دهنده‌ها جهت دستیابی به نرخهای اجرائی حفر پیش بینی شده، هنوز زمینه‌ای است که نیاز به بررسی و ارزیابی دقیق دارد. اطلاعات و آگاهیهای تفصیلی از شرایط سنگی که تونل در آن حفر می‌شود، می‌تواند به میزان زیادی در انتخاب صحیح پیشانی برشی، نوع برش دهنده و آرایش آنها در پیشانی برشی کمک کند.

۷- برش دهنده‌های دیسکی: گسترش دامنهٔ کاربرد TBM ها برای انواع سنگهای سخت‌تر و دستیابی به نرخهای بالاتر حفر تونل هنوز نیازمند توسعه، کارهای تجربی و مکانیکی در زمینهٔ عملکرد برش دهنده‌ها دارد. نظرات زیر در مورد بهبود عملکرد برش دهنده‌های دیسکی ارائه شده است:

الف- افزایش قطر دیسک منجر به توانائی فشار محوری بالاتری برد ولی سرعت

غلتشی تغییر عمده ای ایجاد نمی کند. با افزایش قطر دسک، انرژی ویژه و بار احجم سنگ کنده شده در واحد طول تونل، معمولاً (m^3/km) تغییر عمده ای را متحمل نمی شوند.

ب - با افزایش عمق نفوذ دسک، نیروی محوری و غلتشی به طور مشابه افزایش خواهند یافت. انرژی ویژه به نحو قابل توجهی کاهش می یابد و بار سنگ خرد شده در عمقهای بالاتر نفوذ افزایش می یابد.

ج - هرچه زاویه لبهٔ دسک افزایش می یابد نیروی محوری به طور مشابه افزایش ولی نیروی غلتشی می یابد، به طور جزئی تحت تأثیر قرار می گیرد.

د - برای سرعتهای برشی دسک بالای حدود ۲۰۰ میلیمتر در دقیقه، نیروهای غلتشی و محوری و انرژی ویژه و بار سنگ خرد شده تغییر عمده ای نشان نمی دهند.

۸- قابل اعتماد بودن TBM ها : حفر تونل توسط TBM یک روش با اعتماد بالائی برای حفاری است. انتخاب نوع TBM، نیروی محوری و طرح پیشانی برشی، عوامل اصلی و حیاتی هستند که مستلزم ارزیابی و بررسی دقیق در ارتباط با نوع سنگ و محیط زمین شناسی ای که ماشین در آن عمل می کند، می باشند. TBM را می توان برای حفر بیشتر شرایط زمین شناختی انتخاب کرد و اطلاعات کافی از عملکرد TBM در انواع سنگها و دیزاینهای اجرائی آنها در انواع سنگها موجودی باشد.

پیشرفتهای قابل توجهی در زمینه حفر چاه با استفاده از پیشانیهای برشی مجهز به برش دهنده های دیسکی و بویژه با ماشینهای حفر چاه Titan در انگلستان که بیشترشان با قطر ۲۴ (۸ متر و بزرگترین آنها با قطر ۲۷/۵ متر حفر شده اند، صورت گرفته است.

فصل هشتم

تأثیر شرایط نامساعد زمین بر تونلسازی

مقدمه

انتخاب ماشین تونلسازی برای حفر در یک شرایط زمین شناسی خاص به میزان زیادی بستگی به این دارد که آن ماشین در انواع سنگهائی که انتظار می رود در طول مسیر تونلسازی وجود داشته باشد، دارای عملکرد رضایت بخشی باشد. اغلب احتمال مواجهه ماشین با شرایط نامساعدی از زمین که از قبل پیش بینی نشده یا تأثیرات آن به طور کامل مرآورد نگردیده است، وجود دارد. در بسیاری از پروژه های تونلسازی بررسیهای دقیق به منظور پی بردن به شرایط نامساعد و یا خطرناک زمین در اطراف یا جلوی تونل برای به کارگیری کنترل مناسب یا تمهیداتی نظیر بهسازی زمین صورت می گیرد.

تأثیر شرایط نامساعد: آشنائی کلی

ماشینهای تونلسازی در مواجهه با شرایط نامساعد زمین عکس العملهای متفاوتی نشان می دهند. آنها ممکن است گیر بیفتند، مدفون شوند یا حتی به طور فیزیکی در طول تونل تحت فشار اعمالی توسط مواد مرطوب جریانی غیر مستحکم به عقب پس زده شوند. با وجود این، برخی از ماشینهای TBM بگونه ای طراحی شده اند که در مواجهه با شرایط جریانی از طریق مستحکم کردن کل تونل با اعمال تمهیدات خاص، بتوانند عمل تونلسازی را به صورت عادی انجام دهند.

شرایط نامساعد می تواند براثر برخورد تونل در حین حفر با سنگهای با مقاومت بالا و ساینده نظیر سنگهای آذرین تصوری، پیش بیاید که از قبل پیش بینی نشده است. این مسئله در صورتی که ماشین تونلسازی قابلیت حفر در این نوع سنگها را با نرخ پیشروی رضایت بخشی نداشته باشد، می تواند موجب بروز مشکلاتی گردد.

جدول ۸-۱ برخی از شرایط نامساعد زمین که پروژه های تونلسازی در خطهای مختلف با آنها روبرو شده است را توضیح می دهد. تأثیر حضور شرایط نامساعد [illegible] و تکنیک ارزیابی و تمهیداتی که برای آنها برعملیات صورت گرفته است.

توضیحاتی نیز در جدول ۸-۱ آورده شده است که ماهیت مشکلاتی که بروز کرده و نیز مشکلاتی که ماشین تونلسازی با آن برخورد نموده است را بیان می دارد. برای مثال در یک مورد

دولرتهای نفوذی با مقاومت فشاری تک محوره برابر ۳۵۰ مگا پاسکال، بر قدرت حفر پیشین در چنین سنگی تأثیر گذاشته و در نتیجه پیشروی آن را کند و هزینه برش دهنده‌ها را افزایش داده است. به طور کلی توجه تأکید بر شرایط زمین شناختی زیر متمرکز شده است که بروز پیشروی تونلسازی را متأثر و کند می نمایند:

۱- مناطق با گسل خوردگیهای کوچک ولی از نظر تعداد زیاد؛
۲- مناطق گسله عریض که با مواد ریزدانه حاصل از فعالیت گسلش و گله سنگها پر شده‌اند؛
۳- مناطق سست و ضعیف دارای پتانسیل ریزش؛ و
۴- مناطق مفشوش و درهم ریخته که دارای ساختارهای ضعیف درزه ای، صفحات لایه بندی شدیداً هوازده و جریانهای آب زیاد هستند.

جدول ۸-۱: خلاصه ای از شرایط نامساعدی که ماشینهای تونلسازی با آن مواجه شده اند

ردیف	نوع ماشین حفر	زمین شناسی	جنبه های خاص (نامساعد) زمین شناختی	پیشروی متوسط متر/شبانه روز	تأخیر در پیشرفت
۱	ماشین حفار بازوئی سبک ۴ متر	گل سنگ و ۳۰٪ ذغالسنگ	۱۵ متر عرض منطقه گسله. جریان کم آب	۱۰۹ متر/هفته	۵۳ ساعت
۲	ماشین حفار بازوئی متوسط ۵ و ۶/۵ متر	ماسه سنگ نرم انرژی ویژه = ۵ MJ/m³	منطقه عریضی از کوارتزیت در ماسه سنگ در نزدیکی یک گسل بزرگ انرژی ویژه = ۱۴ MJ/m³	۴۸	۵۰٪
۳	ماشین حفار بازوئی سنگین ۴ متر	گل سنگ، ماسه سنگ، سیلستون، کوارتزیت کم ضخامت و سنگ آهک	لایه های نازک سنگ آهک در با انرژی ویژه = ۲۹/۱ MJ/m³ کوارتزیت در سقف با انرژی ویژه = ۲۶/۴ MJ/m³	۲۷*	چندین ماه برای نصب و جابجائی مجدد
۴	TBM متوسط وزن ۳/۵ متر	ماسه سنگ متوسط سخت	ماسه سنگ و گل سنگ شیدت درزه دار به طول ۲۳ متر	۱۴۰	۷۶ ساعت
۵	TBM سنگین وزن ۳/۵ متر	سیل دولریتی نفوذی در سنگهای رشوبی	۳۶۰ متر سیل دولریتی محکم با مقاومت فشاری تک محوره ۳۵۰ MPa	۹۰	۶۰٪
۶	TBM سنگین وزن ۳/۵ متر	گل سنگ خالص که در زیر آن سقف روی آن سنگ آهک قرار گرفته است	۱۸ متر طول منطقه پر شده با خاک در سقف که بر اثر انحلال آهک ایجاد شده است	۹۰	۳۴۲ ساعت
۷	TBM متوسط وزن ۳/۵ متر	ماسه سنگ و گل سنگ	۲۰۰ متر منطقه گسله که ۱۵ متر آن رسوبهای گسلی (breccia) همراه با قطعات سنگ و ۱۰ متر آن کاملاً خرد شده بوده است.	۱۲۰	۹۷ ساعت

1-Dobert intrusion 2-gouge 3-boulder
4-sill

به طور کلی طولی از مسیر که ماشین حفاری با چنین شرایط نامساعدی در مقایسه با طول کلی حفر برخورد می کند، کم می باشد. بهرحال، جدول ۸-۱ راهنمای مفیدی برای شناخت انواع خاصی از شرایط نامساعد زمین است که در یک پروژه تونلسازی با آن مواجه می شوند.

شرایط نامساعد زمین شناسی و مشکلات تونلسازی با TBM

شرایط نامساعد زمین ساختی موجب بروز مشکلات متعددی می شوند که عبارتند از: سقوط سنگ و بلوکه شدن[1] در جبهه کار، ریزش سنگ در حوالی گسلها یا دیوارگیرهای حک بهل دهنده، نیاز به تعویض اغلب برش دهنده ها، نیاز به حفر گانه های پیشتاز برای شناسائی آب و گسلها.

جدول ۸-۱ (ادامه): خلاصه ای از شرایط نامساعدی که ماشینهای تونلسازی با آن مواجه می شوند

ردیف	مشکلات تونلسازی در مناطق نامساعد	جنبه های طراحی	پیشنهادات و توضیحات
۱	به طور کلی مشکلات کم بود. نگهداری: قابهای فولادی نصب شد	خسارت اندک به بازوی جلوبر از سقوط قطعات سنگ	ماشین حفار طراحی شده برای بکار در این شرایط
۲	گند شدن برش، استفاده از چاله زنی و آتشباری در مقاطع، ماسه سنگ: ۲۴ m³/h کوارتزیت ۶/۵ m³/h	حساسیت ماشین برای مدل استفاده شده یک مشکل بود. روش خوب موجود برای این وضعیت آتشباری بود	مدلهای جدیدتر قادر به کار در این موقعیتها هستند.
۳	گند شدن برش، فرسودگی بیش از حد ابزاره سنگ آهک: ۲ m³/h، سرعت ۶/۵ m/h. ماسه سنگ: ۵ m³/h، سرعت ۸/۱۰ m/h.	حساسیت ماشین (عدم قابلیت کار با برش سنگهائی با سختی متفاوت) یک مشکل بوده ضربات شدید به سرعتهای مخروطی آسیب می رساند. پس زدن ماشین.	سیستم برش ماشین برای ایستگاه نامناسب بود
۴	به طور کلی مشکلات کم بود: از قابهای فولادی استفاده شد.	سیستم بارگیری قابل اعتماد و روشی آسان برای نصب وسائل نگهداری	TBM طراحی شده مناسب برای کار در این شرایط
۵	گند شدن برش. پیشروی متوسط تا ۳۵ متر در هفته کاهش یافت. هزینه برش دهنده ها بسیار بالا رفت	برش دهنده های دیسکی سه تائی استفاده شد، هرچند برش دهنده های تک دیسکی ممکن بود بهتر باشد.	عملیات برای این حد از سنگ سختی موفقیت آمیز در نظر گرفته شده بود
۶	تأخیرات زیاد که برای بارگیری و نگهداری به دلیل ریزش سقف به وجود آمد.	سپر بلند سقف مانع از نصب وسایل نگهداری موقت شد.	طراحی نامناسب سپر میزان تأثیر را افزود
۷	به طور کلی مشکلات کم بود. از قابهای فولادی استفاده شد. برای تکیه گاه دیوارگیرهای ماشین از ستونهای چوبی استفاده شد.	راه حل مناسب برای نصب قابهای فولادی نزدیکتر به رویت جبهه کار، دیوارگیرهای مطمئن و مناسب تر هستند.	باید TBM های کار بهتری برای کار در این شرایط طراحی شوند

این مشکلات می‌توانند به طور مشخص بر نرخ نفوذ بالقوهٔ TBM[1] که در شرایط ایده‌آل سنگ می‌تواند بیش از ۳۰ متر بر ساعت و ۵۰ متر در روز باشد، تأثیر بگذارند. بویژه در کار با TBM باید توجه کافی به جنبه‌های زمین شناختی زیر مبذول شود:

سنگ سخت مرسانیده[2]: شرایط سنگی بسیار سخت و ساینده فقط می‌توانند به طور حاشیه‌ای بر روش چانزنی و آتشباری تأثیر بگذارند، ولی شدیدت بر فعالیت TBM تأثیرگذار هستند. به دلیل مشکلات حفری که در کار TBM در دایکهای آندزیتی یا بازالتی، دایکهای پگماتیتی، گرانیتها، دولومیتهای سیلیسی، ماسه سنگهای کوارتزیتی و غیره پیش آمده است، برخی از TBM از تونل خارج شده اند و کار با روشهای دیگر دنبال شده است. مشکلات یا کارکرد TBM در چنین شرایطی عبارت است از: نرخهای نفوذ پائین، صرف زیاد وقت برای تعویض برش دهنده‌ها و در نتیجه پائین آمدن زمان دسترسی و در اختیار بودن ماشین، و خسارتهای بالای برش دهنده‌ها.

سنگ بلوکی[3] و تخته ای[4]: این شرایط به جدا شدن تخته سنگها یا بلوکهای سنگی از جبهه کار، سقف یا دیواره های جانبی تونل می‌شوند. سنگهائی که شدیدت درزه دار هستند و هوازدگی یا دگرسانی شیمیائی از خود نشان می‌دهند و سنگهای خرد شده و گسل خورده سست در این دسته بندی قرار می‌گیرند. جهت یا فتگی درزه‌ها و صفحات لایه بندی، وقوع محتملترین سقوطها به داخل تونل را نشان می‌دهند. از جهت یا فتگی درزه‌ها و صفحات لایه بندی می‌توان محتملترین سقوطها را تشخیص داد (ترجمه). از سقوط تخته یا قطعات سنگها از سقف یا دیواره‌های جانبی با استفاده از پیچ سنگها و مهارها[5] یا با وسائل نگهداری فلزی سبک می‌توان بنحو مؤثری جلوگیری کرد، بدون اینکه بر روند پیشرفت تونلسازی تأثیر سوء گذاشته شود. سقوط سنگ می‌تواند پتانسیل متوقف شدن سیستم تجهیز سنگهای خرد شده در جبهه کار تونل را، بویژه وقتی که نیاز به جابجا کردن بلوکهای بزرگ باشد، افزایش دهد.

سنگهای فشاری یا مچاله شونده[6]:

بطور کلی تغییر شکل زمین در اثر مچاله شوندگی و ورقه ای شدن[7] براثر تنشهای اعمالی وقتی اتفاق می‌افتد که میزان تنش ایجاد شده در اطراف تونل براثر حفر آن از مقاومت طبیعی مواد تشکیل دهنده اطراف تونل فراتر رود. هرچند چنین مشکلاتی معمولاً در سنگهای زیر بار اتفاق می‌افتد، رفتار مچاله شوندگی و ورقه ورقه شدن تحت تنش در بسیاری از انواع سنگها و بویژه سنگهائی با کانیهای صفحه‌ای که خرد شده یا شدیدت درزه دار باشند، محتمل است.

1- penetration rate ; 2- abrasive rock ; 3- blocky r. ; 4- slabby r. ; 5- strap ; 6- squeezing r. ; 7- stress-slabbing

در شرایطی که تنشهای بسیار بالا وجود دارد معمولاً چنین مشکلاتی بروز می کند و این شرایط درحالتی که تونل در اعماق زیاد نسبت به سطح حفر شود، مصداق دارد. البته تغییر شکلها و گسیختگیهای استاتیکی مشابهی در شرایطی که بازسنگهای سخت در مناطق نسبتاً کم عمق رویری شوند نیز بروز می کند. مشکلهای رسی، سنگهای دارای کانیهای رسی، فیلیتها و توفهای آتشفشانی معمولاً نسبت به آب آزاد حساس هستند. این امر یعنی درتماس قرارگرفتن آب با سنگهای مذکور می تواند موجب آماس قابل ملاحظه و در نتیجه تشدید مجاله شوندگی زمین و جریان یافتن آن به داخل فضای تونل شود.

شرایط بالقوه فاجعه آفرین: آن شرایطی که بالقوه فاجعه آفرین در نظر گرفته می شوند، تونلهایی هستند که با موقعیتهای زیر روبرو می شوند:

۱- حفرات پرشده با مواد خرد و آواری و اشباع از آب در سنگ آهکها؛

۲- مناطق گسله عریض با مواد ریزدانه رسی و سنگی که تحت فشار شدید آب قرار دارند؛

۳- سنگهای تشدت تحت تنش با قابلیت انفجار خودبخودی وقتی که در جریان حفر امکان بروز تغییر شکل می یابند؛

۴- حفرات کوچک حاوی گازهای غیرسمی تحت فشار که قابلیت انفجار و نفوذ به داخل تونل در جریان حفر را دارند.

تاریخچه عملکرد TBM ها مثالهای متعددی از گیرافتادن یا خراب شدن این ماشینها به مدت چند هفته تا چندین ماه در مناطق گسله با مواد دانه ریز و یا زمینهای فشاری را نشان می دهد. در یک پروژه تونلسازی در گواتمالا که تونلی به قطر ۵/۱۷ متر توسط TBM حفر می شد، TBM در داخل یک حفره ایجاد شده بر اثر انحلال در طول یک صفحه گسلی در سنگ آهک دفن گردید. این امر موجب سرازیر شدن ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب مواد خرد شده به همراه ۳۰ متر مکعب در ثانیه آب به داخل تونل شد. حدود ۲۵۰ متر از تونل پر از جریان یافتن چنین مواد مرطوبی پر و مسدود شد. قبل از وقوع این حادثه، TBM حدود ۷ کیلومتر از تونل را با نرخ پیشروی ۱۲ متر در روز حفر کرده بود. پس از این حادثه حفر تونل متوقف شد ولی بعداً با تخلیه این مواد و حفر مجدد تونل پروژه از سرگرفته شد.

شرایط بالقوه فاجعه آفرین باید در مرحله طراحی تونل پیش بینی و برنامه آنها تعیین شود و تعیین مشخصات و ویژگیهای این شرایط اغلب مستلزم حفر گمانه های پیشتاز در فاصله نزدیک جلوی جبهه کار تونلسازی می باشد. این چنین گمانه هایی، پیشاپیش وجود ماشین یا افراد در آستانه آب حفرات یا گازهای انفجاری را در فاصله این چنین گمانه های پیشتاز مکان استقرار در تونل آشکار ایجاد کند، ولی عمدشان کمک به کاهش احتمال وقوع یک فاجعه بالقوه است.

تخریب تونل : مشخصات کلی - تخریب تونل اغلب به مناطق گسله مربوط می باشد. وقتی یک TBM در داخل یک منطقه عریض گسله که با مواد نرم پر شده است، کار می کند، مواد خرد شده بسهولت توسط ماشین جابجا می شوند یا به حرکت در می آیند. این امر براحتی می تواند موجب تشکیل یک فرورفتگی دودکشی شکل در بالای TBM شود که قابلیت فرورفتگیهای بعدی و گسترده تر در زمینهای سست یا مواد دانه ریز بین صفحات گسل را به همراه دارد که می تواند موجب دفن ماشین تونلسازی شود. این شرایط در صورتی که با وجود آب همراه باشد، که معمولاً هم آب وجود دارد، بدترین حالت ممکن است و خطر دفن ماشین را افزایش می دهد.

مواجهه با شرایط نامساعد زمین - Deere توجه را بر حالت مواجهه یک گمانه پیشتاز با گسلی که دارای شرایط بالقوه فاجعه آفرین است، معطوف داشته است. وی اظهار می دارد اقدام بعدی که باید صورت بگیرد بایستی در راستای تعیین بزرگی و جهتداری منطقه گسله باشد. علاوه بر این فشار آب و شدت جریان مواد خرد شده گسلی باید بررسی و ارزیابی شود. وی همچنین اظهار می دارد که استفاده از گمانه های حفاری به منظور زهکشی و در نتیجه کاهش فشار آب بخشی از کار تونلسازی است.

در جائی که TBM در منطقه گسله گیر بیفتد، حفر یک تونل کوچک در بالای ماشین تونلسازی و در منطقه گسله، یک روش مؤثر برای انجام یک اقدام چاره ساز خواهد بود. پر کردن این تونل با بتن مسلح، فرصتی برای عمل حفر که بعد از آن با عریض کردن در هر دو سمت دیواره تونل انجام می شود، فراهم می آورد. پس از آن می توان اقدام به ساختن یک سازهٔ قوسی شکل از طریق تاق زدن بر روی دیواره های سنگی محکمتر در هر دو طرف گسل نمود. هیچ راه حل و روش سریعی برای بیرون کشیدن ماشینی که در زمینهای فشاری یا مجاله شونده در منطقهٔ گسلی حاوی مواد دانه ریز گیر افتاده یا دفن شده است، وجود ندارد. با این وجود، آنچه مهم است انجام تمهیدات مناسبی است که امکان آزاد شدن ماشین و آماده شدن آن برای حفر در زیر منطقه گسله را فراهم آورد. این امر مستلزم بازیابی و نگهداری مؤثر بالا و اطراف ماشین است. به طور طبیعی چنین اقدام چاره سازی، حفر و استخراج دستی زیاد و پیش بینی و تهیه تمهیدات نگهداری خاصی را می طلبد. این یک کار تخصصی است و نقشی حیاتی در اطمینان یافتن از دوباره برجا افتادن عملیات تونلسازی و از سرگرفته شدن حفر عادی در یک زمان حتی الامکان کوتاه ایفا می نماید.

[illegible]

امکان مواجهه ماشین تونلسازی با شرایط نامساعد زمین، که مغایر آنچه در جدول ۱-۱ آمده است، به میزان گسترده ای متفاوت هست. وجود دارد. این شرایط اثرات گوناگون و متعددی بر عملکرد ماشین می گذارند که به ماهیت جبهه ها و ویژگیهای زمین شناختی بستگی دارد. اطلاعات مندرج در جدول ۱-۲ نو

McFeat_Smith گرد آوری شده است. وی اظهار داشته است که تشخیص شرایط نامساعد قابل انتظار زمین در انتخاب مناسبترین ماشین تونلسازی کمک خواهد کرد.

تأثیرات و تبعات زمین شناختی، مندرج در جدول ۸-۲ را می توان در بیشتر موارد مدنظر قرارداد و برای کاهش این تأثیرات سود چنین شرایطی بر حفر تونل، اقدامات مقتضی اتخاذ نمود. هدف اصلی از جنبه های طراحی خاص پیشنهادی که در ارتباط با این شرایط خاص زمین شناختی باید در نظر گرفته شود این است که امکان فعالیت و کار ماشین تونلسازی با حداقل تأخیر فراهم گردد.

شرایط نامساعد زمین در موقعیتهای متعدد، می توان از طریق نگهداری مناسب و تمهیدات کنترلی زمین شناختی، کنترل نمود.

اظهارات و نتیجه گیری نهائی

تجارب کار با ماشینهای تونلسازی قدیمی در موارد متعدد، حاکی از عدم توانائی این ماشینها در مقابله با شرایط زمین در موقعیتهای مختلف می باشد.

بهرحال، ماشینهای جدید تونلسازی دارای انعطاف پذیری بیشتر و قابلیتهای برش بالاتر هستند که این دو، سرعتهای بالاتر حفر تونل را موجب شده است.

دسترسی به توان عملیاتی بالاتر ماشینهای تونلسازی و افزایش سرعت حفر، مستلزم ~~آینده نگری و پیشگوئی دقیق~~ طراحی دقیق ماشین برمبنای اطلاعات زمین شناختی و تونلسازی است.

شرایط نامساعد زمین در صورتی که بخوبی شناخته شوند، بنحو مقتضی پیش بینی گردند و در هر یک از طراحی و برنامه ریزی پروژه تونلسازی تدابیر مناسب ملحوظ شوند، اثرات مخربی بر پیشروی تونلسازی نخواهند گذاشت.

جدول ۸-۲: جنبه های نامساعد زمین شناختی خاص و اثرات آنها بر عملکرد ماشین تونلسازی

(الف) اثر شرایط زمین بر طراحی و عملکرد TBM

جنبه های زمین شناختی	اثر بر بهره وری از ماشین	انتخاب ماشین
۱- مواد دانه ریز بدون گسل، کاملاً هوازده	seatearth، بهره وری پائین در عملیات نگهداری، بارگیری و [illegible] ماشین	طراحی ماشین امکان دسترسی آسان برای نصب وسائل نگهداری و بارگیری در نزدیکی جبهه کار تونل را فراهم می آورد.
۲- درزه دار و خرد شکل شدید	تأثیر مشابه فوق است، ولی تأخیرات بر طرق اساسی مربوط به نگهداری می باشد. [illegible]	یک حفار ماهر و با تجربه از مشکلات مربوط به راندن یا پیش بردن ماشین خط تصور کاست.

ادامه جدول ۸-۲

۳- ناپیوستگیهای موازی	در صورت مشکل نگهداری، راندن یا پیش بردن ماشین شاید یک مشکل باشد. ترتیب قرار گیری وسایل نگهداری از اهمیت برخوردار است.	مانند ردیف ۲. ماشینهای دارای یک سری کفشک دیوارگیر ارجح است.
۴- شدت جریان شدید آب با شدت بالای $30\ m^3/hr$ در یک منطقهٔ کوچک	ایجاد تأخیر برای پیشرفت نگهداری، بارگیری، ریل گذاری و بیرون کشیدن گل و لای تونل	ضد آب کردن یا درزگیری کردن تجهیزات برقی و پمپهای بزرگ؛ ایجاد گمانه‌ها یا فضاهای پیشتاز.
۵- سنگ ساینده و سخت	کنترل نمودن نرخ نفوذ ماشین و خرج برش دهنده‌ها. پیش بینی‌های دقیق از اهمیت برخوردار است.	طراحی پیشانی برشی ماشین مهم است. برش دهنده‌های تک دیسکی ارجحیت دارد.
۶- شرایط جبهه کار مختلط و سختیهای متغیر	سایش و فرسودگی برش دهنده‌ها را با بستی معادل سخت ترین سنگ تمام مقطع در نظر گرفت	ماشین باید توانائی برش سخت ترین سنگ را داشته باشد. برش دهنده‌های غیر کاربیدی ارجح است. اضافه شدن مناسب تجهیزات نگهداری.
۷- شرایط جبهه کار مختلط و سختیهای متغیر البته باشدتی کمتر از ردیف ۶ ولی شامل درزه و غیره	مناطق اصلی بیشتری را باید نگهداری کرد و بارگیری و هلو بردن ماشین کندتر است	این عوامل موجب انتخاب ماشین مخصوص شرایط ضعیف زمین می شود. دسترسی خوب از عوامل کلیدی طراحی ماشین است.

(ب) تأثیر شرایط زمین بر طراحی و عملکرد ماشینهای حفار باز و قی

۱- مواد دانه ریز بین گسلی، کاملاً هوازده	تأخیرهای اصلی در نگهداری و بارگیری به وقوع می پیوندد. ریل گذاری در زمینهای نرم می تواند مشکل باشد.	ماشین باید نحوی باشرایط تونلسازی در زمینهای نرم یا خرد شده انطباق داشته باشد و راه دسترسی خوب برای پیشبرد کارها و عملیات موجود باشد. انتخاب ماشینی که کارآئی خود را در چنین شرایطی اثبات کرده باشد، بشدت مناسب و مطلوب است.
۲- به شدت خرد شده و درزه دار	〃	
۳- شدت جریان بالای آب با شدتی بیش از $2000\ m^3/hr$	مشابه تأثیرات بر TBM. ریل گذاری ممکن است مشکل باشد.	مشابه TBM. استفاده از ماشینی که یک دستگاه حفاری روی آن نصب شده

۵ - سنگ ساینده وسختی	. این مسئله اصلی در انتخاب ماشین حفار بازوئی است. پیشگوئی یا پیش بینی اگر نگوئیم عامل حیاتی ولی بشدت مهم و الزامی است.	. آزمایشهای خاص برشی سنگ و میزان زیادی از خطر عدم اطمینان در رابطه با برش می کاهد.
۶ - شرایط جبهه کار مختلط و سختیهای متغیر	لرزش شدید ماشینهای انعطاف پذیرتر[1] موجب فرسودگی سریع اجزای ماشین می شود.	انتخاب ماشینهای انعطاف ناپذیرتر (سنگین) دارای تاج برشی سنگین[2] و سرمته های مخروطی[3] توصیه می شود.
۷ - شرایط مشابه هموار ولی ناهمواری کمتر	موارد اصلی که باید مد نظر و توجه قرار گیرند عبارتند از نگهداری، تعمیرات برقی و مکانیکی و بارگیری.	مشابه TBM. نکته کلیدی در کار برد موفقیت آمیز ماشین، پیشگوئی یا پیش بینی دقیق عملکرد برشی می باشد.

تذکرات :

خصوصیات یا ویژگیهای زمین شناختی :

۱ - میزان رطوبت، اندازهٔ فیزیکی و شکل هندسی مواد از اهمیت برخوردارند.

۲ - شرایط برای فاصله داری کمتر از ۰/۵ متر و درزه های بدون چسبندگی فرض شده است.

۳ - تشکیل گوه های نازک در دیواره های تونل نیز بطور خاص در این شرایط مد نظر قرار گیرند.

۴ - وقوع هرگونه هجوم شدید آب در فواصل نسبتاً کوتاه در نظر گرفته می شود.

۵ - این شرایط سنگهای با مقاومت بالا و سختی مربوط به آن و ساینده گی بالا را در بر می گیرد.

۶ - در این شرایط تغییرات غیر عادی در سختی نظیر وجود نودولها[4] و بافتهای سخت و غیره در نظر گرفته می شوند.

۷ - در این شرایط تغییرات با شدت کمتر در تناوب درزه، میزان باز شدگی درزه، میزان انحراف و زبری درزه ها، مشخصه های لایه بندی، هوازدگی، هجوم آب و تغییرات مقاومت ملحوظ می شود.

1 - less rigid machine ; 2 - heavy duty cutter head ;
3 - point attack pick ; 4 - nodules

فصل نهم

بهسازی زمین در تونلسازی

مقدمه

بهسازی زمین[1] با هدف دستیابی به شرایط مناسبی از زمین صورت می‌گیرد که امکان حفر و پیشروی ایمن، بدون وجود تأخیرهای زیاد و همراه با میزان قابل قبولی از کنترل جریان آب و مواد خرد و ریزش سنگ مرتبط با آن به داخل تونل در تونلسازی را میسر سازد.

بهسازی زمین برای عملیات تونلسازی به طور کلی به یک یا چند روش از روشهای زیر صورت می‌گیرد: پائین آوردن سطح آب زمین از طریق زهکشی[2] کنترل شده؛ آبکشی کردن[3] از یک مجرای آب زیرزمینی یا خشک اندازی در مجاورت تونل؛ جلوگیری از جریان یافتن آب به داخل تونل توسط هوای فشرده؛ و پایدارسازی زمین از طریق تزریق دوغاب[4] یا انجماد[5].

بسیاری از پروژه‌های تونلسازی به طور کلی به شکلی از فرآیند بهسازی زمین در جریان حفر نیازمندی باشند. این بهسازی ممکن است بسیار موضعی و در حد معدودی بهم ریختگی زمین شناختی باشد یا این که بهسازی برای تغییرات عمده در شرایط آب زمین شناختی باشد. در برخی موقعیتها مانند وقتی که تونلسازی در سنگهای آهکی قابل انحلال توسط آب، چاک یا تشکیلات ماسه سنگی بشدت متخلخل انجام می‌گیرد به میزان گسترده‌ای از بهسازی یا به کارگیری شیوه‌های خاصی از بهسازی زمین نیاز می‌باشد.

کنترل زمین: کلیات

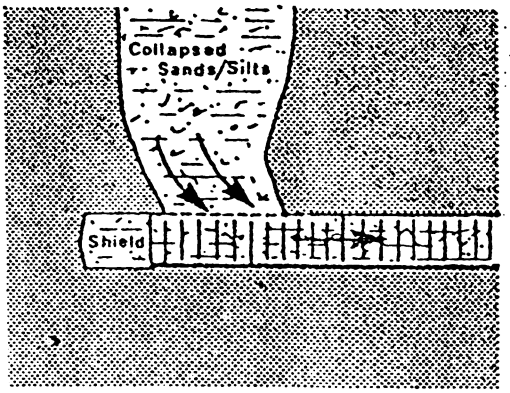
اهمیت کنترل آب زمین در تونلسازی - Bauer اظهار می‌دارد که احتمالاً مهمترین عامل در موفقیت یا عدم موفقیت یک پروژه تونلسازی، کنترل مناسب آب زیرزمینی است. در سوابق کارهای تونلسازی موارد متعددی وجود دارد که هزینه‌های بسیار زیاد و تأخیرهای فوق العاده‌ای در جریان احداث به دلیل عدم پیش بینی مشکل جریان آب یا عدم بکارگیری تمهیدات و تکنیکهای کافی و مناسب برای کنترل آب زمین پرداخت شده یا به وقوع پیوسته است. این نکته حائز اهمیت است که کنترل آب زمین بایستی از اولین مراحل طراحی یک پروژه تونلسازی مدنظر قرار گیرد تا امکان بکارگیری تمهیدات مقتضی را فراهم آورد.

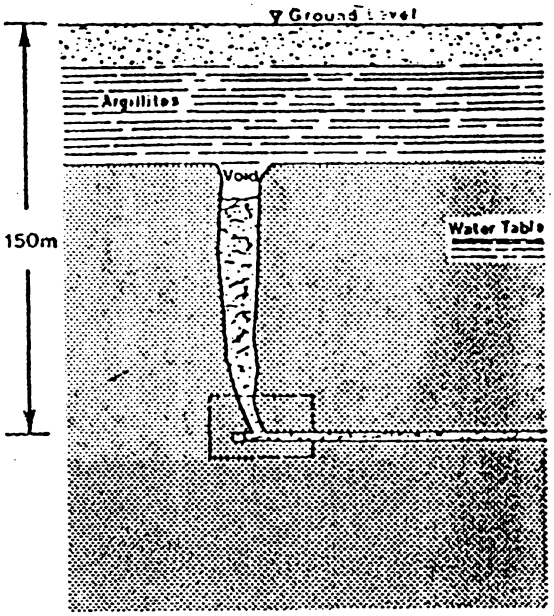
خاکهای ضعیف فاقد چسبندگی و مشکلات ناپایداری و آب - مشکل دیگری که در بسیاری از عملیات تونلسازی بروز می‌کند، احداث تونل در خاکهای سست فاقد چسبندگی نظیر شن و ماسه یا سنگهای بشدت درزه دار آب داری می‌باشد که زمان ایستائی بسیار کوتاهی دارند. چنین شرایطی از زمین نمی‌تواند موجب

1-ground Treatment و 2-drainage و 3-dewatering و 4-grouting و 5-freezing

بروز مشکلاتی در نصب وسائل نگهداری بدور از جبهه کار تونل در تونلهائی که پوشش آن به روش سنتی صورت می‌گیرد، یا بروز مشکلاتی در حفر در ارتباط با پایداری جبهه هم در روشهای حفر سنتی و هم سپری می‌شود.

علاوه بر این، مشکلاتی در رابطه با پایداری در ازمدت تونلی که در چنین زمینهائی حفری شود، می‌تواند بروز کند که ناشی از بار ثقلی اعمالی زیاد بر وسائل نگهداری تونل تحت تأثیر مواد خرد شدهٔ بالای تاج تونل می‌باشد. بعنوان مثالی در مورد مشکل ناشی از بار ثقلی اعمالی زیاد می‌توان به تونل Agri Sauro در نزدیکی شهر Potenza در ایتالیا اشاره کرد که ۶۰۰۰ متر مکعب مصالح سیلتی - ماسه‌ای شل به داخل تونل جریان یافت. این امر در ارتباط با گسیختگی عظیم در پوشش قطعات پیش ساختهٔ بتنی تونل به وقوع پیوست. شکل ۹-۱، جزئیات این رانش را به تصویر کشیده است. تمهیدات به کار گرفته شده و اقدامات صورت گرفته شامل بیرون بردن و انتقال مواد و مصالح و ایمن سازی تونل در برابر رانشهای بعدی بود. پس از این رانش هزینه‌های بسیار زیاد و تأخیرهای فوق‌العاده‌ای در جریان احداث بر مجری طرح تحمیل گردید.





شکل ۹-۱:
تصویری شماتیک از چگونگی تخریب و رانش صورت گرفته در تونل Agri Sauro

روشهای بهسازی زمین - روشهای مختلفی برای بهسازی زمین وجود دارد که کنترل آب زمین را تسهیل می‌کند و یا بهبود زمین را میسر می‌نماید، این روشها عبارتند از:

۱- آبکشی با استفاده از چاههای حفر شده
۲- الکترو اسمز[1]
۳- تزریق دوغاب
۴- انجماد زمین

استفاده از هوای فشردهٔ کم فشار: در موقعیتهائی خاص ممکن است امکان حذف کامل مشکل زمین وجود نداشته باشد یا این که نیازی به برطرف کردن کامل مشکل نباشد. در چنین شرایطی برای بهسازی زمین، از هوای فشردهٔ کم فشار در جبههٔ کار تونل استفاده می‌شود. این تکنیک توسط Nave برای مواردی که

1- electro-osmosis

جبهه کار تونل شامل سیلت و شن دانه‌ای بدون سیمان باشد، استفاده می‌گردد. در این موارد برای محکم کردن شن و کاستن از افت هوای فشرده توسط زمین، مخلوطی از سیمان و بنتونیت تزریق می‌شود که این کار تا بیش از ۸۰ درصد از افت هوای فشرده را می‌کاهد. این کاهش در افت بالقوهٔ هوا، امکان نصب و استفاده از یک کمپرسور با فشار پایین‌تر را میسر می‌سازد که قادر است هوای فشردهٔ کافی را برای جلوگیری از همریان یافتن سیلت و آب به داخل تونل تولید کند. بدین طریق و با کاهش ماشروماتها و تجهیزات هوای فشرده برای عملیات تونلسازی، می‌توان صرفه‌جوئی قابل ملاحظه‌ای در هزینهٔ سرمایه‌ای بالای عملیات انجام داد.

مزیت دیگر حاصل از کاهش میزان فشار هوای فشردهٔ لازم در جبهه کار، به سلامتی افرادی که در تونل کار می‌کنند، مربوط است. افرادی که در هوای فشردهٔ با فشار بیش از ۲ bar کار می‌کنند دچار تهوع و بیماری هوای فشرده می‌شوند. در حدود سال ۱۹۶۰ مشخص شد که کار مداوم تحت چنین شرایطی، احتمال مرگ بافتهای زنده را افزایش می‌دهد. استفاده از بهسازی زمین در ارتباط با هوای فشردهٔ کم فشار با فشار زیر 1 bar علاوه بر صرفه‌جوئی در هزینه، مزایای دیگری نیز در بر دارد.

شیوه‌های مطالعه و بررسی ـ انتخاب روش بهسازی زمین مانند سایر جنبه‌های تونلسازی نظیر طراحی نگهداری، انتخاب ماشین حفر و غیره، بر نتایج حاصل از مطالعه ساختگاه و آزمایشهای انجام شده در شرایط زیر سطح زمین، استوار می‌باشد. Bauer اظهار می‌دارد که تعیین و انتخاب روش بهینه برای کنترل آب زمین از جنبهٔ اقتصادی، به میزان زیادی به آب‌شناسی (هیدروژئولوژی) اساس ساختگاه، ساختار زمین‌شناسی، دسترسی به سیستم مورد نیاز، تجربه کار با آن سیستم خاص و در نهایت به هزینه‌های اجرائی بستگی دارد. وی در مطالعه و بررسی ساختگاه، از نقطه نظر روشهای بهسازی زمین، توجه را بر شیوه‌ها و مراحل زیر معطوف داشته است.

مطالعات و بررسیهای اولیه ـ مطالعات و بررسیهای اولیه صحرائی می‌تواند شامل حفریاتی با فواصل بسیار زیاد از هم و مطالعه نوشتجات و نقشه‌های موجود و سوابق زمین‌شناسی محل، شرایط خاک و خصوصیات آب زیرزمینی و نوسانات فصلی آن و سنگ بستر (در صورت شناخته بودن) باشد. علاوه بر اینها هر گونه آثار عمده‌ای که محتمل است بر اثر آبهای زیرزمینی تحت تأثیر هرگونه دگرسانی قرار گیرد، باید شناسائی شود.

مطالعات و بررسیهای زیر سطح زمین ـ از نتایج حاصل از یک مطالعه مقدماتی، می‌توان به برنامه‌ای برای مطالعات و بررسیهای زیر سطحی اشاره کرد که می‌تواند شامل حفر گمانه‌هائی تا عمق حداقل ۱۵ متر زیر افقی که قرار است تونل در آن حفر شود، باشد. این برنامه باید نمونه برداری مستقل و سنگی و مغزه‌گیری پیوسته برای تعیین خصوصیات فیزیکی با استفاده از آزمایشهای برجا و نمونه‌های آزمایشگاهی را نیز در بر گیرد. مخلوطهای دانه‌بندی

سیلتها، شنها و ماسه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند. مطالعه و بررسی آبها در گمانه های حفر شده می تواند برای تعیین سطوح آب، نوسانات و شیب آبهای زیرزمینی آن محل مورد استفاده قرار گیرند.

مطالعه و بررسی آبهای زمین - برای تعیین خصوصیات شیمیائی و کیفی آب، باید نمونه هائی از آب گرفته شوند. وجود آب منفذی یا آب آزاد در بالای افقهای ناتراوا و بدون تخلخل در عملیات تونلسازی بسیار مهم است و باید کاملاً شناسائی و مشخص شوند. در صورت وجود چنین آبهائی، باید با استفاده از پیزومتر، سطح آب زیرزمینی را تعیین کرد. در نهایت، با انجام آزمایشهای پمپاژ در خلاف و آزمایش packer در سنگ با استفاده از گمانه های باز، می توان نفوذپذیری افقهای مختلف زمین شناسی را تعیین کرد.

نتایج چنین مطالعاتی، ماهیت و سختی مشکل کنترل آب و محلول احتمالی قابل کاربرد برای بهسازی زمین را نشان می دهد. در شرایط سختی که احتمال می رود کنترل آب بنحو قابل ملاحظه ای مشکل باشد، ممکن است انجام آزمایشهای پمپاژ در مقیاس بزرگ، تجزیه و تحلیلهای محیطی یا حتی آزمایشهای کامل ضروری باشند.

مشخصات دانه بندی خاک و بهسازی زمین - شکل ۹-۲ ارتباط بین مشخصه دانه بندی خاکها (اندازه مؤثر دانه) و مناسبترین روش بهسازی زمین را به تصویر کشیده است. Neare اظهار می دارد که در این شکل به سه دلیل زیر ساده سازی بیش از حد صورت گرفته است:

۱- سیمه کار تونل و زمین فراگیر تونل اغلب از بیش از یک نوع خاک تشکیل می شود که این امر موجب تغییر ملزومات بهسازی زمین می گردد.

۲- مشخصات دانه بندی یک خاک تنها ویژگی مؤثر بر بهسازی مواد زمین نیست.

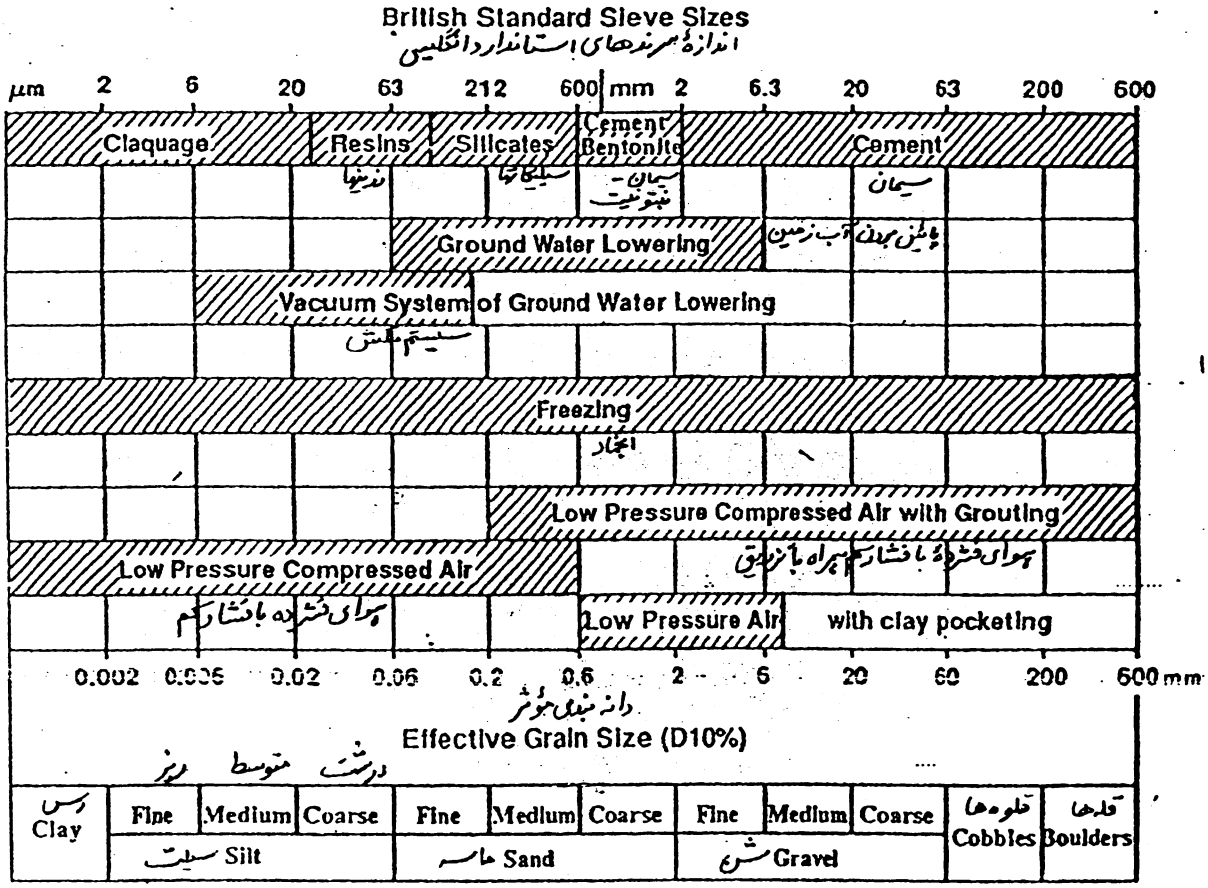
۳- فشار آب و اثر طول تونل بر انتخاب روش بهسازی تأثیر دارد.

آبزدائی یا خشک اندازی زمین

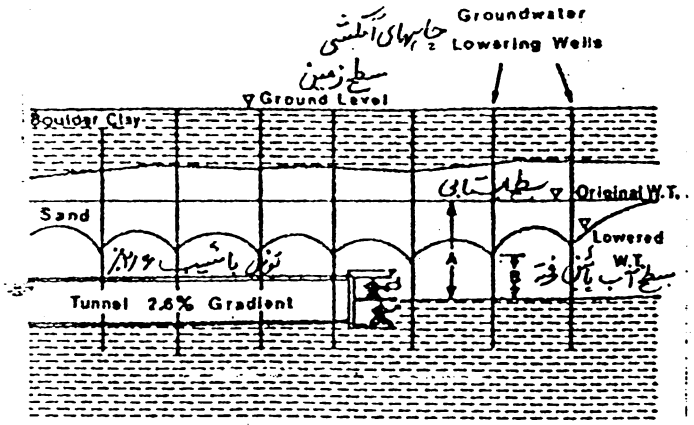
عملیات پایه: خشک اندازی یا آبزدائی یا زهکشی اولیه زمین قبل از شروع عملیات تونلسازی یکی از پرکاربردترین و احتمالاً اقتصادی ترین روشهای کنترل آب است. این روش به طور کلی بر حفر تعدادی چاه در جوانب خط سیر تونل مورد نظر و پائین آوردن سطح ایستابی از طریق پمپاژ آب زیرزمینی توسط چاههای سطحی یا شناور استوار می باشد. نتیجه نهائی چنین فرآیندی کاهش یا حذف فشار آب عمل کننده بر اطراف تونل است. این روش به عنوان «فرآیند کاهش فشار»[1] یا «آبکشی»[2] شناخته شده است (به شکل ۹-۳ مراجعه شود).

همانگونه که قبل از این گفته شده، خشک اندازی یا آبزدائی زمین که به آبکشی نیز معروف است، اغلب با روشهای دیگر کنترل زمین نظیر هوادهی یا هوای فشرده کم فشار همراه است. در حقیقت، آبکشی فقط

1- pressure reducing process; 2- drawdown process or well pointing



شکل ۹-۲ : محدودهٔ کاربرد روشهای بهسازی زمین مورد استفاده در تونلسازی



شکل ۹-۳ : مبنای فرآیند کاهش فشار :

A - ارتفاع کلی معادل فشار آب

B - ارتفاع کاهش یافتهٔ معادل فشار آب

به عنوان یک روش اختصاری کنترل آب زمین در حفریات بسیار کم عمق یا در موقعیتهائی که ارتفاع معادل فشار آب پائین است، مطرح می باشد.

آبکشی ها - ملاحظات اولیه‌ای که در حفر و ایجاد چاههای آبکشی باید مدنظر قرار گیرند عبارتند از :

۱- فاصله چاهها از یکدیگر، عمق چاهها و ظرفیت برآیند پمپ مورد نیاز

۲- استفاده از پمپهای سطحی و شناور

۳- انتقال مواد دانه ریز توسط پمپها

۴- نشست خاک و احتمال وارد آمدن خسارت به سازه‌های نزدیک به چاه

۵- رفتار و نحوهٔ نوسانات و پائین رفتن سطح استاتیکی

۶- تغییر نفوذپذیری زمین

عمق تونل، ارتفاع معادل فشار آبی که باید کاهش یابد و نفوذپذیری زمین، ظرفیت پمپ مورد نیاز را تعیین خواهد کرد و این امر بر نوع پمپ مورد استفاده یعنی سطحی یا شناور تأثیر خواهد گذاشت. محدودیت استفاده از پمپهای سطحی در مقایسه با پمپهای شناور به احتمال ارتفاع مکش پائین آن مربوط می شود. با وجود این، استفاده از پمپهای شناور به میزان زیادی تحت تأثیر هزینه های پمپاژ در ارتباط با هزینه بالای سرمایه گذاری آنها قرار دارد.

پمپاژ با آبکشی سطحی - از پمپاژ سطحی معمولاً باعنوان استفاده از "چاههای خلاء"[1] نام برده می شود. گمانه ها یا چاهها به دلیل محدودیت پمپهای سطحی در ارتباط با ظرفیت پمپاژشان نزدیک به هم حفر می شوند. این پمپها در زمینهای با خاکهای شن و ماسه ای که فقط آبکشی تا اعماق کم یعنی حدود ۵ تا ۶ متری از سطح زمین مورد نیاز است، با راندمان بالا عمل می کنند. در نتیجه، پمپاژ سطحی معمولاً برای تونلسازی می تواند با روش "کند و پوشش"[2] مناسب است که در مقایسه با تونلسازی عمیق از چندین حلقه چاه استفاده نمود.

چاههای عمیق - استفاده از پمپها یا تلمبه های شناور در چاههای عمیق که به فاصله زیادی از یکدیگر حفر می شوند، در مقایسه با تلمبه های سطحی امکان آبکشی از اعماق بیشتر را میسر می سازند. این نوع آبکشی برای شرایط سنگی خرد شده یا درزه دار همانند خاکهای شن و ماسه ای مناسب است. تلمبه های شناور معمولاً برای آبکشی در عملیات تونلسازی سنتی که عمق عملیات زیاد است، استفاده می شود.

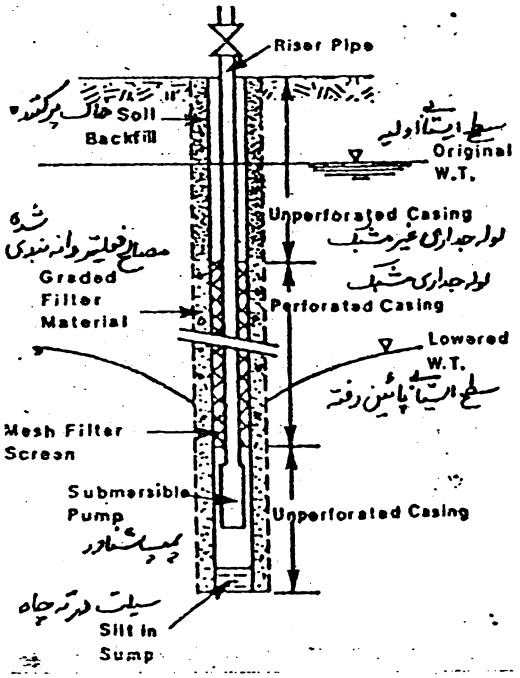
در شکل ۹-۴ یک چاه عمیق تجهیز شده، به تصویر کشیده شده است. میزان و مقدار آبکشی را می توان به نحو مؤثری از طریق انتخاب اندازهٔ تلمبه و تعداد چاههائی که در طول مسیر تونل حفر می شوند، کنترل نمود. نوع زمین می تواند موجب بروز مشکلاتی در امر پمپاژ به واسطهٔ وجود مقدار زیادی مواد دانه ریز در آب زیرزمینی شود. همان طور که در شکل ۹-۴ مشاهده می شود بخشی از طول چاه توسط لوله های مشبکی[3] که اطراف آن را فیلتر ماسه ای مناسبی فرا گرفته، لوله گذاری شده است ولی با این وجود، این فیلتر ممکن است برای جلوگیری از ورود مواد دانه ریز به داخل چاه، بدون ایجاد محدودیت در جریان آب، کفایت نکند. در نتیجه تلمبه های مورد استفاده باید نوعی باشند که علاوه بر توانائی انتقال چنین مواد دانه ریزی با سایندگی متوسط، دارای ظرفیت پمپاژ کافی برای تلمبه برجگاری افزایش یافتهٔ ناشی از وجود مواد دانه ریز معلق باشند.

تأثیرات آبکشی - وقتی آبکشی و پمپاژ صورت گرفته، باید تأثیرات پائین آمدن سطح ایستابی بر سازه ها را علاوه بر تأثیر بر [illegible]

1- Vacuum wells ; 2- cut and cover ; 3- perforated casing

خصوصیات جریان آب را

است براثر خشک شدن سهوی فرو برزند و برخی از انواع ماسه ها می توانند براثر خشک شدن افزایش یابند. نتیجهٔ نشستهای جزئی بر پی ساختمانها می تواند موجب وارد آمدن خسارت بر سازه های نزدیک به منطقهٔ نشست گردد. چنین تأثیراتی در بخشهای قدیمی بعضی از شهرها می تواند بسیار مهم باشد، برای مثال در شهر آمستردام که سطح ایستابی فقط در ۱ تا ۲ متر زیر سطح زمین قرار دارد، براثر پائین آوردن سطح ایستابی، قسمتهائی از ساختمانهای چوبی که تحت تأثیر این شرایط قرار می گیرند یا تحت تأثیر نشستهای موضعی و اثرات اصطکاکی منفی و یا آمادگی برای پوسیدن واقع می شوند. یک راه حل موضعی استفاده از گمانه های پرآبی است که بین تونل و ساختمانی که تحت تأثیر آبکشی واقع شده، حفر می شود و آب در آن به جریان می افتد، در نتیجه این کار ظرفیت نگهداری پی مربوط به آب زمین را با پائین کردن منفی تغییرات سطح ایستابی حفظ می کند.



شکل ۹-۳ : یک چاه عمیق تجهیز شده

سطوح ایستابی معلق - واژه سطح ایستابی معلق[1] به وضعیت آب زمین واقع در بالای یک افق نا تراوا اطلاق می شود. مسئلهٔ سطح ایستابی معلق بندرت توجه خاص می باشد، حتی اگر یک برنامهٔ آبکشی فشرده نیز ترتیب داده شده باشد، سطح ایستابی و وضعیت آن می تواند مشکلاتی برای پروژه تونلسازی به بار آورد. روش استاندارد برای مواجه با سطوح ایستابی گرافتاده این است که با حفاری در میان چینه نا تراوا امکان کشیدن آب محبوس را فراهم آورد.

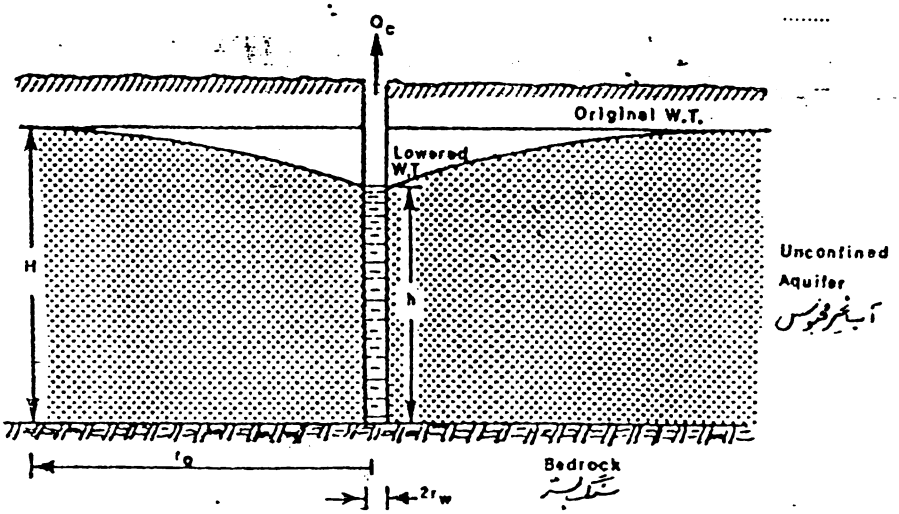
نفوذپذیری متنوع - توجه خاصی باید به تغییر نفوذپذیری موضعی زمین مبذول شود، زیرا این عامل می تواند بر منحنی پائین آمدن سطح ایستابی تأثیر بگذارد. ضروری است که در این موارد مطالعات ساختگاهی کافی برای جمع آوری اطلاعات مربوط به نفوذپذیری در تمام منطقه به عمل آید بنحوی که بتوان منحنی تغییرات سطح ایستابی را به دقت پیش بینی کرد و با استفاده از تعیین فاصله چاهها از یکدیگر و ظرفیت پمپاژ به طور دقیق به آن رسید.

آبکشی از قعر - در جاهائی که با آبکشی از سطح زمین نتوان ارتفاع معادل فشار آب را به طور کامل پائین [illegible] ولی عملی

1- perched water table

است موجب بروز مشکلاتی در پایداری جبهه کار در ارتباط با وجود فشار تراوش گردد. به طور کلی، آبکشی از تونل فقط به عنوان یک روش آبکشی ثانویه برای کنترل شدت جریانهای کم به کار می رود و نه به عنوان یک سیستم آبکشی اولیه از سطح زمین

بررسی میزان پائین آمدن سطح ایستابی - برای پیش بینی میزان آبی که از چاهها برای رسیدن به یک سطح ایستابی مشخص از آبهای محبوس یا غیر محبوس باید پمپاژ شود، وجود دارد. بیشتر این نوع معادلات از معادله استاندارد Theim استخراج شده اند. در شکل ۹-۵ متغیرهای مورد استفاده برای پیش بینی ظرفیت پمپاژ مورد نیاز و آنهائی که در معادلات ۹-۱ و ۹-۲ به کار برده می شوند، نشان داده شده است.



شکل ۹-۵ : جریان شعاعی در یک حوزه آبی غیر محبوس. منحنی تغییرات سطح ایستابی در نزدیکی یک چاه نشان داده شده است.

