آشنایی با تونل و سازه‌های زیرزمینی

(جهت استفاده دانشجویان دوره کارشناسی)

میلاد صافدل

www.miladsafdel.ir

۱-۱ مقدمه

یکی از شاخه های رشته مهندسی عمران، مهندسی تونل است که شامل طراحی تونل، عملیات اجرا و هدایت حفاری، پیاده سازی سازه ها و تحکیمات تونل و در نهایت برداشت عوارض تونل به منظـور تهیه نقشه با توجه به شرایط خاص در تونل می باشد. موفقیت یک مهندس عمران در تونـل مسـتلزم شناخت مراحل اجرای تونل و موضوعات مورد بحث در تونل است .یک مهندس تونل ، ابتدا بایـد شناخت کامل از روند اجرایی تونل داشته باشد، تا بتواند اصول مهندسی را در تونل به کـار ببنـدد و پیاده سازی نماید. به طور مثال یک مهندس نقشه بردار تونل ابتدا باید با قاب گذاری در تونل و نحوه اجرای آن آشنا باشد تا بتواند ریل های آن را پیاده سازی و قاب ها را کنترل نماید.

شکل ۱-۱. کنترل قاب فلزی تونل توسط مهندس نقشه بردار

۱-۲- تعریف تونل

به راهرو زیرزمینی افقی یا مورب که به منظورخاصی با طول و ابعاد مشخص حفر می شود و ممکن است از یک یا دو طرف به هوای آزاد راه داشته باشد تونل می گویند. یا به طور عام، تونل به کلیه فضاهای زیر زمینی که برای استخراج مواد معدنی، رفت و آمد وسایط نقلیه، حرکت قطارها، انتقال تأسیسات، انتقال آب و پدافندغیرعامل احداث می شود، اطلاق می گردد.

ساخت فضاهای زیر زمینی همواره کاری مشکل و طاقت فرسا بوده است از آنجا که سخت ترین کار دنیا را به کارگران معدن نسبت داده اند. ولی این امر مانع کار در زیر زمین نشده است لیکن بهره برداری واقعی از فضاهای عظیم زیرزمینی در چند دهه ی اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است.

درحال حاظر در بین کارهای مهندسی سخت، تنها تونلسازی است که فرض عدم موفقیت در آن خودنمایی می کند. مقطع تونها معمولاً به صورت قوسی شکل انتخاب می شوند که دلایل این امر را می توان به شرح ذیل عنوان کرد:

- مقاومت بالای خمشی و پیچشی در مقاطع قوسی در برابر بار ها ی وارده به تونل
- سهولت حفاری با ابزار های ساده به دلیل نداشتن زاویه و گوشه در تاج تونل
- افزایش ظرفیت باربری سازه های قوسی در شرایط مساوی از دیگر سازه ها
- کاهش تمرکز نیروی تنشی بار وارده به تونل

۱-۳- تاریخچه تونلسازی

اولین تونلها در عصر حجر برای توسعه خانه ها با انجام حفریات توسط ساکنان شروع شد پیش ازتمدن روم باستان، در مصر، یونان، هند و خاور دور و ایتالیای شمالی، تمام تکنیکهای تونل سازی

دستی مورد استفاده قرار می گرفت که در اغلب آنها نیز از فرایندهای مرتبط با آتش برای حفر تونـل های نظامی، انتقال آب و مقبره ها کمک گرفته شده است. در ایران نیز از چند هـزار سـال پـیش، بـه منظور استفاده از آبهای زیر زمینی تونل هایی موسوم به قنات حفر شده است که طول بعضی از آنهـا به ۷۰ کیلومتر و یا بیشتر نیز می رسد. تعداد قنات های ایران بالغ بر ۵۰۰۰۰ رشته برآورده شده است. جالب توجه است که این قنات های متعدد، طویل و عمیق با وسایل بسیار ابتدایی حفر شده اند.

رومی ها نیز در ساخت قناتها و همچنین در حفاری تونل های راه پرکار بودند. آنها در ضـمن اولـین دوربین های مهندسی نقشه برداری اولیه را در جهت کنترل تراز وحفاری تونل ها به کار بردند اما بـا توجه به پیشینه قنات و حفرسازه های زیرزمینی و هـدایت تونـل توسـط ایرانیـان مـی تـوان اولـین مهندسان نقشه بردار تونل را ایرانیان قلمداد کرد.

در ایران و در دوره ساسانی حفر کانال نهروان که در باکویه (واقع در شمال شرقی بغـداد) در حـدود ۱۱۰ کیلومتری پائین دست سد به رودخانه دیاله می رسد، یکـی از شـاهکار هـای مهندسـان ایرانـی باستان بوده است.

کانال نهروان و رود دیاله در یک سطح و بدون هیچگونه کنترل مجاری به یکدیگر می رسیدند و این نشان دهنده آنست که مهندسان ساسانی میتوانسته اند محل سد را طوری تعیین کنند که این جریان و ارتباط طبیعی با دقت انجام گیرد و این خود نمایشگر تبحر آنها در پیاده کردن نقشه و نقشه بـرداری بوده است.

اهمیت احداث تونل ها دردوران های قدیم، تا بدین جاست که کارشناسـان کارهـای احـداث تونـل درآن تمدن ها را نشانگر رشد فرهنگ و به ویژه رشد تکنیکی و توان اقتصادی آن جامعه دانسته انـد.

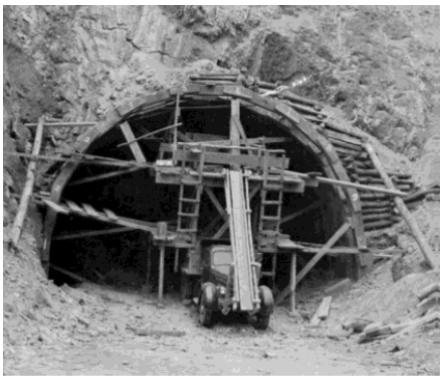
تمدن های اولیه به سرعت به اهمیت تونلها به عنوان راههای دسترسی به کانی ها و مواد طبیعی نظیر سنگ چخماق به واسطه اهمیتش برای زندگی، پی بردند.

