www.icivil.ir

پرتال جامع دانشجویان و مهندسین عمران

ارائه کتابها و جزوات رایگان مهندسی عمران

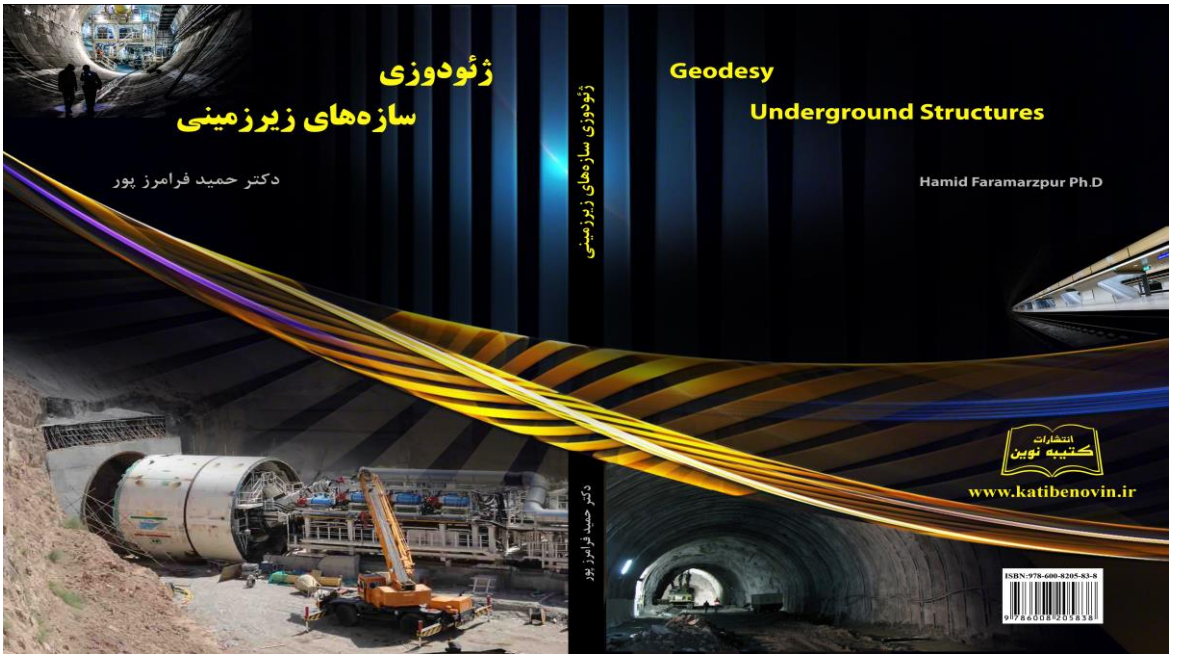
بهترین و برترین مقالات روز عمران

انجمن های تخصصی مهندسی عمران

فروشگاه تخصصی مهندسی عمران

@icivilir

icivil.ir


ژئودوزی
سازه‌های زیرزمینی
دکتر حمید فرامرز پور
ژئودوزی سازه‌های زیرزمینی
دکتر حمید فرامرز پور
Geodesy
Underground Structures
Hamid Faramarzpur Ph.D
انتشارات
کتیبه نوین
www.katibenovin.ir
ISBN:978-600-8205-83-8

بسم الله الرحمن الرحیم

ژئودوزی سازه‌های زیرزمینی

نویسنده:

دکتر حمید فرامرز پور

انتشارات کتیبه نوین

www.katibenovin.ir

۱۳۹۵

سرشناسه	:	فرامرزپور، حمید، ۱۳۴۲
عنوان و نام پدیدآور	:	ژیودوزی سازه‌های زیرزمینی/ نویسنده حمید فرامرزپور
مشخصات نشر	:	شیراز: کتیبه نوین، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	:	۲۱۲ص :.مصور
شابک	:	978-600-8205-83-8
وضعیت فهرست‌نویسی	:	فیپا
موضوع	:	تونل‌ها
موضوع	:	Tunnels
موضوع	:	تونل‌سازی
موضوع	:	Tunneling
موضوع	:	تونل ها -- طرح و ساختمان
موضوع	:	Tunnels -- Design and construction
موضوع	:	سیستم‌های حمل و نقل هوشمند
موضوع	:	Intelligent transportation systems
موضوع	:	تونل‌های ریلی -- ایران
موضوع	:	Railroad tunnels -- Iran
رده‌بندی کنگره	:	TA۸۰۵/ف۴۹ ۱۳۹۵
رده‌بندی دیویی	:	۶۲۴/۱۹۳
شماره کتابشناسی ملی	:	۴۶۲۷۰۶۲

عنوان کتاب:	ژئودوزی سازه‌های زیرزمینی
نویسنده:	دکتر حمید فرامرز پور
ناشر:	کتیبه نوین
نوبت چاپ:	اول ۱۳۹۵
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۸۲۰۵-۸۳-۸
شمارگان:	۱۰۰۰ جلد
ویراستار، صفحه‌آرا و طراح جلد:	علی داودی
چاپ و صحافی:	چاپ گاندی
قیمت:	۲۰۰۰۰ تومان

پیشگفتار

در جهانی که جمعیت مردمانش در حال فزونی و با گسترش و بزرگ شدن شهرها همراه می باشد سیستم حمل نقل موجود پاسخ گوئی رشد افزایش این تعداد جمعیت شهرهای بزرگ نمی‌باشند و این باعث به وجود آمدن مشکلات زیادی در سیستم حمل و نقل شهری و ترافیک موجود در خیابان‌ها و سرعت کم سیستم حمل نقل زمینی می گردد و در پی آن آلودگی‌های آب هوا، صوتی و محیط‌زیست این شهرها را در پی دارند و موجب شکایت و ناخرسندی مردم از وضعیت موجود می شود و تمامی این آلودگی‌های محیط زیست بر سلامت جسمی و روحی و روانی ساکنان این کلان شهرها اثرات منفی می گذارد.

گسترش جمعیت در کلان شهرهای بزرگ دنیا مشکل دیگری را هم گریبانگیر ساکنین این شهرها گردانیده است و آن پدیده گران شدن زمین‌های این شهرها و بالطبع گران شدن مسکن را در پی داشته است در نتیجه سیستم حمل نقل زمینی در این شهرها بسیار گران برای بودجه شهرها و بدنبال آن دولت‌ها تمام می‌شود و این در حالی است که اگر این سیستم حمل و نقل و تردد وسایل نقلیه عمومی و شهری در زیر زمین اجرا گردد بسیاری از مشکلات و هزینه‌ها و در پی آن آلودگی‌ها کلان شهرها هم کمتر می‌گردد.

استفاده از سیستم حمل نقل مترو مزیت‌های زیادی دارد از جمله جابجایی و حمل تعداد زیاد مسافر و در بعضی مواقع حمل بار در زیرزمین و خارج از معابر و جاده‌های شهری می‌باشد که در روی ریل‌های در تونل‌های زیرزمینی و یا در روی پل‌های در بالای زمین نصب شده‌اند، حرکت می‌کند حرکت قطارها با سرعت مناسب و امنیت قابل قبول آن موجب صرفه‌جوئی در مصرف انرژی و کمتر شدن آلودگی‌های ناشی از سوخت های فسیلی و گازهای گلخانه‌ای را می‌گردد.

با توجه به بررسی موضوع ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های زیرزمینی و مطالعه خرابی‌های صورت گرفته از گذشته تاکنون دانشمندان به این نتیجه رسیده‌اند که بهترین، ایمن‌ترین و مؤثرترین سیستم حمل و نقل و جابجایی مسافر و بار در شرایط کنونی برای کلان شهرهای بزرگ بهره‌برداری و استفاده از سیستم و شبکه حمل و نقل زیرزمینی مترو می‌باشد.

و در این کتاب خلاصه‌ای بر تاریخچه ساخت و بهره‌برداری تونل‌های حمل نقل و شبکه زیرزمینی مترو، انواع تونل‌ها، نوع حفاری تونل‌ها و هدایت و اجرا صحیح نقشه‌برداری برای پیاده کردن مسیر پروژه تونل‌های شبکه مترو را در زیر زمین توضیح داده‌ام و سپس روش‌های

انتقال مختصات نقاط از سطح زمین به زیر زمین و تعیین مقدار اندازه خطای انتقال این نقاط (روش کوچک‌ترین مربع Adjustment) به دست آورده و توضیح داده شده و با توجه به قرار گرفتن بسیاری از شهرهای ایران در روی کمربند زلزله و گسل‌های موجود که باعث خرابی سازه‌های زیرزمینی و همچنین تونل‌های مترو می‌گردند برای این هدف از آنالیز نشست (مانیتورینگ) با محاسبات ریاضی برای سازه‌های زیرزمینی در حال ساخت و پس از ساخت و در حین بهره‌برداری از این سازه‌ها را بررسی کرده و توضیح داده ام.

سخن آخر این است که اذعان دارم که هر تألیف، ترجمه و نوشتاری خالی از اشکال نیست و همیشه اعتقاد من بر این است که تنها دیکته نانوشته غلط ندارد و با این فرض، امیدوارم که خوانندگان و اساتید محترم با پیشنهادات اصلاحی خود موجب کیفیت بیشتر این کتاب گردند.

دکتر حمید فرامرزپور

فهرست مطالب

عنوان	صفحه

فصل اول: تونل ۱۱

تاریخچه تونل و ساخت اولین تونل‌ها ۱۳

مقدمه بر سازه‌های زیرزمینی ۱۵

ساخت اولین تونل‌ها با ابزار و وسایل پیشرفته در ایران و جهان ۱۷

آشنایی با انواع تونل‌ها ۲۰

۱. تونل‌های حمل و نقل و ترانسپورت ۲۱

۲. تونل‌های صنعتی ۲۱

۳. تونل‌های تأسیسات شهری ۲۱

۴. تونل‌های معدنی ۲۱

۵. تونل‌های خاص ۲۲

حفاری تونل در کوهستان ۲۳

حفاری و ساخت تونل در زیر آب ۲۶

سیستم‌های کمکی و جنبی تونل‌ها ۳۱

فصل دوم: طراحی و ساخت تونل‌های مترو ۳۳

جنرال پلان و طراحی تونل‌های مترو ۳۵

مهندسی زمین‌شناسی در حفر و ساخت تونل‌ها ۳۷

تعیین هزینه‌های پروژه ساخت شبکه تونل‌های مترو ۳۸

اجزاء اصلی و مهم سیستم حمل نقل شبکه‌های مترو ۴۰

طراحی پروژه سازه‌های زیرزمینی ۴۱

انواع تونل نسبت به عمق حفاری ۴۴

روش‌های حفاری تونل در زیر سطح شهرها ۴۵

حفاری تونل در شهرها با روش کند و پوش ۴۵
حفاظت از کانال حفاری شده تونل ۴۶
سازه نگهبان برای حفاظت از کانال حفاری شده تونل ۴۸
روش‌های حفاری تونل در شهرها به صورت رو بسته ۶۱
طرح هندسی تونل با مشخصات و ابعاد مقطع تونل‌ها ۶۳
فرم و شکل هندسی تونل‌های مترو ۶۴
فصل سوم: حفاری تونل ۷۱
حفاری تونل ۷۳
حفاری به روش آتشباری ۷۳
حفاری با روش مکانیکی ۷۴
پوشش سازه درونی تونل‌های مترو ۸۰
فصل چهارم: عملیات نقشه‌برداری زیرزمینی در پروژه ساخت تونل ۸۵
عملیات ژئودوزی برای اجرا و پیاده کردن محور تونل‌های مترو ۸۷
شبکه‌های اصلی ژئودوزی در سطح و زیر سطح زمین ۸۸
تعیین ژیزمان با روش مغناطیسی در زیر زمین در داخل تونل ۹۵
تعیین ژیزمان توسط دستگاه ژیروتئودولیت در زیرزمین و داخل تونل ۹۶
تعیین ژیزمان توسط روش کلیماتور در زیر زمین ۹۷
انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از طریق یک چاه و دو شاغول ۹۸
روش انتقال مختصات نقاط با دو شاغول و یک چاه (روش مثلث) ۱۰۱
بررسی و آنالیز روش‌های مختلف انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از روی... ..... ۱۰۲
سرشکنی نتایج خطاء مشاهدات اندازه‌گیری‌های انجام شده در روش... ..... ۱۰۲
نمونه محاسبه عملیات انتقال ژیزمان نقاط از سطح زمین به زیر زمین و ۱۰۸
کنترل و محاسبه عملیات ژئودوزی انتقال مختصات و ژیزمان به داخل تونل در ۱۱۱
سرشکن کردن خطای اندازه‌گیری اضلاع مثلث ۱۱۲

محاسبه سرشکنی ژیزمان شبکه پیمایش در زیرزمین (داخل تونل‌ها) ۱۱۷
محاسبه متوسط مربع خطای تعیین جهت..... ۱۱۸
انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از طریق دو شاغول و دو چاه..... ۱۲۰
نمونه‌ای از انتقال ژیزمان نقاط به زیر زمین با روش دو چاه و دو شاغول و مثلث ۱۲۶
انتقال ارتفاع از سطح زمین به زیر زمین داخل تونل..... ۱۳۳
حفاری تونل از دو جبهه کاری ۱۳۸
تعیین مقدار اندازه خطاء تلاقی محور تونل ۱۴۰
تعیین مقدار خطای تلاقی محور تونل با انتقال مختصات از طریق پارتال (پیشانی تونل) .. ۱۴۲
عملیات ژئودوزی برای هدایت صحیح دستگاه T.B.M..... ۱۴۳

فصل پنجم: نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی ۱۴۷

نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی ۱۴۹
علت‌های نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی..... ۱۵۰
بررسی نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی ۱۵۳
اندازه‌گیری و تعیین مقدار نشست سازه‌های زیرزمینی..... ۱۵۳
بررسی نشست طاق تونل مونتاژ شده از قطعات سگمنت ۱۶۵
بررسی نشست سازه‌های تونل‌های متروی ساخته شده از بتون‌آرمه..... ۱۶۹
محاسبه و تعیین مقدار اندازه نشست سازه‌های زیرزمینی..... ۱۷۱
روش انتقال مختصات و ژیزمان به زیر زمین برای تعیین نشست تونل‌های مترو..... ۱۷۳
ارزیابی دقت و صحت محاسبه اندازه‌گیری ژیزمان در شبکه پیمایش..... ۱۷۵
بررسی و محاسبه نشست و دفرمه شدن رینگ‌های تونل..... ۱۸۰
بررسی محاسبه نشست یک نقطه از رینگ‌های تونل..... ۱۸۴
در (فرمول ۱۹–۵) مقدار اندازه‌های آمده فرمول بدین صورت می‌باشند: ۱۸۶
تعیین و تهیه متد و روش نشست و محاسبه اعوجاج گردی دیواره تونل..... ۱۹۸

منابع ۲۰۹

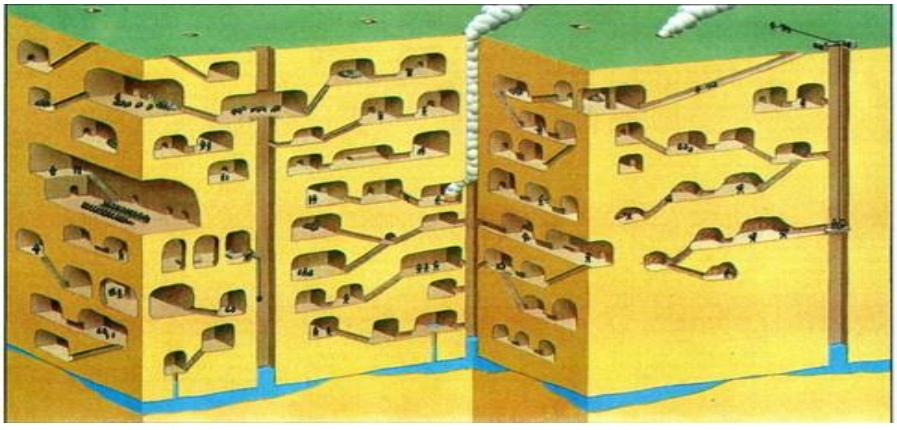
فصل اول:

تونل

تاریخچه تونل و ساخت اولین تونل‌ها

انسان‌های عصر حجر خانه‌های خود را در دل کوه‌ها برای جلوگیری از بلاهای طبیعی و دوری از گزند حیوانات خطرناک حفاری و می‌ساختند، یافته‌های زمین‌شناسی در جهان نشان می‌دهد که در کشورهای روم، مصر، هندوستان، ایران و کشورهای خاور دور پیشینیان ما با استفاده از وسایل حفاری اولیه اقدام به ساختن تونل‌های در دل زمین و یا کوهستان‌ها می‌کردند و یکی از نمونه‌های باقی مانده از گذشته‌های دور تاکنون شهر «کاپودوسیا» «Cappadocia» در کشور ترکیه است مردمان این شهر (تصویر ۱-۱) که منازل خود را جهت جلوگیری از حوادث و خطرات طبیعی در تونل‌های زیرزمینی می‌ساختند.