برای آب محبوس :

$$Q_c = 2\pi kb(H-h) / 2{,}3 \log(r_o/r_w) \qquad (1-9)$$

برای شرایط آب غیر محبوس :

$$Q_u = \pi k(H^2-h^2) / 2{,}3 \log(r_o/r_w) \qquad (2-9)$$

Q_c = شدت جریان تخلیه از چاه (آب محبوس)

Q_u = شدت جریان تخلیه از چاه (آب غیر محبوس)

k = ضریب نفوذ پذیری

b = عرض یا ضخامت حوزه آب یا سیال

H = ارتفاع آب بالای تونل

h = ارتفاع آب از بالای تونل در حد اکثر فشار پائین آمدن سطح ایستابی در چاه

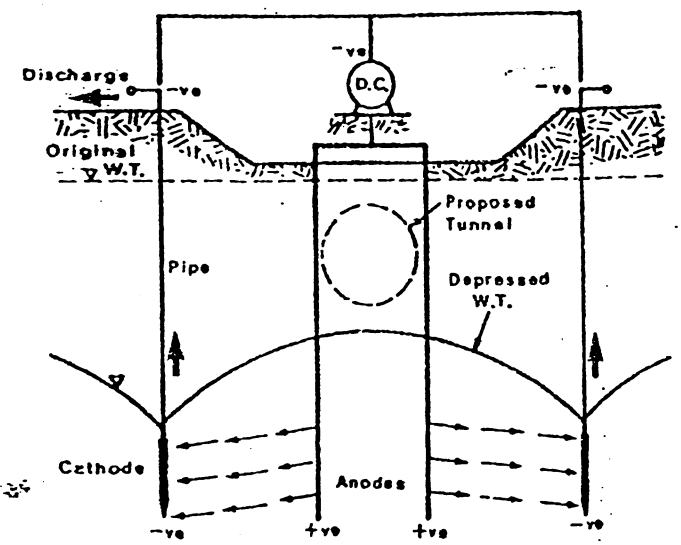
r_o = شعاع منطقه ای که بر اثر پمپاژ سطح آب در آن پائین آمده است

r_w = شعاع چاه

نظریه فوق توسط Atterell و دیگران در ارتباط با اندک بودن شرایط ایده آل زمین تئوریکی فرض شده در معادلات ۹-۱ و ۹-۲ برای به کارگیری عملی ارائه شده است و در نتیجه باید در به کارگیری شرایط واقعی زمین در این معادلات دقت کافی مبذول شود. در پائین آوردن سطح آب زیرزمینی باید از راهنمائی و نظرات متخصصین آبهای زیرزمینی به عنوان بخشی از برنامه آنالیزی در یک پروژه تونلسازی نهایت استفاده را به عمل آورد.

الکترو اسمز (۱)

روش الکترو اسمز یکی از روشهای خشک اندازی است که برای پایدارسازی در رسها و سیلتهای نرم کاربرد سایر روشهای خشک اندازی با مشکل مواجه است، به کار می رود. این روش بر مبنای الکترولیز (۲) استوار است که در آن دو الکترود در زمین با شیب و شدت جریان مستقیم بین آن دو برقرار می شود. به واسطه فرآیندهای شیمیائی الکترولیز، مولکولهای آب از جائی که می توانند به سهولت جذب کاتد (الکترود منفی) می شوند. مبانی کلی الکترو اسمز در شکل ۹-۶ نشان داده شده است.



شکل ۹-۶ : شمائی از مبانی کلی روش الکترو اسمز برای خشک اندازی

الکترو اسمز روشی نسبتاً پرهزینه و با تجهیزات زیاد است که از جنبه کاربری برای سازه های تونلی رو باز مناسبتر از فضاهای زیرزمینی است.

گزارشی در مورد کاربرد روش الکترو اسمز در ارتباط با احداث سازه های زیرزمینی مشاهده نشده است.

تزریق دوغاب

مبانی تزریق

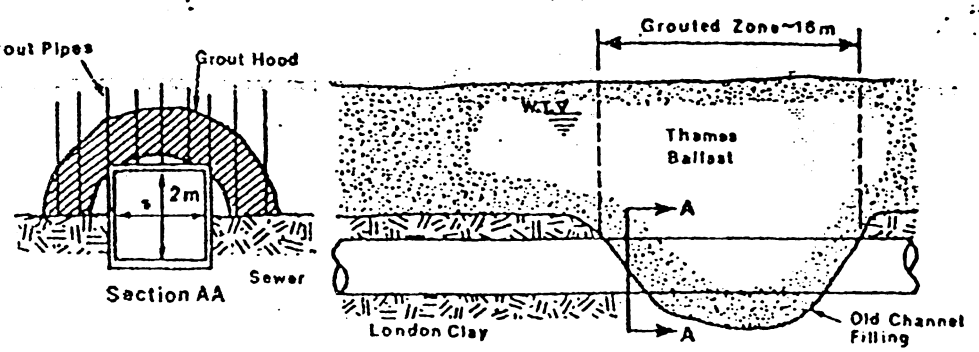
Glossop و Ischy عملیات تزریق دوغاب را بدین صورت تعریف کرده اند که:

«این عملیات عبارت است از تزریق سیالی تحت فشار به داخل فضای حفرات که یا بطور طبیعی در مصالحی نظیر خاکها یا سنگهای درزه دار، یا به طور مصنوعی نظیر آنچه در توده های سنگی لایه لایه در پشت پوشش تونلها مشاهده می شود، به وجود آمده اند. سیال به کار گرفته شده از نوعی است که پس از مرور زمان لخته و گشتی شیمیائی یا ذره ای خاصیت گیرائی و تحکیم شدن دارد.»

طبق گزارشهای Norveiller تزریق از حدود ۲۰۰ سال پیش شروع شده است و از آن زمان به ... از یک تکنیک احداث استاندارد در معدن ... و به توسعه و گسترش ... بوده است.

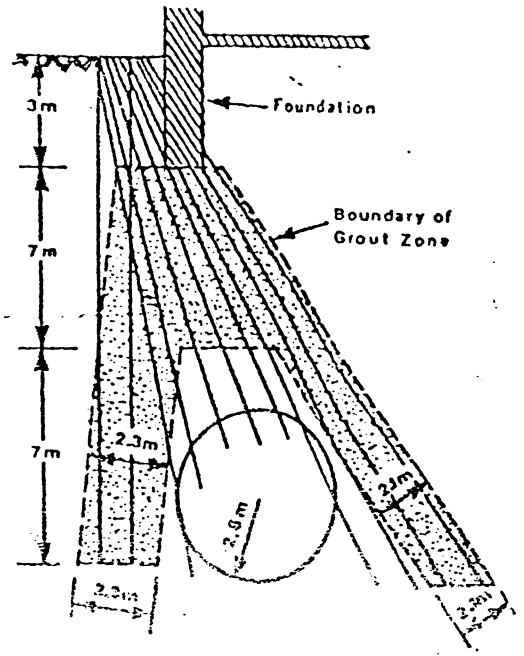
(۱) Electro-osmosis

اهداف تزریق - اهداف اصلی تزریق در تونلسازی را می‌توان به صورتهای زیر برشمرد: ۱) جلوگیری از به جریان افتادن و حرکت آب از طریق مسیرهای عبور آب و منافذ موجود در سنگها یا خالیها به داخل حفریات ایجاد شده (کاهش نفوذپذیری)؛ ۲) افزایش مقاومت نهائی زمین بخوی که زمینهای رونده[1] مانع عملیات احداث تونل نشوند، و ۳) به طور کلی افزایش ایمنی در عملیات تونلسازی. علاوه بر اینها، روشهای تزریق در ارتباط با تونلسازی برای کاهش نشست سطح زمین و تکمیل تأسیسات مستقر زیرسازی سازه‌های سطحی در مناطق شهری به کار می‌روند. در شکلهای ۹-۷ و ۹-۸ مبانی کلی تزریق به تصویر کشیده شده است.



شکل ۹-۷: کاربرد تزریق در حفر یک تونل فاضلاب (تزریق از سطح زمین صورت گرفته است).

روشها و انواع مختلف تزریق وجود دارد و انتخاب روش و نوع تزریق به طور مقدماتی به هدف تزریق و خصوصیات سنگی که در آن تزریق صورت می‌گیرد، نظیر ویژگیهای دانه‌بندی، حلل و فرج و تخلخل، نفوذپذیری و غیره، بستگی دارد.



شکل ۹-۸: آرایش چالهای تزریق به منظور ایجاد یک

انواع دوغاب - انواع دوغاب را می‌توان به دو دسته گسترده تقسیم‌بندی کرد که تحت عناوین دوغابهای سوسپانسیونی[2] و دوغابهای شیمیائی یا مایع[3] نامگذاری شده‌اند. یک دوغاب برحسب خواص اصلی آن باید دارای ویژگیها و مشخصاتی به شرح زیر باشد:

۱- پایداری: یک دوغاب باید در جریان اختلاط و قوس تزریق برای زیرسازی تزریق پایدار باقی بماند. به طور مثال، برای یک دوغاب سوسپانسیونی، مواد دوغاب نباید به طور ناگهانی ته‌نشین کنند. در حالی که برای یک دوغاب مایع، دوغاب نباید بی‌وقفه و به طور ناگهانی منعقد شود.

1-running ground, 2-suspension grout; 3-chemical or liquid grout

۲- **لغزندگی ذرات** : در یک دوغاب سوسپانسیونی اندازهٔ ذرات سوسپانسیون برای این که بتوانند در خاک نفوذ کنند باید نسبت به اندازهٔ دانه‌های خاک تا حدی کوچکتر باشند.

۳- **گرانروی**[1] : گرانروی سیال به طور کلی معرف توانائی آن برای نفوذ در خاکهای ریزدانه است. دیگر خواص روانی یا جریان یابی[2] و زمان انعقاد یا ژل شدن[3] دوغاب، مقدار حداکثر شعاع تزریق را معین می‌کند.

۴- **مقاومت گیرش یا مقاومت ژل** : مقاومت دوغاب بستگی به این خواهد داشت که تزریق با هدف استقرار بخشیدن به زمین یا با هدف جلوگیری از جریان آب در زمین صورت گرفته باشد. در هر حالت، دوغاب باید متناسب با هدف مورد نظر، استحکام لازم را داشته باشد.

۵- **ماندگاری**[4] : دوغاب پس از تزریق و گیرش یا منعقد شدن باید در برابر تأثیرات شیمیائی و فیزیکی و خوردگی آبهای زیرزمینی مقاومت کند.

دوغابهای سوسپانسیونی - دوغاب سوسپانسیونی به طور کلی شامل سیمان پرتلند در یک دوغاب رسی با نسبت سیمان به آب حدود ۱ به ۱ تا ۱ به ۴ می‌باشد که رس به منظور کاهش مصرف سیمان و بهبود پایداری و بهبود گرانروی به کار می‌رود. علاوه بر اجزاء اصلی ترکیب دوغاب یعنی سیمان، آب و رس، افزودنیهای سوسپانسیونی دیگری نیز برای بهبود خواص دوغاب بدان اضافه می‌شوند.

وقتی که قرار است دوغاب سوسپانسیونی در زمینی با درزه‌های بزرگ تزریق شود، می‌توان ماسه به دوغاب اضافه کرد. حداکثر اندازه ماسه‌ها و توزیع آنها باید بگونه‌ای انتخاب شود که با اندازهٔ درزه‌ها و پیها و لوله‌ها و اتصالات موجود مطابقت داشته باشد. در صورتی که درزه‌های بزرگی باید عمل تزریق در آنها صورت گیرد تحت نفوذ آب باشند، باید افزودنیهای دیگری مانند خاک اره، تراشهٔ چوب، قطعه‌های کوچک سلوفان[5]، پلی وینیل[6] یا پلی استر[7] نیز اضافه کرد.

بعضی مواقع که ذرات رس موجود در دوغاب سوسپانسیونی احتمال کار خشنی و بهم چسبیدن دارند، باید افزودنی دیگری نیز به دوغاب اضافه کرد. سوسپانسیون حاوی ذرات بهم چسبیدهٔ رس خواص متفاوتی نسبت به سوسپانسیونی با ذرات مجزای رس دارد. به طور کلی، سوسپانسیون با ذرات بهم چسبیدهٔ رس از پایداری کمتری برخوردار است، ولی ممکن است گرانروی بیشتری داشته باشد و به طور کلی برای مقاصد تزریق مناسب نباشد. برای جلوگیری از بهم چسبیدن ذرات در سوسپانسیون، افزودنی شناخته شده‌ای بنام پلاستیفایر[8] استفاده می‌شود که باعث می‌گردد ذرات رس همدیگر را دفع کنند و در نتیجه به صورت ذراتی مجزا در سوسپانسیون معلق باقی بمانند. بیشتر پلاستیفایرها از نمکهای فلزی نظیر نمکهای پتاسیم، لیتیم و سدیم تشکیل شده‌اند.

1-viscosity ; 2-flow ; 3-gelling ; 4-permanency ; 5-cellophane
6-polyvinyl ; 7-polyester ; 8-plastifier

کاربرد دوغابهای سوسپانسیونی: این دوغابها برای سنگهای درزه دار و دانه‌ای متوسط که دارای حفره‌های بزرگ و تخلخل زیاد هستند، مناسبترین دوغابها می باشند. یک دوغاب سوسپانسیونی حاوی ماسه‌های ریز تا درشت دانه و سیمان و پلاستیفایر، به‌عنوان ملات مناسب برای استفاده در بستن یا پر کردن ترکها و حفره‌های بزرگ شناخته شده است. کاربرد دوغابهای سوسپانسیونی در خاکهای ریزدانه تخلخل مواجه با محدودیتی می باشد. این دوغابها بدلیل وجود ذرات دانه درشت در آنها، نمی توانند به‌درون حفره‌های کوچک نفوذ کنند. قدرت نفوذ دانه‌های سیمان به داخل حفره‌های با تخلخل متوسط و همگن را می توان با آزمایش فیلتر[1] ارزیابی نمود. در جدول ۹-۱ حدود نفوذ انواع سیمان را بسته بسط ویژه، نفوذ پذیری و d_{85} دانه های آنها و d_{15} دانه‌های خاک آورده شده است.

جدول ۹-۱: حدود نفوذ سیمان در خاکهای دانه‌ای (منبع: Nonveiller)

سیمان	ضریب نفوذ پذیری (cm/s)	d_{85} (mm)	d_{15} خاک (mm)
N	$2/3 \times 10^{-1}$	۰/۰۴۷	۰/۸۷
H	$1/3 \times 10^{-1}$	۰/۰۳۳	۰/۶۷
C	$3/2 \times 10^{-2}$	۰/۰۱۹	۰/۳۸
MC	$3/5 \times 10^{-3}$	۰/۰۰۶	۰/۱۲

توضیحات:

۱- N = سیمان پرتلند معمولی؛ H = سیمان با مقاومت اولیه بالا؛ C = سیمان کلوئیدی ریزدانه؛ MC = سیمان بسیار ریزدانه

۲- ضریب نفوذ پذیری[2] به خواص خاک دانه‌ای مورد نظر بستگی دارد.

۳- d_{85} بیانگر قطر دهانه شبکه سرندی است که ۸۵ درصد مواد دانه‌ای سیمان از آن عبور می کنند.

۴- d_{15} بیانگر قطر دهانه شبکه سرندی است که ۱۵ درصد مواد دانه‌ای خاک از آن عبور می کنند.

دوغابهای مایع/شیمیائی: دوغابهای مایع/شیمیائی معمولاً حاوی محلولها و ژلهائی هستند که تشکیل ژل می دهند. این دوغابها نفوذ پذیری را از طریق پر کردن حفره‌ها کاهش و مقاومت و پایداری زمین را افزایش می دهند. این دوغابها نسبت به دوغابهای سوسپانسیونی از این مزیت عمده برخوردارند که می توان آنها را در خاکهای ریزدانه متخلخل تزریق نمود، در حالی که دوغابهای سوسپانسیونی را بدلیل اندازه ذرات موجود در آن نمی توان در این خاکها تزریق نمود. بعضی از انواع دوغابهای مایع مانند انواع رزینی دارای گرانروی نزدیک به گرانروی آب هستند و می توان آنها را بدلیل میزان نفوذ بسیار بالا در خاکهای بسیار ریزدانه تزریق کرد.

1- filter test

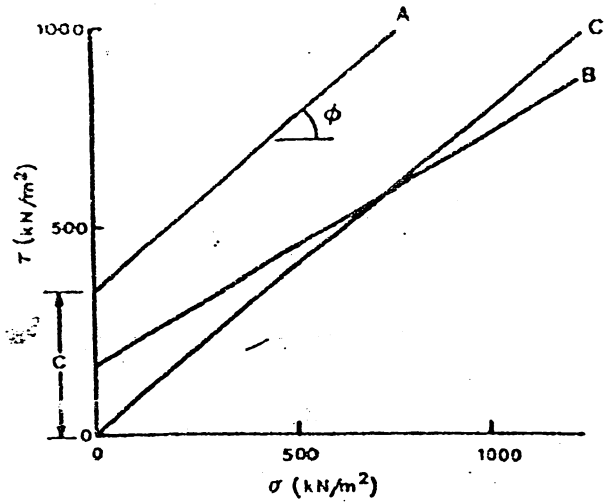
عوامل تأثیرگذار بر انتخاب کاربرد - عوامل متعددی را در استفاده از دوغابهای شیمیائی نظیر پایداری، گرانروی، مقاومت ژل، کنترل زمان ژل شدن، سمیت و هزینه باید مدّنظر قرار داد.

پایداری ژل از آن جهت مهم است که دوغاب ژل می تواند تحت تأثیر واکنش احتمالی شیمیائی با آبهای زیرزمینی که حاوی نمکهای محلول هستند، قرار گیرد. اثر چنین واکنشهای شیمیائی ممکن است منجر به تضعیف خواص ژل شود.

قابلیت نفوذ ژل در خاک، در نهایت توسط گرانروی آن تعیین می شود. اطلاعات مربوط به این عامل معمولاً از سنجه های آزمایشگاهی به دست می آید.

مقاومت ژلهای شیمیائی در مقایسه با دوغابهای سیمان کمتر است. بررسی مکانیک ژلها نشانگر این است که ژلها چسبندگی خاک را افزایش می دهند، ولی تأثیر اندکی بر زاویه مقاومت برشی ϕ[1] دارند. برخی از ژلهای ضعیفتر ممکن است به همان نسبت دارای مقادیر کوچکتر ϕ باشند (شکل ۹-۹). بیشتر دوغابهای شیمیائی مقاومت زمین را بویژه در مناطق با تنش کم، افزایش می دهند، ولی این افزایش در زمینهای با تنش بالا می تواند جزئی و اندک باشد.

زمان ژل شدن دوغابهای شیمیائی به عامل شیمیائی انتخابی و غلظت محلول بستگی دارد. اهمیت زمان ژل شدن، به زمان پیاز دوغاب مربوط است، زیرا قبل از آن که گرانروی شروع به افزایش کند و مقاومت ژل به مقاومت نهائی خود برسد، دوغاب باید در محل تزریق شود. (شکل ۹-۱۰).



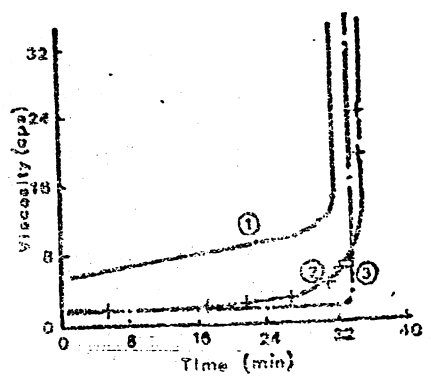
شکل ۹-۹ : خصوصیات مقاومت برشی ماسه باو بدون تزریق

۱- هر خط نشانگر متوسط ۱۰ آزمایش هستند.

۲- A : ماسه تزریق شده با فرمالدئید

۳- B : ماسه تزریق شده با AM-9

۴- C : ماسه خشک (بدون تزریق)، قطر ۰٫۲ تا ۰٫۶ میلیمتر



شکل ۹-۱۰ : تغییر در مشخصهٔ گرانروی دوغابهای شیمیائی بر حسب زمان

۱- محلول سیلیکات : ۵۰ درصد سیلیکات، ۵ درصد فرمامید، ۵۰ درصد اتیل استات

۲- ۱۰ درصد محلول آکریلامید

۳- AC 400

1- angle of shear strength

سمیّت یک دوغاب شیمیائی از دو جنبهٔ خاص مهم است. اوّل، ایمنی و بهداشت افرادی است که در عملیات تزریق دخیل هستند، زیرا بعضی از مواد شیمیائی که در تزریق استفاده می‌شوند، سمّی باشند و ایجاد حساسیتهای پوستی یا خوردگی کنند، در نتیجه این مسئله باید مدّ نظر قرار گیرد. در کار با این چنین مواد شیمیائی باید دستور العملهای اجرائی تولیدکنندگان بدقت رعایت شود. دوّم، محیط زیست باید مورد توجه واقع شود، زیرا آبهای زیرزمینی به آهستگی مواد شیمیائی سمی را شسته و به صورت محلول حمل می‌کنند، در نتیجه آبهای زیرزمینی را آلوده می‌نمایند.

هزینه‌های طرحهای تزریق می‌تواند به طور کاملاً محسوسی تغییر کند. Nonveiller تغییرات هزینه مواد شیمیائی را بین ۱ تا ۲۰ و تغییرات هزینه آماده سازی و تزریق را بین ۱ تا ۳ اعلام کرده است. بنابراین برای هزینه یابی طرحهای مختلف جهت دستیابی به مناسبترین محلول باید دقت و توجه کافی مبذول داشت.

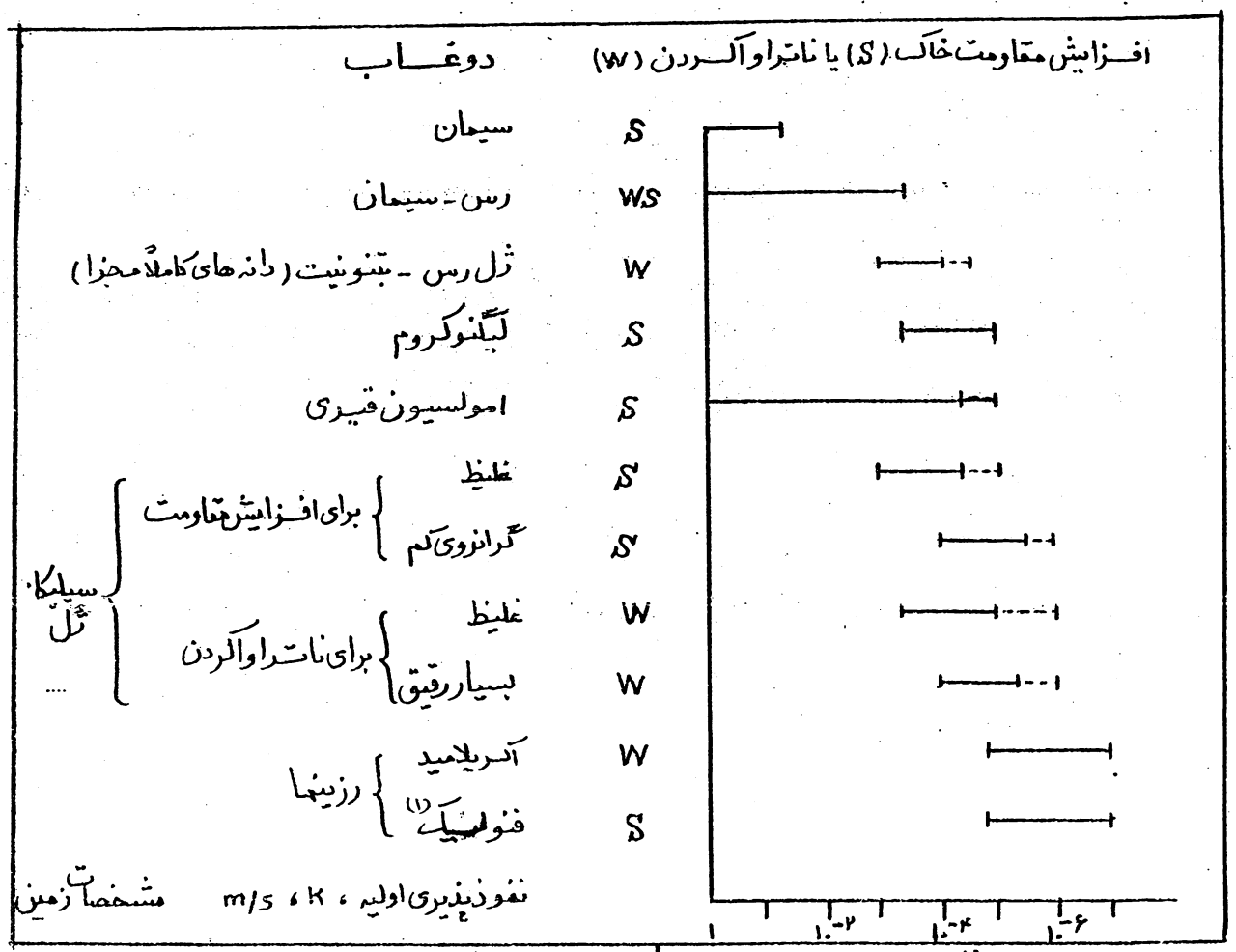
در روشهای تزریق شیمیائی پنج نوع محلول شیمیائی وجود دارد که عبارتند از سیلیکات سدیم[1]، اکریلامیدها[2]، لیگنوسولفیدها[3]، فنوپلاستها[4] و آمینوپلاستها[5]، هر چند انواع خاص نیز به تناسب شرایط استفاده می‌شود. در جدول ۹-۲ و شکل ۹-۱۱ خصوصیات و زمینه‌های کاربرد هر دو نوع دوغاب سوسپانسیونی و شیمیائی دیگری بطور خلاصه آورده شده است.

جدول ۹-۲: مشخصات دوغابهائی که کاربرد گسترده‌تری دارند

نوع دوغاب	مقاومت فشاری تک محوری MPa	نسبت حضور مواد	زمینهٔ کاربرد	شیوه تزریق
سوسپانسیونها				
دوغابهای ناپایدار: سوسپانسیون سیمان و آب ($\frac{\text{آب}}{\text{سیمان}} = \frac{10}{1}$)	مشابه بتن	۴/۲	درزه‌ها و ترکها در سنگ یا مصالح	از نظر کمّی محدودیتی ندارد. پیمانه‌ها پرشدن
دوغابهای پایدار: سیمان و ملاتهای فعال	مشابه بتن		پرکردن حفره‌های بزرگ	محدود از نظر کمّی
سیمان + رس + (ماسه)	< ۵	۱	درزه‌های عریض در سنگ و شن و ماسه با نفوذپذیری بالا	
دوغابهای شیمیائی				
ژلهای سخت	۰/۱ تا بالای ۴ ملات	۹/۸ - ۱۱	$K > 5\times10^{-3}$ cm/s	تزریق دو یا یا ۲ مرحله‌ای معمول میباشد
ژلهای پلاستیک	۰/۰۱ تا ۰/۵	۱/۸ تا ۴	$K > 5\times10^{-3}$ cm/s	محدود از نظر کمّی
رزینهای آلی	بالای ۱۰۰	۱۰ تا ۵۰۰	$K > 10^{-5}$	
دوغابهای هیدروکربنی	۰/۱ تا بالای ۱ برای ملات	۶ تا ۱۲	$K > 10^{-3}$	

توضیحات:
۱- مقاومت فشاری تک محوره برای دوغاب خالص است.
۲- منظور نسبت مواد ۰ است.
... ذکر شده مربوط به خاکهای دانه‌ای است که برای اشباع توسط دوغاب مناسب هستند.

1-Sodium silicate ; 2-acrylamides ; 3-lignosulfites ; 4-phenoplasts ; 5-aminoplasts



شکل ۹ - ۱۱ : کاربردهای دوغاب در خاک سست

روشهای تزریق - سه روش تزریق در عملیات تونلسازی به کار گرفته می شود :

۱- تزریق تحکیمی (۲) ؛ ۲- تزریق تراکمی (۳) ؛ ۳- تزریق باجت (۴)

روشهای دیگر تزریق نظیر تزریق پرده ای (۵) و تزریق فشاری (۶) وجود دارند ، ولی برای کاربردهای مهندسی دیگری مانند آب بندی آبروها و حفره های زیر سدها و مخازن و غیره مورد استفاده قرار می گیرند.

تزریق تحکیمی تکنیکی ساده است که دوغاب بدون آن که ساختار خاک را خراب کند ، با نفوذ به درون خلل و فرج خاک ، مانند آنچه در شکل (۹ - ۱۲ - الف) نشان داده شده است ، تشکیل مخلوطی از دوغاب و خاک می دهد.

تزریق تراکمی نسبت به تزریق تحکیمی از کاربرد کمتری برخوردار است . در این روش ، دوغاب متراکم و بسیار غلیظی که نمی تواند به درون خلل و فرج خاک نفوذ کند را با فشار در خاک تزریق می کنند . این دوغاب خاک را پس زده و متراکم می کند و به جای خاک می نشیند (شکل ۹ - ۱۲ - ب) .

در روش تزریق باجت ، دوغاب با فشار به داخل چال تزریق می شود و با خاک اطراف چال که تحت فشار دوغاب خرد شده ، مخلوط می شود و تشکیل ستونی پایدار از خاک و سیمان می دهد. سه شکل اصلی تزریق باجت عبارتند از حبابی (۷) ، پیمانه ای (۸) و ستونی (۹) . در تزریق باجت ستونی ، از یک جت فرسایشده دورانی استفاده

2 - consolidation grouting ; 3 - compaction grouting ; 4 - jet grouting
5 - curtain g. ; 6 - pressure g. ; 7 - wing ; 8 - panel ; 9 - column

می‌شود و تشکیل ستونهای پایداری می‌دهد که کاربرد گسترده‌ای در مهندسی عمران و کارهای پی‌سازی یافته‌اند. شکل ۹-۱۳ مبانی روش تزریق با جت ستونی را به تصویر کشیده است. این روش در مقایسه با روشهای سنتی تزریق که سیلقه‌های اشباع سخت و رسهای نرم را پوشش می‌دهد، دامنه گسترده‌ای از انواع خاکها را در بر می‌گیرد.

تکنیکهای دیگری وابسته به روش تزریق تحکیمی و تراکمی نیز وجود دارند که دوغاب از طریق گمانه‌ها به درون زمین تزریق می‌شود.

تزریق مرحله‌ای[1]: در تزریق مرحله‌ای گمانه‌ها به طور متوالی تا عمق مورد نظر حفر و تزریق می‌شوند و در بین هر مرحله گمانه با آب شسته می‌شود.

تزریق ردیفی[2]: در این روش برای هر مرحله عمیقتر کردن عمق تزریق، چالهای جدیدی از سطح زمین حفر می‌شوند.

تزریق مداری[3]: در این روش یک مدار بسته تزریق با استفاده از یک لوله دو جداره یا مضاعف[4] و یک مسدود کننده[5] برای جلوگیری از فرار دوغاب ایجاد می‌شود. دوغاب با فشار به درون چال تزریق می‌شود و آن مقداری که در زمین نفوذ نمی‌کند، به داخل مخزن دوغاب برگردانده می‌شود. این تکنیک از سریع بسته شدن چال توسط دوغاب از طریق خارج کردن دوغاب تزریقی جلوگیری می‌کند.

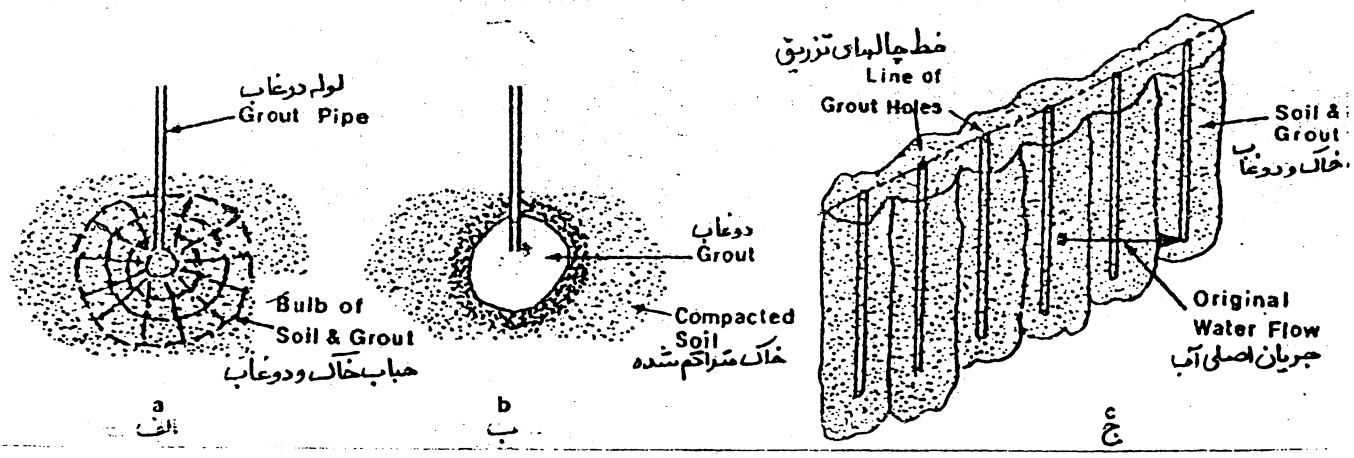
تزریق انسدادی[6]: بخش کوچکی از چال که توسط مسدود کننده‌هائی که در بالا و پائین آن بخش قرار گرفته است، برای تزریق در نظر گرفته می‌شود. تزریق از پائین به سمت بالای چال انجام می‌گیرد. مزیت اصلی این نوع تزریق این است که برای لایه‌ها یا جیبه‌های مختلف واقع در طول چال می‌توان تزریقهای مختلفی انجام داد. بهر حال، اغلب قراردادن مسدود کننده‌ها در دیواره‌های خاکی چالها مشکل است. این مشکل منجر به گسترش و توسعه "لوله مانشت"[7] یا "لوله ماسوره‌ای ایچی"[8] در تزریق انسدادی شده است (شکل ۹-۱۴).

اساس این تکنیک این است که از یک لوله فولادی که اطراف آن به فاصله ۰.۳m در طول لوله سوراخ شده و این سوراخها به صورت حلقه‌ای درآمده‌اند، استفاده می‌شود. هر حلقه (که شامل چندین سوراخ کوچک است) توسط یک حلقه ماسوره لاستیکی کوتاه که به صورت یک شیر یکطرفه عمل می‌کند، بسته‌ای شود. این لوله به عنوان لوله مانشت معروف است. بعد از حفر چال، مانشت در چال قرار داده و حفره بیرونی آن با پر کردن توسط مخلوطی از سیمان و رس موسوم به دوغاب ماسوره[9] مسدود می‌شود. لوله تزریق شامل دو مسدود کننده برای جدا کردن منطقه تزریق از بقیه لوله، در داخل مانشت قرار می‌گیرد. وقتی دوغاب با فشار به داخل لوله تزریق پمپ می‌شود، از ماسوره لاستیکی عبور می‌کند، دوغاب ماسوره را خارج کرده و در داخل زمین می‌شود. مزیت اصلی این روش این است که وقتی لوله جاگذاری شده، می‌توان آن را به دفعات برای دوغابهای مختلف مورد استفاده قرار داد و لایه‌های درشت دانه و سپس در لایه‌های ریزدانه توسط همان لوله عمل تزریق را انجام داد. تزریق می‌تواند در هر چال دوباره از سر گرفته شود و عملیات حفر و تزریق را می‌توان در هر

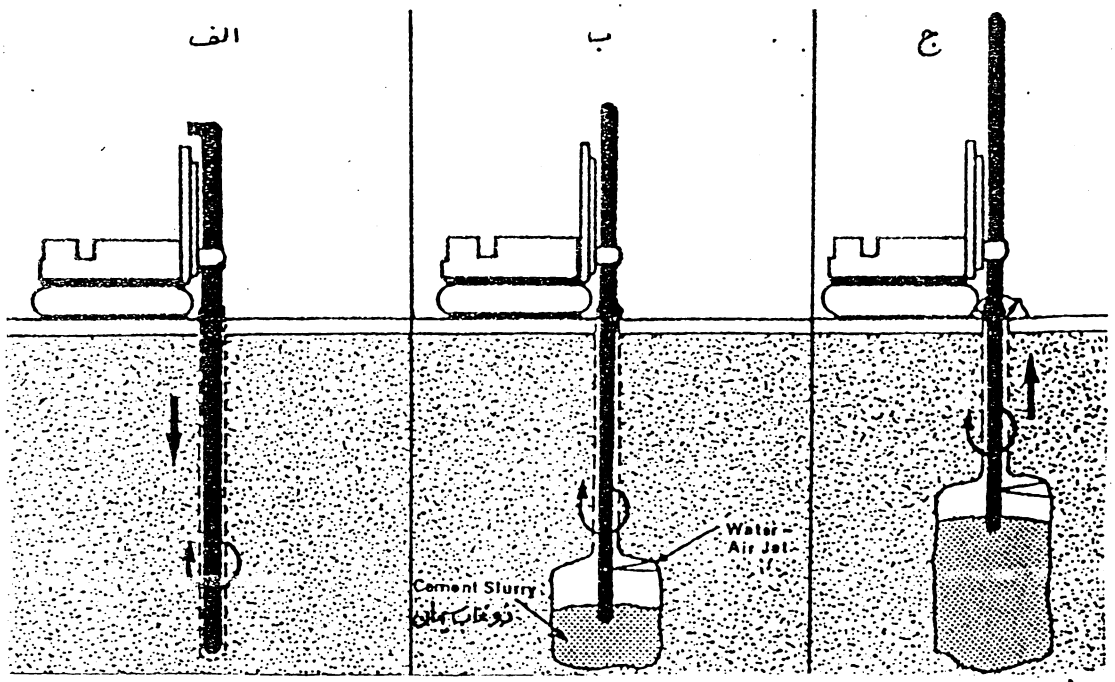
1-stage grouting و 2-series g. و 3-circuit g. و 6-packer g. و
4-double tube و 5-packer و 7-manchette tube و 8-sleeve pipe of Ischy و 9-sleeve grouti

زمانی که برنامه ریزی کارها اجازه دهد بصورت جداگانه انجام داد.

تزریق را می توان از جبهه کار تونل یا با صرف هزینه بیشتر از داخل و جبهه کار تونل پیشساز تونل اصلی انجام داد.
در جدول ۹-۳ خلاصه ای از مشخصات زمین همراه با روشهای تزریق قابل کاربرد و ترکیبهای دوغاب آورده شده است.



شکل ۹-۱۲ - روشهای تزریق : الف) تزریق تحکیمی ، ب) تزریق تراکمی ، ج) تزریق پرده ای

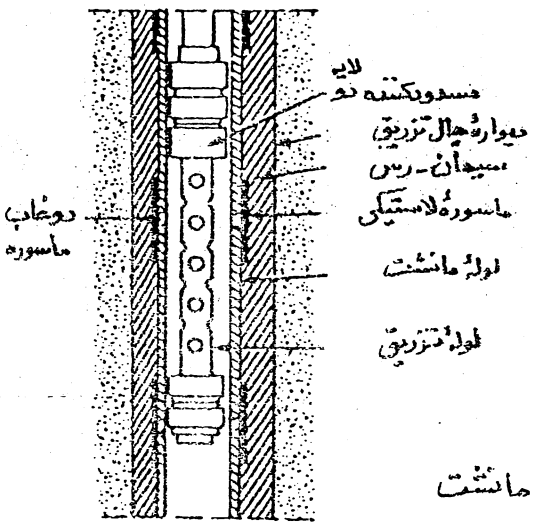


شکل ۹-۱۳ - ایجاد ستون دوغاب باجت

الف - چال راهنما تا عمقی که ستون باید ایجاد شود، حفر می گردد.

ب - تزریق با دوران همراه جت شروع می شود.

ج - جت و چال تزریق و دوران به بالا کشیده می شود و دوغاب از چال راهنما وارد و ستون سیمان و خاک از پائین چال تشکیل می شود.



شکل ۹-۱۴ - لوله مانشت

جدول ۹-۳ - مشخصات زمین، ترکیبهای دوغاب، روش تزریق

الف - هدف تزریق: کاهش نفوذپذیری خاک و سنگ درزه دار

مشخصات زمین	ترکیبهای تزریق	روشهای تزریق
خلل و فرج متوسط با حفره های مرتبط کوچک، تخلخل کم تا متوسط، مانند ماسه سنگ، ماسه ریز دانه، شن و ماسه	محلولهای شیمیائی، رزینها، امولسیونهای بیتومینه، سوسپانسیونهای بنتونیتی و سیمان کلوئیدی	مقدار تزریق در بخشهائی بطول ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر کنترل شود، تزریق با ماسشت و مسدود کننده دوجداره یا مضاعف
خاک با حفره های مرتبط بزرگ، نفوذپذیری بالا، مانند ماسه متوسط دانه، یک دست، شن	سوسپانسیونهای غلیظ سیمان، رس و بنتونیت	مقدار تزریق در بخشهائی بطول ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر کنترل شود، تزریق با ماسشت، در صورت لزوم تزریق مجدد.
درزه های مرتبط ریز، نفوذپذیری کم تا متوسط	سوسپانسیونهای غلیظ سیمان، رس و بنتونیت.	تزریق مرحله ای از بالا (۱) یا پائین (۲) در بخشهای ۱۰ تا ۳ متری برای مشخص کردن حد اشباع
سنگ شامل درزه های مرتبط زیاد و باریک، نفوذپذیری بالا	سوسپانسیونهای بنتونیتی سیمانی پایدار شده، محلولهای شیمیائی	تزریق مرحله ای از پائین در چالهای ریزشی، تزریق از بالا در بخشهای ۵ متری یا کمتر
سنگ بسیار درزه دار، نفوذپذیری بالا	سوسپانسیونهای غلیظ سیمان و رس همراه با مقداری ماسه دانه متوسط یا ریز، به علاوه بنتونیت برای Thixotropy	تزریق مرحله ای از پائین در بخشهای باطول ۵ متر یا کمتر. در صورت افزایش مصرف دوغاب یا نشست سطحی سیمان در تزریق برای کنترل ایجاد انصال یا انقطاع می شود.
سنگ متشدت درزه دار با درزه های باز شدگی زیاد و یا کانالهای کارستی	سوسپانسیونهای غلیظ رس سیمان همراه با بنتونیت برای Thixotropy، در صورت بالا بودن جریان آب، ملات سیمانی با پلاستیفایر	تزریق جداگانه برای مناطق با نفوذپذیری بسیار زیاد، قطع تزریق برای دادن فرصت گیرش سیمان، تزریق ملاتهای غلیظ با پمپهای مخصوص
سنگ شدیدت کارستی همراه با درزه های زیاد و باز	ملات غلیظ سیمان با پلاستیفایر، سوسپانسیون غلیظ Thixotropic برای اشباع نهائی، فومها (foams)	تزریق جداگانه حفره ها یا ترکهای با بازشدگی زیاد و اشباع بخشها با دوغاب غلیظ Thixotropic.
سنگهای خرد شده که بر اثر تزریق دوغاب از سطح زمین نشست می کند	سوسپانسیونهای Thixotropic غلیظ همراه با ماسه های دانه ریز برای گیرش سریع و افزودنیهای اضافه می شود.	تزریق شناور، مسدود کردن نشستهای سطحی، حالبهای بتنی مسلح و غیره
دوغاب تزریق شده در چالهای خالی مجاور، نشست موضعی، جریان آب در درزه ها ترکیب دوغاب را به هم می زند	سوسپانسیونهای غلیظ و یا Thixotropic بدون شن و ماسه های دانه ریز و سیمان با سوسپانسیونهای Thixotropic تزریق می شود. فومهای جاری با سوسپانسیون سیمان	تزریق همزمان دو چال با توجه به مشخصات زمین، چالهای بزرگ برای پمپهای ظرفیت بالا

(ب) هدف تزریق: کاهش تغییر شکل پذیری خاک یا سنگ و یا افزایش مقاومت منطقهٔ تزریق، شالودهٔ اطراف تونلها و فضاهای زیرزمینی، هنارها و غیره

مشخصات زمین	ترکیبهای تزریق	روشهای تزریق
حفره های مرتبط کوچک، درزه های موئین، نفوذ پذیری کم	دوغابهای شیمیائی یا رزینها	مقادیر مشخص معلول تزریق می شود، بحشتهای کوتاه، تزریق ماسوره ای (ماشت) در خاک
حفره های مرتبط کوچک، نفوذ پذیری متوسط تا زیاد	سوسپانسیونهای کلوئیدی سیمان در صورت کارآئی همراه با رزینها	تزریق مقادیر مشخص، بحشتهای کوتاه، تزریق با ماشت در خاک
ترکها یا درزه های باز بدون پرشدگی، نفوذ پذیری بالا	سوسپانسیونهای غلیظ یا پایدار شدهٔ سیمان، در صورت نیاز ماسه ریزدانه اضافه می شود.	تزریق در بحشتهای کوتاه برای استیاع کردن
ترکها یا درزه های باز با پرشدگی زیاد یا کم پرشده با ماسه یا رس	ملات یا سوسپانسیون سیمان مطابق با مشخصات درزه ها و ترکها	درزه ها از چالهای اطراف با آب و هوا شسته می شود و سپس تا استیاع کامل تزریق انجام می شود

طراحی سیستمهای تزریق: عوامل زیر بر امکانپذیری تزریق و مراحل مختلف مطالعات و بررسیهای اولیه تأثیر می گذارد:

۱- مطالعات ژئوتکنیکی و آب شناختی انجام شده از طریق حفاری، نمونه برداری، بررسیهای پیزومتریک[1] و آزمایشهای برجا

۲- آزمایشهائی که در آزمایشگاه برای تعیین آن خصوصیاتی از خاک که بر قابلیت تزریق پذیری اثری گذارد، انجام می شود، برای مثال توزیع دانه بندی.

۳- سنجه های آزمایشگاهی برای انتخاب قابل کاربردترین نوع دوغاب و مقاومت درازمدت و خواص وابسته به زمان دوغاب.

۴- آزمایشهای تزریق برجا در صورت نیاز

معادلات ارائه شده توسط Raffle و Greenwood برای نفوذ یک حباب دوغاب در این فرضها استوار است که در یک خاک همگن، دوغاب از انتهای لولهٔ تزریق به صورت شعاعی خارج و در خاک نفوذ می کند و تشکیل خاک تزریق شده ای به شکل کره می دهد (شکل ۹-۱۵).

سرعت یا نرخ جریان دوغاب به فشار رانش دوغاب و نفوذ پذیری خاک بستگی دارد.

1- piezometric

معادلهٔ ۹-۳ نرخ جریان دوغاب (Q) از یک لوله دوغاب در یک خاک با تخلخل متوسط n تحت شرایط ثبوت یک ایده‌آل را نشان می‌دهد.

$$Q = 4\pi kh \div \left[\frac{N}{r_0} - \frac{N-1}{r}\right] \qquad (۳-۹)$$

که: Q = نرخ جریان دوغاب

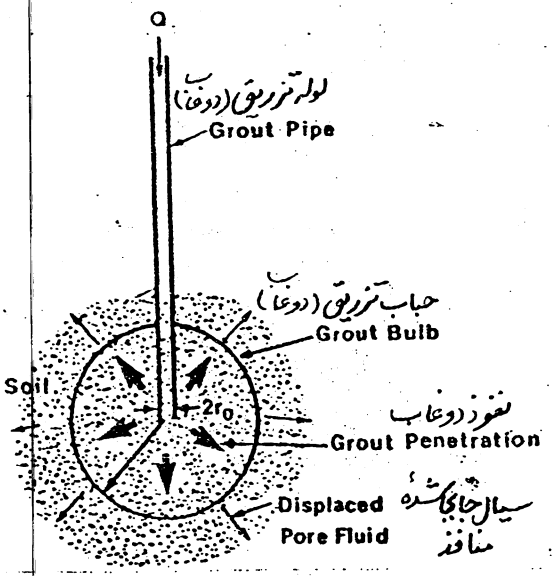
k = نفوذپذیری خاک

h = فشار رانش دوغاب

N = نسبت گرانروی دوغاب به گرانروی آب

r = شعاع حباب دوغاب

r_0 = شعاع لولهٔ دوغاب



شکل ۹-۱۵: گسترش یک حباب کروی ایده‌آل دوغاب در خاک همگن

در صورتی که گرانروی دوغاب برابر گرانروی آب، یعنی N=1 باشد، معادله ۹-۳ به صورت ۹-۴ درمی‌آید:

$$Q = 4\pi khr_0 \qquad (۴-۹)$$

نرخ جریان حجمی Q، حجم منافذ پرشده در یک حجم کروی خاکی با شعاع r در واحد زمان را نشان می‌دهد.

$$Q = nV/t = 4\pi r^3 n/3t \qquad (۵-۹)$$

که: n = تخلخل خاک ، t = زمان ، V = حجم خاک

ترکیب معادلات ۹-۳ و ۹-۵، معادله ۹-۶ را نتیجه می‌دهد:

$$r = [3kht/n\{N/r_0 - (N-1)/r\}]^{1/3} \qquad (۶-۹)$$

در صورت N=1 معادله ۹-۶ برابر خواهد شد با:

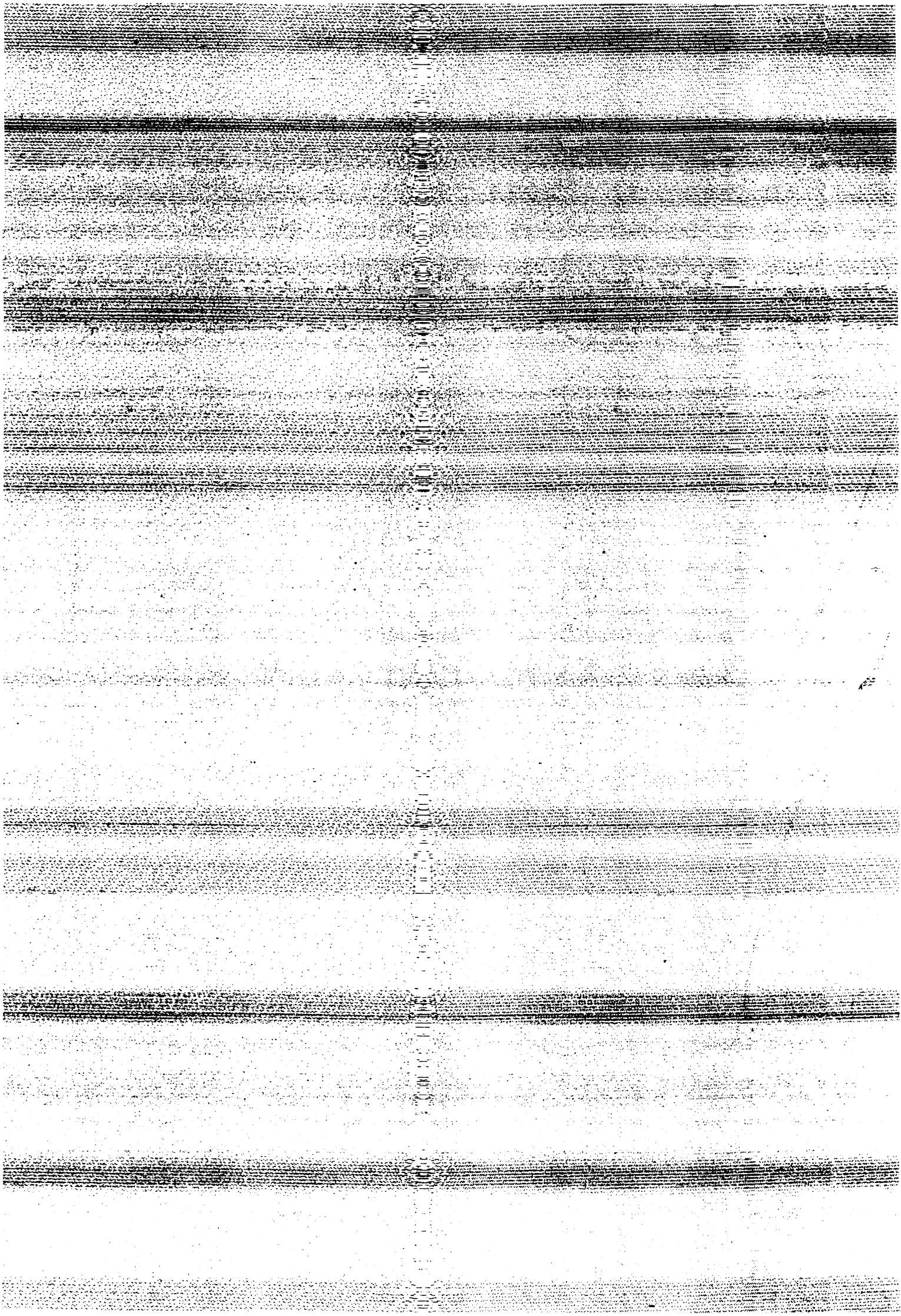
$$r = [3khtr_0/n]^{1/3} \qquad (۷-۹)$$

فشار تزریق - راهنمایها و دستورالعملهای زیر توسط Spangler و Handy در رابطه حداکثر فشار مجاز تزریق ارائه شده است:

۱- فشار تزریق نباید آنقدر زیاد باشد که باعث جابجائی خاک یا پی سازه‌ها شود؛ فشار تزریق نباید از فشار روباره فراتر رود.

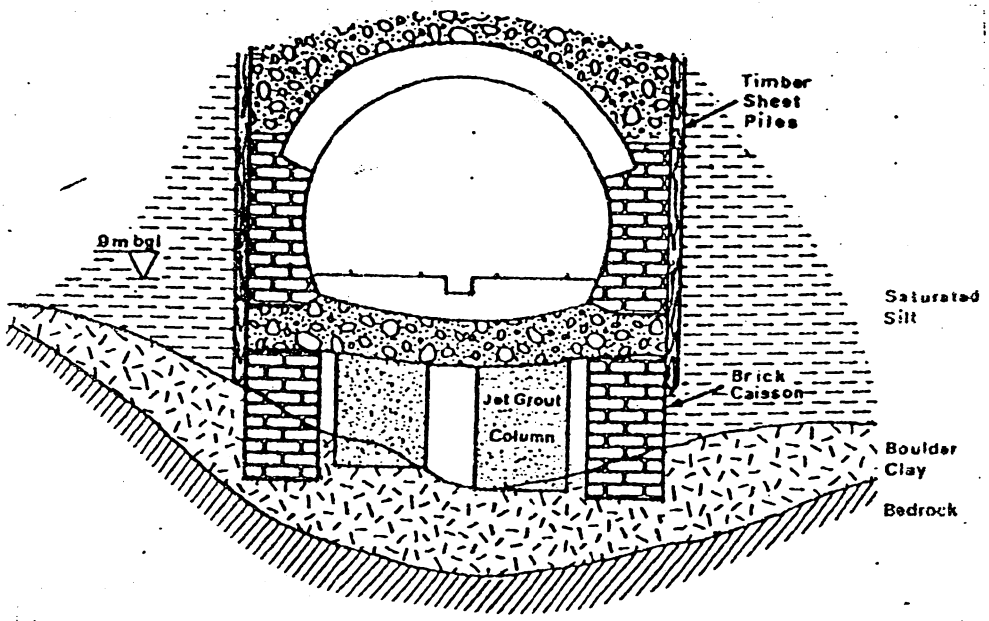
۲- فشار تزریق در جریان عملیات تزریق باید بتدریج زیاد شود، زیرا افزایش فشار به طور ناگهانی منجر به گرادیان فشار بالائی می‌شود که می‌تواند باعث ایجاد نیروهای نشت شعاعی بزرگ و تراکم خاک گردد.

۳- فشار بالای تزریق می‌تواند سنگهای اطراف را درزه‌دار کند که در عملیات تونلسازی باید از این کار (درزه‌دار شدن سنگ بستر سنگ) جلوگیری کرد.



تأثیر بهسازی زمین بسیار موفقیت آمیز بود. افت هوای فشرده از تونل پیشتاز که قبلاً حدود ۲ m³/min بود به حدود یک دهم این مقدار تقلیل پیدا کرد.

تزریق باجت به میزان گسترده ای در کارهای اصلاحی یا مرمت تونلهای موجود به کار گرفته می شود. به عنوان مثالی برای این نوع کارهای اصلاحی می توان به اصلاح تونل راه آهن شهری Glasgow اشاره کرد. قسمت اعظم این تونل در سنگی پایدار ساخته شده بود، اما بخشی از آن به طول ۱۰۰ متر به روش کندو پوش[1] ایجاد شده بود چون سنگ بستر به تمامی در زیر کف قوسی تونل قرار داشت. پس از احداث، کف تونل دچار شکستگی و نشست گردید و این امر به وجود یک حفرهٔ پنجالی مدفون[2] در سنگ بستر که خط تونل را قطع کرده بود، نسبت داده شد. حفره با سیلتهای اشباع دارای دانه بندی یکسان که بر روی یک لایه نازک رس کلوخه ای قرار گرفته بود، پر شده بود. (شکل ۹-۱۷).



شکل ۹-۱۷: مقطع قائم عرضی از یک تونل دوریلهٔ شناگر احداث سازه و بهسازی زمین با تزریق دوغاب باجت (9bgl = زیر سطح زمین[3])

برای جلوگیری از اثرات نشست کف، تصمیم گرفته شد که کف تونل به طور مستقیم به رس کلوخه ای دوخته شود و به دلیل شرایط محدود کاری و نیاز به تداوم فعالیت تونل، تصمیم گرفته شد که از روش تزریق باجت استفاده شود. همان طور که در شکل ۹-۱۷ مشاهده می شود از دو ردیف ستونهای با قطر ۲ متر و با فاصله مرکز به مرکز ۲ متر که با تزریق دوغاب باجت ایجاد شده بودند، به عنوان راه حل نهائی استفاده شد.

1 - cut and cover ; 2 - buried glacial hollow ;
3 - below ground level

انجماد زمین

انجماد چینه‌های آبدار زمین کاری بسیار تخصصی و هزینه بر است، ولی روشی بسیار مؤثر برای کنترل موقت آب زمین یا بهبود پایداری آن می باشد. برای موفق بودن عملیات انجماد لازم است که آب در ساختار زمین موجود باشد. انجماد در مشخصات خاکهای خشت تغییر یا بهبودی ایجاد نخواهد کرد.

انجماد یک روش بهسازی موقت زمین است که برای دامنهٔ گسترده ای از انواع خاکهای آبدار، از جمله زمینهای مختلطی که تنر ریق یا اعمال هوای فشرده قابل کار برنیستند، به کار گرفته می شود. انجماد اغلب برای احداث چاههای قائم در صنعت معدنکاری بویژه برای حفر در زمینهای بشدت آبدار به کار گرفته شده و معمولاً برای حفر چاه کاربرد دارد، ولی کاربردهای مفیدی نیز در عملیات احداث تونل یافته است. در جدول ۹-۴ فهرست تونلهائی که از سال ۱۹۸۰ در احداث آنها از انجماد استفاده شده، آورده شده است.

جدول ۹-۴ : عملیات عمدهٔ انجماد در تونلها از سال ۱۹۸۰

موقعیت	قطر (m)	دوباره (m)	طول (m) (ها)	H/V/I	B/LN	پایان کار	منبع
Milchbuck	۱۴/۴	۸	۱۲ x ۳۴/۴۵	H	B	۱۹۷۹	۹-۱۹
Gasoigne	۶	۱۸۰	۲ x ۱۰۵	V	B	۱۹۸۰	۹-۲۵
Runcorn	۳	۱۵	۲ x ۱۳	H	B&LN	۱۹۸۰	۹-۲۶
Oslo	–	–	۲۶	H	B	۱۹۸۰	۹-۲۷
Antwerp	۱/۷	۶	۲۱۰ +۴۰۰	H	B	۱۹۸۱	۹-۲۸
Brussels	–	۳	–	H	B	۱۹۸۲	۹-۲۹
DuToitskloof	۱۲/۷	۱۰/۴۲	۵ x ۳۲	H&V	B	۱۹۸۲	۹-۳۰
Mol	۳/۵	۲۲۰	۲۵	H	B	۱۹۸۲	۹-۳۱
Iver	۲/۸	۳۰	۵۲	V	LN	۱۹۸۴	۹-۳۲
Nunobiki	۱۱	۷۰	۵۰	H	B	۱۹۸۴	۹-۳۳
Tokyo	۹/۷	۳۷	–	H	B	۱۹۸۵	۹-۳۴
Keihin	۹/۷	۱۵	۲	H	B	۱۹۸۵	۹-۳۵
Stonehouse	۲	۱۰	۱۰	V	LN	۱۹۸۶	۹-۳۶
Agri Sauro	۴	۱۵۰	۳۴	H	LN	۱۹۸۶	۹-۲
Zurich	–	–	–	–	–	۱۹۸۶	۹-۳۷
Vienna(a)	۷	۱/۶	۶۵	H	B	۱۹۸۷	۹-۳۸
Vienna(b)	۹/۵	۳	۲ x ۳۵	H	LN	۱۹۸۷	۹-۳۹

H = افقی ، V = قائم ، I = مایل (لوله‌های انجماد)

B = آب‌نمک ، LN = نیتروژن مایع

در تونلسازی برای انجماد زمین چالهائی معمولاً از سطح زمین یا از تونلی در اعماق بالاتر در جلوی جبهه کار تونل یا از داخل خود تونل حفر می‌شوند، سپس لوله‌های منجمد کننده نصب شده و سیال در گردش سرد کننده در آنها به جریان انداخته می‌شود. فرآیند انجماد تشکیل یک باند یا مرز پایدار و یا غیر قابل نفوذ (ناتراوا) معروف به دیوارهٔ یخی می‌دهد که می‌توان تونل را بمنظور ایمن در آن احداث کرد.

انجماد زمین یک تکنیک ساده برای مشکل کنترل کوتاه مدت آب نیست، هرچند در چنین مواقعی با موفقیت به کار گرفته می‌شود. ضرورت انجماد را باید در مرحلهٔ طراحی عملیات تونلسازی بویژه وقتی که زمین‌های بسیار آبدار و سخت پیش‌بینی می‌شود، مدنظر قرارداد زیرا این کار از نظر زمانی و هزینه برای مواجهه با احداث تونل تأثیرات قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد.