تونل سازی همزمان با انقلاب صنعتی، به ویژه به منظور حمل و نقل، تحرک قابل ملاحظه ای یافت. تونل سازی به گسترش و پیشرفت کانال سازی کمک کرد و این امر در توسعه صنعت به ویژه در قرون ۱۸ و ۱۹میلادی در انگلستان سهم بسزایی داشت. کانالها یکی از پایه های انقلاب صنعتی بودند وتوانستند در مقیاس بسیار بزرگ هزینه های حمل و نقل را کاهش دهند. تونل مال پاس با طول ۱۵۷ متر برروی کانال دومیدی در جنوب فرانسه اولین تونلی بود که در دوره های مدرن در سال ۱۶۸۱ ساخته شد. همچنین اولین تونل ساخته شده با کاربرد حفاری و انفجار باروت بود. در انگلستان، قرن ۱۸ نیز جیمز بریندلی از خانواده ای مزرعه دار با نظارت بر طراحی و ساخت بیش از ۵۸۰ کیلومتر کانال و تعدادی تونل به عنوان پدر کانال و تونل های کانالی ملقب شد. وی در سال ۱۷۵۹ با ساخت یک کانال به طول ۱۶ کیلومتر معدن زغال دوک بریدجواتر را به شهر منچستر متصل نمود.

اثر اقتصادی تکمیل این کانال نصف شدن قیمت زغال در شهر و ایجاد یک انحصار واقعی برای معدن مذکور بود. در اوایل قرن نوزدهم به منظور عبور از قسمت های پایین دست رودخانه تایمز هیچ سازه ای موجود نبود و ۳۷۰۰ عابر مجبور بودند با طی یک راه انحرافی ۳ کیلومتری با قایق مسیر روترهایت به ویپینگ را طی کنند. اقدام به ساخت یک تونل نیز به دلیل ریزشی بودن ومناسب نبودن رسوبات کف رودخانه متوقف شد تا اینکه در حدود سال ۱۸۲۰ فردی بنام مارک ایرامبارد برونل از فرانسه ایده استفاده از سپر را مطرح نمود و در سال ۱۸۵۲ کار احداث تونل بین روترهایت و ویپینگ را آغاز و علی رغم جاری شدن چند نوبت سیل در سال ۱۸۴۳ آن را باز گشایی نمود. این تونل تامس نام گرفته و اولین تونل زیر آبی بود که بدون هر گونه رودخانه انحرافی حفر شد. در دیگر

موارد تونل های زهکشی بزرگ، نظیر تونلی با طول ۷ کیلومتر در هیل کارن انگلستان، اهمیت زیادی در توسعه صنعت معدن کاری داشته اند.

شکل ۲-۱. حفاری دستی و نقشه برداری در تونل NARA سال ۱۹۵۳



شکل ۳-۱. تحکیمات تونل Parkway سال ۱۹۵۳

اولین اقدامات نقشه برداری تونل در ایران در ۲۰ بهمن ۱۳۰۴ بود که قانون نقشه برداری و ساختمان راه آهن از مجلس تصویب شد و پس از آن اداره راه آهن تاسیس گردید .نقشه برداری تونل و راه آهن سراسری ایران یک سال و هفت ماه به طول انجامید. طول کل خط سراسری از بندر ترکمن (در شمال) تا بندر امام (در جنوب)، ۱۳۹۴ کیلومتر است در طول مسیر ۲۲۴ تونل ساخته شده که ۹۳ تونل آن بین قائمشهر (شاهی) و تهران و ۱۳۱ تونل آن در مسیر اندیمشک تا تهران قرار دارد. مجموع طول این تونلها ۸۳۶۶۶ متر است که ۲۳۵۹۹ متر آن در شمال و۶۰۰۶۷ متر آن در جنوب است. از

مجموع تونلهای خط شمال چهار تونل بیش از یک کیلومتر و نه تونل بیش از نیم کیلومتر طول دارند. تونل گدوک که ۲۸۸۷ متر طول دارد بلندترین تونل این مسیر است.

اولین تونل راه جاده ای ایران نیز تونل کندوان با طول ۱۸۸۳ متر در ارتفاع ۳۰۳۰ متری کوهای البرز در ۲۷ اردیبهشت ۱۳۱۷ از افتتاح شده است.

قبل از احداث این تونل، راه میان کرج و چالوس پنج ماه از سال غیر قابل تردد بود. این جاده تا اواخر دوره قاجار یک مسیر خاکی و مالرو بود که راه دسترسی به روستاهای این منطقه را تشکیل می داد. زمانی که راه مخصوص چالوس ساخته می شد در نزدیکی روستای کندوان تنها راه چاره برای عبور از کوه حفر یک تونل بود. در تاریخ بیستم اردیبهشت ۱۳۱۴ اولین دینامیت، برای حفر قسمت ابتدایی تونل به کار گرفته شد و پس از آن کارگران با کلنگ و تیشه عملیات حفاری را ادامه دادند کار ساخت این تونل با ادوات و ابزار آن سالها، فقط سه سال به طول انجامیده است. البته بررسی تاریخچه پیشرفت در روش ها و تکنیک ها تونلسازی نشانگر این مطلب است که مانند بسیاری دیگر از علوم و فنون بیشترین رشد این علم در قرن گذشته صورت گرفته و تا حال نیز ادامه دارد.

۱-۴- انواع تونل

رایج ترین دسته بندی تونل براساس کاربرد آنها به شرح ذیل می باشد:

۱- تونل های حمل و نقلی(ترافیکی)

۲- تونلهای معدنی

۳- تونلهای انتقال وانحراف آب و فاضلاب

۴- تونل های پدافند غیر عامل

۱-۴-۱- تونل های حمل و نقلی (ترافیکی)

۱- **تونلهای جاده ای:** در راه های حمل و نقلی یا ترافیکی به دلایهل متعددی از جمله کوتاه شدن طول مسیر، جلوگیری از قوس های با شعاع کم و بهبود شرایط هندسی، جلوگیری از ریزش کوه و بهمن و افزایش راندمان ترافیکی، تونل های حمل و نقلی احداث می شوند.

تونل های راه که جهت عبور دو طرفه خودروها می باشد، معمولاً به عرض ۱۱ متر وارتفاع ۹ متر حفاری می گردند.

در زیر به برسی چند تونل جاده ای ایران می پردازیم:

جاده هراز: این جاده به عنوان یکی از جاده های پر ترافیک ایران دارای ۱۵ تونل جاده ای می باشد که مجموع طول این تونلها به ۵۷۰۰ متر می رسد. طولانی ترین تونل در مسیر هراز، تونل وانا با طول ۱۵۴۰ متر است. از دیگر تونلهای این جاده می توان از تونل لهاش، تونل سیاه بیشه، تونل دوآب، تونل گروازمال، تونل سیاهبند، تونل شکرالله رود، تونل احمدمال، تونل آیو و تونل نورانی نام برد. همچنین بهمنگیر امامزاده هاشم نیز با طول ۱۳۰۰ متر در این جاده قرار دارد. در سال ۱۳۹۲ بزرگ ترین و طولانی ترین تونل جاده ای کشور به طول ۳۲۹۰ متر افتتاح شد، با بهره برداری از این طرح، فاصله ۲۱ کیلومتری منطقه پلور در مازندران تا منطقه آبعلی در استان تهران به ۱۲ کیلومتر کاهش یافت.

