از معایب TBM می‌توان به مقطع دایره‌ای شکل ثابت، انعطاف پذیری محدود در مقابل تغییرات وضعیت زمین شناسی، هزینه سرمایه گذاری بالا، زمان طولانی مونتاژ و استقرار دستگاه در سینه کار اشاره کرد.

۳-۲-۸ شرکت‌های اصلی سازنده TBM

شرکت‌های متعددی در ساخت دستگاه‌های TBM فعالیت دارند که از جمله آنها می‌توان به شرکت‌های زیر اشاره نمود:

- Robbins
- Wirth
- CTS
- Voest Alpine
- Herrenknecht

www.ttnar.ir

۳-۳ حفاری با کله‌گاوی (roadheader)

اصولا بعد از TBM، کله‌گاوی مهمترین وسیله برای حفاری به روش مکانیکی است. کله گاوی در ابعاد و اندازه های مختلف وجود دارد. اغلب کله‌گاوی ها دارای قسمت‌های زیر هستند (شکل ۳-۲۱):

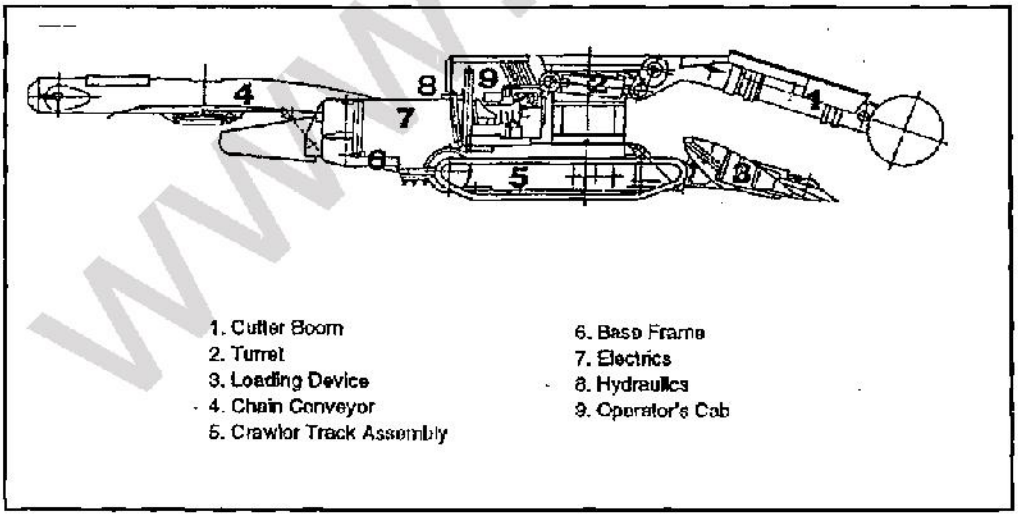
- تاج حفار
- بازوی هیدرولیکی که تاج حفار را به محل مورد نظر می‌رساند (۱)
- بخشی برای ایجاد امکان حرکت افقی کلگی (۲)
- بخش بارگیری (۳)
- تسمه نقاله برای انتقال مواد حفاری شده (۴)
- اتاقک اصلی که دارای کنترل های الکتریکی و هیدرولیکی و کابین اپراتور است (۶)
- وسیله حرکت روی آن که اغلب چرخ زنجیری است(۵)

بطور کلی دو نوع کله‌گاوی وجود دارد:

۱- کله‌گاوی از نوع تاج مخروطی (spiral type cutting head)

۲-کله‌گاوی از نوع تاج طبلکی (drum type cutting head)

در کله گاوی تاج‌مخروطی، تاج حفار حول محوری موازی با بازوی حفاری (boom) می‌چرخد و در کله‌گاوی تاج طبلکی، تاج حفارحول محوری عمود بر بازو دوران می‌کند (شکل ۳-۲۲ و ۳-۲۳).



شکل ۳-۲۱- اجزای یک دستگاه کله‌گاوی

۳-۳-۱ تاریخچه دستگاه‌های کله‌گاوی

ابداع دستگاههای کله‌گاوی به طور مشخص در دهه ۱۹۴۰ در اروپا صورت گرفت. تا دهه ۱۹۵۰ انواع قابل توجهی از دستگاههای کله‌گاوی در صحنه تونلسازی پا به عرصه نهادند. پیشرفتهای عمده ای که در طول دهه ۱۹۵۰ بر روی ماشین‌های بازوئی در شوروی سابق صورت گرفت، منجر به معرفی دستگاههای کله‌گاوی مدل PK3 روسی در سال ۱۹۶۱ در انگلستان شد.

در سالهای اخیر، توجه قابل ملاحظه ای بر افزایش ظرفیت انواع دستگاههای کله‌گاوی برای دستیابی به سرعتهای بیشتر تونلسازی و افزایش قابلیتهای آنها برای حفاری سنگهای سخت تر، متمرکز شده است. این مسائل موجب افزایش قابل توجهی در وزن چنین دستگاههائی گردیده است.
دستگاههای کله‌گاوی به عنوان یک دستگاه تونلسازی، انعطاف پذیری و قابلیت جابجائی خوبی در شرایط مناسب را دارا می‌باشند.

با ابداع دستگاههای کله‌گاوی سنگین‌تر، دامنه کاربرد این دستگاهها برای شرایط سنگی محکمتر گسترش یافت. در جریان یک بررسی که در سال ۱۹۸۰ انجام گرفت، نشان داده شد که کاربرد دستگاههای کله‌گاوی در انگلستان که دارای وزنی بین ۲۱/۵ تا ۸۰ تن می‌باشند، برای حفر سنگهائی با مقاومت ۶۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال توجیه اقتصادی دارند. تاج حفار این دستگاهها از نوع مخروطی بوده، توان مصرفی تاج ۳۰ تا ۱۰۰ کیلووات و توان مصرفی کل دستگاه ۸۶ تا ۶۲۵ کیلو وات بوده است

۳-۳-۲ قدرت و وزن دستگاههای کله‌گاوی

انعطاف پذیری عملیاتی، قابلیت حفر مقاطع تونل باشکلهای مختلف و قابلیت مانور آن برای ایجاد تقاطعها از جمله خصوصیات اصلی دستگاههای کله‌گاوی هستند. دستگاههای سبکتر قدیمی (حدود ۲۵ تن یا کمتر) در حفر سنگهای متوسط تا سخت مواجه با عدم موفقیت شدند، زیرا لرزش دستگاه باعث وارد آمدن خسارت به سرمنه‌ها و اغلب خود دستگاه می‌شد. در انواع دستگاههای سنگین کله‌گاوی (۹۰ تن به بالا) تمام قسمتها از ساختار پیشرفته‌تر و محکمتری برخوردار شده اند و به تناسب آن قدرت دستگاه افزایش یافته و هزینه های تعمیر و نگهداری و زمان سرویس تا حد قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه حفر سنگهای سخت‌تر توسط این دستگاهها از جنبهٔ اقتصادی توجیه یافته است.

یک دستگاه کله‌گاوی در انگلستان برای حفر سنگهائی با مقاومت بالای ۱۰۰ مگاپاسکال که در بعضی شرایط به ۲۰۰ مگاپاسکال می‌رسید، بکار گرفته شد که دارای وزن ۱۵۰ تن، توان تاج حفاری ۲۲۵ کیلووات و گشتاور خروجی ۳۱۲ کیلونیوتن- متر بوده‌است.

www.tnar.ir

۳-۳-۳ مبانی برش دستگاه های کله‌گاوی طبلکی و مخروطی

دستگاههای کله‌گاوی طبلکی عمل حفاری را بصورت شخم زدن (ripping) و کله‌گاوی مخروطی حفاری را بصورت سایشی (milling) انجام می‌دهد. در انگلستان تقریباًکلیه دستگاههای کله‌گاوی مورد استفاده از نوع مخروطی می‌باشند. در آلمان ۶۵٪ از نوع مخروطی و ۳۵٪ از نوع طبلکی و در آمریکا، کانادا و مکزیک ۷۵٪ از نوع طبلکی هستند.

سیستم برش نوع مخروطی:

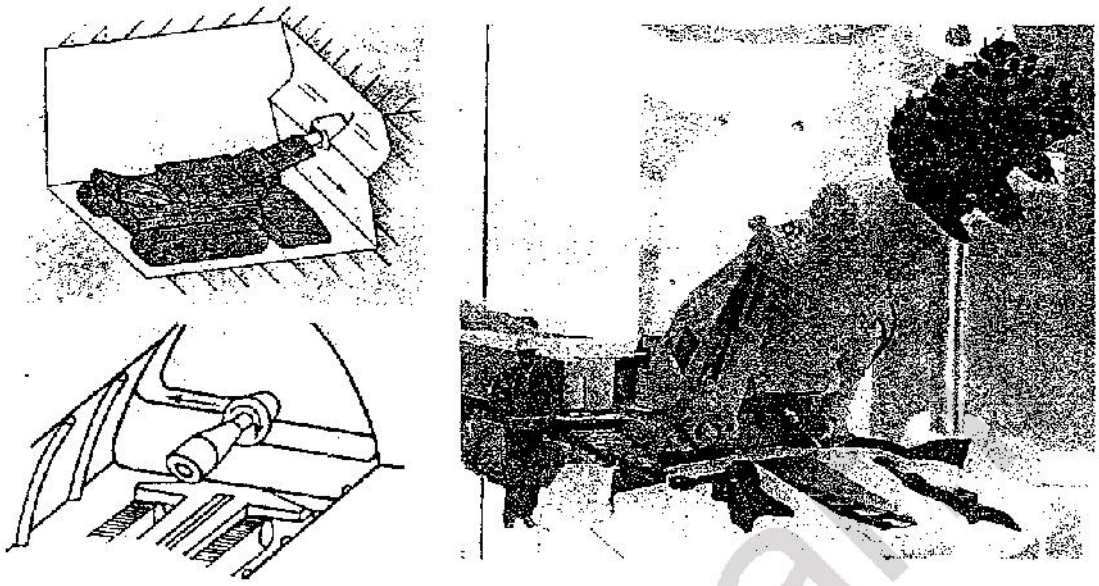
معمولترین شکل تاج حفاری در دستگاههای کله‌گاوی، مخروطی است که حول محوری در امتداد محور بازوی دستگاه دوران می‌کند. طرح تاج برشی مخروطی و موقعیت و جهت نصب آن برروی بازو بگونه‌ای است که در موقعیت بهینه جهت اعمال حداکثر نیروی برشی بر جبهه کار تونل قرار گیرد. به همین دلیل این نوع دستگاههای کله‌گاوی توانسته اند قابلیت اجرائی پذیرفته شده‌ای در شرایط زمین ساختی مشکل و محکم از خود ارائه دهند و کاربرد گسترده ای در اروپا پیدا کنند. در سیستم مخروطی در مقایسه با طبلکی، زمان کمتری صرف خرد کردن یا نفوذ اولیه (فروروی) در سینه کاری متشکل از سنگ سخت شده و امکان حفاری سریعتر در اینگونه سنگ‌ها فراهم می‌شود.

سیستم برش نوع طبلکی:

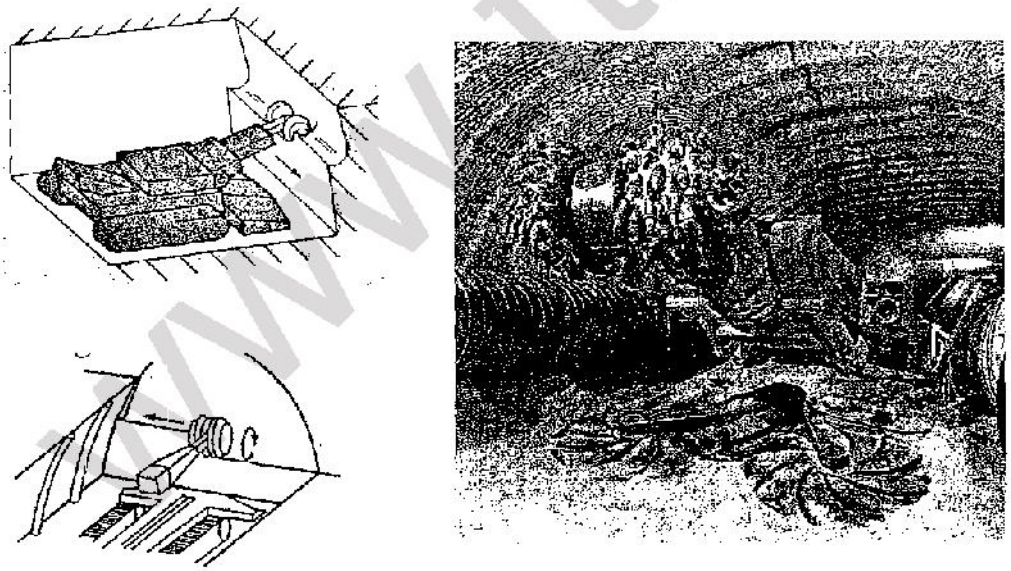
مکانیزم برش شخم زدن با برش نوع طبلکی به طور گسترده ای در دستگاههای استخراج پیوسته (continuous mining machine) برای برش شرایط سنگی نسبتاً ضعیف همچون جبهه کارهای ذغالسنگی یا انواع مختلفی از سنگهای رسوبی پذیرفته شده است. بطور کلی برای شرایط‌سنگی سست، این مکانیزم برش سرعت برش خوبی به دست می‌دهد. دستگاههای حفار طبلکی ۲۰ تا ۳۰ در صد سبکتر از دستگاههای حفار مخروطی با ظرفیت یکسان هستند. شرایط سنگی سخت یا محکم مستلزم تمرکز نیروهای برشی، بویژه در شروع برش جبهه کار تونل می‌باشد و سیستم برش نوع مخروطی در این گونه موارد موثرتر و کاراتر از سیستم برش نوع طبلکی می‌باشد.

ویژگیهای اصلی سیستم برش نوع طبلکی عبارت است از توانائی حفاری سطح مقطعهای بزرگ و ظرفیت بالای حفاری آنها، که این ویژگیها این دستگاه را در شرایطی که محصول یا خروجی انبوه مطلوب باشد، به صورت بسیار جذاب در آورده است و باعث به کار گیری در عملیات متعدد معدنکاری شده است.

www.tunnel.ir



شکل ۳-۲۲- نمونه یک دستگاه کله‌گاوی با تاج حفار مخروطی و نحوه حفاری آن



شکل ۳-۲۳- نمونه یک دستگاه کله‌گاوی با تاج حفارطبلکی و نحوه حفاری آن

www.ttnar

۳-۳-۴ ابزار برش

با توسعه و پیشرفت ابزار برش به منظور بر آوردن نیازها و همپائی با پیشرفت دستگاههای کله‌گاوی سه نوع ابزار برش مطرح شد.

- سر مته های مخروطی (point attack picks)
- سر مته های شعاعی بزرگ (large radial picks)
- سر مته های جلو بر (forward attack picks)

سر مته های مخروطی:

یکی از ویژگیهای اصلی سر مته های مخروطی، قابلیت چرخش آن در درون پایه تا زمان سائیده شدن آن می‌باشد. این امر باعث افزایش عمر و کارایی سرمته‌ها و در نتیجه افزایش زمان بین تعویض سر مته‌ها می‌شود.

سر مته های شعاعی بزرگ:

مهمترین ویژگی این سر مته‌ها دسترسی به راندمانهای بالای برش همراه با کاهش میزان گرد و غبار می‌باشد اندازه بزرگ این سرمته‌ها، کاربرد آنها را در شرایط سنگی سست تا متوسط، مطلوب می‌سازد. کاربرد سر مته‌های شعاعی بزرگ در سنگهای سخت، می‌تواند موجب وارد آمدن سریع خسارت به سرمته و کاهش راندمان برش و بروز لرزشهای شدید در دستگاه شود.

سر مته های جلوبر:

این سر مته ها به گونه ای طراحی شده اند که در مقایسه با سر مته‌های شعاعی، نیروی محوری بیشتری را در جریان برش به سنگ منتقل می‌کنند. پایه سرمته‌ها (pickbox) برای اینکه تحمل نیروهای برشی بیشتری را داشته باشند، بنحو مناسبتری تنظیم شده اند. ساق سر مته ها (pick shank) کمتر از ساق سرمته های شعاعی در معرض آسیب پذیری قرار دارند و بهتر قابل انطباق با سر مته‌های مخروطی هستند. آبفشانها با موفقیت همراه با سر مته های جلوبر بکار گرفته شده اند.

۳-۳-۵ توانایی برش دستگاه کله‌گاوی

تجارب حاصل در انگلستان نشان می‌دهد که دستگاههای کله‌گاوی قادر به حفر سنگها بادامنهٔ مقاومتی متفاوت هستند، لیکن ضعفهای ساختاری در سنگ نظیر درزه ها و صفحات لایه‌بندی می‌توانند محدودیتهائی در جریان حفر به وجود آورند. مطالب کلی در مورد توانائی برش دستگاه کله‌گاوی در جدول۳-۷ آورده شده است.