تکنیکها و ابزار انجماد

انجماد معمولاً با دو تکنیک انجام می‌گیرد، یکی انجماد نسبتاً کند با استفاده از یک سیستم چرخهٔ غیر مستقیم آب نمک و دیگری انجماد سریع با تزریق مستقیم نیتروژن مایع تا دمای ۲۵° - سانتیگراد.

انجماد با آب نمک - تأسیسات سیستم انجماد با آب نمک شامل یک دستگاه سرد کننده است که محلول آب نمک را خنک می‌کند و سپس این آب نمک توسط پمپ و از طریق لولهٔ مارپیچ انجماد به انتهای چال تزریق می‌شود. آب نمک سرد شده پس از این که مدتی در تماس با خاک قرار گرفت، از طریق لولهٔ مارپیچ دیگری به سطح باز گردانده می‌شود. آب نمک برگشتی که در اثر تبادل حرارت گرم شده است، به دستگاه خنک کننده وارد و سرد می‌شود و جریان آن تکرار می‌گردد. این نوع از تکنیک انجماد به فرآیند غیر مستقیم (چرخهٔ بسته[1]، تبادل مضاعف[2]) معروف است و در شکل ۹-۱۸ به تصویر کشیده شده است.

در عمل چندین لولهٔ انجماد به یک دستگاه سرد کننده متصل است و چرخهٔ آب نمک تا زمانی که مناطق منجمد بحد کافی گسترش یابند و همدیگر را پوشش داده و تشکیل یک دیوارهٔ یخی دهند، ادامه می‌یابد. پس از این دمای سیال در گردش فقط باید در حدی حفظ شود که صلبیت دیوارهٔ یخی پایدار بماند.

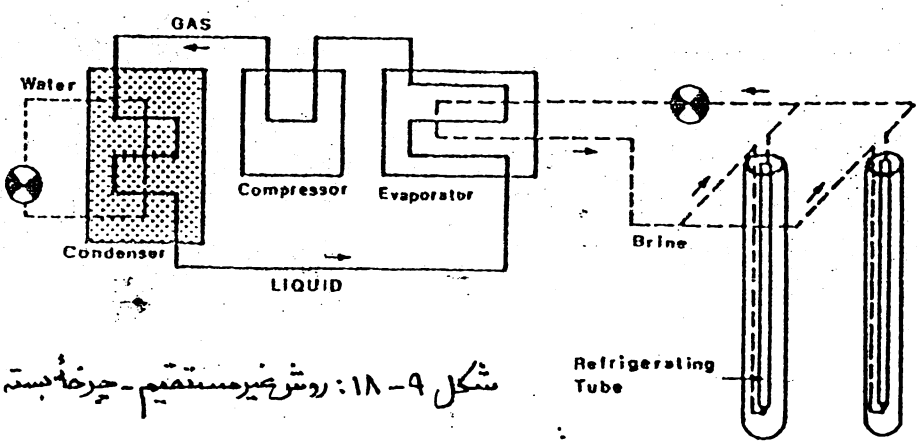
مشکلی که در عمل و در مواجهه با حجم زیادی از آبهای زیرزمینی جاری به وجود آید، بسته شدن دیوار یخی است. وجود مواد آلی و آب نمک نیز می‌تواند موجب بروز مشکلاتی در زمینهٔ کاهش نقطهٔ انجماد آب زیرزمینی شود.

مزیت اصلی این روش، هزینهٔ پائین آن است، ولی این مزیت به دلیل زمان طولانی مورد نیاز برای اثرگذاری کافی انجماد (۲۰ تا ۲۵ روز)، کارآئی خود را از دست می‌دهد. بنابراین در صورتی که در منطقه‌ای نیاز به انجماد سریع باشد، استفاده از این روش (آب نمک) مناسب نیست.

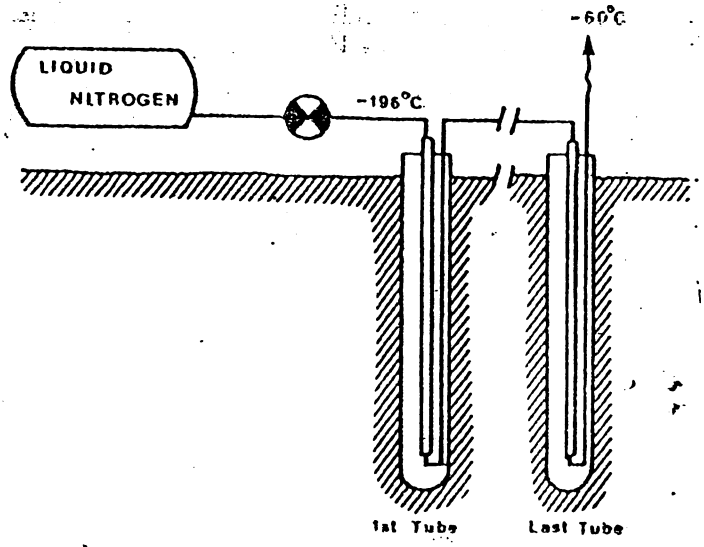
انجماد با نیتروژن مایع - استفاده از نیتروژن مایع در انجماد زمین به عنوان یک روش مستقیم شناخته شده است و اخیراً توسعه یافته است. عادی‌ترین اختلاف این روش با روش انجماد با آب نمک

1-closed cycle ; 2-double exchange

در چرخهٔ باز[1] و تبادل منفرد[3] آن است بدین معنی که نیتروژن مایع از مخزنی واقع در سطح زمین از طریق وسایل و مسیرهای خاص در چالهای متعدد پخش و توزیع می شود و پس از خروج از آخرین چال، نیتروژن مایع که به صورت گاز درآمده، در فضا تخلیه می شود (شکل ۹-۱۹).



شکل ۹-۱۸: روش غیرمستقیم - چرخهٔ بسته، تبادل حرارت مضاعف



شکل ۹-۱۹: روش مستقیم - چرخهٔ باز، تبادل حرارت منفرد

دو عامل مهم در مطلوبیت استفاده از نیتروژن مایع مشاهده می شود. اوّل این که انجمادی قابل ملاحظه و دیوارهٔ یخی پیوسته‌ای را در مدت زمانی کوتاه (۳۰ تا ۴۰ ساعت) ایجاد می کند. همچنین تأسیسات سطحی بسیار ساده‌تری در مقایسه با روش انجماد با آب نمک نیاز دارد. علیرغم این دو مزیت، هزینهٔ استفاده از نیتروژن مایع بالاست و کار با آن مستلزم رعایت احتیاطهای ویژه‌ای نظیر تخلیه آن در هوا به منظور جلوگیری از تجمع بیش از حدّ آن می باشد. احتمال ایجاد چرخهٔ بسته در روش مستقیم استفاده از نیتروژن مایع وجود دارد، ولی ایجاد این سیکل بسته به تجهیزات پیچیده نیاز دارد و با مشکلات اجرائی مواجه است. در نتیجه ایجاد سیکل بسته و این کار بر در خاص صنعت استفاده می شود.

شکلهای هندسی لوله‌های انجماد - شکل هندسی لوله‌های انجماد در یک عملیات انجماد زمین، نقش بنیادین در موفقیت عملیات دارد.

چالها یا چالهایا

1- open cycle ; 2- single exchange

شکل ۹-۲۰ الگوهای متعدد چالها که معمولاً در پروژه های تونلسازی بکار می رود را نشان می دهد.
در برخی از موقعیتها ممکن است انجماد لایه های بلافاصله در زیر سطح زمین ضروری نداشته باشد. بدین منظور تمهیدات مختلفی نظیر عایق سازی، گشاد یا بزرگ کردن موضعی مقطع لوله ها، دو جداره کردن لوله ها و .... فاصله داری لوله های انجماد، در نظر گرفته شده است. همچنین برای تأثیر بیشتر سرد کردن زمین تکنیکهای مختلفی نظیر مشبک کردن لوله های داخلی گسترش یافته است.

عوامل مؤثر بر صلبیت و استحکام سازه ای دیوارهٔ یخی - مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته بر روی خواص زمینهای منجمد شده، نشان می دهند که این زمینها رفتار الاستو-پلاستیک[1] دارند. علاوه بر این، گفته شده است که خزش پلاستیک می تواند عامل محدود کننده در طراحی تونل در خاکهای منجمد باشد، هر چند تاکنون فرمول یا رابطهٔ عمومی برای خزش ارائه نشده است.

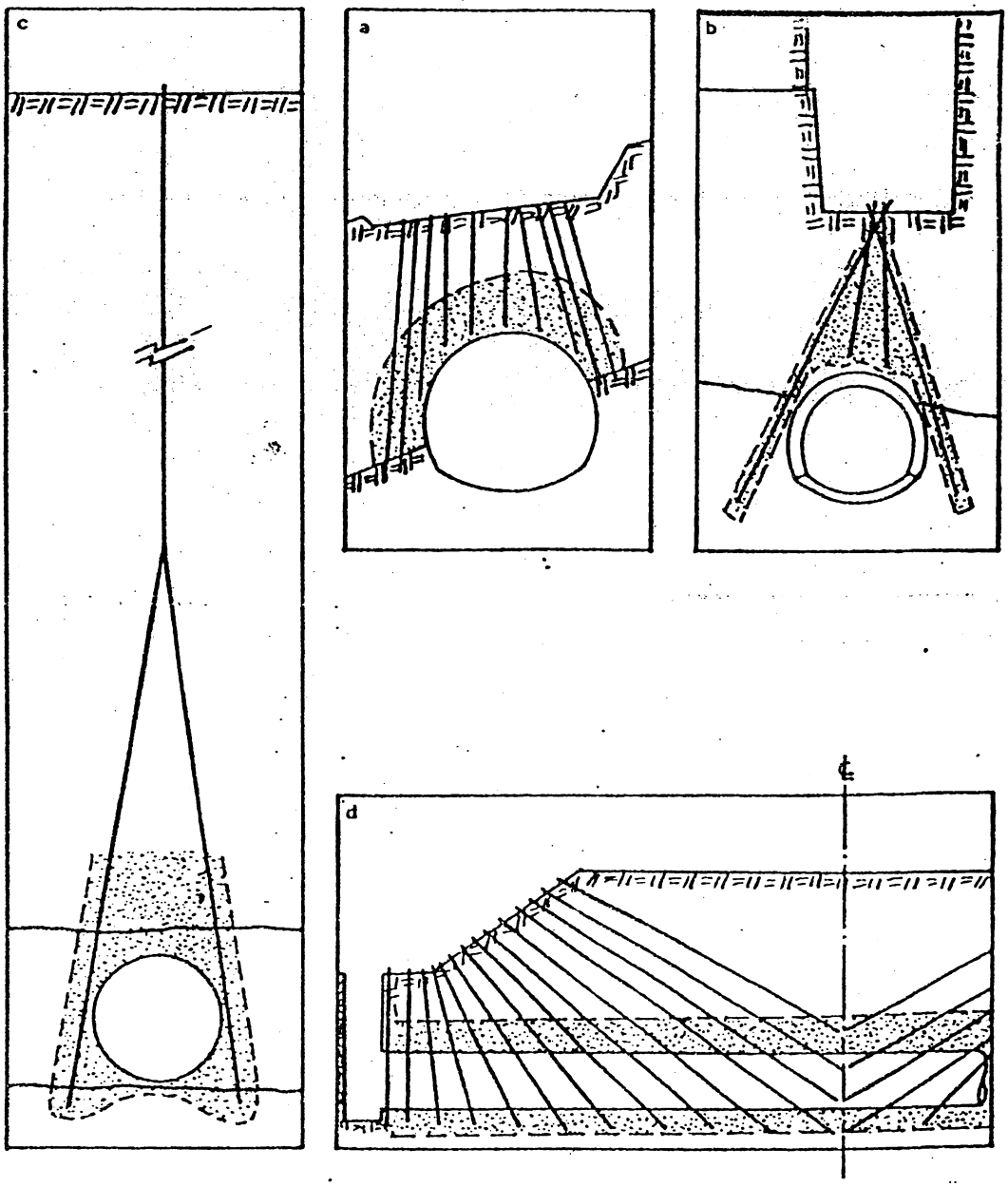
جریان آب زمین برای گسترش و ایجاد دیوارهٔ یخی، خطری محسوب می شود، البته روشهائی برای به حداقل رساندن تأثیرات آن وجود دارد. در صورتی که سرعت آب بیش از ۲ متر در روز باشد، انجماد با روش آب نمک فاقد تأثیر خواهد بود. به منظور کاهش جریان آب، تمهیداتی از جمله متراکمتر کردن الگوی چالها در قسمتهای منطقهٔ بالای جریان آب، و یا سردتر کردن دمای آب نمک تا ۴۰° سانتی گراد به جای دمای معمول ۲۰° - ، یا پیش تزریق برای انجماد، به کار برده می شود.

در صورتی که خاک رطوبت کمی داشته باشد، انجماد مقاومت خاک را اندکی بهبود خواهد بخشید. برای افزایش میزان رطوبت ذاتی طبیعی خاک و در نتیجه بهبود شاخصهای انجماد، ممکن است شستشوی کنترل شده صورت گیرد.

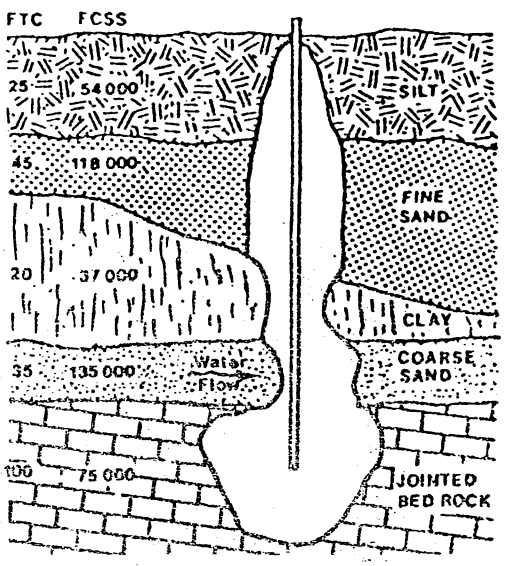
توجه ویژه ای به سازه های واقع در بالای دیوارهٔ یخی باید مبذول شود، زیرا ایجاد این دیواره موجب برآمدگی یا بالا آمدن[2] سطح زمین می شود و پس از آب شدن یخ موجب نشست مجدد[3] سطح می گردد. Kellier در مورد بالا آمدگی سطح زمین بر اثر انجماد در جریان احداث تونل Milchbuck به میزان بیش از ۰.۵ میلیمتر گزارش داده است. این میزان برآمدگی به طور بالقوه قابلیت وارد آوردن خسارت به سازه های سطحی را دارد. با این وجود، با استفاده از روش انجماد نوبتی[4]، میزان برآمدگی را تا ۱۰ میلیمتر محدود کردند و این میزان نشست از پتانسیل خطرزائی برآمدگی سطح کاست.

برهمین منوال، توجه خاصی باید به نشست سطح زمین (فرو رفتگی) پس از آب شدن یخ مبذول داشت زیرا ضرورتاً سطح زمین به تراز اصلی و اولیه خود پس از آب شدن یخ برنمی گردد. برای پر کردن حفره های تشکیل شده بر اثر فرآیند آب شدن یخ و در نتیجه به حداقل رساندن نشست سطح زمین می توان از تزریق دوغاب در حین آب شدن یخ استفاده کرد.

1- elasto-plastic ; 2- surface heave ; 3- re-settlement ;
4- intermittent refrigeration



شکل ۹-۲۰ : انگوها یا آرایشهای گوناگون چالها یا لوله‌های انجماد
a- قائم/مایل (مانند متروی Born، لندن)؛
b- قائم/مایل متقاطع (مثال: Salerno)؛
c- دوشاخه‌ای (مثال: Grascoigne Wood, Selby)
d- بادبزنی (مثال: Hornchurch)



شکل ۹-۲۱ : نمونه‌ای از تأثیر خواص حرارتی بر سنگ منجمد شده.
FTC = هدایت حرارتی یخ زده
FCSS = مقاومت برشی خرشی یخ زده
(ارقام فقط برای نشان دادن حدود و بطور نسبی آورده شده‌اند. واحدها MKH)

پدیدهٔ دیگر، گسترش و پیشرفت محدودهٔ یادهای صفر (یا بالاتر) بسمت قسمت در حال حفر است و این به دلیل آب شدن یخ بر اثر دمای هیدراسیون حاصل از سفت شدن بتن پوشش می باشد. در جائی که فشار بتن ریزی یا بتن پاشی خیلی زیاد باشد، ممکن است عایق سازی دیوارهٔ یخی برای جلوگیری از چنین تأثیری ضروری باشد.

طراحی سازه ای دیواره های یخی - برای تسهیل طراحی یک دیوارهٔ یخی لازم است که مشخصات حرارتی خاکهای مختلف و نقطهٔ انجماد آب زیرزمینی مشخص شود. در شکل ۹-۲۱، تأثیر تغییرات هدایت حرارتی بر حسب توسعهٔ دیوارهٔ یخی به تصویر کشیده شده است. طراحی معمولاً بر مبنای شرایطی که موجب تشکیل کوچکترین دیوارهٔ یخی می شود، انجام می گیرد.

به طور معمول لازم است که دیوارهٔ یخی از آنچنان استحکامی برخوردار باشد که بتواند در طول مدت کار، در برابر تنشها و بارهای حرارتی اعمالی بر آن، مقاومت کند. در سالهای اخیر دامنهٔ گسترده ای از سنجهای آزمایشگاهی برای بدست آوردن اطلاعات لازم در مورد تأثیر انجماد بر خاکها گسترش یافته است.

تاریخچهٔ کارهای انجمادی که در سالهای اخیر صورت گرفته، نشان می دهند که روش اجزاء محدود (FEM)[1] ابزار مناسب و استانداردی برای تحلیل شرایط حرارتی و تنش - کرنشهای حاصل از این شرایط می باشد. در ضمن، یک تکنیک تکرار شونده[2] با استفاده از روش اجزاء محدود توسعه یافته است که خواص وابسته به زمان خاکهای منجمد شده را نیز در محاسبات و تحلیلها در نظر می گیرد.

تاریخچهٔ کارهای انجماد زمین

دسته‌بندی فضاهای زیرزمینی

مغارها	چاهها	تونلها	دسته‌بندی برمبنای :
کم عمق عمیق	کم عمق عمیق	کم عمق عمیق	الف - عمق
			ب - کاربری
	۱- (چاههای) عبور و مرور افراد	۱- راههای عبور و مرور افراد (عابر رو)	ب - ۱ - حمل و نقل
	۲- (چاههای) حمل مواد	۲- ریزگراها	
	۳- (چاههای) وسیله رسانی	۳- خطوط آهن یا راه آهن	
		۴- قطارهای زیرزمینی (مترو)	
		۵- راههای زیر آبی	
	۱- آبرسانی (انتقال آب یا تأمین آب)	۱- آبرسانی (انتقال آب)	ب - ۲ - انتقال
	۲- فاضلاب	۲- فاضلاب	
	۳- انتقال سیلاب	۳- هدایت یا انتقال سیلاب	
	۴- هوارسانی	۴- intake (تونل آبگیر یا تونل هوارسانی)	
۱- فضاهای بزرگ (محلهای انشعاب، تقاطعها، غیره).	۱- دسترسی	۱- خطوط یا شبکه‌های عمومی :	ب - ۳ - خدمات رسانی عمومی یا عام المنفعه
		الف - تلفن	
		ب - کابلها	
		ج - خطوط برق	
		د - خطوط لوله	
۱- محلهای مایعات			ب - ۴ - مخازن و انبارها
۲- مخازن گاز			
۳- مخازن ضایعات			
۴- مخازن یا انبارهای مواد غذایی			
۵- سردخانه‌ها			
۱- گاراژ یا پارکینگ			ب - ۵ - گاراژ یا پارکینگ
		۱- استخرهای شنا	ب - ۶ - تفریحی
		۲- مراکز بازی	
		۳- تئاترهای زیرزمینی	
		۴- سینماها	

۲-۱ دسته بندی فضاهای زیرزمینی

مغارها	چاهها	تونلها	دسته بندی بر مبنای :
	۱- راههای دسترسی	۱- راههای دسترسی	ب - ۷- معدنکاری
	۲- استخراجی	۲- تونلهای استخراجی و طبقات	
	۳- حمل و نقل	۳- حمل و نقل	
	٤- تهویه	٤- تهویه	
۱- آشیانه ها یا پناهگاهها		۱- آشیانه ها یا پناهگاهها	ب - ۸- دفاعی
۲- مراکز فرماندهی نظامی		۲- مراکز نظامی فرماندهی	
سخت	سخت	سخت	ج - نوع زمین
نرم	نرم	نرم	
مختلط	مختلط	مختلط	
۱- چالزنی و آتشباری	۱- چالزنی و آتشباری	۱- چالزنی و آتشباری	د - روشهای احداث
۲- حفارهای مکانیکی	۲- حفر به صورت چاه کور یا از پائین بالا	۲- ماشین حفر تونل TBM	
	۳- گشاد کردن دویل	۳- ماشین حفار بازویی (رودهدر)	
	٤- Down slashing	٤- کند و پوشش یا کند و پوشاند	
	۵- حفر با حفارهای مکانیکی	۵- لوله گذاری	
		۶- حفر با استفاده از جت آب	
۱- پوشش بتنی	۱- پوشش بتنی	۱- پوشش با بتن	هـ - پوشش
۲- شاتکریت	۲- پوشش با قطعات پیش ساخته بتنی	۲- پوشش با قطعات پیش ساخته بتنی	
	۳- شاتکریت	۳- اندود بتنی یا شاتکریت	
	٤- بدون پوشش	٤- بدون پوشش	
	۵- پوشش با وسائل نگهداری فولادی	۵- پوشش با وسائل نگهداری فولادی	

۳- ادامه دسته بندی فضاهای زیرزمینی

مغارها	چاهها	تونلها	دسته بندی برمبنای:
۱- قاب فولادی ۲- بیچ سنگ	۱- قاب فولادی ۲- شاتکریت ۳- بیچ سنگ	۱- قاب فولادی ۲- شاتکریت یا بتن پاشی ۳- بیچ سنگ	و- نگهداری اولیه
	۱- جریان آزاد	۱- جریان آزاد ۲- جریان تحت فشار	ز- شرایط سیال عبوری
۱- طویل ۲- کوتاه	۱- طویل ۲- کوتاه	۱- طویل ۲- متوسط ۳- کوتاه	ح- طول
۱-	۱- قائم	۱- افقی ۲- شیبدار ۳- با شیب کم	ط- شیب
۱- منفرد ۲- چندگانه	۱- منفرد	۱- منفرد ۲- چندگانه ۳- دستگاه اریا پشته دار ۴- دوقلو (دوتائی همپوش)	ی- آرایش
۱- راست	۱- راست	۱- راست یا مستقیم ۲- قوسدار ۳- مارپیچ	ک- جهت داری یا جهت یافتگی

۲۶۷

۱- ملاحظات طراحی برای انتخاب روش احداث

	چالـــزنی و آتشباری	TBM	ماشین حفار بازوئی
انفجار هوا و صداهای شدید	امکان آن وجود دارد، ولی با به کار گیری آتشباری تأخیری می توان کاهش داده شود.	وجود ندارد	وجود ندارد
نرخ متوسط پیشروی (تونلی با اندازهٔ متوسط)	۳۰ فوت در روز	۱۰۰ فوت در روز	۴۰ فوت در روز
شناسائی گمانه‌ای	اهمیتی ندارد	بسیار مهم	گاهی مواقع مهم
قلوه سنگ و رسوبات یخچالی	چالزنی مشکل ولی مطمئن ترین روش است.	برای قلوه سنگها مشکل، ولی برای رسوبات یخچالی مناسب است.	برای قلوه سنگها چندان مشکل نیست ولی برای رسوبات یخچالی مناسب است.
مواد دانه ریز رسی	چندان مشکل نیست	از جنبهٔ جابجائی و انتقال بسیار مشکل	مشکل
مقاومت فشاری سنگ	برای هر مقاومتی قابل استفاده است	برای سنگهای با مقاومت فشاری بیش از ۴۰ KSI کارآئی ندارد.	برای سنگهای با مقاومت فشاری بیش از ۱۴ KSI کارآئی ندارد.
تلرانس در حین احداث	درز منهای بد با مشکل مواجه می‌شود	رضایت بخش خواهد بود	گاهی با مشکل برخورد می کند
قوس یا انحنای تونل	شعاع انحنای قوس نباید کمتر از ۱۰۰ فوت باشد (عامل کنترل کننده شعاع انحنا، تجهیزات باربری و انتقال مواد کنده شده، است).	شعاع انحنا نباید کمتر از ۵۷۵ فوت باشد.	می تواند به قوسهای تندتر وارد شود (عامل کنترل کنندهٔ شعاع قوس تجهیزات انتقال مواد کنده شده است).
شرایط مختلف زمین	در هر شرایطی می تواند تطبیق نماید	بسیار مشکل با شرایط مختلف انطباق می یابد	انطباق پذیری چندان مشکل نیست
چالزنی	نسبت به شرایط زمین بسیار حساس است	نیازی نیست	نیازی نیست
گرد و غبار	در حین چالزنی و آتشباری گرد و غبار بسیار زیاد است.	بسیار زیاد	مقداری گرد و غبار
همگاری اکتشافی	مشکلی ندارد	برای انجام همگاری اکتشافی در حین احداث ماشین باید طراحی خاصی داشته باشد.	مشکلی ندارد
گسلها	در برخورد با گسلها باید احتیاط کرد. از جنبهٔ نگهداری مشکل، ولی از جنبهٔ حفر آسان است.	از گسلهای با عرض کمتر از ۳۰ فوت می توان گذر کرد. گسلهای با عرض ۲۰ تا ۳۰ فوت برای گذر کردن بینهایت مشکل است.	نیمه مشکل

۲- ملاحظات طراحی برای انتخاب روش احداث

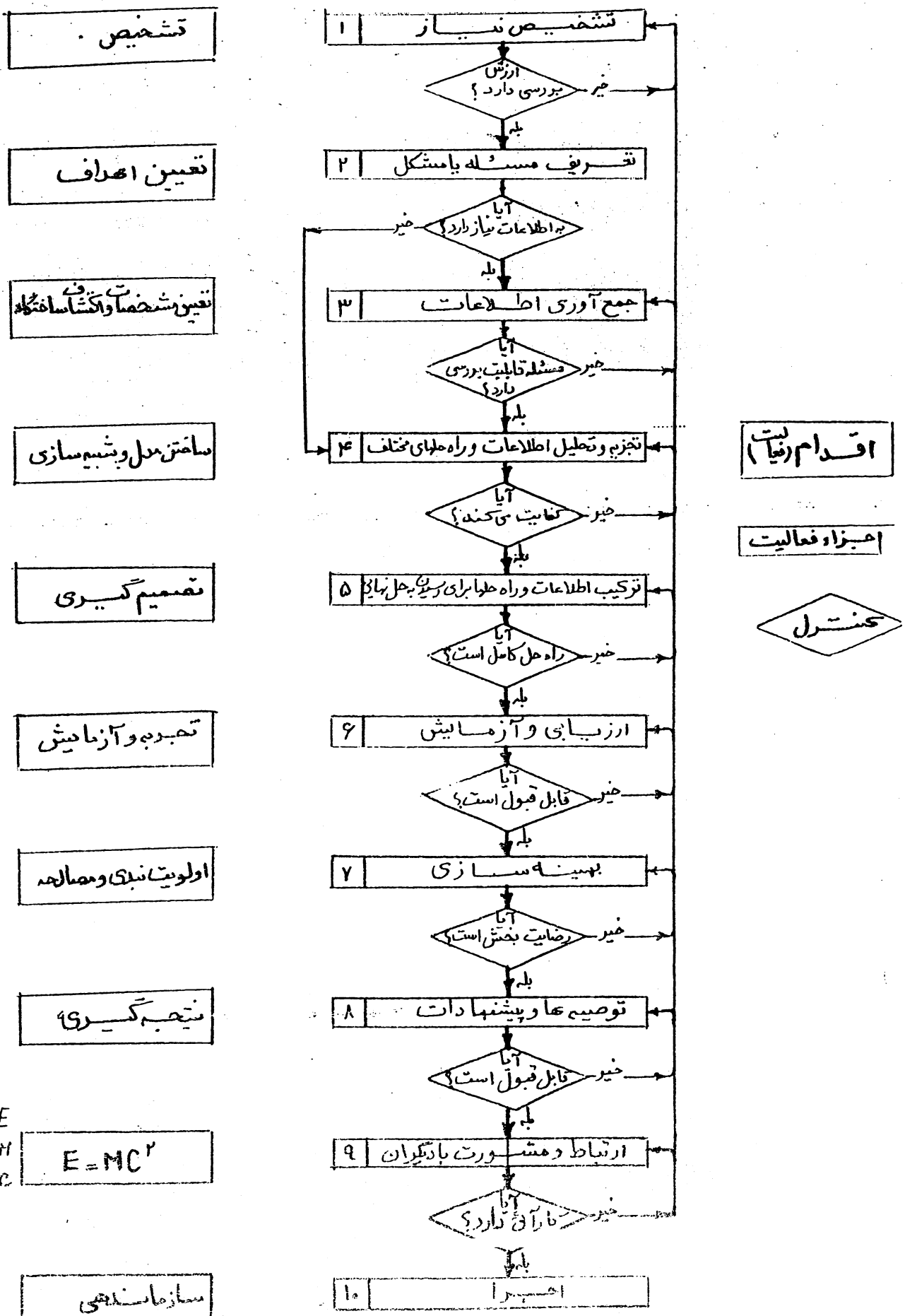
	چالزنی و آتشباری	TBM	ماشین حفار بازوئی
انعطاف پذیری	بسیار بالا	بسیار صلب (غیرقابل انعطاف)	متناوب
شرایط زمینهای جویانی	مناسب نیست	برای این شرایط ماشینهای خاصی طراحی شده اند	مناسب نیست
میزان خرد شدگی	با نوع مواد منفجره کاربردی، روش خرجگذاری و الگوی آتشباری، میزان خردشدگی قابل کنترل است.	با انتخاب برش دهنده، فشار محوری پشت ماشین، فاصله برش دهنده ها از هم و آرایش آنها میزان خردشدگی قابل کنترل است.	با نوع سرمته و فاصله داری آنها، میزان خردشدگی قابل کنترل است
تونلهای گازدار (گازمتان)	بسیار سخت	مشکل	نسبتاً سخت (متوسط)
شیب	هر شیبی ولی نه بیش از ۱۸ درجه	برای شیبهای افقی خوب است. برای زوایای شیب بیش از ۶ درجه مناسب نیست (ماشینهای خاصی برای کار در زاویه بیش از ۲۰ درجه طراحی شده اند)	برای زوایای شیب بیش از ۶ درجه مناسب نیست.
مشکل آب زیرزمینی	می تواند بسهولت کنترل شود	کنترل آن بسیار سخت است	قابل کنترل است
هزینه اولیه	چندان زیاد نیست	بسیار بالا است. نسبت هزینه کل به هزینه ماشین برابر ۱۵ تا ۲۰ است.	متوسط
حفر به کمک حبت (آب)	نیازی به حبت (آب) نیست	برای سنگهای بسیار سخت (σ_c بزرگتر از ۴۰ KSI) نیاز به حبت آب است.	برای سنگهای با σ_c بیشتر از ۱۴ KSI نیاز به حبت آب است.
زمان قبل مورد نیاز برای شروع	حدود یک ماه	سه تا ۱۸ ماه برای راه اندازی	یک ماه یا بیشتر
حفر		یک TBM	
طول تونل	طولهای کوتاهتر، بیش از ۱۰۰۰۰ فوت	برای طولهای کوتاهتر از ۱۰۰۰۰ فوت به کار نمی رود (هگرانین ماشینهای مورد استفاده در دسترس باشند).	بیش از ۱۰۰۰۰ فوت (در شرایط ایده آل، در طولهای بزرگتری توانند به کار گرفته شود).
مکانیزاسیون	چندان بالا نیست	بسیار بالا	متوسط
حفر همزمان با کار مقاطع	چندان مشکل نیست (انعطاف پذیرترین روش).	بسیار مشکل (حداقل انعطاف پذیری)	چندان مشکل نیست
رفتارنگاری حبت حفر	چندان مهم نیست	بسیار مهم	گاه مهم

۳. ملاحظات طراحی برای انتخاب روش اجرا

	چالزنی و آتشباری	TBM	ماشین حفار بازوئی
انتقال سنگ کنده شده	بسیار انعطاف پذیر (قطار، کامیون)	انتقال سنگ خرد شده از جبهه کار به پشت ماشین توسط نوار نقاله و سپس توسط قطار یا کامیون انجام می گیرد.	حمل سنگ خرد شده از جبهه کار به پشت ماشین نیاز به بازوی جمع کننده و نوار نقاله و سپس قطار یا ماشین دارد.
حفر تونلهای چند گانه	به کار گرفته می شود	مورد استفاده قرار نمی گیرد	معمولاً مورد استفاده قرار می گیرد
فرسودگی (درزه دار شدن) حبارهٔ فضای اطراف	برای چالهای با خرجگذاری زیاد، بسیار بالاست	زیاد نیست (حبداره تأثیر می گذارد)	متوسط
سر و صدا	بسیار زیاد (در حین آتشباری)	نه چندان زیاد	میزان سر و صدا متوسط
تعداد کارخانجات تولیدکننده	متعدد	در امریکا ۳ یا ۴ کارخانه	در امریکا ۳ یا ٤ کارخانه
حفر چند مرحله ای یا بخشی جبهه کار	همیشه امکانپذیر است	غیر ممکن است	امکانپذیر است
قابلیت دسترسی به دهانه یا مدخل ورودی	مهم نیست	بسیار مهم است مگر این که برای پائین بُردن TBM نیاز به حفر چاه باشد	برخی مواقع مهم است
پیش نگهداری و پایدارسازی زمین	اجرای پیش نگهداری زمین مشکل نیست	بسیار مشکل است مگر این که ماشین برای این منظور طراحی شده باشد	چندان مشکل نیست
پیوستگی یا عدم پیوستگی عملیات	چرخه ای، متناوب، غیر پیوسته	پیوسته	پیوسته
میزان پیشروی دستگی دارد به:	طول، آرایش و فاصله ردیف چالها و نوع ماده منفجره	سختی سنگ، ساینده گی سنگ، گسترش و توان و سرعت دوران و وزن و نوع برش دهنده های ماشین	سختی سنگ، گسترش، توان، سرعت دوران و نوع برش دهندهٔ ماشین
زمان خود نگهداری مورد نیاز زمین برای عمل حفر (بدون اصلاح زمین)	حداقل ۳ ساعت (بدون پیش نگهداری)	درصورتی که زمان خود ایستائی زمین صفر باشد، برای کار با TBM از سپرهای دوغابی یا سپرهای تعادلی بازمین استفاده می شود.	۴ ساعت ارجح است
مراحل یا روندها (sequence) پیشروی	برای حدود ۱۲ متر طول چال روند یا مرحله پیشروی ... است	پیشروی روزبند یا مرحله ای نیست	پیشروی روزبندی یا مرحله ای نیست
RQD	برای کلیهٔ مقادیر RQD مناسب است.	درصورتی که RQD برابر ۲۵ تا ۴۵ درصد باشد روشن خوبی نیست.	برای کلیهٔ مقادیر RQD خوب است.

۴- ملاحظات طراحی جهت اعتماد بازوبش احداث

	چالزنی و آتشباری	TBM	ماشین حفار بازوئی
زمینهای رونده	مناسب نیست مگر این که زمین پیش تزریق و پایدار شده باشد.	ماشینهائی که بطور ویژه طراحی شده باشند می توانند در این زمینها عمل کنند	مناسب نیست
مشکل	هرشکلی	فقط دایره‌ای (به استثنای ماشینهای خاص مانند mobile miner)	دایره‌ای ، نعل اسبی و نعل اسبی اصلاح شده
زمینهای رسی ، ماسه‌ای و سیلتی	مناسب نیست	TBM های سپر دار خوب عمل میکنند	استفاده نمی شود
اندازه	با استفاده از حفر تونلهای پیشرو و پله‌ای هر اندازه ای را می توان حفر کرد	در حال حاضر قطر ۴ تا ۴۰ فوت	با ابعاد بازو کنترل می شود . به طور کلی ۶ تا ۱۴ فوت ، ولی از طریق حفر پله‌ای هر اندازه ای را می توان حفر کرد
زمینهای فشاری یا متورم شونده	گاهی مشکل	احتمالاً گیر خواهد کرد مگر این که پایه های کافی زمان داشته باشد یا قادر به کاهش اندازه باشد	گاهی مشکل
مشکلات شروع کار مشکلات راه‌بری و هدایت	شدید نیست وجود ندارد	شدید و مستلزم ملاحظات خاص است بر شرایط زمین بستگی دارد ، شیب و جهت باید مشدداً کنترل شوند .	شدید نیست وجود ندارد
مشکلات خشک برداری	زیاد	کم	متوسط
یکنواختی و یکسانی اندازه تونل	ضروری نیست ، می توان انشعاب و تغییر سطح مقطع ایجاد نمود .	بنیهایت مهم	چندان مهم نیست
بهره دهی تجهیزات	۳۵ درصد	۴۵ درصد	۶۰ درصد
وصله‌های خیلی محکم	بله	با استفاده از سرمته های مخصوص برش دهنده ها همراه با سپرها	استفاده نمی شود
لرزش	بسیار زیاد (در جریان آتشباری)	متوسط	بالا
نیروهای کار انسانی	بسیار ماهر (ناظر آتشباری انتخاب)	بسیار ماهر و متخصص (اپراتورها و مکانیسین ها)	ماهر



مراحل یا الگوریتم عمومی تحقیق

محدودکننده ها و تضییقات مهندسی

کاربری، اندازه، شکل، جانمائی، روش احداث

اهداف

ایمنی، پایداری، اقتصاد

تشخیص و تعیین داده های ورودی

ساختار زمین شناختی

(نقشه برداری زمین شناسی مهندسی و پیمایش ژئوتکنیکی حفره ها)

خصوصیات سنگ و چینه های مسلی

(مقاومت، تغییرشکل پذیری و عوامل موثر بر آنها)

آب زمین — میدان تنش برجا

بارهای اعمالی

(تنش در رابطه با نوع حفر تغییری کند)

روشهای طراحی

استفاده از قوانین و استانداردها. مشاهده (اندازه گیریها سر زمین) زمین شناختی (مطالعه و تزئیهای خطر زمین شناختی) تجربی (طبقه بندی توده سنگ و تجربیات) تحلیلی (مدلسازی عددی و معیار های شکست)

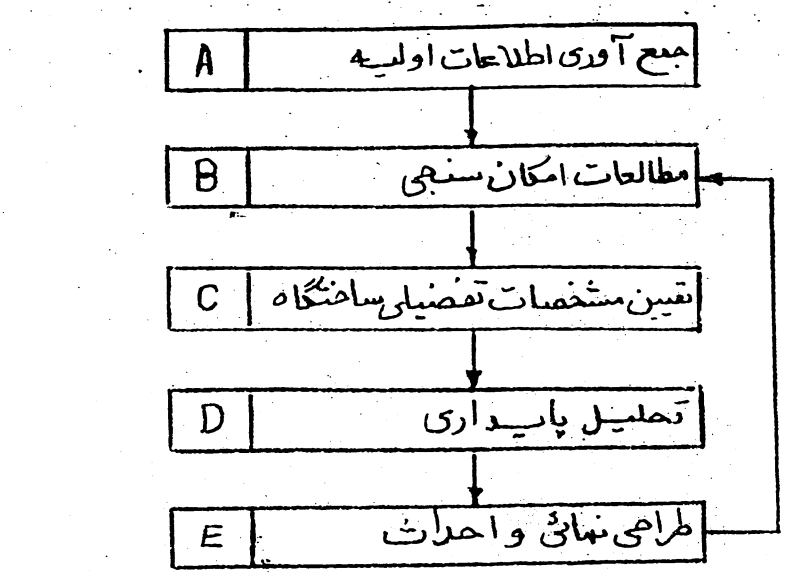
مشخصات داده های خروجی

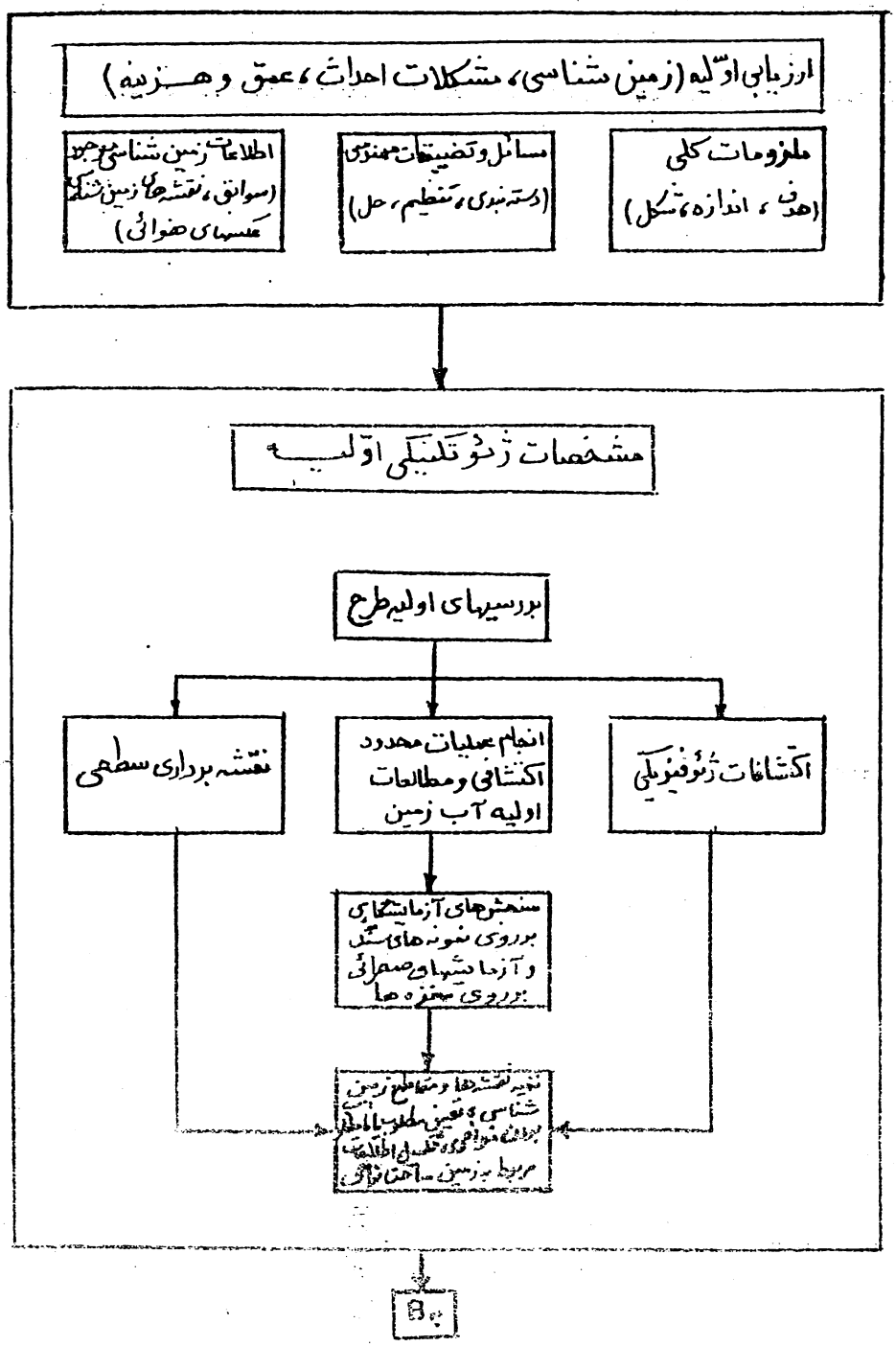
- اندازه سقف
- دستورالعمل نگهداری سقف، دیواره، کف
- اثر تقاطعها و فضاهای مجاور

اطلاعات برگشتی

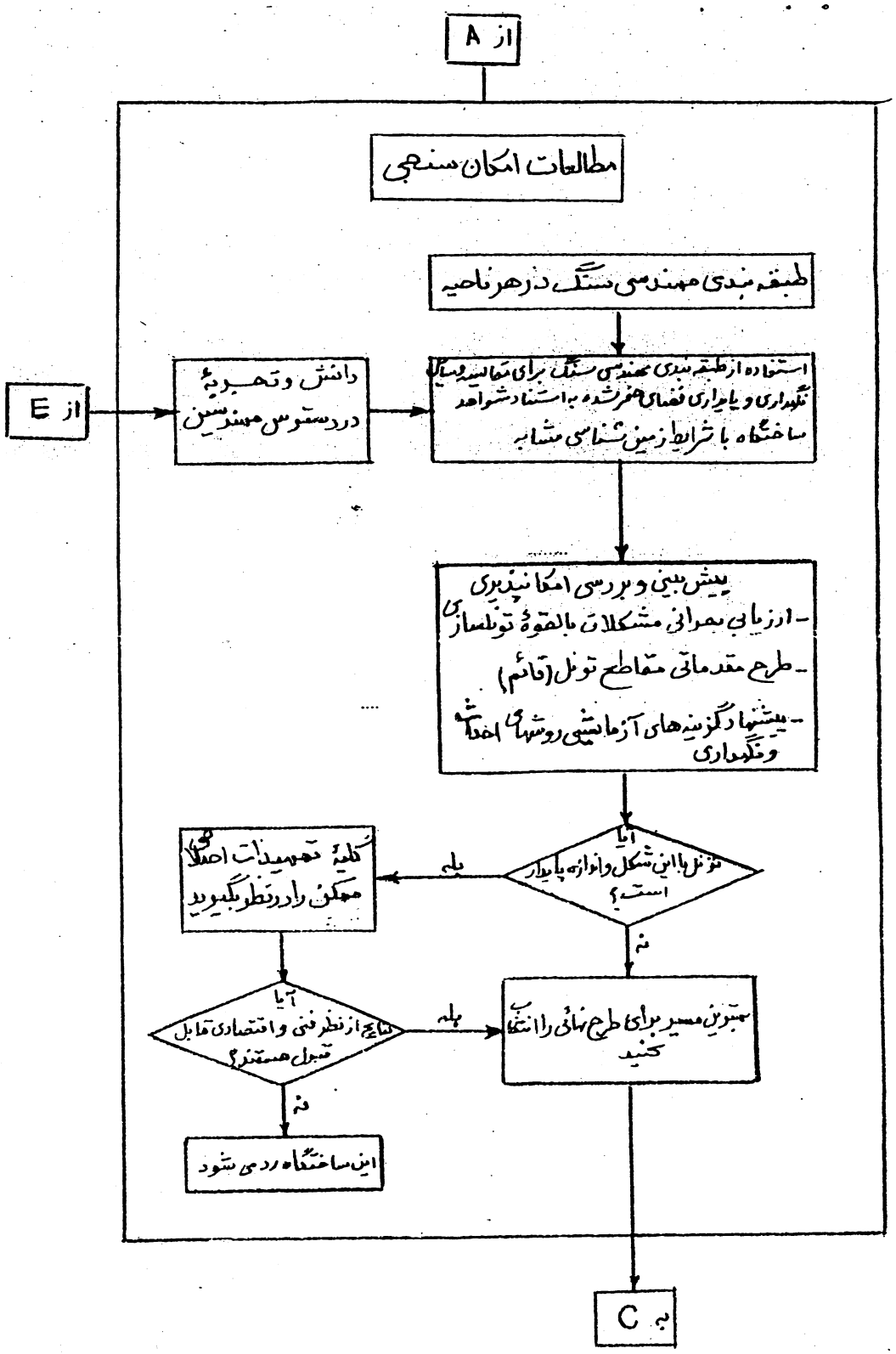
- انتخاب سیستم ابزار دهی به منظور رفتار نگاری
- تغییرات راهنما در حالت ناپایداری

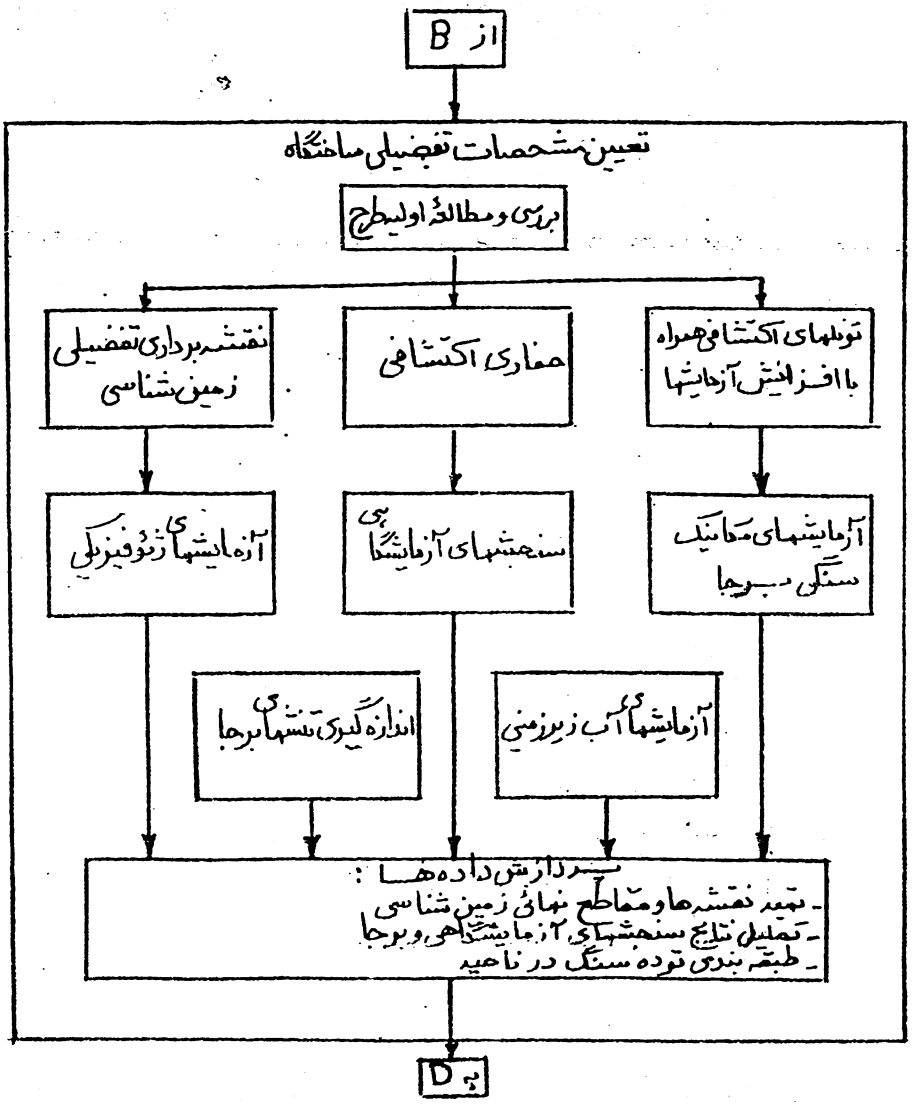
روند طراحی ساده برای فضاهای معدنی و تونلسازی





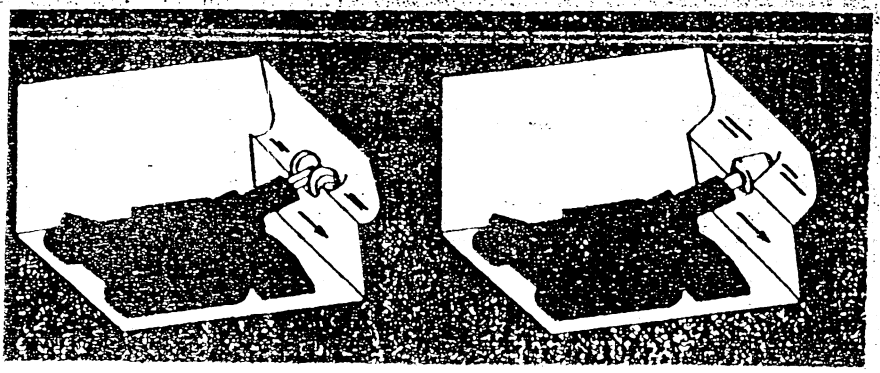
مراحل و شیوهٔ طراحی تونل


از A
مطالعات امکان سنجی
طبقه بندی مهندسی سنگ در هر ناحیه
استفاده از طبقه بندی مهندسی سنگ برای مقایسه وسایل نگهداری و یا اجرای فضای حفر شده با استفاده از شواهد ساختگاه با شرایط زمین شناسی مشابه
از E
دانش و تجربهٔ در دسترس مهندسین
پیش بینی و بررسی امکانپذیری
- ارزیابی بصرانی مشکلات بالقوهٔ تونلسازی
- طرح مقدماتی مقاطع تونل (قائم)
- پیشنهاد گزینه های آزمایشی روشهای احداث و نگهداری
آیا تونل با این شکل و اندازه پایدار است؟
بله
کلیهٔ تمهیدات اصلاحی ممکن را در نظر بگیرید
نه
آیا نتایج از نظر فنی و اقتصادی قابل قبول هستند؟
بله
بهترین مسیر برای طرح نهائی را انتخاب کنید
نه
این ساختگاه رد می شود
به C


از B
تعیین مشخصات تفضیلی ساختگاه
بررسی و مطالعهٔ اولیه طرح
تونلهای اکتشافی همراه با افزایش آزمایشها
حفاری اکتشافی
نقشه برداری تفضیلی زمین شناسی
آزمایشهای مکانیک سنگ و برجا
سنجشهای آزمایشگاهی
آزمایشهای ژئوفیزیکی
آزمایشهای آب زیرزمینی
اندازه گیری تنشهای برجا
پردازش داده ها :
- تهیه نقشه ها و مقاطع نهائی زمین شناسی
- تحلیل نتایج سنجشهای آزمایشگاهی و برجا
- طبقه بندی توده سنگ در ناحیه
به D

۲-۲- مقایسه رودهدرهای تاج حفار مخروطی و تاج حفار طبلکی [۱۰]

از اولین روزهای ابداع رودهدر به طور کلی دو طرح متفاوت تاج حفار (Cutting head) در اینگونه ماشینها بکار برده شده است. کارخانه های سازنده برای هر کدام مزایایی را بر میشمردند. این دو طرح عبارتند از تاج حفار مخروطی (یا مارپیچی) و تاج طبلکی (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۲- (چپ) رودهدر تاج طبلکی (راست)رودهدر تاج مخروطی

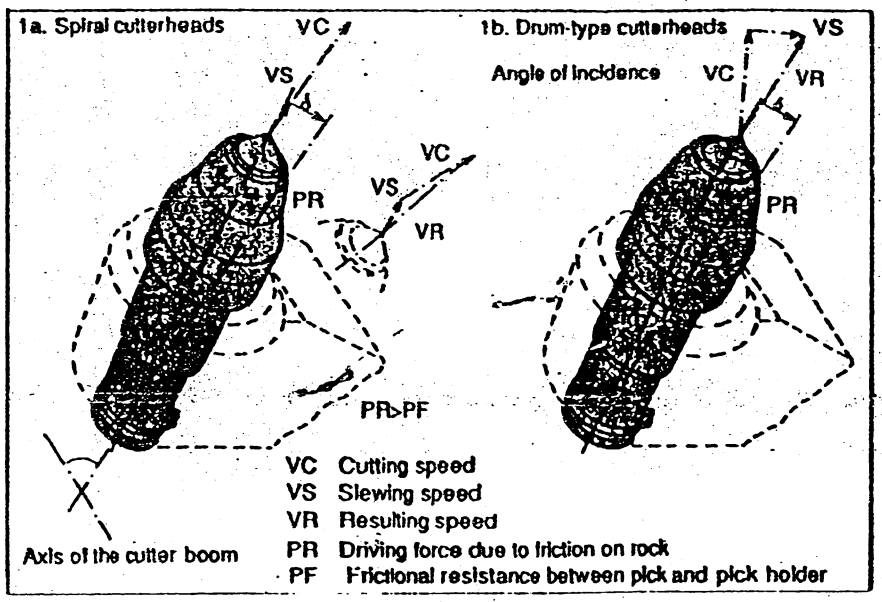
۲-۳-۱- تحلیل بردارهای سرعت‌بیت

در حین چرخش‌تاج بر روی هر یک از بیتها دو بردار سرعت‌متصور است. یکی در جهت فرو روی تاج بیت‌به داخل سنگ، که به آن بردار سرعت‌فروروی گفته میشود . (Slewing speed)، و دیگری در جهت فروروی متـه بـه داخـل سنگ، که آنرا بردار سرعت برشی (Cutting speed) مینامیم.

در تاجهای مخروطی دوران حول محور بازوی ماشین انجام میشود، بنابراین صفحه گذرنده از دو بردارمذکور عمود برمحـور بـازوی دستگـاه میباشـد(شکـل ۲-۱۸-الف) تاجهای طبلکی محور چرخش‌تاج عمود بر محور بازوی دستگاه بـوده وبردار سرعت فـروروی و سرعـت برشـی، بـردار سرعـت‌منتجـه VR را بوجـود

نسبت سرعتهای فروروی و برشی دارد.

این قسمت از سمینارکارشناسی ارشد [illegible] دانشکده فنی دانشگاه تهران آورده شده است



شکل ۲-۱۸- تاثیر شکل تاج بردینامیک‌حفر

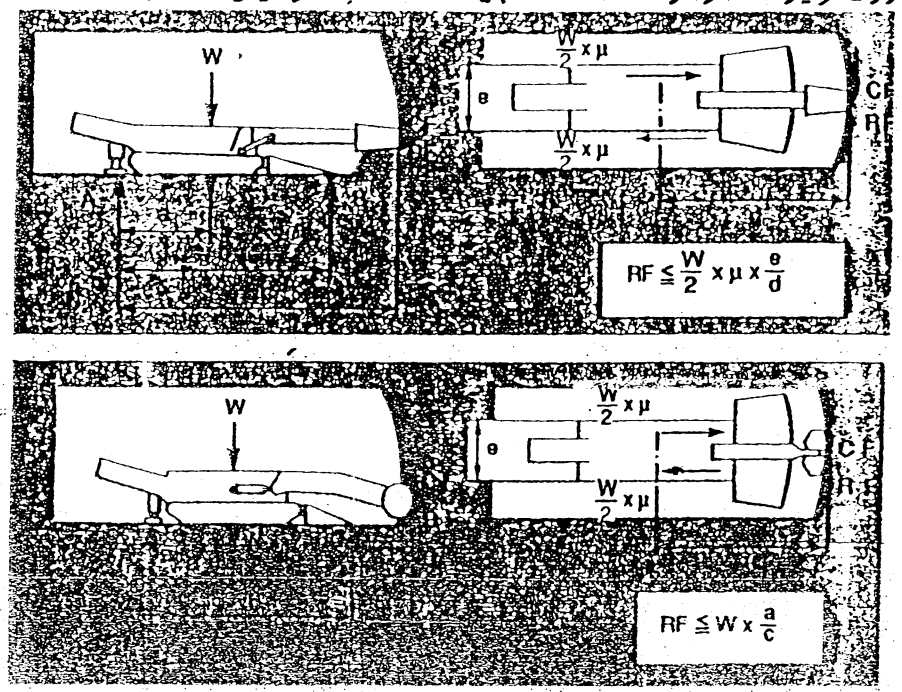
۲-۳-۲- لغزش ماشین در اثر نیروهای عکس العمل

نیروی اصطکاک‌بین کف‌تونل و چرخ زنجیری یک‌عامل موثر در کنترل تکانهای ناشی از نیروی عکس‌العمل وارد به رودهدر میباشد. به همین دلیل رودهدرهایی که توان حفر بیشتری دارند، به منظور افزایش نیروی اصطکاک ($f=W.\mu$)، باید از وزن بالاتری نیز برخوردار باشند.

همانگونه که قبلا" ذکر شد در تاج های مخروطی گشتاور عکس العمل وارد به تاج در صفحه ای عمود بر محوربازوی دستگاه وارد میشود. همین امر سبب ایجاد تکانهای شدید می شود امادر تاجهای طبلکی با توجه به اینکه جهت نیروی عکس العمل تقریبا" در امتداد قائم و به موازات راستای بازوی ماشین وارد میشود، تکانهای حاصله نیز بسیار کمتر است.

این موضوع به صورت مستدل در شکل ۲-۱۹ دیده میشود. به همین دلیل در [illegible] به و یا یک موتور محرکه [illegible] سیستم تاج طبلکی وزن دستگاه نسبت به حالتی که از سیستم تاج مخروطی استفاده میشود، کمتر خواهد بود. و یا به عبارت‌دیگر در یک‌رودهدر با وزن مشخص، سیستم تاج طبلکی قابلیت‌استفاده از موتورهای قوی تری را خواهد داشت.