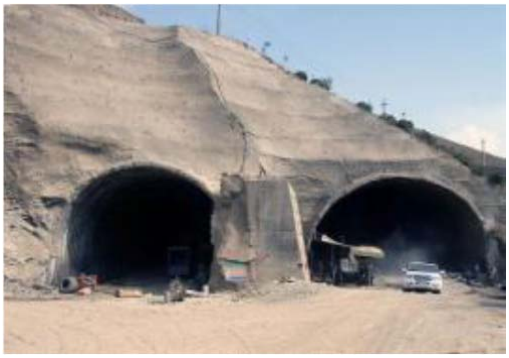
آزادراه تهران- شمال: این جاده بخشی از کریدور شمال و جنوب است که ارتباط کشورهای آسیای جنوب شرقی را با اروپا از طریق ایران و کشورهای همسایه شمالی برقرار

می کند. این آزادراه با کوتاه کردن فاصله تهران چالوس از حدود ۲۰۰ کیلومتر به ۱۲۱ کیلومتر زمان مسافرت را از ۴/۵ ساعت به ۱/۵ ساعت کاهش خواهد داد. این مسیر دارای ۱۳۷ رشته تونل می باشد که مجموع طول تونل های مسیر حدود ۴۵ کیلومتربه صورت دوقلو(مجموع ۹۰ کیلومتر) می باشد.

تعداد ۱۰ رشته تونل دارای طولی بیش از یک کیلومتر می باشند. طولانی ترین تونل های مسیر تونل های دوقلوی تالون با طول حدود ۵۰۰۰ متر و تونل های دوقلوی البرز به طول تقریبی ۶۳۰۰ متر می باشند. تونل اکتشافی تالون به روش NATM و با چالزنی و آتشباری حفر شده و تونلهای اصلی نیز به همین روش در حال حفر است. سنگهای منطقه حفاری بیشتر از جنس توف های سازند کرج می باشد. تونل اکتشافی البرز که طولانی ترین تونل مسیر آزادراه تهران شمال است با دستگاه حفار تمام مقطع (TBM) و به قطر ۵/۲ متر حفر شده و حفاری تونل های اصلی به روشNATM و با چالزنی و آتشباری در حال اجرا است.

آزاد راه خرم آباد – پل زال: مسیر موجود خرم آباد پل زال به طول حدود ۱۶۵ کیلومتر یکی از گلوگاه های ارتباطی شمال جنوب می باشد. با احداث آزادراه خرم آباد پل زال طول مسیر حدود ۶۰ کیلومتر کاهش می یابد و زمان سفر وسایل نقلیه به نصف تقلیل می یابد. مسیر این آزادراه پس از عبور از مناطق کوهستانی و صعب العبور، رشته کوه های زاگرس را قطع و در محلی در نزدیکی پل زال در فاصله ۵۵ کیلومتری شهر اندیمشک در استان خوزستان با تقاطع غیر همسطح دیگری به محور آزادراه خرم آباد به اندیمشک متصل می گردد. طول مسیر آزادراه حدود ۱۰۴ کیلومتر مشتمل بر حدود ۲۵ کیلومتر تونل دوقلو که به روش چالزنی و آتشباری حفر شده اند، می باشد.

آزاد راه قزوین– رشت: آزادراهی است که در شمال ایران واقع شده است و شهرهای قزوین و رشت را به همدیگر متصل می نماید.این آزادراه به دلیل کوهستانی بودن در مسیر ۱۱ کلیومتری حدفاصل شهرهای رودبار و منجیل از روی رودخانه سفیدرود عبور می کند که۱۰تونل به طول ۵,۵ کیلومتر دارد.



شکل ۴-۱ ساخت تونل های رفت و برگشت آزاد راه تهران شمال

شکل ۵-۱. تونل های دوقولو در مسیر آزاد راه خرم آباد- پل زال

۲- تونلهای راه آهن برون شهری: مسیر های راه آهن به دلیل محدودیت های هندسی راه به خصوص عدم اجرا قوسهای با شعاع کم و محدودیت بالا در شیب های بیشتر از ۴ درصد بیشترین استفاده تونل در راه آهن را ایجاب می نماید. از جمله دیگر موارد قابل توجه در تونل های راه آهن امکان برخورد واگن های قطار با دیواره های تونل در مسیر های قوسی که شیب عرضی یا بربلندی اعمال شده است که باید در طراحی تونل راه آهن به نکات زیرتوجه کرد:

- زمانیکه شعاع قوس در یک خط کم باشد ،جهت راحتی حرکت قطار ها و کاهش ساییدگی چرخ و ریل، عرض خط افزایش یافته و به مقدار بیشتری نسبت به مسیر مستقیم می رسد. این مقدار در قسمت ریل داخلی به عرض خط افزوده می شود .برای قوسهایی که شعاع آنها بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر است عرض خط را می توان تا مقدار ۱/۴۴۵ متر (برای تراورسهای چوبی یا فولادی) و ۱/۴۴ متر (برای تراورسهای بتنی) افزایش داد.

- پیدا کردن بربلندی مناسب برای قوسها به صورتی که علاوه بر حفظ مسائل ایمنی و بهره برداری مناسب از خط باعث حفظ کیفیت و پایینن آوردن هزینه تعمیر و نگهداری شود بسیار مهم و اساسی است لذا :

۱- دوری که برای قوسها داده می شود ثابت و همیشگی نیست و به ترافیک بستگی دارد .

۲- وزن و تعداد قطارها برای یکسان شدن سایش بیرونی و داخلی تاثیر دارد.

۳- بربلندی برای یک فاصله زمانی بین دو تعمیرات و اصلاح قوس با در نظر داشتن ترافیک بایستی انتخاب گردد.

۴- احتمال وجود خطا در محاسبه د ور وجود دارد که با مشاهدات عینی ، مهندس نگهدارنده خط در حین اصلاح قوس می تواند اعمال کند که سایش ریل داخلی و خارجی به یک نسبت باشد.