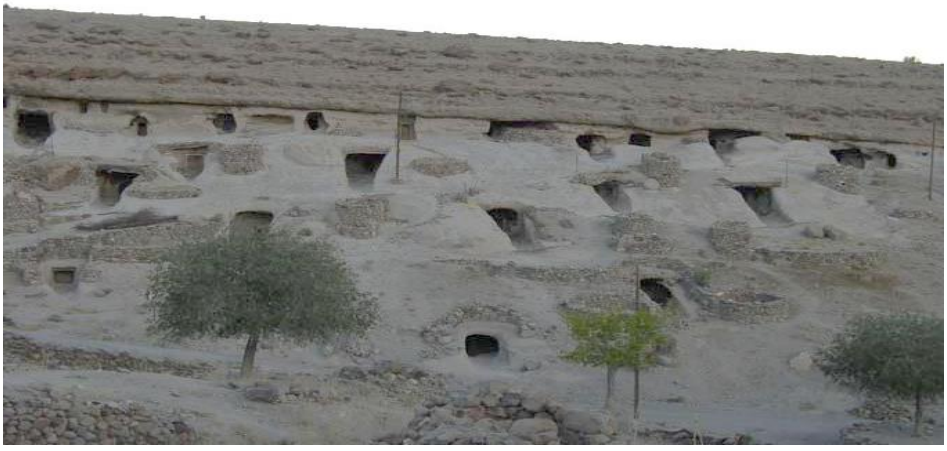
(تصویر ۱-۱) برش شهر زیرزمینی کاپودوسیا را در جنوب غربی ترکیه نشان می‌دهد.



در سرزمین ما ایرانیان از هزاران سال قبل تاکنون مردمان از ساخت تونل برای استفاده در خانه‌سازی و انتقال آب‌رسانی بهره می‌برند، شاهد این گفته‌ها روستایی «میمند» (تصویر ۲-۱) واقع در ۳۸ کیلومتری شمال شهرستان شهر بابک از توابع استان کرمان است، به گفته باستان

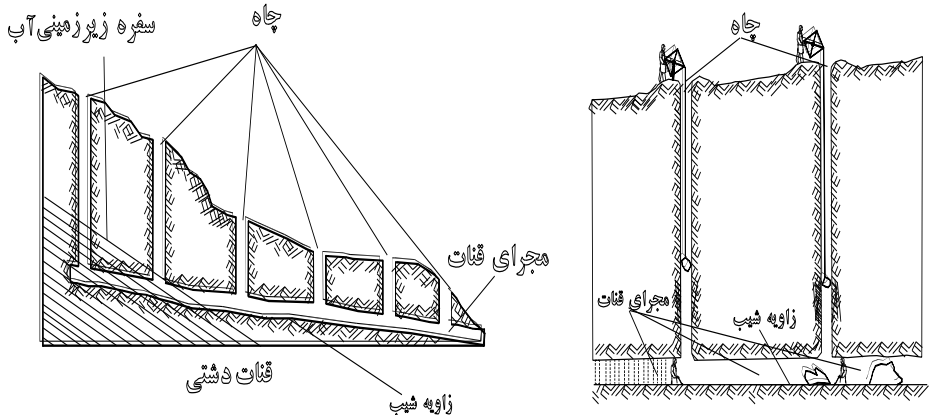
شناسان تاریخچه ساخت روستایی میمند کرمان به ۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ سال قبل بر می‌گردد و این روستا نشانگر زحمات و تلاش‌های مردمان این سرزمین کهن می‌باشد. ایرانیان از گذشته قدیم تا حال برای انتقال و جابجایی آب شرب مصرفی خود حفاری‌های زیادی در دل زمین‌های واقع در دامنه کوه ها و شیب‌های زمین‌های طبیعی انجام می‌دادند که قنات نامیده می‌شود، قنـات دارای یک مجرای تونل مانند زیرزمینی و چندین چاه عمودی است که مجرا زیر زمینـی را در فواصـل مشخص با سطح زمین مرتبط می‌سازد، با بررسی اثرات تاریخی توسط کارشناسان و متخصصین باستان‌شناسی نشان می‌دهد که اولین بار با استفاده از وسایل اندازه‌گیری شیب و تراز اولیه برای کنترل شیب و مسیر پروفیل قنات‌ها استفاده گردیده است.

(تصویر ۲-۱)



در زمین‌های شنی برای جلوگیری از تخریب چاه‌های ورودی بـه قنـات و همچنـین مجراهـای زیرزمینی قنات‌های را با رینگ‌های سفالی پخته شده به نام «نای» کار می‌گذاشتند یکی از ایـن نمونه قنات های ساخته شده در گذشته قنات «زارچ» واقع در استان یـزد اسـت کـه بـه عنـوان بلندترین و طولانی‌ترین قنات جهان نام گرفته است.

(تصاویر ۳-۱ و ۴-۱)

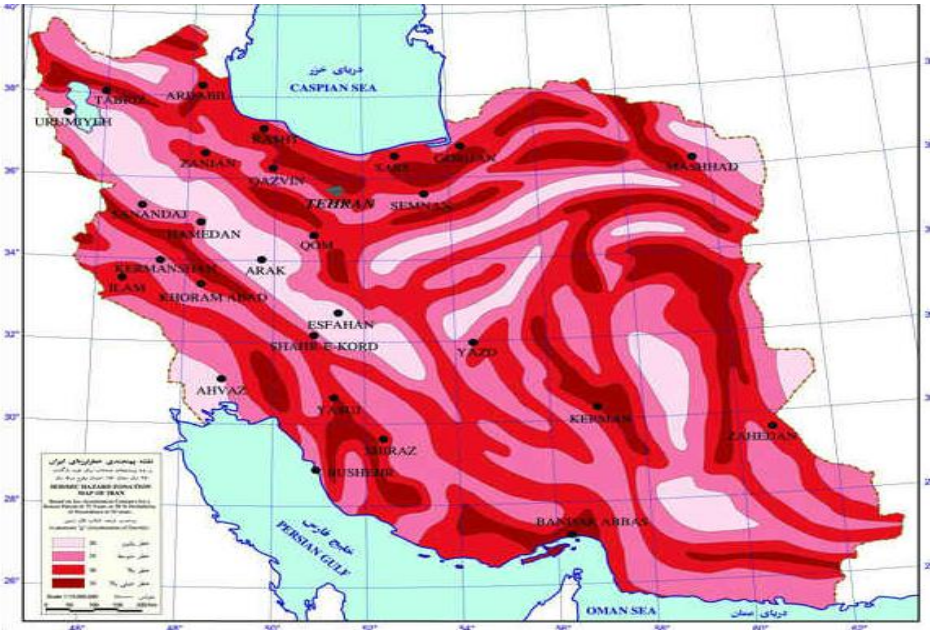


طول قنات زارچ واقع در استان یزد به ۷۰ کیلومتر و عمق مادر چاه این قنات به ۳۰۰ متر می‌رسد از تاریخ ساخت و حفاری این قنات نزدیک به ۲۴۰۰ سال می‌گذرد و طبق بررسی‌های به عمل آمده توسط کارشناسان حفاری و ساخت آن به قبل از دوره هخامنشیان بر می‌گردد، هم اکنون تعداد قنات‌های کشور ایران بالغ بر ۳۴۰۰۰ رشته تخمین زده شده است، در (تصاویر ۳-۱ و ۴-۱) نیمرخ ساخت و حفاری قنات را نشان می‌دهد.

مقدمه بر سازه‌های زیرزمینی

سازه‌های زیرزمینی و تونل‌ها هم‌اکنون جزء لاینفک شهرهای مدرن گردیده‌اند و در انواع مختلف برای کاربردها و مصارف خاصی ساخته می‌شوند با توجه به بررسی موضوع ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های زیرزمینی و استفاده از تجارب ساخت پروژه‌های زیرزمینی حمل نقل شهری از گذشته تا به حال و مطالعه خرابی‌های صورت گرفته در این سازه‌ها تاکنون به اثبات رسیده است که بهترین و ایمن‌ترین و مؤثرترین سیستم حمل و نقل و جابجایی مسافر و بار در شرایط کنونی در شهرهای کلان و نوین بهره‌برداری و استفاده از سیستم و شبکه حمل و نقل زیرمینی مترو می‌باشد.

(تصویر ۵-۱)



در خیلی از کشورهای جهان و همچنین کشور ما که در روی کمربند زلزله واقع می‌باشد که هر از چند گاهی زلزله‌های زیادی به وقوع پیوسته و باعث تخریب و خسارت‌های مالی و جانی گردیده است. سازه‌های زیرزمینی یکی از ایمن‌ترین سازه‌های ساخته شده دست بشر در مقابل زلزله‌ها می‌باشند، در (تصویر ۵-۱) مناطق زلزله‌خیز را در کشور ایران نشان می‌دهد که تقریباً اکثراً شهرهای بزرگ را در بر می‌گیرد.

در اکثراً شهرهای بزرگ جان پناهگاه‌های بزرگی را برای نجات و اسکان سکنه شهرها در هنگام بروز جنگ‌ها و در مقابل خطر بمباران‌ها ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرد در زمان وقوع جنگ می‌توان از شبکه‌های تونل‌های زیرزمینی مترو به عنوان پناهگاه و مکانی مقاوم برای حفاظت از جان شهروندان و یا اشیاء با ارزش ملی و مهم در برابر آسیب‌های ممکن ناشی از خطرات جنگ مورد استفاده بگیرد، بطور مثال در زمان وقوع جنگ جهانی دوم در کشورهای اروپائی قطارهای شبکه متروی شهرها از حرکت باز ایستاده و سیستم برق فشار قوی ریل سوم قطع و مترو به حالت تعطیل درآمده و از تونل‌های آن به عنوان جان‌پناه مورد استفاده قرارگرفته است و حتی از بعضی واگن‌های مترو به عنوان دفاتر اداری دولتی استفاده گردیده است.

(تصاویر ۶-۱ و ۷-۱)

از مهمترین وظایف کارکنان مترو نگه‌داری تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو در هنگام جنگ نگه‌داری از سیستم تهویه مطبوع شبکه تونل‌های مترو می‌باشد در زمان جنگ جهانی دوم کارکنان شبکه مترو شهر مسکو سعی در نگه‌داری سیستم تهویه و رساندن اکسیژن به داخل‌ها تونل‌های مترو می‌کردند آن‌ها بطور روزمره به سیستم‌های تهویه سرکشی کرده و در نزدیکی هر دستگاه تهویه هوا یک نفر از افراد نظامی قرار داده بودند که از نظر امنیتی مشکلی پیش نیاید و در زمان بمباران‌های شهرها در خصوص تخریب و یا از کار افتادن سیستم‌های تهویه هوا سریعاً اطلاع‌رسانی کنند. در (تصاویر ۶-۱ و ۷-۱) ایستگاه متروی شهر مسکو را در زمان جنگ جهانی دوم نشان می‌دهد که مردم و کارمندان از بخش‌های ادارات مهم دولتی در آنجا پناه گرفته و یا مشغول به کار و خدمت می‌باشند.

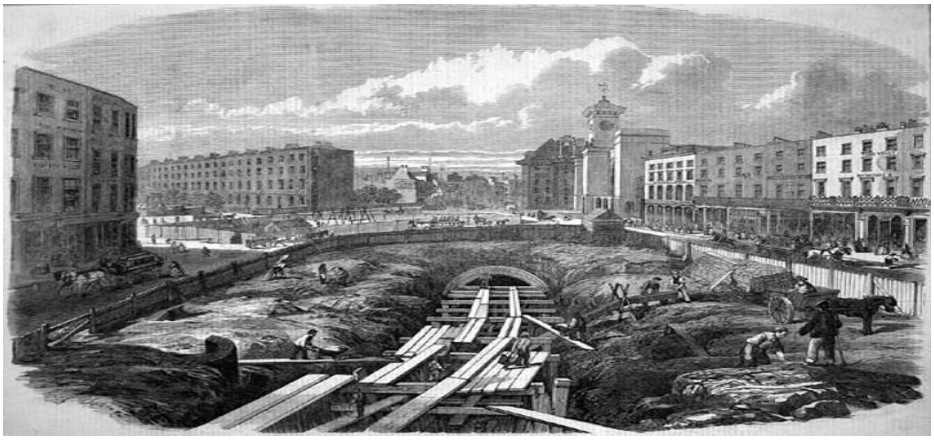
ساخت اولین تونل‌ها با ابزار و وسایل پیشرفته در ایران و جهان

اولین تونلی که در دوره‌های مدرن ساخته شده است تونل «مال پاس» با طول ۱۵۷ متر است (تصویر ۸-۱) که در سال ۱۶۸۱ میلادی حفاری و ساخت آن به پایان رسیده است، این تونل برای حرکت کشتی‌ها بر روی «کانال دومیدی» در جنوب فرانسه طراحی و ساخته شده بود و تونل مال پاس اولین تونل ساخته شده با کاربرد حفاری و استفاده از انفجار باروت در جهان بود.

(تصویر ۸-۱)

اولین تونل راه‌آهن در جهان در سال‌های ۱۸۳۰-۱۸۲۶ میلادی در کشور انگلستان و در شهر لندن ساخته شده است (تصویر ۹-۱) این تونل راه‌آهن در شبکه زیرزمینی متروی لندن خط لیورپول- منچستر برای جابه جائی و حمل نقل مسافر مورد بهره‌برداری قرار گرفته شده است.

(تصویر ۹-۱)



یکی از طولانی‌ترین تونل‌های که تاکنون به دست بشر ساخت شده است تونل یک طرفه‌ای با نام «تونل مون سینیس» (اسم کنونی«تونل فریژیوس») است، در (تصاویر ۱۰-۱ و ۱۱-۱) سمت راست ورودی تونل فریژیوس در کشور ایتالیا و سمت چپ خروجی آن در کشور فرانسه را نشان می‌دهد) این تونل در سال‌های ۱۸۷۰-۱۸۵۷ میلادی با طول ۱۳ کیلومتر در زیر کوه‌های آلپ ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است این تونل راه‌آهن کشورهای ایتالیا و فرانسه را به هم متصل می‌کند.

تونل فریژیوس توسط مهندسان و کارشناسـان ایتالیـایی از سـمت کشـور ایتالیـا و مهندسـان و کارشناسان فرانسه از سمت کشور فرانسه حفاری و اجرا گردیده است.

(تصاویر ۱۰-۱ و ۱۱-۱)

در ایران نخستین تونل حفاری و ساخته شده تونل «گدوک» بود که برای خطوط راه‌آهـن مـورد استفاده قرار گرفت (تصویر ۱۲-۱) این تونل در سال ۱۳۰۷ هجری شمسی در نزدیکی روسـتایی گدوک استان مازندران با طول ۲۸۸۷ متر ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

(تصویر ۱۲-۱)

پس از حفاری و بهره‌برداری از تونل راه‌آهن گدوک تونل دیگری برای حمل نقل جاده‌ای به نـام تونل کندوان ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفت، تونل کنداون یکـی از تونـل‌هـای بـزرگ و قدیمی است که استان مرکزی را به شهرهای نواحی شمال غرب ایران متصل می‌کند.

(تصویر ۱۳-۱)

آشنایی با انواع تونل‌ها

تونل‌ها با توجه به مصارف و نوع استفاده آن‌ها به انواع مختلفی تقسیم می‌گردند:

۱. تونل برای حمل و نقل و ترانسپورت.

۲. تونل‌های صنعتی.

۳. تونل‌های تأسیسات شهری.

۴. تونل‌های معدن

۵. تونل‌های خاص.

۱. تونل‌های حمل و نقل و ترانسپورت

- تونل برای حمل و نقل ریلی.
- تونل برای حمل و نقل جاده‌ای.
- تونل برای حمل و نقل ریلی در زیر زمین و مترو.
- تونل برای حمل و نقل دریایی (عبور و مرور کشتی‌ها).
- تونل برای عبور عابران پیاده.
- تونل برای حمل و نقل آبی و دریایی.

۲. تونل‌های صنعتی

- تونل جهت انحراف آب سد به نیروگاه‌های برق آبی.
- تونل جهت انتقال آب کشاورزی و مصرف شهرها.
- تونل‌های استفاده همگانی و پناهگاه‌ها.
- تونل‌های انبارهای نظامی.

۳. تونل‌های تأسیسات شهری

- تونل برای لوله‌کشی‌های آب‌رسانی سرد و گرم شهری.
- تونل برای انتقال لوله‌های گاز شهری.
- تونل برای انتقال برق و الکتریسیته شهرها.
- تونل برای حمل و رساندن نامه‌های پستی در شهرها.
- تونل برای سیستم فاضلاب شهری.

۴. تونل‌های معدنی

- تونل‌های اکتشافی
- تونل‌های استخراجی
- تونل‌های خدماتی
- تونل‌های زهکشی

تونل‌های معدن همیشه با عمر کاری مشخص و معینی طراحی و ساخته می‌شوند و پس از استفاده و استخراج و اتمام مواد معادنی آن‌ها را به صورت متروکه رها می‌شوند.

۵. تونل‌های خاص

- تونل برای نگه‌داری و انبار کردن آذوقه مردم شهرها.
- تونل برای ساخت پناهگاه‌ها (این تونل‌ها در زمان جنگ سرد کاربرد زیادی داشته‌اند).
- تونل برای پارکینگ و گاراژ اتومبیل‌های شهرنشینان.
- تونل برای انبار کردن نفت و گاز و دیگر مواد سوختی.
- تونل برای ساخت کارخانه جات و همچنین استفاده پایگاه‌های دریایی (در شبه‌جزیره کریمه در اتحاد جماهیر شوروی سابق پایگاه زیردریایی‌های ناوگان دریای سیاه را در تونلی که در اعماق کوهستان حفاری و ساخته شده قرار گرفته بود که پس از فروپاشی اتحاد جماهیر شوروی تبدیل به موزه دریایی گردیده است).