یک عامل محدود کننده در رابطه با قدرت برش، این نکته است که با افزایش قدرت برش، هزینه سرمته افزایش می‌یابد. سختی اجزای برشی و حفظ قدرت مؤثر برش در دماهای بالای حاصل از اصطکاک، از

ویژگیها و عوامل مهم می‌باشند. کاهش سرعت سرمته به منظور افزایش عمر سرمته‌ها و حفظ قدرت برش ایجاب می‌کند که از دستگاههای کله‌گاوی سنگین‌تری استفاده شود، که این امر خود معایبی نظیر افزایش هزینه ها و کاهش انعطاف پذیری عملیاتی و تعمیراتی را به همراه دارد. پیشرفتهائی که در زمینه تولید دستگاههای کله‌گاوی سنگین در سالهای اخیر صورت گرفته، ضمن حفظ ویژگیهای برشی مؤثر سرمته‌ها، امکان افزایش قدرت حفاری انواع سنگهای سخت تر را نیز میسر ساخته است.

جدول ۳-۷- توانائی حفاری دستگاههای کله‌گاوی (Whittaker and Firth, 1990)

انواع اصلی کله‌گاوی	توانائی یا قدرت برش
۱-دستگاههای سبک	۱-قادر به برش سنگهائی با مقاومت ۸۰ مگاپاسکال بطور موفقیت آمیز می‌باشد. ۲-در سنگهائی با مقاومت بیش از ۸۰ مگاپاسکال می‌تواند مشکلاتی در برش بروز کند.
۲-دستگاههای سنگین	۱-حفر موفق سنگهائی با مقاومت تا ۱۰۰ مگاپاسکال. ۲-در سنگهائی با مقاومت بیش از ۱۵۰مگاپاسکال وبالاتر نمی‌توان موفق بودن حفر را تضمین کرد. ۳-یک ماسه‌سنگ متراکم با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال توسط یک دستگاه کله‌گاوی انگلیسی-روسی درانگلستان با موفقیت حفر شد.

۳-۳-۶ کنترل دستگاه‌های کله‌گاوی

تجارب حاصل از کار با دستگاههای کله‌گاوی در معادن ذغالسنگ انگلستان نشان داده است که محدودیت عمده ناشی از مشکل تطبیق قابلیتهای دستگاه با شرایط متغیر لایه ها بوده است (بعنوان مثال کنترل میزان نیروی وارد بر سطح سینه کار با توجه به تغییر مقاومت لایه ها). عملکرد دستگاه در این گونه موارد، بستگی زیادی به مهارت اپراتور دستگاه دارد. برشهای کم عمق همراه با نفوذ محدود و نرخ بالای سایش سرمته می‌تواند ناشی از احتیاط بیش از حد اپراتور باشد. برعکس نرخهای بالای نفوذ یا سرعت پیشروی زیاد در سنگ سخت می‌تواند موجب وارد آمدن خسارت به سرمته‌ها و تاج حفاز و همچنین لرزش دستگاه شود.

طراحی به وسیله کامپیوتر (CAD) کمک مهمی برای کله‌گاوی بویژه از جنبه طراحی تاج حفار و جانمائی، فاصله داری و نحوه قرارگیری (positioning) بهینه سرمته‌ها بوده است. پیشرفتهای حاصله در زمینه هیدرولیک و میکروالکترونیک محدودهٔ روشهای کنترلی جدید را به صورت وسیعی گسترش

بخشیده است و در نتیجه سرعت پیشروی و قابلیت اطمینان به دستگاه افزایش یافته است. سرمته‌های طراحی شدهٔ جدید و سیستمهای آبفشانی که اخیراً طراحی شده اند، پتانسیل بالائی برای بهبود عملکرد و کنترل دستگاههای کله‌گاوی از خود ارائه داده‌اند.

۳-۳-۷ کاربرد کله‌گاوی‌ها در روش 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 عمومی‌شده است. کیفیت فضای حفر شده با این روش یک عامل مهم است و دستگاههای کله‌گاوی با توجه به قابلیت کارشان تحت شرایط گوناگون و متنوع زمین شناسی بنحو موفق این کیفیت را تأمین کرده اند. دستگاه کله‌گاوی AMT70 (AlpineMiner Tunneller) برای روش NATM طراحی و ساخته شده است. ویژگی مهم این دستگاه قابلیت حفر تونلهائی باسطح مقطع ۶۰ متر مربع یا بیشتر می‌باشد.

حفر تونل Karawanken بین اتریش و یوگسلاوی با سطح مقطع ۱۰۱ متر مربع به صورت یک راه دوبانده و به طول ۸/۵ کیلومتر در سنگ آهک، دولومیت و ماسه سنگ باروش NATM و با استفاده از AMT70 صورت گرفته است. این تونل در دو مقطع اصلی با شرایط مشکل زمین روبرو شد. اول در یک مقطع بشدت خرد شدهٔ آبدار و دوم در یک مقطع دارای شیلهای گرافیتی سیاه درزه دار. ابتدا قسمت بالائی و سقف تونل با سطح مقطع ۵۳ متر مربع توسط AMT70 حفر شد (باروش NATM). برای حفر بقیه سطح مقطع نیز از همین دستگاه و به صورت حفر پله‌ای استفاده گردید و در زمان حفر قسمت پائین، نگهداری قسمت بالائی تونل (قابهای فولادی، راکبولت، و بتن پاشی) انجام می‌گرفت.

۳-۳-۸ دستگاههای کله‌گاوی دو بازویی (twin boom roadheader)

توسعه و پیشرفت دستگاهها کله‌گاوی دو بازویی ناشی از تقاضای زیاد برای افزایش سرعت پیشروی بوده‌است. به عنوان نمونه دستگاه Dosco TB 600 قادر به حفاری و بارگیری ۲۰۰ متر مکعب در ساعت است. این دستگاهها نرخ کندن سنگ را افزایش و در نتیجه زمان لازم برای حفر طول ثابتی از تونل را کاهش می‌دهند، و نتیجتا، سرعت پیشروی با این دستگاهها بالا می‌رود. این نوع دستگاه برای حفر تونلهائی با سطح چهارگوش مناسب‌تر می‌باشد.

تونل روزنبرگ (Rosenberg) در سویس، به قطر ۱۱/۴۶ متر و سطح مقطع حدود ۱۰۰ متر مربع توسط یک کله‌گاوی دارای چهار بازو بدون هیچ گونه خطر برخورد این چهار بازو با هم حفاری شده‌است.

۳-۳-۹ تأثیر ویژگیهای حفر سنگ بر عملکرد دستگاه کله‌گاوی

www.tinar.ir

دستگاههای تونلسازی از جنبهٔ قابلیتهای اجرائی حفر در شرایط زمین شناسی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از ویژگیهای مهمی‌که داشتن ارزیابی در مورد آن ضروری است،عملکرد دستگاه در انواع مختلف سنگها می‌باشد. تحقیقات در این زمینه بر تعیین شاخصها و ویژگیهای سنگ و برقراری ارتباط بین این شاخصها پیشروی کله‌گاوی متمرکز بوده است.

آزمایشهای لازم برای تعیین ویژگیهای حفر سنگ:

آزمایشهای لازم برای تعیین شاخصها و ویژگیهای رفتاری سنگ در برابر برش مبتنی برتستهای آزمایشگاهی مختلف نظیر مقاومت،سختی و سایندگی هستند. پارامترها بصورت منفرد مورد بررسی قرار می‌گیرند و برای قضاوت کلی راجع به رفتار برشی سنگ به صورت تجمعی مدنظر قرار داده می‌شوند.

در مطالعاتی که برای اندازه گیری توان مصرفی در حالتهای مختلف برش به وسیلهٔیک دستگاه کله‌گاوی شرکت Dosco صورت گرفت، توان جذب شده توسط دستگاه و سرعت حفر برای هریک از حالتهای مختلف برش و برای انواع مختلف سنگها اندازه گیری شد. عوامل و پارامترهای زیر پس از این مطالعات برای ارزیابی عملکرد برش ارائه گردید:

شاخص شکست (break index):

این شاخص تعیین کنندهٔ تعداد متوسط صفحات ناپیوستگی (درزه ها، صفحات لایه بندی،ترکها و غیره) در هر متر از هر لایهٔ اصلی سنگ می‌باشد که آن را بطور عمودی یا افقی قطع کرده است.

ضریب تغییر شکل (deformation coefficient): این ضریب معیاری جهت ارزیابی سختی سنگهای جبهه کار تونل می‌باشد که توسط آزمایش چکش اشمیت نشان داده می‌شود:

ضریب تغییر شکل = (Rc -Ri) /Rc

Rc = مقدار ثابت جهش بعد از ۲۰ آزمایش

Ri= مقدار جهش اولیه (جهش در اولین آزمایش)

انرژی ویژه (specific energy):

انرژی مصرفی توسط تاج حفار برای حفر واحد حجم سنگ را انرژی ویژه گویند. بر موارد زیر به عنوان نکات حاصل از نتایج و مشاهدات صورت گرفته در جریان مطالعات تاکید شده است:

۱ - عملکرد دستگاه حفاری بنحو زیادی تحت تاثیر ویژگیهای رفتاری توده و مادهٔ سنگ، مشخصات دستگاه، مشخصات تونل و شرایط عملیاتی قراردارد.

۲- در صورتی که عمل حفاری در شرایطی انجام گیرد که مشکلات تخلیه مواد خرد شده و شرایط عملیاتی مانع ایجاد نکرده باشند، ویژگیهای ماده سنگ بیشترین تاثیر را در عملکرد برش دستگاه از خود نشان می‌دهد.

۳- ترکهای باز یا دیگر ضعفهای طبیعی در ساختار سنگ به میزان زیادی بر عملکرد برش تاثیر می‌گذارد.

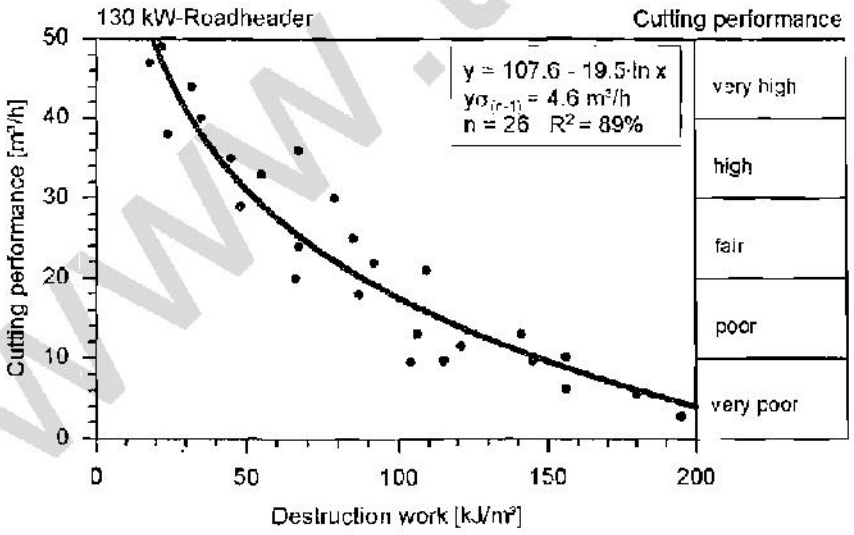
www.itnar.ir

۴ـ با افزایش نرخ حفر، انرژی ویژه کاهش می‌یابد.

۵- مطالعات نشان داده‌است که با برنامه ریزی درست حرکات بازو می‌توان افزایش راندمان را انتظار داشت. تفاوتهای راندمان برش در هر یک از حرکات چهارگانه بازو شامل فرو روی (sumping)،حرکت عرضی (traversing)،زیربری (undercutting)،روبری (overcutting) نشان می‌دهد که با برنامه ریزی و اجرای دقیق مراحل برش می‌توان به بهره‌وری بسیارخوبی از عملکرد برش‌دست یافت. شرایط لایه بندی و نوع سنگها نیز در دامنهٔ گسترده‌ای بر عملکرد حفر تاثیر گذار هستند.

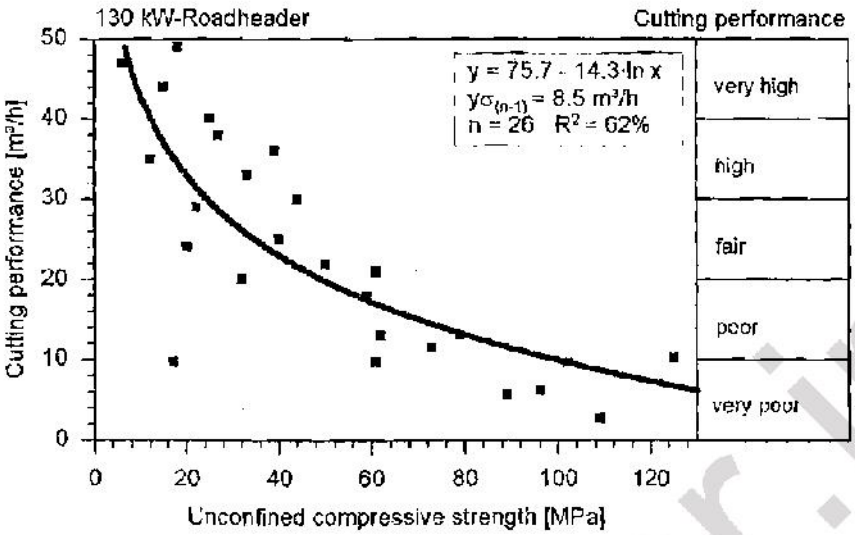
Thuro و Spaun یک ویژگی جدید بنام کار تخریبی ویژه (specific destruction work) برای سنگ تعریف کردند (Thuro & Spaun, 1996). از نقطه نظر فیزیکی، انتگرال منحنی تنش-تغییرشکل (stress-strain) نشان دهنده انرژی یا کار لازم برای گسیختگی نمونه سنگ می‌باشد. کار تخریبی ویژه (یا به اختصار کار تخریبی) بعضا انرژی تغییر شکل (strain energy) نیز نامیده می‌شود.

در شکل ۳-۲۴ برای یک کله گاوی ۱۳۰ کیلوواتی، رابطه عملکرد برش (cutting performance) با کار تخریبی نشان داده شده است. در شکل ۳-۲۵ نیز رابطه عملکرد برش با مقاومت تک محوری سنگ برای همان کله‌گاوی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که عملکرد برش دارای ضریب همبستگی بهتری با کار تخریبی در مقایسه با مقاومت تک محوری می‌باشد.



شکل ۳ ۲۴- تغییرات عملکرد برش بر حسب کار تخریبی

www.tunnel.ir



شکل ۳-۲۵- تغییرات عملکرد برش بر حسب مقاومت تک محوری سنگ

۳-۳-۱۰ حفر تونل با چکشهای ضربه ای هیدرولیک

چکشهای دستی هوای فشرده بنحو گسترده ای در عملیات احداث تونل به کار گرفته شده اند وحتی در حفر تونلهای با مقطع کوچک، روش اصلی حفر را تشکیل داده اند. بکارگیری چکشهای ضربه ای هیدرولیک به هر حال در تونلسازی تمام مقطع، ابداعی نسبتاً جدید بویژه در ایتالیا است که تعدادی از تونلها در آن کشور با استفاده از این روش حفر شده اند. اولین کار سرد عمده چکشهای ضربه ای هیدرولیک به دهۀ ۱۹۶۰برمی‌گردد که این تکنیک در تونلهای بزرگ متعددی به کار گرفته شد. چکشهای ضربه‌ای هیدرولیک ابتدا در راهسازی و خرد کردن بتن و سپس به عنوان روش حفر و خرد کردن سنگ در معادن کاربرد عمومی یافتند.

چکشهای هیدرولیکی۳ تنی با قدرت اعمال انرژی ضربه ای در حدود ۶۰۰۰ ژول کاربرد زیادی در حفر سنگ از جمله در تونلسازی پیدا کرده‌اند. چکش بر روی یک بازوی هیدرولیک مناسب و این مجموعه بر روی یک شاسی متحرک معمولاًریلی نصب می‌شود.

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 به حد کافی بزرگ باشد.

www.ttnar.ir

۳-قطعات بزرگ سنگهای خرد شده را می‌توان با چکش ضربه زن خردتر کرد و به اندازه مورد نظر رساند،در نتیجه امکان انتقال و جابجائی موادخرد شده با تقریبا کلیه سیستمهای حمل و نقل و بویژه نوار نقاله میسر است.

۴- حفر تونل تمام رخ با این روش در بسیاری از شرایط زمین شناسی که سطح مقطع تونل از ۳۰ متر مربع متجاوز است، امکان پذیر میباشد.

۵- محیط تونل با حداقل اضافه حفاری حفر می‌شود.