۵- موقعیت قوس در مسیر در انتخاب دور تاثیر دارد و از روی قوسهایی که در نزدیکی ایستگاه قرار دارد به هیچ وجه قطارها با سرعت های ماکزیمم حرکت نمی نمایند در نتیجه برای محاسبه بربلندی اول باید شبیه سازی حرکت قطارها در بلاک انجام پذیرد سپس با توجه به سرعتهای میانگین برای قوسها بربلندی بهینه را تعریف کرد.

- شیب ها

شیب های طولی در راه آهن بسیار کمتر از راه است . حداکثر مقدار شیب به مشخصات و توان وسیله نقلیه بستگی داشته و مقادیر متداول برای ترافیک مختلط و سرعت تا ۲۰۰ کیلومتر در ساعت بین ۱۲ تا ۱۵ در هزار تغییر می کند. به دلیل چسبندگی به سختی ممکن است حداکثر شیب از ۴۰ در هزار تجاوز کند.

تونل های راه آهن از چند جنبه تقسیم بندی می شوند :

۱- از نظر نوع پوشش به سه دسته بدون پوشش، دارای پوشش غیر سازه ای (غیر باربر) و فقط جلوگیری کننده از فرسایش، و دارای پوشش سازهای و باربر تقسیم می شوند.

۲- از نظر جنس مصالح به کار رفته در پوشش به دو دسته پوشش سنگی (بنایی) و پوشش بتنی تقسیم میشوند.

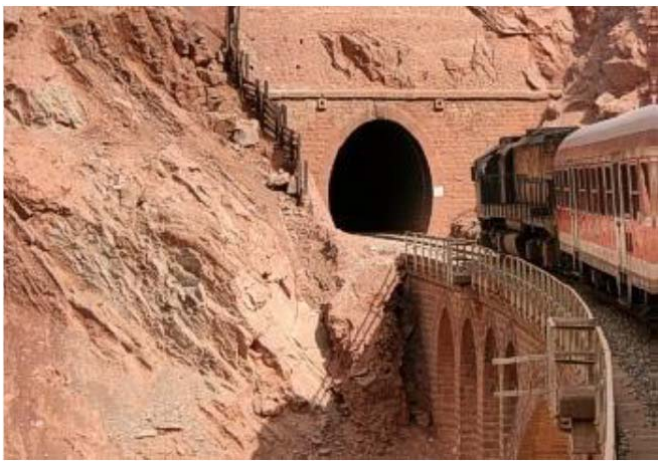
۳- براساس ابعاد به تونلهای با ابعاد کوچک قدیمی و تونلهای با ابعاد جدید با ارتفاع بیشتر تقسیم می شوند.

۴- در تونلهای با پوشش بنایی سنگی همه نیروهای وارده ناشی از پدیده قوس زدگی در دیواره و سقف منحنی شکل تونل تحمل می شوند. بیشتر تونلهای قدیمی راه آهن کشور در محورهای شمال، جنوب و شمال غرب از نوع با پوشش بنایی سنگی هستند که تحت نامهای تونل سنگی یا سنگی مالون شناخته می شوند.

۵- پوشش بتنی تونلها می تواند از دو نوع سازهای یا غیرسازه ای باشد. در حالت پوشش غیرسازه ای، نیروهای وارده به پوشش قابل توجه نمی باشند. در تونلهای با پوشش سازه ای، بخش اعظم نیروهای وارده از سوی مصالح سنگی اطراف تونل از طریق پوشش تحمل می گردد. تونلهای دارای دیوار بتنی و سقف سنگی (هفت رج) را سنگی - بتنی می نامند.

۶- تونل های با مقطع کوچک قدیمی که بر اساس قواره (گاباری) قدیمی ساخته شده اند و دارای ارتفاع حدود ۵/۸۰ متر (و گاه در حدود ۵/۶۰ متر) از سطح تراز ریل می باشند .تونل های با مقطع جدید بر اساس ابعاد جدید برای قطارها طرح شدهاند و دارای ارتفاع حدود ۷ متر یا بیشتر از سطح ریل می باشند. این تونلها که در پروژه های جدید خطوط راه آهن کشور اجرا شده اند امکان نصب شبکه بالاسری برق را داشته و شرایط تهویه مناسبتری دارند.

تونل گدوک: طولانی ترین تونل ایران با طول ۲۸۸۷ متر است. این تونل در مسیر راه آهن مازنـدران و در نزدیکی روستای گدوک قرار دارد. قطار امروزه آن را در طی مدت ۳ دقیقه و بیست ثانیه طی می کند، این تونل بدلیل درازای زیاد آن دارای ۵۶۰ سانتیمتر عـرض و ۶۰۰ سـانتیمتر ارتفاع می باشد و از این لحاظ عریض ترین تونل در میان تمامی تونلهای راه آهـن در ایـران اسـت، همچنین در حدود ۹۰۰ متر انتهایی جنوبی آن بلندترین نقطه از لحاظ ارتفاع قـرار دارد.احـداث ایـن تونل به منظور رسیدن به خط راه آهنی با شیب ۲۸ در هزار در مناطق کوهستانی که در جلسه ای در سوم اردیبهشت سال ۱۳۱۱ با حضور سرمهندسان خطوط شمال و جنوب و وزیر راه وقت و شخص رضا شاه تصویب شده بود، انجام گرفت. در هنگام احداث این تونل خطرات فراوانـی وجـود داشـته است. در تابستان ۱۳۱۲ کارگران در هنگام حفر این تونل به یک منبع آب زیرزمینی برخورد کردند که بلافاصله پس از حفر تونل، آب به شدت جاری شد. جریان اولیه آب در حدود ۱۲۰ لیتر در ثانیه بوده است به طوری که در همان لحظات اولیه محوطه ی جلوی تونل به رودخانه ای تبدیل شده بود.



شکل ۶-۱. تونل گدوک در مسیر راه آهن مازندران

۳- تونلهای قطار شهری (مترو): از آنجا که مترو به عنـوان یکـی از سـازه هـای زیرزمینـی مهـم و کاربردی در دوران اخیر قلمداد می گردد به شرح مختصری از آن می پردازیم. نخستین متروی جهان

در سال ۱۸۶۳ میلادی در شهر لندن آغاز به کار کرد .شهرهای پاریس، بوداپست استانبول و گلاسگو پس از آن به سیستم مترو مجهز شدند. استفاده از فن آوری مترو در اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ میلادی به سرعت در شهرهای بزرگ اروپا و آمریکا گسترش پیدا کرد. در حال حاضر ۱۶۰ شهر جهان دارای سیستم مترو هستند و در ۲۵ شهر دیگر مترو در دست احداث است. شهرهای توکیو، مسکو و سئول دارای پر استفاده ترین متروهای جهان هستند.