بطور کلی در فرآیند حفر مقدار انرژی که از طریق هر یک‌از بیت‌ها می‌توان منتقل نمود، به دو عامل عمده سختی سنگ‌و استحکام (stabillity) ماشین بستگی دارد. بدین معنی که در حفر یک سنگ سخت هرچه انرژی پشت‌بیتها بیشتر شود، نرخ استهلاک آنها نیز به شدت افزایش می یابد. در این حال عدم استحکام دستگاه (مقاومت در برابر لرزش های شدید)، در مواجهه با نیروهای قوی عکس العمل سنگ، سبب تخریب قطعات مختلف رود هدر می شود. به هر ترتیب"انرژی ویژه" (انرژی که به هر یک از بیتها وارد میشود.) به عواملی از قبیل سرعت‌چرخش، جرم تاج و همچنین تعداد بیتهایی که در هر لحظه با سینه کار درگیر هستند، بستگی دارد. همانگونه که قبلا" گفته شد رودهدرها تاج طبلکی نسبت به نیروهای عکس العمل وارد به تاج تکانهای کمتری نشان میدهند. بنابراین با استفاده از افزایش سرعت‌چرخش و جرم تاج میتوان انرژی ویژه حفر را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.



شکل ۲-۱۹- تحلیل استحکام رودهدر (Stability) در رودهدرهای تاج مخروطی (بالا) و تاج مخروطی (پائین)

۲-۳-۳- مقایسه تفاوتهای عملیاتی رودهدرهای تاج طبلکی و تاج مخروطی

برای بررسی تفاوتهای عملیاتی تاج حفار مخروطی و تاج حفار طبلکی

می‌توان به دو طریق اقدام نمود [۳]:

الف - مقایسه نیروی حفر و مقدار تقریبی انرژی حفر بین دو رودهدر تاج مخروطی و تاج طبلکی با قدرت موتور مشابه.

ب - بررسی نتایج تجربیات عملی در مورد کارآیی رودهدرهای تاج مخروطی و رودهدرهای تاج طبلکی.

در ذیل با استفاده از نتایج مطالعاتی دو نوع رودهدر نسبتاً مشابه به مقایسه عملکرد هر یک می پردازیم:

جدول ۲-۲- مشخصات دو نوع رودهدر تاج مخروطی و تاج طبلکی

مشخصات	رودهدرتاج مخروطی	رودهدرتاج طبلکی (AM 100/300)
قدرت‌موتور تاج حفار	۳۰۰(KW)	۳۰۰KW
وزن	۱۱۰(ton)	۹۵(ton)
تعداد بیت‌ها	۱۰۵	۲X۹۹
سرعت‌برشی متوسط(V)	۱/۵(m/s)	۲/۸(m/s)
نیروی حفر در حرکت افقی	۲۰۰(KN)	۸۵(KN)
نیروی حفر در حرکت روبه بالا	۲۰۰(KN)	۳۰۰(KN)
نیروی حفر در حرکت روبه پائین	۲۰۰(KN)	۲۲۵(KN)
عرض‌دستگاه (e)	۳/۶(m)	۳(m)
طول دستگاه (c)	۱۳/۵(m)	۱۲(m)
ارتفاع دستگاه (h)	۲/۷(m)	۱/۸۵(m)
فاصله مرکز ثقل تامحور تاج(d)	۵(m)	۴/۵(m)
فاصله مرکز ثقل تاجکهای نگهدارنده(a)	—	۶(m)

۲-۲-۳-۱- مقایسه عددی مشخصات مکانیکی:

جدول ۲-۲ حاوی اطلاعات تکنیکی دو نوع رودهدر با مشخصات مشابه یکی با تاج حفار طبلکی و دیگری با تاج حفار مخروطی می‌باشد. با استفاده از این

جدول به مقایسه این دو نوع رودهدر می‌پردازیم.

حداکثر نیروی قابل اعمال از رودهدر تاج مخروطی مندرج در جدول ۲-۲ با استفاده از فرمول زیر، و با در نظر گرفتن شکل ۲-۱۹- الف قابل محاسبه می‌باشد.

$$Fmax = W.\mu.\frac{e}{2}:\frac{1}{d}$$

با فرض : $\mu = 0.8$

آنگاه : $Fmax = 317\ KN$

μ، ضریب اصطکاک بین چرخ زنجیری و کف کارگاه می‌باشد.

از طرفی با توجه به توان اسمی موتور تاج حفار مخروطی، N، و سرعت متوسط آن، V، می‌توان نیروی اسمی را بدست آورد:

$$F = \frac{N}{V} \qquad (۲-۱۰)$$

$F = 200\ KN$

بنابراین "پایداری" دستگاه (Stability) را با نسبت $\frac{Fmax}{F\ اسمی}$ نشان می‌دهیم که در این حالت برابر است با :

$$F\ اسمی = \frac{317KN}{200KN} = 1.59$$

اگر مشخصات رودهدر تاج حفار طبلکی جدول ۲-۲ را در نظر بگیریم با توجه به شکل ۲-۱۹-ب - حداکثر نیروی قابل اعمال از تاج حفار با فرمول ذیل محاسبه می‌گردد.

$$F = W.\frac{a}{a+d} \qquad (۲-۱۱)$$

$Fmax = 407\ KN$

در این حالت نسبت پایداری دستگاه برابر است با :

$$\frac{F_{max}}{F} = 3.8$$

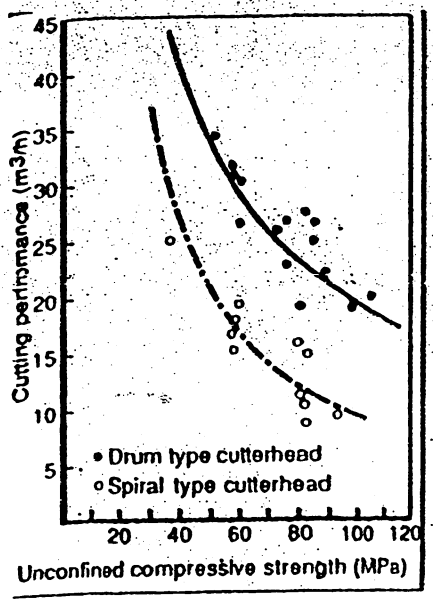
بنابراین با توجه به نسبت پایداری در دو نوع ماشین یاد شده می‌توا
نتیجه گرفت که رودهدر تاج طبلکی نسبت نوع مشابه تاج مخروطی ، د
مقابل جابجایی بر اثر نیروی عکس العمل ، دارای پایداری بیشتر
می‌باشد.

۲-۳-۳-۲- مقایسه عملکرد کارگاهی

این مقایسه بر مبنای بررسی توانایی های اجرایی یک رودهدر تاج مخروط
با توان اسمی ۲۳۰ کیلو نیوتن ، و یک رودهدر تاج طبلکی با توان اسم
۲۵۰ کیلو وات (Alpine Miner AM100) در ناحیه ذغالی سار (Saar) آلمار
، با شرایط مشابه زمین ساختی ، انجام گرفته است.

۲-۳-۳-۲-۱- توان حفر

با توجه به نتایج بدست آمده از اندازه گیری ها در شکل ۲-۲۰، مشاهد
می‌شود که نرخ حفر در رودهدر تاج طبلکی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از
رودهدر تاج مخروطی می‌باشد، که با افزایش مقاومت فشاری سنگ‌ایز
اختلاف نیز زیادتر می‌شود.
بنابراین به طور مثال برای مقاومت تراکمی تک محوری ۸۰ مگاپاسکال،
توان حفر رودهدر تاج طبلکی ۲۳ مترمکعب‌برساعت‌و توان حفر رودهدر تاج
مخروطی ۱۲ مترمکعب‌برساعت بدست خواهد آمد که نسبت به یکدیگر حدود
۱۰۰٪ اختلاف دارند.



شکل ۲ـ۲۰- مقایسه نرخ حفر در رودهدرهای تاج طبلکی و مخروطی مورد آزمایش

۲-۲-۳-۲-۲- استهلاک‌بیت

مقدار استهلاک‌بیت‌ها در دونوع ماشین مذکور، در ارتباط بامقدار سختی سایشی ،در شکل ۲ـ۲۱ آورده شده است معادله خطوط رگرسیون در این شکل به صورت ذیل میباشد.

تاج حفار طبلکی

$$Cp = 0.76 \cdot F^{0.39}$$

تاج حفار مخروطی

$$Cp = 0.96 \cdot F^{0.56}$$

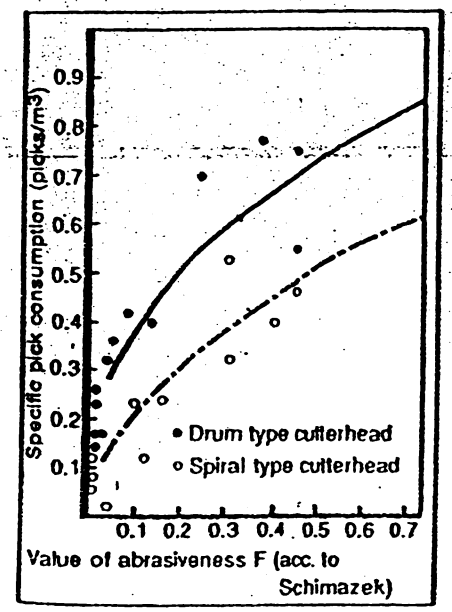
به طوریکه : استهلاک ویژه بیت

CP = (تعداد ناخن/m3)

F = (Schimazek) مقدار سختی سایشی در مقیاس شیمازک

با نگاهی به شکل ۲ـ۲۱ دیده میشود که مقدار استهلاک ویژه برای بیت‌ها در تاج طبلکی از تاج مخروطی بیشتر میباشد، به طوریکه برای F=0.4 ، مقدار استهلاک ویژه بیت‌های تاج طبلکی ۵۰٪ بالاتر از تاج مخروطی است.

۱۶۸/
۵۲



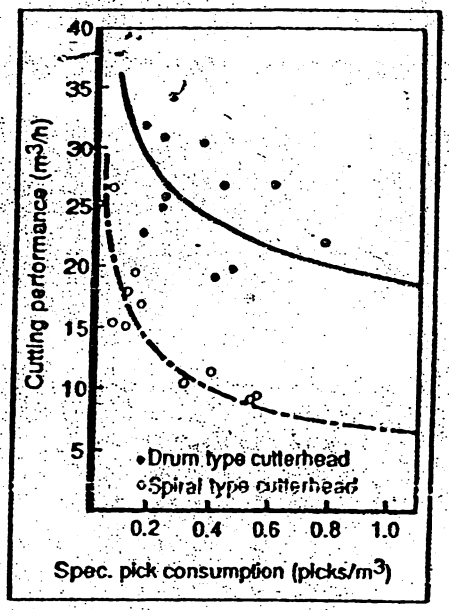
شکل ۲-۲۱- مقایسه مصرف‌ویژه بیت‌در رودهدرهای تاج طبلکی و مخروطی مورد آزمایش

از یک نگاه دیگر می‌توان مقدار استهلاک ویژه بیت‌ها را در ارتباط با توان حفر دستگاه بررسی کرد. همانگونه که از شکل ۲-۲۲ مشهود است، برای مقدار مشخصی از استهلاک‌ویژه بیت‌ها، توان حفر تاج طبلکی بیش از دو برابر تاج مخروطی است.

معادلات‌رگرسیون در این منحنی به صورت‌زیر می‌باشند:

$$\frac{19.13}{Cp\ 0.24} = \text{تاج حفار طبلکی}$$

$$\frac{8.16}{Cp\ 0.33}$$



شکل ۲-۲۲- مقایسه نرخ حفر در ارتباط با مصرف‌ویژه بیت در رودهدرهای تاج طبلکی و تاج مخروطی مورد آزمایش

۲-۳-۳-۲-۵کیفیت بارگیری سنگهای خرد شده

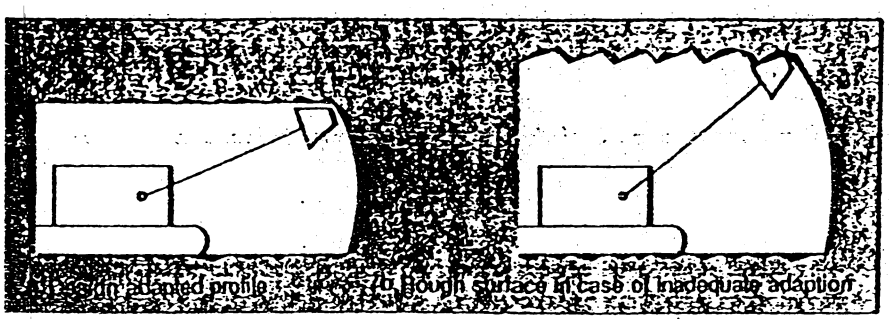
در رودهدرهای دارای تاج طبلکی ، جهت چرخش تاج به گونه‌ای است که درصد عمده سنگهای خرد شده توسط پاروهای جمع کننده دستگاه، به سهولت بارگیری می‌شوند. اما در رودهدرهای تاج مخروطی ، به علت جهت چرخش تاج مقداری از سنگهای خرد شده در خارج از محدوده سینی جمع کننده مواد ریخته و این امر لزوم بارگیری مجدد را اجتناب‌ناپذیر خواهد کرد.

۲-۳-۳-۶-شکل دهی مقطع طولی تونل

صاف بودن جداره تونل عامل مهمی در کیفیت و سهولت نصب وسایل نگهداری می باشد. اصولا" رودهدرهای تاج مخروطی، به علت‌شکل هندسی تاج حفار، در ایجاد یک سطح صاف‌در جداره تونل قابلیت بسیار بالایی دارند. اما نکته‌ای که در این مورد باید به آن توجه شود، نسبت‌ارتفاع تونل به طول بازوی رودهدر تاج مخروطی است. اگر ارتفاع تونل نسبت‌به

(شکل ۲-۲۳). در رودهدرهای تاج طبلکی ایجاد یک سطح عمودی از تقرس بسیار مشکل می‌باشد. و حتی با استفاده از ماهرترین اپراتورها

نیز، حداقل ۱۰-۵ سانتیمتر تفرس در جداره تونل بوجود خواهد آمد.



شکل ۲-۲۳- توانایی رودهدرهای تاج مخروطی در ایجاد سطح صاف در تونل

۲-۳-۳-۲-۳تولید گرد و غبار

یکی از مشکلات مهم کار با دستگاههای حفار بازویی تولید گرد و غبار در حین کار میباشد. به طور کلی مقدارگرد و غبار حاصله به عوامل زیر بستگی دارد:

- توان حفر ماشین
- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ
- شرایط زمین شناسی از قبیل رطوبت و لایه بندی
- شکل و محل سائیدگی بر روی بیت‌ها
- کارآیی سیستم آب‌پاش

از آنجا که تاج های طبلکی دارای سرعت چرخش بالاتری هستند، بنابراین مقدار گرد و غبار تولید شده نسبت به تاج های مخروطی نیز بیشتر خواهد بود.

۲-۳-۳-۳-۲حفاری در سینه کارهای دارای لایه بندی

تیپ شاخص این سینه کارها، سنگهای رسوبی میباشند. در چنین ساختارهایی لایه‌های مختلف از نظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و ضخامت دارای تنوع

زیادی هستند. این لایه‌ها عموما" چین خوردگی و گسلهایی نیز دارند. از طرفی حتی در سینه کاری با یک سنگ‌مشخص نیز احتمال تغییرات قابل توجه در مقاومت‌سنگها وجود دارد. در هر صورت‌چنین شرایطی می‌تواند برای رودهدرها مشکل آفرین، و باعث‌کاهش سرعت‌حفر، شود.

به علت شکل مخروطی تاج، بازوی رودهدرهای تاج مخروطی در همه قسمتهای سینه‌کار با انعطاف‌پذیری بسیار خوبی کار می‌کند. بنابراین با استفاده از برش‌لایه‌های نرم‌تر، سطح اتکای لایه‌های مقاومتر را از بین برده، و باعث سهولت در حفر بخشهای مقاوم می‌شود. اما قابلیت انعطاف در رودهدرهای تاج طبلکی به علت شکل تاج نسبتا" ضعیفتر و بنابراین در استخراج انتخابی سینه کار نیز کارایی کمتری دارد ولی در عین حال در هنگام برخورد با لایه‌های مقاوم، نسبت به رودهدرهای تاج مخروطی قابلیت بالاتری دارند.

۲-٤- آبفشان (Water jet)

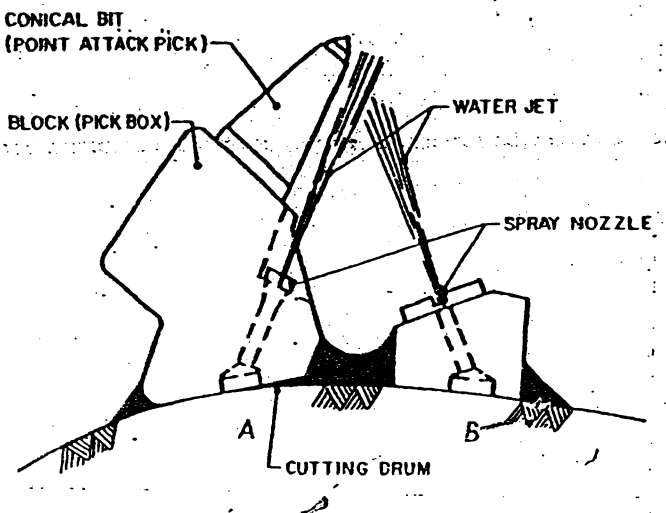
۲-٤-۱- ابداع و توسعه تکنولوژی آبفشان

ابداع آبفشان نتیجه چندین سال تجارب آزمایشگاهی و کارگاهی محققان می‌باشد. چندین سال تحقیقات پر هزینه، سبب ظهور یک‌سیستم بسیار موثر و کارآمد در افزایش‌توان حفر رودهدرها در سنگهای سخت، شد.

به طور ساده سیستم آبفشان متشکل از افشانه‌هایی (Nozzel) مستقر بر تاج برش، و یک‌پمپ‌آب‌می‌باشد. پاشش آب بر روی نوک‌بیت‌و سنگهای درگیر سبب کاهش گردو غبار، افزایش قدرت حفر رودهدر، کاهش استهلاک‌بیتها و کاهش خطرات احتمالی آتش سوزی می‌شود. آبفشانها را می توان به سه دسته کلی تقسیم کرد [4]:

۲-٤-۱-۱- نسل اول، آبفشان کم فشار: برای مدت ده سال پس از ابداع آبفشان این نوع از آبفشان ها در رودهدرهای انگلیسی مورد استفاده قرار می گرفت. فشار آب در این نوع (نسل اول) به حدود ٤-bar می‌رسید و بطور

عمده سبب‌کاهش گرد وغبار و خنک کردن نوک الماسه بیت‌ها (p of bit Carbide) افزایش عمر آنها می‌شد (شکل ۲-۲٤).

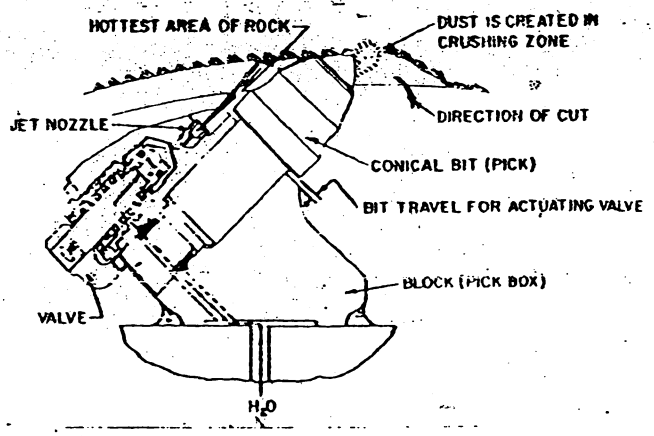


شکل ۲-۲٤- نسل اول آبفشان، آبفشانهای کم فشار با دو افشانه (zzel

نسل اول آبفشانها تاثیر قابل توجهی در افزایش قدرت حفر رودهدره نداشت. این آبفشانها آب را به جلوی بیت ها می‌پاشیدند و از این جهـ در کنترل جرقه‌های پشت‌بیت‌و خطرات آتش‌سوزی (در سنگهای گازدار) ناتو می‌نمود.

۲-٤-۱-۲- نسل دوم، آبفشان فشار متوسط : در این نوع آبفشانها فشار بین ۱۵۰-۲۰۰bar می‌باشد.

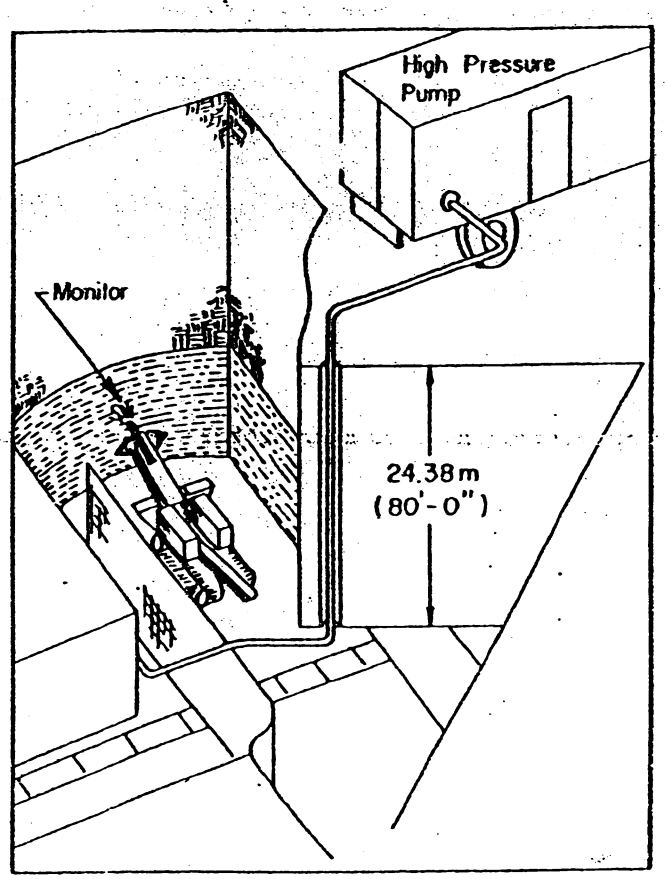
کمپانی های Voest-Alpine در اتریش و GmbH در آلمان، سیستمی را ابـ کرده‌اند که در آن آبفشان درای یک‌شیر قطع و وصل بر سر مسیر آب می‌با این شیر بر روی پایه بیت‌سوار، و هرگاه نوک بیت با سنگها برخـ می‌کند این شیر باز، و عمل پاشش آغاز می‌شود. به این ترتیب‌از ضرو اضافی غیر از زمان درگیری بیتها با سنگ جلوگیری به عمل می‌آید. مقـ مصرف آب در این سیستم به ازاء هر بیت‌حدود ۳۰-٤۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد (شکل ۲-۲۵).



شکل ۲-۲۵- نسل دوم آبفشان ، آبفشانهای فشار متوسط باشیر قطع و وصل ضربه‌ای

شکل ۲-۲۵ یک نمونه از بیتهای شیردار را نشان میدهد. آزمایشهایی که بر روی این نوع بیت انجام گرفت حاکی از آن بود که بدلیل برخورد آب به پشت‌بیت، داغ شدگی قطعات‌سنگ و ایجاد جرقه کاملا" کنترل شده. همچنین ۸۳/۹٪ از میزان گردو غبار، و ۹۲/۱٪ از میزان تجمع گل و خاک بر روی تاج حفار ، کاسته شده است.

اگر چه نتایج آزمایشگاهی بسیار جالب توجه بود، اما عملکرد کارگاهی این سیستم در معادن ذغال "فردریش هینریش" (Freidrich-Heinrich) انتظارات‌اولیه را برآورده نکرد. مهمترین مسئله قیمت تمام شده بسیار بالا بود. هر بیت شیر ضربه‌ای قیمتی معادل ۲۹۵ دلار داشت بنابراین قیمت تاج حفار یکرودهدر AM100 (Alpine Miner) با ۱۹۸ قطعه بیت آبفشان دار، معادل ۱۱۴۰۰۰ دلار میشد، بدون اینکه افزایش‌قابل توجهی در قدرت حفر رودهدر بدست‌آمده باشد.



شکل ۲-۲۶- طرح شماتیک رودهدر با آبفشان فشار قوی ، مورد استفاده در بروستون پنسیلوانیا

۲-٤-۱-۳- نسل سوم ،آبفشان فشار قوی : این نوع از آبفشانها به منظور دسترسی به خصوصیات زیر ابداع شد:

۱- کاهش گرد وغبار و خطرات آتش سوزی (در تود، های دارای گاز متان)

۲- کاهش استهلاک بیت ها

۳- افزایش قدرت حفر و سرعت پیشروی بدون نیاز به افزایش قدرت موتور تاج حفار

٤- افزایش توانایی ماشین در حفر سنگهای سخت تر بدون نیاز به افزایش وزن ماشین.

۵- کاهش هزینه استخراج هر متر مکعب سنگ ($/m3)

برای بررسی مواردفوق در طرح مورد ارزیابی قرار گرفت، اولین طرح در یک

معدن ذغال در بروستون پنسیلوانیا (Bruceton,Pennsylvania) با استفاده از یک‌رودهدر تاج طبلکی ۱۰ تن ، با قدرت‌موتور ۳۳ کیلووات انجام شد، که در آن آب فشار قوی از یک پمپ‌سه مرحله‌ای با دبی ۸۰ لیتربردقیقه و فشار ۷۰۰bar تامین می‌شد. این آبفشان نرخ حفاری را تا ۲ برابر افزایش‌داده و باعث کاهش گرد و غبار تا ۷۰٪ و به میزان ۲ میلی گرم برمترمکعب‌شد.

تحقیقات‌آزمایشگاهی که در آمریکا بر روی انواع سنگ‌و ذغال انجام شده حاکی از آنست‌که بهترین نتایج استفاده از آبفشان در فشارهای بین ۲۴۰۰-۷۰۰bar حاصل می‌شود. همچنین این تحقیقات‌نشاندهنده آنست که با استفاده از جت‌آب در بیت‌های مخروطی می‌توان تا حدود ۶۰٪ از نیروی نرمال بیت کاست.

بر مبنای این آزمایشات می‌توان مقایسه‌ای بین یک‌رودهدر ۷۰ تن (با قدرت موتور تاج ۲۰۰ کیلووات) و یک رودهدر ۲۸ تن با آبفشان فشار قوی (وقدرت‌موتور تاج ۹۰ کیلووات) انجام داد. در این حالت رودهدر آبفشان دار با وزن و قدرت موتور کمتر (وبالطبع با صرف هزینه سرمایه‌ای کمتر) دارای قدرت حفری برابر با رودهدر ۷۰تن می‌باشد. در حال حاضر یک رودهدر ۷۰ تن با قیمتی در حدود ۸۰۰،۰۰۰ دلار دارد، در حالیکه یک رودهدر ۲۸ تن با قیمتی در حدود ۳۸۰۰۰۰ دلار فروخته می‌شود. به هر حال با استفاده از این نوع آبفشان به طور متوسط هزینه حفر هر متر تونل تا ۴۰٪ کاسته می‌شود.

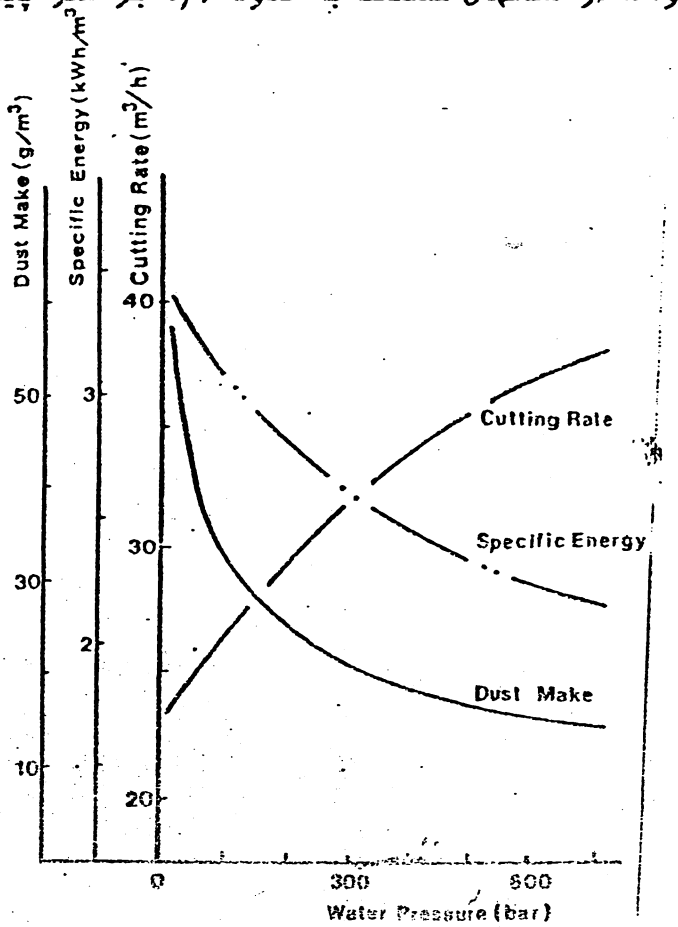
طرح دیگری که مورد بررسی قرار گرفته در سنگهای آهکی میدلتون در بی‌شایر (Middleton, Derbyshire) در انگلیس و به توسط یک رودهدر تاج مخروطی Dosco MK2A (در رده رودهدرهای سبک) با قدرت موتور ۴۸/۵ کیلووات، مجهز به یک آبفشان با فشار ۷۰۰bar، بود. تاج حفار این رودهدر با ۴ آبفشان با دبی ۴ لیتربردقیقه برای هر افشانه ، تجهیز شده بود. در شرایط معمول رودهدر Dosco MK2A برای کار در سنگهایی با مقاومت کمتر از ۷۰ مگاپاسکال مناسب می‌باشد، اما باتصب این آبفشان رودهدر قادر به حفر سنگهای آهکی با مقاومت ۱۲۷-۱۰۸ مگاپاسکال شد. ضمنا" مقدار مصرف بیت نیز در حد متعارف بوده. تاثیر مجموعه نصب آبفشان مستقیما" در

۱۷۶

کاهش لرزش دستگاه (که تاثیر مستقیم بر تخریب قسمتهای مختلف ماشین میگذارد) نیز مشاهده میشد [۵].

با توجه به بررسی های انجام شده بر روی رودهدرهای آبفشان دار (تا فشار ۷۰۰bar) (شکل ۲-۲۷) مشاهده میشود که انرژی ویژه حفر به طور متوسط حدود ۳۲٪ کاهش، و میزان پیشروی در سنگهای متوسط تا سخت به طور متوسط حدود ۵۰٪ افزایش داشته است.

همانطور که در این شکل دیده میشود گرد و غبار حاصله در فشار آب بین ۲۰ تا ۴۰bar به شدت کاهش مییابد به طوری که در فشار ۹۰bar تا حدود ۵۰٪ از گرد و غبار کاسته میشود. مقدار مصرف بیت نیز بسیار کاهش یافته و به طور متوسط در سنگهای مختلف به حدود ۶/۰ بز متر پیشروی رسیده است[۵].



شکل ۲-۲۷- بهبود ذرات ین رودهدر با استفاده از آبفشان فشار قوی [۵]

۲-۴-۲- تشریح عملکرد آبفشان

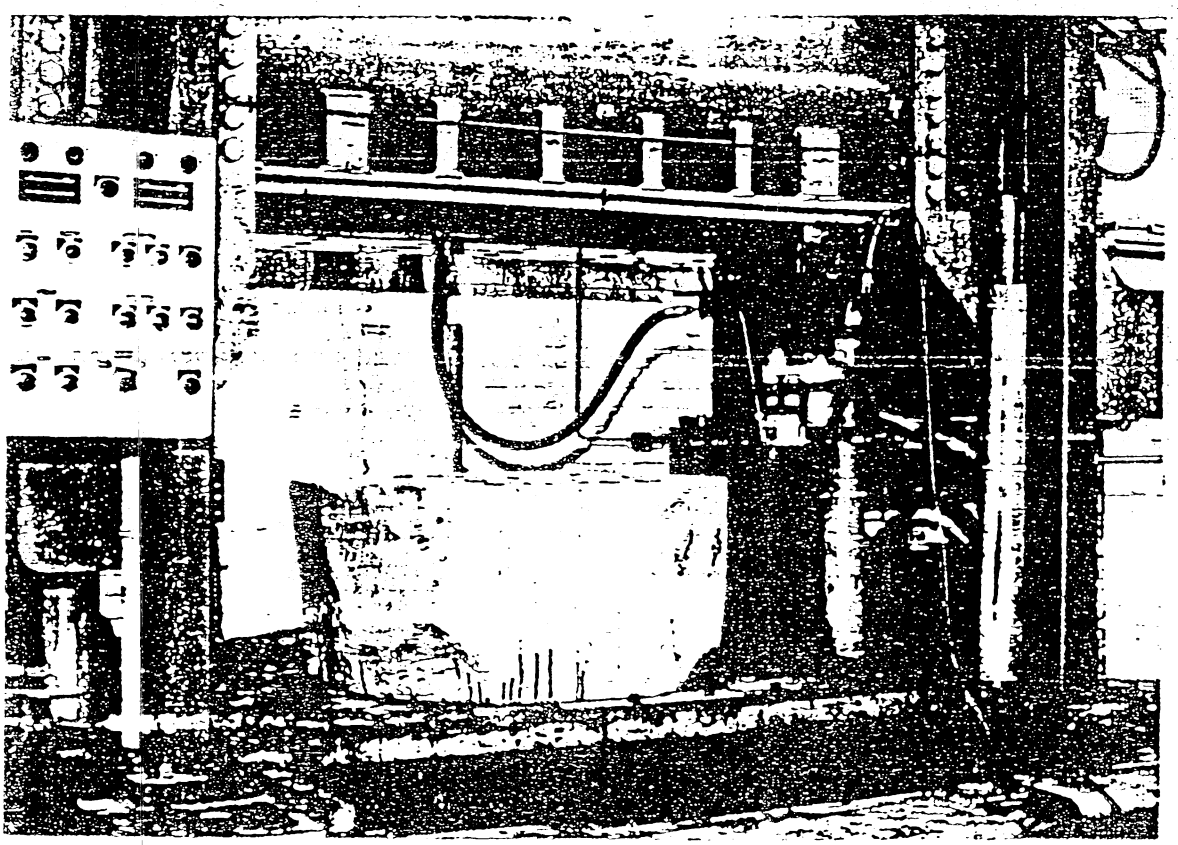
در چند دهه اخیر موسسات تحقیقاتی مختلف به منظور بررسی دقیق

تاثیرات‌کاربرد آبفشان در حفر سنگها (برش‌سنگ) تستهای آزمایشگاهی و بعضاً کارگاهی فراوانی ترتیب داده‌اند در این آزمایشها تغییرات پارامترهایی نظیر نیروهای وارد بر پیت، درجه حرارت اصطکاکی ،و میزان گرد و غبار تولید شده و عوامل دیگر مد نظر قرار می‌گیرند.

در آزمایشگاههای تحقیقاتی وسایل و تجهیزات مختلفی برای شبیه سازی آبفشانها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تجهیزات ضمن شبیه سازی عمل حفر سنگ، قادر به اندازه گیری پارامترهای موثر در حفر که بدان اشاره شد نیز هستند. شکل ۲-۲۸ یک نمونه از این دستگاهها را نشان می‌دهد. در این دستگاه حرکت‌خطی یک‌قطعهٔ بیت‌سبب‌حفر (برش) سنگ‌و ایجاد یک شیار بر آن می‌شود و در همان حین پارامترهای مورد نظر اندازه گیری و ثبت می‌شوند.

ذیلاً نتایج حاصل از اینگونه آزمایشات مورد بررسی قرار می‌گیرد:

بکار بردن آبفشان همراه با بیت‌دو تاثیر مهم به همراه دارد. اول آنکه سبب سهولت‌بیشتر شکست‌سنگ‌شده، و در نتیجه برای حفر یک‌سنگ‌مشخص نیروی کمتری به پشت‌بیتها وارد شده و توان مصرفی نیز کاهش‌می‌یابد، بنابراین می‌توان با کم کردن سرعت‌خطی بیتها گامی در جهت کاهش‌حرارت اصطکاکی برداشته و به این ترتیب‌به عمر مفید بیتها افزود. دومین تاثیر کاربرد آبفشان تاثیر خنک‌کنندگی سطح درگیر سنگ‌و بیت می‌باشد. بنابراین با خنک‌نگه داشتن دمای بیت‌کمک‌موثری در تقلیل استهلاک‌بیت‌ها می‌شود. [۸]

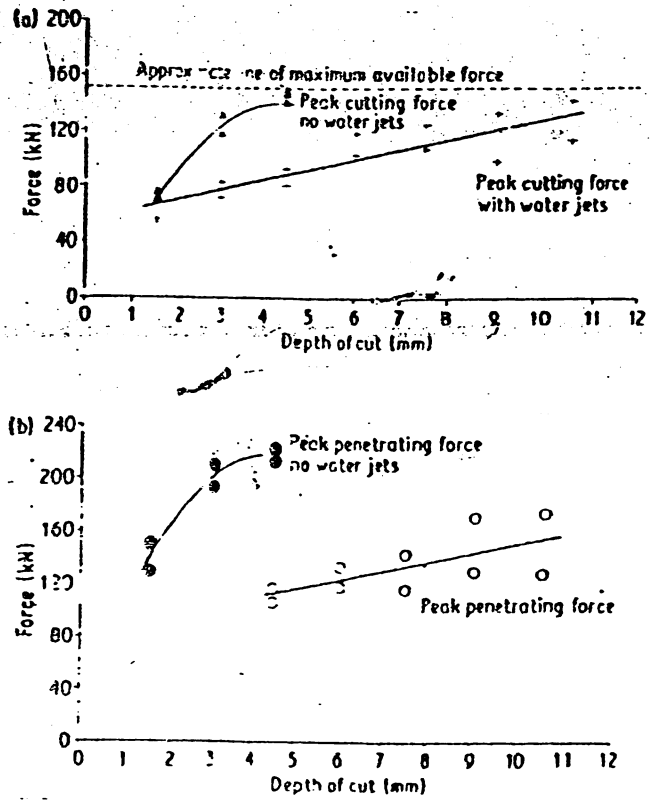


شکل ۲-۲۸- دستگاه برش‌شیاری سنگ، مجهز به ابفشان[۷]

۲-٤-۲-۱- تاثیر آبفشان در تقلیل نیروی پشت‌بیت

نتایج آزمایشهای انجام شده (Hood 1978) بر روی سنگهای متوسط تا سخت نشانگر آنست که با کاربرد آبفشان با فشار حدود ۷۰مگاپاسکال ، نیروی وارد بر پشت‌بیت به میزان قابل توجهی تقلیل می‌یابد. در تستهای آزمایشگاهی که بر روی توریت انجام گرفته میزان نیروهای قائم و مماس نوک بیت در مقابل عمق فرو روی بیت به داخل سنگ اندازه گیری و ثبت‌شده است.

همانگونه که از شکلهای ۲-۲۹- الف- مشخص است، تاثیر آبفشان در تقلیل نیروی قائم بسیار بیشتر از نیروی مماسی می‌باشد. لازم به ذکر است که عامل اصلی ایجاد ترک و شکست در بیت نیز همان نیروهای قائم هستند. مشابه این آزمایش آزمایشهایی نیز توسط محققان دیگر (Ropchan, Wang & Wagamott, 1980; Dubughon, 1981; Tomlin, 1982) انجام شده است. همگی این آزمایشات نشان از آن دارند که با کاربرد آبفشان نیروی وارد به پشت‌بیت حدود ۲۵-۴۰٪ تقلیل یافته است[۶]. در حقیقت قطعات خرد شده و نیمه شکسته سنگ که در مقابل نوک الماسه بیت قرار دارند، مانع انتقال کامل نیرو به سنگ می‌باشند. فشار آبی که توسط آبفشان به این قطعات وارد می‌شود سبب جابجایی آنها و در نتیجه سهولت در فرآیند حفر می‌شود [۷].



شکل ۲-۲۹- نیروهای وارد به بیت با آبفشان و بدون آبفشان[۶]

(الف) نیروی قائم بر بیت

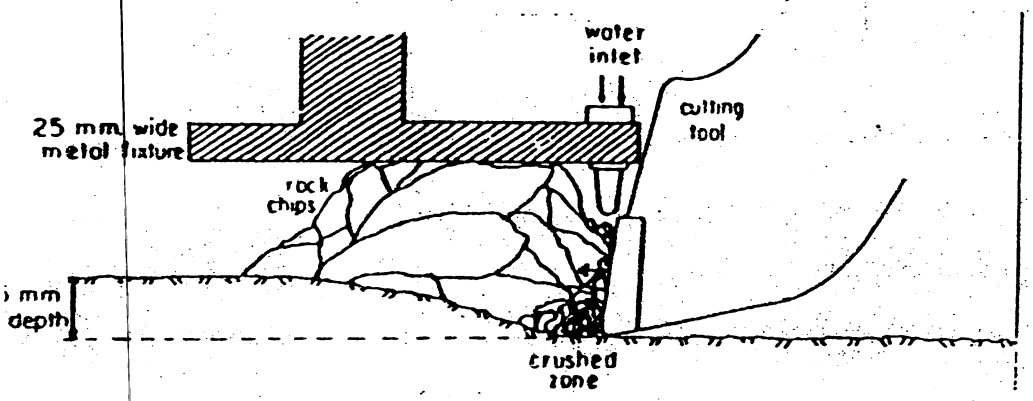
(ب) نیروی مماس بر بیت

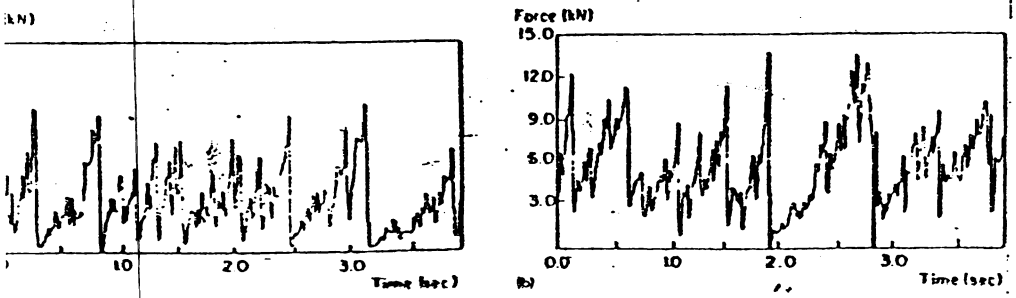
با در نظر گرفتن مکانیزم شکست می‌توان تاثیر آبفشان در تقلیل نیروهای وارد بر بیت و افزایش راندمان حفر را با دلایل زیر توصیف نمود:

۱- همانطونه که میدانیم شکست سنگ به توسط بیت، با ایجاد ترکهای ریز اولیه آغاز میشود و به تدریج با افزایش فشار وارد از بیت این ترکها گسترش یافته و منجر به جدا شدن قطعات سنگها می شود. اما حضور آبفشان و نفوذ فشار آب به درون ترکهای تولید شده سبب گسترش سریع این ترکها و همچنین جدا شدن آنها میشود. به این

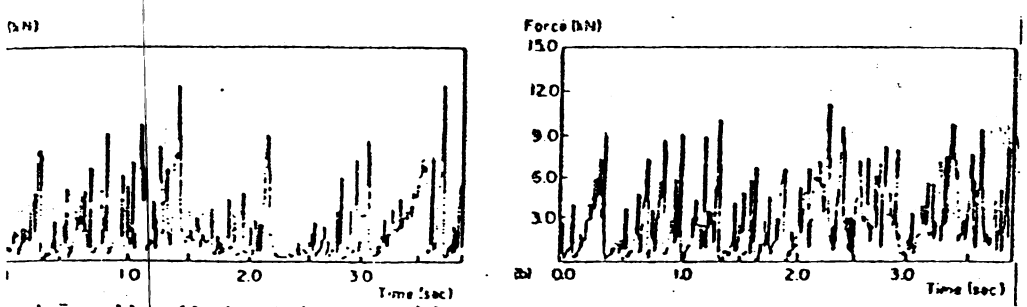
۲- پاکسازی قطعات خرد شده : باقی ماندن قطعات خرد شده سنگ در مقابل بیت سبب انتشار تنش های وارده در یک سطح بزرگتر و تعدیل آنها می‌شود. بنابراین برای شکست سنگ در این مرحله لازم است تا نیروی بیشتری از طریق بیتها وارد شود. اما فشار آبی که توسط آبفشان به این قطعات وارد می‌شود سبب جابجایی آنها و در نتیجه سهولت در فرآیند حفر می‌شود.[۷]

برای بررسی این موضوع آزمایشی تزتیب داده شده که در آن نیروی وارد بر بیت در دو حالت ، همراه باپاکسازی بیت و بدون پاکسازی قطعات، با استفاده از آبفشان وبدون استفاده از آبفشان، اندازه‌گیری شده است[۶].





الف - نیروی مورد نیاز بدون استفاده از آبفشان :(a) با پاکس
قطعات(b) بدون پاکسازی قطعات.



ب - نیروی مورد نیاز با استفاده از آبفشان : (a) باپاکسازی قطعـ
(b) بدون استفاده از قطعات.

شکل ۲-۳- تاثیر پاکسازی قطعات از مقابل بیت [۶]

۲-۴-۲-۲- تاثیر آبفشان در تقلیل حرارت اصطکاکی :

کاهش درجه حرارت بیت عامل بسیار مهمی در تقلیل سایش و شکستگی آن است
در حفاری با استفاده از آبفشان کاهش

افزایش عمق فرو روی بیت‌درون سنگ، و افزایش توان حفر پدید می‌آید. حرارت‌بیت با عمق فرو روی در سنگ‌رابطه مستقیم دارد) بنابر این با استفاده از آبفشان و کاهش درجه حرارت‌بیت‌امکان افزایش عمق فرو روی بیت‌درون سنگ، و افزایش توان حفر ، پدید می‌آید. [۶]

تحقیقات انجام شده (Cook 1982) نشان می‌دهند که حضور آبفشان ضمن کنترل درجه حرارت اصطکاک، عامل مهمی در امکان افزایش سرعت تاج می‌یافد. در شکل ۲-۳۱- تاثیر آبفشان در کنترل انتقال حرارت‌به بیت‌دیده می‌شود. [۶]

کنترل حرارت‌اصطکاکی از جنبه ایمنی در توده‌های گازدار نظیر معادن ذغال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چرا که افزایش‌درجه حرارت تا حد بالاتر از حد مجاز محیطهای گازدار و ایجاد جرقه‌های ناشی از آن ، سبب بروز خطرات جدی آتش‌سوزی می‌شود. بنابراین بکارگیری آبفشان در چنین محیطهایی بسیار حیاتی می‌باشد. [۶]

به طور خلاصه با توجه به توضیحاتی که در دو بند گذشته ذکر شد، می‌توان نتیجه گرفت تاثیر آبفشان در تقلیل نیروهای وارد بر بیت و حرارت اصطکاکی سبب افزایش توان حفاری رودهدرها و کاهش هزینه‌های سرمایه گذاری (به دلیل کوچکتر شدن رودهنرها) و هزینه‌های عملیاتی از قبیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری (به خصوص هزینه مصرف‌بیت) شده است.

فصل هفتم

روشهای تونلسازی؛ شرایط سنگی برای استفاده از ماشینهای حفر تونل (TBM)

مقدمه

در جریان توسعه و پیشرفت تونلسازی مکانیزه معلوم شد که مقاومت سنگ عامل محدود کننده اصلی در حفر توسط ماشین است. ابداع ماشینهای حفر تونل (TBMها) که با برش دهنده های دیسکی[1] سنگو مناسبی تجهیز شده، شاید تنها پیشرفت عمده صورت گرفته در روند مکانیزه کردن تونلسازی بوده است. این ماشینها به میزان زیادی حوزه کاربرد تونلسازی برای دستیابی به نرخهای بالاتر پیشروی و همچنین در شرایط سنگی سخت تر، که قبلاً خارج از حیطه عملکرد ماشینها بود، را افزایش داده است.

ماشینهای حفر تونل: حفر سنگ توسط ابزاری که بر روی برخی از ماشینهای تونلسازی نصب شده بود، در قرن نوزدهم به عنوان یکی از گامهای مهم در راستای پیوسته کردن عملیات حفر تونل تشخیص داده شد. این عمل یعنی نصب ابزار برنده بر روی ماشینهای تونلسازی، اولین بار توسط Colonel Beaumont در دهه ۱۸۸۰ انجام شد. این ماشین برای اولین بار برای حفر تونلی در زیر رودخانه Hersey با قطر ۲٫۱۳ متر بکار گرفته شد و به نرخ پیشروی ۳۵ متر در هفته دست یافت. این نوع ماشینها برای حفر تونل پیشرو، در تونل Channel به طول یک مایل در زیر دریا که از ساحل شروع گردید، بکار گرفته شدند و توانستند به نرخ پیشروی ۱۵ متر در روز در چالک[2] دست یابند. ماشین Beaumont برای چرخاندن تاج حفار یا پیشانی برشی[3] که با سرمته های چنگلی[4] تجهیز شده بود، از هوای فشرده استفاده می کرد.

علیرغم این که این تجربه توانائی عمده حفر تونل توسط ماشینهای حفار را بخوبی نشان داده، ولی ابعاد قضیه تا اواسط دهه ۱۹۵۰ بطور کامل روشن نشد تا این که James S. Robbins ماشینهای را عرضه کرد قادر به حفر تونلهائی عریضتر در سنگهای سخت تر و در شرایط زمین شناسی مشکل بودند.

1-disc cutter ; 2-chalk ; 3-cutting head ; 4-drag bit

موفقیت عمده‌ای در سال ۱۹۵۴ در حفر تونل انحراف آب سد Oahe در داکوتای جنوبی با ماشینهای تونلزنی رابینز به دست آمد. این تونل با قطر ۷/۱۸۵ متر در شیلهای سست و بسیار درزه دار با مقاومت ۱/۱۴ تا ۲/۱۸ مگاپاسکال و با نرخ پیشروی ۴۳ متر در روز حفر گردید. در Tronto با استفاده از این ماشینها در میان سنگهای رسوبی سخت با مقاومت ۵۰ تا ۱۹۰ مگاپاسکال، تونلی با قطر ۳/۲۷ متر برای فاضلاب احداث گردید. ماشینهای مورد استفاده با ۲۴ برش دهنده دیسکی چرخان و موتوری با توان ۲۵۴ کیلووات برای چرخاندن تاج حفار و نیروی فشاری یا محوری ۱۴۳ تن تجهیز شده بودند. نرخ حفر با این ماشینها ۳ متر در ساعت بود. موفقیت حاصل از حفر تونل Toronto موجب جلب توجه جهانیان و توسعه و افزایش کاربرد ماشینهای تونلسازی شد.

TBMها: پیشرفت و تجربه

همانگونه که بیان شد، عدم امکان به کارگیری روشهای مکانیزه حفر تونل در شرایط نامساعد زمین، یکی از عوامل مهم در پیشرفت این ماشینها تا سالهای ۱۹۵۰ بود و باعث شد که روند پیشرفت به سمت حفر تمام رخ تونل تا اواسط نیمه قرن بیستم بگونه‌ای صورت بگیرد.

تاریخ جدید ماشینهای تونلسازی به سال ۱۹۵۷ برمی‌گردد که James S. Robbins اولین ماشین حفر تونل در سنگهای سخت را به بازار عرضه کرد. این ماشین دارای قدرت و چثه بزرگی بود، ولی موفقیت‌های حاصل را مرهون اصلاحات انجام گرفته در جریان عمل می‌باشد. وجود میان لایه‌های سیلیسی با مقاومت ۱۴۰ مگاپاسکال در میان لایه‌های شیلی و آهکی و ترکیب برش دهنده‌های دیسکی و چنگکی نتوانست نتایج کاملاً رضایت بخشی به دست دهد، سرمته‌های چنگکی گهگاه به طور کامل کنده می‌شدند و حفر تونل فقط با برش دهنده‌های دیسکی انجام می‌شد. در مورد ترتیب قرارگیری و نوع برش دهنده‌ها اصلاحاتی صورت گرفت ولی اقدام مهم این بود که ماشین قادر بود اکنون برای ساعتها و حتی روزها بدون این که نیازی به تعویض سرمته‌ها باشد، عمل حفر را انجام دهد. قبلاً همین تعویضها در فواصل زمانی در حد دقیقه ضرورت پیدا می‌کرد. این تغییر به خوبی نشان داد که ابزار برشی قابل اعتمادی برای شرایط سنگی سخت پا به عرصه گذاشته است.

حفر با ماشین در سنگهای سخت: نگهداری و پایداری زمین از مهمترین عوامل حاکم بر موفقیت یک پروژه تونلسازی هستند، ولی وقتی تونلسازی در سنگهای سخت انجام می گیرد، مهمترین عوامل اقتصادی نرخ نفوذ[1] و هزینه های برش می باشند. برش دهنده ها معمولاً در جریان حفر سائیده می شوند، ولی در شرایط سنگی ملوکی سخت، برخی از برش دهنده ها متحمل خسارت می شوند یا حتی تحت تأثیر بارهای ضربه ای بالا که در جریان حفر با آن روبرو می شوند، بطور کامل درهم می شکنند. نرخ سائیش برش دهنده ها[2] و جایگزینی آنها بر هزینه مصرف قطعات برش دهنده ها تأثیری گذارد و تعویض آنها بر زمان عملکرد ماشین و راندمان آن تأثیر گذار است.

برش دهنده ها

یکی از عوامل مؤثر بر نرخ سائیش یا فرسودگی، خواص ساینده گی سنگ است. نرخ نفوذ در یک عملیات تونلسازی تمام رخ، تابعی از شکل هندسی برش دهنده، نیروی فشاری یا محوری ماشین و مقاومت سنگ است. جدول ۷-۱ ارتباط بین هر نوع برش دهنده و نرخ نفوذ را به صورت تابعی از پارامترهای تونلسازی فشاری آن می دهد.

از جدول ۷-۱ معلوم است که به کارگیری حفر مکانیکی در شرایط سنگی سخت تر، مستلزم افزایش نیروی فشاری یا محوری لشیت هر برش دهنده و در نتیجه افزایش کل[3] نیروی فشاری یا محوری ماشین است. این امر ایجاب می کند که مشخصات ماشین از جنبهٔ ظرفیت مکانیکی، هیدرولیکی، توان و ساختاری بهبود یا افزایش یابد. یک عامل مهم، سرعت چرخش تاج حفار است که بایستی محدود نشود یا کاهش یابد. این مسئله بطور اساسی به ظرفیت تحمل بار[4] برش دهنده و شدت بارگذاری ضربه ای تحمل شده توسط برش دهنده ها[5] بستگی دارد که می تواند منجر به افزایش نرخ سائیش و خسارت برش دهنده ها شود.

نتایج حاصل از بررسیهائی که برای بالا بردن قدرت برش دهنده ها صورت گرفته بر سنگهای سخت تر به عمل آمده، این بود که عوامل محدود کننده عبارتند از ظرفیت تحمل بار برش دهنده ها و مصالح لبهٔ برش دهنده ها یا آن بخشی از ساختار برش دهنده ها که در تماس با سنگ قرار می گیرد. در اوائل دهه ۱۹۷۰ ماشینهائی که طراحی شده بودند قادر به اعمال حداکثر حدود ۱۰ تن بار پیوسته بر روی هر برش دهنده بودند در ضمن بارهای ضربه ای حدود ۲ تا ۳ برابر بار پیوسته غالباً بر برش دهنده اعمال می شد. بر همل،

1- penetration rate و 2- cutter wear rate ،
3- cutter bearing capacity ، 4- shock loading

۱۸۷

جدول ۲-۱ : ارتباط بین هزینه برش دهنده ها و نرخ نفوذ به صورت تابعی از پارامترهای اصلی توقفسازی

هزینهٔ برش دهنده به ازای هر متر طول تونل = $A + B$

نرخ نفوذ به ازای هر دقیقه از زمان حفر = $C + D$

که :

$$A = f_1 \left[\left(\text{نیروی فشاری پشت برش دهنده} \right) \div \left(\text{قطر} \right)^2 \right]$$

$$B = f_2 \left[\frac{\left(\text{ساینـدگـی} \right)\left(\text{مقاومت سنگ} \right)}{\left(\text{شدت درزه داری و ترک خوردگی} \right)} \right]$$

$$C = f_3 \left[\frac{\left(\text{سرعت تاج دوار} \right)\left(\text{نیروی فشاری پشت ماشین} \right)}{\left(\text{زاویهٔ لبهٔ برش دهنده} \right)\left(\text{فاصلهٔ بین برش دهنده ها} \right)\left(\text{قطر} \right)} \right]$$

$$D = f_4 \left[\left(\text{مقاومت سنگ} \right) \div \left(\text{شدت درزه داری و ترک خوردگی} \right) \right]$$

.....

در دههٔ ۱۹۷۰ برش دهنده ها از جنبهٔ طراحی ناجائی توسعه یافتند که قادر به تحمل ۱۵ تا ۲۰ تن بارگذاری پیوسته باشند. نتیجه این پیشرفتها افزایش بسیار زیاد نرخ نفوذ در سنگهای سخت در حین افزایش عمر برش دهنده و در نتیجه کاهش هزینه های برش دهنده ها بود. با بهبود ظرفیت تحمل بار برش دهنده، محدودیت یا عامل محدود کنندهٔ باقیمانده، مواد لبهٔ برش دهنده بود. یک نکتهٔ مهم، توزیع حدود ۲۰ تن بار فشاری پشت برش دهنده بر روی سطح تماسی از سنگ با کمتر از ۶ سانتیمتر مربع مساحت بود. این حقیقت را نیز باید در نظر می گرفت که حداکثر یا پیک[1] بار تا ۳ برابر این مقدار نیز ممکن بود برسد. در نتیجه لازم بود که فولاد برش دهنده ها فوق العاده بالا رود و در ضمن توانائی سایندگی آنها نیز بنحو عمده ای افزایش یابد.

استفاده از کاربید تنگستن[2] به عنوان مادهٔ اصلی برش دهنده ها با موفقیت قابل ملاحظه ای همراه بود. کاربید تنگستن به صورت تکه های استوانه ای یا دکمه ای شکل در مادهٔ بدنهٔ برش دهنده نشانده می شد. هرچند این تکه های کاربیدی مقاومت بسیار بالائی در برابر سایش از خود نشان می دادند، ولی از جنبهٔ تحمل بارهای بسیار زیادی که بر برش دهنده های جدید باید تحمل می کردند، دچار محدودیت بودند. بهرحال، برای رفع این نقیصه و به منظور توزیع بهتر بارهای وارد بر برش دهنده بر سنگ، فاصلهٔ جاگذاری این تکه های کاربیدی را به هم نزدیکتر کردند. بدین ترتیب حفر تونل در سنگهای بسیار سخت (با مقاومت بیش از ۳۵۰ مگاپاسکال) و با قطرهای بزرگ، از جنبهٔ اقتصادی توجیه پذیر شد.

2- Tungsten carbide

عملکرد اصلی TBM

عملکرد اصلی حفر با یک TBM را می‌توان در عمل یک پیشانی برشی یا تاج حفار تجهیز شده با برش دهنده‌های مناسب با جبهه کار تونل دانست. پیشانی برشی با سرعتی ثابت (معمولاً) می‌چرخد و بوسیله نیروی فشاری پشت ماشین که توسط یک سیستم هل دهنده هیدرولیک و خود آن نیز از طریق تعدادی کفک‌های هیدرولیک به دیواره تونل محکم شده است، به داخل جبهه کار تونل فشار داده می‌شود.

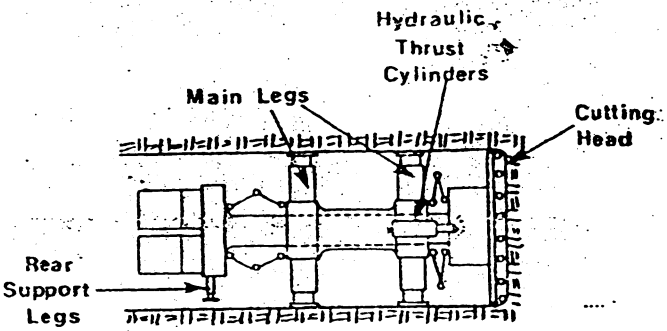
در شکل ۷-۱ پیشروی یک ماشین تونلزنی بر مبنای سیستم Jarva نشان داده شده است. پایه‌های هیدرولیک اصلی که کفشکهائی مناسب به آنها متصل شده است، ماشین را در جریان حفر به دیواره تونل محکم می‌کنند. در طول عمل حفر، پیشانی برشی چرخان تا آنجا که محور اصلی ماشین حاوارد به داخل جبهه کار فشار داده می‌شود و در حقیقت یک سیکل پیشروی پیشانی برشی انجام می‌شود. سپس پایه‌های اصلی جمع می‌شوند، پایه‌های نگهدارنده دنباله باز می‌گردند و ماشین (بدنه اصلی شامل پایه‌های اصلی) برای آماده شدن جهت سیکل بعدی برش به جلو رانده می‌شود.

مواد خرد شده یا کنده شده از طریق سیستمی که در داخل پیشانی برشی قرار دارد (روش معمول استفاده از صندوقه‌های انتقال مواد کنده شده چرخان است) به درون یک سیستم نقاله تخلیه می‌شوند.

در شکلهای نشان داده شده تحت شماره ۷-۲، شمای کلی یک TBM که دیواره گیرها برای عمل در درون وسائل نگهداری حلقوی فولادی طراحی شده‌اند و شکلهائی از TBMهای مختلف آورده شده است.