نحوه حفاری:

حفاری در مرکز جبهه کار از حدود ۱ تا ۱/۵ متری بالای کف شروع و تا عمق حدود ۱/۵ تا ۲ متر حفاری می‌شود. عمل حفر تا دیواره های جانبی و کف ادامه می‌یابد و در نتیجه شکافی ایجاد می‌شود که سنگهای قسمت بالای جبهه کار روی آن قرار گرفته است. حفاری به سمت بالا تا تکمیل سطح مقطع تونل ادامه می‌یابد.

شرایط مناسب کاربرد:

این روش حفر تونل برای چینه‌های با لایه‌بندی خوب و ترک‌دار روش مناسبی است. شرایط توده‌ای می‌تواند از نرخ پیشروی،تا رسیدن به یک سرعت پیشروی که از جنبه اقتصادی مقرون به صرفه نباشد، بکاهد. درسنگهای محکم که دارای درزه های زیاد باشند و رفتاری شبیه لایه های دارای باندهای ضعیف در بین لایه‌ها از خود نشان دهند، می‌توان با استفاده از چکشهای ضربه ای بنحو موفقیت‌آمیزی اقدام به حفر تونل نمود.

با استفاده از این روش در پنج تونل در ایتالیا به نرخ پیشروی در محدودهٔ ۲ تا ۹ متر در شیفت (۱۲ ساعته) و به طور متوسط ۶ متر در ۱۲ ساعت دست یافته‌اند و حجم سنگ حفر شده بین ۳۰۰ تا ۹۰۰ متر مکعب بوده است.

تونل Rieti در نزدیکی رم به طول ۲. ۱کیلومتر به منظور ایجاد یک راه دو بانده به سطح مقطع ۸۰ متر مربع (ارتفاع ۷.۲ و عرض ۱۱،۱ متر) در لایه های آهکی با لایه‌بندی خوب حفر شد. در هر روز کاری (۲۴ ساعت) طی ۵ سیکل، ۸-۷ متر تونل حفر و نگهداری شد و بار بری مواد خرد شده نیز صورت گرفت. برای نگهداری از قابهای قوسی فلزی چهار تکه که به فواصل ۱/۵ متری از هم نصب شده بودند و برای بار گیری همزمان با حفر از لودر تخلیه از جلو و برای حفر از چکش ضربه ای مدل Liebherr 962 استفاده شد که نرخ پیشروی 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 سریع السیر در لایه های ماسه سنگی، مارلی و شیستهای ارژیلیتی به‌شدت چین خورده وگسله حفر شد. عملیات در چهار سیکل و با نرخ پیشروی ۱۰ متر در ۲۴ ساعت انجام گرفت. عملیات حفر و بار گیری همزمان انجام می‌شد.

۳-۳-۱۱ ملاحظات دیگر

۱- دستگاههای کله‌گاوی دارای انعطاف پذیری خوب در عملیات و توانائی برش تونلها با شکلهای مختلف، علاوه بر قابلیت مانوردهی بالا درحفر تقاطع‌ها در تونل‌ها هستند.

۲- در صورتی که تونل در شرایط سنگی لایه ای که دارای باندهای عریض سست در جبهه کار تونل هستند، حفر شود می‌توان در ابتدا اقدام به حفر این باندهای سست نمود. در نتیجه این عمل امکان آزاد شدن تنش و ضعیف شدن سایر لایه های تشکیل دهندهٔ جبهه کار را فراهم می‌آورد که پس از آن می‌توان آنها را بسرعت حفر کرد.

۳- استفاده از آبفشان یا جت آب با فشار بالای ۷۰۰ بار می‌تواند کاهش عمده ای در نیروهای برشی سرمته ایجاد کند.

۴ـ توسعه و به بازار آمدن دستگاههای کله‌گاوی سنگین در عین حالی که ویژگیهای اصلی برش و عملکرد مؤثر سرمته را از طریق طراحی خوب تاج حفار حفظ کرده است، توانائی برش انواع سنگهای سخت‌تر را افزایش داده است.

۵ـ دامنهٔ کاربرد دستگاههای حفاری بازوئی در شرایط سنگی سخت، بنحو فزاینده‌ای افزایش یافته است. این امر توسعهٔ انواع سنگین دستگاهها و در نتیجه افزایش قابل ملاحظهٔ بکارگیری چنین دستگاههای تونلسازی را موجب شده است.

۶ـ مزایای حاصل از کاربرد (CAT) در تاج حفار دستگاههای کله‌گاوی به طور عمده عبارتند از: توانائی طراحی برای عملکرد بهتر برش، توزیع بهتر بار بین سرمته‌ها، همراه با کاهش عمده میزان لرزش.

۷ـ آبفشانهای فشار بالا سهم عمده ای در بالا بردن نرخ حفر داشته اند و در عین حال از انرژی ویژه حفر و میزان گرد و غبار تولیدی کاسته‌اند.

۸-ظهور دستگاههای کله‌گاوی سنگین بسرعت مشخص کرد که سرمته‌های برشی در زنجیرهٔ توسعه از رشدی همپای دستگاههای حفار برخوردار نبوده‌اند.

۹ـ هدایت اتوماتیک دستگاههای کله‌گاوی توانائی حفاری دستگاه را افزایش داده است. با هدایت اتوماتیک میتوان پیشروی را علیرغم فقدان دید لازم بدلیل گرد و خاک ایجاد شده، ادامه داد.

۱۰-چکشهای ضربه ای هیدرولیک میتوانند نیاز به چالزنی و آتشباری در جبهه کار تونل حذف کنند. مزیت مهم این روش بارگیری همزمان با حفر است که امکان می‌دهد تونل سطح مقطع کافی داشته باشد. این روش برای شرایط زمین شناسی که سنگها درزه‌دار باشند، روش مناسبی است.

www.tmar.ir

از مدتها پیش نیاز به دستگاهی ارزان، سبک و متحرک برای حفر و نگهداری فضاهائی با هر شکل مقطعی احساس می‌شده است. دستگاههای کله‌گاوی در ترکیب با سپرهای تونلسازی تا حد زیادی به این نیاز پاسخ داده‌اند.

۳-۳-۱۲ مقایسه کله‌گاوی‌های تاج حفار مخروطی و تاج حفار طبلکی

تحلیل بردارهای سرعت سرمته:

در حین چرخش تاج حفار، برای هر یک از سرمته‌ها دو بردار سرعت متصور است. یکی در جهت چرخش تاج حفاری که به آن بردار سرعت چرخشی (slewing speed) گفته می‌شود و دیگری در جهت فرو روی سرمته به داخل سنگ، که آنرا بردار سرعت برشی (cutting speed) نامیده‌می‌شود.

در تاجهای مخروطی دوران حول محور بازوی دستگاه انجام می‌شود، بنابراین صفحه گذرنده از دو بردار مذکور عمود بر محور بازوی دستگاه می‌باشد. در تاجهای طلبکی محور چرخش تاج عمود بر محور بازوی دستگاه بوده و بردار سرعت چرخشی و سرعت برشی، بردار سرعت منتجه‌ای را بوجود می‌آورند. زاویه این بردار نسبت به محور بازو بستگی به نسبت سرعتهای چرخشی و برشی دارد.

لغزش دستگاه در اثر نیروهای عکس العمل:

نیروهای اصطکاک بین کف تونل و چرخ زنجیری یک عامل موثر در کنترل تکانهای ناشی از نیروی عکس العمل وارد به کله‌گاوی می‌باشد. به همین دلیل کله‌گاوی‌هایی که توان حفر بیشتری دارند، به منظور افزایش نیروی اصطکاک 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 محور بازوی دستگاه وارد می‌شود. همین امر سبب ایجاد تکانهای شدید می‌شود اما در تاجهای طلبکی با توجه به اینکه جهت نیروی عکس العمل تقریبا در امتداد قائم و به موازات راستای بازوی دستگاه وارد می‌شود، تکانهای حاصله نیز بسیار کمتر است.

در شرایط عملیاتی مشابه و با یک موتور محرکه مشابه، با استفاده از سیستم تاج طبلکی وزن دستگاه نسبت به حالتی که از سیستم تاج مخروطی استفاده می‌شود، کمتر خواهد بود. و یا به عبارت دیگر در یک کله‌گاوی با وزن مشخص، سیستم تاج طبلکی قابلیت استفاده از موتورهای قوی تری را خواهد داشت.

بطور کلی در فرایند حفر مقدار انرژی که از طریق هر یک از سرمته‌ها می‌توان منتقل نمود، به دو عامل عمده سختی سنگ و پایداری (stabillity) دستگاه بستگی دارد. بدین معنی که در حفر یک سنگ

سخت هر چه انرژی پشت سرمته‌ها بیشتر شود، نرخ استهلاک آنها نیز به شدت افزایش می‌یابد. در این حال عدم استحکام دستگاه (مقاومت در برابر لرزش های شدید)، در مواجهه با نیروهای قوی عکس العمل سنگ، سبب تخریب قطعات مختلف کله‌گاوی می‌شود. به هر ترتیب انرژی ویژه (انرژی که به هر یک از سرمته‌ها وارد می‌شود) به عواملی از قبیل سرعت چرخش، جرم تاج و همچنین تعداد سرمته‌هایی که در هر لحظه با سینه درگیر هستند، بستگی دارد. همانگونه که قبلا ذکر شد کله‌گاوی‌های تاج طبلکی نسبت به نیروهای عکس العمل وارد به تاج تکانهای کمتری نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از افزایش سرعت چرخش و جرم تاج می‌توان انرژی ویژه حفر را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

مقایسه مشخصات فنی

در جدول زیر مشخصات فنی یک دستگاه کله‌گاوی تاج مخروطی با یک دستگاه کله‌گاوی تاج طبلکی با قدرت موتور یکسان مقایسه شده‌است.

جدول ۳-۸- مشخصات دو نوع کله‌گاوی تاج مخروطی و تاج طبلکی

مشخصات	کله‌گاوی تاج مخروطی	کله‌گاوی تاج طبلکی
قدرت موتور تاج حفار	۳۰۰(kW)	۴۰۰ (kW)
وزن	۱۱۰(ton)	۹۵ (ton)
تعداد سرمته‌ها	۱۰۵	۲x۹۹
سرعت برشی متوسط (V)	۱/۵(m/s)	۳/۸ (m/s)
نیروی حفر در حرکت افقی	۲۰۰(kN)	۸۵ (kN)
نیروی حفر در حرکت رو به بالا	۲۰۰(kN)	۳۰۰ (kN)
نیروی حفر در حرکت رو به پائین	۲۰۰ (kN)	۲۲۵ (kN)
عرض دستگاه	۳/۶(m)	۳ (m)
طول دستگاه	۱۳/۵ (m)	۱۲ (m)
ارتفاع دستگاه	۲/۷ (m)	۱/۸۵ (m)
فاصله مرکز ثقل تا محور تاج	۵ (m)	۴/۵(m)
فاصله مرکز ثقل جکهای نگهدارنده	-	۶ (m)

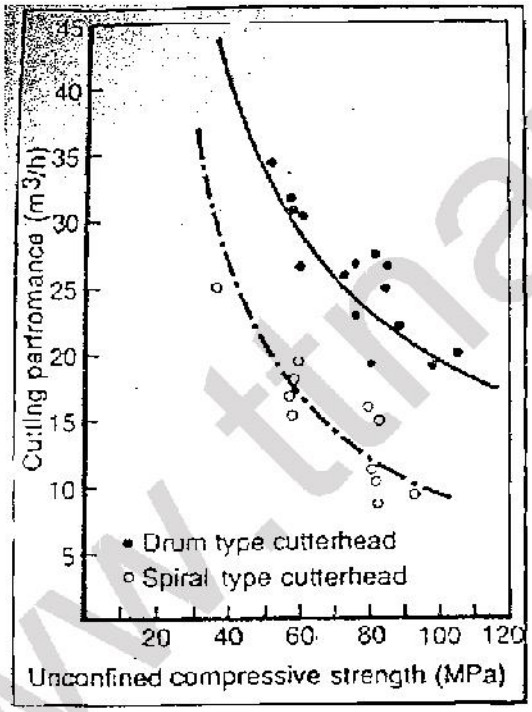
مقایسه عملکرد کارگاهی

این مقایسه بر مبنای بررسی توانایی های اجرایی یک کله‌گاوی تاج مخروطی با توان اسمی ۲۳۰ کیلو نیوتن، و یک کله‌گاوی طبلکی با توان اسمی ۲۵۰ کیلو وات (Alpine Miner AM100) در شرایط مشابه زمین ساختی، انجام گرفته است.

www.itnar.ir

در شکل ۳-۲۶ عملکرد حفاری (cutting performance) کله‌گاوی تاج‌مخروطی و تاج‌طبلکی در سنگ‌های با مقاومت فشاری تک‌محوره مختلف نشان داده‌شده‌است. مشاهده می‌شود عملکرد حفاری کله‌گاوی تاج‌طبلکی بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از کله‌گاوی تاج مخروطی می‌باشد، که با افزایش مقاومت فشاری سنگ این اختلاف زیادتر می‌شود.

بنابراین به طور مثال برای مقاومت فشاری تک محوری ۸۰ مگاپاسکال، توان حفر کله‌گاوی تاج طبلکی ۲۳ متر مکعب بر ساعت و توان حفر کله‌گاوی تاج مخروطی ۱۲ متر مکعب بر ساعت بدست خواهد آمد که نسبت به یکدیگر حدود ۱۰۰٪ اختلاف دارند.



شکل ۳-۲۶- عملکرد حفاری در سنگ‌های با مقاومت فشاری مختلف

استهلاک سرمته: مقدار استهلاک سرمته یا مصرف ویژه سرمته (specific pick consumption) برحسب تعداد سرمته بر مترمکعب حفاری در دو نوع دستگاه مذکور، در منحنی‌های شکل ۳-۲۷ نشان داده‌شده‌است. این منحنی‌ها از روابط زیر پیروی می‌کنند:

$Cp = 0.76.F^{0.39}$ تاج حفار طبلکی

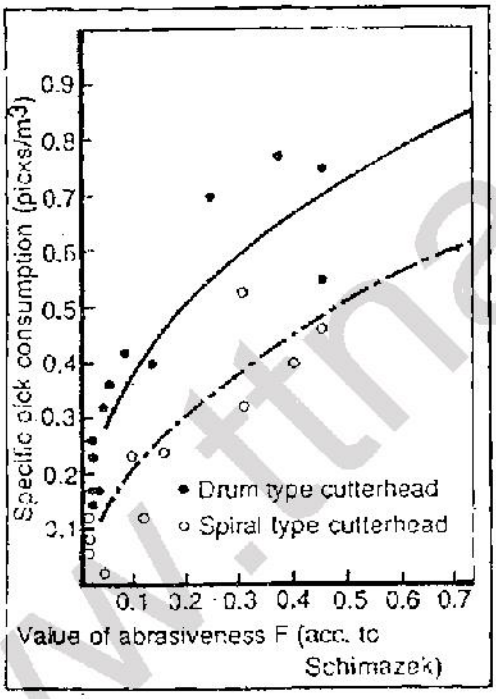
$Cp = 0.96.F^{0.56}$ تاج حفار مخروطی

F= مقدار سختی سایشی در مقیاس شیمازک (Schimazek)

www.tunar.ir

مقدار مصرف ویژه سرمته در کله‌گاوی‌های تاج طبلکی از تاج مخروطی بیشتر می‌باشد، بطوریکه برای F=0.4، مقدار مصرف ویژه سرمته تاج طبلکی ۵۰٪ بالاتر از تاج مخروطی است.

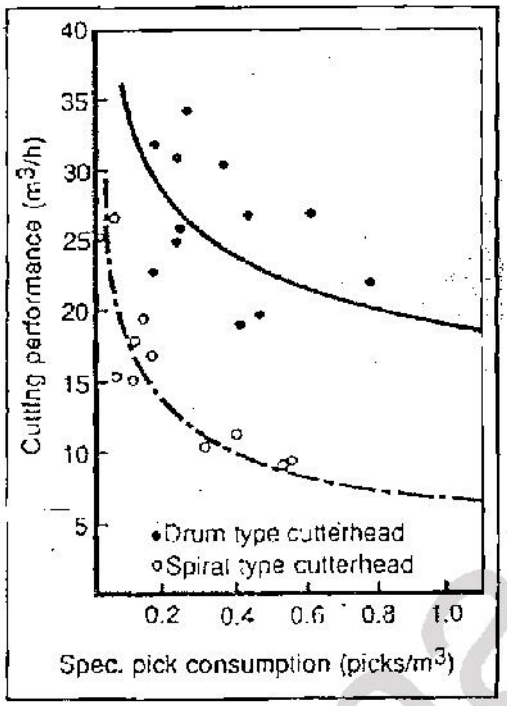
مصرف سرمته اصولا باید در ارتباط با عملکرد حفاری بررسی شود (شکل ۳-۲۸). همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود، برای یک مصرف ویژه معین، عملکرد کله‌گاوی تاج طبلکی بیش از دو برابر عملکرد کله‌گاوی تاج مخروطی می‌باشد.