در کل تونل‌ها معمولاً دارای دو خروجی به سطح زمین و گاهی اوقات در موارد خاص دارای یک ورودی به سطح زمین می‌باشند (تونل‌های مترو گاهی اوقات یک ورودی به سطح زمین دارند که اغلب برای محل تعمیرگاه یا دپو قطارهای شبکه مترو در نظر می‌گیرند و در آنجا قطارها تعمیر می‌شوند و سر دیگر تونل بسته است).

تونل‌ها یک محور (تکی) و دو محور (دوطرفه) و به صورت دو لاین رفت و برگشت برای قطارها و با شیب عرضی به دو طرف محور تونل باشند البته ساخت و اجرا و تحویل راه‌اندازی پروژه تونل‌های مترو و سازه‌های زیرزمینی به عوارض زمین‌شناسی محل پروژه، وضعیت مالی کارفرما، دقت و تخصص مجموعه تکنسین‌ها و کارشناسان مشغول به کار در محل پروژه بستگی دارد.

- تونل حمل و نقل و ترانسپورت زمینی

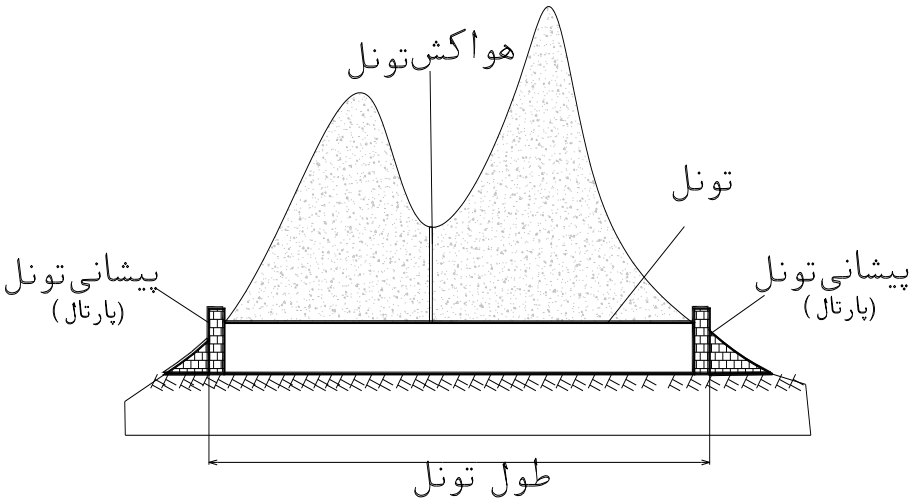
تونل‌های حمل و نقل و ترانسپورت سازه‌های مصنوعی ساخته شده خیلی پیچیده و گران‌بهای هستند که در زیر زمین و یا زیر آب ساخته می‌شوند که برای جابجایی و حمل نقل جاده‌ای و ریلی و یا شبکه‌ای مترو و یا تأسیسات شهری و گذر پیاده‌رو استفاده می‌شوند و با توجه به کاربردشان به چند گروه تقسیم می‌شوند:

- حفاری تونل در کوهستان، حفاری و ساخت ساز تونل در زیر بلـوکی از سـنگ و خـاک کوهستان صورت می‌گیرد.
- حفاری تونل در زیر آب، حفاری و اجرا تونل در زیر کانال‌های آب، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تنگه‌ها دریایی و آبی صورت می‌گیرد.
- حفاری تونل در شهرها، حفاری و اجرا تونل در زیر معابر عمومی و محل‌های که ساخت ساز در آن‌ها وجود دارد صورت می‌گیرد.

حفاری تونل در کوهستان

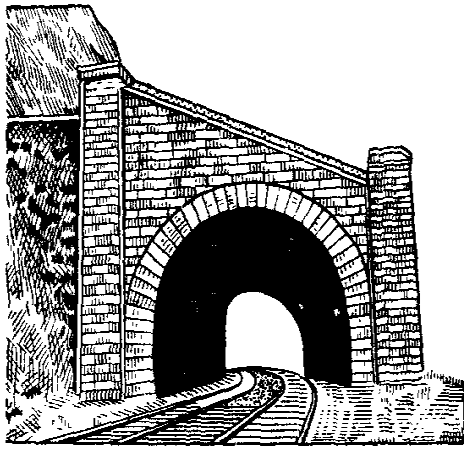
حفاری تونل در کوهستان‌های وقتی صورت می‌گیرد که امکان حفاری ترانشه در دل کوه میسـر نباشد و یا برای حفاظت و تأمین امنیت عبور مرور وسائل نقلیه در کوهستان‌های پر شیب جهـت جلوگیری از ریزش بهمن و خاک و سنگ می‌باشد، اجرا و حفاری ترانشه در دل کـوه همـراه بـا جابجای حجم زیادی از خاک و سنگ است که بسیار مشکل ساز و هزینه بر می باشـد. همیشـه حفاری تونل در کوه مستقیماً از سطح زمین به‌صورت بریدن کوه توسـط ماشـین‌آلات راه‌سـازی انجام می‌گردد، در حفاری و ساخت تونل در کوهستان همیشه ترانشـه بـا شـیب مناسـب در ورودی و یا خروجی تونل انجام می‌گیرد و دیواره داخلی تونل را با سنگ و یا با بتون مسـلح برای جلوگیری از ریزش سنگ و خاک به درون تونل روکشی می‌کنند. (اگر محل حفـاری و اجرا پروژه تونل از نظر زمین‌شناسی مشکل نداشته و جنس آن از سنگ مناسب و محکم باشد نیازی برای ساختن پوشش داخلی تونل نیست) سطح مقطع تونل نسبت مستقیمی بـا تعـداد جابجایی وسایل نقلیه عمومی از داخل مسیر تونل و همچنین شرایط زمین‌شناسی محل اجرا پروژه تونل دارد شیب محور تونل در کوهستان می‌تواند تا ۱۴٪ افزایش پیدا کند، در (تصویر ۱۴-۱) تونل را در کوهستان نشان می‌دهد.

(تصویر ۱۴-۱)



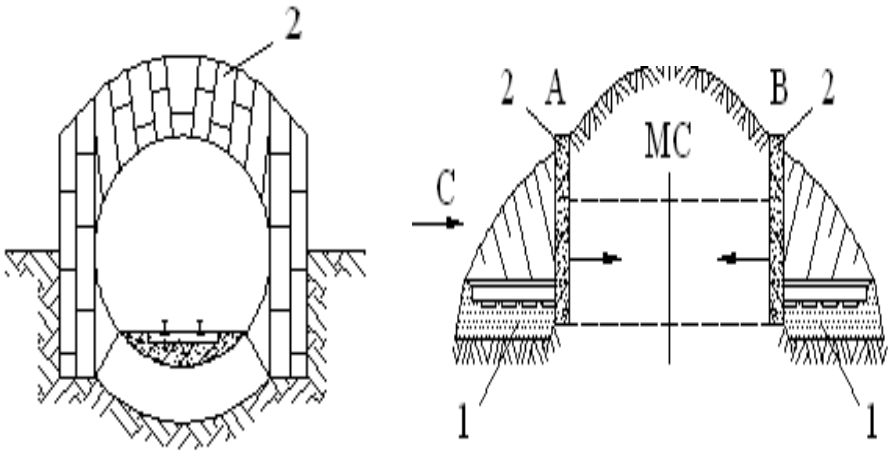
در (تصاویر ۱۵-۱ و ۱۶-۱) ورودی تونل در کوهستان و یا پیشانی تونل (پارتال) را نشان می‌دهد.

(تصاویر ۱۵-۱ و ۱۶-۱)



اجراء تونل در کوهستان با تنظیم بنای ورودی به داخل تونل (پیشانی تونل یا پارتال) و در نظر گرفتن استحکام دیواره تونل و همچنین شیب ترانشه ورودی به داخل تونل و هدایت خروج آب‌های سطحی از داخل تونل به بیرون و تنظیم و طراحی معماری محل ورود به داخل تونل صورت می‌گیرد، در اجراء پروژه تونل در کوهستان عمق حفاری تونل، طول تونل، محل حفاری تونل، فرم شکل سازه تونل ارتباط مستقیمی با توپوگرافی محل پروژه تونل و شرایط زمین‌شناسی و آب و هوایی منطقه احداث و اجراء تونل دارد البته بعد از حفاری مسیر پروفیل تونل با توجه به مشخصات زمین و مقطع عرضی تونل، به لحاظ ایمنی و جلوگیری در مقابل ریزش و قطعات سنگ و خاک به داخل تونل و همچنین برای پایدارسازی قسمت‌های متزلزل تونل از یک پوشش داخلی برای عایق سازی و جلوگیری از ورود آب‌های سطحی به درون تونل که اغلب با قالب‌بندی‌های بتونی و یا سنگ‌های تراشیده که در سقف و دیواره‌های داخلی و پیشانی تونل‌ها کار گذاشته و آماده بهره‌برداری می‌شوند، در (تصاویر ۱۷-۱ و ۱۸-۱) برش ورودی تونل در کوهستان و یا پیشانی تونل (پارتال) را نشان می‌دهد.

(تصاویر ۱۷-۱ و-۱۸-۱)



در تصویرهای بالا MC محل تلاقی حفاری از دو سر تونل BوA محل پیشانی تونل (پارتال) در مناطق کوهستانی را نشان می‌دهد که اغلب با سنگ‌های تراشیده شده پوشش داده می‌شود.

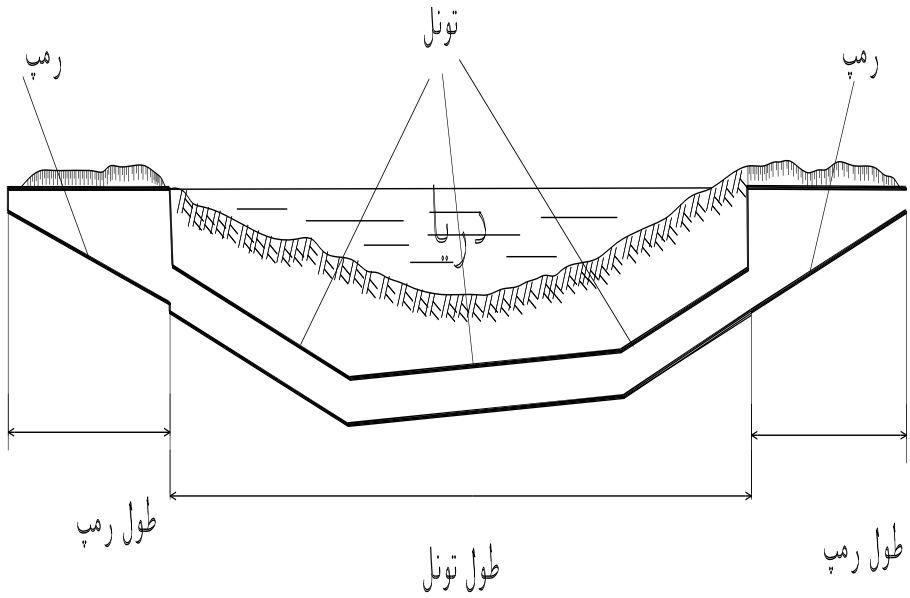
برای حفاری پیشانی تونل (پارتال) در کوهستان‌ها اغلب این سازه را در مکان‌های از مسیر پروژه تونل ساخته می‌شود که ورودی تونل به بلوک کوه با مقطع عرضی کامل شروع گردد.

اگر پروژه ساخت ساز و اجرا تونل در محل‌های مانند کوهستان‌ها با خاک‌های سست و یا در محل‌های باتلاقی باشد برای جلوگیری از آسیب‌های احتمالی و خطر ریزش سنگ و خاک و بهمن و یا آب‌های باران از اطراف به داخل تونل حتماً در اطراف پیشانی تونل (پارتال) حائل‌گذاری‌های و یا با دیوارهای سنگی و یا بتونی در مکان‌های که خطرساز می‌باشند برای پیش‌گیری از حوادث ناگوار درست می‌کنند.

حفاری و ساخت تونل در زیر آب

پروژه تونل‌های در زیر آب همیشه برای اتصال دو خشکی که در دو طرف آبراه قرار دارند حفاری و ساخته می‌شوند این حفاری‌ها می‌توانند از زیر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، خلیج‌ها، تنگه‌ها و کانال‌ها صورت پذیرد، در (تصویر ۱۹-۱) تونل زیرآبی را نشان می‌دهد که خشکی‌های دو سوی دریا را به حمل متصل کرده است.

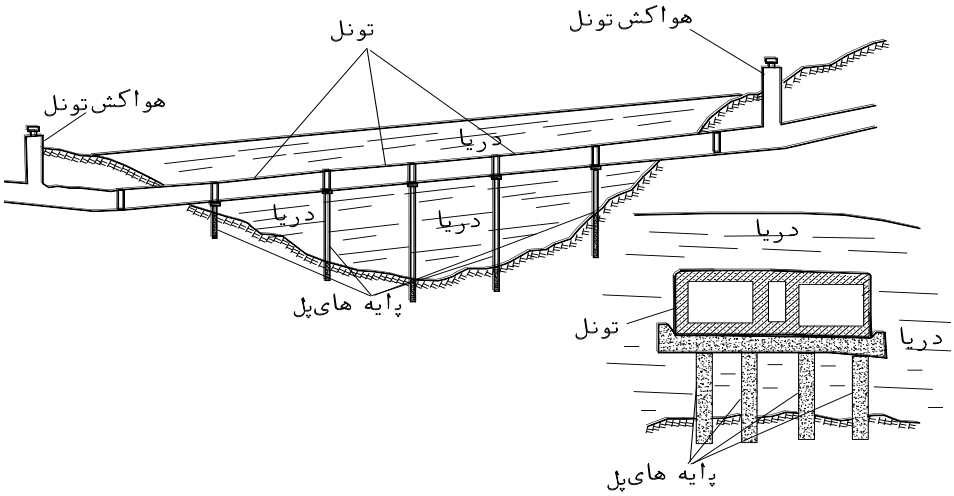
(تصویر ۱۹-۱)



(یکی از معروف‌ترین سازه‌های تونل زیر آبی تونل مانش است این تونل مابین کشور فرانسه و انگلیس و در زیر تنگه دریایی مانش واقع گردیده است و حفاری و ساخت این تونل برای اتصال قاره اروپا به کشور انگلیس با خط آهن و جاده ماشین‌رو انجام گرفته است)

برای مونتاژ و اجرا سازه تونل در زیر آب‌های که عمقی بیش از ۳۰- متر دارند از تونل‌های ساخته شده در روی سدهای مصنوعی که دیواره این سدها در کف آب ساخته و اجراء شده استفاده می‌گردد و یا اینکه سازه تونل در روی پایه‌های ساخته شده در کف آب مونتاژ می‌گردند، یا می‌توان سازه پل را به صورت شناور در روی پلی در زیر آب ساخت، سازه تونل در زیر آب نسبت به شرایط منطقه ساخت در روی سد یا دیواره ساخته شده در زیر آب مونتاژ می‌گردد بدین ترتیب تونل را به صورت قطعات پیش‌ساخته‌ای در آورده و سپس این قطعات پیش‌ساخته را با کشتی به منطقه مونتاژ پروژه تونل حمل کرده و در آنجا با جرثقیل‌های بزرگ قطعات مونتاژ شده را از داخل کشتی‌های حمل کننده قطعات به زیر آب فرستاده و در زیر آب این قطعات پیش‌ساخته تونل را سر هم مونتاژ کرده و در روی تاج سد در رأس محور پروژه تونل قرار می‌دهند و یا اینکه با روش دیگری از طرف ساحل آبراهی در امتداد محور تونل با یک خط ریل موقت ساخته و قطعات تونل توسط واگن‌های قطار از روی ریل به زیر آب دریا انتقال داده می‌شوند تا در روی تاج سدی که در زیر آب از قبل اجرا و ساخته گردیده است به هم متصل شوند، در (تصویر ۲۰-۱) تونل زیرآبی را نشان می‌دهد که بر روی پایه‌های پل مانند ساخته شده است.

(تصویر ۲۰-۱)

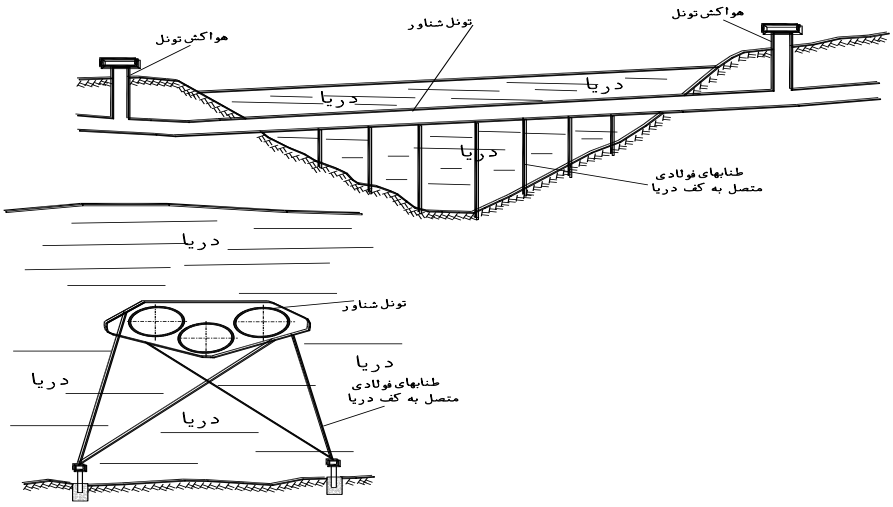


تونل زیر آبی مونتاژ شده در روی پایه‌های بتونی و یا فلزی مانند ساخت دو سازه پل و تونل می است که برهم منطبق شده‌اند که در حقیقت آن‌ها مجموعه‌ای از سازه یکپارچه یک تکه بتونی را در زیر آب تشکیل می‌دهند.