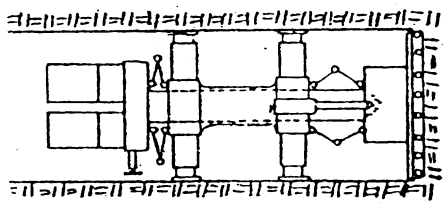
برش دهنده‌ها: انواع و کاربرد - پیشانی برشی یک TBM با آرایه‌ای از برش دهنده‌ها تجهیز می‌شود. برش دهنده‌های مورد استفاده به شرایط زمینی که تونلسازی در آن صورت می‌گیرد بستگی دارد. برش دهنده‌ها یا سرمته‌های چنگکی برای تونلسازی در زمینهای نرم و در بعضی موقعیتهائی که زمینها نرم دارای میان لایه‌هائی از سنگها یا زمینهای سفت یا سخت هستند مناسب می‌باشند. برش دهنده‌های چنگکی در شکلها و اندازه‌های مختلف ساخته شده است. این برش دهنده‌ها زمین را به صورت تکه‌های نسبتاً بزرگ (در مقایسه با انواع برش دهنده‌های دیسکی) می‌کنند و این امر کارآئی و سرعت برش [illegible] را افزایش می‌دهد.

شرایط سنگ - در شرایط سنگی سخت، برش دهنده های چنگگی بسرعت فرسوده یا سائیده می شوند و در سنگهای ماوکی سخت بتندی خسارت می بینند. شکستن سنگ با استفاده از تاج حفار یا پیشانی برشی که برروی جبهه کار تونل عقب حرکت غلتشی دارد، کاملاً موفقیت آمیز بوده است. این شکل برش با استفاده از نیروهای فشاری بسیار بالا و پیشروی در شرایط سنگی سخت را تسهیل می کند. این برش دهنده ها بر روی یا ناقانهای (۱) باظرفیت بالای تحمل بار نصب می شود.



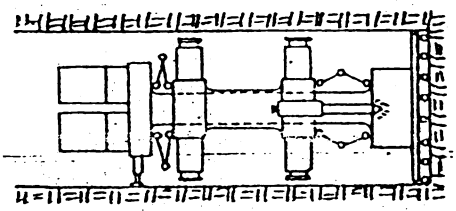
مرحلهٔ ۱

شروع حفر، ماشین توسط دیوارگیرهای اصلی کاملاً به دیواره های تونل محکم شده است. پایه های نگهدارندهٔ دنباله ماشین آزاد هستند.



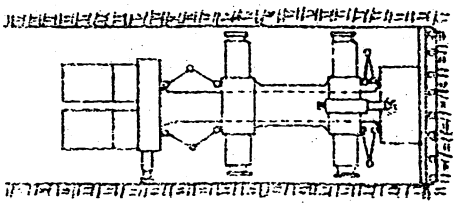
مرحلهٔ ۲

پایان حفر سیکل. ماشین محکم به دیواره ها ثابت شده و پیشانی برشی به سمت جلو رانده شده است. پایه های نگهدارندهٔ دنباله آزاد هستند.



مرحلهٔ ۳

دیوارگیرها پس از این که پایه های نگهدارنده دنباله ماشین را به دیواره محکم کردند، آزاد می شوند.



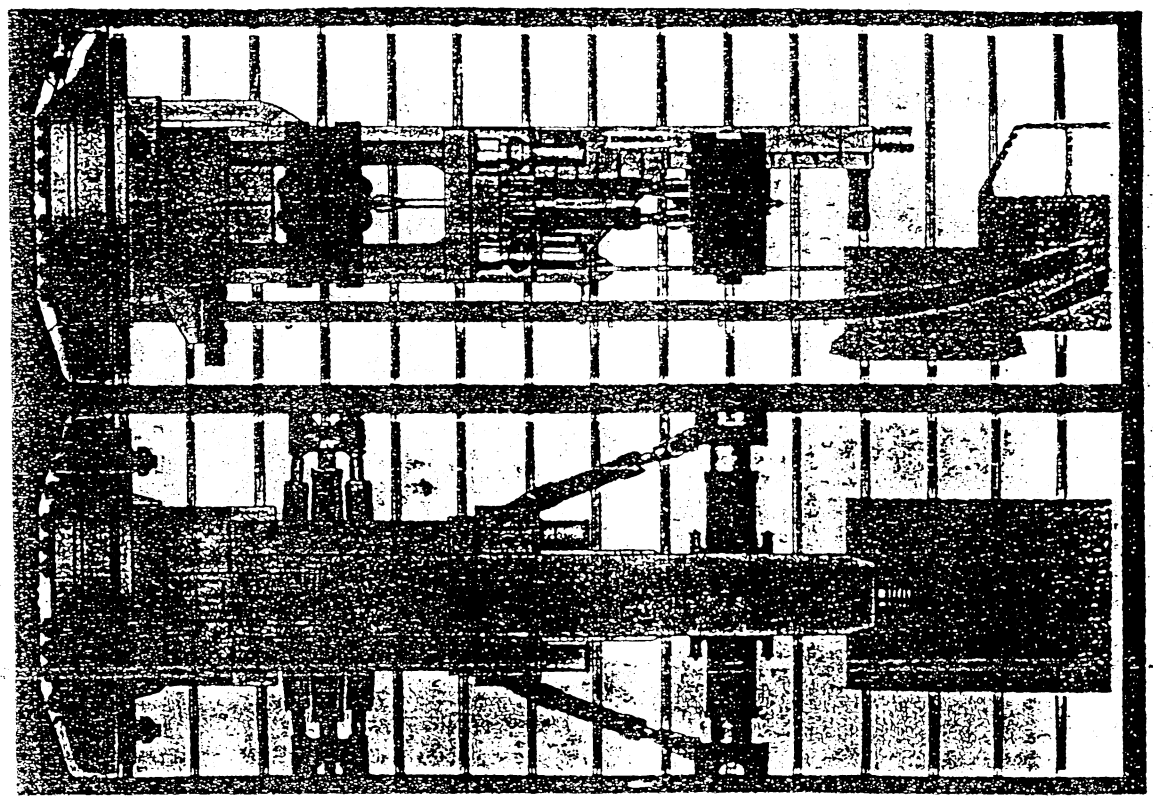
مرحلهٔ ۴

بدنهٔ اصلی ماشین که در این مرحله آزاد است، توسط جکهای محوری که در درون دنباله قرار دارند، به جلو رانده می شود. ماشین برای محکم شدن به دیواره و شروع مرحله بعدی حفر آماده است.

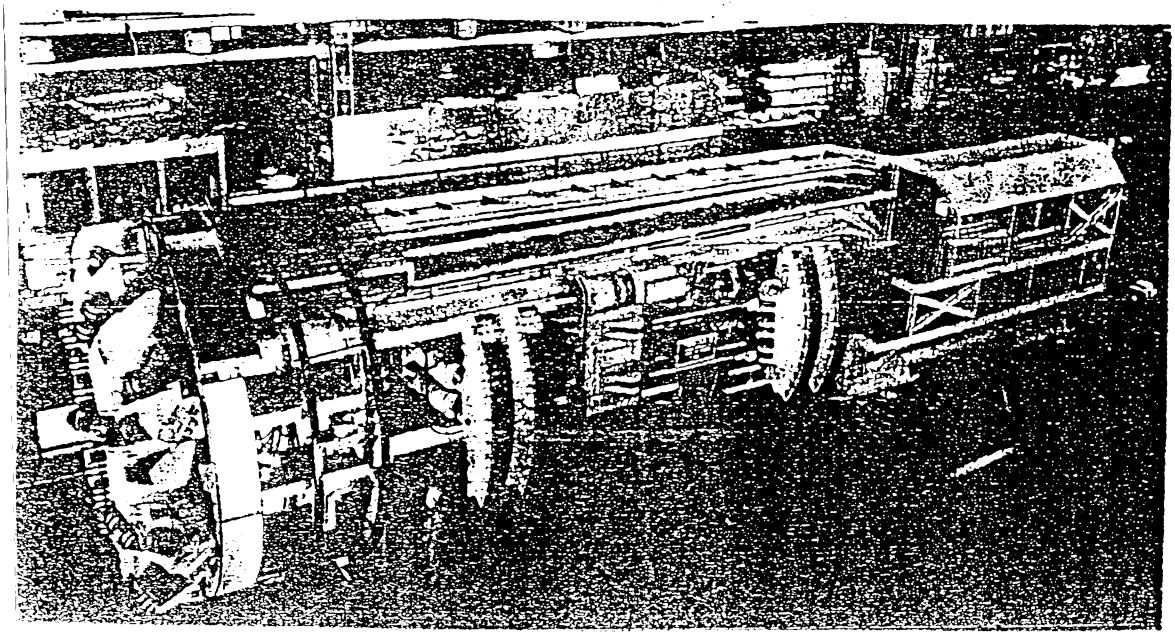
شکل ۴-۱ : مراحل پیشروی ماشین حفر تونل

---

(۱) bearing

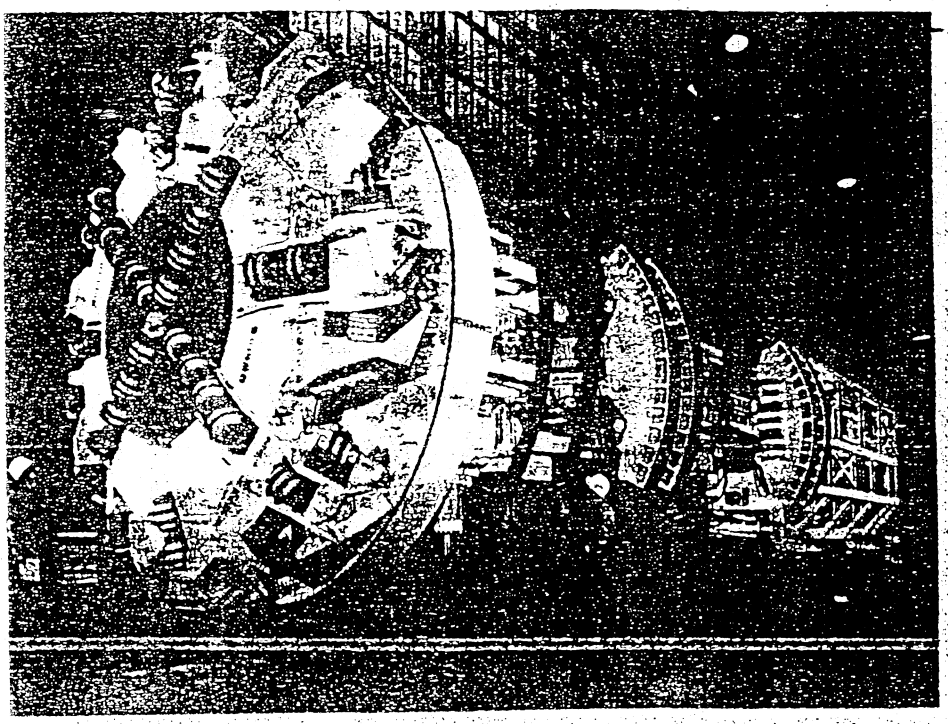


(الف) - بالا و پائین مترتیب نمای از روبر و بالای یک TBM در حال کار

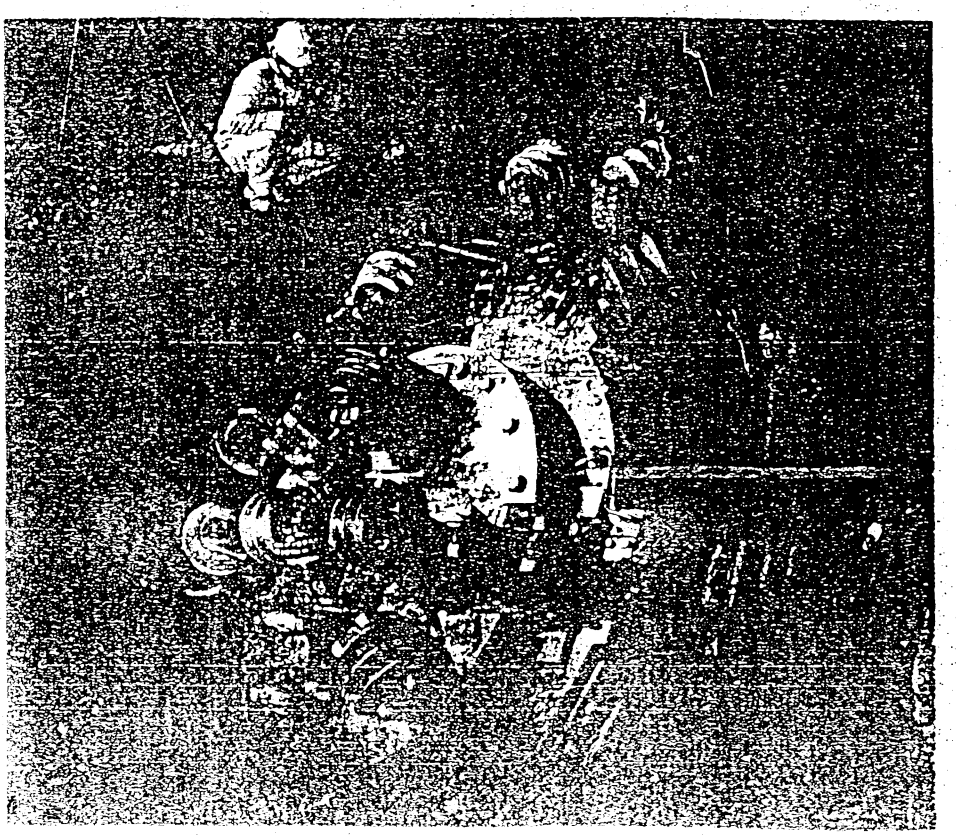


(ب) TBM مورد استفاده در معدن ذغالسنگ Goettelborn برای احداث تونلهای معدن.
(قطر ۶ متر، جنس سنگ: ماسه سنگ، شیل ماسه ای و کنگلومرائی و شیل، مقاومت فشاری سنگها ۴۰ تا ۱۷۶ مگا پاسکال)

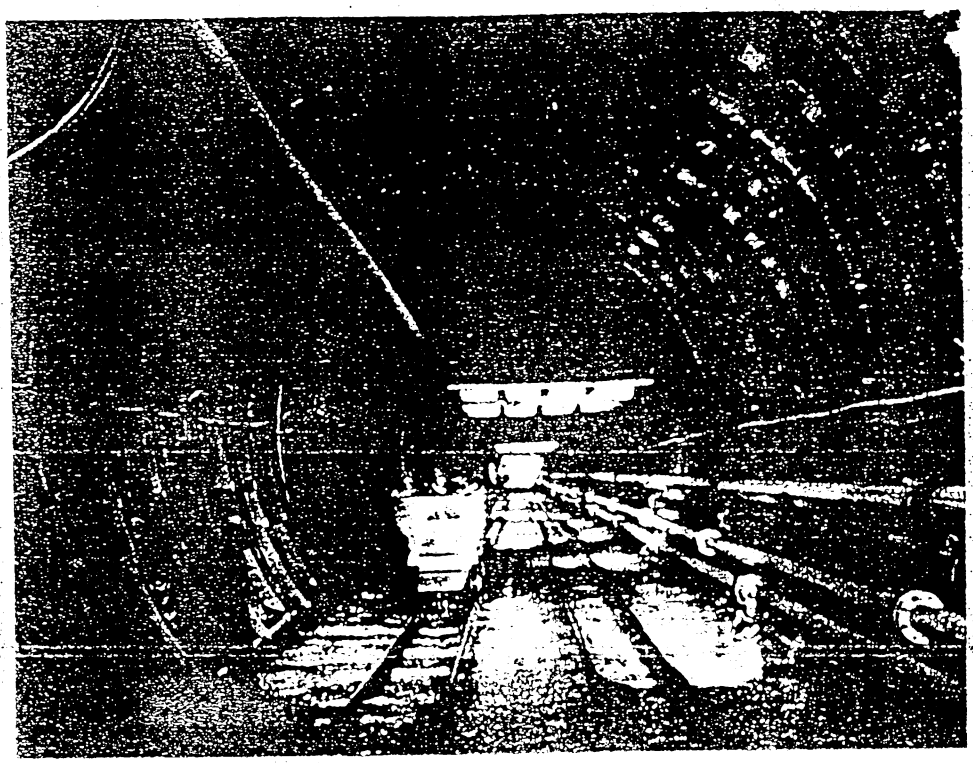
شکل جمع: شکل، طرح و دیاگرامهای اجزاء ماشینهای حفر تونل



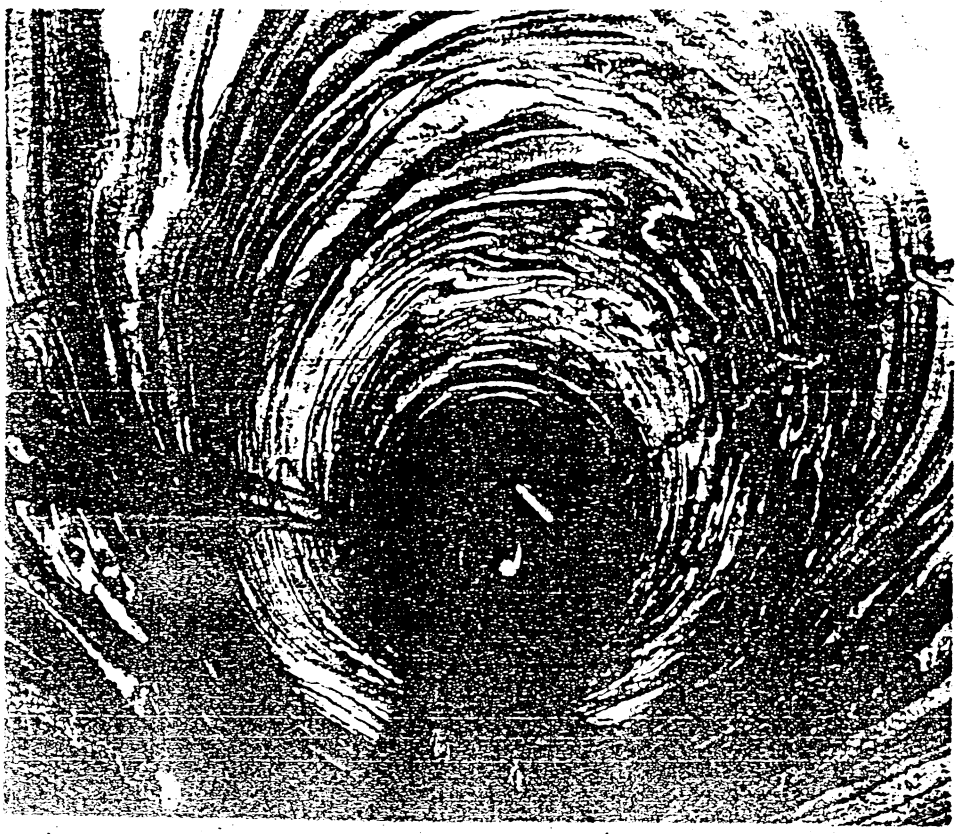
(ج) نمای ازجلوی TBM مورد استفاده درمعدن Geattelborn با
قطر ۶ متر



(د) TBM مورد استفاده در ایستگاه هیدروالکتریک سد Maggia در سوئیس. مدل Demag TM 34-38/42 HS، قطر ۴/۲ متر. در زمان خروج از تونل مایل با شیب ۳۵٪
شیر از عقب [illegible] تا جلو حفاری با برش دهنده های عاتگی سه دیسکی و قاطعه دار
[illegible]



(ه) راهروی معدنی حفر شده با TBM به قطر ۶ متر



(و) تونل انتقال آب در سوئیس با قطر ۳/۸ متر. این تونل توسط TBM ساخت شرکت Demag در آهکهای دانه‌ای همراه با میان لایه‌های شیلی حفر شده است. کیفیت حفر تونل با TBM بوضوح مشخص است.

شکل ۳-۱ (ادامه)

۱۹۴

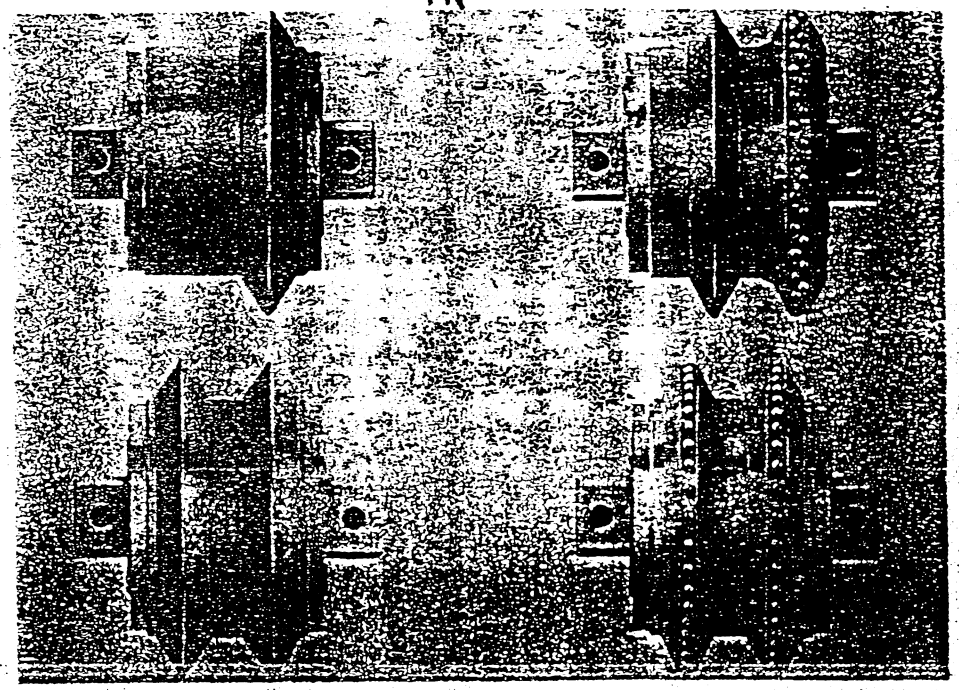
برش دهنده های دیسکی[1] : این برش دهنده دیسک ساده ای با یک لبه برشی تیغه ای یا شمشیری است که قابل تعویض می باشد. این برش دهنده ها به صورت دو یا سه دیسکه[2] نیز ساخته می شوند. مکانیزم حفر دیسک ایجاد شیاری در سنگ و سپس اعمال نیروی برشی برای خرد کردن برآمدگیهای حاصل از ایجاد شیار می باشد. سنگهائی که مقاومت فشاری تک محوری بیش از ۱۷۵ مگا پاسکال دارند را می توان با موفقیت توسط این برش دهنده های دیسکی برش داد. سنگهای دارای ساینده گی زیاد مشکلاتی در حفر با این برش دهنده ها ایجاد می کند و در نتیجه ساینده گی دامنه کاربرد برش دهنده های دیسکی به سنگهای با مقاومت فشاری بسیار کمتر محدود می سازد. با نشاندن تکه های کاربید تنگستن بر روی لبه دیسک، دامنهٔ کاربرد چنین برش دهنده هائی برای سنگهای بسیار سخت تر توسعه داده شده است.

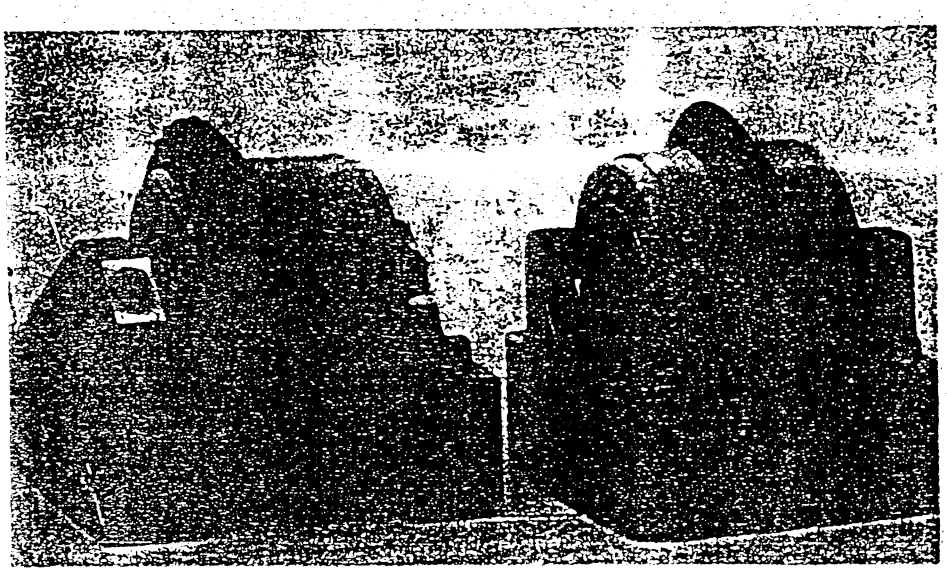
برش دهنده های غلتشی[3] : برش دهنده های غلتشی دارای دو نوع اصلی هستند : نوع دندانه ای و نوع کاربید تنگستنی[4]. نوع دندانه ای موجب خرد شدن سنگ تحت نفوذ موضعی ایجاد شده می شود. نفوذ موجب تشکیل خرده سنگ و لب پریدگی در سنگهای مجاور دندانه ها تحت تأثیر تنش های کششی و برشی و در نتیجه شکستگیهای متعاقب آن می شود.

برش دهنده های نوع پوشیده از کاربید تنگستن در جاهائی مورد استفاده قرار می گیرند که ویژگیهای ساینده گی سنگ، استفاده از برش دهنده های نوع دندانه ای را اجازه نمی دهد. در حفر سنگ با برش دهنده های نوع غلتشی کاربید تنگستنی، خرد کردن سنگ ناشی از عمل سائیدن[5] است تا این که بر اثر لب پریده کردن و شکستن سنگ باشد. اگرچه نرخ نفوذ با این نوع برش دهنده ها کند است و مقدار زیادی نرمه تولید می کند و مصرف و هزینهٔ برش دهنده ها بالای باشد، ولی احتمالاً برای سنگهای با مقاومت بالاتر که در جریان تونلسازی با آن مواجه می شویم، نوع موفقتر و کارآتری هستند.

در شکل ۷-۳ طرحهای مختلف برش دهنده های دیسکی و برش دهنده های غلتشی کاربید تنگستن نشان داده شده اند.

1- disc cutter ; 2- roller cutter ;
3- milled-tooth type ; 4- Tungstan carbide insert type ;
5- pulverising action





شکل ۷-۳ : طرحهای مختلف برش دهنده ها

پیشانی برشی یا تاج حفار : برای شرایط زمینهای نرم ، استفاده از برش دهنده های چنگکی برای نصب بر روی پیشانی برشی از همهٔ برش دهنده ها مناسبتر است ، ولی در شرایط سنگی ، ترکیبی از انواع برش دهنده های مختلف استفاده می شود . در پیشانی برشی TBH سه ناحیه متمایز در نظر گرفته می شود : مرکز ، تاج و لبهٔ خارجی .

برش دهنده های مرکزی[1] : در قسمت مرکزی پیشانی برشی ، لازم است که برای دستیابی به جهش سریع و مؤثر تحت شرایط سرعت برش پایین آهسته ، دستهٔ از برش دهنده ها نصب گردد . در بعضی از تاجهای حفار ، برش دهنده ها به منظور تسهیل خرد شدن سنگ به شکل سه محوره قرار گرفته اند . خرد سنگ آنگونه

1- center cutter

با کلیه برسانیش و پودر کردن سنگ صورت بگیرد، موجب پیشروی کند تونلسازی می شود، مگر این که سرعت پیشروی بیشتری ضرورت نداشته باشد.

برش دهنده های جبهه ای[۱] : قسمت اصلی جبهه کار معمولاً با برش دهنده های دیسکی یا غلتشی حفر می شود که به کارگیری این برش دهنده ها به سختی سنگ بستگی دارد. برخی مواقع نظیر حفر در سنگهای ضعیفتر ملس است استفاده از برش دهنده های چنگکی را ایجاب نماید.

برش دهنده های لبه ای[۲] : این برش دهنده ها بر لبه خارجی پیشانی برشی نصب شده اند و هدف به کارگیری آنها کندن و خرد باز کننده به اندازه مورد نیاز است. برش دهنده های لبه ای معمولاً از نوع دیسکی یا غلتشی هستند و از آنجائی که کار انجام شده توسط چنین برش دهنده هائی زیاد است، ضروری است که بتوانند در برابر شرایطی که موجب افزایش نرخ سائیدگی و فرسودگی آنها می شود، مقاومت کنند.

شکل ۷-۴ یک TBM مخصوص سنگهای سخت و موقعیت برش دهنده های دیسکی بر روی پیشانی آن و سه منطقه برشی مجزا را بخوبی نشان می دهد. این TBM ساخت شرکت رابینز مدل ۲۴۵-۱۶۶ دارای قطر ۵ متر می باشد که در پروژه احداث فاضلاب به کار گرفته شد.

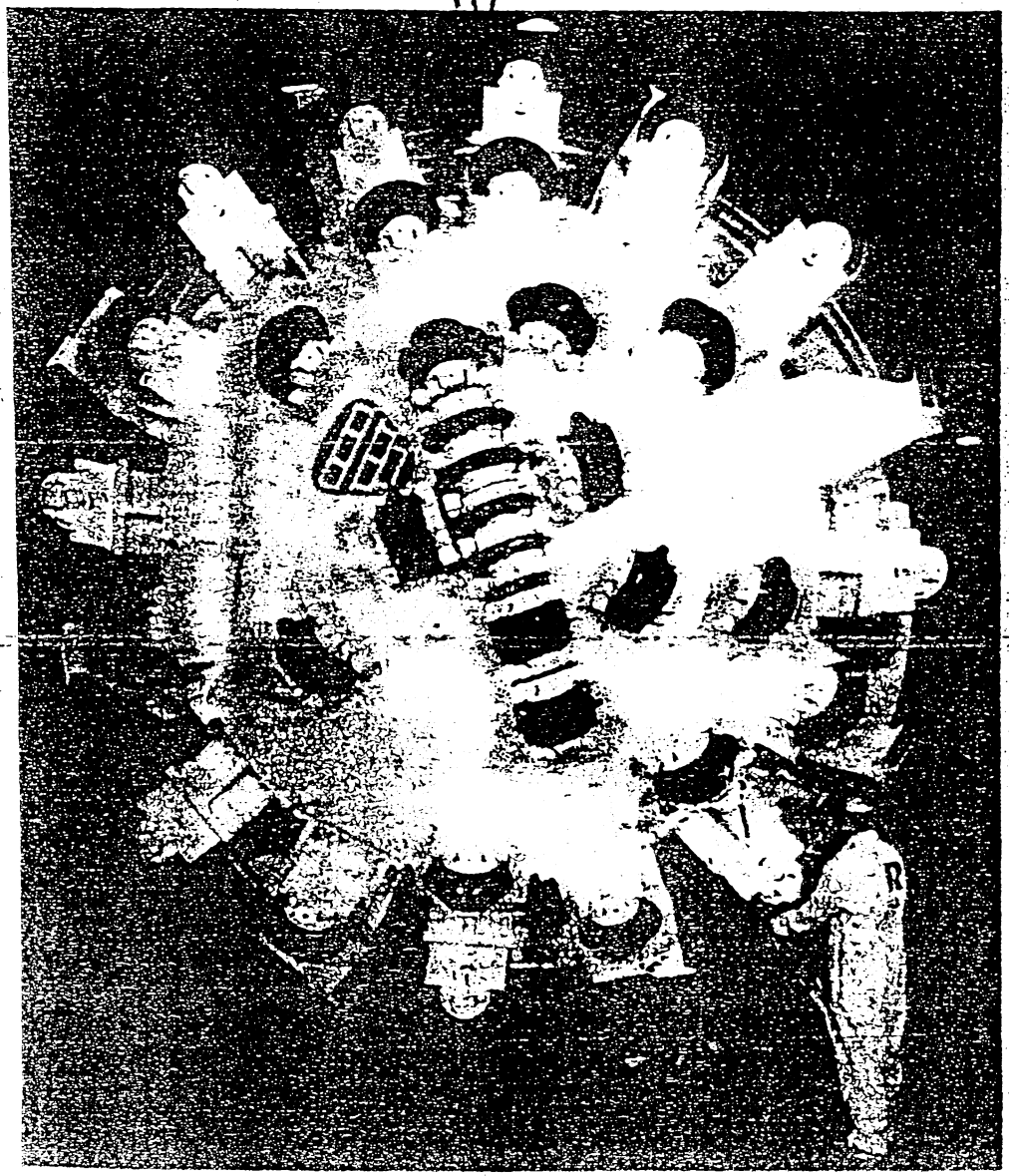
در شکل ۷-۵ یک TBM مخصوص سنگهای سست یا نرم دارای قطر ۵/۶ متر نشان داده شده است. در این شکل سه منطقه برشی مجزا برای برش دهنده های چنگکی بوضوح مشخص هستند. این ماشین برای کار در شرایط زمین شناختی ای که جریانهای شدید آب پیش بینی می شد، طراحی شده بود. مشخصات و ویژگیهای TBM های دیگری در شکل ۷-۶ و ۷-۷ نشان داده شده است.

عملکرد TBM و ویژگیهای زمین

یک مطالعه و بررسی تفصیلی در جریان احداث تونلی که توسط TBM در انگلستان حفر شده، صورت گرفته است. در این مطالعه بین عملکرد ماشین و شرایط زمین شناسی مربوط مقایسه صورت گرفته بود. این تونل در گل سنگها، ماسه سنگها و سنگ آهکهای متعلق به کربنیفر حفر شده بود.

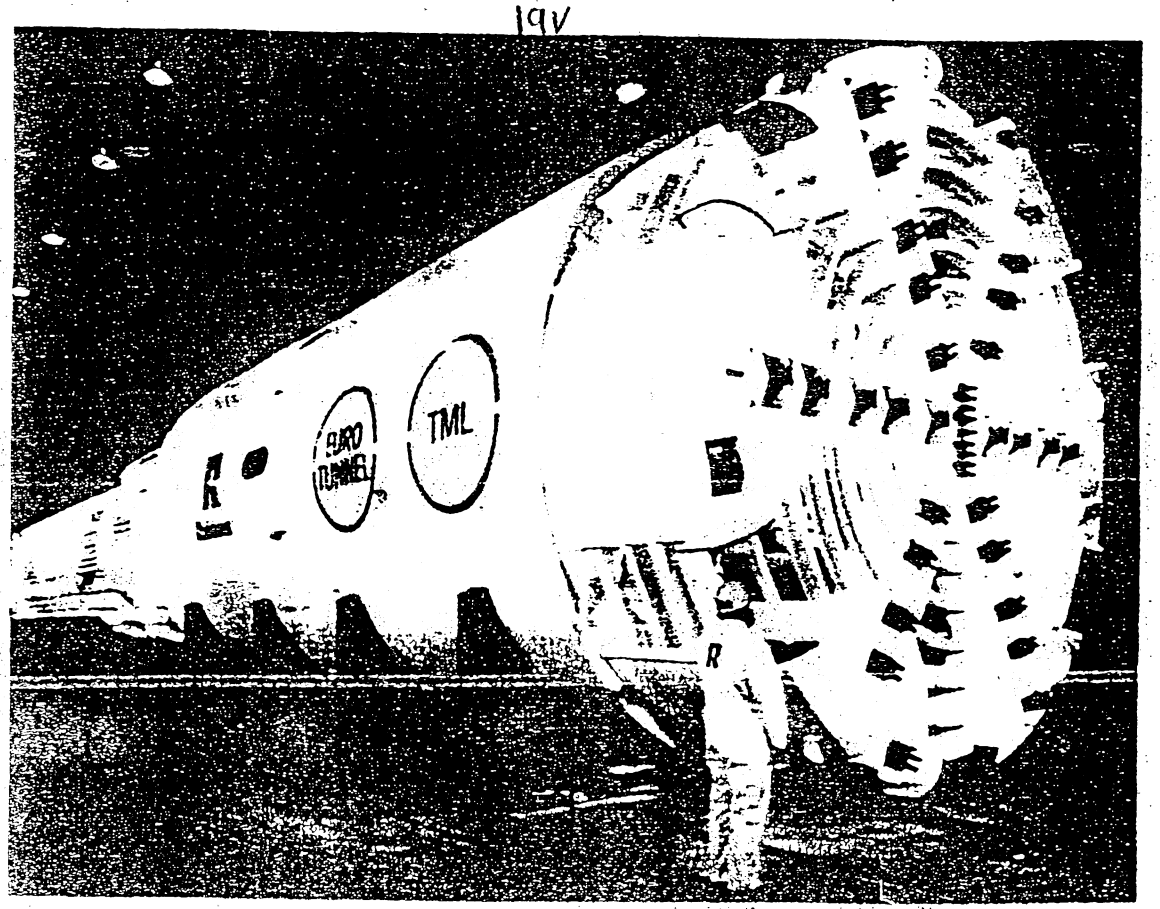
TBM مورد استفاده Demag مدل TVM 34-38 بود. در شکل ۷-۸ طاقهای عمومی ماشین و اجزاء اصلی مربوط به آن نشان داده شده است.

2- gauge cutter

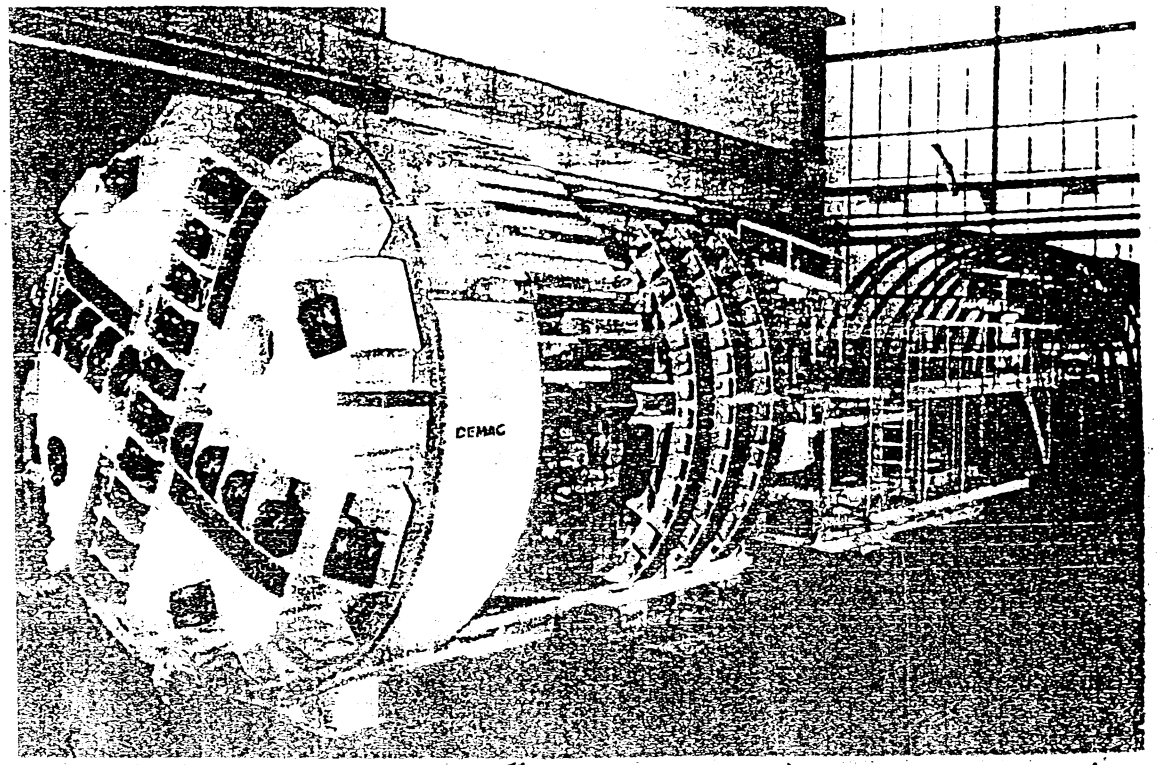


شکل ۲-۴ : یک TBM مخصوص سنگهای سخت، از شرکت Robbins مدل ۱۴۴-۲۴۵، قطر ۵ متر، مورد استفاده در پروژه فاضلاب Rochester، نیویورک.

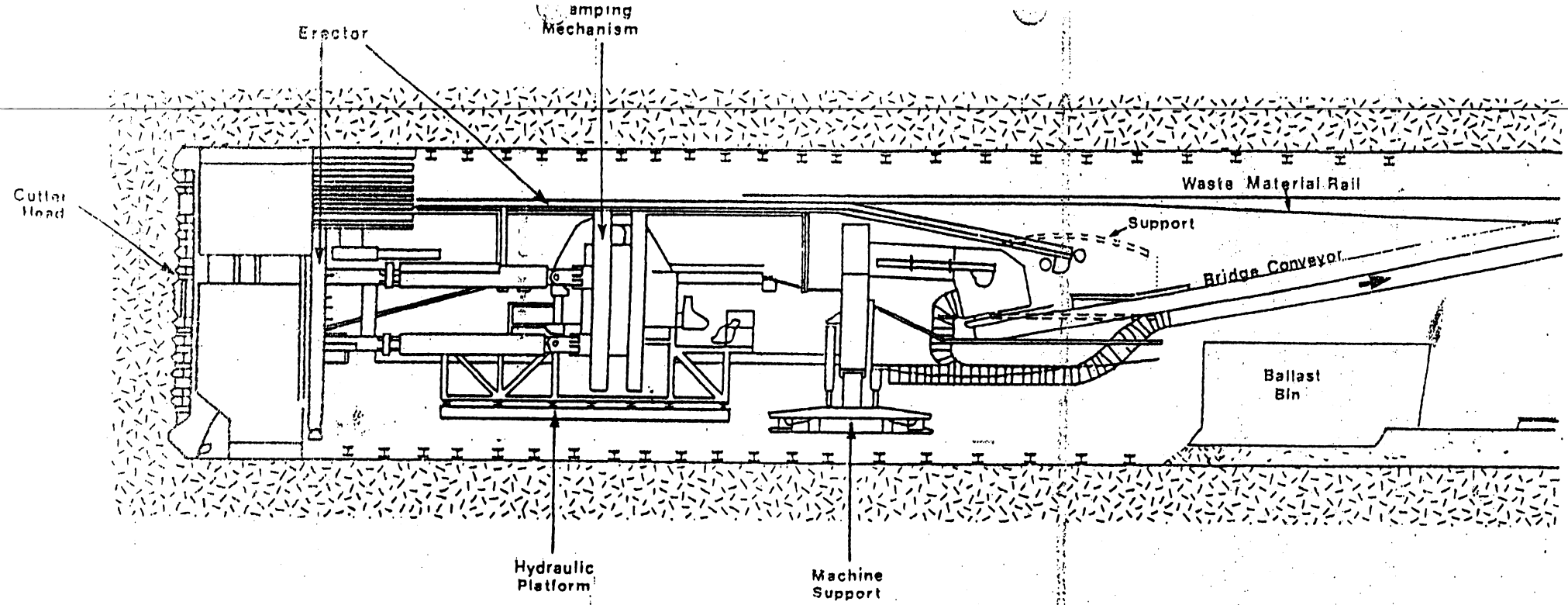
زمان حفر تونل یا زمان حفر TBM : زمانهائی که TBM حفر انجام نمی داده است مورد مطالعه قرار گرفته بود که تأخیرهای معمول تونلسازی نظیر ریزش و از خط بیرون افتادن واگنها یا قطار، علاوه بر تأخیرهای غیرقابل اجتناب در رابطه با نصب و توسعه خدمات و تکمیل و انجام نگهداری سقف و غیره را شامل می شد. به طور کلی، زمان عدم حفر ۷۸٪ ساعت کاری معمول بود. این زمان با گذشتن از منطقه ای که رفتاری غیرعادی از خود نشان داده بود به ۱۱٪ کاهش یافت. صرفنظر از نوع سنگ، در زمان حفر عملکرد TBM ثابت بود. در مواقعی که تونلسازی در زمینهای شکسته و خرد شده صورت می گرفت، تغییرات زیادی در بهره وری کلی مشاهده شده بود. نتیجه گیری کلی این بود که با کاهش زمان بیکاری ماشین می توان اجرای تونلسازی را بهتر نمود.



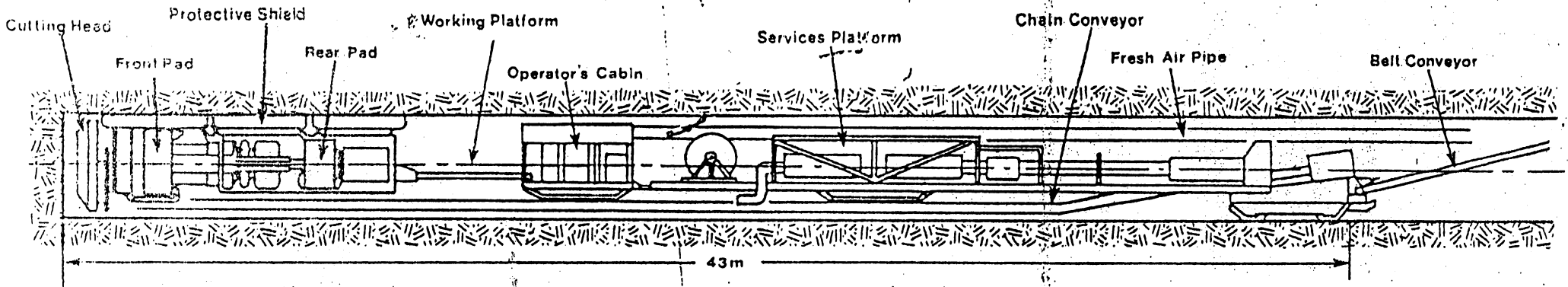
شکل ۷-۵ :TBM مورد استفاده در تونل خدمات رسانی English-Channel با قطر ۶٫۵ متر برای کار در شدت جریانهای بالای آب. قادر به تحمل فشار هیدروستاتیکی معادل ۱۰ بار



شکل ۷-۶ :TVM 50H، قطر ۵٫۵ متر، دارای ویژگی جمع وجور بودن، قابلیت نصب و پیاده کردن سریع مقطع دایره‌ای پوشش راهی توان برای آماده کردن صحت نصب، قابهای نگهداری فولادی قوسی یا شکل قوسی براشی



شکل ۷-۷ : نگهدارنده حلقوی قوسی در پشت پیشانی برشی



شکل ۷-۸ : TBM شرکت Demag مدل WM3438. طول کلی ۴۳ متر، وزن ۱۳ تن، قطر ۳٫۵ متر، تعداد برش دهنده های دیسکی ۱۳ تا ۱۷ همراه با برش دهنده های مرکزی، دور دوران پیشانی حفار ۹٫۶ rpm، نیروی فشاری محوری ۳۲۰ تن

عمر برش دهنده : برش دهنده ها به دلایل چندی نظیر شکستن محور، شکستن لبه‌ها تحت تأثیر نیروی فشاری یا ساییده شدن لبه های برشی دیسکها در یک یا چند لبه باستی تعویض شوند. عمر متوسط برش دهنده ها در پروژه مورد مطالعه ۲۰۴ متر حفر تونل بود. این رقم مصرف متوسطی برابر یک برش دهنده به ازای هر ۱۲ متر از تونل حفر شده به دست داد. فاصله متوسطی که توسط هر برش دهنده با در نظر گرفتن موقعیت شعاعی آن بر روی پیشانی برشی، سرعت دوران و زمان برش، ۴۰ کیلو متر محاسبه شده بود.

فشار محوری ماشین، نرخ برش، انرژی ویژه : داده های جمع آوری شدهٔ مربوط به فشار محوری ماشین، نرخ برش و انرژی ویژهٔ مورد نیاز در جریان حفر در جدول ۷-۲ برای شش منطقه از نه منطقه مورد مطالعه آورده شده است. این نتایج نشان می دهد که انواع مختلف سنگها در این شش منطقه تأثیر زیادی بر عملکرد برش TBM نداشته اند. سایر عوامل اجرائی دخیل در حفر تونل به نظری رسد از تأثیرگذاری و اهمیت بیشتری در این مورد خاص برخوردار بوده اند.

جدول ۷-۲ : فشار محوری، نرخ برش و انرژی ویژه مربوط به TBM

منطقه		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
فشار محوری متوسط (در فاصله حفر)	MN	۱/۶۲	۲/۳۳	—	—	—	۲/۸۵	۲/۳۱	۱/۸۲	۱/۵۵
نرخ برش متوسط (در زمان حفر)	m/h	۲/۳۰	۱/۳۰	—	—	—	۱/۴۷	۲/۴۶	۲/۳۵	۲/۳۶
انرژی ویژه متوسط (در فاصله حفر)	MJ/m^3	۲۵/۳	۳۷/۵	—	—	—	۵۳	۳۲	۲۴/۸	۱۹/۴

منطقه	مشخصات زمین شناختی جبهه کار تونل
۱	اختلاطی از لایه های گل سنگ و ماسه سنگ
۲	تمامی جبهه کار ماسه سنگ
۳	اختلاطی از لایه های سنگ آهک، سنگ آهک شیلی و گل سنگ
۷	تمام جبهه کار تقریباً از گل سنگ، برخی موارد با میان لایه هائی از سنگ آهک شیلی
۸	گل سنگ، منطقه گسل ۱
۹	گل سنگ، منطقه گسل ۲

تونلهای قطر کوچک : حفر با TBM

تونلهای با قطر حدود ۳/۲ متر یا کمتر را به طور معمول تونلهای قطر کوچک می نامند و از جنبه فضای کاری با محدودیت مواجه هستند. این امر مشکلاتی در رابطه با انتقال مواد کنده شده، تهویه، دسترسی به پیشانی برشی و راحتی اپراتور (عملگر) ایجاد می کند. حفر سنگ با TBM بعنوان یک ابزار تونلسازی همه چیز سرخود[1] و خودکنترل به رسمیت شناخته شده است که با آن می توان در وضعیتهای زمین شناسی مختلف و از طریق یک پیشانی برشی چرخان توسعه پذیر یا قابل امتداد[2] که برش دهنده ها سنگ را به صورت یک سری دوایر متحدالمرکز خرد می کنند، اقدام به حفر تونل نمود.

کاربرد TBM به طور معمول در محدوده قطرهای ۵ تا ۸ متر بوده است. این اندازه به دلایل زیر برای تونلها مناسب هستند :

۱- سهولت دسترسی به قسمتهای مختلف زیر TBM، پیشانی برشی و برش دهنده ها و اجزای مختلف آن از طریق پرسنل که در نتیجه راندمان خدمات رسانی و تعمیر و نگهداری کلی را بالا می برد.

۲- بالاتر رفتن انعطاف پذیری، پیوستگی و راندمان عملیات سیستم انتقال مواد کنده شده.

ویژگیهای عملیاتی تونلسازی قطر کوچک : مشکل اصلی ناشی از کاهش قطر تونل، الزام به استفاده از باربری تک ریله مواد کنده شده است. سیستم تهویه لازم است که از راندمان بالائی، بویژه با توجه به شرایط کار در یک فضای شلوغ و پر از تجهیزات، برخوردار باشد. TBM anchoring در یک فضای محدود، ممکن است محبت سهولت و تسهیل عملیات حفر تونل، استفاده از یک سیستم تجدید نظر و اصلاح شده را ایجاب کند. کوچک بودن قطر تونل موجب بروز مشکلاتی در نصب پیچهای سقفی و بتن پاشی به دلیل محدود بودن فضای اطراف TBM و تجهیزات مربوط به آن، بویژه در شرایط زمین شناسی بد و سخت، می شود.

در جدول ۷-۳ اطلاعات جمع آوری شده از هفت پروژه تونلسازی قطر کوچک ارائه شده است. نتایج نشان داده شده در این جدول نشانگر این نکته هستند که با کاربرد TBM در حفر تونلهای قطر کوچک می توان به نرخهای پیشروی بالا در شرایط سنگی سخت دست یافت.

---

1 - self contained ; 2 - extendible

۱۴ مقاله سنگ (زمان) ۲۵۳۵

۱۲۶

مکانیک سنگ Rock Mechanics سری ۴

۱- مقدمه:

در نیمه دوم قرن حاضر روابط بین علوم کاربردی و تئوریک به طور چشمگیری افزایش یافته است. زیرا برای دسترسی به یک نتیجه مطلوب و قابل اطمینان همکاری‌های مشترک بین شاخه های مختلف علوم لازم و ضروری است. یکی از نمونه های بارز چنین همکاری‌هائی مکانیک سنگ میباشد. احتیاج روز افزون جامعه بیشتری به مواد خام معدنی و منابع انرژی و لزوم استفاده از فضاهای زیرزمینی در مناطق مسکونی و شهرهای بزرگ و یا مقاصد نظامی باعث تولد شاخه‌ای جدید از علوم مهندسی به نام مکانیک سنگ گردید. اولین تعریف جامع از مکانیک سنگ در سال 1966 توسط کمیته ملی مکانیک سنگ آمریکا ارائه گردید که در سال 1974 با تغییراتی به صورت زیر بیان شد:

مکانیک سنگ: عبارت است از دانش نظری و عملی از رفتار مکانیکی سنگ یا آن بخش از علم مکانیک که به واکنش سنگ در برابر میدان های نیرو از محیط فیزیکی اطراف مربوط میگردد. (۱)

در حال حاضر اصول مکانیک سنگ و روش های تحلیلی آن کاربرد وسیعی در زمینه های مهندسی معدن، مهندسی راه و ساختمان، مهندسی زمین شناسی، مهندسی نفت و ژئوفیزیک پیدا کرده است. و سعی میشود که مسائل و مشکلات مربوط به طراحی در زمینه های فوق با استفاده و بکارگیری مبانی مکانیک سنگ حل شود. که در عمل شاهد نمونه‌های موفقیت آمیز بسیاری در این مورد هستیم. قبل از پرداختن به اصل موضوع بهتر است نگاهی کوتاه به گذشته روابط بین انسان و سنگ، و همچنین تاریخچه مکانیک سنگ بیفکنیم.

2 - رابطه انسان و سنگ در طول تاریخ

تاریخ شروع حیات انسان در روی کره زمین در حدود یک و نیم میلیون سال تخمین زده شده است. که در مقایسه با سن ۴ میلیارد و ۶۰۰ میلیون سالی کره خاکی خیلی ناچیز می باشد. انسان اولیه سالهای سال به طور آزاد و ابتدائی می زیسته است. و از حدود ۴۰ هزار سال قبل است که به مفهوم امروزی شروع به زندگی کرده و برای تداوم آن و حفظ جان خود شروع به حفر سنگ غار و درست کردن غار پرداخته است.

رابطه انسان با سنگ با غارنشینی، استفاده از سنگ و آلات سنگی (تبر و نیزه) جهت شکار و دفاع از خود شروع و تا به امروز به اشکال مختلف ادامه داشته است و اهمیت این رابطه هر روز بیشتر و بیشتر می شود. وقتی در حدود ۱۰ هزار سال پیش انسان به زندگی کشاورزی روی آورد. موارد استفاده از سنگ نیز تنوع بیشتری پیدا کرد.

اولین یادبود های سنگی در حدود ۶۵۰۰ سال قبل بانکنده کاری سنگ ها توسط انسانهای آن زمان برای نسل های آینده به یادگار گذاشته شده است. طول این یادبود های سنگی (Megalith) بعضی وقت ها تا ۲۵ متر نیز میرسد. که به صورتی نه چندان ظریف کار شده است. و نشان میدهد که انسانهای آن دوره سنگ را به عنوان یک میراث گران بها و قابل اطمینان و ماندنی برای نسل های بعد از خود انتخاب کرده است. زیرا انسان آن روزی سنگ را سمبل متانت، سنگینی و دوام دانسته و به علت سختی و صلابت به آن دل بسته و آنرا مورد اعتماد و اطمینان خود قرار داده است. موارد استفاده از خواص فوق در طول زمان افزایش یافته به طوریکه بغیر از استفاده مادی از سنگ یک سری دلبستگی ها و اعتقادات معنوی نسبت به آن در انسان بوجود آمده بطوریکه از آن انتظار برکت، شادی، خوشبختی و سلامتی و سحر و جادو داشته است. که سنگ شادی، سنگ جادو، سنگ شفا، سنگ طلسم، سنگ فال، سنگ صبور از آن جمله اند. و در تمامی ادیان سنگ جایگاه مخصوص و مقدسی دارد.

بطور خلاصه انسان از بدو حیات دنبال سنگ گشته، آنرا پیدا کرده و به آن پناه برده و روی آن کار کرده و همیشه بیشتر از معیارهای مادی برای آن ارزش قائل بوده بطوریکه پس از

مرگ نیز برای اینکه فراموش نشود برسر قبر خود سنگ میگذارد و یا مرده های خود را در دل سنگ دفن میکنند.

قدیمیترین معدن شناخته شده دنیا متعلق به ۴۰۰۰۰ سال قبل از میلاد در نواحی افریقای جنوبی است که از آن همانیت (سنگ احمرا) استخراج شده است. که با استفاده از استخوان‌های حیوانات و سنگ‌های تیز صورت میگرفته است.

با پیدایش سنگ چخماق (Flint) عصر حجر شروع می‌شود. و سومریان در حدود ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد مس را پیدا می‌کنند و مصریان ۲۹۰۰ سال قبل از میلاد با استفاده از اسکنه ها و قلم های مسی سنگ های مورد استفاده در اهرام مصر را شکل می‌دهند و اهرام و تونل های زیر آنها را به طول ۲۴۵ متر در داخل تراشیده حفر می‌کنند.

داستان معدنکاری انسان برای اولین بار در سال 1956 توسط آگری کولا (Agricola) در کتابی تحت عنوان (Demetallica) مورد بحث و بررسی قرار گرفته و برای مدت های مدید بعنوان کتاب مرجع هندسی معدن مورد استفاده معدنچیان قرار گرفته و باعث گسترش هرچه بیشتر این علم شده است. قابل ذکر است که اولین اطلاعات مربوط به مکانیک سنگ نیز از معدنکاری سرچشمه گرفته است

تولد و توسعه علم مکانیک سنگ:

همانطوریکه در مقدمه نیز ذکر شد حوادثی که برای بار اول اطمینان انسان را به خود جلب کرد ماده سنگ بود و این اعتماد و اطمینان نیز ها به مرور زمان به توده سنگ نیز به عنوان پی و یا بناهای گسترش یافت و با گذشت زمان دامنه این اعتماد و اطمینان آنقدر گسترش یافت که در حین ساختمان و یا هنگام رسیدن به سنگ و یا درست پایی به آن در حفریات روزمینی و زیرزمینی به صورت یک هدف درآمده بود و بدون هیچ گونه اندازه گیری خواص مکانیکی سنگ را محکم و مقاوم فرض می‌کردند. این اعتماد و اطمینان برای سالهای مدید ادامه داشت تا اینکه در اواسط قرن اخیر با تخریب بندهای (Vajont) در ایتالیا با بیش از ۲۰۰۰ کشته و (Malpaset) در سال 1959 که اولی به علت لغزش زمین و دومی به علت جابجائی

بلوک های سنگی بی اتکای استاد مورد مسئوال قرارگرفت (۲)

درصورتی که این شک و تردید و عدم اطمینان درمورد خاک (زمین) که نتیجه تقریب و تجزیه سنگ هاست از سالهای خیلی پیش شروع شده بود، و باعث بوجود آمدن علم مکانیک خاک (Soil Mechanics) وسیط و توسعه آن شده بود.

(تئوری کولمب درمورد خاک 1773). درصورتیکه اولین مطالعه علمی درمورد توزیع تنش درمحیط سنگی یکصد سال بعدصورت گرفته است. (Rzihd 1874)

بعداز جنگ جهانی دوم به موازات پیشرفت های حاصل در صنایع وعلوم مختلف احتیاج به مواد اولیه معدنی هرروز افزایش یافته وعمق معادن و ابعاد آنها نیز بیشتر شده به طوری که بارهای وارده از طرف انسان بر سنگ بالغ بر 10-8 برابر بودند و ابعاد کارهای زیرزمینی نیز بیش از 6-4 برابر بزرگتر شده است. اینها عواملی بودند که لزوم مطالعه خواص مکانیکی و رفتس العمل سنگ ها را در مقابل شرایط جدید ضروری می ساختند به عبارت دیگر وقتی حفریات روباز و زیرزمینی به چنین ابعادی رسیدند دیگر امکان بکارگیری سنگ ها بدون اندازه گیری خواص مکانیکی آنها چندان عاقلانه به نظر نمیرسید.

درسال 1936 تغییر شکل پذیری سنگ ها از طرف David Grigs مورد مطالعه قرارگرفت و درسال 1946 یعنی یکسال پس از تشکیل کمیته ای جهت تحقیق درمورد تغییر شکل پذیری سنگ ها در امریکا اداره معادن این کشور اولین استانداردهای خود را درمورد چگونگی اندازه گیری خواص مکانیکی سنگ ها منتشر نمود. به عبارت دیگر مطالعات آزمایشگاهی و درجا درمورد اندازه گیری خواص مکانیکی سنگ در ارتباط با پروژه های مهندسی پس از سال 1945 شروع شد (Rose – Eichinger 1949).