در شهرهای توسعه یافته استفاده از حمل و نقل عمومی بیشتر است. سیستم حمل و نقل عمومی همانند اتوبوس، مترو و ...باید به گونهای برنامه ریزی و طراحی شوند که امکان ایجاد فرصتهای رشد آتی شهر در آنها دیده شود .یکی از مواردی که به بحران ترافیک در شهرهای بزرگ کمک می کند استفاده از وسایل حمل و نقل عمومی است مترو در کم شدن مشکل ترافیک و آلودگی هوا در شهرها بسیار موثر و ضروری است .ایمنی بسیار بالا، راحتی وآسایش مسافران، کاهش مصرف انرژی، سرعت مناسب، قیمت پایین حمل مسافر در مقایسه با خودروهای شخصی از جمله مزیتهای قطار شهری نسبت به سایر وسایل نقلیه عمومی است.

مصرف روزانه ۱۳ میلیون لیتر بنزین و چندین میلیون لیتر گازوئیل فقط در شهر تهران، خسارتهای بسیار هنگفتی به اقتصاد ملی وارد می کند. مترو یکی ازمهمترین راهکارهای حل مشکل ترافیک و آلودگی هوا در جهان شناخته شده است. توسعه سریع و گسترش خطوط قطار درون شهری، ضرورتی اجتناب ناپذیر و از نیازهای اصلی شهر است. مترو از مزایای بسیاری چون کاهش زمان و هزینه درسفرهای درون شهری، سهولت در جابجایی، کاهش آلودگی هوا و کاهش مصرف انرژی برخوردار است.از نظر اقتصادی، اجتماعی، بهداشتی و ترافیک شهری غیر قابل توجیه است.

حفاری تونل های مترو به سه روش ترانشه باز، اتریشی و ماشین حفار انجام می شود:

۱- روش ترانشه باز: در این روش ساخت، ابتدا بررسی و آزمایشهای ژئوتکنیکی برای تشخیص لایه های زمین و مقاومت خاک در مسیر حفر تونل صورت گرفته و پس از خاکبرداری و گود کردن تونل، کف منطقه گودبرداری شده تسطیح، آرماتوربندی و سپس بتن ریزی می شود.

۲- روش اتریشی: در این روش، مانند همان روشی که در حفر قنوات استفاده می شود، با یک شفت یا رمپ به عمق مورد نظر رسیده، سپس اقدام به حفر تونل می نمایند. تونل خاک برداری شده در مقاطع فوقانی و تحتانی، ابتدا حفاظت موقت شده و در نهایت؛ قالب بندی، آرماتور بندی و بتن ریزی می شود.

۳- روش ماشین حفاری: ساخت تونل با ماشین حفار در خیابانهای پرترافیک و در مناطقی که سطح سفره آبهای زیرزمینی بالا است، کاربرد دارد .در این روش، یک رمب برای ورود ماشین حفار به عمق زمین ایجاد شده و پس از آن ماشین حفار کار حفاری و ساخت تونل در زیر زمین را آغاز می کند. ماشین حفار به دستگاه خاک برداری دوار با مقاومت زیاد و تعدادی چکهای هیدرولیکی که به طور افقی حرکت می کنند، مجهز است. با پیشروی در دل خاک، تونل حفاری شده و خاک ناشی از حفاری، توسط تسمه نقاله به قطارهای حمل خاک که در پشت ماشین قرار دارند، به سمت عقب هدایت می شود .پس از آن، قطعات پیش ساخته بتنی توسط ماشین نصب میگردد.

شکل ۷-۱. اجرای تحکیمات اولیه تونل مترو تهران

شکل ۸-۱. پایان مأموریت ماشین حفاری خط ۳ تونل تهران

۱-۴-۲- تونل های معدنی

تونلهای معدنی برای دسترسی، شناسایی و استخراج مواد معدنی احداث می شوند. حفر راهروهای سنگی و تونلها ، بخش مهمی از معدنکاری زیرزمینی را تشکیل می دهد گاهی تا ۲۵ درصد از مجموع سنگ شکسته شده در یک معدن از حفر تونل ها و راهروها بدست می آید. به عنوان مثال به هنگام استفاده از روش استخراج تخریب طبقات فرعی و روش استخراج اطاق و پایه مقدار نسبتاً زیادی سنگ شکسته شده در طول آماده سازی راهروها بدست می آید و باز اگر به مقدار سنگ شکسته شده که جهت حمل و نقل ، تهویه و تونل های اکتشافی لازم است توجه شود بآسانی می

توان دریافت که طراحی و حفر تونل های و راهروهای سنگی نقش عمده ای در اقتصاد معدن بـازی می کنند.

افزایش مکانیزاسیون در معدنکاری، تونلها و راهروهایی با مقـاطع بـزرگ را جهـت و حمـل و نقـل ماشین آلات معدنی طلب می کند. استفاده از ماشین آلات مدرن موجب از بین رفتن کار طاقت فرسای روشهای سنتی و دستی شده و شرایط محیط کار را بهبود بخشیده است.

در این موارد روشهای مدرن نسبتاً زیادی را می توان بکار گرفت، اما تجـارب کـاری کـه در کـار بـا سـنگ بدسـت آورده اسـت (نظیـر اسـتفاده از نقـاط ضـعف طبیعـی سـنگ در هنگـام حفـر) فـدای مدرنیزاسیون می گردد. با برقراری فاصله های زمانی جداگانه برای حفاری، بارگیری و حمل و نقـل، باید تمام توجه خود را بر طراحی هر چه بهتر آرایش چالهای تونل متمرکز نمود.

از آنجائیکه با دستگاه های جدید چالهای بزرگتری را می توان حفر کرد. بدین طریـق، تعـداد چالهـا کاهش می یابد از طرف دیگر در این صورت احتمالاً دقت دستگاه های پنوماتیکی دستی را نخواهیم داشت و چالهای بزرگتر موجب می شوند که صدمه بیشتری به سنگ های باقی مانده در دیواره های تونل ها وارد شود.

البته دقت لازم را می توان اخیراً با دستگاه های اتوماتیک جامبو دریلر که بازوهای آن تحت زوایـای مختلف می توانند عمل کنند، بدست آورد برای یک تونل قوسی با مقطع بـزرگ احتیـاج بـه روشـی خاص و دقت بیشتری در اجرای مراحل آتشباری آن می باشد تا از سقوط سـنگ سـقف جلـوگیری کرده و زمان پایداری آن را بیشتر می کند .