شکل ۳-۲۷- مصرف ویژه سرمته برحسب مقدار سختی سایشی

در کله‌گاوی‌های دارای تاج طبلکی، جهت چرخش تاج به گونه ای است که درصد عمده سنگهای خرد شده توسط پاروهای جمع کننده دستگاه، به سهولت بارگیری می‌شوند. اما در کله‌گاوی‌های تاج مخروطی، به علت جهت چرخش تاج مقداری از سنگهای خرد در خارج از محدوده سینی جمع کننده مواد ریخته، و این امر لزوم بارگیری مجدد را اجتناب ناپذیر خواهد کرد.

www.ttnar.ir



شکل ۳-۲۸- عملکرد حفاری بر حسب مصرف ویژه سرمته

شکل دهی مقطع طولی تونل:

صاف بودن جداره تونل عامل مهمی‌در کیفیت و سهولت نصب وسایل نگهداری می‌باشد. اصولاً کله‌گاوی‌های تاج مخروطی، به علت شکل هندسی تاج حفار، در ایجاد یک سطح صاف در جداره تونل قابلیت بسیار بالایی دارند و اما نکته‌ای که در این مورد باید به آن توجه شود، نسبت ارتفاع تونل به طول بازوی کله‌گاوی تاج مخروطی است. اگر ارتفاع تونل نسبت به طول بازو از حد معینی بیشتر شود سطح سقف تونل به شکل مضرس خواهد شد. در کله‌گاوی های تاج طبلکی ایجاد یک سطح عاری از تضرس بسیار مشکل می‌باشد و حتی با استفاده از ماهرترین اپراتورها نیز حداقل ۱۰-۵ سانتیمتر تضرس در جداره تونل بوجود خواهد آمد.

تولید گرد و غبار:

یکی از مشکلات مهم کار با دستگاههای کله‌گاوی تولید گرد و غبار در حین کار می‌باشد. به طور کلی مقدار گرد و غبار حاصله به عوامل زیربستگی دارد :

- توان حفر دستگاه
- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی دستگاه
- شرایط زمین شناسی از قبیل رطوبت و لایه بندی
- شکل و محل سائیدگی بر روی سرمته‌ها

www.tt.ar.ir

ـ کارآیی سیستم آب پاش

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.

حفاری در سینه کارهای دارای لایه بندی:
تیپ شاخص این سینه کارها، سنگهای رسوبی می‌باشند. در چنین ساختارهایی لایه مختلف از نظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و ضخامت تنوع زیادی هستند. این لایه ها عموما چین خوردگی و گسلهایی نیز دارند. از طرفی حتی در سینه کاری با یک سنگ مشخص نیز احتمال تغییرات قابل توجه در مقاومت سنگها وجود دارد. در هر صورت چنین شرایطی می‌تواند برای کله‌گاوی‌ها مشکل‌آفرین، و باعث کاهش سرعت حفر، شود.

به علت شکل مخروطی تاج، بازوی کله‌گاوی‌های تاج مخروطی در همه قسمتهای سینه کار با انعطاف پذیری بسیار خوبی کار می‌کند. بنابراین با استفاده از برش لایه های نرم‌تر، سطح اتکای لایه‌های مقاومتر را از بین برده، و باعث سهولت در حفر بخشهای مقاوم می‌شود. اما قابلیت انعطاف در کله‌گاوی‌های تاج طبلکی به علت شکل تاج نسبتاً ضعیفتر و بنابراین در حفاری انتخابی سینه کار نیز کارایی کمتری دارد ولی در عین حال در هنگام برخورد با لایه های مقاوم، نسبت به کله‌گاوی‌های تاج مخروطی قابلیت بالاتری دارند.

شکل ۳-۲۹- نمونه آبفشان در کله‌گاوی‌ها

www.tnar.ir

۳-۳-۱۳ ابداع و توسعه تکنولوژی آبفشان در کله‌گاوی‌ها

استفاده از آبفشان در افزایش توان حفر کله‌گاوی‌ها در سنگهای سخت نقش بسیار موثری دارد. پاشیده شدن آب بر روی نوک ابزاربرش و سنگهای درگیر سبب کاهش گرد و غبار، افزایش قدرت حفر کله‌گاوی، کاهش استهلاک ابزاربرش و کاهش خطرات احتمالی آتش سوزی می‌شود. آبفشانها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد :

نسل اول، آبفشان کم فشار:

برای مدت ده سال پس از ابداع آبفشان این نوع از آبفشان ها در کله‌گوی‌های انگلیسی مورد استفاده قرار می‌گرفت. فشار آب در این نوع به حدود ۴۰ بار می‌رسید و بطور عمده سبب کاهش گرد و غبار و خنک کردن ابزاربرش و در نتیجه افزایش عمر آنها می‌شد

نسل اول آبفشانها تاثیر قابل توجهی در افزایش قدرت حفر کله‌گاوی‌ها نداشت. این آبفشانها آب را به جلوی ابزاربرش می‌پاشیدند و از این جهت در کنترل جرقه های پشت ابزاربرش و خطرات آتش سوزی (در سنگهای دارای گاز) ناتوان می‌نمود.

نسل دوم، آبفشان فشار متوسط:

در این نوع آبفشانها فشار آب بین ۲۰۰-۱۵۰ بار می‌باشد. شرکت‌های Vocst-Alpine در اتریش و Gmbh در آلمان، سیستمی‌را ابداع کرده‌اند که در آن آبفشان دارای یک شیر قطع و وصل بر سر مسیر آب می‌باشد که بر روی پایه ابزاربرش سوار، و هر گاه نوک ابزاربرش با سنگها برخورد می‌کند این شیر باز شده، و عمل پاشش اغاز می‌شود. به این ترتیب از خروج آب اضافی غیر از زمان درگیری ابزار برش با سنگ جلوگیری به عمل می‌آید. مقدار مصرف آب در این سیستم به ازاء هر ابزاربرش حدود ۶۰-۴۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد.

اگر چه نتایج آزمایشگاهی بسیار جالب توجه بود، اما عملکرد کارگاهی این سیستم انتظارات اولیه را برآورده نکرد. مهمترین مسئله قیمت تمام شده بسیار بالا بود. هر ابزاربرش دارای شیر ضربه‌ای قیمتی معادل ۲۹۵ دلار داشت بنابراین قیمت تاج حفار یک کله‌گاوی(Alpine Miner) AM100 با ۱۹۸ قطعه ابزاربرش آبفشان دار، معادل ۱۱۴۰۰۰ دلار می‌شد، بدون اینکه افزایش قابل توجهی در قدرت حفر کله‌گاوی بدست آمده باشد.

نسل سوم، آبفشان فشار قوی:

این نوع آبفشانها به منظور دسترسی به خصوصیات زیر ابداع شد :

۱ـ کاهش گرد و غبار و خطرات آتش سوزی (در توده های دارای گاز متان)

۲ـ کاهش استهلاک ابزاربرش

www.ttnar.ir

۳ـ افزایش قدرت حفر و سرعت پیشروی بدون نیاز به افزایش قدرت موتور تاج حفار
۴ـ افزایش توانایی دستگاه در حفر سنگهای سخت تر بدون نیاز به افزایش وزن دستگاه.
۵ـ کاهش هزینه استخراج هر متر مکعب سنگ ($/m^3$)

برای بررسی موارد فوق دو طرح مورد ارزیابی قرار گرفت، اولین طرح درآمریکا (Bruceton, Pennsylvania) با استفاده از یک کله‌گاوی تاج طبلکی ۱۰ تن، با قدرت موتور ۳۳ کیلووات انجام شد، که در آن آب فشار قوی از یک پمپ سه مرحله ای با دبی ۸۰ لیتر بر دقیقه و فشار ۷۰۰ بار تامین می‌شد. این آبفشان نرخ حفاری را تا ۲ برابر افزایش داده و باعث کاهش گرد و غبار تا ۷۰٪ و به میزان ۲ میلی‌گرم بر متر مکعب شد.

تحقیقات آزمایشگاهی که در آمریکا بر روی انواع سنگ و ذغال انجام شده حاکی از آنست که بهترین نتایج استفاده از ابفشان در فشارهای بین ۲۴۰۰-۷۰۰ بار حاصل می‌شود. همچنین این تحقیقات نشان‌می‌دهدکه با استفاده از جت آب در ابزاربرشی مخروطی می‌توان تا حدود ۶۰٪ از نیروی نرمال ابزاربرش کاست.

بر مبنای این آزمایشات می‌توان مقایسه ای بین یک کله‌گاوی ۷۰ تن (با قدرت موتور تاج ۲۰۰ کیلو وات) و یک کله‌گاوی ۲۸ تن با آبفشان فشار قوی (و قدرت موتور تاج ۹۰ کیلو وات) انجام داد. در این حالت کله‌گاوی آبفشان دار با وزن و قدرت موتور کمتر (و بالطبع با صرف هزینه سرمایه ای کمتر) دارای قدرت حفری برابر با کله‌گاوی ۷۰ تن می‌باشد. در حال حاضر یک کله‌گاوی ۷۰ تن با قیمتی در حدود ۸۰۰.۰۰۰ دلار دارد، در حالیکه یک کله‌گاوی ۲۸ تن با قیمتی در حدود ۳۸۰.۰۰۰ 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 گرفت در سنگهای آهکی (Middleton, Derbyshire) در انگلیس توسط یک کله‌گاوی تاج مخروطی Dosco MK2A (در رده کله‌گاوی‌های سبک) با قدرت موتور ۴۸/۵ کیلو وات، مجهز به یک آبفشان با فشار ۷۰۰ بار بود. تاج حفار این کله‌گاوی با ۹ آبفشان با دبی ۴ لیتر بر دقیقه برای هر افشانه، تجهیز شده بود. در شرایط معمول کله‌گاوی Dosco MK2A برای کار در سنگهایی با مقاومت کمتر از ۷۰ مگاپاسکال مناسب می‌باشد، اما با نصب این آبفشان کله‌گاوی قادر به حفر سنگهای آهکی با مقاومت ۱۳۷-۱۰۸ مگاپاسکال شد. ضمناً مقدار مصرف ابزاربرش نیز در حد متعارف بوده است. تاثیر مثبت نصب آبفشان مستقیماً در کاهش لرزش دستگاه (که تاثیر مستقیم بر تخریب قسمتهای مختلف دستگاه می‌گذرد) نیز مشاهده می‌شد.

www.tmar.ir

با توجه به بررسی های انجام شده بر روی کله‌گاوی های آبفشان دار (تا فشار ۷۰۰ بار) 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. گرد و غبار حاصله در فشار آب بین ۲۰ تا ۴۰ بار به شدت کاهش می‌یابد به طوری که در فشار ۹۰ بار تا حدود ۵۰٪ از گرد و غبار کاسته می‌شود. مقدار مصرف ابزار برش نیز بسیار کمتر می‌شود.

۳-۳-۱۴ تشریح عملکرد آبفشان

در چند دهه اخیر موسسات تحقیقاتی مختلف به منظور بررسی دقیق تاثیرات کاربرد آبفشان در حفر سنگ تستهای آزمایشگاهی و بعضاً کارگاهی فراوانی ترتیب داده اند در این آزمایشها تغییرات پارامترهایی نظیر نیروهای وارده بر ابزاربرش، 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. در این دستگاه حرکت خطی یک قطعه ابزاربرش سبب حفر (برش) سنگ و ایجاد شیار بر آن می‌شود و در همان حین پارامترهای مورد نظر اندازه گیری و ثبت می‌شوند.

ذیلا نتایج حاصل از اینگونه آزمایشات مورد بررسی قرار می‌گیرد :
بکار بردن آبفشان همراه با ابزاربرش دو تاثیر مهم به همراه دارد. اول آنکه سبب سهولت بیشتر شکست سنگ شده، و در نتیجه برای حفر یک سنگ مشخص نیروی کمتری به پشت ابزاربرش وارد شده و توان مصرفی نیز کاهش می‌یابد، بنابراین می‌توان با کم کردن سرعت خطی ابزار برش گامی‌در جهت کاهش حرارت اصطکاکی برداشته و به این ترتیب به عمر مفید ابزاربرش افزود. دومین تاثیر کاربرد آبفشان تاثیر خنک کنندگی سطح درگیر سنگ و ابزاربرش می‌باشد. بنابراین با خنک نگه داشتن دمای ابزاربرش کمک موثری در تقلیل استهلاک ابزاربرش می‌شود.

تاثیر آبفشان در تقلیل نیروی پشت ابزاربرش:
نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی سنگهای متوسط تا سخت نشانگر آنست که با کاربرد آبفشان با فشار حدود ۷۰ پاسکال، نیروی وارد بر پشت ابزاربرش به میزان قابل توجهی تقلیل می‌یابد. در تستهای آزمایشگاهی که بر روی نوریت (norite) که یک سنگ آذرین است انجام گرفته میزان نیروهای قائم و مماس نوک ابزاربرش در مقابل عمق فرو روی ابزاربرش به داخل سنگ اندازه گیری و ثبت شده است.

www.tunnel.ir

تاثیر آبفشان در تقلیل نیروی قائم بسیار بیشتر از نیروی مماسی می‌باشد. لازم به ذکر است که عامل اصلی ایجاد ترک و شکست در ابزاربرش نیز همان نیروهای قائم هستند. مشابه این آزمایش ازمایشهایی نیز توسط محققان دیگر انجام شده است. همگی این آزمایشات نشان از آن دارند که با کاربرد آبفشان نیروی وارد به پشت ابزاربرش حدود ۵۰٪ -۴۰٪ تقلیل یافته است. در حقیقت قطعات خرد شده و نیمه شکسته سنگ که در مقابل نوک الماسه ابزاربرش 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. با در نظر گرفتن مکانیزم شکست می‌توان تاثیر آبفشان در تقلیل نیروهای وارد بر ابزاربرش و افزایش راندمان حفر را با دلایل زیر توصیف نمود :

۱ـ شکست سنگ توسط ابزاربرش، با ایجاد ترکهای ریز اولیه آغاز می‌شود و به تدریج با افزایش فشار وارد از ابزاربرش این ترکها گسترش یافته و منجر به جدا شدن قطعات سنگها می‌شود. اما حضور آبفشان و نفوذ فشار آب درون ترکهای تولید شده سبب گسترش سریع این ترکها و همچنین جدا شدن آنها می‌شود. به این ترتیب سهمی از نیروی لازم برای شکست توسط فشار آب تامین میشود.

۲ـ پاکسازی قطعات خرد شده: باقی ماندن قطعات خرد شده سنگ در مقابل ابزاربرش 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 ابزار برش وارد شود. اما فشار آبی که توسط آبفشان به این قطعات وارد می‌شود سبب جابجایی آنها و در نتیجه سهولت در فرآیند حفاری می‌شود.

۳-۳-۱۵ شرکت‌های اصلی سازنده کله‌گاوی

از شرکت‌های متعددی که در ساخت دستگاه‌های کله‌گاوی فعالیت دارند شرکت‌های زیر را می‌توان نام برد:

- Voest Alpine
- Paurat
- Dosco
- Eickoff

مشخصات دستگاه های تولید شده توسط شرکت Eickoff به عنوان نمونه در جدول ۳-۹ ذکر شده‌است.

www.tunar.ir

جدول ۳-۹- مشخصات کله‌گاوی‌های تولیدی توسط شرکت Eickoff

type	performance	total performance instalated	weight	dimensions (approx. in mm)					
	kW	kW	tons	length	width	heigth	w	h	u
ET 100 series - the small versions with high power									
ET 120	132	220	34	8500	1900	1950	5500	4050	200
ET 170	132	220	35	9000	1900	2700	6100	4600	250
ET 180*	100	230	40	10000	2100	1950	6500	5100	600
ET 200 series - for heavy duty applications in mining and construction									
ET 210	200	350	57	10200	2800	2400	7100	4700	185
ET 250	200	350	64	10500	2800	3200	7500	5500	65
ET 300 series - specifically designed for advanced crown headings									
ET 380*	200	380	100	17300	3400	4100	9800	7450	1000
ET 400 series - for cavern excavation and large cross sections in tunnelling and mineral mining									
ET 410	300	470	105	16000	3400	3400	10000	5500	250
ET 450	300	490	110	16000	3400	3900	10300	7300	250
ET 480*	300	490	120	16600	3600	3600	11000	7900	250

* telescopic cutting boom

www.tinar.ir

۴ – تهویه، آبکشی و تخلیه تونل‌ها

۴-۱ تهویه تونل‌ها

تهویه تونل‌ها را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود:

تهویه در مرحله اجرا

تهویه در مرحله بهره‌برداری

با توجه به موضوع گزارش، در این گزارش فقط تهویه تونل‌ها در مرحله اجرا مورد بررسی قرار می‌گیرد. کلیات تهویه در مرحله بهره‌برداری نظیر تهویه در مرحله اجرا می‌باشد. در تونل‌های راه، هدف اصلی از تهویه، کنترل میزان آلاینده‌های خروجی از اگزوز وسایل نقلیه هنگام بهره برداری عادی و کنترل دود و گازهای گرم در مواقع اضطراری آتش‌سوزی است. در مورد تونل‌های راه‌آهن، هدف اصلی از تهویه در هنگام بهره‌برداری، کاهش آلودگی و حرارت ناشی از احتراق موتورهای دیزلی لوکوموتیو می‌باشد .