و درسال 1951 فعالیت های خیلی موثری درمورد مکانیک سنگ در (Colorado School Of Mines) آغاز شد. و درهمین سال اولین سمپوزیم چال زنی وحفاری و آتشباری در آمریکا برگزار شد و همزمان اولین سمپوزیوم مکانیک سنگ از طرف انجمن ژئومکانیک اطریش در سالزبورگ تشکیل شد

دراین سالها (1945-1952) افرادی که به نوعی با مسائل مهندسی مربوط به سنگ سروکار داشتند به رهبری Livington در آمریکا و درسال های (1946-1951) به رهبری

(J-Stini) درباره‌ی معنی و برگزار آوری افراد در زمینه‌ی اعلام [illegible] مکانیک سنگ
معتقد. تا اینکه در سال 1962 انجمن بین المللی مکانیک سنگ (I.S.R.M) به سرکردگی
(L. Muller) آغاز تشکیل شد. واولین کنگره بین المللی مکانیک سنگ در سال
1966 در پرتغال برگزار شد. که از آن تاریخ به بعد هر ۴ سال یکبار تکرار می‌شود. کنگره‌ها
و سمینارهای متنابهی در کشورهای مختلف دنیا همه ساله در ارتباط با مکانیک سنگ برگزار
می‌شود.

مکانیک سنگ بعنوان یک درس مستقل پس از سال 1960 در بعضی کشورها در رشته‌های
معدن و ساختمان شروع به تدریس گردید. در حدود ۴۰ سالی که از اعلام استقلال مکانیک
سنگ بعنوان یک علم مستقل می‌گذرد پیشرفت های خیلی زیادی در این زمینه حاصل شده است
به طوریکه در مسائل مربوط به معدنکاری و حفاری‌های روزمینی و زیرزمینی به طور موفقیت آمیزی
از آن استفاده می‌شود. شاید این جمله (Bieniawski) که تکنولوژی در ۴۰ سال اخیر
بیشتر از ۴۰۰۰ سال گذشته پیشرفت کرده بیشتر از هر علمی درمورد مکانیک سنگ صادق
باشد. (۱)

زمینه‌های بکارگیری مکانیک سنگ

هر روز که میگذرد زمینه‌های جدیدی برای استفاده و بکارگیری اصول و مبانی مکانیک
ایجاد میشود که مهمترین زمینه‌های بکارگیری مکانیک عبارتند از:

- معدنکاری
  - زیرزمینی (غالب): طراحی کارگاه، اتاق و پایه، گانری‌ها و چاه
    - انفجار سنگ و زغال و گاز
  - زیرزمینی متال (فلزی و غیرفلزی): طراحی گالری - پایه - قابلیت تحریب کارگاه - انفجار سنگ
  - روزمینی: چال زنی - انفجار - قابلیت حفاری - پایداری شیب پله ها
- حمل و نقل
  - تونل‌های جاده‌ای
  - تونل‌های راه آهن
  - تونل‌های شهری (مترو) و ایستگاه‌ها
  - معادن خنمک

- انرژی
  - نیروگاههای زیرزمینی (هیدرولیک - اتمی)
  - ذخیره نفت و گاز
  - رفتن ذباله‌های اتمی
  - انرژی ژئوترمال Geothermal Energy
  - سدسازی
- نفت
  - هفاری
  - شکاف هیدرولیکی Hydrolic Fracturing
  - استخراج شیل‌های نفتی
- حفرات
  - انتقال آب
  - تأسیسات تصفیه خانه و آبرسانی
  - واعلاب
- نظامی
  - آشیانه موشک‌های استراتژیک
  - تأسیسات نظامی زیرزمینی
  - پناهگاهها
- مسکن
  - خانه‌های زیرزمینی
  - اداره - انبار
  - کارخانه
- کاربردهای جدید
  - کشف فضا
  - پیش‌بینی زلزله
  - معدنکاری به روش کنترل از راه دور و رجا
  - تونل‌های زیر اقیانوسی برای نفت
  - حفره‌های زیرزمینی بزرگ جهت پناهگاه غیرنظامی با رهائی ۵۰ متر

برای ساخت پرتابه زیر، طراحی و اجرای [illegible] بزرگی فوق الذکر بسته به نوع کار یک و یا چند مورد زیر که نیاز زیادی به داده های مکانیک سنگ دارند باسیستی بررسی شوند

- ارزیابی کمی عوارض زمین شناسی
- انتخاب و آماده سازی مواد سنگی (مصالح سنگی)
- ارزیابی قابلیت حفاری و چالزنی سنگ ها و طراحی دستگاهها و تجهیزات حفاری
- ساختمان کلی (Layout) و انتخاب شکل ساختمانهای زیرزمینی
- تحلیل تغییر شکل سنگها
- تحلیل پایداری سنگها
- سرپرستی و کنترل پروسه های آتشباری
- طراحی سیستم نگهداری
- شکافت هیدرولیکی Hydrolic Fracturing

نحوه صحیح بدست آوردن اطلاعات مورد بحث در بالا در کشورهای مختلف دنیا باهم فرق میکند و طبق استانداردهای آن مکانیک صورت میگیرد. در این ارتباط بهتر است از روش های پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک استفاده کرد. (۱۵)

منابع و مآخذ مورد استفاده در ارتباط با مکانیک سنگ.

1_ Coates. D.F. 1980. ROCK Mechanics Principles, Mines Branch Monograph 874 CANMET Third Edition. Ottawa.

2_ Good man 1989. R.E. Introduction to Rock Mechanics. john Wiley & Sons New York.

3_ Hoek.E & Brown.E.T. Undergrcund Excavations in Rock Institution of Mining and Metallurgy 1980. London. 527. P.

4_ Jager.J.C and Cook.N.G.W. Funcamentals of Rock Mechanics. Chapman and Hall. London. 1984.

5_ Bieniavski, 2.T. Rock Mechanics Design in Tunnelling Balkema. Rotterdam. 1984.

6_ Müller.L. Rock Mechanics. Springer Verlag Wien 1974.

7_ Budavari,s. Rock Mechanics in Mining practice. South African Institute of Mining and Mettalurgy Johannsburg 1983.

8_Farmer.I.W. Engineering Behaviour of Rocks Chapman Hall. London. 1983.

9_Brady.B.H.G. and Brown.E.T. Rock Mechanics for Underground Mining Allen and Unwin London.1981.

10_Brown.E.T. Rock Characterization.Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. prgamon press, OXFORD 1981.

11_International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences pergamon press Oxford.

12_Rock Mechanics and Rock Engineering Sprin_ger Verlay_Wien

13_Tunnels and Tunnelling.Morgan_Granpian Ltd London.

14_Engineering Geology_International Journal Elsvier.Amsterdom.

وضعیت تنش در یک نقطه

اطلاع از مکانیک اجسام جامد شکل پذیر به ما امکان میدهد که توسط روش‌های ریاضی توزیع تنش و جابجائی‌های نسبی که در داخل یک جسم تحت تأثیر بارها و یا تغییرشکل‌های وارده ایجاد میشود را حساب کرد. تعیین توزیع تنش و تغییر شکل در داخل یک جسم به مهندس این امکان را میدهد که پیش بینی نماید در یک نقطه معین در داخل جسم و یا سطح آن وقتی که جسم مربور تحت تأثیر سیستم بارگذاری خاصی قرار میگیرد و چه میگذرد. برای انجام یک چنین تحلیلی باید یک مدل جسم شکل جسم (وقتی که جسم تحت تأثیر بارگذاری قرار گیرد در داخل آن چه می گذرد) استراتژی بارگذاری و خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده جسم جامد مشخص باشد.

در حل مسائل عملی (مسائل کاربردی) همیشه فاکتور فوق الذکر ممکن است چنان پیچیده باشند که تعیین توزیع تنش و تغییر شکل خیلی مشکل و یا غیر ممکن باشد بنابراین مسئله را میتوان تا اندازه‌ای ساده و ایده آلیزه نمود.

تقریبا تمام توصیفاتی که در مورد اجسام جامد شکل پذیر ارائه شده همگی بر مبنای تئوری پیوسته (Continum Theory) میباشند. در این تئوری ساختمان مولکولی جسم نادیده گرفته شده و با یک محیط پیوسته معادل فرضی که رفتار آن به مفهوم ریاضی در تمام نقاط یکسان است جایگزین شده است. بنابراین مسئله براساس جابجائی متوسط نقاط درون جسم نسبت به یکدیگر حل شده نه براساس جابجائی مولکول های جسم نسبت به یکدیگر.

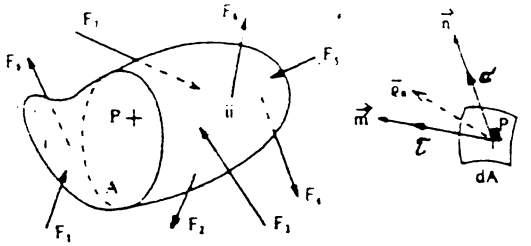
خواص مکانیکی جسم معادلی که در فوق تعریف شد فرض میشود در تمام نقاط جسم یکسان است. موادی که دارای چنین خاصیتی باشند همگن (Homogeneous) همگن یا متجانس نامیده میشوند. خواص مکانیکی جسم در تمام نقاط یکسان است = همگن

یکی دیگر از موارد ساده کردن مسئله این است که فرض می‌شود خواص مکانیکی جسم در هر نقطه از آن در تمام جهات یکسان است. اجسامی که چنین خواص مکانیکی از خود نشان دهند ایزوتروپیک (Isotropic) خوانده می‌شوند. اگرچنانچه خواص مکانیکی جسم در جهات مختلف یکسان نباشد این جسم از نظر رفتار آنیزوتروپ (Anisotropic) خوانده می‌شود.

خواص مکانیکی جسم در تمام نقاط یکسان است = ایزوتروپیک

جسم جامدی را مانند شکل زیر در نظر بگیرید که تحت تاثیر نیروهای مؤثر خارجی در حال تعادل است. تصور کنید که این جسم توسط یک صفحه فرضی مثل (A) به دو قسمت تقسیم شده باشند. از حالت تعادل موجود در کل جسم نتیجه گیری می شود که هریک از قسمت های I و II نیز باید در حال تعادل باشند. چون نیروهای خارجی مؤثر بر هریک از قسمت های I و II به طور جداگانه حالت تعادل را ایجاد می کنند. اینرو قسمت وقتی میتوانند در حال تعادل باشند که نیروهای داخلی در سطح فرضی A اثر نمایند. برآیند نیروهای داخلی مؤثر بر سطح A را میتوان از شرایط تعادل موجود در هریک از دو قسمت فوق بدست آورد. به گفته دیگر برآیند نیروهای داخلی مؤثر بر سطح A مساوی برآیند نیروهای مؤثر بر هریک از قسمت I و II بوده ولی در جهت عکس آن عمل مینماید. نیروهای داخلی معمولاً به صورت پیوسته در سطح مفروض توزیع شده اند. شدت نیروهای داخلی به صورت خارج قسمت نیروی مؤثر بر واحد سطح بیان شده و تنش نامیده می شود. (Stress)

تنش : شدت نیروهای داخلی به صورت خارج قسمت نیروی مؤثر بر واحد سطح



$$\lim \Delta A = dA$$

$$\lim \Delta F = \vec{dF}$$

برای تعریف تنش با یک مفهوم ریاضی لازم است قسمت کوچک ΔA از صفحه فرضی A حول نقطه P در نظر گرفته شود. این صفحه کوچک کاملاً با صفحه مماس به سطح در نقطه P مطابقت دارد. بنابراین صفحه کوچک اولیه ΔA (Elemantary) را میتوان با

بردار واحد $\vec{n}$ عمود بر صفحه مماس در نقطه P استخراج کرد. اگر سطح اولیه المانی کوچک باشد می‌توان نوشت $\lim \Delta A = dA$ و نیروی داخلی مؤثر بر سطح آنرا میتوان تابت فرض کرده با میل دادن نیروی مؤثر داخلی بر سطح کوچک اولیه با $\lim \Delta \vec{F} = d\vec{F}$

میتوان مقدار تنش در سطح کوچک ΔA را با نزدیک کردن نیرو بر سطح حساب کرد

تنش: جمع برداری نیروها بر واحد سطح
برآیند تنش به دو مؤلفه تقسیم می‌شود

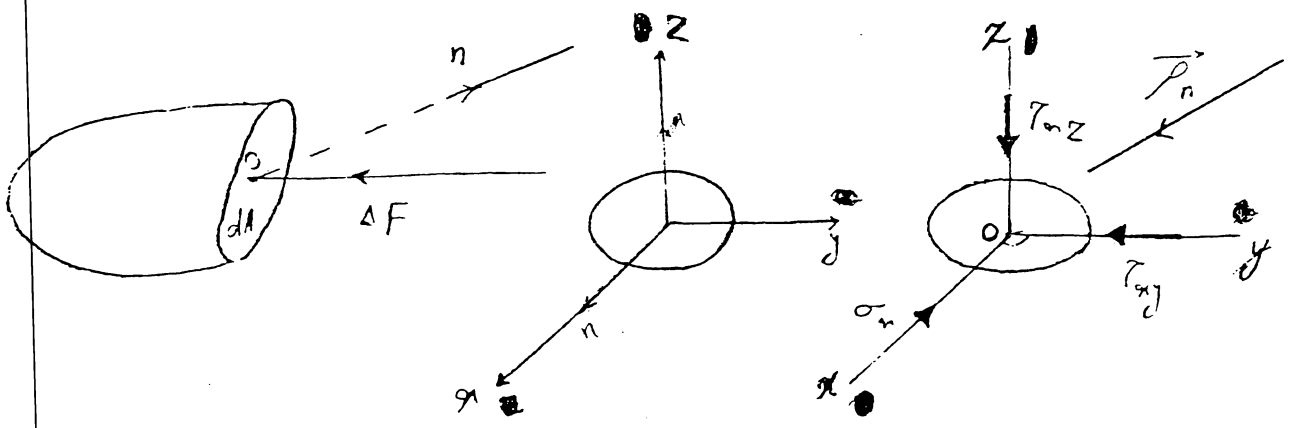
$$\vec{\rho}_n = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta A} = \frac{d\vec{F}}{dA}$$

تنش برآیند نیروها بر واحد سطح

روشن است که تنش یک کمیت برداری بوده که بزرگی آن برابر $|\vec{\rho}_n|$ و جهت آن موازی $d\vec{F}$ است. $(\vec{\rho}_n)$ بردار تنش است که بر سطح صفحه فرضی، که عمود بر آن در جهت بردار واحد $\vec{n}$ است، اثر نموده. در مکانیک مهندسی بردار تنش معمولاً به دو مؤلفه به نام‌های تنش عمودی $\sigma = (\text{Normal Stress})$ به موازات جهت بردار واحد $\vec{n}$ و تنش برشی $\tau = (\text{Shear Stress})$ مؤثر بر سطح صفحه کوچک اولیه و به موازات بردار واحد $\vec{m}$ تجزیه می‌شود. تنش در یک نقطه به جهت و امتداد صفحه فرضی بستگی دارد.

واضح است که وقتی جسم توسط صفحات فرضی دیگری که همگی از نقطه P میگذرند قطع گردد، مقدار و جهت نیروهای داخلی فرق خواهد کرد. بنابراین تنش در یک نقطه به جهت و امتداد صفحه فرضی بستگی دارد. حالت تنش، گروه کامل مؤلفه‌های تنش که بر سطح‌های کوچک dA در جهت‌های مختلف در اطراف نقطه عمل می‌کنند.

گروه کامل مؤلفه‌های تنش که بر سطح کوچک اولیه dA در جهت‌های معینی در اطراف یک نقطه اثر می‌کنند را حالت تنش (State of Stress) در این نقطه می‌نامند و هدف از آنالیز تنش این است که در هر نقطه از داخل جسم حالت تنش را تعیین نمایند.



در دستگاه محورهای مختصات در شکل قبل را به عنوان مرجع قبول کنیم بردار واحد $\vec{n}$ را با ox هم جهت انتخاب کنیم (ρ_{ox}) بردار تنش را در صفحه‌ای که عمود بر آن با محور x هم جهت و منطبق با است نشان میدهد. بردار مزبور در جهت محورهای x و y و z دارای سه مؤلفه τ_{xz} و τ_{xy} و σ_x می‌باشد. سطح A که در صفحه $z-y$ قرارگرفته بر محور ox عمود بوده و تنش مؤثر در این جهت را تنش قائم (نرمال) گویند (Normal Stress).

مؤلفه‌های تنش τ_{xy} و τ_{xz} که با سطح کوچک اولیه در یک صفحه قرار دارند تنش‌های برشی هستند و در صفحه‌ای از جسم که A در آن قرار گرفته باعث پارگی و لغزش می‌شوند.

اگر جهت ox عمود بر سطح صفحه کاغذ قبول شود در صورتیکه با انگشت به نقطه o فشار دهیم تنش σ_x حاصل را تنش فشاری و در صورتیکه از نقطه کاغذ را به طرف خود بکشیم آنرا تنش کششی می‌گویند.

اگر چنانچه جهت عمود بر صفحه $\vec{n}$ با محور oy یکی فرض شود یعنی سطح مفروض در صفحه zx قرارگیرد مؤلفه‌های بردار $\vec{\rho_n}$ مقادیر τ_{yz} و τ_{yx} و σ_y خواهند بود. و اگر عمود $\vec{n}$ با محور oz هم جهت فرض شود یعنی سطح مفروض در صفحه yx قرارگیرد مؤلفه‌های تنش τ_{zy} و τ_{zx} و σ_z خواهند بود.

State of stress

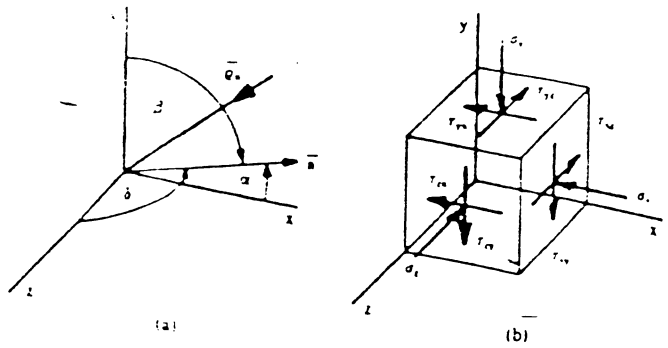
تانسور تنش که به صورت زیر نشان داده شده است. حالت تنش در نقطه o را که عبارت است از مؤلفه‌های تنش در صفحات عمود بر x و y و z را به طور کامل نشان میدهد.

تانسور تنش ← حالت تنش در نقطه که عبارت از مؤلفه تنش در صفحاتی که عمود بر x و y و z هستند

$$[\sigma]_{xyz} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

در شکل صفحه دیگر بزروی یک المان مکعبی شکل که نقطه o را در برگرفته حالت تنش نشان داده شده است. برای ایجاد تعادل **مان** (چرخش) در المان مزبور لازم است

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad , \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad , \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$



(a) (b)

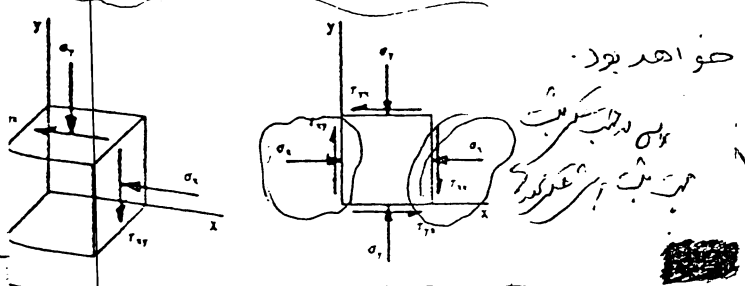
بنابراین برای بیان حالت تنش در یک نقطه دانستن ۶ مؤلفه تنش کافی است.

همانطور که بعداً ملاحظه خواهد شد در حالت دوبعدی (صفحه) دانستن ۳ مؤلفه تنش در یک نقطه برای بیان حالت تنش کافی خواهد بود. این سه مؤلفه تنش عبارتند از:

σ_x ، σ_y ، τ_{xy} (در حالت دوبعدی دانستن ۳ مؤلفه کافی است برای بیان حالت تنش)

در مکانیک سنگ مثل مکانیک خاک و رسم شناسی ساختمانی و سایر علوم مشابه تنش فشاری + فرض می‌شود زیرا در مسائل مکانیک سنگ تنش‌هایی که با آنها سروکار داریم اغلب از نوع فشاری هستند مثل فشار طبقات، تنش‌های ناشی، تنش‌های قائم که باعث چسبیدن لایه‌ها به هم می‌شوند، فشار آب مانند غیره.

در شکل فوق عمود بر سطوح وجهای المان مکعبی شکل منطبق بر محورهای مختصات انتخاب شده و مؤلفه‌های تنش که حالت تنش در یک نقطه را مشخص می‌کنند مطابق با جهت مثبت اختیار شده بر روی المان مزبور نشان داده شده‌اند. در یک سطح مثبت که عمود بر آن هم جهت با جهت مثبت محور هاست تنش‌های برشی مثبت در جهت مثبت محورها اثر میکنند. در سطوحی که عمود بر آن در جهت منفی محورها است تنش‌های مثبت برشی در جهت عکس محورها اثر می‌کنند. این تعیین علامت در حالت تنش‌های صفحه‌ای (دوبعدی) راحت‌تر فهمیده می‌شود. بعنوان مثال سطحی که عمود بر آن در امتداد $+\sigma_x$ میباشد و $+\tau_{xy}$ مؤثر بر سطح در جهت $+\sigma_y$ خواهد بود.



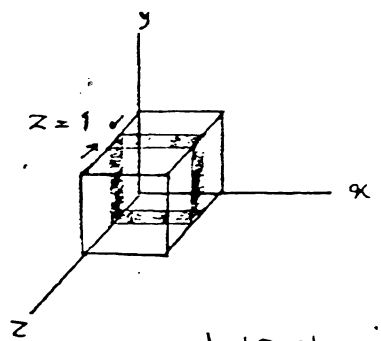
(a) (b)

تنش‌های وتانم مساری مثبت هستند. تنش‌های تنشی منفی فرض می‌شوند. تنش‌های مثبت بردی در شکل نشان داده شده‌اند

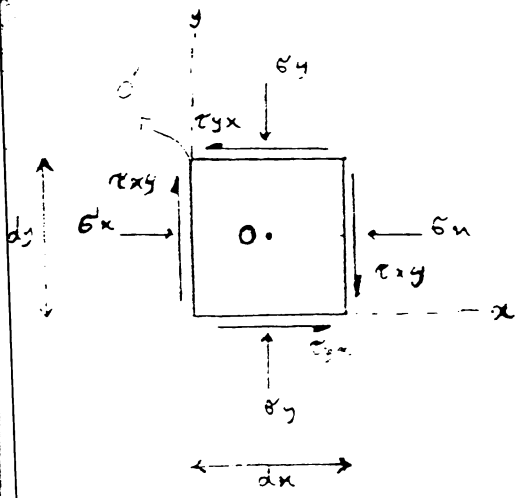
زیرنویس (اندیس) در حالت تنش قائم محوری از دستگاه مختصات را نشان می‌دهد بر سطحی از المان که تنش بر روی آن نشان داده شده عمود باشد. در حالت تنش برشی از یک اندیس دوحرفی استفاده می‌شود. اولی محوری را که بر سطح مربور (وجه) عمود است و تنش بر آن اثر می‌کند را نشان میدهد در صورتیکه اندیس دوم جهت تنش را مشخص میکند.

تنش در اجسام دوبعدی (Plane Stress)

در صورتیکه تمامی بردارهای تنش در یک صفحه قرار داشته باشند تعیین حالت تنش در یک نقطه خیلی آسانتر می‌شود. اگر چنین شرایطی در هر نقطه از داخل جسم در نظر گرفته شود یک حالت تنش صفحه ای (دوبعدی) بوجود خواهد آمد. در صورتیکه حالت تنش دوبعدی در نظر گرفته شود تمامی نیروهای خارجی مؤثر بر جسم در صفحه x-y اثر خواهند کرد و جسم مورد نظر فرض می‌شود بین دو صفحه به موازات x-y که به فواصل مساوی در دو طرف آن قرار گرفته‌اند محدود شده است. ضخامت جسم در امتداد محور z ها در مقایسه با ابعاد آن در امتداد دو محور دیگر کوچک بوده و قابل اغماض است. در نتیجه فرض آخر تغییرات نیروهای داخلی در امتداد محور z خیلی کوچک بوده (در صورتیکه ضخامت هم اندازه کافی کوچک فرض شود) میتوان آنرا مستقل از z فرض کرد.



در شکل فوق اگر المان مربعی شکل در حال تعادل باشد بایستی نیروهای حاصل از تنش های مؤثر در وجوه آن نیز متعادل باشند. به این ترتیب برای ایجاد تعادل المان حول نقطه o اگر بگیریم خواهیم داشت:



$$\sum M_{O'} = 0$$

$$\tau_{yx}\,dx\,.\,dy - \tau_{xy}\,dy\,.\,dx = 0$$

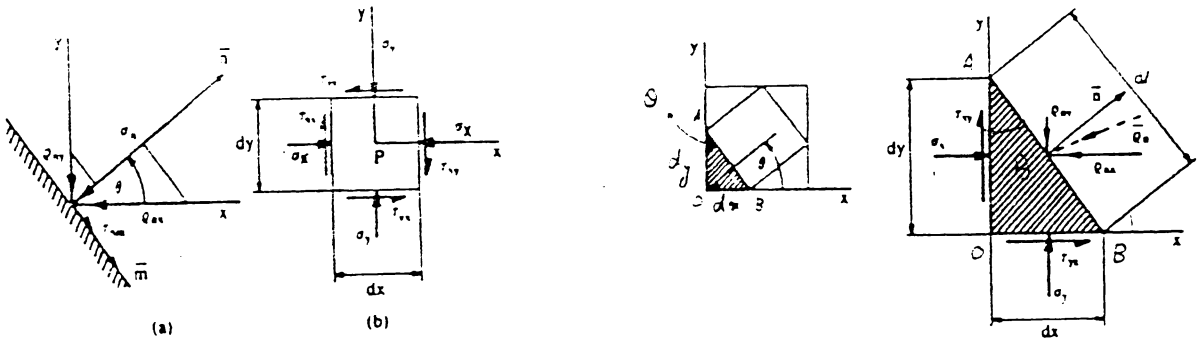
$$\Rightarrow \tau_{yx} = \tau_{xy}$$

$$\sum M_O = 0$$

$$\tau_{xy}.dy.\frac{dx}{2} - \tau_{yx}.dx.\frac{dy}{2} + \tau_{xy}.dy.\frac{dx}{2} - \tau_{yx}.dx.\frac{dy}{2} = 0$$

$$\tau_{xy}.dy.dx = \tau_{yx}.dx.dy \quad \Rightarrow \quad \tau_{xy} = \tau_{yx}$$

محاسبه تنش های برشی و قائم مؤثر بر هر نقطه از جسم :



در نظر گیریم که المانی صفحه‌ای مثل شکل (b) تحت تأثیر تنش های مختلف قرار گرفته باشد. میخواهیم تنش های قائم و برشی مؤثر بر صفحه ای که عمود بر آن با محور x ها زاویه θ میسازد را حساب کنیم. ضخامت المان مزبور را واحد فرض میکنیم. قبل از هرچیز معادلات تعادل را می نویسیم

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\begin{cases} p_{nx} \cdot dl = \sigma_x \cdot dy + \tau_{yx} \cdot dx \\ p_{ny} \cdot dl = \sigma_y \cdot dx + \tau_{xy} \cdot dy \end{cases} \qquad (1-3)$$

فقط با توجه به زاویه θ و در مثلث OAB خواهیم داشت.

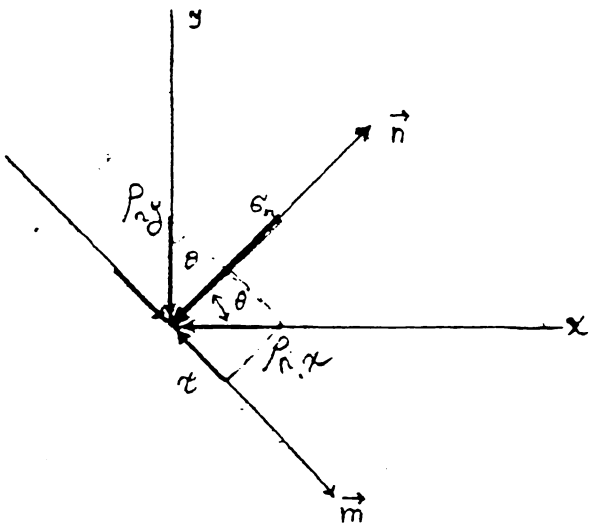
$$dx = dl \cdot \sin\theta$$
$$dy = dl \cdot \cos\theta$$

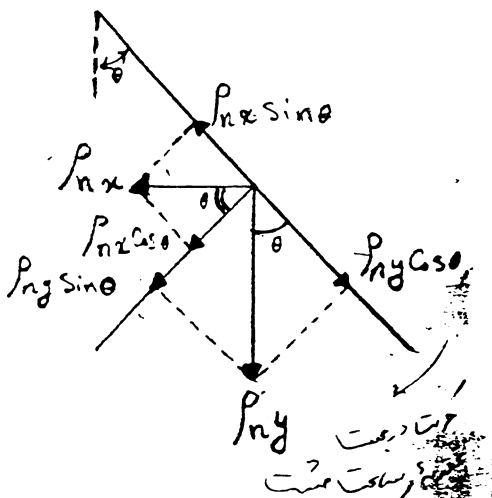
و با جایگذاری آنها در رابطه (1-3) خواهیم داشت.

$$\begin{cases} p_{nx} \cdot dl = \sigma_x \cdot dl \cdot \cos\theta + \tau_{yx} \cdot dl \sin\theta \\ p_{ny} \cdot dl = \sigma_y \cdot dl \cdot \sin\theta + \tau_{xy} \cdot dl \cos\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_{nx} = \sigma_x \cdot \cos\theta + \tau_{yx} \cdot \sin\theta \\ p_{ny} = \sigma_y \cdot \sin\theta + \tau_{xy} \cdot \cos\theta \end{cases} \qquad (1-4)$$

مولفه های قائم واقعی بردار تنش در صفحه مورد نظر یعنی σ و τ را میتوان با تجزیه بردارهای p_{nx} و p_{ny} در امتداد صفحه و امتداد قائم بر آن بدست آورد و آنها را با هم جمع کرد.





$$\begin{cases} \sigma = \rho_{nx}\cos\theta + \rho_{ny}\cdot\sin\theta \\ \tau = \rho_{ny}\cos\theta - \rho_{nx}\cdot\sin\theta \end{cases} \qquad (1-5)$$

حال به جای مقادیر ρ_{nx} و ρ_{ny} در رابطه (۱-۵) از رابطه (۱-۴) قرار میدهیم.

$$\begin{cases} \sigma = (\sigma_x\cdot\cos\theta + \tau_{yx}\cdot\sin\theta).\cos\theta - (\sigma_y\cdot\sin\theta + \tau_{xy}\cdot\cos\theta)\cdot\sin\theta \\ \tau = (\sigma_y\cdot\sin\theta + \tau_{xy}\cdot\cos\theta).\cos\theta - (\sigma_x\cdot\cos\theta + \tau_{yx}\cdot\sin\theta).\sin\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_x\cos^2\theta + \tau_{yx}\sin\theta\cdot\cos\theta + \sigma_y\sin^2\theta + \tau_{xy}\sin\theta\cos\theta \\ \tau = \sigma_y\sin\theta\cdot\cos\theta + \tau_{xy}\cos^2\theta - \sigma_x\cos\theta\sin\theta - \tau_{yx}\sin^2\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_x\cdot\cos^2\theta + \sigma_y\sin^2\theta + \tau_{yx}\sin\theta\cdot\cos\theta + \tau_{xy}\sin\theta\cos\theta \\ \tau = (\sigma_y-\sigma_x)\sin\theta\cdot\cos\theta + \tau_{xy}\cos^2\theta - \tau_{yx}\sin^2\theta \end{cases}$$

و از آنجائیکه $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ و برطبق روابط مثلثاتی:

$$\begin{cases} \cos^2\theta-\sin^2\theta = \cos 2\theta \\ \sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta \end{cases}$$

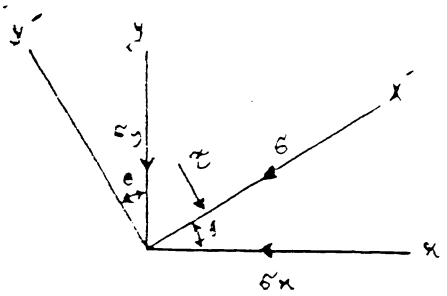
خواهیم داشت:

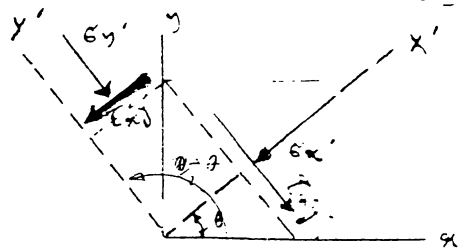
$$\begin{cases} \sigma = \sigma_x\cos^2\theta + \sigma_y\sin^2\theta + 2\tau_{yx}\sin\theta\cos\theta \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_y-\sigma_x)\sin 2\theta + \tau_{xy}(\cos^2\theta-\sin^2\theta) \end{cases}$$

$$\boxed{\begin{cases} \sigma = \sigma_x\cos^2\theta + \sigma_y\sin^2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_y-\sigma_x)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta \end{cases}} \qquad (1-9)$$

بدین ترتیب تنش های قائم و برشی مؤثر در صفحه مورد نظر بدست میآید.

این مسئله را میتوان به یک صورت دیگر حل کرد. فرض کنیم که محورهای مختصات وصفحه را چنان تغییر دهیم که با اندازه زاویه θ دوران داده باشیم. در این حالت در دستگاه مختصات جدید σ'_x و σ'_y و τ_{xy} مساوی مقادیر σ و τ به دست آمده از رابطه فوق خواهند بود. یعنی:





$$\begin{cases} \sigma'_x = \sigma_x \cdot \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \sigma'_y = \sigma_x \cdot \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \tau'_{xy} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \end{cases}$$

$\sin 2(\theta + \pi/2) = -\sin 2\theta$

برای بدست آوردن مقدار σ_y کافی است کرده معادله مربوط به σ'_x به جای زاویه θ مقدار $(\theta + \frac{\pi}{2})$ را قرار دهیم در این صورت خواهیم داشت:

$$\boxed{\sigma'_x = \sigma_x \cdot \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta}$$

$$\sigma'_y = \sigma_x \cdot \cos^2(\theta + \tfrac{\pi}{2}) + \sigma_y \sin^2(\theta + \tfrac{\pi}{2}) + 2\tau_{xy} \sin(\theta + \tfrac{\pi}{2}) \cos(\theta + \tfrac{\pi}{2})$$

با توجه به روابط:

$$\sin(\tfrac{\pi}{2} + \alpha) = \cos\alpha$$
$$\cos(\tfrac{\pi}{2} + \alpha) = -\sin\alpha$$

$$\Rightarrow \sigma'_y = \sigma_x \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta - 2\tau_{xy} \sin\theta \cdot \cos\theta$$

$$\boxed{\sigma'_y = \sigma_x \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta}$$

حال اگر چنانچه مقادیر بدست آمده برای σ'_x و σ'_y را طرف به طرف جمع کنیم خواهیم داشت:

$$\sigma'_x + \sigma'_y = \sigma_x(\sin^2\theta + \cos^2\theta) + \sigma_y(\sin^2\theta + \cos^2\theta)$$

$$\rightarrow \boxed{\sigma'_x + \sigma'_y = \sigma_x + \sigma_y}$$

* یعنی مجموع تنش‌های قائم در اطراف یک نقطه با تغییر جهت صفحه مورد نظر ثابت میماند.

حال با استفاده از روابط مثلثاتی زیر روابط مربوط به σ_x' و σ_y' را میتوان به صورت ساده‌تری درآورد.

$$\cos^2\theta = \frac{1+\cos 2\theta}{2}$$

$$\sin^2\theta = \frac{1-\cos 2\theta}{2}$$

$$\begin{cases} \sigma_x' = \sigma_x\left(\frac{1+\cos 2\theta}{2}\right) - \sigma_y\left(\frac{1-\cos 2\theta}{2}\right) + \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \sigma_y' = \sigma_x\left(\frac{1-\cos 2\theta}{2}\right) + \sigma_y\left(\frac{1+\cos 2\theta}{2}\right) - \tau_{xy}\sin 2\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_x' = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2}\cdot\cos 2\theta + \frac{\sigma_y}{2} - \frac{\sigma_y}{2}\cdot\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \sigma_y' = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2}\cdot\cos 2\theta + \frac{\sigma_y}{2} + \frac{\sigma_y}{2}\cdot\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \end{cases}$$

روابط σ_x' و σ_y' برحسب σ_x و σ_y

$$\begin{cases} \sigma_x' = \frac{1}{2}(\sigma_x+\sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x-\sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \sigma_y' = \frac{1}{2}(\sigma_x+\sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x-\sigma_y)\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \end{cases}$$

تنش‌های اصلی و جهت آنها (Principal Stresses)

حال اگر از رابطه مربوطه $\sigma_x' = \sigma$ نسبت به θ مشتق گرفته و آنرا مساوی صفر قرار دهیم مقادیری از θ را که باعث می‌شود σ یا یکی از آن Max یا Min شود بدست خواهیم آورد.

$$\frac{\partial \sigma_x'}{\partial \theta} = -2\times\frac{1}{2}(\sigma_x-\sigma_y)\sin 2\theta + 2\tau_{xy}\cos 2\theta = 0$$

طرفین را بر $\cos 2\theta$ تقسیم میکنیم

$$-(\sigma_x-\sigma_y)\frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} + 2\tau_{xy}\frac{\cos 2\theta}{\cos 2\theta} = 0$$

$$-(\sigma_x-\sigma_y)\tan 2\theta + 2\tau_{xy} = 0 \Rightarrow \tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x-\sigma_y}$$

$$\Rightarrow 2\theta = \text{Arc}\tan\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x-\sigma_y}$$

$$\rightarrow \theta = \frac{1}{2} \text{Arc tg} \left[\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right] + k \cdot 90^\circ \quad \Rightarrow k = 0, 1, 2$$

برای بردار واحد $\vec{n}$ چهار جهت معین وجود دارد که دو به دو بر هم عمود هستند. که بردار تنش σ_n مؤلفه برشی ندارد. این جهت ها را جهت های اصلی (principal Directions) گویند. و تنش های موثر در این جهت ها را تنش های اصلی (principal Stresses) گویند. حال اگر مقادیر بدست آمده برای θ را از رابطه فوق در معادله مربوطه به $\tau_{x'y'}$ قرار دهیم خواهیم دید که به ازای آن $\tau_{x'y'} = 0$ می شود. یعنی اولاً زوایایی وجود دارد که به ازای آن تنش های قائم موثر بر صفحه مورد نظر ماکزیمم و یا مینیمم می شود. و از طرف دیگر در صفحاتی که تنش قائم σ ماکزیمم و یا مینیمم می شود تنش های برشی صفر می شود. چنین صفحاتی را صفحات اصلی تنش گویند.

$$\text{tg } 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad \Rightarrow \quad \tau_{xy} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \text{tg } 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \text{tg } 2\theta \cdot \cos 2\theta$$

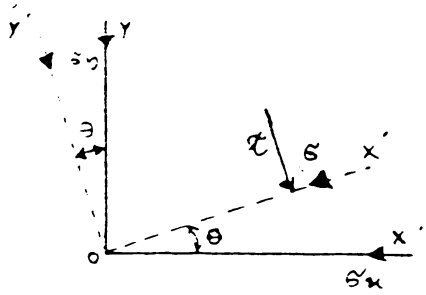
$$\tau_{x'y'} = -\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta = 0$$

$$\Rightarrow \tau_{x'y'} = 0$$

یعنی بر صفحه ای که σ ماکزیمم است و یا مینیمم هم، تنش برشی (τ) وجود ندارد. این صفحات را صفحات اصلی تنش و یا جهات اصلی (θ_1, θ_2) و تنش های موثر بر این صفحات را نیز تنش های اصلی میگویند. و آنها را با σ_1, σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$) نشان میدهند.

همانطور یکه قبلاً به تفصیل گفته شد:

با استفاده از حالت تعادل یک جسم مثلث شکل (منشور) ثابت شد که اگر σ_x ، σ_y ، τ_{xy} را دانسته باشیم میتوانیم مقدار تنش های مؤثر در هر نقطه از صفحه جسم را که عمود بر آن با محور مختصات ox زاویه θ می سازد را از روابط زیر بدست آوریم.



$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{x'y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin 2\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin 2\theta \\ -\frac{1}{2}\sin 2\theta & \frac{1}{2}\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\left[\overrightarrow{\sigma_{x'y'}}\right] = A \left[\overrightarrow{\sigma_{xy}}\right]$$

و بصورت دیگر خواهیم داشت:

$$\sigma_{x'} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta$$

$$\sigma_{y'} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta$$

و با استفاده از رابطه:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

بنا براین مقداری از θ وجود دارد که به ازای آن در محور $x'oy'$ تنش برشی صفر می شود. این محورها را محورهای اصلی تنش می گویند و با σ_1 و σ_2 نشان میدهند.

مقدار $\operatorname{tg} 2\theta$ را از قبل قرار می دهیم

$$\sin 2\theta = \pm\left[1 + \cot g^2 2\theta\right]^{-\frac{1}{2}} = \pm \operatorname{tg} 2\theta \left[\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\cos 2\theta = \pm\left[1 + \operatorname{tg}^2 2\theta\right]^{-\frac{1}{2}} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\left[\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$

اگر مقادیر فوق را در معادله زیر قرار دهیم:

$$\sigma_{x'} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta$$

حواهیم داشت:

$$\sigma_{x'} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \left[\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 \right]^{1/2}$$

معادله σ_2 نیز نتایج مشابه خواهد داشت بنابراین (و مقدار معادله بالا ($\sigma_{x'}$) به ما (و مقدار تنش اصلی را می‌دهد یعنی:

$\sigma_1 > \sigma_2$

$$\text{تنش‌های اصلی} \quad \begin{cases} \sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \left[\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 \right]^{1/2} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \\ \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \left[\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 \right]^{1/2} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \end{cases} \quad *$$

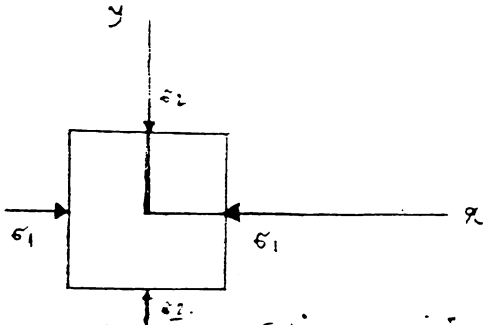
معمولاً محورهای OX و OY را منطبق بر تنش‌های اصلی می‌گیریم و سپس هم انتخاب می‌کنند.

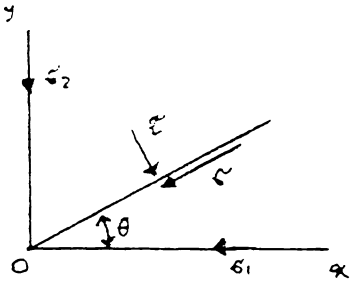
تنش برشی نداریم τ_{xy}

در چنین حالتی خواهیم داشت.

تنش‌های مؤثر بر صفحات مختلف

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 \cos^2\theta + \sigma_2 \sin^2\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \\ \tau = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\theta \end{cases}$$





نوعی باز دست داشتن تنش‌های اصلی می‌توانیم تنش‌های مؤثر بر صفحات مختلف را حساب کنیم.

حال اگر در رابطه بالا فرض کنیم:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = a \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = b \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma = a + b\cos 2\theta \\ -\tau = b\sin 2\theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (\sigma - a) = b\cos 2\theta \\ (-\tau) = b\sin 2\theta \end{cases}$$

حال اگر معادله بالا را به توان ۲ رسانیده و طرفین را با هم جمع کنیم خواهیم داشت:

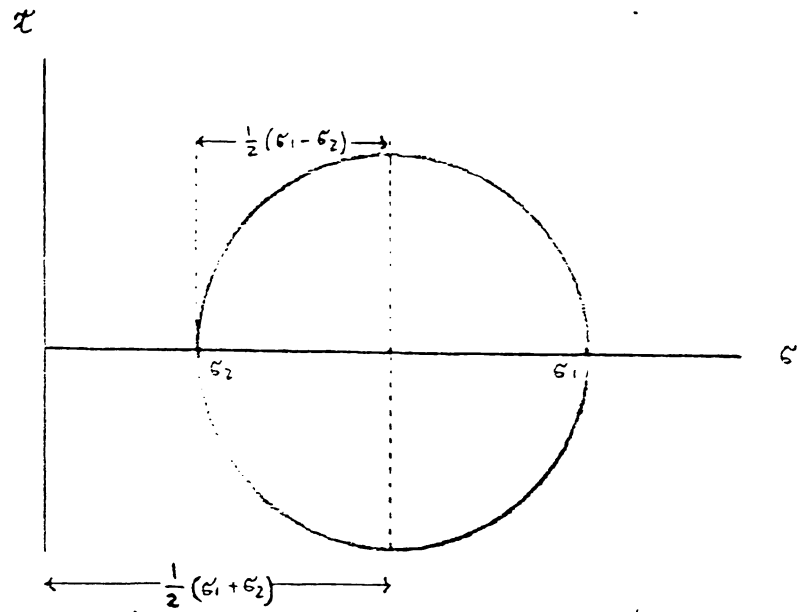
$$(\sigma - a)^2 = b^2 \cos^2 2\theta$$

$$(-\tau)^2 = b^2 \cdot \sin^2 2\theta \quad +$$

$$(\sigma - a)^2 + \tau^2 = b^2(\sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta) = b^2 \rightarrow \boxed{(\sigma - a)^2 + \tau^2 = b^2}$$

حال اگر معادله فوق را با معادله دایره مقایسه کنیم $(x-a)^2 + (y-b)^2 = R^2$

درمییابیم که معادله فوق معادله دایره ای است که مختصات مرکز آن $a = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$ و شعاع آن $b = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ میباشد. و مرکز آن بر روی محور σ ها قرار دارد.



- این دایره که مکان هندسی تقاطع با صفحات (τ, σ) می باشد به اسم دایره موهر مشهور است که در سال 1882 توسط (OTTO MOHR) برای اولین بار ارائه شده است و برای بدست آوردن تنش های مؤثر بر صفحات مختلف جسم از طریق ترسیمی مورد استفاده قرار می گیرد.

1- روش اول (Good man)

نحوه رسم دایره موهر

۱- محورهای مختصات σ و τ را رسم کرده و σ مثبت را در جهت مثبت محور σ و به موازات آن و τ مثبت را به موازات τ رسم میکنیم.

۲- نقطه Q به مختصات (σ_x, τ_{xy}) را پیدا می‌کنیم

۳- نقطه P به مختصات $(\sigma_y, -\tau_{xy})$ را رسم میکنیم. (نقطه P را قطب یا (Pole) میگویند)

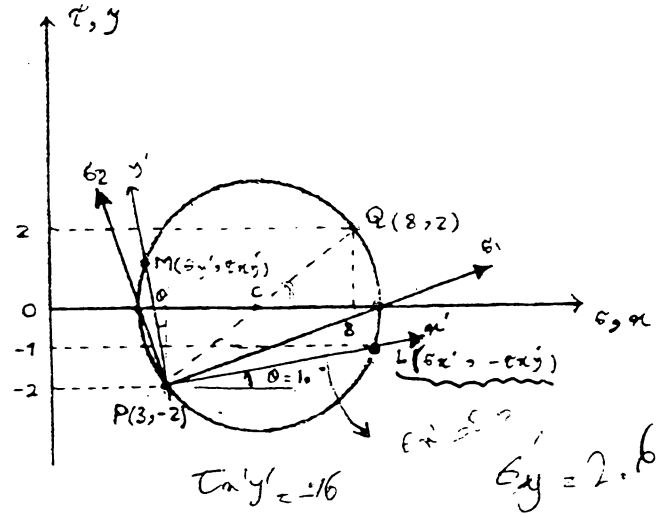
۴- نقطه c را روی محور σ و در وسط PQ در نظر می‌گیریم.

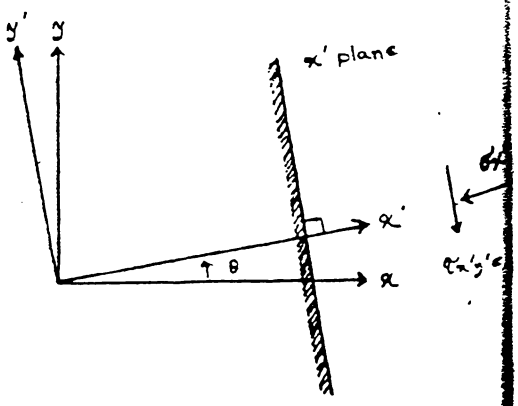
۵- دایره ای به مرکز c و شعاع cp رسم میکنیم.

۶- از نقطه P خطی موازی ox' رسم میکنیم تا دایره را در نقطه L قطع کند مختصات نقطه $L(\sigma_{x'}, -\tau_{xy'})$ میباشد

۷- از نقطه P خطی به موازات y' رسم میکنیم تا دایره را در نقطه M قطع کند مختصات نقطه $M(\sigma_{y'}, \tau_{xy'})$ است.

مثال: اگر $\sigma_x = 8$ و $\sigma_y = 3$ و $\tau_{xy} = 2$ باشد مقادیر $\sigma_{x'}$ و $\sigma_{y'}$ و $\tau_{xy'}$ را در جهت x' و y' پیدا کنید $(\theta = 10^\circ)$



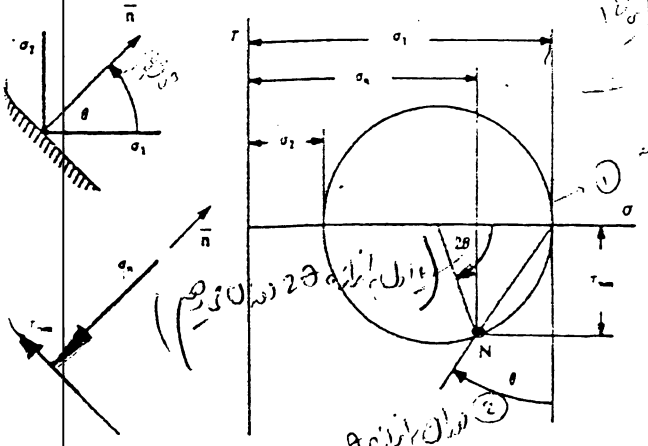


برای مقدار معینی از θ مقدار $\tau_{x'y'}$ مساوی صفر بوده و $\sigma_{x'}$ ماکزیمم یا مینیمم است.

جهت x و y در این حالت جهت اصلی (principal Directions)
تنش‌های قائم مربوط نیز تنش های اصلی ماکزیمم σ_1 و مینیمم σ_2 هستند.

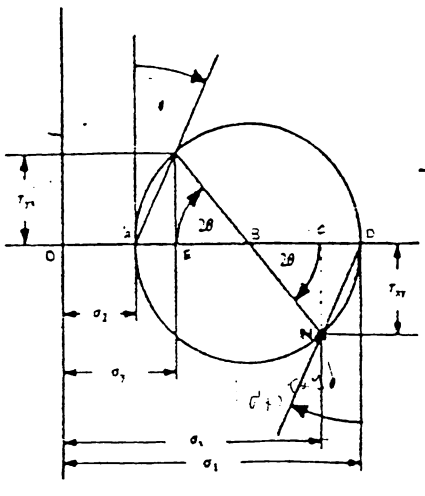
2 - روش دوم (Budavari)

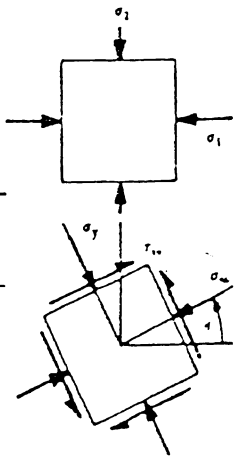
روش ترسیمی تعیین تنش‌های مؤثر برحسب با استفاده از دایره مور صورت میگیرد.
در این سیستم محورهای قائم واقعی $\sigma - \tau$ مورد استفاده قرار میگیرد. اگر چنانچه مقادیر عددی σ_1 و σ_2 و جهت آنها مشخص باشد میتوان τ و σ مؤثر بر هر صفحه از جسم را که عمود بر آن با جهت مثبت σ_1 زاویه θ میسازد را بدست آورد. برای این کار مقادیر σ_1 و σ_2 را روی محور $\sigma(x)$ جدا کرده و دایره ای به مرکز $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$ و به شعاع $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ رسم میکنیم. دایره حاصل وضعیت تنش در اطراف نقطه مورد نظر را نشان میدهد. حال اگر بخواهیم تنش‌های قائم و برشی مؤثر بر صفحه ای که عمود بر آن با σ_1 زاویه θ میسازد را بدست آوریم. کافی است از نقطه ای که مشخص کننده σ_1 است خطی عمود بر محور σ رسم کنیم. حال حول نقطه σ_1 در جهت حرکت عقربه‌های ساعت یا در خلاف آن زاویه θ دوران میدهیم تا دایره را در نقطه ای مثل N قطع کند. مختصات نقطه N مقدار تنش های قائم و برشی مؤثر بر صفحه مورد نظر را میدهد.



Mohr's representation of stress.

میتوان ثابت کرد که زاویه θ در محور مختصات نصف زاویه مورد نظر در دایره مور است.





با توجه به شکل صفحه قبل و با استفاده از دایره موهر میتوان روابط مربوط به تنش

کرنش را خیلی راحت بدست آورد.

با استفاده از شکل:

$$\sigma_x = OC = OB + BC \quad , \quad OB = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$, \quad BC = BN\cos 2\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cdot\cos 2\theta$$

1 — $$\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \quad ?$$

$$\sigma_y = OB - EB$$

2 — $$\sigma_y = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \quad ?$$

3 — $$\tau_{xy} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\theta = -CN \quad ?$$

با توجه به مثلث BCN خواهیم داشت:

$$\overline{BN}^2 = \overline{BC}^2 + \overline{CN}^2$$

$$\overline{BN}^2 = \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\right]^2 + \left[-\tau_{xy}\right]^2 = \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2$$

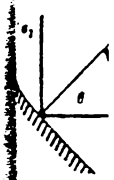
$$BN = BD = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = OB + BD = OB + BN = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \\ \sigma_2 = OB - BA = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \end{cases}$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\tan 2\theta = \tan\alpha = \frac{\tau_{xy}}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}} = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$



با مساوی قرار دادن روابط 1 و 2 این صفحه با روابط σ_x ، σ_y حاصل از محاسبات قبلی میتوان به این نتیجه رسید که زاویه‌های مورد نظر در دایره موهر دو برابر زاویه حقیقی است این مطلب را میتوان با توجه به این که نقاط P و Q در روش Good man انتهای یک قطر دایره بوده و مختصات این نقاط تنش های مؤثر بر دو صفحه عمود بر هم هستند نیز استنباط کرد. همچنین باید توجه کرد که در دایره موهر جهت دوران نسبت به مرکز دایره در جهت حرکت عقربه‌های ساعت است در صورتیکه در جسم در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت است.

Analysis of strain تحلیل کرنش

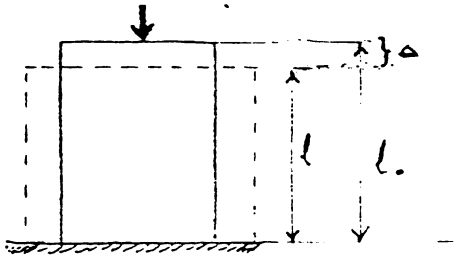
تغییر شکل و حالت کرنش در نقطه :

وقتی جسمی تحت تأثیر نیروهای خارجی قرار گیرد، جسم حامد مزبور تغییر شکل پیدا می‌کند و گویند در این جسم تغییر شکل یا deformation پیدا کرده است. در اثر تغییر شکل نقاط موجود در داخل جسم نیز دچار تغییر مکان اصلی خود تغییر مکان میدهند. در کل مؤلفه‌های تغییر مکان و جابجائی (displacement) را در راستای محورهای x و y و z یا u ، v و w نشان میدهند طبق قرارداد تغییر مکان (+) حرکت در جهت مثبت محور را نشان میدهد.

از شکل‌های مختلف تغییر شکل عادی حالت ساده را در نظر می‌گیریم. اولاً اگر جنانچه نخ یا استوانه‌ای شکل سنگی تحت تأثیر تنش فشاری σ قرار گیرد، طول اولیه l_0 نخ کوتاه خواهد شد اگر طول جدید نخ را با l نشان دهیم. تغییر طول نخ $\Delta = l_0 - l$ خواهد بود. تغییر حاصل در طول نخ معمولاً بر اساس طول اصلی نخ بیان می‌شود. یعنی:

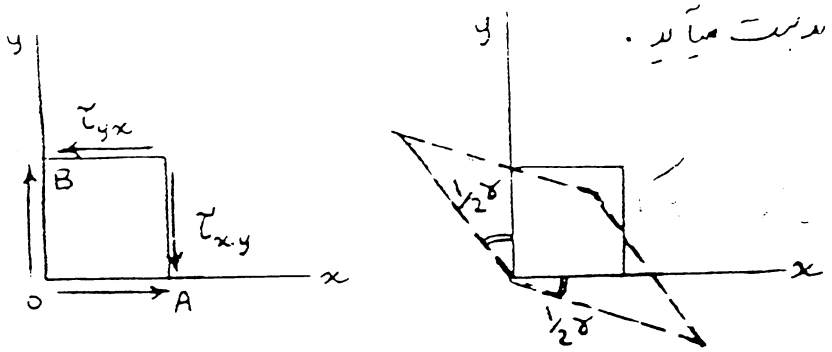
$$\varepsilon = \frac{l_0 - l}{l_0}$$

بنابراین ε مقدار افزایش طول نخ در امتداد تنش قائم وارده می‌باشد. ε را کرنش نرمال (normal strain) گویند. وقتی که کاهش طول را نشان میدهد مثبت (compressive strain) و وقتی که افزایش طول را نشان میدهد منفی (tensile strain) قبول می‌شود. کرنش‌های قائم در راستای محورهای x ، y و z بصورت ε_x ، ε_y و ε_z نشان داده می‌شود.



در حالت دوم بارگذاری جسمی را در نظر میگیریم که فقط تحت تأثیر تنشهای برشی (shearing stress) قرار گرفته باشد. در حین ایجاد تغییر شکل ضلع oB از جسم را اندازه $\frac{1}{2}\gamma$ در حول نقطه o دوران پیدا می‌کند. بنابراین $\frac{1}{2}\gamma$ نصف افزایش در مقدار زاویه قائمه AoB که

ضلع oA و oB قرار داشت را نشان میدهد. با در نظر گرفتن دوران زاویه‌ای oA نصف دیگر اختلاف این زاویه قائمه AoB بدست میآید.



مقدار کل اختلاف این زاویه قائمه توسط تنش‌های برشی مؤثر بر جسم بوجود آمده و در همین علت آنرا کرنش برشی (shearing strain) می‌نامند. وقتی γ مقدار اختلاف این دو زاویه را نشان میدهد (+) و اگر کاهش زاویه را نشان دهد (−) در نظر گرفته می‌شود. γ برحسب in/in و یا رادیان اندازه‌گیری می‌شود (یک رادیان معادل 57.3 درجه می‌باشد)

بطور کلی کرنش برشی γ_{nm} مقدار انحراف از زاویه قائمه بین دو بردار واحد $\vec{n}$ و $\vec{m}$ که در حالت اولیه با محور x بترتیب زاویه‌های θ و $\theta + 90$ می‌ساخته اند را نشان میدهد.

مقدار کرنشهای ε و γ معمولاً خیلی کوچک بوده و در همین علت حاصل ضرب و توان دوم آنها را در محاسبات نادیده می‌گیرند.

روابط بین تنش - کرنش و کرنش‌های اصلی -

روابط بین کرنش‌های ε_x ، ε_y و γ_{xy} و مقدار کرنش‌های حاصل در یک صفحه دلخواه که با θ مشخص شده و مقدار کرنش در آن صفحه: γ_{nm} ، ε_n نامیده می‌شود بصورت زیر می‌باشد.

$$\begin{cases} \varepsilon_n = \varepsilon_x \cos^2\theta + \varepsilon_y \sin^2\theta + \gamma_{xy} \sin\theta \cdot \cos\theta \\ \gamma_{nm} = (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \end{cases} \qquad (1-20)$$

$$\begin{cases} \sigma_n = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta \\ \tau_{nm} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \end{cases} \qquad (1-9)$$

مقایسه معادلات (1-9) و (1-20) می‌توان گفت که در این روابط بترتیب ε_y ، $\frac{\gamma_{xy}}{2}$ با σ_x ، σ_y ، τ_{xy} و همچنین σ_n ، τ_{nm} با ε_n و $\frac{\gamma_{nm}}{2}$

مطابقت دارند بنابراین می‌توان روابط حاصل برای σ_n و τ_{nm} را برای کرنش با جایگذاری ε_n با ε_n و $\frac{1}{2}\gamma_{nm}$ با τ_{nm} مورد استفاده قرار داد و همچنین می‌توان نتیجه گیری کرد که حالت کرنش در یک نقطه را می‌توان با استفاده از دایره موهر در محورهای $\varepsilon - \frac{1}{2}\gamma$ نشان داد.