ضریب ایمنی تونلهای معدنی کمتر از تونلهای راه و راه آهن است زیرا عمر تونلهای معدن در مقایسه با سایر تونلها کمتر است. عمر مفید تونلهای معدنی تابع نوع استفاده از آن و هدف از حفر تونل مـی

باشد. برخی از تونلهای معدنی مثل تونل های شبکه بندی کارگاه استخراج کافی است عمری کمتر از یک ماه داشته باشند و بعضی دیگر مثل تونلهای باربری اصلی تا پایان عمر معدن باید دوام داشته باشند در حالی که تونلهای راه، راه آهن ، مترو و نظایر آنها باید سالهای سال و برای چندین نسل باقی بمانند.

تونل های معدنی به شرح ذیل تقسیم بندی می شوند:

۱- **تونل های اکتشافی**: این گونه تونل ها برای اکتشاف معادن جدید بکار می روند و معمولاً عرض کمی در حد یک متر دارند.

۲- **تونل های استخراجی**: این تونل ها رگه ی معدنی را تعقیب می کنند تا مواد معدنی استخراج شوند و ممکن است فقط نقش کارگاه استخراج را داشته باشند .در این صورت اغلب مقاطع آنها شباهتی به تونل نداشته و با پیشروی در رگه ی معدنی فقط فضای خالی بین سنگ ها را ایجاد می کند و برای پیشروی وسایل حفاری لازم است مجدداً پر شوند. حداقل عرض این تونل ها به گونه ای طراحی می شوند که بتوان توسط لوکوموتیو، مواد استخراجی را به بیرون منتقل کرد.

۳- **تونل های تهویه**: اینتونل ها شکل و مقطع خاص و شیب معینی ندارند. برای ایجاد مسیر های تهویه ی هوا از داخل تونلها به روی زمین در کوتاه ترین مسیر و کمترین سطح مقطع بکار می روند. به این نوع تونلها را تونل های ایزوبویکا نیزمی گویند.

۴- **تونل های دسترسی**: این نوع از تونل ها معمولاً عمود بر لایه معدنی حفر می شوند تا پس از رسیدن به لایه های معدنی، بتوانند آن ها را استخراج نمایند.

۵-**تونل های زهکشی**: این گونه تونل ها جهت استخراج آب در حین برخورد تونل معدنی به لایه های آبی و یا جهت زهکشی مواد اسیدی معدن به خارج مورد استفاده قرار می گیرند. برای اینکه آب

لایه های بالاتر زهکش شود معمولاً در تراز پایین تر نسبت به حفر تونل بعنوان زهکش حفر می نمایند .سطح مقطع این گونه تونل ها به شکل دایره ای و حداقل ممکن می باشد.

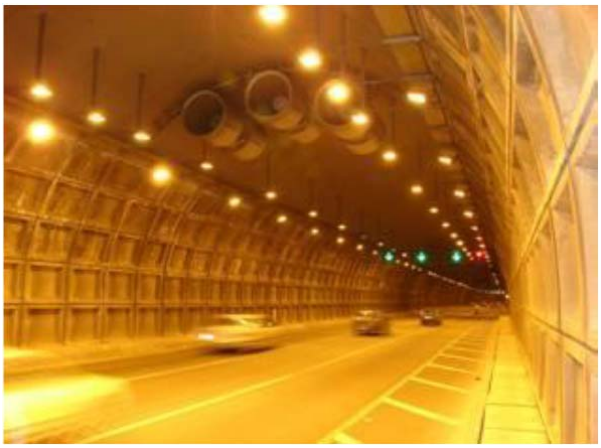
شکل ۹-۱. تونل استخراجی در یکی از رگه های تونل معدن

شکل ۱۰-۱: تونل معدنی مهار شده به وسیله قاب فلزی در چین

۱-۴-۳- تونل های شهری:

تونل های شهری یکی از راهکارهای غیر قابل اجتناب در جهت گسترش مسیرهای ارتباطی هستند که اجرای آنها در بلند مدت باعث کاهش هزینه های عمومی می شود و مزایای متعدد اجتماعی، محیط زیستی و غیره به همراه دارد. تحقیقات متعدد نیز نشان دهنده روند رو به رشد استفاده از فضاهای زیرزمینی در جهان می باشد و شهرهای ایران نیز از این امر مستثنی نمی باشند. در زیر به برسی چند نمونه از تونل های شهری ایران می پردازیم:

تونل رسالت: بزرگراه رسالت یکی از طولانی ترین مسیرهای شرقی- غربی تهران می باشد. این بزرگراه شرق تهران را از خیابان دماوند به غربی ترین نقطه تهران در محدوده شهرک راه آهن متصل می نماید. تونل های رسالت با ۱۹۶۴ متر طول شامل ۲ تونل رفت و برگشت با سه خط عبوری و در دو قطعه است که قطعه بزرگتر ۸۲۲ متر و قطعه کوچک آن ۱۶۰متر طول دارد. این دو تونل عریض با قطر حدود ۱۷ متر در آبرفت تهران حفاری شده و دو تونل فقط ۳/۵ متر از یکدیگر فاصله دارند. عرض دهانه های داخلی هر تونل پس از تکمیل پوشش بتن مسلح ۱۳/۵ متر است. در این تونل از سیستم های هوشمند استفاده گردیده است . سیستم نور پردازی و روشنایی در طول تونل با توجه به شرایط محیطی بیرونی و درونی تونل و متناسب با وضعیت دید راننده تنظیم می گردد. همچنین این سیستم در صورت افزایش غلظت آلاینده ها بر اثر افزایش بار ترافیکی در درون تونل از ورود خودروها به داخل آن ممانعت به عمل می آورد.



شکل ۱۱-۱ تونل رسالت

تونل توحید: تونل توحید با امتداد شمالی جنوبی در محدوده بزرگراه چمران، میدان توحید، میدان جمهوری، و بزرگراه نواب قرار دارد. دیوار میانی تونل های دوقلوی توحید به صورت شمع های در

جا ریز به قطر ۱/۵ متر و با فواصل ۴ متر از هم ساخته شده است .سطح مقطع این تونل ها ۳۰۵ متر مربع می باشد.

طول کل پروژه در هر جهت حدود ۳۰۰۰ متر شامل یک تونل به طول ۲۱۳۶ متر و دو رمپ شمالی و جنوبی با مجموع طول ۸۶۴ متر می باشد. مجموع طول تونل ها ۴۲۷۲ متر است.