اجراء و ساخت اینگونه سازه‌های تونل در زیر آب با این شکل و طراحی از طول سازه تونل‌های زیر آبی به مقدار زیادی می‌کاهد این به معنی طول کمتر و کار کمتر و در نتیجه هزینه ساخت تونل هم کاهش میابد می‌گردد اما پروژه حفاری تونل در زیر سطح آب دریاها نیاز به حجم زیادی حفاری و جابجا کردن خاک و سنگ برای ساختن تونل می‌باشد.

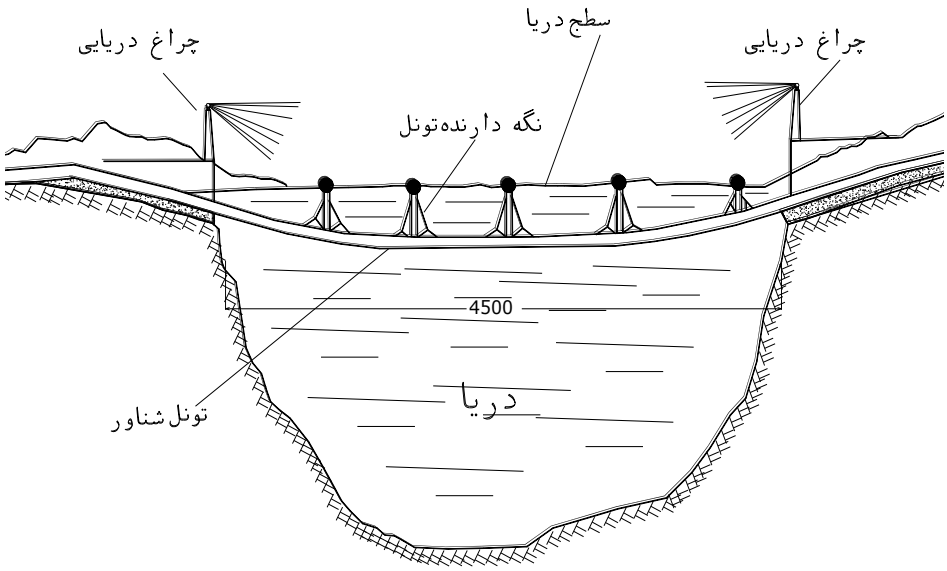
روش دیگری برای ساخت و اجرا سازه پروژه تونل‌های شناور زیر آبی است که در این روش سازه تونل به وسیله طناب‌های فولادی قوی به کف آب (دریا) بسته و مهار می‌گردد، در (تصویر ۲۱-۱) تونل زیرآبی را نشان می‌دهد که سازه تونل به وسیله طناب‌های فولادی و قدرتمند به کف آب (دریا) بسته شده است.

(تصویر ۲۱-۱)



روش دیگری هم در ساخت پروژه تونل‌های زیر آبی استفاده می‌شود که بدین صورت است که در روی سطح آب سازه‌های شناوری را در مسیر پروژه محور تونل که باید در آینده اجرا و ساخته شود قرار می‌دهند و این سازه‌های شناور را به وسیله ستون‌های و کابل‌های فولادی قدرتمند به بدنه تونل متصل می‌کنند و تونل به صورت شناور در عمق مورد نیاز از دریا به این سازه‌های متصل می‌گردد، یکی از خصوصیات مهم تونل‌های شناور در این است که سازه تونل‌ها شناور را می‌توان در هر عمقی از دریا ساخته و مونتاژ کرد، در (تصویر ۲۲-۱) تونل زیرآبی شناوری را نشان می‌دهد که توسط سازه‌های نگه‌دارنده‌ای که در روی آب شناورند هستند متصل می‌گردند.

(تصویر ۲۲-۱)



این نوع سازه‌ها تونل‌های شناور اغلب در مکان‌های مورد استفاده قرار می‌گیرند که عمق دریا زیاد باشد و یا به علت شرایط زمین‌شناسی منطقه امکان استفاده از روش‌های حفاری تونل از زیر دریا امکان‌پذیر نباشد، در این روش عمق شناوری تونل با عمق آبخور کشتی‌ها عبوری تعیین و مشخص می‌گردد تونل‌های شناور نسبت به تونل‌های که در روی پایه نسب می‌شوند محدودیتی از نظر ارتفاع ساخت ندارند این سازه‌ها از چند قسمت مجزا و با روش‌های متفاوتی ساخته می‌شوند.

سیستم‌های کمکی و جنبی تونل‌ها

تمام تونل‌های حمل و نقل (راه‌آهن، ماشین‌رو و تونل‌های مترو) نیاز به سیستم‌های جنبی دارند:

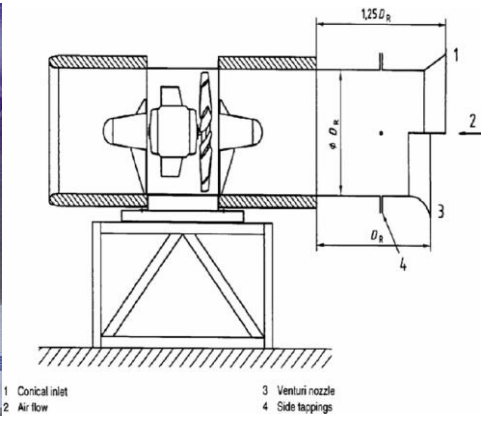
- سیستم جمع‌آوری آب‌های نفوذی به داخل تونل.
- سیستم تهویه هوای پاک یا هوا رسانی تازه به تونل.
- سیستم‌ها و دستگاه‌ها حفاظتی جهت تأمین امنیت رفت آمد وسائل نقلیه و پرسنل.
- سیستم تأمین روشنایی و تنظیم نور طبیعی خارج از تونل با نور مصنوعی داخل تونل (عدم‌خیرگی).

برای این منظور کابل‌کشی و نصب لامپ‌های مناسب جهت تأمین روشنایی و همچنین و شبکه دوربین‌های ویدئوئی، ارتباط تلفنی و سیستم مبارزه با آتش‌سوزی در نظر می‌گیرند.

- سیستم شبکه‌ای جمع‌آوری آب‌های داخلی تونل که برای دفع آب‌های زیر زمینی و نفوذی که از میان قطعات پیش‌ساخته بتونی و یا ناشی از شکستگی و نشت لوله‌های آب جهت مصرف کارهای خدماتی و شستشویی شبکه تونل به داخل تونل سرازیر می‌گردند و همچنین برای جلوگیری از ورود آب‌های باران و آب‌های سطحی و غیره به داخل سازه تونل نیاز به سیستم‌های مناسب جمع‌آوری و هدایت و در صورت نیاز پمپاژ آب‌های جمع‌آوری شده به خارج از محدوده تونل می‌باشد بخصوص برای ساخت و طراحی تونل در کوهستان باید در خصوص کانال‌های انحرافی جهت هدایت آب‌های ناشی از بارندگی و آب‌های چشمه‌سارهای کوهستانی که آب دهی آن‌ها از داخل تونل می‌باشد و یا برای دفع و هدایت آب‌های ورودی به داخل تونل که از شکاف‌های موجود مابین لایه‌های سنگی و آب‌های که از سقف و کف به داخل تونل سرازیر می‌شوند برنامه‌ریزی خاص توسط متخصصین امور و طراحان تونل صورت می‌گیرد که اغلب جمع‌آوری و دفع این آب‌ها توسط کانال‌های مخصوص به سوی مخزنی در داخل تونل هدایت و سرازیر شده و از آنجا توسط لوله‌های که در وسط محور تونل و یا در گوشه‌های داخلی مسیر تونل نصب شده به خارج از تونل هدایت می‌گردند در هنگام طراحی پروژه سازه تونل باید برای سیستم‌های هوا رسانی تهویه و خروج هوای آلوده تونل را باید مدنظر قرار داد، برای سیستم تهویه مناسب هوای پاک و پمپاژ آن به داخل تونل نیاز به حفر چاه در مکان‌های در زیرزمین و یا

در روی زمین در امتداد محور طولی پروژه تونل انجام می‌شود و این سیستم هوا رسانی تهویه در طراحی و ترکیب سازه تونل نقش مهمی دارد، سیستم تهویه هوای تونل با مقدار (هوا رسانی) و طول عرض و حجم هوای تونل ارتباط مستقیمی دارد که برای انتقال هوای پاک به داخل تونل‌ها اغلب از «اگزاست فن‌ها» و یا «جت فن‌ها» استفاده می‌گردد این فن‌ها بسیار قوی و پرقدرت هستند و جوابگوی نیاز تهویه هوای پاک تونل می‌باشند در (تصاویر ۲۳–۱ و ۲۴–۱) دو نوع سیستم هوا رسانی تهویه مورد استفاده در تونل‌ها را نشان داده است.

(تصاویر ۲۳–۱ و ۲۴–۱)



فصل دوم:

طراحی و ساخت تونل‌های مترو

جنرال پلان و طراحی تونل‌های مترو

با افزایش یکجانشینی‌های میلیونی جمعیت کلان شهرها در جهان و افزایش ارزش و نرخ زمین‌های شهری و تخریب محیطزیست و همچنین آلودگی‌های ناشی از حرکت وسائل حمل و نقل عمومی که همگی این عوامل با هم مشکلات عدیده بسیاری را پیش پای مردم این کلان شهرها گذاشته است، یکی از راه‌های بین بردن گوشه‌ای از این مشکلات استفاده از سازه‌های زیرزمینی بخصوص سیستم حمل نقل شبکه ریلی مترو است که به صورت روزافزونی در شهرهای پرجمعیت جهان افزایش پیدا کرده است.

در کشورهای پیشرفته با جمعیت بیش از یک میلیون نفر و با محل‌های پرازدحام و ترافیک سنگین مناسب‌ترین سیستم حمل نقل شهری با توجه به راحتی استفاده از آن سیستم‌های زیرزمینی حمل و نقل ریلی مترو می‌باشند که بدون آلودگی‌های زیست‌محیطی استفاده از آنان مورد توجه قرار می‌گیرد. پروژه اجرا و ساخت سازه تونل در شهرهای بزرگ جهان جهت جابجایی مسافران و حمل و نقل همیشه در زیر سطح زمین و در زیر تقاطع خیابان‌ها و معابر و میادین شهرها احداث می‌گردد.

شبکه زیرزمینی مترو دارای سیستم پیچیده‌ای است که شامل تونل‌های اصلی که قطر و اندازه‌ای مشخصی دارند و در آن‌ها قطارهای مسافربری در حال حرکت می‌باشند و تونل‌های دیگری که برای سالن ایستگاه‌های مترو که حجم و اندازه بزرگتری نسبت به تونل‌های اصلی مترو دارند و محل تجمع مسافران هستند، سیستم شبکه برق‌رسانی ترن‌ها و دپوها برای تعمیرات می‌باشند.

در هنگام طراحی شبکه مترو مسائل مهمی هست که کارشناسان در مرحله اول اغلب در نظر می‌گیرند و این توجه به حل مسائل و مشکلات اجتماعی مردم این شهرها می‌باشد و یکی از مسائل مورد توجه پیش‌بینی و در نظر گرفتن توقعات و خواسته‌های شهروندان برای حرکت و جابجا شدن در زمان حال و آینده نزدیک توسط شبکه حمل و نقل مترو است.

همینطور که در مطالب قبلی گفته شده است یکی از موارد ضروری در طراحی پروژه جدید شبکه مترو در رابطه با از بین بردن مشکلات حمل و نقل موجود در شهرها است که سیستم حمل نقل موجود جوابگوی نیازهای مردم این شهرها نمی‌باشد و می‌توان گفت این مشکلات وقتی پدیدار می‌شوند که سیستم حمل و نقل شهری به دلایل مختلفی وقت گران‌بهای مردم را تلف کرده و با استانداردهای امروزه زمان عادی برای حرکت و جابجایی شهروندان از اطراف و پیرامون به مرکز شهرها نباید بیش از ۳۰ دقیقه باشد اگر بیش از این زمان وقتشان در سیستم حمل و نقلی شهری به هدر رود این شهرها نیاز به سیستم شبکه حمل نقل جدید دیگر و مدرن دارند برای این منظور خطوط حمل و نقل مترو بر اساس جنرال پلان و طرح جامع هر کلان شهری و ارتباط حمل و نقل درون شهری در نظر گرفته و توسط کارشناسان طراحی می‌گردد، در رابطه با تطبیق پروژه شبکه خطوط مترو با جنرال پلان هر کلان شهر طراحی مناسب خطوط مترو است که شامل طراحی تعیین جهت خطوط مترو، طول پروفیل خطوط مترو محل و تعداد قرار گرفتن ایستگاه‌های مترو و دپو و غیره می‌باشد. بطور کلی تونل‌های مترو یکی از پیچیده‌ترین و اساسی‌ترین سازه‌های زیرزمینی می‌باشند و از تمام سازه‌های ساخته شده بدست بشر در زیر زمین تونل‌ها از نظر پیچیدگی و طراحی ساخت و اجرا مشکل‌ترین آن‌ها می‌باشند و به همین دلیل تهیه جنرال پلان پروژه شبکه سیستم حمل نقل زیرزمین مترو هم با پیچیدگی‌ها و مشکلات خاص خود همراه می‌باشد.تحقیق و پژوهش در زمینه طراحی پروژه ساخت شبکه مترو در سه مرحله صورت می‌گیرد:

- ✓ مرحله اول آماده‌سازی مقدماتی، دوره جمع‌آوری اطلاعات، مطالعه و تعمیم دادن مطالب به دست آمده در محل برای پروژه احداث و پیاده کردن پروژه شبکه مترو می‌باشد.
- ✓ مرحله دوم مرحله شروع عملیات میدانی برای تعیین مشخصات زمین‌شناسی محل پروژه می‌باشد که شامل حفر چاه‌های به نام گمانه برای منظور آگاهی از شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی اعماق بیشتر زمین و تحقیقات ژئوفیزیکی زمین، حفاری تونل‌های اکتشاف، تحقیقات آزمایشگاهی نمونه‌های خاک به دست آمده از محل گمانه‌ها و تونل‌های اکتشافی در محل پروژه پروفیل شبکه تونل‌های مترو انجام می‌گیرد.
- ✓ مرحله سوم پردازش و عمل‌آوری اطلاعات به دست آمده از تحقیقات و اکتشافات صورت گرفته و نتایج آزمایشگاهی می‌باشد که کارشناسان با در دست داشتن این اطلاعات و تحقیقات می‌توانند گزارش کاملی از اثرات زمین‌شناسی بر سازه‌های زیرزمین در مراحل ساخت تا پایان آن در مسیر تونل آینده اعلام کنند.

تعیین و دقت و شناسایی عوامل مؤثر در سازه‌های زیر زمینی شامل ساختارهای زمین‌شناسی چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها، لرزه‌خیزی و ... لیتولوژی و جنس واحدهای زمین‌شناسی، آب‌های زیرزمینی می‌باشد که معمولاً برای مقابله با برخی از مشکلات در حفاری مکانیزه لازم و ضرورت است که کارکنان و کارشناسان ساخت تونل‌های زیرزمینی مترو آمادگی کاملی برای رویارویی با این مشکلات خطرات بسیار آمادگی کامل داشته باشند.

مهندسی زمین‌شناسی در حفر و ساخت تونل‌ها

در هنگام طراحی خطوط شبکه مترو مهندسی زمین‌شناسی جایگاهی خاص و مهمی در تهیه جنرال پلان و پیشرفت کار حفاری و تعیین هزینه‌ها ساخت تونل‌های مترو را دارد.

شرایط زمین‌شناسی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی منطقه یکی از عوامل و پارامترهای اصلی در طراحی خطوط مترو محسوب می‌شوند، یکی از وظایف اصلی کارشناسان زمین‌شناس بررسی و شناخت شرایط زمین‌شناسی در منطقه اجرا پروژه شبکه مترو می‌باشد که نتایج بررسی و تحقیقات آن‌ها کمک شایانی به طراحان می‌کند که تا آنان بتوانند بهترین مکان از نظر زمین‌شناسی و مقرون به صرفه بودن پروژه را تعیین کنند همچنین از نتایج دادهای زمین‌شناسی می‌توان عمق پروفیل تونل، نوع حفاری، نوع سازه مترو و مقدار مصرف هزینه و مقرون بصرف بودن پروژه را تعیین کرد، پالایش نتایج زمین‌شناسی مسیر پروفیل تونل‌های مترو باید بر این اساس و به شرح زیر استوار باشند:

- ساختار زمین‌شناسی مسیر پروفیل تونل(نوع و ترکیب و ساختار لایه‌های زمین‌شناسی، تعیین چینه نگاری سنگی (چینه‌شناسی لیتولوژی سنگ‌ها و لایه) و چینه نگاری زمانی (خواص سنگ‌شناسی) و چینه نگاری زلزله‌ای و غیره را مورد بررسی باید قرار داد.
- مشخص و تعیین کردن سفره‌های زیرزمینی آب در مسیر پروژه پروفیل تونل.
- تعیین ژئومکانیکی و رفتار خصوصیات لایه‌های زمین که در تحلیل و طراحی مهندسی خاک و پی عامل مهمی می‌باشد که شناخت این عوامل کمک می‌کند که در حین پیاده کردن پروژه ساخت شبکه تونل‌های مترو جلوگیری از مشکلاتی مانند فشار لایه‌های سنگ و خاک، فرونشست بالای سازه تونل، ریزش لایه‌های خاک و حرکت ریگ‌های روان در حین حفاری به داخل تونل گردد که هرکدام از این موارد گفته شده نقش مهم و مؤثری در پایداری سازه‌های زیر زمینی دارند.