تهویه تونل‌ها یا از طریق دمیدن هوا (سیستم دهشی) یا مکش هوا (سیستم مکشی) از طریق یک داکت می‌تواند صورت پذیرد. در سیستم دهشی، هوای تازه خارج تونل از طریق خط تهویه به نزدیک سینه کار تونل هدایت می‌شود. این امر باعث می‌شود که هوای آلوده، کل طول مسیر تونل را طی کند تا به خروجی تونل برسد. مزیت این سیستم این است که هوای تازه بطور پیوسته به سینه کار که اکثر کارها در آنجا متمرکز است هدایت می‌شود. اما عیب این روش آن است که بقیه طول تونل در معرض هوای آلوده که در سینه کاری تولید شده است قرار گیرد.

در سیستم مکشی، هوای آلوده از طریق خط تهویه مکیده و خارج می‌شود و هوای تازه در ورودی تونل (پرتال) یا شافت وارد شده و طول تونل را می‌پیماید تا به سینه کار برسد. اگرچه این سیستم محیط بهتری را در طول تونل ایجاد می‌کند ولی باعث می‌شود که هر گونه حرارت، رطوبت، گرد و غبار و دود موجود در طول تونل به نزدیک سینه کار منتقل شود.

سیستم مکشی معمولا برای حفاری با TBM در سنگ ترجیح داده می‌شود زیرا گرد و غبار تولید شده که از طریق گردگیر (dust collector) گرفته نشده‌است مجبور به طی کل طول مسیر تونل برای خارج شدن نخواهد داشت. در صورت حفاری تونل به روش چالزنی و انفجار، سیستم تهویه می‌تواند بعد از آتشباری بمدت ۱۵ الی ۳۰ دقیقه بصورت مکشی انجام شود تا قسمت عمده دود و گرد و غبار گرفته شود و سپس به سیستم دهشی تغییر وضعیت پیدا کند .

مقررات مربوط به تهویه تونل‌ها معمولا در آیین‌نامه‌های بهداشت و ایمنی مربوط به هر پروژه خاص مشخص می‌شود. بطور معمول یک سرعت حداقل ۱۵ متر در دقیقه در تونل و حداقل حجم ۵/۷

مترمکعب در دقیقه هوای تازه به ازای هر کارگر داخل تونل در نظر گرفته می‌شود. در صورت استفاده از ماشین‌آلات دیزلی، به ازای هر اسب بخار (brake horse power)، ۲/۸ مترمکعب در دقیقه هوای تازه مورد نیاز می‌باشد. معمولا وقتی چند دستگاه با هم کار می‌کنند تمام آنها بطور همزمان از حداکثر توان خود استفاده نمی‌کنند، بنابر این می‌توان این موضوع را در برآورد هوای لازم بنحوی لحاظ کرد. بعضی آیین‌نامه‌ها بر اساس میزان مواد آلاینده موجود در تونل، هوای تازه مورد نیاز را تعیین می‌کنند. خصوصیات گازهای مختلف و تاثیر فیزیولوژیکی آنها بر روی افراد شاغل در تونل در جدول ۴-۱ ذکر شده‌است.

طبق آیین‌نامه‌های اخیر بهداشت و ایمنی مقدار گرد و غبار در تونل باید در سطح پایینی نگه‌داشته‌شود. چالزنی توام با استفاده از آب (wet drilling) و پاشیدن آب به مواد حفاری شده پس از آتشباری الزامی می‌باشد. در مورد TBM گرد و غبار تا حد زیادی توسط سپر گرد و غبار (dust shield) به سینه کاری محدود می‌شود که از آنجا به گردگیر (dust collector) منتقل می‌گردد.

www.ttnar.ir

جدول ۴-۱- خصوصیات بعضی گازهایی که ممکن است در تونل موجود باشد

گاز	چگالی*	رنگ	بو	منبع	آثار فیزیولوژیکی بر روی کارکنان
اکسیژن(O_2)	۱.۱۱	بی رنگ	بی بو	هوا معمولا ۲۰.۹۳ ٪ O_2 دارد	برای نگه داشتن سلامتی نرمال حداقل ۲۰ درصد لازم است اگر تراکم اکسیژن به ۱۵ در صد برسد کارکنان دچار سرگیجه می شوند. برخی افراد ممکن است در ۱۲.۵ درصد بیفتند.بسیاری از کارکنان در ۹ درصد دچار ضعف می شوند. مرگ در ۶ درصد و زیر آن رخ می دهد.
نیتروژن(N_2)	۰.۹۷	زرد	بی بو	هوا معمولا ۷۸.۱۰ ٪ N_2 دارد	نیتروژن جز رقیق کردن و کاهش O2 اثر دیگری ندارد .
دی اکسید کربن (CO_2)	۱.۵۰	بی رنگ	بی بو	هوا معمولا ۰.۰۳ ٪ CO_2 دارد. این گاز از فساد الوار، اتش و گازهای ناشی از احتراق دیزل ایجاد می‌شود.	CO_2 به عنوان محرک دستگاه تنفسی است و ممکن است اثر سایر آلوده کننده ها را افزایش دهد.در ۵ درصد CO_2 تنفس دشوار می گردد. تراکم ۱۰ درصدی آن تنها برای چند دقیقه قابل تحمل است.
مونوکسید کربن(CO)	۰.۹۷	بی رنگ	بی بو	در گاز خروجی از احتراق گازوئیل و گازهای حاصل از انفجار دیده می شود	CO راحت تر از اکسیژن به خون جذب می شود . در آن واحد تراکم ناچیز آن نیز به مسمومیت منجر می گردد.تراکم کمی کمتر از ۰.۰۱ ٪ می تواند به سردرد و حالت تهوع منجر شود.تراکم بالاتر از ۰.۲ ٪ مهلک خواهد بود.
متان (CH_4)	۰.۵۵	بی رنگ	بی بو	در سنگ های مشخصی که دارای مواد کربناته هستند دیده می شود	به جز رقیق کردن O_2 اثر دیگری ندارد . خطرآن به دلیل خصیت انفجاری آن می باشد . در تراکم ۵.۵ تا ۱۴.۸ ٪ متان دارای خاصیت انفجاری می باشد . در تراکم ۹.۵ ٪ بیشترین انفجار ممکن را دارد.
سولفید هیدروژن (H_2S)	۱.۱۹	بی رنگ	تخم مرغ گندیده	در برخی تشکیلات سنگی وجود دارد. بعضا در گازهای حاصل از انفجار هم موجود است	به شدت سمی- ۰.۰۶ ٪ متی در دقایقی اندک مشکلاتی اساسی ایجاد می کند.
اکسید گوگرد (SO_2)	۲.۲۶	بی رنگ	گوگرد سوخته	در گاز خروجی از احتراق گازوئیل و گازهای حاصل از انفجار دیده می شود	در تراکم های کم به سوزش شدید اعضای مخاطی منجر می گردد.می توان با محدود کردن گوگرد سوخت (fuel) به ۰.۵ ٪ در زیر حد مشخص نگه داشت .
اکسیدهای نیتروژن	حدود ۱.۵	زرد-قهوه‌ای	بینی را می‌سوزاند	در گاز خروجی از احتراق گازوئیل و گازهای حاصل از انفجار دیده می شود	NO بسیار سمی می باشد . تمام اکسید های نیتروژن در تراکم بالا می توانند به اثرهای سوزشی شدید در دستگاه تنفسی منجر شوند. اثرهای حاد ممکن است در چند روز تا چند هفته بدلیل آسیب ریه‌ها به مرگ منجر گردد

*نسبت وزن واحد حجم گاز به وزن واحد حجم هوا

www.tunar.ir

امکان مواجه شدن با گازهای سمی یا قابل انفجار همواره باید در حفاری تونل‌ها مد نظر باشد. در صورت محتمل بودن چنین مسئله‌ای تدابیر ویژه‌ای را باید بکار گرفت که از جمله استفاده از وسایل برقی خاص و یا تهویه بیشتر می‌باشد. همچنین در چنین شرایطی باید با استفاده از ابزار اندازه‌گیری میزان گازهای سمی یا قابل انفجار شرایط تونل را دائما مورد پایش قرار داد. باید به خصوصیات فیزیکی انواع گازها نیز توجه لازم بعمل آید، زیرا بعضی گازها در قسمت‌های پایین و بعضی در قسمت‌های فرقانی تونل تجمع پیدا می‌کنند.

دو متغیر مهم که طراحی یک سیستم تهویه با ظرفیت مشخص را تحت تاثیر قرار می‌دهد عبارتند از قطر لوله تهویه و توان مورد نیاز. هر قدر قطر لوله زیادتر باشد توان کمتری مورد نیاز خواهد بود. لیکن لوله با قطر بیشتر مستلزم هزینه بیشتری بوده و همچنین در هر تونلی برای تعبیه لوله تهویه مقدار محدودی فضا را می‌توان اختصاص داد. اصولا باید ترکیبات مختلفی از قطر و توان را بررسی و از میان آنها ترکیب مناسب را انتخاب نمود که در این مورد هم باید هزینه‌های اولیه و هم هزینه‌های تعمیر و نگهداری را مد نظر قرار داد.

۴-۱-۱ مراحل انتخاب سیستم تهویه

مراحل طراحی سیستم تهویه تونلها در مرحله حفاری را می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

انتخاب روش تهویه
محاسبه مقدار هوای لازم
محاسبه نشت هوا
محاسبه افت فشار در طول لوله
انتخاب بادبزن یا بادبزنها

۴-۱-۲ محاسبه مقدار هوای لازم

شدت جریان هوای لازم برای تهویه سینه کار تونل بر اساس موارد زیر به طور جداگانه محاسبه می‌شود:

الف- حداکثر تعداد نفرات
ب- هوای لازم برای برطرف کردن آلودگیهای حاصل از ماشین آلاتی که در تونل کار می‌کنند.
ج – هوای لازم برای رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری
د – هوای لازم برای برطرف کردن گرد و غبار
ه – هوای لازم بر اساس حداقل سرعت هوا

پس از محاسبه شدت جریان هوای لازم برای موارد مختلف، بزرگترین آنها برای تهویه سینه کار انتخاب می‌شود. تصحیحات مختلف برای ضریب اطمینان و میزان نشت نیز اعمال می‌شود (مدنی، ۱۳۷۸).

www.tnar.ir

۴-۱-۳ انتخاب لوله تهویه

برای تهویه جبهه کار تونل، لوله تهویه تا حوالی جبهه کار نصب شده و بسته به سیستم تهویه، هوا به طرف جبهه کار دمیده و یا از آن محل مکیده می‌شود. بدیهی است هرقدر قطر لوله بیشتر باشد، قیمت آن زیادتر است و فضای بیشتری را اشغال می‌کند. از سوی دیگر، هر قدر قطر لوله بیشتر باشد، افت فشار در طول لوله و بنابراین فشار لازم برای به جریان انداختن هوا، کمتر است. میزان نشت هوا نیز تابع جنس لوله و اتصالات است. بدین ترتیب، در هر مورد باید لوله های مختلف را از نظر هزینه خرید و مصرف انرژی و نوع بادبزن مقایسه کرد و مناسب ترین را برگزید.

۴-۱-۴ محاسبه نشت هوا

لوله تهویه معمولاً از ورقهای فلزی و یا قطعات پارچه ساخته می‌شود و هر قدر هم که در ساخت این لوله‌ها دقت شود، مقداری هوا از میان درزهای لوله به خارج نشت خواهد کرد. محل اتصال قطعات مختلف لوله تهویه نیز از جمله نقاط ضعف آن است و به مقدار قابل توجهی هوا را هدر می‌دهد. در حالت کلی میزان نشت هوا به عواملی نظیر نوع اتصالات، قطر و یا به عبارت دیگر محیط لوله، طول هریک از قطعات لوله و اختلاف فشار هوا بین داخل و خارج لوله بستگی دارد.

با توجه به مطالب یاد شده، ابتدا میزان نشت هوا در لوله را با توجه به مشخصات آن حساب می‌کنند و از جمع آن با شدت جریان لازم برای تهویه جبهه کار، شدت جریانی را که بایستی از ابتدای لوله عبور کند (یا به وسیله بادبزن تولید شود) به دست می‌آورند.

۴-۱-۵ محاسبه افت در لوله های تهویه

پس از انتخاب نوع لوله تهویه و تعیین شدت جریان هوایی که باید از آن عبور کند، افت فشار بین دو سر آن را محاسبه می‌کنند تا به کمک آن، بادبزن مناسب انتخاب شود. افت کلی از مجموع افت اصطکاک و افت در نقاط اتصالات تشکیل می‌شود که در هر مورد آنها را باید بطور جداگانه محاسبه کرد.

۴-۱-۶ انتخاب بادبزن

پس از تعیین شدت جریان و فشاری که باید به وسیله بادبزن تامین شود، با توجه به ضرایب اطمینان لازم، آنها را تعدیل می‌کنند. اگر Q و P مقادیر نهایی شدت جریان و فشار باشد، با مراجعه به منحنی مشخصه بادبزنهای مختلف، بادبزنی انتخاب می‌شود که نقطه با مختصات P و Q در منحنی مشخصه آن واقع باشد.

www.tnar.ir

کارخانه های سازنده بادبزن، نمودارهایی را تهیه کرده اند که به کمک آنها، به آسانی می‌توان بادبزن مناسب را انتخاب کرد. در این نمودارها، با **انتقال** مختصات P و Q مورد نظر، مدل ونوع بادبزن مناسب انتخاب می‌شود.

۴-۱-۷ محاسبه توان لازم

اگر P فشار کلی بادبزن و Q شدت جریان آن باشد، توان بادبزن از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$N = \frac{PQ}{\eta_1 \eta_2}$$

که در آن η_1 و η_2 به ترتیب راندمان بادبزن و راندمان موتور الکتریکی آن است. اگر P بر حسب پاسکال و Q برحسب متر مکعب در ثانیه بیان شود، N برحسب وات به دست می‌آید.

۴-۱-۸ لوله های تهویه

لوله تهویه باید به گونه ای ساخته شود که افت فشار در آن حداقل باشد و در ضمن از موادی ساخته شود که غیر قابل سوختن باشد و یا لااقل شعله را منتقل نکند. مهمترین انواع لوله های تهویه به شرح زیر است:

لوله های تخته ای:

این لوله ها معمولاً با تخته سه لایی ساخته می‌شود. مقطع لوله ها ابتدا مربع بود ولی امروزه با مقطع دایره ای ساخته می‌شوند. از این لوله ها معمولاً در مواردی که لوله های فلزی زود خورده می‌شوند استفاده می‌کنند. برای اینکه در مواقع آتش سوزی، آتش به وسیله این لوله ها منتقل نشود، در فاصله های معینی یک تک لوله را که با مواد مخصوص ساخته شده است، در لوله کشی به کار می‌برند تا در مواقع آتش سوزی،درز طرفین لوله مزبور ذوب شده و با افتادن این قطعه، ارتباط لوله ها با قسمتی که در آن حریق واقع شده است قطع شود. قطعات لوله های تخته ای را با استفاده از واشر و پیچ ومهره به یکدیگر وصل می‌کنند.

لوله های فلزی:

لوله های فلزی را از ورق‌های آهن سفید به ضخامت ۱ تا ۳ میلیمتر می‌سازند. انتخاب ضخامت ورق به قطر لوله تهویه بستگی دارد. برای تهیه لوله های فلزی، ابتدا ورق مورد نظر را انتخاب می‌کنند و سپس با استفاده از نوردهای دستی و یا به کمک چکش، آنها را به شکل لوله در می‌آورند. درز لوله به وسیله جوش و یا به کمک پرچ محکم می‌شود. لوله های فلزی به قطر ۲۰ تا ۸۰ سانتیمتر ساخته می‌شوند.

لوله های پارچه ای:

لوله های پارچه ای را از پارچه های مختلف مثل پارچه های پنبه ای، برزنت و الیاف مصنوعی می‌دوزند. طول این لوله ها ۱۰ تا ۳۰ متر و قطرشان از ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتر تغییر می‌کند. این لوله ها در مقایسه با انواع فلزی به مراتب سبکترند و نصب آنها به سادگی انجام می‌گیرد. در مقابل این امتیازات، می‌توان

www.ttnar.ir

مقاومت مکانیکی کم آنها را به عنوان عیب ذکر کرد. علاوه بر این، از این لوله ها تنها در تهویه دهشی میتوان استفاده کرد. البته اگر لوله ها بوسیله مفتول فلزی تقویت شوند، می‌توان از آنها در تهویه مکشی نیز استفاده کرد. در ایران غالباً از لوله های برزنتی برای این منظور استفاده می‌کنند. برای وصل قطعات لوله‌های پارچه‌ای، در انتهای هر قطعه یک حلقه فلزی نصب می‌کنند که حالت فنری دارد و به سهولت داخل حلقه لوله دیگر قرار می‌گیرد.