شیب رمپ شمالی و جنوبی به ترتیب۶ و ۴/۲۹ درصد و شیب متوسط کل تونل حدود ۴ درصد می باشد. عرض تونل ها حدود ۱۲/۵ متر شامل دو پیاده رو با عرض ۰/۵ متر برای عبور و مرور پرسنل و مهندسان خدمات تونل در دو سمت تونل ها و مسیر عبور مرور وسایط نقلیه در ۳ خط مجزا و یک خط اورژانس در هر جهت با مجموع عرض ۱۱ متر می باشد. ارتفاع این تونل ها که با مقطع نعل اسبی ساخته شده اند ۸/۵ متر می باشد .این تونل مجهز به ژنراتورهای اختصاصی بوده که در هنگام قطع سراسری شبکه برق تهران، تونل بصورت خودکار دارای برق خواهد بود همچنین جهت تهویه آن از ۷۰ دستگاه جت فن و۱۱ دستگاه اگزاست فن بهره گرفته شده است. این تونل بمانند تونل رسالت دارای سامانه هوشمند تنظیم نور بیرونی و درونی تونل می باشد. بکارگیری بیش از ۳ هزار شمع و ۲۵ هزار قطعه بتونی و نصب سامانه هوشمند در برابر زلزله باعث گردیده این سازه در برابر زلزله های ۷ و ۸ ریشتری مقاوم بوده و از آن بعنوان پناهگاهی برای اسکان مردم در هنگام وقوع زلزله ها نامبرده شود.

شکل ۱۲-۱. تونل توحید

تونل نیایش: طرح اتصال بزرگراه نیایش به بزرگراه صدر به منظور کاهش مشکلات ترافیکی شمال تهران از طریق اجرای دو تونل مجزای شمالی و جنوبی اجرا می شود. طول تقریبی هر یک از تونل ها حدود ۳۶۵۰ متر می باشد. مسیر تونل های رفت و برگشت از انتهای غربی بزرگراه صدر آغاز شده و پس از عبور از زیر بلوار آفریقا و خیابان ولی عصر در ضلع جنوبی پارک ملت و در بخش شمالی بزرگراه کردستان به بزرگراه نیایش می رسد. ارتفاع هر یک از تونل ها دارای ۱۱/۷۵ متر و عرض آن ها حدود ۱۴ متر می باشد.

هر یک از تونل ها دارای دو خط ماشین رو و مسیر باریک تر امداد می باشد (۲/۵ خط). بیشترین میزان روباره در طول مسیر تونل در حدود ۵۳ متر است.

شکل ۱۳-۱. تونل نیایش در حال اجرا

۱-۴-۴- تونل های انتقال و انحراف آب و فاضلاب:

این گونه تونل ها معمولاً دارای مقطع دایره ای می باشند که سطح مقطع آنها بسته به دبی آب انتقالی دارد. تونل های انحراف آب نیز در ابتدای ساخت سد ها جهت انحراف آب رودخانه کاربرد دارد تا بتوانند سد را در محل اصلی آن بسازند. در زیر به برسی چند نمونه از تونل های انتقال آب در ایران می پردازیم:

تونل انتقال آب دز به قمرود: طرح انتقال آب دز به قمرود یکی از طرح های انتقال آب از سرشاخه های دز به ایران مرکزی می باشد. طرح انتقال آب دز به قمرود از سه قسمت عمده تشکیل شده است و شامل مجموعا ۹۴,۱ کفلومور تونل در هفت قطعه می باشد که پنج قطعه به طول ۴۵ کیلومتر به صورت مکانیزه و دو قطعه به طول حدود۴ کیلومتر به صورت سنتی حفاری شده اند. تعدادی آبگیر،۶ بند انحرافی سد کوچری و حدود ۱۰۷ کیلومتر خط لوله آبرسانی این طرح را تکمیل می کنند.

در اجرای این طرح انواع سازه های آبی بکار گرفته شده و شامل چهار سد انحرافی **است** که نقش آنها جمع آوری آب از دره های شهر سوان الیگودرز و سرشاخه های دز است.

میزان آب خارج شده از این چهار دره جهت تامین آب شرب شـهرهای هـدف سـالیانه حـدود ۱۸۱ میلیون متر مکعب خواهد بود. علاوه بر چهار سد انحرافی، سه تونل به ترتیب به طول های یک هزار و۲۰۰ ، دو هزار و دو هزار و۵۰۰ متر با قطر تقریبی چهار متر اجرا شده که نقش آنهـا جمـع آوری و انتقال آب به ابتدای سامانه انتقال آب است.

طرح شامل سامانه جمع آوری آب (شامل چهار سدانحرافی و سه تونل) و سامانه های انتقال (**شامل** یک تونل به طول ۴ کیلومتر و قطر چهار متر که آب را از دره دایی به رودخانه انوج منتقل می کند که پس از آن یک کانل آب بتونی به طول هفت کیلومتر احداث شده و آب به رودخانه انـوج مـی رسـد، است .پس از آن تونل بلند ۳۶ کیلومتری آغاز می شود که آب را ازشهرسوان الیگودرز بـه گلپایگـان منتقل میکند و بر این اساس سامانه انتقال آب این طرح شامل تونل ۹ کیلومتری کانـل بتـونی هفـت کیلومتری و تونل بلند ۳۶ کیلومتری است این تونل بلندترین تونل انتقال آب در خاورمیانه است. در مجموع ظرفیت انتقال و جمع آوری آب در این طرح ۲۳ متر مکعـب بـر ثانیـه اسـت در حـالی کـه بیشترین میزان آبی که از سد کرج به تهران می آید ۱۱ متر مکعب بـر ثانیـه بـوده و ظرفیـت سـامانه یادشده بیش

از دو برابر آب انتقالی از سد کرج به تهران است. این سامانه سالیانه۱۸۳ میلیون متـر مکعـب آب بـه پشت سد کوچری منتقل می کند. ظرفیت نهایی انتقال آب در این پروژه۵۰۰۰ لیتر در ثانیه است.

شکل ۱۴-۱. اجرای تحکیمات تونل انتقال آب دز به قمرود

تونل انتقال آب کرج به تهران: پروژه تونل انتقال آب از سد تنظیمی کرج به تصفیه خانـه شـماره ۶ تهران در محدوده شمال غربی تهران، شامل یک رشته تونل با سطح مقطع دایروی شکل است که در دو قطعه مجزا با مجموع طول ۳۰ کیلومتر در حال اجرا است. گستره طرح از شمال غربی تهران آغاز شده و به سمت شمال غربی و از میان کوهستانهای پرفراز و نشیب رشته کوه البرز تا مجـاورت سـد تنظیمی کرج امتداد یافته است. طول قطعه اول حدود ۱۶ کیلـومتر و طـول قطعـه دوم ۱۳/۵ کیلـومتر. حفاری با استفاده از یک دستگاه TBM با سپردوگانه انجام گرفته است. قطرحفاری تونل ۴/۶۶۵ متر و قطرتمام شده ۳/۹ متر می باشد.