بنابراین با کمک کارشناسان زمین‌شناسی مطالعات پایه در زمینه خطرات و حوادث طبیعی و با توجه به شرایط متنوع زمین‌شناسی موقعیت لایه‌های زمین را در مسیر پروفیل پروژه تونل باید آماده و تهیه کرد، باید در زمینه انجام مطالعات دقیق زمین‌شناسی و ژئوتکنیک پدیده کارست (پدیده خوردگی و انحلال توده سنگ‌های کربناته)، فرآیندهای شیب، پردازش و تهیه نقشه از شیب ساحل رودخانه‌ها، دریا، دریاچه‌ها و سدها و در صورت ممکن تهیه نقشه از منطقه جاری شدن احتمالی سیل و تهیه نقشه از مانیتورینگ و نشست سازه‌ها و بناهای ساخته شده در روی سطح زمین و در نزدیکی پروفیل پروژه مترو تحقیقات جامع و کاملی انجام داد. می‌توان نتیجه گرفت که امنیت کارکنان در حین حفاری مترو در چه اندازه می‌باشد و خطری آن‌ها را حین حفاری تهدید می‌کند و یا خیر بنابراین کیفیت کار کرد نتایج و داده‌ای زمین‌شناسی برای حفاری تونل در مقام و جایگاهی بالا در طراحی جنرال پلان شبکه مترو قرار دارد.

تعیین هزینه‌های پروژه ساخت شبکه تونل‌های مترو

ساخت و اجرائی شبکه‌ای از تونل‌ها برای قطار زیرزمینی و یا مترو بسیار کاربر است و از نظر اقتصادی نسبت به سازه‌های دیگر بسیار گران و پر خرج می‌باشند بنابراین از اقتصاد فناورانه (تکنو اکونومیک) در صرفه‌جویی هزینه‌های ساخت پروژه مترو استفاده می‌گردد البته تعیین پیشاپیش مقدار کامل هزینه مصرف شده جهت انجام پروژه‌های ساخت و اجرا، نوسازی و گسترش سازه‌های شبکه مترو و غیره خیلی مشکل و سخت می‌باشد برای همین منظور اقتصاد فناورانه مطابقت با توسعه و برنامه پیشرفت و بر اساس پروژه‌های مشابه و مکمل ساخته شده در گذشته محاسبه می‌گردد.

در مرحله شروع طرح محاسبه و انجام اقتصاد فناورانه از کمک و داده‌های کارشناسان نقشه‌برداری و زمین‌شناسی استفاده می‌گردد.

همینطور که قبلاً توضیح داده شده است برای طراحی و اجرا حفاری مسیر پروژه تونل در منطقه احداث پروژه باید مطالعاتی در خصوص حفاری و مشخصه‌های ژئوتکنیکی زمین صورت پذیرد، مطالعات مزبور بسیار وقت‌گیر می‌باشند و همیشه قسمتی هنگفتی از هزینه ساخت پروژه را به خود تخصیص می‌دهند که طراحان و کسانی که هزینه ساخت مسیر پروژه تونل را محاسبه می‌کنند این هزینه‌ها را باید مدنظر قرار دهند لزوم این تحقیقات و مطالعات و تعیین هزینه‌ها

خیلی برای احداث پروژه تونل ضروری می‌باشد و بدون تحقیقات زمین‌شناسی اجراء و ساخت مسیر پروژه تونل غیرممکن است و در آینده پروژه احداث و اجرا تونل با مشکلات جبران‌ناپذیر و از نظر مالی گران گریبانگیر کارفرمای پروژه می‌شود بنابراین در اجراء و احداث ساخت تونل نتایج دقیق و حرفه‌ای شناخت زمین‌شناسی مسیر حفاری پروژه تونل خیلی مهم و ضروری می‌باشند بنابراین کارشناسان زمین‌شناسی با کمک کارشناسان نقشه‌بردار بررسی کاملی در طول پروژه ساخت پروفیل تونل و در زمینه تهیه و آنالیز پلان‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰، نقشه‌های رقومی هوایی و ماهواره (فتو پلان)، تعیین نقشه‌های ثبتی (نقشه کاداستر)، نقشه‌های جامع شهری، نقشه‌های فضای سبز و درختان و نقشه‌های از سیستم‌های تأسیسات (آب و فاضلاب، سیستم‌های لوله‌کشی آب شرب، سیستم‌های لوله‌کشی گاز شهری و سیستم برق و مخابرات) نقشه کاملی از مکان‌های چاه‌های جذبی دفع فاضلاب منازل که در کشور ما و خیلی کشورهای که سفره‌های آب زیرزمینی پایینی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد باید تعیین و تهیه کرد، کارشناسان نقشه‌برداری اغلب نقشه چاه‌های فاضلاب را در مقیاس ۱:۲۰۰۰ تهیه می‌کنند.

البته کار کارشناسان نقشه‌برداری تمامی نخواهد داشت و در هنگام شروع پروژه و احداث و ساخت تونل برای اجراء و پیاده کردن مسیر پروفیل تونل در منطقه‌ای که طرح و اجراء سیستم شبکه مترو در دست احداث می‌باشد کارشناسان مذکور باید نقشه‌ای از شبکه نقاط ثابت ژئودوزی و کنترل صحت این نقاط در زمینه ارتفاعی و پلان انجام دهند و در صورت نیاز این نقاط مختصاتی ثابت را به نزدیکی مسیر پروفیل تونل انتقال داده می‌شوند به غیر از این کارشناسان نقشه‌برداری توسط دستگاه‌های نقشه‌برداری نقاط ارتفاعی عمق رودخانه‌ها و دریاچه‌ها را اندازه‌گیری کرده و رقوم به دست آمده را با پروفیل‌های طولی و عرضی از مکان‌های مورد نظر آماده و در روی نقشه‌ها مورد نظر ثبت و درج می‌کنند و با در دست داشتن این داده‌ها تحقیقات و مطالعات کامل زمین‌شناسی امکان ساخت و حفاری احداث پروژه تونل را می‌توان معلوم کرد، کارشناسان می‌توانند هزینه ساخت تونل‌های مترو را محاسبه و به مسئولین و کارفرمایان اعلام کرد که در آینده پروژه ساخت تونل‌های مترو در منطقه مورد نظر احداث و یا اینکه پروژه منجمد و تعطیل می‌گردد.

اجزاء اصلی و مهم سیستم حمل نقل شبکه‌های مترو

- ایستگاه‌های مترو: که یکی از اجزاء مهم سیستم حمل و نقل شبکه زیرزمین مترو می‌باشند که به صورت سطحی (در بالای زمین) و زیر سطحی (واقع در زیر زمین) طراحی و ساخته می‌شوند که در حقیقت این ایستگاه‌ها مکان‌های برای ارتباط میان سطح زمین و خطوط حمل و نقل زیرزمینی مترو می‌باشند ایستگاه‌های مترو محل تجمع مسافران هستند و مجهز به سکوهای برای پیاده و سوار شدن مسافرها و همچنین برای حرکت قطارهای مترو می‌باشند و مکان ایستگاه‌های مترو به شکلی طراحی می‌شوند که در مسیرهای مستقیمی از تونل‌های مترو قرار گیرند و جائی آن‌ها در پروفیل مسیرهای تونل در نظر گرفته و طراحی می‌شوند که در ارتفاع بالاتری نسبت به پروفیل مسیر تونل‌ها جابجایی قطارها قرار داشته باشند و این نوع طراحی به چند دلیل می‌باشد، یکی از این دلایل حرکت قطار از حالت سکون با ظرفیت کامل مسافر است که در سراشیبی تونل شتاب و سرعت بیشتری می‌گیرد و در هنگام رسیدن به ایستگاه بعدی که باز هم در بلندی و ارتفاع بالاتری قرار دارد سرعتش کمتر می‌شود و دلیل بعدی در این است که ایستگاه‌های مترو باید نزدیک به سطح زمین قرار داشته باشند که طول پله‌برقی‌ها کمتر گردد.
- تونل‌های مترو: تونل‌های مترو یکی از اجزاء اصلی شبکه حمل نقل مترو می‌باشند که در زیرزمین احداث گردیده و حمل بار و مسافر توسط قطار در داخل آن‌ها صورت می‌گیرد و تونل‌های مترو یکی از مهمترین سازه‌های زیر زمینی شهری و شبکه مترو می‌باشند.
- تونل‌ها و پل‌های هوایی برای حرکت قطارها در بین ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و اغلب این تونل‌ها به صورت یک مسیر و یا با دو مسیر رفت برگشت طراحی و ساخته می‌شوند.
- تونل‌های یکطرفه و بن‌بست برای انتهای خطوط مترو ساخته می‌شوند و همچنین از این تونل‌ها برای انتقال قطار به خطوط دیگر استفاده می‌شوند از این خطوط بن‌بست برای بازرسی‌های شبانه و تعمیرات جزئی واگن‌های قطار هم استفاده می‌شود.
- دپو قسمت بخش مهمی و پشتیبانی از شبکه‌های مترو می‌باشند که پارک نگهداری و بازرسی و همچنین تعمیر احتمالی قطارها استفاده می‌شود.

- بخش مدیریت و مهندسی شبکه مترو از یک بخش مرکزی و تجهیزات مستقر در خطوط مترو تشکیل گردیده که بخش اصلی آن را مرکز فرمان ترافیک نامیده می‌شود که شامل تجهیزات مستقر در اتاق فنی ایستگاه پایانه راه دور سامانه کنترل ترافیک که با دستگاه‌های سیگنالینگ ارتباط دارد که وظیفه تعیین مسیر و نظارت بر کنترل سیر حرکت به وقت و ایمن قطارها را مطابق با برنامه زمانی تعیین شده انجام می‌دهد.
- سامانه کنترل انرژی این سامانه از یک بخش مرکزی که بخش اصلی آن در مرکز فرمان، بخش کنترل انرژی و تجهیزات مستقر در خطوط تشکیل شده واقع شده است که شامل تجهیزات مستقر در اتاق‌های فنی ایستگاه‌ها شامل پایانه‌های راه دور، پست‌های فشار قوی، پست‌های یکسو ساز، پست‌های سویچینگ و پست‌های توزیع می‌باشد ضمناً شرح وظایف این سامانه شامل تأمین برق پایدار و نظارت و کنترل بر فرآیند تأمین ولتاژ فشار قوی و توزیع آن بر روی ریل سوم می‌باشد.

در طراحی شبکه مترو و جنرال پلان شهرها مکان‌های کمکی هم برای موارد لازم مانند جمع‌آوری آب‌های موجود در داخل تونل‌ها و پمپاژ آن‌ها به بیرون از تونل‌های مترو، سیستم تهویه هوای مناسب برای تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو چاه‌های عمودی برای سیستم تهویه مطبوع و هوای پاک در نظر گرفته می‌شود.

در محل‌های که قطار زیرزمینی از تونل‌ها خارج و به سمت دپوها حرکت می‌کنند رمپی (شیبی) ساخته می‌گردد و اطراف رمپ را با دیواره‌ای از جنس بتون‌آرمه که سازه نگهبانی می‌باشد ساخته می‌شود که امنیت ورود و خروج قطارها را تثبیت و تأمین می‌کند.

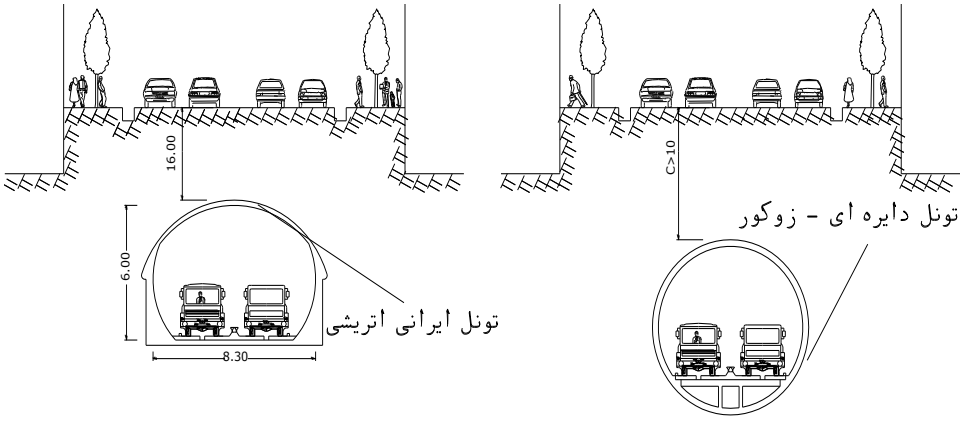
- سازه‌های دیگری هم در شبکه زیرزمین مترو ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند مرکز فرماندهی سکوها، ورودی و خروجی‌ها، راهروها، راه‌پله‌ها و پارکینگ و غیره... می‌باشند.

طراحی پروژه سازه‌های زیرزمینی

طراحی پروژه سازه‌های زیرزمینی و تونل‌ها از خصوصیات خاص خود برخوردار می‌باشند و این خاصیت مخصوص آن‌ها را از دیگر پروژه‌های حفاری تونل‌ها متمایز می‌کند یکی از مهمترین موارد در ساخت و اجرا پروژه تونل‌های مترو محل و مکان پیاده و اجرا کردن آن‌ها از قبیل ایستگاه‌های شبکه مترو و دپوی (محل پارکینگ و تعمیر قطارهای مترو) متروی می‌باشد که بتوان در آینده امنیت استفاده از این سازه‌ها را در حین بهره‌برداری استفاده و تأمین کرد.

در (تصویر ۱-۲) چند نمونه تونل مخصوص تردد وسایل نقلیه شخصی و عمومی را کـه در زیـر سطح معابر شهرها اجرا و ساخته می‌شود را نشان می‌دهد.

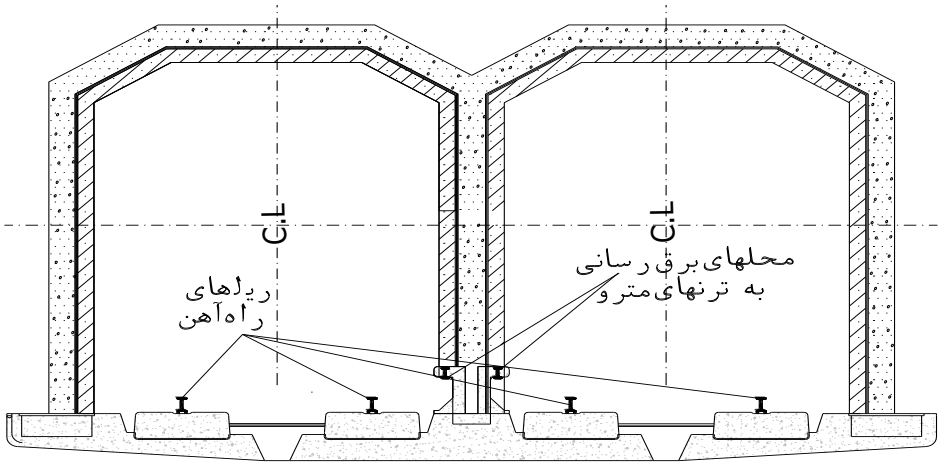
(تصویر ۱-۲)



عمق حفاری و خط پروژه خطوط شبکه زیرزمینی مترو همیشه نسبت بـه همـدیگر متفـاوت می‌باشند و این به علت شرایط خاص زمین‌شناسی منطقه و طراحی سـاخت و اجـرا سیسـتم حمل نقل ریلی شبکه‌ای مترو است که همیشه در زیر زمین و در زیر سطح شهرها ساخته و اجرا می‌شود، طراحی پلان و پروفیل مسیر و عمق پروژه شبکه مترو در زیـر زمـین شـهرها ارتباط مستقیمی به شرایط زمین‌شناسی توپوگرافی لایه‌های خاک و زمین زیر این شهرها را دارد، در (تصویر ۲-۲) تونل‌های ساخته شده در عمق کم زمین برای شبکه حمل و نقل مترو را نشان داده است.

البته همین جور که در مطلب قبلی عنوان گردیده است روش‌های حفاری پروفیل تونل نیز تحت تأثیر عوامل مختلف دیگری هم می‌باشد و این روش‌ها بستگی به شرایط عمق خط پروژه تونل، طول پروژه تونل، شرایط مهندسی زمین‌شناسی در محل حفاری تونل و همچنـین بـه شـرایط و وضعیت مالی کارفرما هم بستگی دارد.