لوله های پلاستیکی:

لوله های پارچه ای که در داخل به وسیله P.V.C و در خارج به وسیله پی وی سی کلریتی شده (Chlorinated PVC) اندود شده اند، وسیله مناسب دیگری برای تهویه جبهه کارند. قطعه های این لوله ها را به طریقی می‌سازند که به سهولت داخل یکدیگر قرار گیرند و بدین ترتیب اتصال آنها ساده است.

۴-۱-۹ نصب لوله های تهویه

با توجه به قطر نسبتا زیاد لوله های تهویه، نصب آنها در محلهای مناسب باعث صرفه جویی در فضای مفید تونل می‌شود.لوله های فلزی را معمولا به وسیله مفتولهای فلزی یا وسایل دیگر نگهداری نصب میکنند. لوله های پارچه ای معمولا به فاصله هر چند متر حلقه های مخصوصی دارند که به کمک آنها میتوان به سهولت لوله را به میخهایی که در تونل نصب می‌شود آویزان کرد. از آنجا که ضمن حرکت هوا در لوله های تهویه، به خصوص لوله های پارچه ای، مقداری الکتریسیته ساکن تولید می‌شود که ممکن است جرقه تولید کند، لذا در فواصل مناسب بایستی این لوله ها را به ریل یا وسایل فلزی دیگر موجود در تونل وصل کرد تا الکتریسیته آنها به زمین تخلیه شود.

۴-۱-۱۰ بادبزنها

بادبزنهایی را که برای تهویه جبهه کار تونلها به کار می‌روند از نقطه نظر نیروی محرکه به دو دسته بادبزنهای با موتور هوای فشرده و بادبزنهای با موتور برقی تقسیم می‌کنند. هریک از این دو دسته خود ممکن است از نوع محوری یا شعاعی باشد.

بادبزنهای با موتور هوای فشرده

این بادبزنها از جمله متداولترین بادبزنها در تونلهای معادن زغال سنگ هستند. گر چه موتور هوای فشرده سروصدای زیادی دارد و راندمان آن چندان بالانیست ولی به خاطر ایمنی بیشتر، از نوع برقی متداولتر است. بادبزن با موتور هوای فشرده را معمولاً از نوع محوری می‌سازند. نیروی محرکه این بادبزنها به وسیله یک توربین هوای فشرده تامین می‌شود.

بادبزنهای با موتور برقی

استفاده از این بادبزنها راندمان بهتری دارد. بادبزن برقی نیز در دو نوع شعاعی و محوری ساخته می‌شود که نوع محوری آن مناسب تر است و به تدریج جای بادبزن شعاعی را که دارای ابعاد بزرگ و وزن زیاد

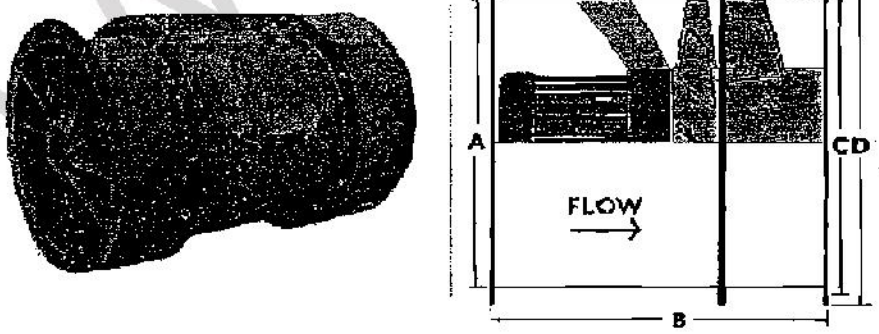
است می‌گیرد. بادبزنهای برقی را طوری می‌سازند که موتور و چرخ گردنده آن مشترکاً در پوشش واحدی قرار می‌گیرد و این امر باعث سهولت حمل و نقل آنها می‌شود (مدنی، ۱۳۷۸).

برای برخی شرایط طبق مقررات OSHA سیستم تهویه باید دو طرفه (reversible) باشد. جریان هوا در بادبزن‌های با جریان محوری را می‌توان با نصب سویچ برعکس کننده، براحتی برعکس نمود. برای تونل‌های طویل، معمولا از بادبزن‌های با جریان محوری استفاده می‌شود که همراه با پیشرفت حفاری تونل بادبزن‌های دیگر نیز در خط لوله‌تهویه نصب می‌شود. این سیستم می‌تواند هم بصورت دهشی و هم بصورت مکشی مورد استفاده قرار گیرد (Bickel et al., 1996).

در جدول ۴-۲ مشخصات بعضی از بادبزنهای برقی روسی متداول در ایران درج شده است. در شکل ۴-۱ یک نمونه بادبزن محوری و در جدول ۴-۳ ابعاد مربوط به آن داده شده است.

جدول ۴-۲- مشخصات بعضی از بادبزنهای برقی روسی متداول در ایران

نوع بادبزن / مشخصات فنی	Ka-400	Ka-500	Ka-600	BM-200	BM-300	BMII 2-200	BMII 5-240
قطر استوانه گردنده (mm)	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۵۳۰	۶۷۰
حداکثر راندمان (%)	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۶
قدرت موتور (kW)	۳/۸	۱۱	۳۰	۶/۳	۲۴	۷/۶	۲۰/۴
وزن (kg)	۱۴۰	۲۶۵	۴۷۰	۲۰۰	۳۱۵	۱۹۰	۲۴۷



شکل ۴-۱- نمونه یک بادبزن محوری ساخت شرکت SMJ

جدول ۴-۳- شماره وابعاد مربوط به بادبزن‌های محوری
نشان داده شده در شکل ۴-۱

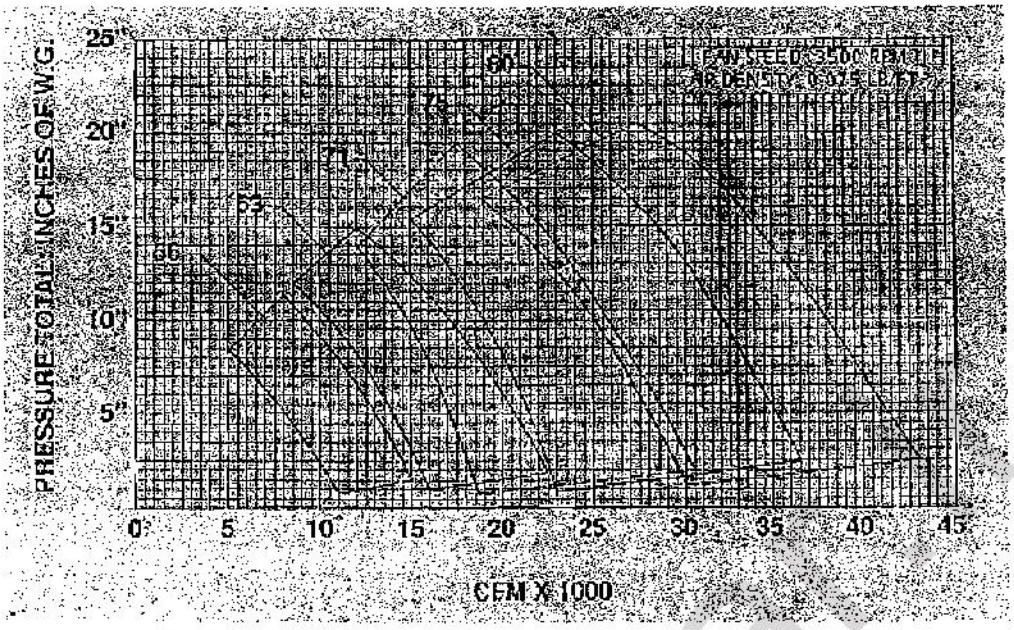
FAN SIZE	A	B	D	HP	RPM
56	22" (56cm)	44" (112cm)	27.5" (70cm)	25 - 40	3500
63	25" (63cm)	47" (119cm)	30.5" (77cm)	25 - 40	3500
71	28" (71cm)	50" (127cm)	33.5" (85cm)	40 - 75	3500
75	30" (75cm)	50" (127cm)	35.5" (90cm)	50 - 100	3500
80	31.5" (80cm)	50" (127cm)	37" (94cm)	50 - 100	3500

۴-۱-۱۱ منحنی مشخصه بادبزنها

یکی از مهمترین خصوصیات تهویه جبهه کار تونلها این است که بادبزن بایستی مقدار هوای لازم را در لوله ای که طول آن در حال تغییر است، به جریان اندازد. این بادبزنها باید به گونه ای ساخته شوند که این امر در راندمان آنها چندان تاثیری نداشته باشد. بدیهی است نقطه عملکرد، محل تلاقی منحنی‌های مشخصه بادبزن و لوله تهویه است. بدین ترتیب هر قدر شاخه منحنی مشخصه به حالت قائم نزدیکتر باشد، وضعیت بادبزن مناسبتر است.

در شکل ۴-۲ منحنی‌های مشخصه بادبزن‌های نشان داده شده در شکل ۴-۱ به عنوان نمونه نشان داده شده است.

www.tunar.ir



شکل ۴-۲- منحنی‌های مشخصه بادبزن‌های نشان داده شده در شکل ۴-۱

۴-۱-۱۲ استفاده از چندین بادبزن

از آنجا که طول لوله تهویه با ازدیاد طول تونل افزایش می‌یابد، در اینصورت اگر مشخصات بادبزن ثابت بماند، شدت جریان ناشی از آن به مرور کم و هوارسانی مشکل می‌شود.

برای اینکه در تمام مراحل هوای کافی به وسیله بادبزن به جریان افتد، روشهای ذیل را می‌توان به کار برد:

الف – از ابتدای کار، یک بادبزن قوی در نظر گرفته شود به طوری که در آخرین مراحل کار نیز قادر باشد حجم مورد نظر از هوا را به جریان اندازد. عیب این روش آن است که در ابتدای کار که طول لوله تهویه و در نتیجه مقاومت آن کم است، شدت جریان و سرعت هوا زیاد است و تولید گرد و غبار خواهد کرد. همچنین مقداری انرژی در این روش بیهوده تلف می‌شود.

ب – ممکن است بادبزنی را به کار برند که زاویه تمایل پره های آن، و در نتیجه شدت جریانش، قبل تنظیم باشد. عیب این روش آن است که نوع بادبزن قابل تنظیم با قدرتهای کوچک خیلی گران است.

ج – در این روش ابتدا یک بادبزن کوچک و سپس در مراحل مختلف بادبزنهائی با قدرتهای متفاوت نصب میکنند. این امر مستلزم داشتن بادبزنهایی با قدرتهای مختلف است که می‌توان از نقاط ضعف این روش دانست.

د- در این طریقه، که متداولترین روشهاست، ابتدا از یک بادبزن استفاده کرده و در مراحل بعد توام با افزایش طول لوله، از دو یا چند بادبزن به حالت سری یا موازی استفاده می‌کنند. برای بالا بردن فشار هوا می‌توان دو یا چند بادبزن را بطور سری بهم متصل نمود و برای افزایش دبی هوا باید بادبزن‌ها را بصورت موازی بهم متصل کرد.

۴-۲ آبکشی تونل‌ها

مقدار مشخصی از آب ورودی به تونل، در صورت حفاری در جهت سربالایی بطور ثقلی قابل تخلیه است. این آب از طریق نهری که در یک طرف تونل قرار دارد به بیرون هدایت می‌شود. در مورد تونل‌هایی که با دستگاه TBM حفاری می‌شود آب از قسمت گودی کف (invert) تونل می‌تواند به بیرون هدایت شود. در صورتی که مقدار آب ورودی به تونل زیاد باشد یا در صورتی که تونل در جهت سرازیری حفر شود نیاز به پمپاژ برای تخلیه آب خواهد بود. در این موارد آب در گودال‌هایی (sumps) که در فواصل ضروری از همدیگر قرار گرفته‌اند جمع‌آوری شده و بوسیله پمپ‌های کف‌کش به بیرون از تونل پمپ می‌شود.

آب در گودی‌های موجود در سینه کار جمع شده و توسط پمپ کف‌کش قابل حمل الکتریکی و یا بادی به اولین گودال ایجاد شده دائم منتقل می‌شود. لوله تخلیه آب معمولا از دیواره تونل آویزان می‌شود.

از آنجائیکه مقدار آب نشتی به تونل قابل پیش‌بینی دقیق نبوده و نظر به اینکه مقدار آب در طی زمان معمولا کم می‌شود، سیستم آبکشی باید دارای حداکثر انعطاف‌پذیری باشد. پمپ‌های اصلی باید مجهز به کلیدهای اتوماتیک شناور باشند. مشخصات پمپ‌های مورد استفاده باید با محدوده وسیعی از فشارها و دبی‌ها قابل انطباق باشد.

آبی که از داخل تونل به بیرون از آن تخلیه می‌شود باید طبق مقررات زیست‌محیطی دفع شود. در بعضی موارد ممکن است نیاز به استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی یا سایر اشکال تصفیه آب باشد.

۴-۳ جابه جایی مواد و تجهیزات اجرایی

هر پروژه تونل سازی به یک سیستم حمل و نقل اصلی برای جابجایی پرسنل و مواد به داخل وخارج تونل نیاز دارد. این سیستم معمولا جهت حمل مواد حفاری از سینه کار به بیرون از تونل نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

www.tnar.ir

دو نوع حمل و نقل اصلی برای تونل‌سازی وجود دارد. یکی استفاده از خط آهن و انواع واگن‌ها و دیگری استفاده از راه (roadbed) و وسایل نقلیه چرخ لاستیکی .

۴-۳-۱ خط آهن

از نقطه نظر مصرف انرژی، خط آهن کار آمدترین شیوه حمل مواد را درتونل تامین می‌کند.

مزایا:

۱- سهولت تعمیر و نگهداری
۲- حداقل نیاز به تهویه
۳- سازگاری با اکثر روش‌های حفاری و بارگیری
۴- قابلیت هماهنگی با تقریبا تمام تونل‌ها با ابعاد مختلف
۵- توانایی استفاده ازچندین منبع انرژی
۶- سیستم هدایت ثابت استفاده از حد آزاد (clearance) کوچکتری را امکان‌پذیر می‌سازد
۷- هیچ محدودیتی در ارتباط با طول تونل وجود ندارد.

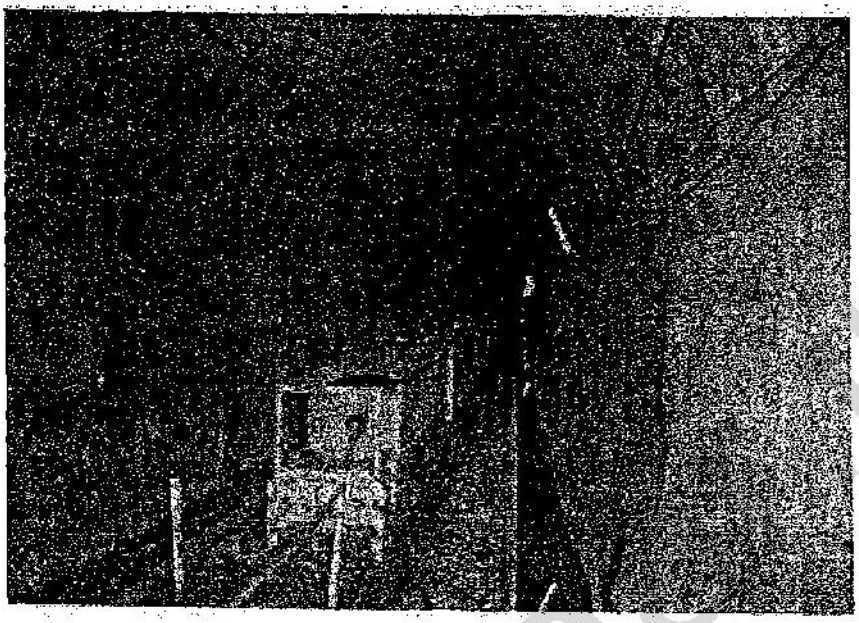
معایب:

۱- نیاز به توسعه مداوم در نزدیکی سینه کار دارد.
۲- محل عبور ثابت بوده و یا فقط نیمه متحرک (semimovable) می‌باشد.
۳- در صورت از خط خارج شدن واگن‌ها یا دیگر حوادث، تمام سیستم از کار می‌افتد.
۴- مراکز تخلیه بار کمابیش ثابت هستند.
۵- این سیستم امکان فعالیت در کف تونل را محدود می‌کند.