در تطابق با قاعده می‌توان دو امتداد متقابل عمود بر هم دو اطراف یک نقطه پیدا کرد بطوریکه در این امتداد کرنش‌های برشی صفر باشد، جهات مزبور را جهات اصلی کرنش (Principal strain direction) و کرنش‌های نرمال مؤثر بر صفحات مزبور را کرنش‌های اصلی (Principal strain) گویند. $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2$

با توجه به بحث‌های فوق می‌توان معادلات زیر را برای کرنش نوشت.

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}$$

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 \cos^2\theta + \varepsilon_2 \sin^2\theta = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cos 2\theta$$

$$\gamma_{nm} = -(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\sin 2\theta$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_x + \varepsilon_y$$

مثال: حالت کرنش در یک نقطه توسط مؤلفه کرنش زیر تعریف شده است. جهت و مقدار کرنش‌های اصلی را حساب کرده و دایره موهر مربوطه را رسم کنید.

$$\varepsilon_x = 4{,}15 \times 10^{-6} \quad , \quad \varepsilon_y = 1{,}74 \times 10^{-6} \quad , \quad \gamma_{xy} = -3{,}3 \times 10^{-6}$$

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \Rightarrow \theta = \frac{1}{2}\operatorname{arc\,tg}\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} = \begin{cases} \theta_1 = 63.08^\circ \\ \theta_2 = -26.92^\circ \end{cases}$$

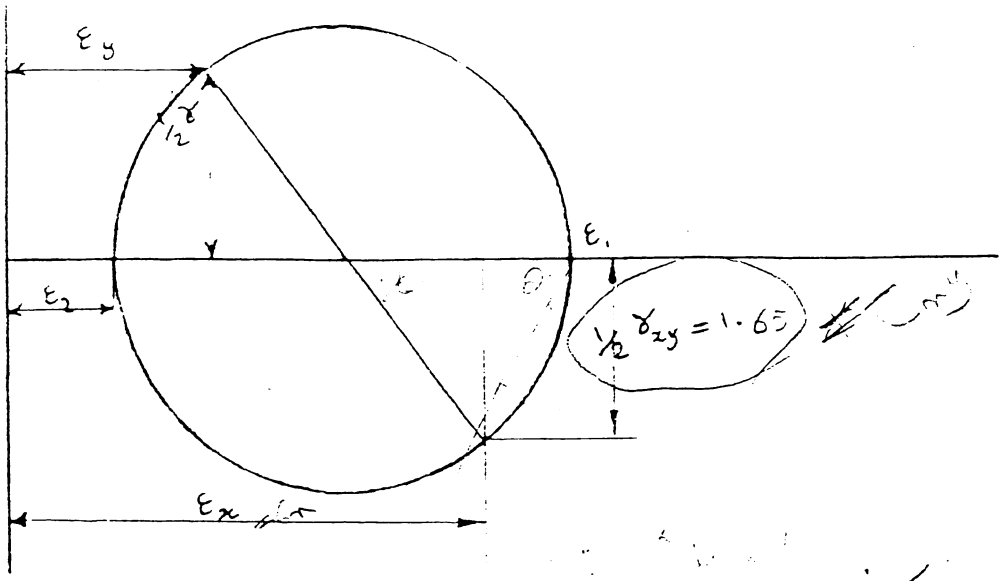
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{nm}^2}$$

$$= \left[\frac{1}{2}(4{,}15 + 1{,}74) \pm \sqrt{\left(\frac{4{,}15 - 1{,}74}{2}\right)^2 + \left(\frac{-3{,}30}{2}\right)^2}\right] \times 10^{-6}$$

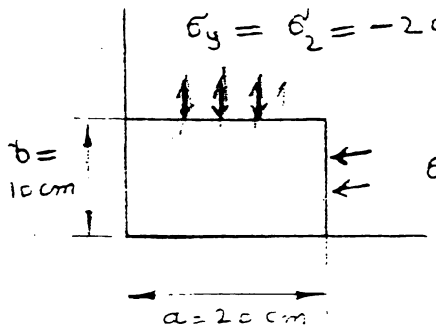
$$= [2{,}945 \pm 2{,}174] \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_1 = 4{,}988 \times 10^{-6} \qquad \varepsilon_2 = 0{,}901 \times 10^{-6}$$

بقیه جواب در صفحه بعد



مثال: مؤلفه‌های کرنشی ε_x ، ε_y و مقدار تغییر شکل (deformation) حاصل در جسم مستطیل زیر را پیدا کنید.



$\nu = 0.25$

$E = 50\,GPa$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) = \frac{1}{50\times10^9}(300 - 0.25(-200))\times10^3 = 7\times10^{-6}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) = \frac{1}{50\times10^9}(-200 - 0.25\times300)\times10^3 = -3.3\times10^{-6}$$

$$\Delta a = \varepsilon_x \cdot a = 7\times10^{-6}\times0.2 = 1.4\times10^{-6}\,m$$

$$\Delta b = \varepsilon_y \cdot b = -3.3\times10^{-6}\times0.1 = -0.55\times10^{-6}\,m$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} \quad ; \quad \tau_{yz} = G\,\gamma_{yz} \quad , \quad \tau_{zx} = G\,\gamma_{zx}$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\right] \qquad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\right]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \cdot \tau_{xy} \quad , \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \cdot \tau_{yz} \quad , \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G}\,\tau_{zx}$$

حالت کرنش صفحه‌ای ـــــ Plane strain

وقتی المانی تحت تأثیر تنش صفحه‌ای قرار گیرد در صفحه تحت تأثیر تنش‌های مختلف تغییر شکل حاصل می‌شود و در امتداد عمود بر صفحه نیز کرنش $\varepsilon_z \neq 0$ حاصل می‌شود اگر بخواهیم $\sigma_z = 0$ مقداری کرنش

حالت کرنش صفحه‌ای ($\varepsilon_z = 0$) حاصل شود باید تنش سطحی σ_z را اعمال کرد (1)

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

محور z بر صفحه و در شرایط:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[(1-\nu^2)\sigma_x - \nu(1+\nu)\sigma_y\right]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[(1-\nu^2)\sigma_y - \nu(1+\nu)\sigma_x\right]$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu(\sigma_x+\sigma_y)}{E} = 0 \quad (1)$$

کرنش حجمی ـــــ volumetric strain

$$e = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_1 - V}{V}$$

V = حجم اولیه ، V_1 = حجم ثانویه

طول اولیه در جهت x, y, z : (l_x, l_y, l_z)

$$V = l_x \cdot l_y \cdot l_z$$

$$V_1 = (l_x + \Delta l_x)(l_y + \Delta l_y)(l_z + \Delta l_z)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{l_x} \quad , \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta l_y}{l_y} \quad , \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta l_z}{l_z}$$

مثال

$$e = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_1 - V}{V} = \frac{(l_x+\Delta l_x)(l_y+\Delta l_y)(l_z+\Delta l_z) - (l_x \cdot l_y\, l_z)}{l_x \cdot l_y \cdot l_z}$$

$$e = \frac{(l_x+\Delta l_x)(l_y+\Delta l_y)(l_z+\Delta l_z)}{l_x \cdot l_y \cdot l_z} - 1$$

ترفیع برای حل مسئله:

مثال: $\dfrac{(3+2)(4+3)(2+2)}{3 \cdot 4 \cdot 2} = \left(1+\frac{2}{3}\right)\left(1+\frac{3}{4}\right)\left(1+\frac{2}{2}\right)$

$$e = (1+\varepsilon_x)(1+\varepsilon_y)(1+\varepsilon_z) - 1$$

با ضرب و حذف خواهیم داشت

$$\Rightarrow e = (1+\varepsilon_y+\varepsilon_x+\varepsilon_y\cdot\varepsilon_x)(1+\varepsilon_z)-1 = 1+\varepsilon_y+\varepsilon_z+\varepsilon_z-1$$

$$\Rightarrow \boxed{e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}$$

Rock Burst

انرژی کرنشی Strain Energy

وقتی جسمی الاستیک تحت تنش‌های مختلفی قرار گیرد تغییر شکل یافته و کار انجام شده صورت انرژی کرنشی در آن ذخیره می‌شود. برای محاسبه این انرژی فرض کنید که یک المان مکعبی شکل با حجم واحد تحت تأثیر تنش σ در یک وجه آن قرار گرفته، چون وجه واحد است پس این نیرو از نظر مقدار برابر σ است و مقدار تغییر شکل $d\varepsilon$ می‌باشد. کار انجام شده، عبارت است از:

$$w = \int_0^{\varepsilon} \sigma \cdot d\varepsilon \quad \text{(strain Energy density)}$$

انرژی ذخیره شده در جسم (تراکم انرژی کرنشی)

w عبارت است از سطح زیر منحنی تا مقدار معین ε

در مورد یک جسم الاستیک خطی:

$$w = \frac{1}{2}\sigma\cdot\varepsilon$$

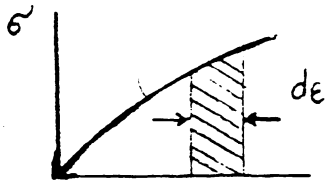
در حالت بارگذاری سه محوری

$$w = \frac{1}{2}(\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3)$$

w را همچنین می‌توانیم از رابطه زیر بدست آوریم σ_x ، σ_y ، σ_z و τ_{xy} ، τ_{yz} و τ_{zx}

$$w = \frac{1}{2}(\sigma_x\varepsilon_x + \sigma_y\varepsilon_y + \sigma_z\varepsilon_z + \tau_{xy}\cdot\gamma_{xy} + \tau_{yz}\cdot\gamma_{yz} + \tau_{zx}\cdot\gamma_{zx})$$

انرژی کرنشی کل با انتگرال گیری از رابطه density انرژی بدست می‌آید.



مثال: مقدار حداکثر انرژی کرنشی با زاء واحد حجم و همچنین مقدار کل انرژی ذخیره شده در یک نوار فنری را می‌توان در یک نوار فنری ذخیره خود بدست آورید. حجم تحت تأثیر فشار یک محوری تا مرز الاستیک 100 MPa قرار گرفته و $E = 70\ GPa$. نوار استوانه‌ای به قطر 5.5 cm و طول 11 cm است.

برای محاسبه انرژی، اول باید مقدار کرنش حاصل را بدست آورد.

$$\sigma = E\cdot\varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{100\times10^6}{70\times10^9} = 1.43\times10^{-3}$$

$$w = \frac{1}{2}\sigma\cdot\varepsilon = \frac{1}{2}\times100\times10^6\times1.43\times10^{-3} = 71.5\ KJ/m^3$$

$$\Omega = V\times W = \frac{0.055^2\cdot\pi}{4}\times0.11\times71.50\times10^3 = 0.02\ KJ$$

مقدار انرژی ذخیره شده در فنر.

مواد: elastic / inelastic

$\sigma_z = E \cdot \varepsilon_z$

σ = normal stress $\left[\frac{\text{force}}{\text{area}}\right]$

E = elastic modulus $\left[\frac{\text{force}}{\text{area}}\right]$

ε = strain = $\frac{\Delta l}{l}$ (بدون بعد)

Poisson's Ratio (ν) = $\frac{\text{کرنش جانبی}}{\text{کرنش طولی}}$

$\sigma_x = \sigma_y = 0$

برای بارگذاری در امتداد z :

$\varepsilon_x = -\nu \cdot \frac{\sigma_z}{E}$ ، $\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_z}{E}$

$\tau_{yx} = G \cdot \gamma_{yx}$ G = shear modulus Rigidity

برای یک جسم ایزوتروپ و الاستیک سه فرمول وجود دارد

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

در حالت بارگذاری سه محوری:

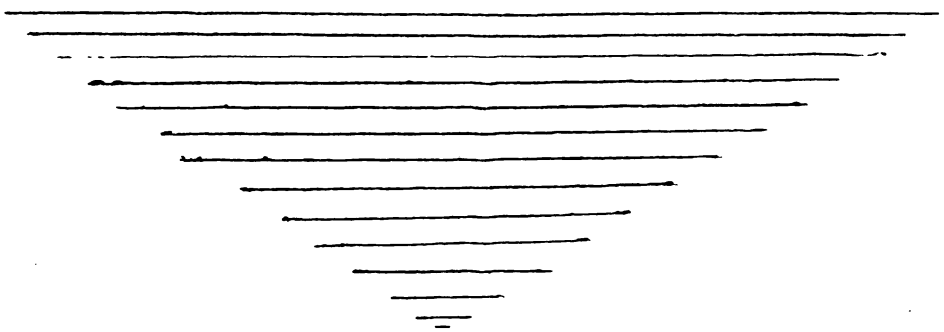
$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right]$

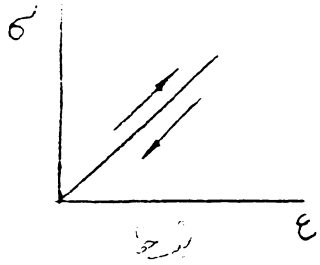
$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\right]$

$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\right]$

$\frac{\tau_{xy}}{G} = \gamma_{xy}$ ، $\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$ ، $\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$

$e = \frac{\Delta v}{v}$

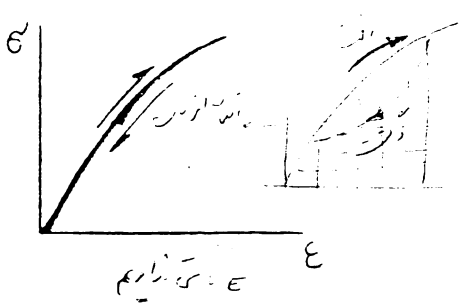




$\sigma = E \cdot \varepsilon$

اجسام الاستیک خطی

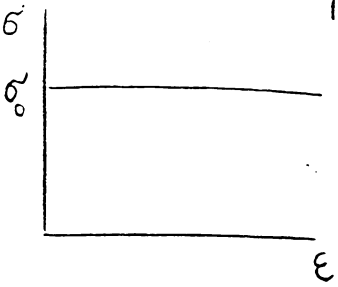
linear elastic



$\sigma = f(\varepsilon)$

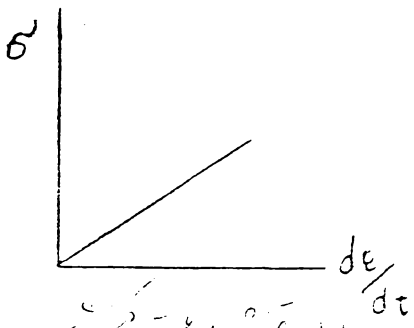
اجسام الاستیک غیرخطی

non linear elastic



Perfectly Plastic

پلاستیک کامل

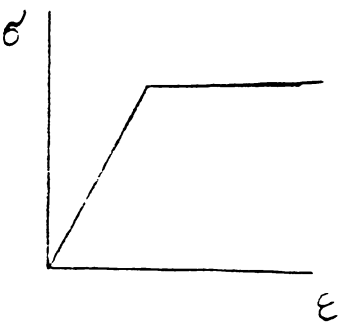


$\sigma = \eta \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)$

viscous substance

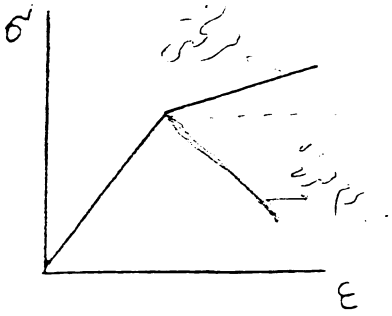
اجسام ویسکوز

غیرخطی $\sigma = \mu \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^n$



elasto - Plastic

اجسام الاستوپلاستیک



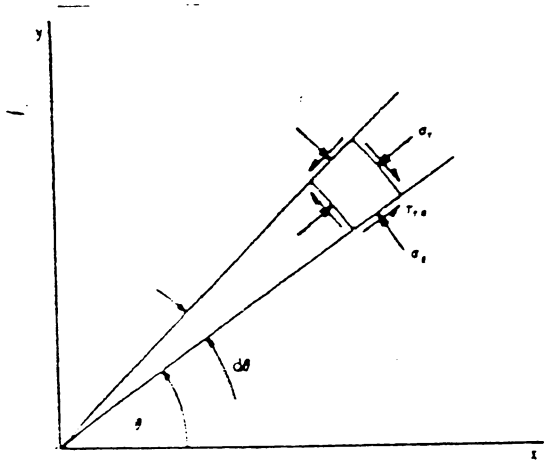
elasto plastic wi

strain hardening

اجسام الاستوپلاستیک با سختی

دوران المان در صفحه تحت تنش

برای بدست آوردن روابط تنش و کرنش در محورهای مختلف قطعه، المان مربعی در نظر گرفته و آن را تحت تنش‌های σ_x، σ_y و τ_{xy} قرار می‌دهیم. سپس المان را به اندازه زاویه θ دوران می‌دهیم و تنش‌های جدید σ_r، σ_θ و $\tau_{r\theta}$ را بر حسب تنش‌های اولیه بدست می‌آوریم.



$$\sigma_r = \sigma_x \cos^2\theta + 2\tau_{xy}\sin\theta\cos\theta + \sigma_y \sin^2\theta$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x \sin^2\theta - 2\tau_{xy}\sin\theta\cos\theta + \sigma_y \cos^2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta$$

اگر روابط مربوط به σ_r و σ_θ را طرف به طرف جمع کنیم:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \sigma_x + \sigma_y$$

معادلات مربوط به کرنش نیز با استفاده از تبدیل بالا به شکل زیر خواهد بود:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_x \cos^2\theta + \gamma_{xy}\sin\theta\cos\theta + \varepsilon_y \sin^2\theta$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x \sin^2\theta - \gamma_{xy}\sin\theta\cos\theta + \varepsilon_y \cos^2\theta$$

که به روابط زیر خواهیم رسید:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y$$

معیارهای شکست : Failure criter

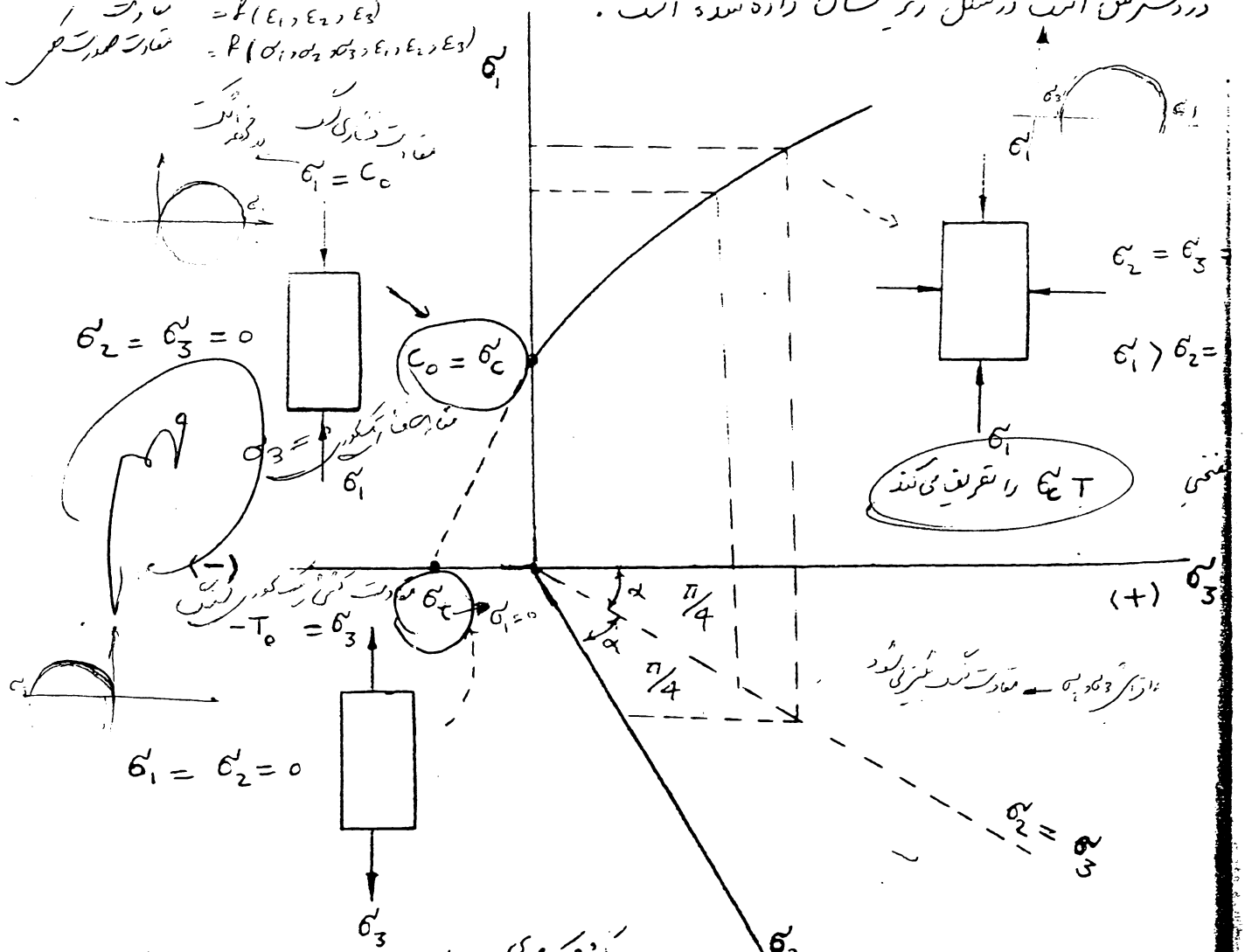
هنگامیکه از آزمایش سه محوری تعدادی تنشهای مؤثر بگیرند؛ از مقدار معینی افزایش می‌یابد شکست ترکیدن ، گسیختگی و تسلیم سنگ در برابر بار اتفاق می‌افتد و بیشترین تنش اصلی قبل از تسلیم یا ترکیدن مقدار مقاومت و کرنش‌های متناظر تسلیم اتفاق افتاده قبول می‌شود. در این بخش با استفاده از روشهای تئوریک و تجربی بطور ساده، طرز شکستن سنگ و مقاومت آن تحت بارگذاری یک محوری، سه محوری مورد بحث قرار خواهد گرفت

شکست (تسلیم) تحت اثر تنشهای پلی اکسیال ——— Poly axial stress

برای اینکه شکست در اثر تنشهای چند محوره، اتفاق بیفتد ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) باید رابطه‌ای که مشخصه جسم (سنگ) است صادق باشد.

$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3, \text{خواص سنگ})$ criterion of failure

این رابطه را معیار شکست failure criterion(criteria) گویند؛ این رابطه از نظر هندسی صفحه‌ای را در محورهای مختصات σ_1 ، σ_2 و σ_3 مشخص می‌کند. اطلاعاتی که در حال حاضر در مورد صفحه مذکور در دسترس است در شکل زیر نشان داده شده است.



در مورد صفحه مورد بحث فقط اطلاعات زیر در دسترس است:

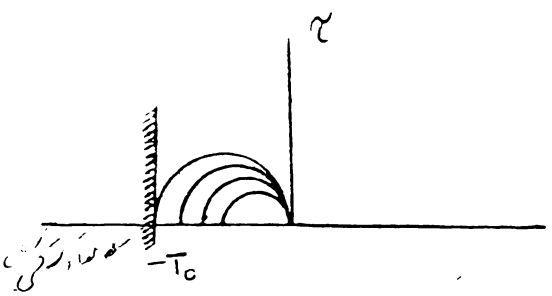
$\sigma_1 = \sigma_2 = 0 \Rightarrow \sigma_3 = -\sigma_t$ مقاومت کششی تک محوری

$\sigma_3 = \sigma_2 = 0 \rightarrow \sigma_1 = \sigma_c$ مقاومت فشاری

$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \Rightarrow \sigma_c T$ مقاومت سه محوری

در مورد معیار شکست مرسیه‌ای که بیان شده است که عبارت آنها :

تنش کششی ماکزیمم Maximum tensile stress



اگر تنش اصلی می‌نیم (σ_3) مساوی مقدار منفی مقاومت کششی سنگ باشد شکست اتفاق می‌افتد یعنی سنگ تحت تأثیر تنش کششی در حالت شکنندگی می‌شکند.

$$\sigma_3 \leq -\sigma_t$$

با توجه به شکننده بودن سنگها و ضعف سنگها در مقابل تنش کششی این معیار به کرات مورد استفاده قرار می‌گیرد

$\sigma_3 = -T_0$ — گت

تنش برشی ماکزیمم maximum shear stress

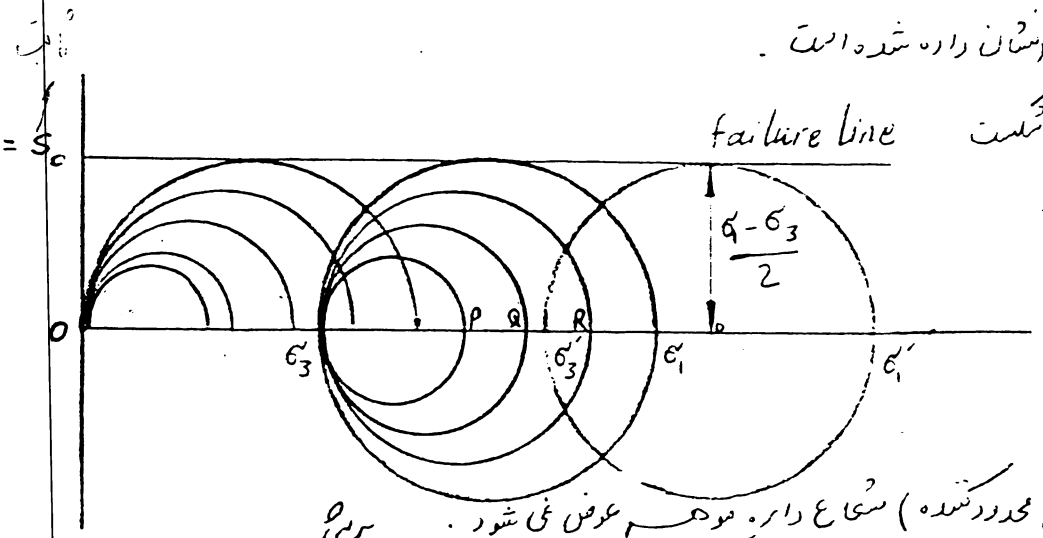
بر طبق این نظریه سنگ وقتی می‌شکند که مقدار تنش برشی حداکثر با مقاومت چسبندگی سنگ (S_0) که در آزمایشگاه مشخص می‌شود برابر باشد.

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = S_0 \Rightarrow \sigma_1 - \sigma_3 = 2S_0$$

معیار رفوتی که به معیار Tresca نیز مشهور است حالت خصوصی از معیار کولمب می‌باشد

در بررسی شکست فلزات و برخی مواد شکنیک این معیار اهمیت زیادی پیدا می‌کند.

این معیار در دوایر موهر نشان داده شده است.



با افزایش σ_3 (تنش محدودکننده) شعاع دایره موهر کوچک می‌شود. برش

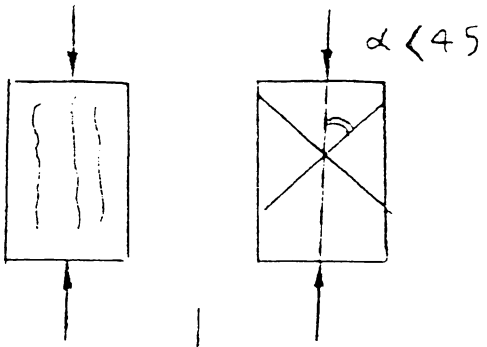
همانطوریکه از شکل پیداست. فشار جانبی هیچگونه تأثیری در جهت ماکزیمم مقاومت جسم ندارد و اگر تنش جانبی را به ترتیب به σ_3'، σ_3'' افزایش دهیم، مقدار تنش برشی حداکثر (شعاع دایره موهر) از رابطه زیر حساب می‌شود

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} = \frac{\sigma_1'' - \sigma_3''}{2} = S_0$$

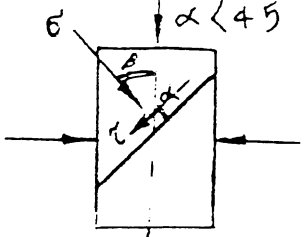
می‌کند τ_m مساوی S_c شود شکست صورت می‌گیرد. حال اگر تنش S_c در حوالی σ_3 ... شود پوش شکست است. در حین آزمایش اگر σ_3 را ثابت نگه داریم ... اصلی σ_1 دوایر موهر ... قطرهای $\sigma_3 P$ ، $\sigma_3 Q$ و $\sigma_3 R$ بزرگ شده، و بالاخره دایره‌ای که ... σ_3 و σ_1 قرار دارد پوش شکست مماس شود شکست اتفاق می‌افتد.

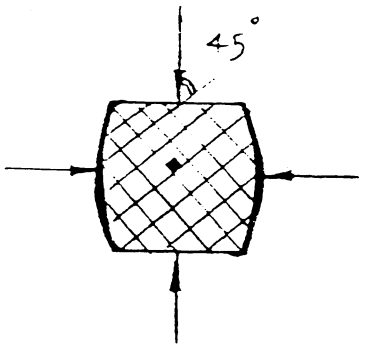
سطوح شکست (صفحه‌های شکست)

در آزمایش فشاری یک محوره:



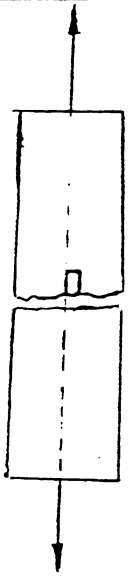
در آزمایش فشاری سه محوره:





در آزمایش فشاری سه محوره اگر فشارهای جانبی را خیلی افزایش دهیم نمونه بصورت مقابل درمی‌آید. با ترکهای عمود بر هم (Barelling)

در آزمایش کششی:

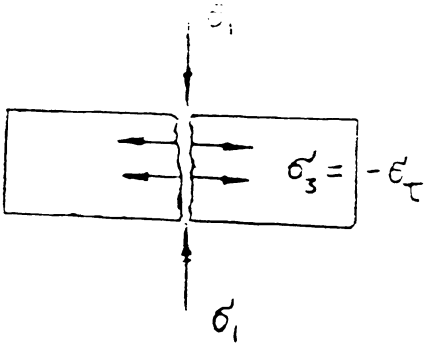


$\sigma_2 = \sigma_1 = 0$

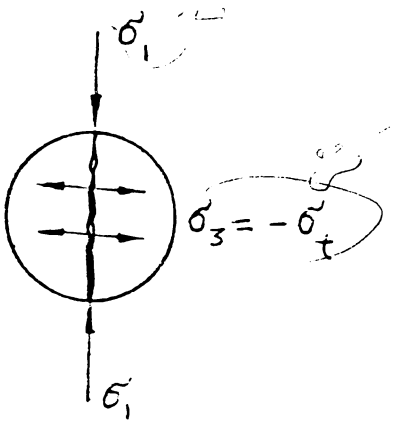
$\sigma_3 = -\sigma_t$

تنش کششی در جهت عمود بر σ_3 می‌باشد.

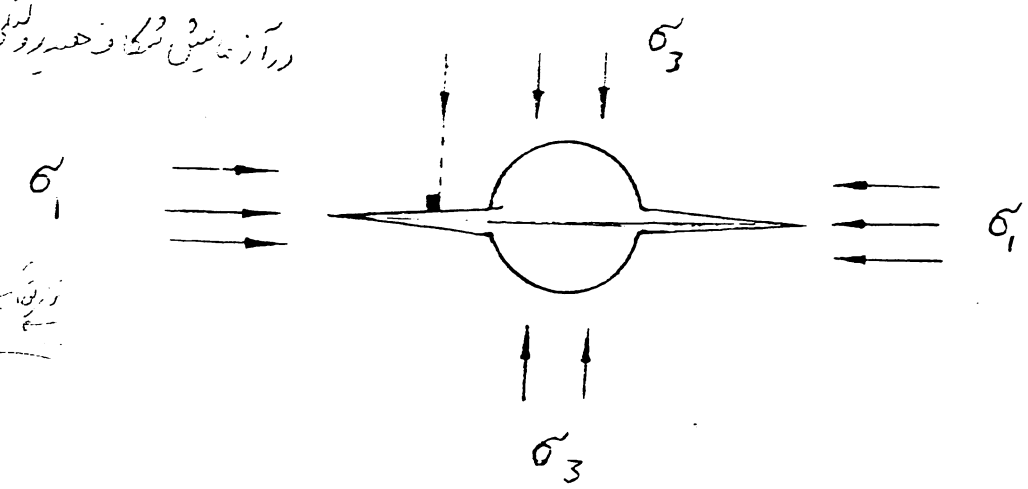
در بارگذاری تک‌محوری :



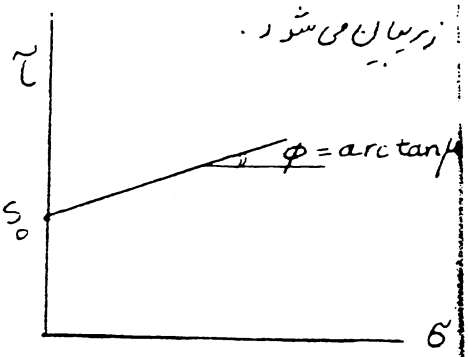
در روش برزیلی :



در آزمایش تراکم هیدرولیکی (تکنیک سه محوری) :



قدیمی‌ترین و مهم‌ترین معیارهای شکست ... سال 1773 توسط کولمب ارائه شده و بعد؟ در سال 1864 توسط Navier اصلاح شد. کولمب مطالعات زیادی را در مورد اصطکاک انجام داد و اظهار داشت که تنش برشی که باعث شکست سنگ در امتداد صفحه معینی می‌گردد، توسط نیروی چسبندگی سنگ (cohesion) و حداکثر تنش قائم مؤثر بر صفحه شکست با یک ضریب ثابت مقاومتی شود. به طور آزمایشهائی که بر روی سنگ انجام داد شرایط شکست در صفحه‌ای که با محور اصلی min زاویه β می‌سازد و یا بعبارت دیگر صفحه‌ای که عمود بر آن با محور اصلی تنش σ_1 زاویه β می‌سازد شرایط شکست بصورت زیر بیان می‌شود.



$$|\tau| = S_c + \mu \cdot \sigma \quad (1)$$

$$|\tau| - \mu \cdot \sigma = S_c \quad (2)$$

τ = تنش برشی مؤثر در صفحه شکست

σ = تنش قائم مؤثر بر صفحه شکست

S_c = cohesion (cohesive shear strength)

مقاومت نیروی چسبندگی (مقاومت برشی ذاتی سنگ) = S_c

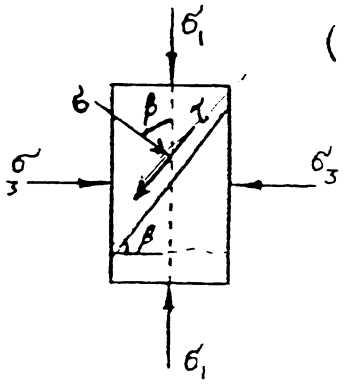
μ = coefficient of internal friction ضریب اصطکاک داخلی

S_c را می‌توان بعنوان مقاومت برشی ذاتی سنگ در نظر گرفت inherent shear strength

از آنجا که علامت تنش برشی (τ) فقط جهت نیروی برشی را مشخص می‌کند برای همین از قدر مطلق آن $|\tau|$ استفاده شده است.

اساس مختلفی برای معیار فوق گذاشته شده، از قبیل Coulomb - Navier و Coulomb - Mohr criterion که فقط بهتر است آنرا معیار کولمب خواند.

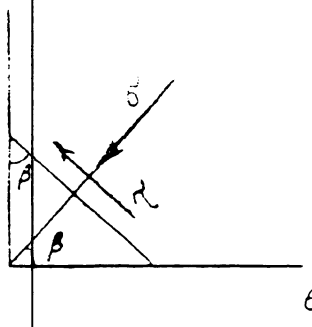
با توجه به بحث‌هائی که در قسمت تنش‌های قائم و برشی مؤثر در صفحه‌ای که عمود بر آن با امتداد تنش اصلی ماکزیمم (σ_1) زاویه β می‌سازد، از روابط زیر بدست می‌آید (شکل 1)



$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \quad (3)$$

$$\tau = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \quad (4)$$

① عموماً در مکانیک خاک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، در آنجا نیروی چسبندگی cohesion نامیده شده و با c نشان داده می‌شود



حد بالا و پایین مقدار μ

$\mu = 0 \Rightarrow tg\,2\beta = \infty \Rightarrow 2\beta = 90 \Rightarrow \beta = 45$

اگر $\mu = \infty \Rightarrow \tan 2\beta = 0 \Rightarrow 2\beta = 180 \Rightarrow \beta = 90$

بنابراین همیشه $45 < \beta < 90$ خواهد بود

اگر مقادیر σ و τ را از رابطه‌های ③ و ④ در معادله ② قرار دهیم خواهیم داشت:

$$|\tau| - \mu\cdot\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta - \mu\left[\frac{1}{2}\left((\sigma_1+\sigma_3)+(\sigma_1-\sigma_3)\cos 2\beta\right)\right]$$

$$|\tau| - \mu\cdot\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\left[\sin 2\beta - \mu\cos 2\beta\right] - \mu\cdot\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_3) \quad (5)$$

شکست وقتی اتفاق می‌افتد که مقدار $|\tau| - \mu\cdot\sigma$ یعنی رابطه ⑤ ماکزیمم گشته و مساوی S_0 شود. اگر از رابطه فوق نسبت به β مشتق گرفته و سمت راست را مساوی صفر قرار دهیم مقداری از β که باعث max شدن معادله فوق می‌شود بدست خواهد آمد.

$$\frac{\partial\left[|\tau| - \mu\cdot\sigma\right]}{\partial\beta} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\left[2\cos 2\beta + 2\mu\cdot\sin 2\beta\right] = 0$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \neq 0 \Rightarrow 2\cos 2\beta + 2\mu\cdot\sin 2\beta = 0 \Rightarrow \quad (6)$$

$$\frac{\cos 2\beta}{\cos 2\beta} + \mu\,\frac{\sin 2\beta}{\cos 2\beta} = 0 \Rightarrow 1 + \mu\cdot\tan 2\beta = 0 \Rightarrow \boxed{\tan 2\beta = -\frac{1}{\mu}}$$

چون $\tan 2\beta$ کوچکتر از صفر یعنی منفی می‌باشد بنابراین $90^\circ < 2\beta < 180^\circ$ بعبارت دیگر $45^\circ < \beta < 90^\circ$ قرار می‌گیرد. بدیهی است که مقدار β بستگی به μ دارد

با توجه به روابط مثلثاتی داریم: $\frac{1}{\cos^2 2\beta} = 1 + \tan^2 2\beta$ ، $\frac{1}{\sin^2 2\beta} = 1 + \cot g^2 2\beta$

$$\frac{1}{\cos^2 2\beta} = 1 + \left(-\frac{1}{\mu}\right)^2 \Rightarrow \frac{1}{\cos^2 2\beta} = \frac{\mu^2+1}{\mu^2} \Rightarrow \cos^2 2\beta = \frac{\mu^2}{1+\mu^2}$$

چون $90 < 2\beta < 180$ است بنابراین $\cos 2\beta < 0$ خواهد بود.

$$\cos 2\beta = -\mu\left(1+\mu^2\right)^{-1/2}$$

$$\tan 2\beta = \frac{\sin 2\beta}{\cos 2\beta} = \frac{\sin 2\beta}{-\mu(1+\mu^2)^{-1/2}} = -\frac{1}{\mu} \Rightarrow \sin 2\beta = (1+\mu^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\boxed{\cos 2\beta = -\mu\left(1+\mu^2\right)^{-1/2} \quad , \quad \sin 2\beta = (1+\mu^2)^{-1/2}} \quad (7)$$

اگر به جای $\sin 2\beta$ در ... مقادیر آن را برحسب ... مقدار $|\tau| - \mu.\sigma$ براساس حسب ... σ_1 و σ_3 به دست ...

$$|\tau| - \mu.\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\left[\sin 2\beta - \mu.\cos 2\beta\right] - \frac{1}{2}\mu.(\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\left[(1+\mu^2)^{-\frac{1}{2}} - \mu^2(1+\mu^2)^{-\frac{1}{2}}\right] - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\left[(1+\mu^2)^{-\frac{1}{2}}(\cdot + \mu^2)\right] - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$\Rightarrow |\tau| - \mu.\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(1+\mu^2)^{1/2} - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (8-1)$$

با توجه به بند ① تا زمانی که مقدار $|\tau| - \mu.\sigma$ یعنی مقدار رابطهٔ (8-1) از S_0 کمتر باشد شکست رخ نخواهد داد. بلکه شکست زمانی رخ می دهد که مقدار رابطهٔ فوق (8-1) بزرگتر یا مساوی S_0 باشد. بعبارت دیگر معیار شکست برحسب σ_1 و σ_3 شرح زیر خواهد بود

$$\left[|\tau| - \mu.\sigma\right] \geq S_0$$

رابطهٔ (8-1) را می توان بصورت زیر نوشت.

$$|\tau| - \mu.\sigma = \frac{1}{2}\left[\sigma_1(1+\mu^2)^{1/2} - \sigma_3(1+\mu^2)^{1/2} - \sigma_1\mu - \sigma_3\mu\right]$$

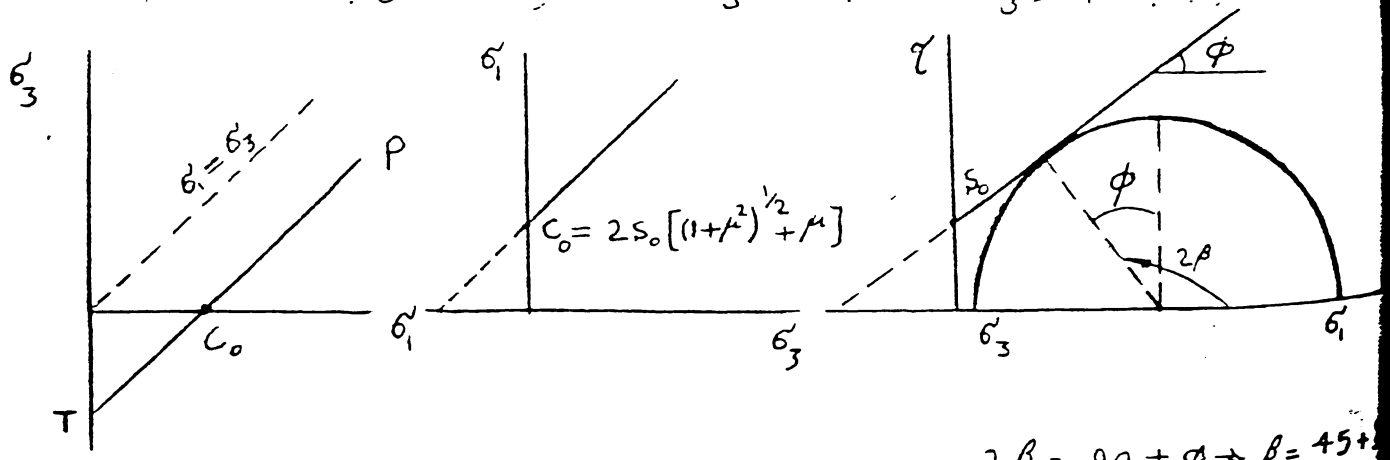
$$|\tau| - \mu.\sigma = \frac{1}{2}\left\{\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{1/2} - \mu\right] - \sigma_3\left[(1+\mu^2)^{1/2} + \mu\right]\right\}$$

$$|\tau| - \mu.\sigma = \frac{1}{2}\left\{\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{1/2} - \mu\right] - \sigma_3\left[(1+\mu^2)^{1/2} + \mu\right]\right\} \quad (8-2)$$

اگر رابطهٔ فوق را مساوی S_0 قرار دهیم خواهیم داشت $|\tau| - \mu.\sigma = S_0$

$$\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{1/2} - \mu\right] - \sigma_3\left[(1+\mu^2)^{1/2} + \mu\right] = 2S_0 \quad (8)$$

معیار کولمب برحسب σ_1 و σ_3 که در صورت $\sigma_1 - \sigma_3$ یک خط راست می باشد.



$$2\beta = 90 + \phi \Rightarrow \beta = 45 + \frac{\phi}{2}$$

رابطهٔ فوق در محورهای مختصات $\sigma_1 - \sigma_3$ و همچنین $\tau - \sigma$ با استفاده از دوایر موهر نشان داده شده است. خطی که توسط معادله (8) تعریف می شود محور σ_1 را در نقطه ای مثل C_0 قطع می کند برای بدست آوردن

مقدار C_0 کافی است که در معادله فوق $\sigma_3 = 0$ فرض شود. معادله (8) را الصورت زیر می‌نویسیم

$$\sigma_1 = \frac{2S_0}{\left[(\mu^2+1)^{1/2}-\mu\right]} + \sigma_3 \frac{\left[(\mu^2+1)^{1/2}+\mu\right]}{\left[(\mu^2+1)^{1/2}-\mu\right]}$$

معادله فوق رابطه بین σ_1 و σ_3

C_0 مقاومت فشاری یک محوری $= C_0$

$$\sigma_1 = C_0 \Rightarrow \sigma_3 = 0 \Rightarrow \sigma_1 = C_0 = \frac{2S_0}{\left[(\mu^2+1)^{1/2}-\mu\right]}$$

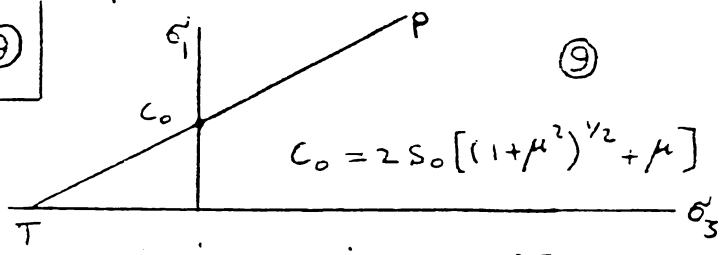
سنگ

$$C_0 = \frac{2S_0\left[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu\right]}{\left[(\mu^2+1)^{1/2}-\mu\right]\left[(\mu^2+1)^{1/2}+\mu\right]}$$

که اگر رابطه فوق را ساده کنیم خواهیم داشت:

$$C_0 = 2S_0\left[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu\right] \quad (9)$$

صورت دیگر کسر را در مزدوج مخرج ضرب می‌کنیم:



(9)

$$C_0 = 2S_0\left[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu\right]$$

خط معادله فوق محور σ_3 را در نقطه ای به مختصات (T) قطع می‌کند، برای پیدا کردن آن کافی است که در رابطه (8) به جای σ_1 صفر قرار دهیم:

$$\sigma_1 = 0 \Rightarrow \sigma_3 = \frac{-2S_0}{\left[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu\right]} = \frac{-2S_0\left[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu\right]}{\left[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu\right]\left[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu\right]}$$

در رابطه 8

$$\Rightarrow \sigma_3 = -2S_0\left[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu\right] \quad (9')$$

فقط مقدار مثبت آمده برای σ_3 در رابطه (9') مقاومت کششی تک محوری سنگ است زیرا اندازه گیری ها نشان داده است که مقادیر حاصل برای مقاومت کششی تک محوری از مقدار حاصل از رابطه (9') خیلی کمتر است زیرا شرایط فیزیکی مثلاً کوچک را فقط در قسمتی از خط TC_0P محدود می‌کند. اساساً در رابطه ① فرض بر این بوده است که σ_3 مثبت باشد. با استفاده از مقادیر هم از رابطه (7) و جایگزینی آنها در رابطه ③ خواهیم داشت.

رابطه ③ طبق فرض:

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)\cos 2\beta > 0$$

$$\tau = \frac{1}{2}\left[\sigma_1+\sigma_3+\sigma_1\cos 2\beta - \sigma_3\cos 2\beta\right] = \frac{1}{2}\left[\sigma_1(1+\cos 2\beta)+\sigma_3(1-\cos 2\beta)\right] >$$

$$\sigma_1\left[1-\mu(1+\mu^2)^{-1/2}\right] + \sigma_3\left[1+\mu(1+\mu^2)^{-1/2}\right] > 0$$

$$\sigma_1\left[1-\frac{\mu}{(1+\mu^2)^{1/2}}\right] + \sigma_3\left[1+\frac{\mu}{(1+\mu^2)^{1/2}}\right] > 0$$

$$\sigma_1\left[\frac{(1+\mu^2)^{-\frac{1}{2}}}{(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}}\right] + \sigma_3\left[\frac{(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu}{(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}}\right] > 0$$

از طرفین کسر صرف نظر می شود.

$$\boxed{\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right] + \sigma_3\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right] > 0} \quad (10)$$

اگر رابطهٔ فوق را با (8) ترکیب کنیم خواهیم داشت.

$$(8) \Rightarrow \sigma_1\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right] - \sigma_3\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right] = 2S_0$$

$$\sigma_3\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right] = -2S_0 + \sigma_1\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right]$$

اگر مقدار فوق را در رابطهٔ (10) قسمت اول خواهیم داشت:

$$\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right] - 2S_0 + \sigma_1\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right] > 0$$

$$2\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right] > 2S_0$$

$$\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right] > S_0 \quad ; \quad \sigma_1 > \frac{S_0}{\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right]} \Rightarrow$$

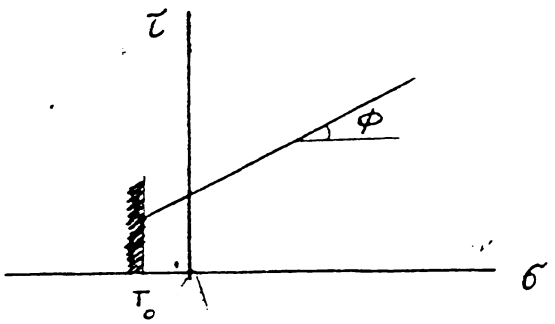
$$\sigma_1 > \frac{S_0\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right]}{\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}-\mu\right]\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right]} \Rightarrow \sigma_1 > S_0\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right]$$

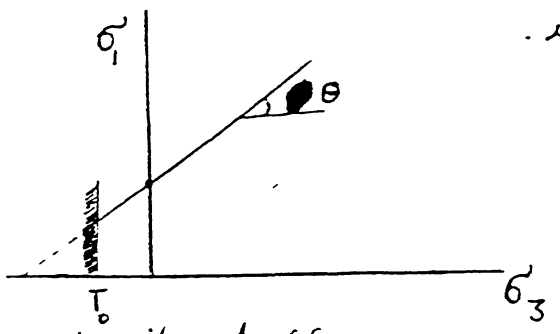
فقط با توجه به رابطهٔ فوق مساوی نصف C_0 رابطهٔ $C_0 = 2S_0\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right]$ یعنی (9) می باشد یعنی:

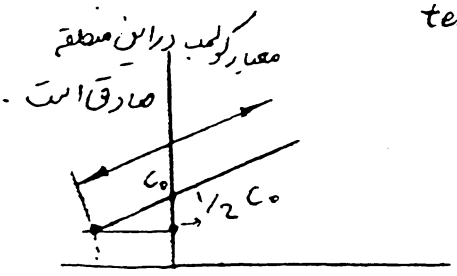
$$\sigma_1 > S_0\left[(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}+\mu\right] = \frac{1}{2}C_0 \Rightarrow \sigma_1 > \frac{1}{2}C_0$$

یعنی معیار فوق برای مقادیر کوچکتر از $\frac{1}{2}C_0$ برای σ_1 قابل قبول نیست

برای جلوگیری از عدم فوق — معمولاً در مقدار یعنی از T_c (مقاومت کششی از tensile cut off استفاده می کنند.





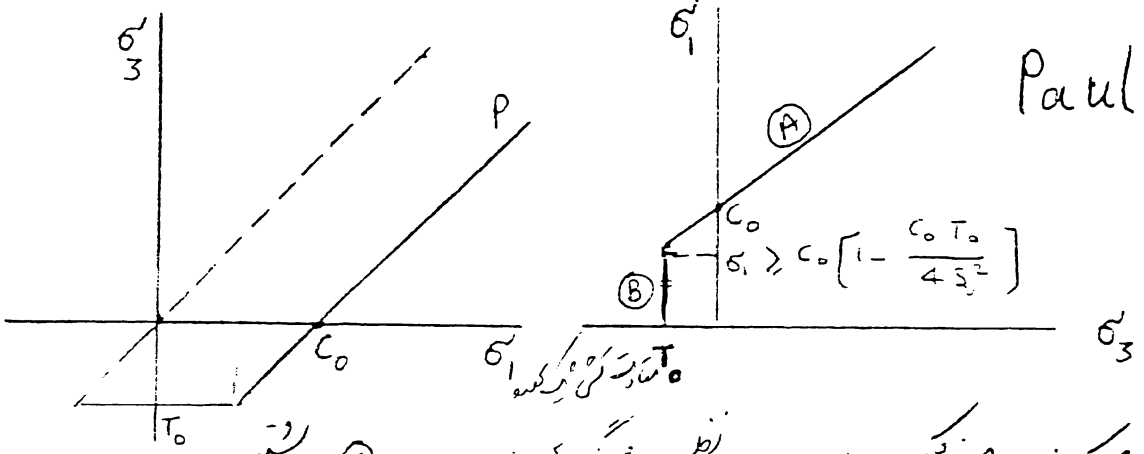


برای بعضی مقادیر منفی σ_3 (کششی) پیش‌بینی شده است که شکست‌های کششی در صفحاتی عمود بر امتداد σ_3 ایجاد می‌شود. بخصوص در آزمایش کدخدای کششی. این رفتار کاملاً با شکست برشی که تحت تاثیر تنش‌های فشاری حاصل می‌شود کاملاً فرق داشته و معیار مقید و سازگار توسط Paul در سال 1961 برای این حالت ارائه شده است:

$$\sigma_1\left[(\mu^2+1)^{1/2}-\mu\right]-\sigma_3\left[(\mu^2+1)^{1/2}+\mu\right]=2S_0 \Rightarrow (A)$$

$$\sigma_1 \geq C_0\left[1-\frac{T_0\cdot C_0}{4S_0^2}\right]$$

$$\sigma_1 < C_0\left[1-\frac{C_0\cdot T_0}{4S_0^2}\right] \longrightarrow \text{اگر } \sigma_3=-T_0 \quad (B)$$



حال زاویه‌ای که صفحه شکست با راستای σ_3 می‌سازد را در نظر می‌گیریم. از رابطه (6) داریم:

$$\tan 2\beta = -\frac{1}{\mu} \Rightarrow 2\beta = \tan^{-1}\left(-\frac{1}{\mu}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu}\right)$$

$$2\beta = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu}\right) \Rightarrow \beta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu}\right)$$

حال می‌توان رابطه β را بر حسب μ مورد بحث قرار داد.

$$\mu \to 0 \Rightarrow \beta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{4}$$

$$\mu \to 1 \Rightarrow \beta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8} = \frac{3\pi}{8} \qquad \frac{\pi}{4} < \beta < \frac{\pi}{2}$$

$$\mu = \infty \Rightarrow \beta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(0) = \frac{\pi}{2}$$

جوابهای بحث‌های قبل مستقل از علامت β بود. در حقیقت دو جهت برای صفحه شکست وجود دارد که با شیب مساوی $\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu}\right)$ نسبت به امتداد σ_1 و در دو طرف آن قرار گیرد. جهت‌های مزبور جهت‌های همزوج و یا conjugate directions نامند (جهات مزدوج)

رابطه اصلی معیار گریفیث را می‌توان به صورت‌های مفید دیگری نوشت. مجموع تنش‌ها $\sigma_1+\sigma_2$ را برای وضعیتی که

$\mu = \tan\phi$ زاویه اصطکاک ϕ را بدست آورید.

$$\left[(\mu^2+1)^{1/2}+\mu\right] = \left[\tan^2\phi+1\right)^{1/2} + \tan\phi =$$

$$\frac{1}{\cos\phi} + \tan\phi = \sec\phi + \tan\phi$$

اگر فرض کنیم:

$$\tan\alpha = \sec\phi + \tan\phi \Rightarrow$$

$$\tan\alpha = \frac{1}{\cos\phi} + \frac{\sin\phi}{\cos\phi} = \frac{1+\sin\phi}{\cos\phi}$$

حال اگر در رابطه فوق بجای $\sin\phi$ و $\cos\phi$ از روابط مثلثاتی قسم اردم بدست آوریم $(\phi+\frac{\pi}{2})$:

$$\sin\phi = -\cos\left(\phi+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\cos\phi = \sin\left(\phi+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\tan\alpha = \frac{1-\cos\left(\phi+\frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\phi+\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{2\sin^2\left(\frac{\phi}{2}+\frac{\pi}{4}\right)}{2\sin\left(\frac{\phi}{2}+\frac{\pi}{4}\right)\cos\left(\frac{\phi}{2}+\frac{\pi}{4}\right)} = \tan\left(\frac{\phi}{2}+\frac{\pi}{4}\right)$$

$$\Rightarrow \tan\alpha = \tan\left(\frac{\phi}{2}+\frac{\pi}{4}\right) \Rightarrow \boxed{\alpha = \frac{\phi}{2}+\frac{\pi}{4}} \quad (17)$$

با مقایسه رابطه فوق با رابطه $\beta = \frac{1}{2}\pi - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu}\right)$ می‌توان دریافت که $\alpha = \beta$ است زیرا:

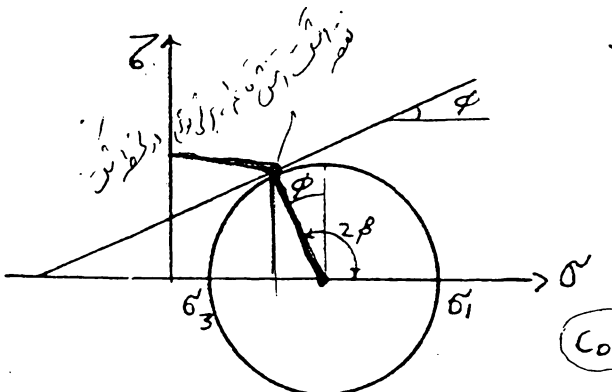
$$\beta = \frac{1}{2}\pi - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu}\right) \qquad \alpha = \frac{\phi}{2}+\frac{\pi}{4}$$

$$\mu = \tan\phi = 0 \Rightarrow \phi = 0 \Rightarrow \beta = \frac{\pi}{4} \quad ; \quad \alpha = 0+\frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{4}$$

$$\mu = \tan\phi = 1 \Rightarrow \phi = \frac{\pi}{4} \Rightarrow \beta = \frac{3\pi}{8} \quad ; \quad \alpha = \frac{\pi}{4}\times\frac{1}{2}+\frac{\pi}{4} = \frac{3\pi}{8}$$

$$\mu = \tan\phi = \infty \Rightarrow \phi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \beta = \frac{\pi}{2} \quad ; \quad \alpha = \frac{\pi}{4}+\frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$$

رابطه فوق را می‌توان با استفاده از دوایر مور هم نیز اثبات کرد:



$$2\beta = \frac{\pi}{2}+\phi$$

$$\beta = \frac{\pi}{4}+\frac{\phi}{2}$$

رابطه (8) را می‌توان با استفاده از روابط $C_0 = 2S_0\left[(\mu^2+1)^{1/2}+\mu\right]$ و $\tan\alpha = \left[(\mu^2+1)^{1/2}+\mu\right]$ بصورت زیر نوشت.

$$\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu\right] - \sigma_3\left[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu\right] = 2S_0$$

$$\sigma_1\left[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu\right] = 2S_0 + \sigma_3\left[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu\right]$$

$$\sigma_1 = \frac{2S_0}{[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu]} + \sigma_3 \frac{[(1-\mu^2)^{1/2}+\mu]}{[(1-\mu^2)^{1/2}-\mu]}$$

①

$$\sigma_1 = \frac{2S_0[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu]}{[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu][(1+\mu^2)^{1/2}+\mu]} + \sigma_3 \frac{[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu][(1+\mu^2)^{1/2}+\mu]}{[(1+\mu^2)^{1/2}-\mu][(1+\mu^2)^{1/2}+\mu]}$$

$$\Rightarrow \sigma_1 = 2S_0[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu] + \sigma_3[(1+\mu^2)^{1/2}+\mu]^2$$

با توجه به فرض شکل خواهیم داشت: $\mu = \tan\phi$

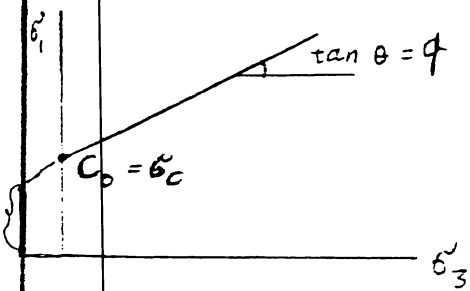
$$\sigma_1 = (2S_c)\tan\alpha + \sigma_3 \tan^2\alpha \quad (18)$$

$$\sigma_1 = C_0 + \sigma_3 \tan^2\alpha \quad (19)$$

و با فرض $\tan^2\alpha = [(\mu^2+1)^{1/2}+\mu]^2 = q$ خواهیم داشت

$$\boxed{\sigma_1 = C_0 + q \cdot \sigma_3} \quad (20)$$

حالت فوق ساده‌ترین شکل معیار کولمب است که بیشترین کاربرد را دارا است.



q عبارت است از شیب خط فوق که می‌توان آنرا با استفاده از رابطه (17) و یا (20) حساب کرد.