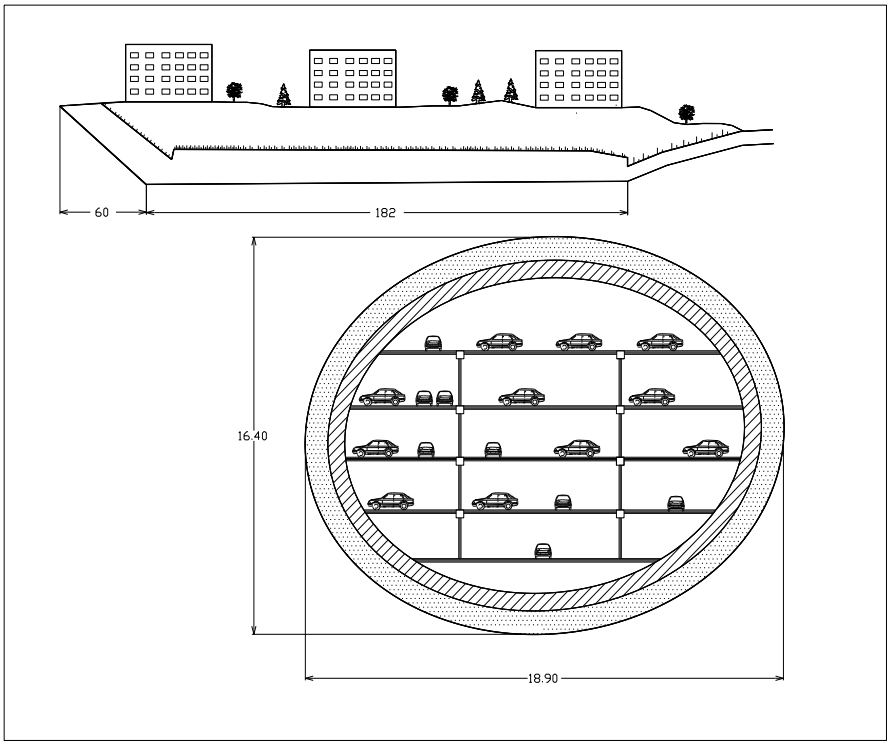
(تصویر ۲-۲)



تونل‌ها زیرزمینی برای استفاده انبار ذخیره نفت و مواد غذائی، کارخانه ها و نیروگاه‌های برق و پارکینگ اتومبیل‌ها و غیره مورد استفاده قرار میگیرند تونل‌های بزرگ زیرزمینی به تونل‌های گفته می‌شود که اغلب طول آن‌ها بیش از ۱۲۰۰ متر و ارتفاع تا متر۳۰ و عرض تا ۲۵ متر می‌باشد. بطور مثال در کشور فنلاند در فاصله ۴۰ کیلومتری از شهر هلسینکی انبار زیر زمینی عظیمی برای نگه داری نفت خام به حجم ۲ میلیون متر مکعب ساخته اند کارشناسان این انبار را به ۱۰ قسمت تقسیم کرده اند که هر کدام از آنها تا ۱۸۰ هزار متر مکعب گنجایش ذخیره نفت خام را دارند و ابعاد این بخشهای تقسیم شده سازه متفاوت است و یکی از آنها با طول ۴۴۰ متر عرض ۱۸ متر و ارتفاع ۳۰ متر بزرگترین سازه زیرزمینی می باشد.

در (تصویر ۳-۲) برش تونل‌های پارکینگ زیرزمینی اتومبیل برای شهرهای با جمعیت زیاد را نشان می‌دهد.

(تصویر ۳-۲)



انواع تونل نسبت به عمق حفاری

- تونل در عمق کم، سطح ارتفاع خط پروژه مسیر تونل از روی زمین بین ۱۰ تا ۱۸ متر می‌باشد.
- تونل عمق متوسط، سطح ارتفاع خط پروژه مسیر تونل از روی زمین بین ۱۸ تا ۲۵ متر می‌باشد.
- تونل در عمق زیاد، سطح ارتفاع خط پروژه مسیر تونل از روی زمین بیش از ۲۵ متر می‌باشد.

روش‌های حفاری تونل در زیر سطح شهرها

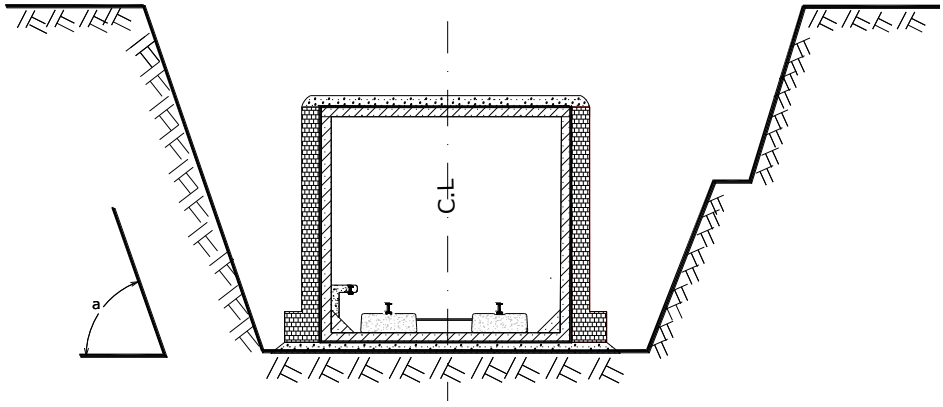
روش‌های حفاری تونل در زیر سطح شهرها به شرح زیر می‌باشد:

- حفاری تونل به روش کند و پوش.
- حفاری تونل به صورت رو بسته.

حفاری تونل در شهرها با روش کند و پوش

حفاری تونل به صورت رو باز (کند و پوش) بیشتر برای پروژه‌های ساخت و اجرا تونل‌های مترو در مناطق مسکونی شهرها صورت می‌گیرد، این روش حفاری در مکان‌های صورت می‌گیرد که سازه‌های ساخته شده در روی سطح زمین در مسیر پروژه آینده تونل جود نداشته باشند و یا در صورت وجود تخریب سازه ساخته شده امکان‌پذیر باشد ، روش حفاری به صورت کند و پوش یکی از مهم‌ترین روش‌های برای پروژه‌های ساخت و اجرا تونل‌های شبکه مترو در عمق کم می‌باشد، در این روش پیاده کردن مسیر خط پروژه تونل‌های مترو به سادگی توسط کارشناسان نقشه‌برداری در محل پروژه احداث تونل مترو و در روی زمین پیاده و میخ‌کوبی می‌گردد. پس از تعیین مسیر حفاری تونل توسط کارشناسان نقشه‌برداری این مسیر پروفیل تونل توسط دستگاه‌های گودبرداری زمین در محل مورد نظر حفاری گردیده و کانالی با دیواره شیروانی در آنجا درست می‌کنند تا از ریزش خاک و سنگ به درون کانال جلوگیری به عمل آید، اگر محل حفاری پروژه خط مترو از نظر زمین‌شناسی مشکل‌ساز باشد و دارای خاک‌های سست و ریزشی باشد در آن وقت کانال را به صورت دیواره شیروانی و یا با استفاده از شاتکریت و یا سازه نگهبان برای استحکام و نگهداری از دیواره کانال و جلوگیری از تخریب استفاده آن می‌شود. در (تصویر ۴-۲) حفاری تونل را در عمق کم با دیواره شیروانی و امکان انجام شاتکریت را نشان می‌دهد.

(تصویر ۴-۲)



البته در روش حفاری به صورت کند و پوش (رو باز) اگر ساخت سازهای شهری در محل اجرا پروژه کم باشد و فاصله کانال از ساختمان‌های موجود در محل زیاد باشد دیوارهای کانال را به صورت دیواره شیروانی و با شیب کم درست می‌کنند در این روش نیازی به استفاده از سازه نگهبان دیواره‌ها نمی‌باشد.

حفاظت از کانال حفاری شده تونل

برای حفاری کانال در محل‌های که ساخت ساز زیادی صورت گرفته است و تراکم شهری هم زیاد می‌باشد و اگر کانال حفاری شده عمیق باشد و از نزدیکی مناطق مسکونی و اداری عبور کند و زمین مسیر پروفیل تونل هم دارای خاک‌های سست و ضعیف از نظر زمین‌شناسی باشد آن وقت با توجه به فاصله کم و نزدیکی دیواره‌های کانال تا ساختمان‌های موجود احتمال نشست و تخریب آن‌ها وجود دارد بنابراین برای جلوگیری از نشست این سازه‌ها از روش‌های اجرا سازه نگهبان برای نگه‌داری دیواره کانال استفاده می‌شود، به همین دلیل حفاری کانال در مناطق مسکونی شهرها یکی از کارهای پیچیده و بسیار مشکل است که در صورت اصولی و مهندسی نبودن کار خطرات جانی و مالی زیادی در پی خواهد داشت.

(تصاویر ۵-۲ و ۶-۲)

در (تصاویر ۵-۲ و ۶-۲) تخریب دیواره کانالی را نشان می‌دهد که فاقد سازه نگهبان بوده است.

در هنگام حفاری گودی کانال پروفیل مسیر شبکه مترو و برای پایدار نمودن جهت جلوگیری از تخریب دیوارهای کانال و یا ترانشه و فراهم آوردن شرایط ایمن و مطمئن جهت انجام کار و حفظ جان کارگران و جلوگیری از وارد آمدن خسارت به ماشین‌آلات باید حتی‌الامکان سعی شود قبل از شروع حفاری کارشناسان ذی‌ربط بررسی‌های کاملی در منطقه حفاری صورت گیرد.

همیشه باید از استقرار و جاگذاری کانکس، دفاتر کارگاه و یا اتاقک و محل سکونت استراحت نگهبان و کارگران و یا دپو کردن مصالح در مجاورت کانال حفاری شده برای جلوگیری از تخریب دیواره کانال اجتناب و جلوگیری به عمل آید و سعی شود با تمهیدات امنیتی و مهندسی این مکان‌ها را با فاصله مناسب و در جائی از کارگاه که فشاری به دیواره کانال وارد نشود قرار گیرند.

قبل از حفاری کانال مسیر پروفیل تونل‌های مترو باید در خصوص وجود چاه‌ها و سپتیک‌های فاضلاب ساختمان‌های مجاور که در نزدیکی کانالی که در حال گودبرداری می‌باشد شناسایی گردد و در روی نقشه مشخص و علامت‌گذاری شوند، اگر سطح خط تراز آب و فاضلاب چاه‌ها و سپتیک‌ها بالاتر از سطح خط تراز نهایی کف گودی کانال باشد آن وقت باید برای تخلیه آن‌ها و انتقال فاضلاب این ساختمان‌ها به جایی دیگری چاره‌اندیشی کرده و برای جلوگیری از استفاده مجدد آن‌ها اقدامات لازم صورت گیرد. اگر سطح تراز آب‌های زیرزمینی بالاتر از سطح تراز

گودی محل حفاری باشد در این صورت باید گودبرداری کانال مسیر حفاری مترو با در نظر گرفتن متدها و روش‌های زهکشی آب‌های موجود در محل انجام شود تا چائی که سطح تراز آب‌های زهکشی شده در محل پایین‌تر از سطح تراز گودی کانال قرار گیرد.

در محل‌های که مسیر حفاری کانال در نزدیکی ساختمان‌ها می‌باشد با توجه به فاصله کم و نزدیکی کانال با این سازه‌ها و برای جلوگیری از نشست آن‌ها در دو طرف کانال دیواری‌های پیش‌ساخته‌ای به صورت سازه نگهبان اجرا می‌گردد.

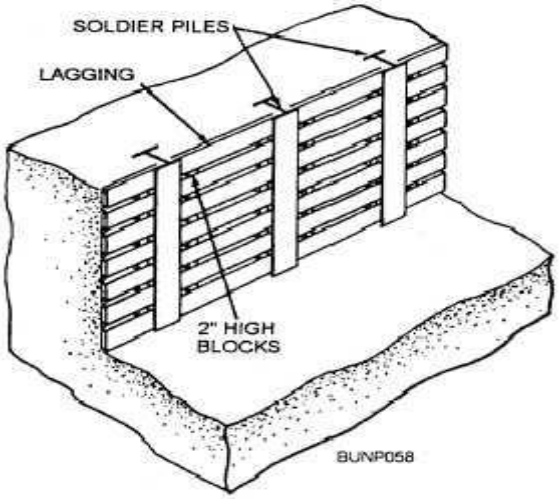
سازه نگهبان برای حفاظت از کانال حفاری شده تونل

روش‌ها و متدهای مختلفی که جهت محکم کردن و پیشگیری از تخریب دیواره کانال حفاری شده جهت اجرا سازه تونل می‌باشد که سازه نگهبان نامیده می‌شوند این روش‌ها متفاوت و به شرح زیر می‌باشند:

- انجام دیواره سازه نگهبان توسط المان‌های کششی.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط کوبیدن درجا شمع‌ها.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط المان‌های افقی و مایل.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط سپرکوبی.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط انکراژ.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط دوخت به پشت– پین گذاری.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط دیوار دیافراگمی.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط نیلینگ.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط خرپا.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط دیواره حائل تونل.
- انجام دیواره سازه نگهبان توسط المان‌های کششی.

از این روش برای مقاوم‌سازی و استحکام دیواره کانال در مناطق شهری با تراکم ساخت مناطق مسکونی و اداری صورت می‌گردد و اغلب جهت محکم کردن دیواره کانال برای مدت زمانی کوتاهی استفاده می‌شود در این روش برای استحکام دیواره‌های کانال از تیرهای فولادی که در زمین کار گذاشته می‌شوند استفاده می‌گردد مقدار ارتفاع این ستون‌های فولادی به عمق کانال حفاری شده بستگی دارد و کمی بیش از سطح ارتفاع تمام شده کف نهایی کانال است اغلب فاصله بین المان‌ها را بین ۲ تا ۴ متر در نظر می‌گیرند و مابین این فواصل را با الوارهای چوبی پر می‌کنند.

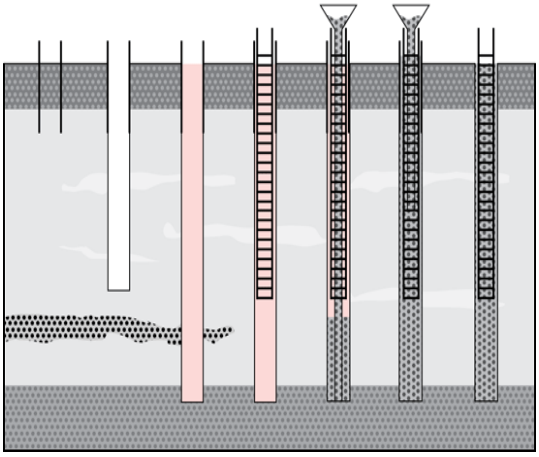
(تصاویر ۷-۲ و ۸-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط کوبیدن درجا شمع‌ها

از این روش می‌توان برای حفاظت دیواره کانال در هر نوع خاک و زمین مختلفی استفاده کـرد و برای شروع با دستگاه حفارهای روتاری چاه‌های با عمق متناسب حفاری کرده و آن‌ها را با بتون مسلح پر می‌کنند برای استحکام و حفاظت بیشتر از سازه نگهبان می‌توان در میان شمع‌های کار گذاشته به صورت قائم تیرهای فولادی افقی هم نصب کرد از این روش برای مکـان‌هـای کـه سطح آب‌های زیرزمینی بالا است و برای جلوگیری از ورود این آب‌ها به درون کانال و همچنین آب‌بندی کانال استفاده می‌گردد.

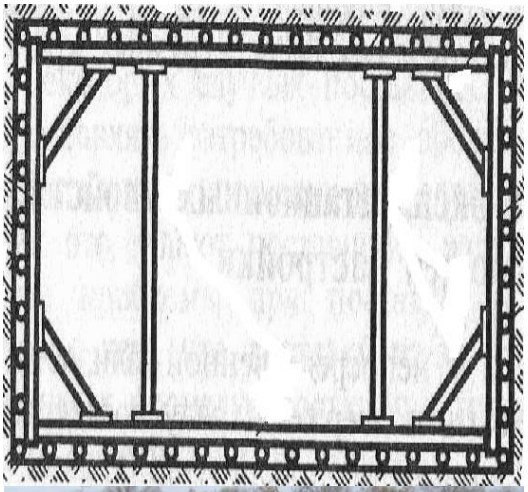
(تصاویر ۹-۲ و ۱۰-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط المان‌های افقی و مایل

این یکی از روش‌های ساده انجام سازه نگهبان برای نگهداری و حفاظت از دیواره کانال حفاری شده می‌باشد، برای این منظور قبل از عمل انجام حفاری گودی کانال باید در دو طرف دیواره مسیر کانال آینده شمع‌های فولادی یا بتون‌آرمه قرار گذاشت و سپس با انجام عملیات حفاری پله به پله تیرهای فولادی افقی را در میان شمع‌های کوبیده شده در دو طرف جداره دیوار کانال نصب کرد و هر چه عمق حفاری بیشتر گردد می‌توان تیرهای بیشتری افقی را به سمت پایین و در بین شمع‌های کوبیده شده نصب می‌کنند.

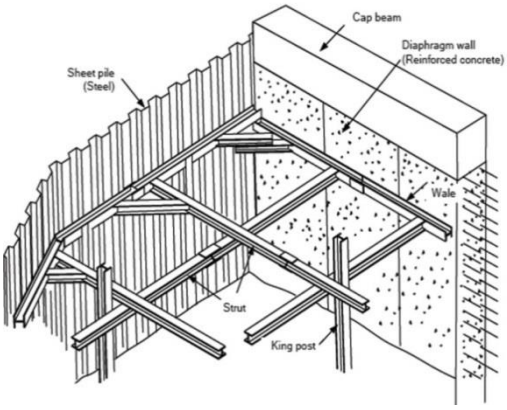
(تصاویر ۱۱-۲ و ۱۲-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط سپرکوبی

در این روش از سپرهای فولادی که استحکام زیادی دارند استفاده می‌شود و به وسیله اتصالاتی که در روی این سپرها وجود دارد آن‌ها را به هم متصل می‌کنند که با هم دیـواره یکپارچـه‌ای را تشکیل می‌دهند و برای استحکام بیشتر این دیواره تیرهای فولادی افقی را در میان آن‌هـا قـرار می‌دهند، حسن استفاده از این روش مقرون به صرفه بودن آن می‌باشد و همچنین می‌توان پس از پایان پروژه آن‌ها را بیرون کشیده و در پروژه‌های دیگری مورد استفاده قـرار داد، از سـپرهای فولادی بیشتر در زمین‌های ماسه‌ای و با خاک‌های نرم و سطح آب‌های زیرزمینی بـالا اسـتفاده می‌گردد، در مناطق شهری از این روش به علت اینکه نصب آن‌هـا بـا دسـتگاه‌هـای کوبنـده‌ای صورت می‌گیرد که لرزش زیادی در محیط اطراف خود به وجود می‌آورند کمتر استفاده می‌شود.