محدودیت‌ها:

۱- شیب ۳٪ یک محدویت عملی برای ریل محسوب می‌شود، هر چند شیب تا ۶٪ هم در شرایط خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شیب‌های تندتر نیاز به استفاده از تجهیزات خاصی مثل کابل‌ها (cables) و بالابرها (hoists) دارد. تمهیدات ایمنی جهت جلوگیری از حوادث برای شیب‌های بیش از ۱٪ باید در نظر گرفته شوند.
۲- با استانداردهای فعلی اجرا و نگهداری، سرعت به حدود 15mph (24km/h) محدود می‌شود. با اعمال شرایط بهتر در ساخت ریل و زیرسازی، سرعت‌های بالاتر نیز امکان‌پذیر است.

www.ttnar.ir



شکل ۴-۳- سیستم ریلی مورد استفاده در تونل گاوشان

شکل ۴-۴- تخلیه مواد حفاری شده توسط TBM به Tipping Ramp – تونل گاوشان

نیروی محرکه

واگن‌های روی ریل به وسیله لوکوموتیوهایی که دارای موتورهای از نوع احتراق داخلی و یا موتورهای برقی هستند حرکت می‌کنند. هوای فشرده تنها برای کارهای سبک و فواصل کوتاه مناسب است. به دلایل ایمنی و زیست محیطی تنها سوخت دیزلی قابل استفاده در کارهای زیرزمینی می‌باشد. لوکوموتیوهای دیزلی بیشترین انعطاف پذیری را دارند از این نظر که می‌توانند محدوده قدرت زیادی داشته و نیازی به منابع انرژی خارجی نداشته باشند. بزرگ‌ترین عیب این سیستم‌ها گازهای سمی منتشر شده می‌باشد. این امر ظرفیت بالاتر تهویه را طلب می‌کند و در تونل‌های بزرگ می‌تواند به عنوان یک مشکل اساسی مطرح گردد.

قوانین زیست محیطی بر لزوم فرآوری شدن گازهای خروجی از موتورهای دیزلی قبل از ورود به فضای تونل تاکید دارند. هدف اصلی کاهش میزان مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن و رساندن آنها به حدی ست که قابل رقیق شدن توسط سیستم تهویه تونل باشند. بدین منظور از فیلترهای (scrubber) از نوع کاتالیتیک (catalytic) یا از نوع واشر (wsaher) استفاده می‌شود. مدل کاتالیتیک به نگهداری و تعمیرات کمتری نیاز دارد اما برخی آژانس‌های ایمنی این مدل را دارای مقاومت کمتر در برابر آتش و دارای اطمینان کمتری تلقی می‌کنند.

لوکوموتیوهای برقی می‌توانند با باتری‌های قابل شارژ یا با برق بالاسری (overhead trolley conductor) کار کنند. لوکوموتیوهایی که با باتری کار می‌کنند قابلیت‌هائی مشابه لوکوموتیوهای دیزلی دارند با این مزیت که گازهای سمی متصاعد نمی‌کنند. هر چند محدوده فعالیت آنها محدود به مقدار انرژی قابل ذخیره شدن در باتری می‌شود. این لوکوموتیو ها به باتری‌های یدکی و نیز تجهیزاتی جهت شارژ و تعمیر آنها احتیاج دارند.

به استثنای بدنه واگن‌های بزرگ، حداقل شعاع انحنا درتونل بسته به ابعاد چرخ‌های لوکوموتیو و واگن‌ها دارای محدودیت است. (جدول ۴-۴).

فاصله بین ریل‌ها در محل انحنا باید بیشتر شود. این فاصله معمولاً به ازای هر۲/۵ درجه انحنا به میزان ۱/۱۶ اینچ افزایش می‌یابد.

۴-۳-۲ وسایل نقلیه چرخ لاستیکی

حمل و نقل با وسایل نقلیه چرخ لاستیکی انعطاف پذیری بالایی دارد چرا که کارایی آنها محدود به وجود تجهیزات ثابت مانند خط آهن نمی‌شود. طیف وسیعی از وسایل نقلیه با اندازه‌ها متفاوت که معمولا دیزلی بوده و روی اگزوز آنها فیلتر (scrubber) نصب شده، وجود دارند.

جدول ۴-۴- حداقل شعاع انحنای ریل بر حسب متر

	قطر چرخ (cm)										
حداکثر اندازه پایه چرخ(cm)	۳۵.۶	۴۰.۶	۴۵.۷	۵۰.۸	۵۵.۹	۶۱.۰	۶۶.۰	۷۱.۱	۷۶.۲	۸۳.۸	۹۱.۴
۹۱.۴	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۴.۰	۴.۰	۴.۰	۴.۳				
۹۶.۵	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۴.۶	۴.۶			
۱۰۱.۶	۴.۰	۴.۰	۴.۰	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۴.۹	۴.۹	۴.۹		
۱۰۶.۷	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۴.۹	۴.۹	۴.۹		
۱۱۱.۸	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۴.۹	۴.۹	۴.۹	۵.۲	۵.۲	۵.۲	۶.۱	
۱۲۱.۹	۴.۹	۴.۹	۴.۹	۵.۲	۵.۲	۵.۲	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۶.۷	۶.۷
۱۳۷.۲		۵.۵	۵.۵	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۶.۴	۶.۴	۶.۴	۷.۶	۷.۶
۱۵۲.۴		۵.۵	۵.۵	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۶.۴	۶.۴	۶.۴	۷.۶	۷.۶
۱۶۷.۶			۶.۷	۷.۰	۷.۰	۷.۰	۷.۹	۷.۹	۷.۹	۹.۴	۹.۴
۱۸۲.۹			۷.۶	۷.۹	۷.۹	۷.۹	۸.۵	۸.۵	۸.۵	۱۰.۴	۱۰.۴
۲۱۳.۴			۸.۸	۹.۱	۹.۱	۹.۱	۱۰.۱	۱۰.۱	۱۰.۱	۱۱.۹	۱۱.۹
۲۴۳.۸				۱۰.۴	۱۰.۴	۱۰.۴	۱۱.۳	۱۱.۳	۱۱.۳	۱۳.۷	۱۳.۷
۲۷۴.۳				۱۱.۹	۱۱.۹	۱۱.۹	۱۳.۱	۱۳.۱	۱۳.۱	۱۵.۵	۱۵.۵
۳۶۵.۸				۱۵.۸	۱۵.۸	۱۵.۸	۱۷.۱	۱۷.۱	۱۷.۱	۲۰.۷	۲۰.۷

مواد حفاری شده را با استفاده از وسایل نقلیه چرخ لاستیکی می‌توان مستقیما به یک یا چند محل دپوی مورد نظر حمل کرد. در صورت وجود چند سینه کار، وسایل نقلیه چرخ لاستیکی می‌توانند بسته به میزان حفاری در سینه‌های مختلف کار از یک سینه کار به سینه کار دیگر منتقل شوند.

مزایا:

۱- در یک تونل عریض، وسایل نقلیه به سهولت می‌توانند از کنار هم عبور کنند.
۲- امکان توقف کل کار بغلت بروز مشکل برای یک وسیله نقلیه به حداقل می‌رسد.
۳- حداکثر انعطاف پذیری در عملیات را دارد.
۴- امکان استفاده از سیستم ترکیبی بارگیری و حمل وجود دارد.
۵- کار در کف تونل به آسانی قابل انجام است.

معایب:

www.tunar.ir

۱ - نگهداری زیرساخت راه (کف تونل) مشکل است مخصوصا در صورتی که جنس زمین نرم و خیس باشد.
۲- به سیستم تهویه قویتری نیاز دارد.
۳- عدم سازگاری با برخی سیستم‌های حفاری و بارگیری.
۴- در تونل های باریک ، نقاط عبور وسایل نقلیه از کنار هم محل مشخصی دارند.
۵- وسایل نقلیه با اندازه‌های معمول در تونل‌های کوچک قابل استفاده نیستند. ظرفیت حمل، حتی با استفاده از تجهیزات خاص یا تورفتگی دیواره‌ها برای عبور، در تونل‌های کوچک کاهش می‌یابد.
۶- موتور دیزل تنها منبع تامین انرژی لازم است.
۷- به استثنای تونل‌های خیلی بزرگ، تامین حد آزاد (clearance) معمولا مشکل است.

محدودیت‌ها:
۱- شیب های ۱۰٪ هیچ مشکلی ندارند. شیب‌های تا ۲۵٪ نیز امکان‌پذیر است.
۲- با یک زیرسازی خوب، سرعت های ۲۵ مایل بر ساعت (۴۰ کیلومتر بر ساعت) غیرعملی نیست. سرعت تا ۵۰ مایل بر ساعت (۸۰ کیلومتر بر ساعت) برای وضعیت راه بسیار عالی نیز امکان‌پذیر است.
۳- به علت مشکلات تهویه و زیرسازی، حمل و نقل با کامیون در تونل‌های با طول بیش از حدود ۲ مایل (۳/۲ کیلومتر) اقتصادی نیست.

۴-۳-۳ نوار نقاله

پیشرفت در ساخت دستگاه‌های TBM با میزان تولید زیاد مواد حفاری شده، استفاده از نوار نقاله در تونل‌سازی را متداول کرده‌است. نوار نقاله می‌تواند در اندازه‌ای انتخاب شودکه حداکثر خروجی کوتاه مدت تونل را حمل کند.

مزایا:
۱- ظرفیت جابه‌جایی مواد حفاری شده با هر سرعت تولید
۲- قابل انطباق با تقریبا هر اندازه‌ای از تونل
۳- نیاز به حد آزاد (clearance) نسبتا کم
۴- قابلیت اطمینان عالی و نیاز کم به تعمیر و نگهداری
۵- حمل مواد بصورت پیوسته
۶- قابل انطباق برای حمل مواد فله‌ای (bulk material) به درون تونل
۷- مناسب برای شیب‌های زیاد

www.tmar.ir

معایب:

۱- هزینه سرمایه گذاری اولیه بالا

۲- خراب شدن یک قسمت موجب توقف کل سیستم می‌شود.

۳- حداکثر اندازه مواد قابل حمل محدود است اما با خرد کردن مواد این مشکل قابل رفع است.

۴- به سیستم سازه‌ای گسترده‌ای به عنوان تکیه‌گاه نیاز دارد.

۵- در نزدیک سینه کار نیاز به سیستم پیچیده‌ای جهت توسعه دارد.

۶- در صورت وجود انحنای زیاد در تونل، نیاز به طراحی خاص دارد.

محدودیت‌ها:

۱- شیب مسیر چه بصورت سربالایی و چه بصورت سرپایینی به ۱۸ تا ۲۰ درجه محدود می‌شود.

۲- بسته به پهنای نوار، حداکثر اندازه مواد قابل حمل حدود ۸ تا ۱۸ اینچ (۲۰ تا ۴۵ سانتی‌متر) می‌باشد.

www.tnar.ir

۵ – پایدارسازی تونل‌ها

۵-۱ مقدمه

در اغلب موارد، انواع راکبولت (rockbolt) و میل مهار (dowel) همراه با شاتکریت مسلح شده با توری سیمی، سیستم اصلی پایدارسازی و حائل‌بندی تونل‌ها تشکیل می‌دهند. در برخی موارد ممکن است نیاز به حائل های چدنی، قاب‌های فولادی، سگمنت‌های بتنی و نیز پوشش بتنی در جا نیز باشد. مهمترین جنبه‌های استفاده از حائل‌ها در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲ حائل‌های چدنی

به نظر می رسد تکنیک استفاده از چدن برای اولین بار به Peter Barlow در ۱۸۹۶ برای ساخت تونل Tower Subway در لندن برگردد. اگرچه یک طراحی مشابه توسط Marc Brunel در ۱۸۱۸ برای تونل Thames در Rotherhithe انگلیس همراه با سپر پیشنهاد شده بود ولی طرح او سرانجام رد شد. قبل از استفاده از سپر تونلزنی، برای حفاظت دائمی تونل‌ها از مصالح بنایی استفاده می‌شد ولی این مصالح برای استفاده در تونلزنی با سپر مناسب نیستند زیرا این مصالح برای کسب مقاومت لازم نیاز به زمان داشتند تا هم در مقابل بار اعمال شده توسط زمین مقاومت کنند و هم نیرویی اعمال شده توسط جک‌های رانشی را تحمل کنند. لذا استفاده از پوشش چدن خاکستری (grey cast iron) متداول شد که هم به سهولت قابل نصب هستند و هم بلافاصله پس از نصب توانایی مقابله با نیروهای شعاعی (radial) و طولی (longitudinal) را دارند. این نوع پوشش ها بیش از ۱۰۰ سال است که مورد استفاده قرار می‌گیرند اگرچه برخی جزئیات تغییر کرده است.

۵-۲-۱ چدن خاکستری (Grey iron)

چدن خاکستری نوع سنتی چدن برای استفاده در پوشش تونلها از زمان اولین استفاده آن در تونل Tower Subway در ۱۸۶۹ بوده است. کلمه خاکستری بدلیل ظاهر خاکستری ناشی از وجود گرافیت (graphite) آزاد مورد استفاده قرار میگیرد. چدن خاکستری بدلیل ویژگیهایی که داشت و نیز بدلیل وفور آن در اواسط ۱۸۰۰ به عنوان یک حائل استاندارد متوسط استفاده می‌شد. ویژگیهای خاص چدن خاکستری که آن را برای استفاده به عنوان حائل در تونلها توجیه می‌کرد شامل مقاومت فشاری بالا و مقاومت آن در برابر خوردگی بود. هر چند مقاومت کششی چدن خاکستری در مقایسه با مقاومت فشاری اش کم است و این می تواند به عنوان یک فاکتور مهم در طراحی پوشش باشد.

۵-۲-۲ چدن نودولار (nodular iron)

تکنیک ساخت چدن نودولار در نتیجه تحقیقات متالوژی در سال ۱۹۴۷ توسعه یافت. مشخصات مکانیکی چدن نودولار شبیه فولاد می باشد. مقاومت فشاری چدن نودولار کمی بیشتر از چدن خاکستری است اما مزیت اصلی آن نسبت به چدن خاکستری مقاومت کششی بالاست که برابر مقاومت فشاری آن است. این افزایش مقاومت کششی و همچنین ضربه ای علاوه بر شکل پذیری و مدول الاستیسیته بالا به پوشش نودولار این اجازه را می دهد که بتواند تحت بارهای سنگین قرار گرفته و تغییر شکل کمتری داشته باشد. همچنین چدن نودولار قابلیت ریخت‌گری، قابلیت تراش و مقاومت در برابر خوردگی بالایی نسبت به چدن خاکستری دارد. با توجه به اینکه هزینه چدن نودولار تقریبا دو برابر چدن خاکستری است اصولا باید در مواردی از آن استفاده شود که بهبود مشخصات کششی و دوام کاربرد آن را توجیه می‌کند.

با رواج پوشش های بتنی سگمنتی قبل از جنگ جهانی دوم در نتیجه کمبود چدن، کاربرد پوشش‌های چدنی بطور قابل‌توجهی کمتر شده است. قبل از آن، پوشش‌های چدنی بطور وسیعی در انواع تونل‌ها از جمله تونل‌های راه و راه‌آهن بکار گرفته می‌شدند.

محدوه وسیعی از پوشش های بتنی پیش‌ساخته برای تونل ها توسعه یافته‌اند و بطور کلی مشخص شده است که این پوشش‌ها اقتصادی‌تر از پوشش‌های چدنی هستند. این روند با افزایش نسبی قیمت چدن و بتن سرعت گرفت به این ترتیب که در دوره زمانی اوایل دهه ۱۹۶۰ تا اواسط دهه ۱۹۷۰ قیمت چدن ۴ تا ۵ برابر افزایش یافت در حالیکه قیمت بتن ۲ یا ۳ برابر شد.

۵-۳ حائل های فولادی

مقاطع فولادی نورد شده مورد استفاده زیادی در تونل‌های حفر شده در سنگ دارند. بطور معمول ، این قبیل حائل ها در وضعیت هایی بکار برده می شوند که توده سنگ خرد شده است یا تا حدی ضعیف است که راکبولت غیر قابل استفاده می باشد یا احتمال گسیختگی وسیع در اثر حفاری وجود دارد. شرایط تنش‌های درجای بالا نسبت به مقاومت سنگ نیز مستلزم روش‌های حائل‌بندی مناسب از قبیل استفاده از حائل‌های فولادی می‌باشد.