شکل ۱۵-۱ اتصال دستگاه حفاری TBM با سپردوگانه در تونل انتقال آب کرج به تهران

۱-۴-۵- تونل های پدافند غیر عامل:

همان طور که می دانید، پدافند غیر عامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می گردد که به بکارگیری جنگ افزار نیاز ندارد و با اجرای آن می توان از وارد شدن خسارات مالی به تجهیزات و تاسیسات حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی(سیل، زلزله و...) و تلفات انسانی

جلوگیری نموده و یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل ممکن کاهش داد. پدافند غیرعامل به معنای کاهش آسیب پذیری در هنگام بحران، بدون استفاده از اقدامات نظامی و صرفا با بهره گیری از فعالیتهای غیرنظامی، فنی و مدیریتی است. با عنایت به موارد معنونه بهترین گزینه جهت این موضوع استفاده از تونل های پدافند غیر عامل می باشد برای مثال جهت نیرو گاه های برق می توان از تونل های پدافندی استفاده نمود.

در تونل های پدافند غیرعامل علاوه بر استفاده از اصول دقیق مهندسی درشناسایی حفاری و تحکیمات و استحکام تونل پارامتر اختفاء، استتار و دسترسی بسیارحائز اهمیت است. در تمامی سازه های زیرزمینی باید اصول پدافند غیر عامل لحاظ شود تا در مواقع بحران به عنوان جان پناه مورد استفاده قرار گیرند در غیر این صورت این سازه ها خود به عنوان یک گور دست جمعی عمل می کند. مترو یک نمونه بارز آن به شمار می آید.

۱-۵- مزایای استفاده از تونل

تکنولوژی طراحی و ساخت تونل ها در طی ده های گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است، به طوری که احداث تونل از قطر ۳۰ سانتیمتر تا ۱۵ متر و از چند متر طول به چندین کیلومتر در لایه های متنوع و اعماق مختلف زمین امکانپذیر گشته است.

تنوع کارکرد تونل در بخش های مختلف علوم مهندسی از جمله عمران، صنعت و معدن بسیار متنوع است امروزه به دلایل متعددی استفاده از فضاهای زیرزمینی رشد فزاینده ای داشته است. در ادامه به برخی از مزایای استفاده از تونل می پردازیم:

۱- همخوانی محیط اطراف تونل بعنوان وجود یک حصار و ساختار طبیعی و فراگیر

۲- محدودیت کمتردر احداث سازه های بزرگ به دلیل نیاز کمتر به استفاده از وسایل نگهداری عمده در مقایسه با احداث همان سازه بر روی زمین همچنین از دیگر مزایای تونل ها در راه های ارتباطی و ترافیکی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- **ایمنی عبور و مرور:** بر طبق تجربه بین المللی، بطور عموم تونلها نسبت به بزرگراه ها دارای خطر کمتری هستند. علت آن این است رانندگان در تونل ها با هشیاری بیشتر رانندگی می کنند و نیز به این خاطر است که مسائل ترافیکی و فنی در تونلها بهتر قابل پیش بینی است، چون طراحی استاندارد و دقیقی در تونل صورت می گیرد .تعداد خرابی اتوموبیل ها و یا توقف ها و یا تصادف هادر تونل به چند عامل بستگی دارد که عبارتند از: استاندارد طراحی بخصوص جهت و مقطع تونل، حجم ترافیک، میزان وسائط نقلیه سنگین و نیز تجهیزات کنترل و مراقبت تونل.

در گزارش مرسوم به PIARC ایمنی ترافیک مربوط به ۳۴ تونل مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است مشخص گردید، تونلهای دو بانده به طول ۵ تا ۲۰ کیلومتر که در کشورهای مختلف در حال بهره برداری هستند تقریباً مانند یک دیگرعمل نموده و قابل مقایسه با هم می باشند، زیرا کنترل ترافیک در آنها تقریباً بصورت ساعتی انجام می شود. بالعکس تونل های راه های روستایی بسیار متفاوت می باشند. همینطور در تونل های خیابانی در مناطق شهری، استانداردها، حجم ترافیک، ایمنی و کنترل آنها بطور قابل ملاحظه ای فرق می کند. در رابطه با تونلهای زیرآب بخاطر شیب طولی زیاد،

موضوع خیلی بدتر نمایان است. براساس گزاش یاد شده سطح خرابی اتومبیل ها در همه حالتها باستثناء تونلهای راه های قدیمی شبیه هم هستند. میزان تصادفات در تونلهای دو طرفه بلند و تونلهای بزرگراه های غیر شهری کمتر می باشد.

در تونلهای خیابانی میزان تصادفات کمی بیشتر ولی بالاترین آمار تصادف مربوط به تونلهای راههای قدیمی با شیب نامتعادل است.

۲- کوتاه شدن مسیر و افزایش راندمان ترافیکی

۳- جلوگیری از ریز کوه و بهمن در جاده های کوهستانی

۴- ایمنی بیشتر در مواقع بحران از قبیل زلزله و جنگ

۵- بهبود شرایط هندسه مسیر

۶- جلوگیری از اختلال در چشم انداز زمین و شهر

۷- عدم تأثیر بر روی استفاده از سطح زمین و محیط اجتماعی

۸- کاهش آلودگی صوتی نسبت به جاده های و بزرگراه های سطحی.

منابع مورد استفاده:

- اصول مهندسی تونل – احسان حقیقت خرازی، مصطفی آدرسی،حسین دهقانی– انتشارات سیمای دانش
- راهنمای فنی طرح ریزی و ساخت تونل های جاده ای و عوامل شهری جلد ۱– زهرا زارعی نرمیق، حسن شرفخانه، حسین بلاش – انتشارات سرسبز
- درخشش تمدن در اعماق زمین مروری بر سازه های زیرزمینی ایران از گذشته تاکنون – سیامک هاشمی – انتشارات شادرنگ
- جزوه درس تونل سازی دکتر پلاسی – مدرس دانشگاه تهران
- جزوه آشنایی با تونل و نقشه برداری تونل مهندس یاسر عشورزاده