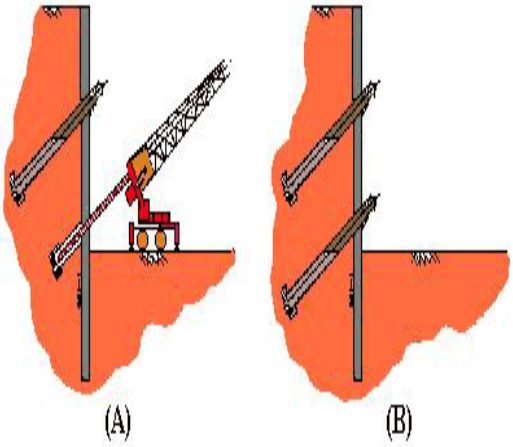
(تصاویر ۱۳-۲ و ۱۴-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط انکراژ

از این روش در جاهای استفاده می‌شود که زمین محل پروژه دارای خاک‌های سست و ضعیف داشته باشد برای این منظور توسط دستگاه‌های حفار چاه‌های با فواصل مشخص و عمقی معلوم در مکان‌های از پیش تعیین شده در زمین حفر می‌کنند و در درون این چاه‌ها پروفیل‌های فولادی H شکل قرار داده بطوری که در ته این چاه‌ها و در روی شمع‌های که از قبل درست شده‌اند مهار می‌گردند و برای استحکام بیشتر و جلوگیری از تخریب دیواره سازه نگهبان در بدنه دیوار توسط دستگاه‌های حفار سوراخ‌های ایجاد و درون آن‌ها آرماتور گذاشته و سپس بتون تزریق می‌کنند.

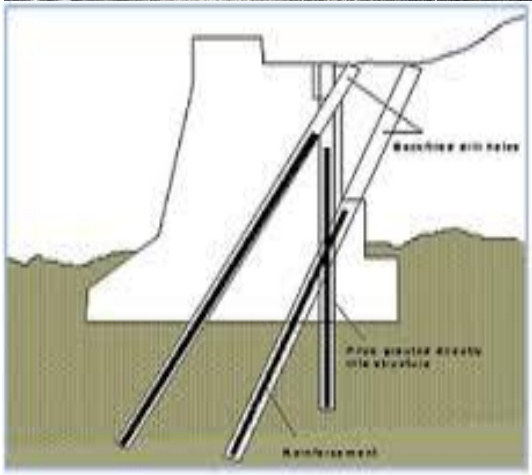
(تصاویر ۱۵-۲ و ۱۶-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط دوخت به پشت- پین گذاری

در این روش در دیواره سازه نگهبان چاه‌های را بـه صـورت حفـاری‌هـای افقـی و مایـل انجـام می‌دهند و در درون آن‌ها کابل‌های پیش تنیده قرار داده و در انتهای چاه‌ها بتون تزریق می‌کنند و سپس این کابل‌ها را در روی جداره دیوار سازه نگهبان محکم کرده و سپس بطور کامل تمـام چاهک‌ها را با تزریق بتون پر می‌کنند و پس از خشک شدن بتون کابل‌ها را آزاد کـرده و دیـواره سازه نگهبان محکم و قابل بهره‌برداری می‌شود.

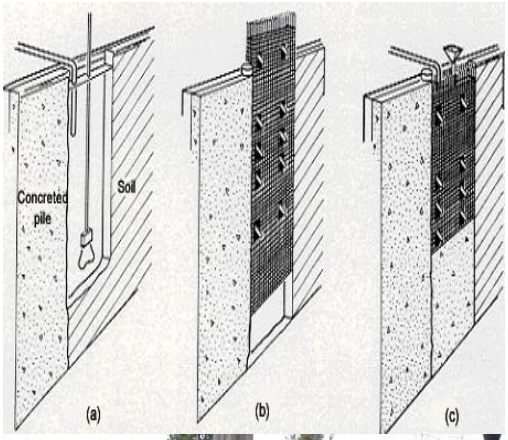
(تصاویر ۱۷-۲ و ۱۸-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط دیوار دیافراگمی

از این روش می‌توان در مناطق شهری و برای حفاظت از دیواره کانال استفاده کرد بدین ترتیب اول با دستگاه‌های حفار هیدروفرز و یا گراب که از بهترین دستگاه‌های حفاری دیافراگمی در ساخت سازه‌های نگهبان هستند چاه‌های قائم را حفاری می‌کنند و همزمان با حفاری با دوغاب بنتونیت برای جلوگیری از محل ریزش حفاری چاه‌ها استفاده می‌شود و پس از رسیدن به عمق مورد نظر آرماتوربندی گردیده و در نهایت بتون‌ریزی صورت می‌گیرد و در نتیجه دیوار سخت و محکمی به وجود می‌آید که از تخریب دیوارهای کانال در حین کار جلوگیری به عمل می‌آید از این روش برای جلوگیری از جاری شدن آب‌های سفره‌های زیرزمینی به درون کانال هم استفاده می‌گردد.

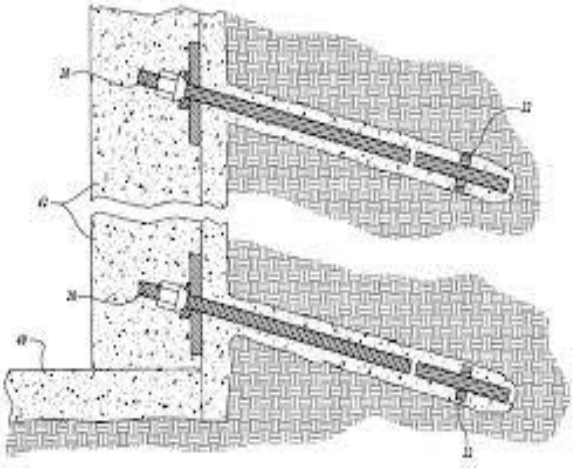
(تصاویر ۱۹-۲ و ۲۰-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط نیلینگ

یکی از روش‌های است که برای پایداری دیوارهای کانال‌ها استفاده می‌شود در این روش اول با استفاده شاتکریت دیواره کانال را به صورت موقتی برای استحکام خاک دیواره ترانشه و یا کانال محکم می‌کنند و سپس با مهارهای کششی فولادی «نیل» که با فاصله‌های نزدیک از همدیگر توده خاک می‌دوزند، استفاده از این روش باعث افزایش مقاومت برشی و نیروی در سطح خاک می‌شود.

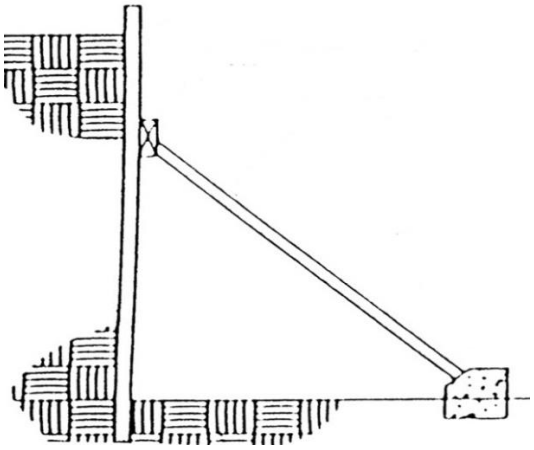
(تصاویر ۲۰-۲ و ۲۱-۲)



انجام دیواره سازه نگهبان توسط خرپا

در این روش که برای پایدارسازی جداره گودبرداری کانال استفاده می‌شود از سازه نگهبان خرپایی که یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین روش‌های پایدارسازی برای کانال‌های با عمق متوسط است استفاده می‌شود، در این روش پروفیل‌های فولادی خرپایی را در فواصل معین به دیواره گودی تکیه داده تا خرپاها با تحمل فشار جانبی ناشی از سربار خاک و انتقال آن به زمین مانع از ریزش دیواره گودی شوند و اجرا این روش در شرایط مختلف قابلیت انعطاف‌پذیری زیادی دارد و در میان روش‌های مختلف دیواره سازه نگهبان این روش یکی از مناسب‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های اجرای دیواره گودی می‌باشد و البته پس از اتمام پروژه امکان استفاده مجدد از خرپاها در پروژه‌های دیگر می‌باشد.

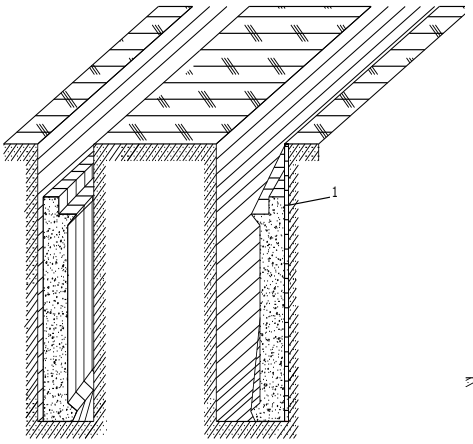
(تصاویر ۲۱-۲ و ۲۲-۲)

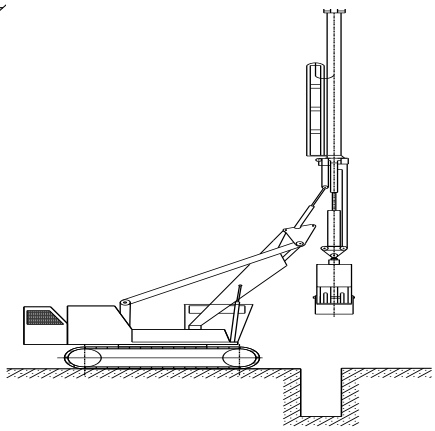


انجام دیواره سازه نگهبان توسط دیواره حائل تونل

روش دیگری برای جلوگیری از دیواره تخریب کانال حفاری شده مسیر پروژه تونل‌های مترو در زمین‌های کم عمق و محل‌های پر تراکم شهری اجرا دیواره حائل تونل است که پس از تعیین و مشخص نمودن دو طرف محور تونل و میخ‌کوبی توسط دستگاه حفار مخصوص دو کانال را با عمق مورد نیاز حفاری کرده و سپس در این دو کانال دیواره بتونی به عمق و عرض مورد نظر احداث می‌کنند این دیواره‌ها نقش دیواره حائل و همچنین دیواره سازه نگهبان برای جلوگیری از تخریب دیواره کانال و جاری شدن آب‌های زیرزمین به درون کانال آینده را انجام می‌دهند و پس از آن اقدام به تخلیه خاک و زمین محور مسیر پروژه تونل می‌کنند، در (تصاویر ۲۳-۲ و ۲۴-۲) سمت راست دستگاه حفار و روش حفاری ترانشه را نشان می‌دهد و سمت چپ تصویر قالب‌بندی و بتون‌ریزی دیواره سازه نگهبان و دیواره حائل تونل را نشان داده است.

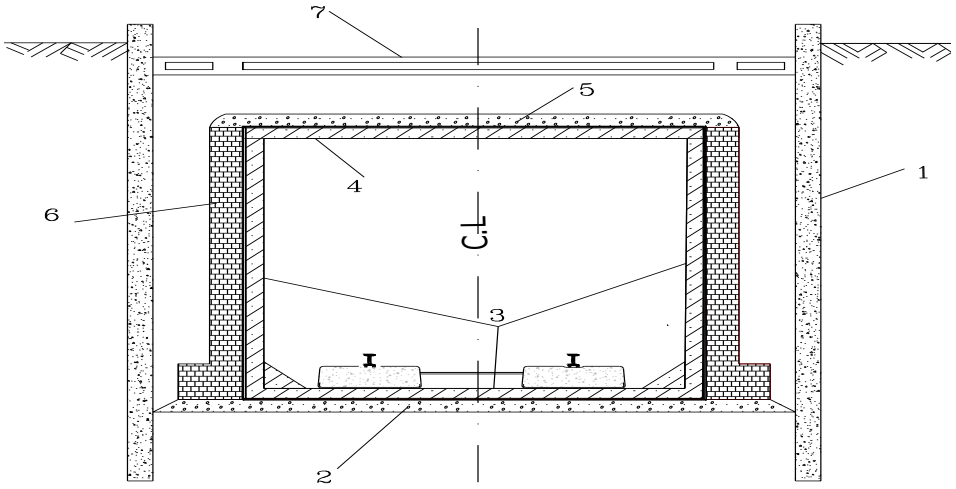
(تصاویر ۲۳-۲ و ۲۴-۲)





پس از آن کف و دیواره و سقف تونل آینده را قالب‌بندی و بتون‌ریزی می‌کنند و پس از اینکه اجرای سازه نگهبان ایستگاه کامل گردید در گام‌های بعدی عملیات اجرای رادیه کف، دیوارها و سقف تونل در محل اجرا می‌شود، در این روش به علت باز بودن بالای مسیر حفاری پروژه تونل سختی کار کمتر و سرعت اجرا ساخت پروژه هم بیشتر می‌گردد و از نظر اقتصادی هزینه‌های ساخت ساز هم کمتر می‌شوند.

(تصاویر ۲۵-۲)

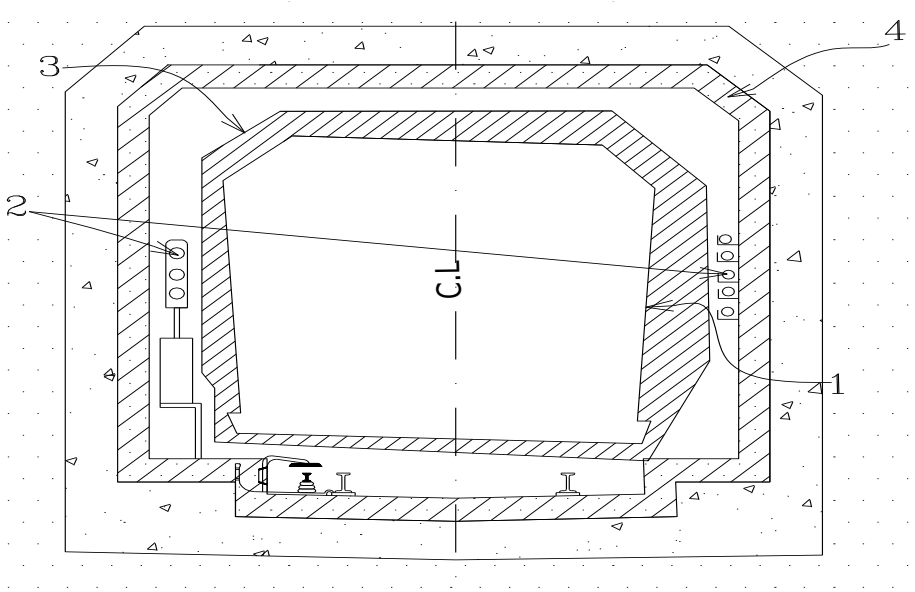


در (تصاویر ۲۵-۲) تونل به صورت روباز و بدون شیب با دیواره محافظ بتونی را نشان می‌دهد، برای مونتاژ و اجرا ساخت چنین پروژه به شرح زیر صورت می‌گیرد: ۱- دیوار بتونی سازه نگهبان و دیوار حائل در دو طرف کانال اجرا می‌گردد ۲- بتون مگر و یک لایه ایزوگام برای جلوگیری از آب‌های سطحی در کف کانال در زیر تونل آینده انجام می‌گردد ۳- اجرا دیواره دو طرف و سطح زیرین تونل را با بتون مسلح انجام می‌دهند و دیوارها و سقف را ایزوگام می‌کنند. ۴ - در روی دیوارهای ساخته شده در دو طرف کانال سقف تونل را با بتون مسلح می‌پوشانند. ۵- پس از اجرا سقف تونل برای جلوگیری از هر گونه آسیبی و استحکام بیشتر یک لایه بتونی را در روی سقف اجرا می‌کنند ۶- پس از اتمام دیواره‌های تونل دور تا دور دیواره‌ها بیرونی تونل آینده را با آجرچینی دیوار می‌کشند. ۷- پس از آماده شدن تونل و عایق‌بندی یک دال بتونی در روی سازه ساخته شده تونل مجدداً در روی سطح بالای تونل خاک‌ریزی انجام می‌گردد تا به ارتفاع سطح اولیه زمین طبیعی برسد.

در حفاری پروفیل مسیر تونلی که به صورت روباز در زمین‌های با عمق کم ساخته و اجرا می‌شود باید سازه پروژه تونل با فواصل ۱۰ تا ۱۵ متر به صورت پیوسته و تا آخر خط پروژه ساخته جلو رفته و مونتاژ گردد البته اگر پروژه ساخت تونل در زمین‌های سخت و از نظر زمین‌شناسی مناسب برای ساخت و ساز تونل باشد در آن صورت بدون ساخت دیواره سازه نگهبان در اطراف مسیر پروژه تونل حفاری را به صورت ترانشه پلکانی انجام می‌دهند.

در طراحی پروفیل تونل در عمق کم که به صورت حفاری رو باز و به صورت ترانشه‌ای صورت می‌گیرد از تونل‌های با مقطع فرم هندسی چهار گوش برای یک پروفیل مسیر و یا دو پروفیل مسیر به صورت رفت و برگشت استفاده می‌گردد، در (تصویر ۲۶-۲) طرح برش نقشه هندسی تونل و محل تجهیزات نصب شده را با مشخصات و ابعاد مقطع برای تونل چهار گوش را نشان می‌دهد.