معمول ترین مقطع مورد استفاده در حائل های فولادی مقطع H شکل است که شکل توسعه یافته مقطع I شکل تیرهای فولادی مورد استفاده در صنعت ساختمان است . تیرهای با مقاطع I و H شکل براساس ایده سازه ای قراردادن جرم مقطع دور از تار خنثی جهت افزایش مقاومت خمشی مقطع میباشد. برای یک شاهتیر با مقطع H شکل مقاومت حول محور X چندین برابر مقاومت حول محور Y است.

www.tunar.ir

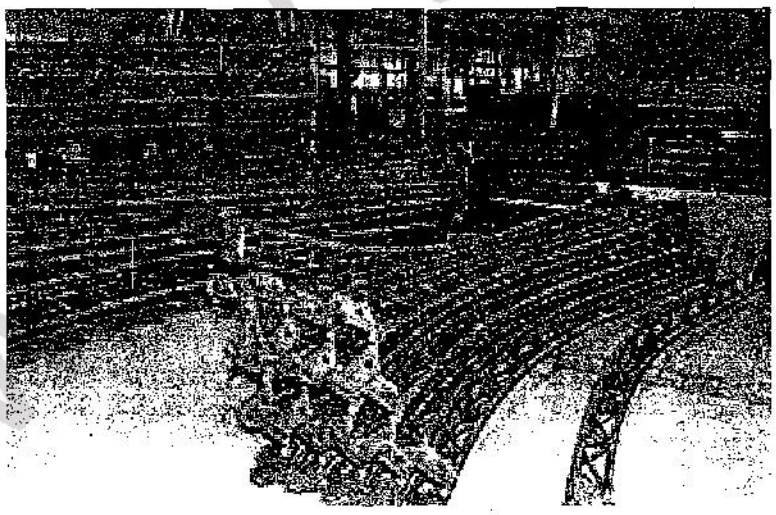
مشکل اصلی پوشش های فولادی مقاومت نسبتاً کم آنها در برابر خوردگی می باشد . این مشکل را می‌توان تاحدی با گالوانیزه کردن یا رنگ کردن پوشش برطرف کرد اما اینکار باعث افزایش هزینه می‌شود در مواردی که از بتن درجا بعنوان پوشش نهایی استفاده می‌شود پوشش فولادی عملا داخل بتن قرار می‌گیرد که بدین ترتیب از خوردگی فولاد جلوگیری بعمل می‌آید.

۵-۴ تیر مشبک (lattice girder)

تیرهای مشبک از نظر تحمل لنگر خمشی می‌توانند مانند قاب‌های فولادی عمل کنند ولی وزن کمتری نسبت قاب های فولادی دارند .

در شکل ۵-۱ نمونه ای از قطعات تیر مشبک نشان داده شده است و در شکل ۵-۲ نمایی از نصب این تیرها ارائه شده است.

شبکه باز این تیرها موجب می‌شود که شانکریت براحتی داخل آن جای گرفته و بنابراین یک سازه مرکب (composite structure) تشکیل شود.



شکل ۵-۱- نمونه‌ای از قطعات تیر مشبک

شکل ۵-۲- نصب تیر مشبک – تونل گاوشان

www.tt

۵-۵ انواع راکبولت و میل مهار و کاربرد آنها

شکل ۵-۳ کاربرد معمول راکبولت‌ها و میل مهارهایی که برای کنترل خرابیهای مختلف در توده‌های سنگ در اطراف تونل‌ها نصب می‌شوند را نشان می‌دهد.

انواع مختلف سیستم راکبولت و میل‌مهار وجود دارد و بطور کلی می‌توان تقسیم‌بندی زیر را در مورد آنها بعمل آورد:

انواع راکبولت:

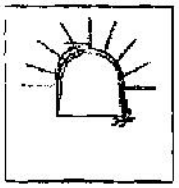
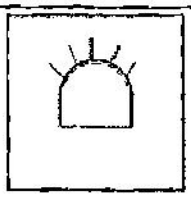
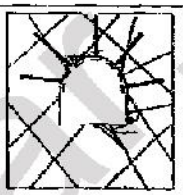
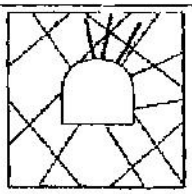
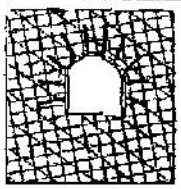
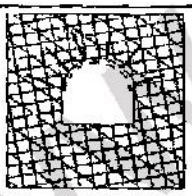
- راکبولت‌های گیردار شده بصورت مکانیکی (mechanically anchored rockbolts)
- راکبولت‌های گیردار شده با رزین (resin grouted rockbolts)

انواع میل مهار:

- میل مهارهای تزریق شده (grouted dowels)
- میل‌مهارهای اصطکاکی یا مجموعه شکافدار (split set)
- میل مهارهای از نوع Swellex

تفاوت راکبولت با میل‌مهار آن است که می‌توان در راکبولت پیش‌تنیدگی (کشش) ایجاد نمود. میل مهارها در مواردی بکار می‌روند که نصب خیلی سریع آنها امکانپذیر باشد. میل‌مهارها صرفا وقتی کشیده شده و تحت بار قرار می‌گیرند که سنگ اطراف آنها بتواند تغییر شکل داده و نتیجتا راکبولت به کشش بیفتد. اگر این میل مهارها خیلی دور از سینه کار نصب شوند، بیشتر تغییر شکل های اولی و کوتاه مدت سنگ قبلا اتفاق افتاده و عملا میل‌مهار موثر نخواهدبود.در صورتی که پیمانکاری ماهر مسئول اجرا و نصب این راکبولت ها بوده و زمان نصب آنها حساب شده باشد، میل‌مهارها می‌توانند ابزار خیلی موثری در پایدار سازی تونل باشند. ولی در صورت عدم نصب مناسب، حاصل آن در شرایط خوب هدر دادن سرمایه و در بدترین حالت باعث ناپایداری و ریزش تونل خواهد بود.

www.tunar.ir

	سطح تنش بالا	سطح تنش پایین
سنگ سالم	 توده سنگ سالم که در معرض تنشهای زیادی قرار دارد.استفاده از راک بولت یا میل‌مهار همراه با توری سیمی یا شاتکریت مانع شکست سنگها و سقوط آنها می شود.	 توده سنگ سالم که در معرض تنشهای کمی قرار دارد . مهار بندی مختصر موجب ایمنی بیشتر می گردد.
سنگ با درزه و ترکهای کم	 توده سنگ با درز وترکهای کم در معرض تنشهای زیاد. با بکاربردن راکبولت یا میل‌مهارهای قوی که ناپیوستگیها را بیکدیگر می دوزند همراه با توری سیمی و شاتکریت یا شاتکریت الیافدار در سقف و دیواره‌ها می‌توان مهار مناسب را ایجاد کرد .	 توده سنگ با درز وترکهای کم در معرض تنشهای کم. نصب راکبولت بطور موضعی برای جلوگیری از ریزش سنگهای منفرد بکار می رود . بولتها باید کشیده شوند .
سنگ با درزه و ترکهای زیاد	 توده سنگ با درز و ترکهای زیاد در معرض تنشهای زیاد. در این موارد راکبولت یا میل‌مهارهای قوی همراه با توری سیمی و شاتکریت یا شاتکریت الیافدار باید مورد استفاده قرار گیرد. در شرایط خیلی بد ممکن است نیاز به قاب‌های فولادی یا مفاصل لغزنده (sliding joints) باشد. کف تونل هم ممکن است برای جلوگیری از تورم (heave) نیاز به تیر کف یا تاوه بتنی داشته باشد.	 توده سنگ با درز و ترکهای زیاد که در معرض تنشهای کم قرار دارد. راک بولت گذاری مختصر بهمراه مش یا شاتکریت می تواند مانع افتادن تکه سنگهای سقف و دیواره‌ها شود.

شکل ۵-۳- نمونه ای از کاربرد راکبولت و میل‌مهار برای کنترل گسیختگی در شرایط مختلف توده‌سنگ

www.tnai.ir

۵-۵-۱ راکبولتهای گیردار شده بصورت مکانیکی

مهمترین نوع راکبولتهای گیردار شده بصورت مکانیکی، راکبولت با پوسته منبسط شونده (expansion shell rockbolt) است. در توده های سنگی با کیفیت خوب می‌توان راکبولت را تا حد تنش تسلیم کشید . لیکن خرد شدن محلی سنگ در نقاطی که راکبولت گیردار شده است منجر به لغزش راکبولت در سنگ های با کیفیت ضعیف می‌گردد. پیچ های شکافدار و گوه (slotted bolt and wedge) نیز از انواع دیگر راکبولتهای گیردار شده بصورت مکانیکی هستند که امروزه از آنها استفاده چندانی نمی‌شود.

مهاری های مکانیکی، نظیر پوسته منبسط شونده که در شکل ۵-۴ مشاهده می‌شود. بطور وسیعی در کارهای عمرانی و معدنی مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد زیادی از انواع گوناگون پوسته‌های منبسط شونده طراحی و تولید شده‌اند اساسا کلیه گیردار کننده های پوسته ای منبسط شونده به شیوه یکسانی عمل می‌کنند و انتخاب نوع گیردار کننده برای کارهای خاص معمولا بیشتر بستگی به قیمت و قابلیت دسترسی به آن در بازار دارد.

در سنگ های سخت و باکیفیت خوب، مهاری های مکانیکی کارایی زیادی دارند و سریع و راحت می‌توان آنها را نصب نمود. در سنگ های ضعیف‌تر و نرم‌تر تاثیر گیردار کننده مکانیکی بعلت خرد شدگی محلی و موضعی سنگ در طول غلاف راکبولت، کاهش می‌یابد. در شیل‌های خیلی ضعیف، گل سنگ‌ها وماسه سنگ های‌ضعیف، استفاده از گیردار کننده‌های مکانیکی توصیه نمی‌شود.
انواع راکبولت با پوسته منبسط شونده از اصول مشابهی پیروی می‌کنند. گوه ای که به انتهای میله راکبولت متصل می‌شود به داخل غلاف گیردار کننده مخروطی شکل کشیده شده و در نتیجه بدنه راکبولت را با فشار بطرف دیواره های چال منبسط می‌سازد.

درپوش دوغاب‌بند لاستیکی (rubber grout seal) برای قرار دادن راکبولت در امتداد محور چال و برای آب‌بندی کردن دهانه چال در مقابل نشت دوغاب استفاده می‌شود. طریق دیگر آب بندی استفاده از خمیر زودگیری است که در دهانه چال مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۵-۴ طرق مختلف نصب لوله‌های ورود و خروج دوغاب نشان داده شده است که در همه آنها (بجز چال‌های سربالا) تزریق از دهانه چال صورت می‌گیرد و لوله برگشت تا انتهای چال امتداد می‌یابد. تزریق هنگامی متوقف می‌شود که هوای داخل چال کاملا خارج شده و دوغاب از لوله برگشت بیرون بزند.

یکی از بحرانی ترین مراحل تزریق راکبولتها آب بندی دهانه چال است. اولین اقدام مهم در این امر دقت در آماده سازی سطح سنگ و قرار دادن واشر است. عدم دقت در قرار دادن صحیح راکبولت و فقدان آماده سازی سطح سنگ، تقریبا آب بندی دهانه چال را غیر ممکن می‌سازد.

www.tunar.ir

وقتی که امکان جاگذاری راکبولت در محل خود بگونه‌ای که سطح اطراف دهانه به اندازه کافی هموار باشد وجود ندارد، می‌توان با استفاده از ملات سطح صاف و مناسبی زیر واشر ایجاد نمود تا سطح تماس خوب فراهم گردد و امکان آب بندی دهانه چال بوجود آید. واردکردن آب تحت فشار به داخل چال قبل ازشروع تزریق موجب شسته و تمیز شدن چال شده و نیز می‌توان به این طریق چگونگی آب بندی دهانه چال را آزمایش نمود.

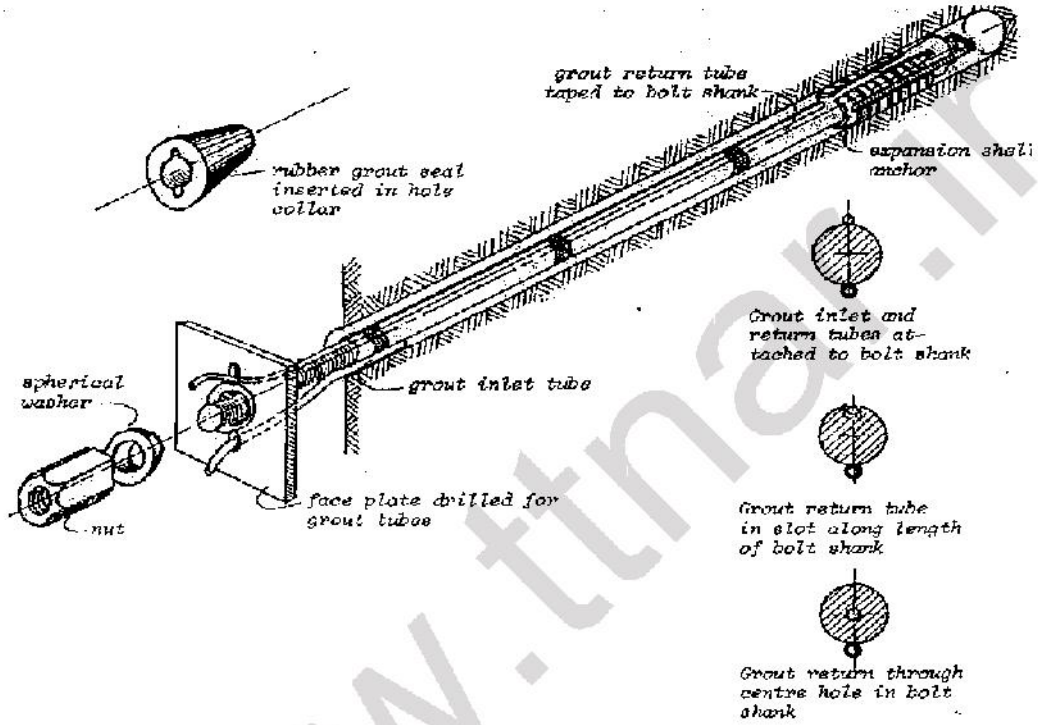
شکل ۵-۴ نمونه‌ای از لوله و وسایل تزریق را نمایش می‌دهدکه برای استفاده در چال هایی که بصورت سربالا هستند مفید است. یک لوله پلاستیکی کوتاه (به قطر داخلی حدود ۸ میلیمتر و قطر خارجی حدود ۱۱میلیمتر) برای تزریق دوغاب بکار می‌رود. برگشت دوغاب توسط لوله پلاستیکی دیگری به قطر داخلی ۶ میلیمتر و قطرخارجی ۸ میلیمترکه به سراسر راکبولت بسته شده است، انجام می‌شود. قطر اتصالات دستگاه تزریق باید چنان باشد که فقط به لوله تزریق بزرگتر متصل شود. در مواردی که تزریق در چال هایی که بصورت سر پایینی هستند انجام می‌شود، تزریق باید از پایین و ته چال شروع شود و لوله برگشت کوتاهی به ابتدا و سرچال متصل گردد.

لوله برگشتی که درقسمت خارجی بدنه راکبولت پیچیده می‌شود درطول جابجایی و نصب راکبولت به آسانی صدمه دیده و خراب می‌شود و باید دقت خاص از این نظر بکار برد تا آسیبی به لوله وارد نشود. چنانچه این لوله آسیب ببیند باید میله راکبولت از چال خارج شده و تعویض گردد. چنانچه میله راکبولت را نتوان خارج نمود، لوله تزریق دیگری را می‌توان به داخل چال توسط مفتول محکم و سفتی هدایت کرد و سپس مفتول را بیرون کشید تا لوله در محل خود باقی بماند.

همانطور که در شکل ۵-۴ ملاحظه می‌شود، برای اینکه لوله برگشت در معرض آسیب کمتری قرار گیرد. می‌توان آن را در شکافی که روی میله راکبولت تعبیه شده جاسازی کرد یا از راکبولت توخالی برای این منظور استفاده کرد. علیرغم گران تر بودن آن نسبت به سیستمی که در بالا توصیف شد، این روش برای لوله برگشت دوغاب درجه اطمینان بالایی را فراهم می‌نماید. فشار تزریق دوغاب باید زیر kPa ۱۷۲ ($25lb/in^2$) حفظ شود تا از آسیب رساندن (jacking) به توده سنگ اجتناب شود. تزریق باید آنقدر ادامه یابد تا جریان پیوسته ای از دوغاب در داخل لوله برگشت برقرار شود.

از مزایای این راکبولت آن است که آن را می‌توان بلافاصله پس از نصب کشید و در مرحله بعدی پس از متوقف شدن تغییر مکان کوتاه مدت تزریق نمود. گیرداری خیلی مطمئن در سنگ های خوب ایجاد می‌کند و توان باربری زیادی را می‌توان تامین نمود.

از معایب این نوع راکبولت آن است که نسبتا گران بوده و نصب صحیح آن نیاز به کارگران ماهر و نظارت دقیق دارد. به لوله های تزریق اغلب آسیب وارد می‌شود و لذا تست آنها با پمپاژ آب تمیز قبل از تزریق ضروری است.



شکل ۵-۴- راکبولت با پوسته منبسط شونده

www.ttnar.ir