آزمایشهای سه محوری انجام شده، صحت روابط فوق را نشان میدهد. صفحه شکست با محور اصلی تنش زاویه‌ای کمتر از $45°$ می‌سازد.

کمیت دیگر از راههای استفاده از معیار کولمب (رابطه 8) با استفاده از تنش قائم متوسط (σ_m) و تنش برشی ماکزیمم (τ_m) تعیین می‌گردد.

$$\begin{cases} \sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) & \text{تنش قائم متوسط} \\ \tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) & \text{شعاع دایره موهر} \end{cases} \quad (22)$$

با توجه به روابط فوق رابطه (8) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\mu^2+1)^{1/2} - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\mu = S_0$$

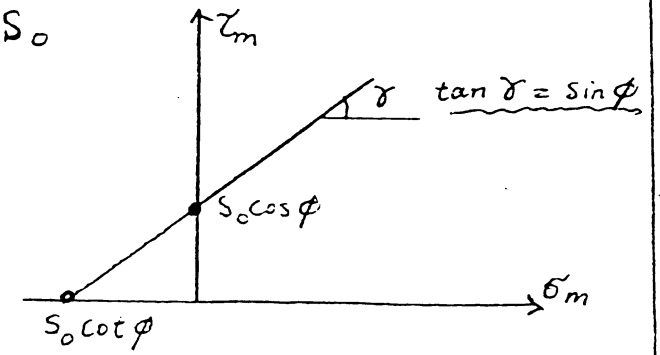
$$(\tau_m)(\mu^2+1)^{1/2} - \mu \cdot \sigma_m = S_0 \quad ; \quad \mu = \tan\phi$$

$$\tau_m[(1+\tan^2\phi)^{1/2}] - \tan\phi \cdot \sigma_m = S_0$$

$$S_0 = \tau_m \frac{1}{\cos\phi} - \sigma_m \frac{\sin\phi}{\cos\phi}$$

$$\tau_m \frac{1}{\cos\phi} = S_0 + \sigma_m \frac{\sin\phi}{\cos\phi}$$

$$\boxed{\tau_m = S_0\cos\phi + \sigma_m \sin\phi} \quad (23)$$



نحوه بدست آوردن شیب خط لوکر با استفاده از دایره موهر: در صفحه $\tau - |\sigma|$ مشخص کردن بارامترها

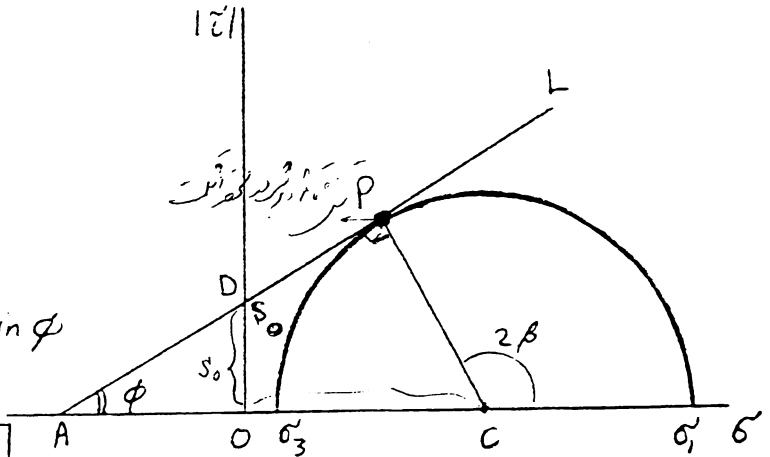
① توسط خط راستی مثل ADL شکل زیر بیان می‌گردد. شیب این خط $\mu = \tan\phi$

بوده و محور τ را در نقطه‌ای مثل D به فاصله $OD = S_0$ قطع می‌کند. تنش‌های قائم وارد بر صفحه توسط دایره موهر و قطر $\sigma_3 - \sigma_1$ مشخص می‌شود. شکست وقتی اتفاق می‌افتد که دایره فوق خط ADL را قطع و یا بر آن مماس باشد یا در نقطه گرفتن مثلث CAP که در آن $2\beta = \frac{\pi}{2} + \phi$ است داریم:

$$\sin\phi = \frac{CP}{CA} = \frac{CP}{AO + OC}$$

$$CP = (AO + OC)\sin\phi$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \left[S_0 \cot\phi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\right]\sin\phi$$



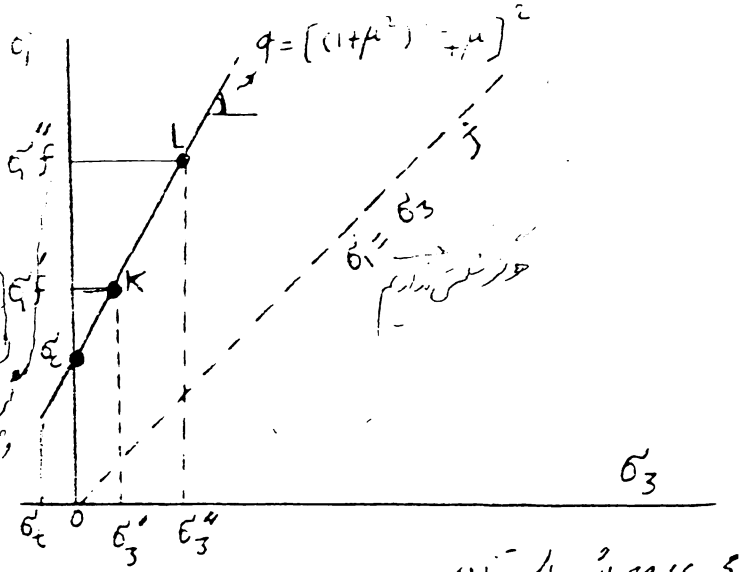
$$\tau_m = S_0\cos\phi + \sigma_m\sin\phi$$

که همان رابطه (23) است.

حالت $\sigma_1 = C + q\sigma_3$ عمومی‌ترین حالت رابطه کولمب است. مقدار μ برای اغلب سنگها در حدود $q \simeq 3.5$ تا 4.5 تغییر می‌کند یعنی μ بین 0.5 تا 1 باشد معمولاً در اجسام پلاستیک ندرت می‌آید. مقدار q را از آزمایش $\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \rightarrow \sigma_1 - \sigma_3 = C = 250 \Rightarrow \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = S_0$ بدست می‌آوریم.

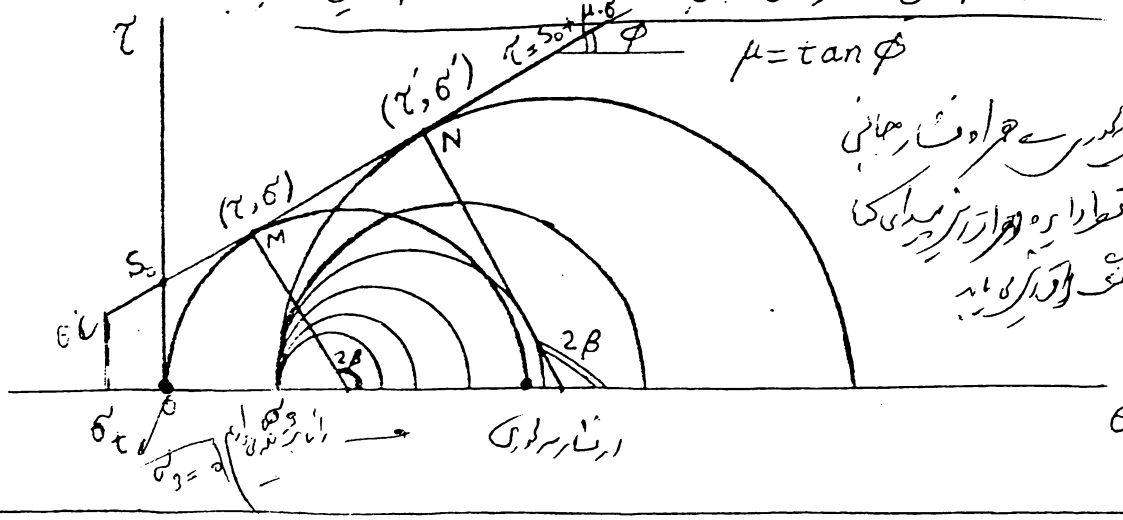
خط مزور بر رهبر، tensile cut off در شکل زیر نشان داده شده است. برای بیان مفهوم فیزیکی خط شکست بر روی شکل ۲ تا مسر مختلف تنش در نظر گرفته شده است. خط σ_3 با شیب 45° که حالت $\sigma_1 = \sigma_3$ را بیان می‌کند. مسر σ_3 حالتی را نشان می‌دهد که $\sigma_1 = \sigma_3$ یعنی نمونه تحت تأثیر تنشهای هیدرواستاتیک قرار گرفته باشد. در کل همیشه $q > 1$ می‌باشد و σ_3 هیچ وقت پوش شکست (منحنی شکست) را قطع نخواهد کرد یعنی شکست اتفاق نخواهد افتاد.

از طرف دیگر در آزمایش سه‌محوری فشار جانبی $\sigma_3 = \sigma_3'$ را ثابت نگه داشته و در امتداد σ_3 K مقدار σ_1 را افزایش دهیم. در نقطه K منحنی شکست را قطع خواهیم کرد و شکست اتفاق خواهد افتاد (وقتی که $\sigma_1 = \sigma_1'f$) و این مقدار تنش $\sigma_1'f$ در حالتی که تنش جانبی σ_3 باشد عنوان مقاومت فشاری سه‌محوری تعریف می‌شود. برای تنشهای بالاتر σ_3 خط شکست در نقطه L قطع خواهد



تا ـ ج حاصل از آزمایشهای یک محوری و سه محوری معمولاً با استفاده از روابط موهر ـ کولمب نشان داده می‌شود. در شکل زیر رابطهٔ $|\tau| = S_0 + \mu.\sigma$ یعنی رابطهٔ کولمب نشان داده شده است. در بارگذاری یک محوره، $(\sigma_3 = 0)$ آزمایش در نقطه o شروع می‌شود. با افزایش تنش محوری σ_1 قطر دایره موهری که نشان دهندهٔ حالت تنش در داخل نمونه است بزرگتر شده، و با خط مماس برخورد می‌کند و وقتی که $\sigma_1 = \sigma_c$ باشد. در نقطه M با هم برخورد کرده، شکست رخ می‌دهد. مختصات نقطه M مقادیر σ و τ متوسط شکست را در نقطه شکست می‌دهد. به همین ترتیب یک آزمایش سه محوری با فشار جانبی $\sigma_3 = \sigma_3'$ شروع شده، با افزایش σ_1 مقاومت آن افزایش پیدا کرده

با افزایش تنش محوری دایره‌های تنش $\sigma_3 P$، $\sigma_3 Q$ و $\sigma_3 R$ نشان دهندهٔ حالت تنش در داخل نمونه هستند بزرگتر شده و در نقطهٔ $N(\sigma', \tau')$ معیار شکست تحقق پیدا می‌کند. همانطور که از شکل پیداست با افزایش فشار جانبی قطر دایره موهر در لحظهٔ شکست افزایش پیدا می‌کند. و این نیز برعکس احجام پلاستیک نشان می‌دهد که با افزایش فشارهای جانبی مقاومت سنگ‌ها افزایش می‌یابد.



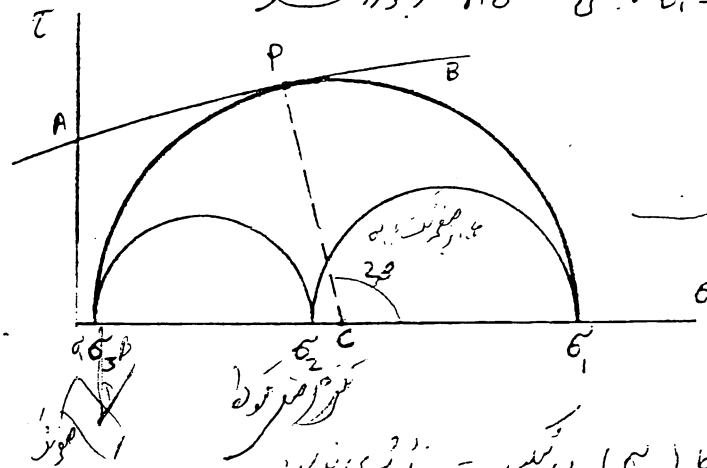
مقاومت سنگ در یک حد از فشار جانبی افزایش پیدا کرده و از آن به بعد مقاومت سنگ افزایش نمی‌یابد.

Mohr's hypothesis

طبق تئوری موهر (Mohr 1900) وقتی که شکست برشی در امتداد صفحه‌ای اتفاق می‌افتد بین تنش نرمال عمود (σ) و برشی (τ) یک رابطه تابعی برقرار است این رابطه می‌تواند خطی و یا منحنی باشد.

$$|\tau| = f(\sigma)$$

رابطه فوق در محورهای $\sigma - \tau$ توسط یک منحنی مثل AB نشان داده می‌شود. اگر حالت تنش اصلی مختلف σ_3 و σ_2 و σ_1 داشته باشیم مقادیر σ و τ را می‌توان با استفاده از روابط موهر بدست آورد. و تا زمانیکه مقادیر σ و τ در زیر منحنی AB هستند شکست اتفاق نخواهد افتاد. یک شکست وقتی اتفاق می‌افتد که دایره‌ای به مرکز C و قطر $\sigma_1 - \sigma_3$ با منحنی AB برخورد کند.



خط AB مماس بر دایره موهر صفحه شکست در امتداد تنش اصلی Max تشکیل می‌دهد که محور σ را قطع می‌کند. مقدار تنش اصلی متوسط σ_2 در شکست تأثیری ندارد

با توجه به شکل فوق می‌توان دریافت که تنش اصلی متوسط (σ_2) در شکست تأثیری ندارد صفحه شکست در امتداد تنش اصلی متوسط قرار دارد. که محور آن با جهت تنش اصلی Max زاویه β می‌سازد. در صورتیکه زاویه 2β عبارتست از زاویه PC σ که خط عمودی AB با محور σ در بیت می‌کند. منحنی AB توسط رابطه معینی تعریف نشده و توسط مکان هندسی آزمایش‌های سه محوری و بصورت پوششی (Mohr's envelope) بر دایره‌های موهر بدست آمده، رسم می‌شود. جهت شکست با جهت عمود بر AB از مرکز دایره موهر بدست می‌آید. پوش موهر معمولاً کمی نسبت به خط راست تقعر دارد یعنی با افزایش تنش متوسط $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ زاویه بین صفحه شکست و جهت تنش اصلی افزایش می‌یابد

برای احجام شکسته $\sigma_1 - \sigma_3$ قطر دایره موهر با افزایش σ_3 بیشتر خواهد شد، یعنی منحنی پوش به طرف راست بازتر خواهد شد. با فرض خطی بودن پوش موهر معیار موهر و کولمب با هم مطابقت خواهند داشت و معادله $|\tau| = f(\sigma)$ بصورت خطی $|\tau| = S_0 + \mu \cdot \sigma$ درخواهد آمد. در تئوری گریفیت پوش بصورت سهمی درنظر گرفته می‌شود.

معیار کولمب قبلاً با استفاده از تنش متوسط $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ و تنش برشی ماکزیمم

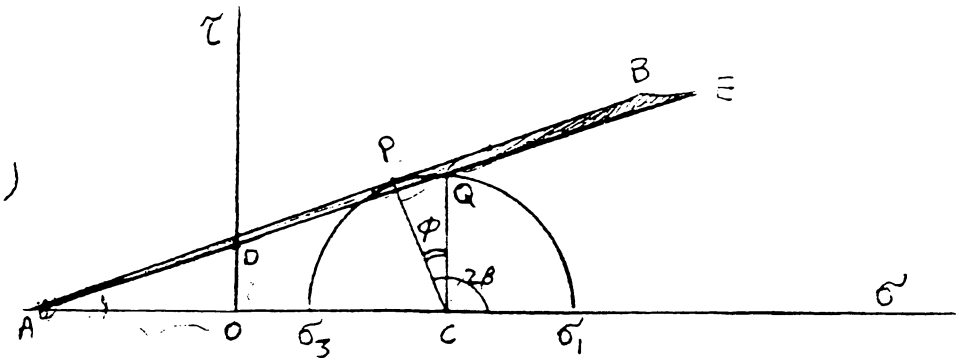
$\tau_m = \sigma_m \sin\phi + S_0 \cos\phi$ به صورت زیر نوشته شده بود، $\tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$

رابطه فوق با ... نسبت دارد. نشان دهید:

$OA = -S_0 \cot\phi$

$OD = S_0 \cos\phi$

$OAo = \tan^{-1}(\sin\phi)$



پوش مورد نظر برای معیار فوق پوشش دایره‌ای مثل CQ خواهد بود (با مرکز C و شعاع τ_m)

پوش مزبور به صورت خط APB مماس بر دایره خواهد بود. مثلث حاوی مزبور عبارت است از:

$$\sin PAC = \frac{CP}{AC} = \frac{\tau_m}{\sigma_m + S_0 \cot\phi} \Rightarrow CP = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \tau_m$$

$$AC = AO + OC = S_0 \cot\phi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) = S_0 \cot\phi + \sigma_m$$

$$\sin PAC = \frac{\tau_m}{\sigma_m + S_0 \cot\phi}$$

(A) زیرا از رابطه $\Rightarrow \tau_m = \sigma_m \sin\phi + S_0 \cos\phi = \sin\phi\,(\sigma_m + S_0 \cot\phi)$

$$\Rightarrow \sin\phi = \frac{\tau_m}{\sigma_m + S_0 \cot\phi}$$

بنابراین $\sin PAC = \sin\phi$

یعنی زاویه PAC عبارت است از زاویه ϕ یعنی زاویه اصطکاک داخلی و رابطه مربوط به پوش موهر

عبارت است از همان رابطه خطی با شد کار کولمب که $\tau = S_0 + \sigma \tan\phi = S_0 + \mu \cdot \sigma$

معیار Griffith

گریفیث برای اولین بار تئوری خود را بر روی تکه‌ای از شیشه با صفحه‌ای واحد که دارای ترک باریک طول خیلی بزرگ $2C$ بود برای گسترش ترک انجام داد و نتیجه گرفت که ترک وقتی گسترش می‌یابد که

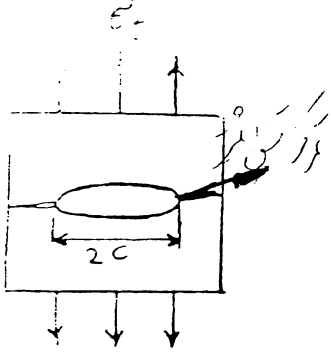
$$\sigma_t \geq \sqrt{\frac{2E \cdot \alpha}{\pi \cdot C}}$$

با این معیار بعد از ایشان

که در آن α انرژی لازم برای ایجاد واحد سطح ترک جدید و E مدول الاستیسیته است.

① اثر اصطکاک کنار ترک در نظر گرفته نشده است (نقاط بیضی شکل)

② تنش فشاری ثابت σ_3 در راستای ترک (موازی با دیواره)

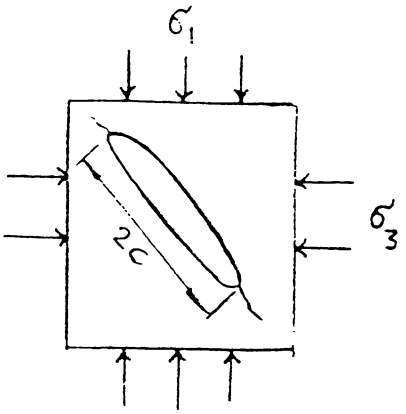


α (T/m^2) : انرژی سطحی در سطوح دیواره ترک

E : مدول یانگ بدون ترک

C : نصف طول ترک

σ_t : تنش کششی

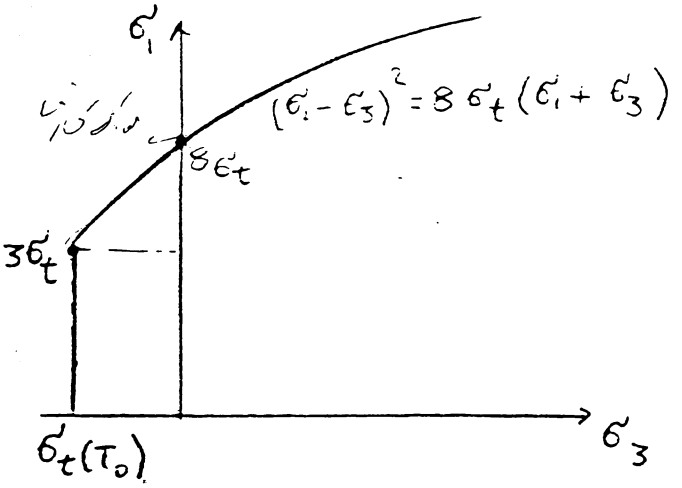


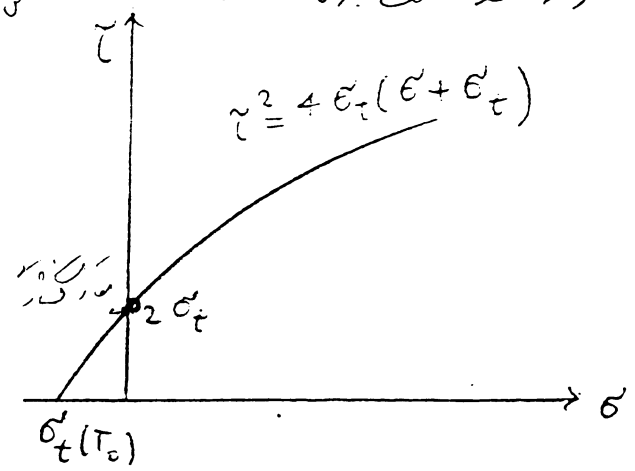
وی سس تئوری خود را برای حالت فشاری نیز بسط داد. در این نظریه ناهمسانی از تأثیر اصطکاکی دیواره درزه چشم پوشی کرد.

اگر $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$ $\quad (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3)$

اگر $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ $\quad \sigma_3 = -\sigma_t$

در رابطه فوق هر جا تنش کششی وقتاً مؤثر بر صفحه‌ای که از محور بزرگ بیضی (ترک) عمود می‌گذرد به صورت زیر ارائه شده است. $\tau^2 = 4\sigma_t(\sigma + \sigma_t)$ تنش برشی موثر





رابطه فوق نشان می‌دهد که وقتی $\sigma_3 = 0$ معادله به صورت $(\sigma_1)^2 = 8\sigma_t \cdot \sigma_1$

$\sigma_1 = 8\sigma_t$

$\sigma_c = C_0 = 8T_0$ در حالی که مقاومت فشاری سنگ 8 برابر مقاومت کششی است

ولی آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که در حقیقت این نسبت بیشتر از مقدار فوق است

سورل Murrell تئوری خود را با استفاده از حالت تنش سه محوری به صورت زیر بسط داد.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2 = 24\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$(\tau_{oct})^2 = 8\sigma_t(\sigma_{oct})$$

$\sigma_c = 12\ \sigma_t$ برای سنگدانه‌ای یک محوری رابطه فوق بصورت مقابل می‌باشد.

رابطه Griffth $(\tau)^2 - 4(\sigma_t)(\sigma_n) - 4(\sigma_t)^2 = 0$

$\tau^2 = 4\sigma_t\sigma_n + 4\sigma_t^2 = 4\sigma_t(\sigma_n + \sigma_t)$

Mc clintock ، walsh رابطه گرفیث اثر اصطکاکی سطح ترک معادل

گرفیث رابصورت زیر اصلاح کردند.

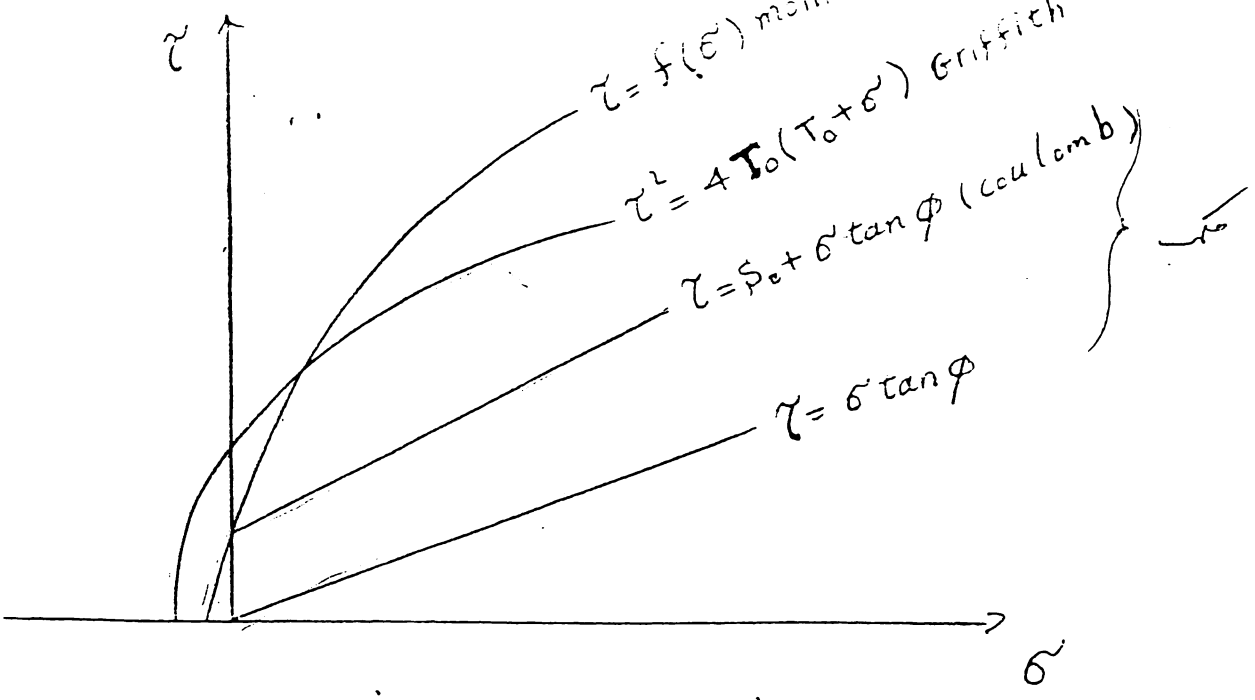
$$\mu(\sigma_3 + \sigma_1 - 2\sigma_c) + (\sigma_1 - \sigma_3)(1+\mu^2)^{0.5} = 4\sigma_t\left[1 - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t}\right)\right]^{0.5}$$

μ : ضریب اصطکاک در سطح ترک

σ_t مقاومت کششی

σ_c تنش کرانی عمود بر ترک برای بسته شدن آن

فقط Brace در رابطه فوق σ_c در رابطه فوق خلی کمتر است و رابطه فوق را بصورت ساده‌تری درآورد: $\mu(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)(1+\mu^2)^{0.5} = 4\sigma_t$



پوش موهر برای معیارهای مختلف.

موضوع کلی آن در مورد ... → مقدار ... در آزمایش ... مقاومت ...

... strength ...

معیار شکست : تعریف شکست در اثر اعمال تنش‌های مختلف

رهبر

... مشخص می‌دهد که هیچ یک از معیارهای مقاومت موجود کاملاً ... دقت ... بطور کامل و دقیق با نتایج آزمایشگاهی در شرایط مختلف بارگذاری تست و مشاهده می‌شود که نمونه‌های $\sigma - \tau$ و $\sigma_1 - \sigma_3$ اغلب خطی نبوده بلکه بصورت منحنی هستند و می‌توان آنها را بصورت قانون توان (Power low) ارائه کرد.

در سال 1965 مورل (Murrell) معیار تجربی زیر را پیشنهاد کرد (قانون توان)

$$\sigma_1 = \sigma_c + F\,\sigma_3^{A}$$

$$\tau = S_o + b \cdot \sigma_n^{a}$$

σ_1 : تنش اصلی Max

σ_3 : تنش اصلی Min

A و F و b و a ضرائب هستند.

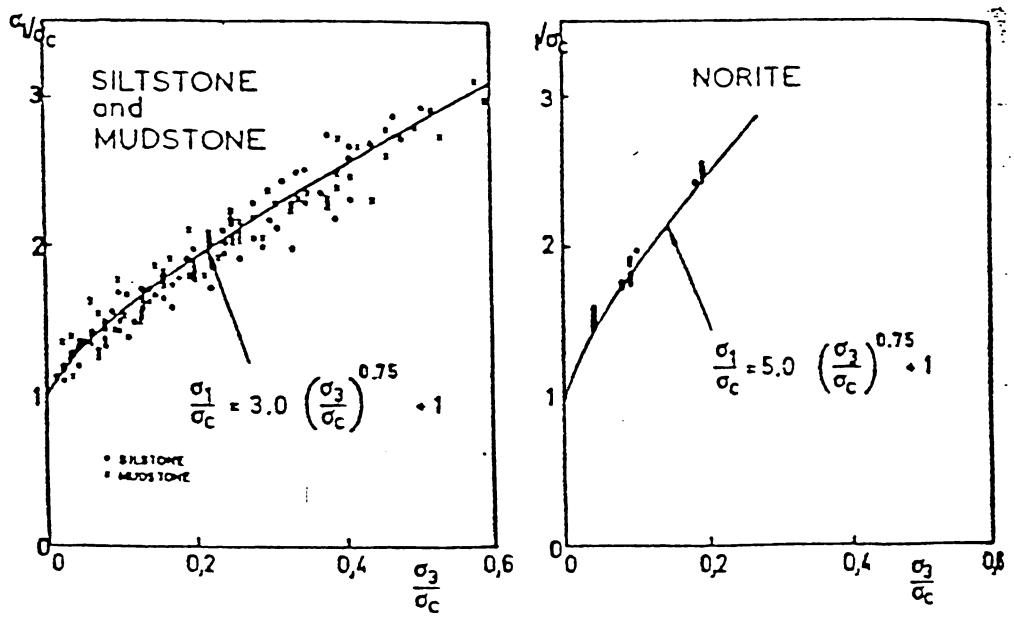
a و A کمتر از یک بوده و F و b دارای واحد هستند.

ضرائب فوق بدون بعد بوده و همین علت مشکلاتی را فراهم می‌کنند. این مشکل را می‌توان بگونه زیر حل کرد. نرمالیزه (normalize) کردن رابطه فوق یعنی تقسیم طرفین رابطه بر ... در این حالت :

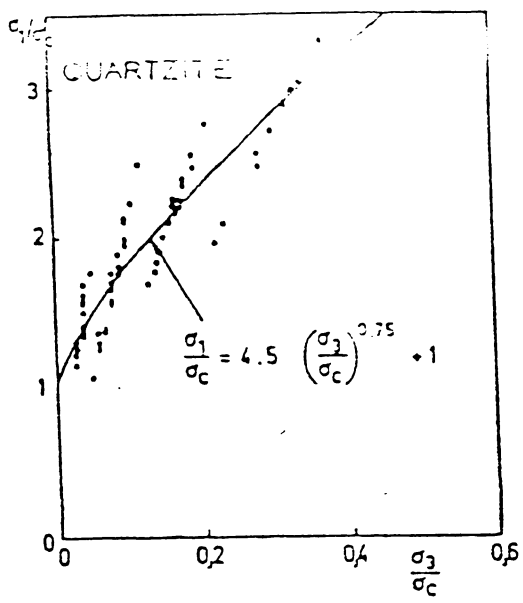
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = K \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right)^{A} + 1 \qquad K = 3 \sim 5$$

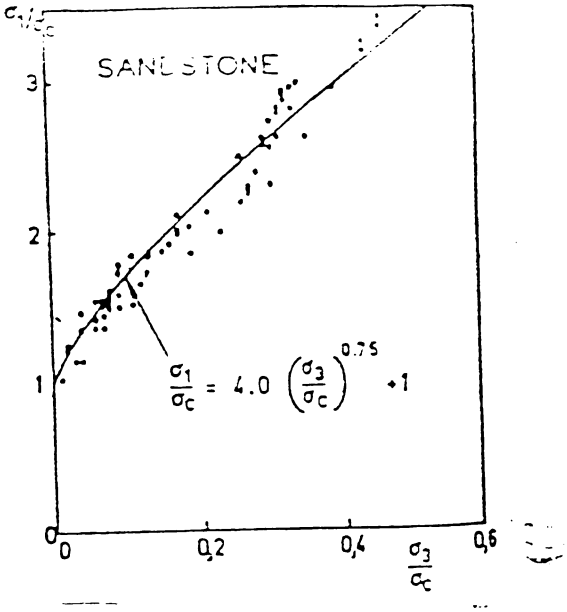
$$A = 0.75$$

معیار فوق توسط بنیاوسکی (Bieniawski) بروی دو نوع از سنگهای افرقای جنوبی انجام و نتایج زیر بدست آمده است.

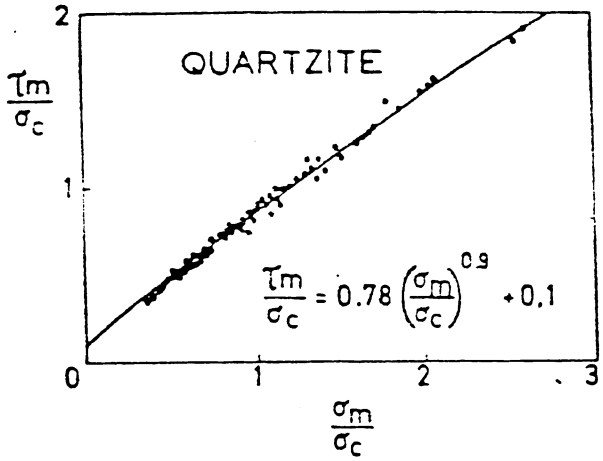


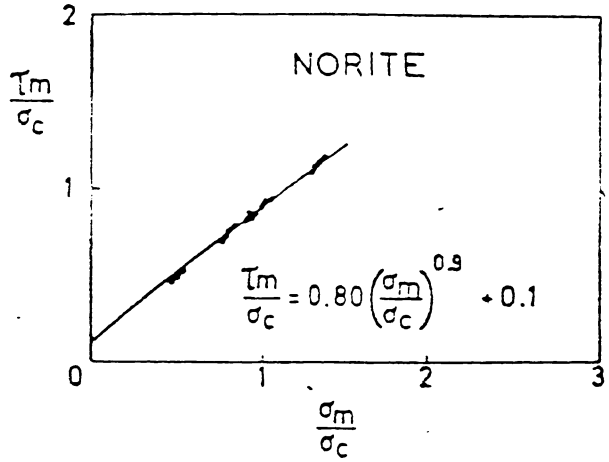
— تکنیک در آزمایش فشاری سه محوری برای 4 نوع سنگ

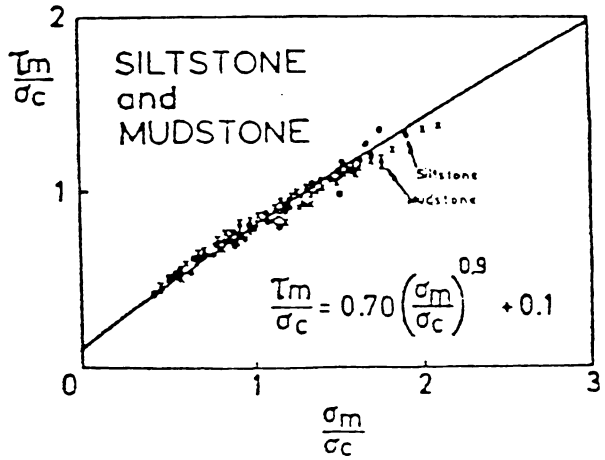


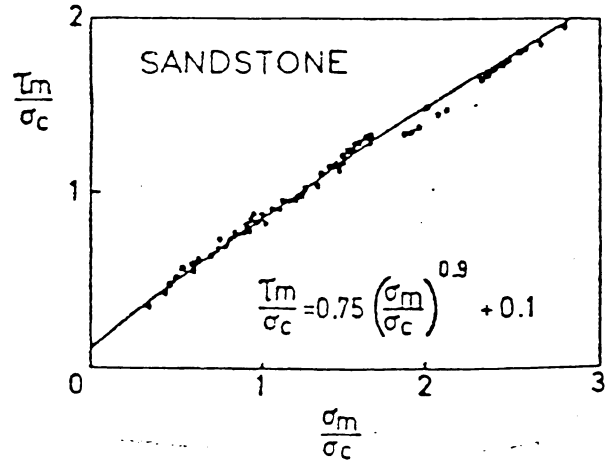


نمودار تعیین سه محوری برای دو نوع سنگ









رابطه بین تنش برشی مؤثر و تنش قائم متوسط برای
پنج نوع سنگ

صورت دیگری از قانون توان توسط Hoek در سال 1968 ارائه شده است. این رابطه بر اساس تنش برشی max و تنش قائم متوسط بنا شده است و شکل آن به صورت زیر است:

$$\frac{\tau_m - \tau_0}{\sigma_c} = B \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)^c \qquad (a)$$

مثال: تنش برشی و قائم متوسط را برای حالت سه محوری محاسبه کنید.

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad ; \quad \tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

τ_0 و B در رابطه (a) ثابت هستند.

برای مقاصد عملی می‌توان $\sigma_t = \tau_0$ یعنی مقاومت کششی کند محور. سنگ فرض کرد و از آنجا که τ_m و σ_m مختصات نقطه بالائی دایره مور هستند (یکی سفاع و دیگری فاصله مرکز دایره از مبدأ مختصات) مقادیر بدست آمده مکان هندسی نقاط بالائی دایره مور است

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} - \frac{\tau_0}{\sigma_c} = B \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)^c$$

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} = B \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)^c + \frac{\tau_0}{\sigma_c} = B \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)^c + \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \Rightarrow \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \simeq 0.1$$

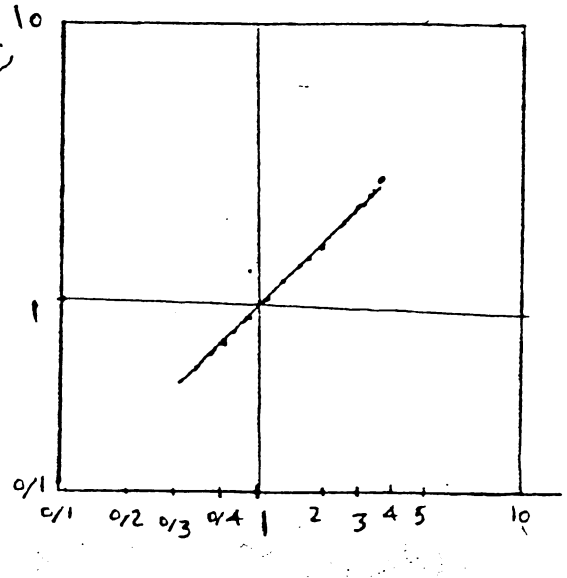
از تنش کششی کند محور

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} = B \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)^c + 0.1$$

همچنین رابطه (a) را می‌توان به صورت لگاریتمی زیر درآورد. برای بدست آوردن ضرائب B و c

$$\log_{10} \left(\frac{\tau_m - \tau_0}{\sigma_c} \right) = \log_{10} B + c \log_{10} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)$$

این معادله توسط بینیاوسکی برای تعداد زیادی سنگ آزمایش و نتایج زیر بدست آمده است.



رابطه بین تنش برشی حداکثر و تنش قائم متوسط برای حالت سه محوری

روابط بنیادی روالاز برای سنگ‌ها

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} = 0.8\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)^{0.9} + 0.1$$ norite

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} = 0.75\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)^{0.9} + 0.1$$ ماسه‌سنگ

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} = 0.78\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)^{0.9} + 0.1$$ کوارتزیت

$$\frac{\tau_m}{\sigma_c} = 0.70\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)^{0.9} + 0.1$$ لایه‌سنگ و سنگ رس

$$\frac{\tau_m}{C_0} = 0.76\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)^{0.85}$$ هوک (ماسه‌سنگ)

رابطه بنیادی مربوط به

$B = 0.7 \sim 0.8$ $\quad C = 0.90$

پارامترهای مورد استفاده در دو معیار شکست فوق.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = A\left[\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right]^{0.75} + 1 \qquad \frac{\tau_m}{\sigma_c} = B\left[\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right]^{0.9} + 0.1$$

نوریت	Norite	$A = 5$	$B = 0.8$
کوارتزیت	Quartizite	$A = 4.5$	$B = 0.78$
ماسه‌سنگ	sandston	$A = 4.0$	$B = 0.75$
سیلت‌استون	siltston	$A = 3.0$	$B = 0.70$
سنگ رس	mudston	$A = 3.0$	$B = 0.70$

برای تمام سنگ‌ها $A = 3.5 \pm 10.4\%$ و $B = 0.75$

یک معیار شکست خوب و کامل باید دارای خواص زیر باشد.

a) باید بتواند شکل العمل سنگ را در مقابل تمام سه حالت مختلف تنشهای احتمالی در زمین شرح دهد و دامنه تغییرات این سه حالت از تنش کششی یک محوری تا فشاری سه محوری تغییر می کند.

b) باید قادر در پیش بینی اثر یک و یا چند بین گروه، anisotropy در رفتار بخور سنگ باشد.

c) باید بتواند هم چند تقریبی رفتار توده سنگ را که شامل تعدادی گروه درزه و anisotropy می باشد، مشخص نماید.

معیار تجربی شکست هوک و براون

اساس این معیار تجربی، معیار Griffith و Mcclintock walsh می باشد.
بنظر ناظر دگان در حین شکست روابط زیر بین تنشهای اصلی موجود است.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\,\sigma_c\,\sigma_3 + s\,\sigma_c^2} \qquad (A)$$

σ_1 = تنش اصلی ماکزیمم در حین شکست

σ_3 = تنش اصلی می نیم در حین شکست

σ_c = مقاومت فشاری یک محوری ماده سنگ در بخور.

m و s ضرائب عریوط به جزاحن سنگ و نحوه شکست آن قبل از اعمال گیری تحت تاثیر σ_3 و σ_c

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m\,\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s}$$ نرمالیزه کردن (بخوار در صفحه بعد)

$\sigma_3 = 0 \Rightarrow \sigma_1 = \sqrt{s\,\sigma_c^2}$ برای سنگ بکر $\Rightarrow \sigma_{cs} = \sigma_1 = \sigma_c$ ، $s = 1$

برای سنگی که قبلاً شکسته ($s < 1$) و مقاومت آن فاصله ای صفر از رابطه فوق بدست می آید.
در صورتیکه σ_c مقاومت فشاری یک محوری سنگ بکر بخوار است.

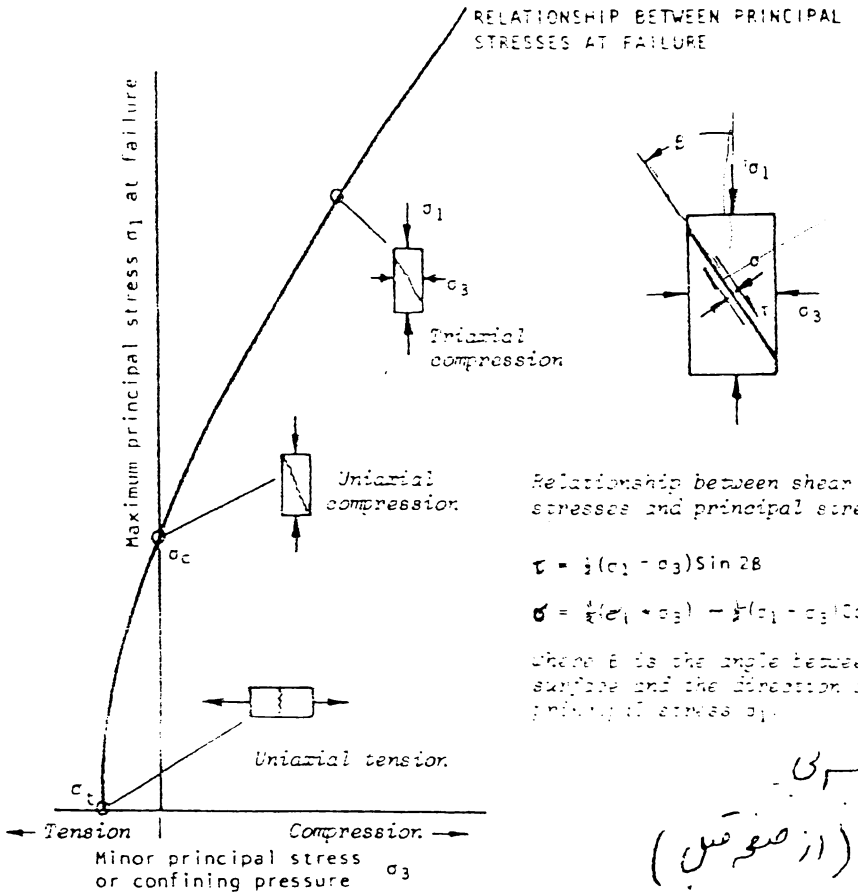
تنش کششی یک محوری بخور با جایگزین کردن $\sigma_1 = 0$ در رابطه (A) بدست می آید

$$\sigma_3 + \sqrt{m\,\sigma_c\,\sigma_3 + s\,\sigma_c^2} = 0 \Rightarrow \sigma_3^2 = m\,\sigma_c\,\sigma_3 + s\,\sigma_c^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_3^2 - (m\sigma_c)\sigma_3 - (s\sigma_c^2) = 0$$ معادله درجه دوم

$$\Delta = m^2\sigma_c^2 + 4s\sigma_c^2 = \sigma_c^2(m^2 + 4s)$$

$$\sigma_3 = \sigma_t = \frac{m\sigma_c \pm \sigma_c\sqrt{m^2+4s}}{2} \Rightarrow \sigma_t = \frac{1}{2}\sigma_c\left(m - \sqrt{m^2+4s}\right)$$



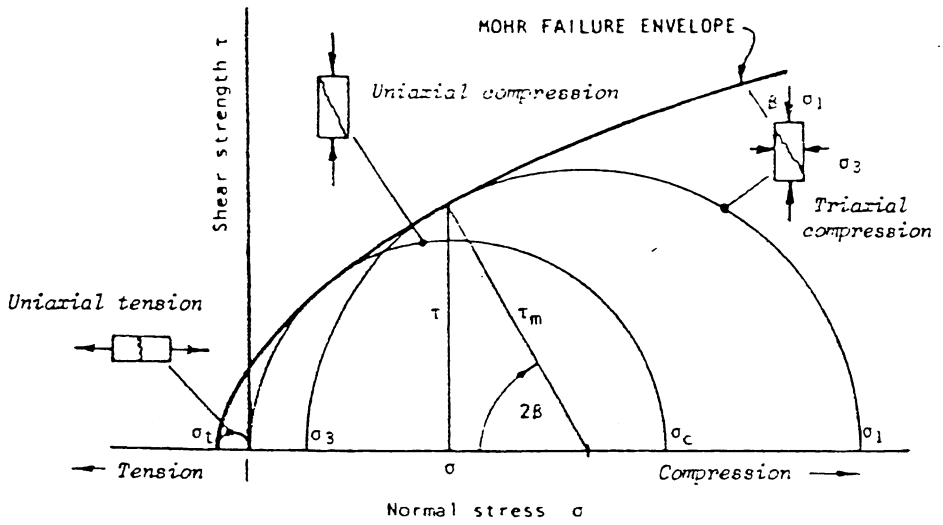


Figure 67 : Graphical representation of stress conditions for failure of intact rock.

معیار هوک و براون به شرح زیر می باشد

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \left(1 + m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^{0.5}$$

m = ضریب ثابت

مقادیر ثابت m توسط هوک و دیگران (۱۹۹۲)
برای سنگهای مختلف شرح زیر محاسبه و یا تخمین زده شده است.

آمفیبولیت	۳۱/۲	گابرو	۲۵/۸
آندزیت	۱۸/۹	گنیس	۲۹/۲
آنهیدریت	۱۴/۲	گرانیت	۳۲/۷
بازالت	۱۷	دیوریت	۱۵/۵
چاک	۷/۲	سنگ آهک	۸/۴
چرت	۱۹/۳	نوریت	۲۱/۷
کلی استون	۳/۴	کوارتزیت	۲۳/۷
دولریت	۱۵/۲	ریولیت	۲۰
دولومیت	۱۰/۱	ماسه سنگ	۹/۶
		لاسنگ	۱۱/۴

با جایگزینی $\sigma_1 = 0$ در این معادله و با حل معادله درجه دوم حاصل برای σ_3 مقاومت کششی تک محوری سنگ (σ_t) بصورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\sigma_3 = \sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_c \left[m - (m^2 + 4)^{0.5} \right]$$

معیار تجربی برای توده سنگ:

از میان معیارهای مختلفی که در مورد توده سنگ ارائه شده، فقط معیار هوک و براون تا حدودی مورد بحث خواهد شد. معیار اولیه هوک و براون که در سال ۱۹۸۰ شرح زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \left(s + m_m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^{0.5}$$

m_m و S [illegible]

مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ σ_{cm} با جایگذاری $\sigma_3 = 0$ در معیار یافته ، را می‌توان بصورت زیر بدست آورد

$$\sigma_{cm} = \sqrt{S} \cdot \sigma_c$$

آنها در سال ۱۹۸۸ معادلات اصلاح شده زیر را در مورد روابط تجربی بین ثابت های S ، m_m و کیفیت توده سنگ (RMR) ، پیشنهاد بینیاوسکی (۱۹۷۴) ارائه دادند :

توده سنگ دستکاری شده، بعنوان مثال توده سنگ های در سطوح شیب دار سنگی که تحت تأثیر انفجارات ناشی از آتشباری :

$$\frac{m_m}{m} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right)$$

$$S = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right)$$

توده سنگ دستکاری نشده بعنوان مثال سنگ های محاور تونل های حفاری شده بوسیله ماشین حفر تونل :

$$\frac{m_m}{m} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right) \quad , \quad S = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right)$$

m_m و S ثابت های توده سنگ و m ثابت مربوط به سنگ بکر است .

آنها پیشنهاد کردند که معیار فوق در مورد سنگهای متجانس بکار گرفته شود . بعنوان مثال وقتی که حجم سنگ مورد نظر شامل ۳ گروه و یا بیشتر درزه های نزدیک بهم بوده ، هیچ یک از گروه درزه های خوق از دیگران بمقدار خیلی زیاد ضعیف تر نباشد - در این معیار اصلی مقاومت فشاری تک محوری در رده بندی RMR و معیار شکست هوک و براون بکار گرفته شده است .

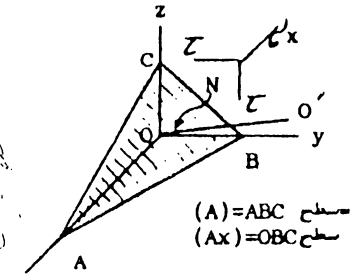
براساس مطالعات هوک و دیگران (۱۹۹۲) معیار مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ را در مقادیر کوچکتر σ_3 خیلی بالا نشان داده و هم چنین مقاومت کششی معنی حاصل می شود .

آنها معتقد هستند که مقاومت کششی توده سنگ نباید صفر باشد . از جنبه این نقص موجود در معیار اصلی هوک و براون ، آنها معیار خویش را بدین صورت اصلاح کردند .

محاسبه، اجزاءتنش برشی ونرمال سه محوره وجهت یابی ومحاسبه، آنها درسطح
سه بعدی چنین است :

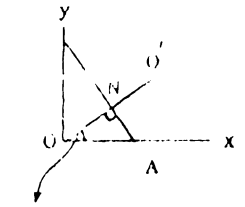
مولفه، تنش درجهات یک سه وجهی موردنظرهمانندشکل (۱۰-۲) اثرسه
مراکزاعمال نیروووتنیپیرشکل سطوح چهاروجهی طوری درنظرگرفته میشوند
اختلافهاقابل صرفنظرکردن باشند. جهت نرمال ON بر ABC ازمبدامختصات به
عنوان واحدطول درجهت O′ درنظرگرفته میشود. اندازه، سطح ABC
واحداست. حجم هرچهاروجهی = ارتفاع × قاعده × ۱/۳ یعنی :

(A).1
(شکل ۱۱-۲)
(Ax).OA
(Ax).OA=1/3(A).1
(A).1/OA
میدانیم ON =
(شکل ۱۲-۲) COS(x,O′)
A.COS(x,O′)
A.COS(y,O′)
A.COS(z,O′)

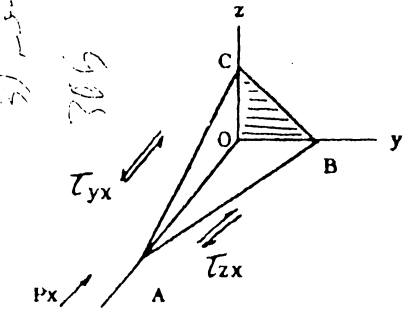


واحدسطح (A)=ABC
سطح (Ax)=OBC

شکل ۱۰-۲-نمایش تنسورمعادلات درچهاروجهی .

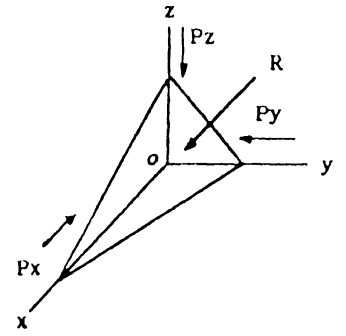


شکل ۱۲-۲-بیان معنی COS(x,O)



شکل ۱۱-۲-سطح Ax ومحاسبه، نیروهادرجهت Px

برداربرآیندتنش R برروی سطح ABC به موازات محورهای مختصات با Pz,Py,Px نمایش داده میشوند. (شکل ۱۳-۲) هریک ازاین مولفه‌هاعناصر تنش برشی وقائم رادربردارند.



شکل ۱۳-۲-برداربرآیندتنش R

(شکل ۱۱-۲)
$Px(A)=\sigma x(Ax)+\tau yx(Ay)+\tau zx(Az)$
$Px(A)=\sigma x(A)\cos(x,O')+\tau yx(A)\cos(y,O')+\tau zx(A)\cos(z,O')$ (۲-۱۵)

باتقسیم طرفین بر (A) مولفه‌های تنش شامل :

$Px=\sigma x\cos(x,O')+\tau yx\cos(y,O')+\tau zx\cos(z,O')$
$Py=\sigma y\cos(y,O')+\tau zy\cos(z,O')+\tau xy\cos(x,O')$
$Pz=\sigma z\cos(z,O')+\tau xz\cos(x,O')+\tau yz\cos(y,O')$

وبروش مشابه :

سه فرمول فوق مولفه‌های بردار برآیندتنش موثربرسطح مایل موازی بامحورهای z,y,x میباشند. بردار برآیندتنش موثربرسطح ABC برابراست با :

$R^2=Px^2+Py^2+Pz^2$

$R^2=\sigma^2+\tau^2$

تنش قائم موثر ( ) ABC برابرمجموع تصاویر Pz,Py,Px+رجهت O′ میباشدکه به صورت زیرنشان داده میشود :

$\sigma ABC=\cos(x,O')Px+\cos(y,O')Py+\cos(z,O')Pz$

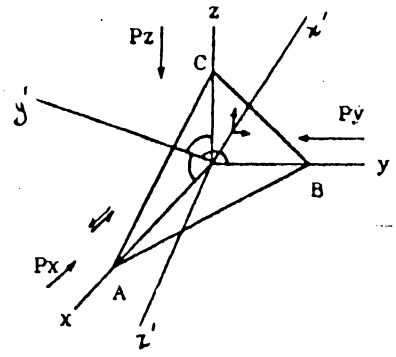
باانتقال دادن مقـــادیر Pz,Py,Px به رابطه، بسط یافته، آنها، داریم :

$\sigma ABC=\cos(x,O')(\sigma x\cos(x,O')+\tau yx\cos(y,O')+\tau zx\cos(z,O'))$
$+\cos(y,O')(\sigma y\cos(y,O')+\tau zy\cos(z,O')+\tau xy\cos(x,O'))$
$+\cos(z,O')(\sigma z\cos(z,O')+\tau xz\cos(x,O')+\tau yz\cos(y,O'))$

حاصلضرب وحاصلجمع شکست حاصل شده ازتنش عمودی بر ABC چنین است :

$\sigma ABC=\cos^2(x,O')\sigma x+\cos^2(y,O')\sigma y+\cos^2(z,O')\sigma x$
$+2\cos(x,O')\cos(y,O')\tau xy+2\cos(y,O')\cos(z,O')\tau yz$
$+2\cos(z,O')\cos(x,O')\tau xz$

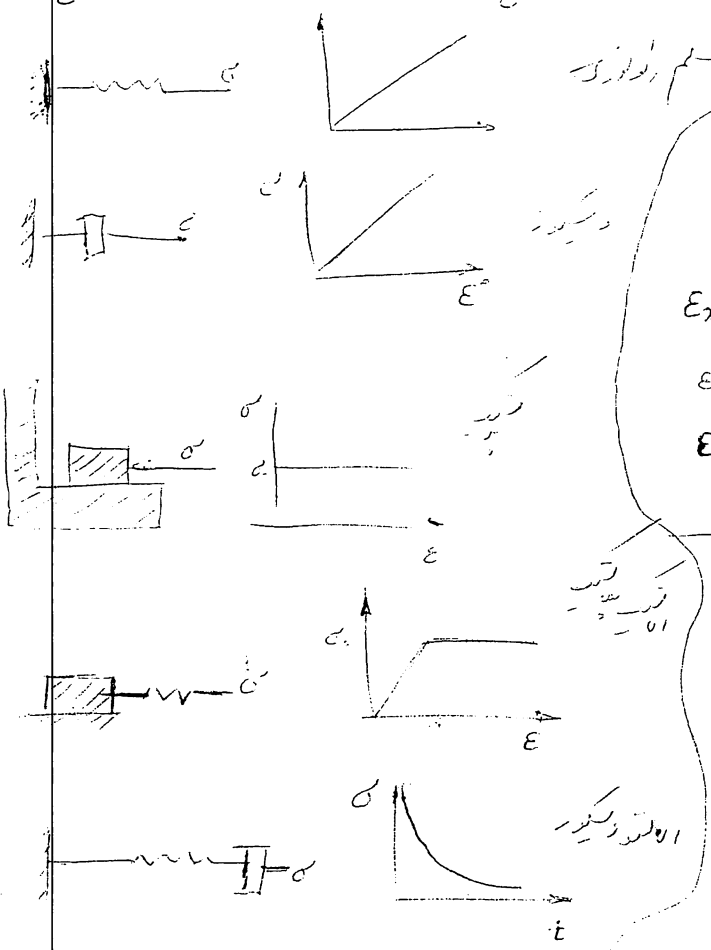
برای تعیین تنشهای برشی در ABC دستگاه مختصات جدیدی باتعویض x′ به‌جای O-O′ عمودبر ABC رسم میکنیم ؛ y′ و z′ باتوجه به سطح ABC همانندشکل ۱۴-۲ انتخاب میشوند. σABC بصورت $\sigma x'y'$ و $\tau x'y'$ نشان داده میشوند. همانطوریکه داریم :



شکل ۱۴-۲-تنشهای برشی در ABC .

$\tau x'y'=Px\cos(y',x)+Py\cos(y',y)+Pz\cos(y',z)$

اولین عنصراین جمع هم ارزمولفه، برشی Px درجهت y′ است که باجایگزین کردن مقادیربسط یافته، Px, Py, Pz ازروابط قبلی خواهیم داشت :



$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_y}{E} = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y)$$

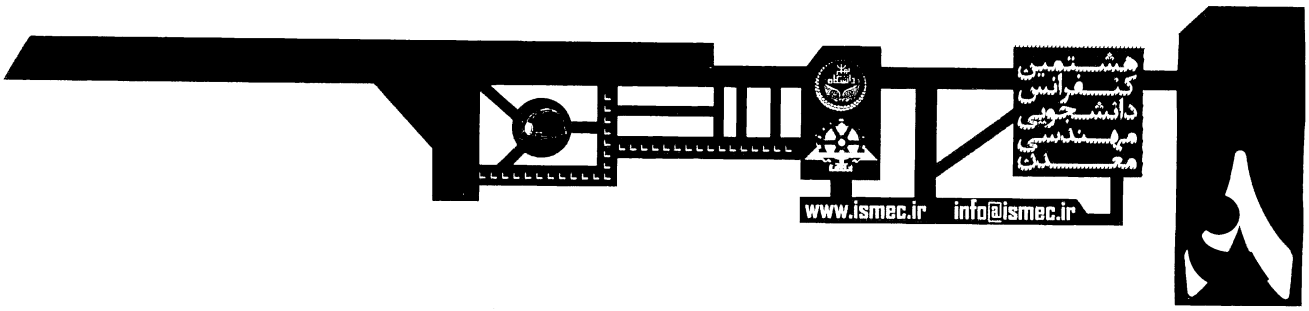
$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu\frac{\sigma_x}{E} = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$W_0 = \frac{1}{2E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)$$

$$W_0 = \frac{1}{2E}\sigma_1^2 \quad , \quad W_0 = \frac{\text{نیروی} \times \text{جابجایی}}{\text{حجم}}$$

$$W_0 = \frac{1}{2}\frac{Q_0^2}{E}$$


هشتمین
کنفرانس
دانشجویی
مهندسی
متالورژی
www.ismec.ir
info@ismec.ir