(تصویر ۲۶-۲)



در (تصویر ۲۶-۲) مشخصات تونل به شرح زیر می‌باشد:

۱. ابعاد و اندازه واگن‌های قطارهای مترو و ماکزیمم جابجایی و کج شدن آن‌ها در حین حرکت.

۲. محل تجهیزات داخلی تونل (کابل چراغ‌های راهنما و غیره).

۳. مقدار اندازه فاصله حائل بین واگن‌ها و تجهیزات داخلی تونل (محل هاشور زده شده).

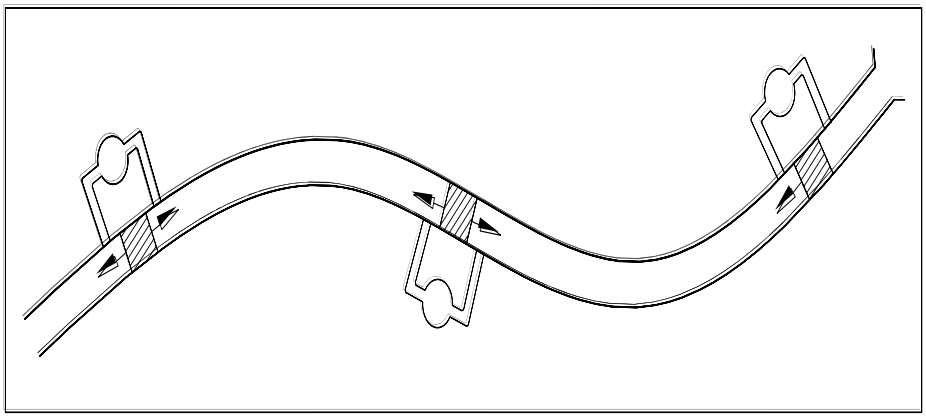
۴. اندازه تمام شده پوشش داخلی بدنه تونل.

روش‌های حفاری تونل در شهرها به صورت رو بسته

روش حفاری تونل به صورت رو بسته برای تونل‌های که پروژه ساخت و اجرا آن‌ها در عمق زیاد زمین است صورت می‌گیرد، حفاری در زیر زمین به نحوی صورت می‌گیرد که به استحکامات و ساختمان‌های روی سطح زمین خسارتی وارد نشود و نشستی در آن‌ها به وجود نیاید و سازه آن‌ها دست نخورده و سالم باقی بمانند.

برای ساخت تونل‌های حمل و نقل و دیگر تونل‌های که پروژه ساخت و اجرا آن‌ها در عمق زیاد می‌باشند در مرحله شروع به کار حتماً حفاری از سطح زمین شروع می‌شود و تا عمق مورد نیاز زیر سطح زمین حفاری صورت می‌گیرد مقدار اندازه این حفاری به اندازه و فرم و شعاع سازه تونل‌ها و نوع خاک زمین در منطقه حفاری پروژه بستگی کامل دارد، در حفاری تونل با عمق زیاد اگر طول مسیر پروژه حفاری تونل زیاد گردد در نزدیکی مسیر پروژه تونل چندین چاه حفر کرده و از طریق گالری‌های دسترسی برای حفاری تونل آینده مانند (تصویر ۲۷-۲) اقدام می‌گردد.

(تصویر ۲۷-۲)

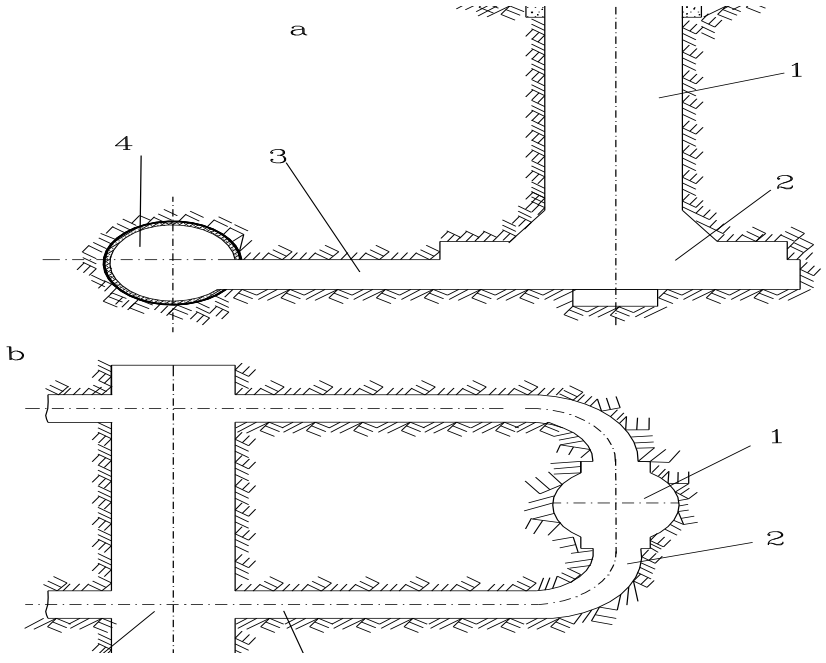


با توجه به در نظر گرفتن راحتی کار در حین مونتاژ و اجرا پروژه سازه تونل اغلب این چاه‌های عمودی که متصل به گالری‌های می‌باشند با فواصل ۵۰-۲۰ متری از مسیر پروژه تونل حفاری می‌گردند.

گاهی اوقات هم در بعضی از شهرهای با تراکم زیاد پیمانکاران به سختی می‌توانند محلی را برای تجهیز کارگاه مسیر پروژه تونل‌های مترو پیدا کنند، آن وقت این چاه‌های عمودی را در فواصل ۵۰ متری از مسیر محور پروژه تونل را حفر می‌کنند اندازه این فاصله‌ها مربوط می‌شود به

تراکم ساخت سازهای صورت گرفته در شهرها که اغلب مشکلات فراوانی برای کارفرمایان و پیمانکاران احداث پروژه تونل و مترو به وجود می‌آورند، در هر قطعه از محل پروژه تونل چند اکیپ حفار کار کرده و از دو طرف در دو سینه کاری جداگانه شروع به حفاری می‌کنند تا در مکانی دو تونل به همدیگر برسند، در نتیجه استفاده از این روش عملیات سرعت حفاری پروژه تونل از نظر زمانی چندین بار بیشتر می‌گردد تنها مشکل و سختی این روش در تعیین دقت لازم عملیات نقشه‌برداری است که داشتن خطاهای بسیار و کمی دقت دستگاه‌های نقشه‌برداری و اشتباه در محاسبات ژئودوزی باعث نرسیدن تونل‌ها به همدیگر و یا انحراف تونل از مسیر پروفیل اصلی پروژه می‌شود، در (تصویر ۲۸-۲) چاه‌های عمودی و گالری‌های دسترسی به تونل‌های را نشان داده است.

(تصویر ۲۸-۲)



در (تصویر ۲۸-۲) a,b شماره‌های ۱ و ۲ چاه‌های عمودی می‌باشند و شماره ۳ گالری و شماره ۴ مسیر پروفیل پروژه تونل است، در شهرهای بزرگ ماکزیمم فواصل طولی مابین این چاه‌ها از یکدیگر $L \leq 1000m$ (کمتر از هزار متر) است که اندازه فواصل طولی برای جلوگیری و کم کردن خطاهای به وجود آمده در پروژه نقشه‌برداری مسیر تونل و همچنین راحتی تخلیه سنگ و خاک به بیرون از تونل و حمل مصالح ساخت تونل به داخل تونل می‌باشد.

در ساخت و اجرا پروژه و حفاری تونل با عمق زیاد از طریق چاه‌های قائم و گالری‌ها تخلیه خاک و سنگ و زمین و همچنین ادامه حفاری و مونتاژ سازه تونل صورت می‌گیرد، چاه‌های که اغلب در جوار مسیر پروفیل تونل حفاری و ساخته می‌شوند بیشتر برای حمل و انتقال مصالح و ماشین‌آلات مورد نیاز، اکسیژن و تخلیه آب‌های سطحی از داخل تونل به بیرون مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای حفاری تونل تا عمق $H \leq 20m$ از سطح زمین اغلب به جای حفر چاه‌های عمودی با حفر یک شکاف جعبه مانند (باکس) که مستقیماً در محور مسیر محور تونل حفاری می‌شود و از این شکاف جعبه مانند برای مونتاژ و انتقال تجهیزات (دستگاه حفار و...) در مراحل ساخت ساز از طریق کانال مذکور از سطح زمین به داخل تونل و برای فرستادن وسایل مورد نیاز کارکنان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

طرح هندسی تونل با مشخصات و ابعاد مقطع تونل‌ها

برای اجرا و مونتاژ ساخت تونل‌ها شبکه مترو همیشه در مسیر تونل با توجه به اندازه‌های خط پروژه و تخلیه و بیرون آوردن خاک و زمین حفاری شده به روی سطح زمین مستحکم سازی و پایدارسازی دیواره داخلی تونل پس از حفاری کامل مقطع تونل با قاب‌های فلزی و لایه مش و شاتکریت خشک انجام می‌دهند و سپس محکم سازی دیواره داخلی تونل و عملیات کف سازی با تسطیح کف تونل و اجرای رادیه کف و همچنین و انجام پوشش داخلی تونل (Lining) صورت می‌گیرد.

طرح هندسی تونل عبارت است از شکل و مشخصات مقطع تونل در زمان اجرا و بهره‌برداری و البته اندازه‌های داخلی تونل‌های مترو در هنگام طراحی ژنرال پلان پروژه مسیر تونل تعیین می‌گردد این ابعاد و اندازه‌های تونل به صورت اندازه‌های عرضی و ارتفاعی برای تونل می‌باشند.

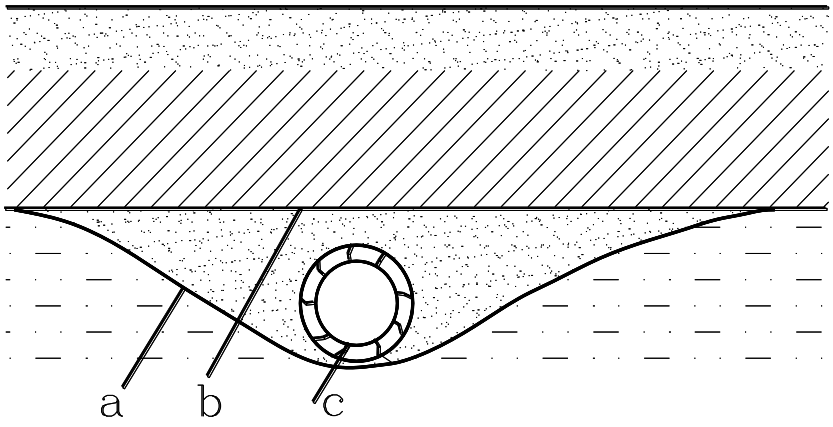
فرم و شکل هندسی تونل‌های مترو

در پروژه‌های ساخت و اجرا تونل‌های مترو از اجزاء پیش‌ساخته قطعات بتون‌آرمه (سگمنت) استفاده می‌گردد و حتی بعضی اوقات در مکان‌های از مسیر پروژه تونل نسبت به شرایط موجود لایه‌های زمین که از نظر زمین‌شناسی مشکل سازند پوشش داخلی تونل را با سگمنت‌های از جنس فولاد و یا چدن ساخته و ساخته و مونتاژ می‌کنند.

با پیشرفت تکنولوژی طراحی ساخت و اجرا تونل‌ها هم‌اکنون برای پوشش داخلی تونل (Lining) بیشتر از روش بهره‌برداری از «شاتکریت» و یا «بتن درجا» استفاده می‌گردد افزودن الیاف در بتن، موجب تقویت ویژگی‌ها و خواص بتن شاتکریت می‌شود استفاده از شاتکریت باعث بستن ترک‌ها و شکاف‌های کوچک در دیواره مسیر تونل می‌گردد و همچنین تمرکز تنش‌ها را در اطراف بدنه تونل را کاهش می‌دهد و از ضخامت زیاد شاتکریت به عنوان یک قوس نگهدارنده برای سازه تونل استفاده می‌شود، اگر در مسیر پروژه ساخت تونل زمین از لایه‌های سنگی تشکیل شده باشد و این توده سنگ مقاومت و مشخصه‌های ژئوتکنیکی مناسب داشته باشد می‌توان از آن به عنوان یک جزء اصلی نگهدارنده برای مسیر تونل استفاده کرد و دیگر از پوشش‌ها بتونی و چدنی و فولادی و همچنین سیستم شاتکریت استفاده نمی‌شود. همیشه پس از اتمام ساخت پروژه تونل‌های مترو این طاق‌های تونل‌ها هستند که تحت تنش و فشار زیاد قرار دارند. با توجه به شرایط خاص زمین‌شناسی محل پروژه می توان عواملی که بر دیواره و سقف تونل مؤثرند و فشار زیادی بر سازه تونل وارد می‌کنند را معلوم و مشخص کرد و در این باره تمهیداتی باید انجام داد و این موضوع برای بهره‌برداری تونل‌ها در آینده از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. حفاری تونل در دل زمین باعث تخریب و تغییر رژیم آبهاهای زیرزمینی در لایه های خاک میگردد بخصوص این حالت در زمینهای صورت می گیرد که لایه های خاک آب دار باشند.در حین حفاری پروژه تونل آبهای زیرزمینی به منطقه حفاری سرازیر می شوند که لازم است این آبها را به سطح زمین انتقال داد و این باعث میگردد که که سطح آبهای زیرزمینی در حالت a– در لایه های خاک پایین رود در (تصویر ۲۹-۲) در این مرحله هیچ فشار هیدرواستاتیکی از سوی آبهای زیر زمینی بر سازه تونل فشاری وارد نمی کند.بنابراین برای جلوگیری از نفوذ آبهای زیرزمینی به داخل تونل لازم است آببندی پوشش بیرونی سازه تونل انجام گردد برای این منظور به پوشش بیرونی تونل بتون تزریق می کنند و هر شکاف و درزی

در سازه تونل وجود داشته باشد را می بندند و عایق کاریهای لازم را انجـام مـی دهنـد و بعـد از انجام این اعمال جلوی ورود آبهای زیر زمینی به داخل تونل گرفته می شود و با توقف تخلیـه و پمپاژ آبهای زیر زمینی به سطح زمین پس از مدتی این آبهای به لایه های زمین اطـراف تونـل بازگشته و زمین حالت طبیعی اولیه خود را پیدا مـی کنـد (تصـویر ۲۹-۲) در حالـت b – در روی تونل لایه از آب تشکیل می شود و سازه تونل فشار ناشی از آبهای زیر زمینی را تحمل می کنـد که به فشار هیدرواستاتیکی معروف است (تصویر ۲۹-۲) مشخصات آبهای زیرزمینی را بشرح زیـر توضیح می دهد: a– شکل لایه های زمین در پروسه حفاری تونل. b– شکل لایه های زمین تا قبل و بعد از حفاری و اجرا پروژه تونل. c – سازه تونل می باشد.

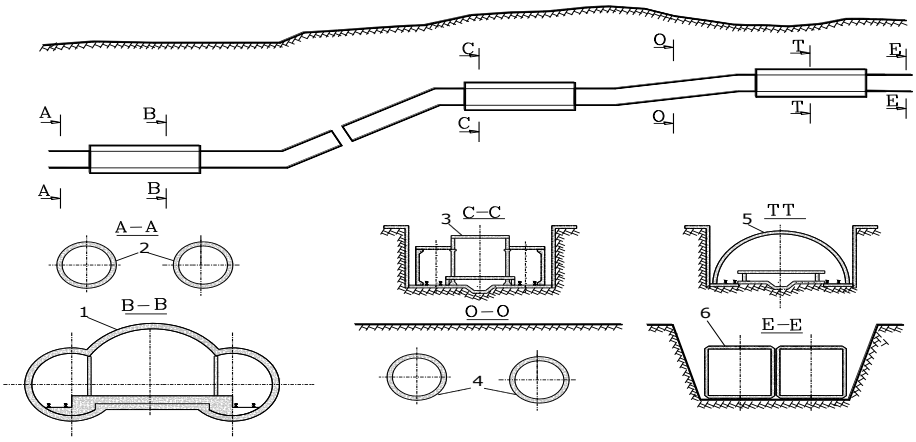
(تصویر ۲۹-۲)



فشارهای که بر سازه تونل وارد می شوند به دو دسته تقسیم می شـوند:۱– فشـار همیشـگی۲– فشار موقتی.فشار همیشگی شامل فشار لایه های زمین ، فشار هیدروستاتیکی ، فشـار ناشـی از وزن ساختمانهای و سازه های ساخته شده در روی زمین و در بالای تونل و همچنین وزن خـود سازه تونل می باشد. فشار موقتی شامل فشار ناشی از حرکت قطارها در تونل،فشار وسایل نقلیـه در حال حرکت در سطح زمین(این فشار فقط شامل تونلهای با عمق کم می شود)، فشار ناشـی از تزریق بتون در حین انجام پوشش داخلی تونل (لاینینگ) و فشار ناشی از جکهای هیدرولیکی دستگاه تی بی ام می باشند بنابراین در طراحی سازه تونـل ایـن موضـوعات مهـم را طراحـان و کارشناسان مربوطه مدنظر قرار می دهند انتخاب طراحی انواع سازه تونل‌ها و فرم و شکل مقطع تونل و تولید قطعات بتونی (فولادی و یا چدنی) و مونتاژ و ساخت سازه تونل بـه عوامـل زیـادی

مانند عمق حفاری تونل، طول تونل، محل حفاری تونل، شرایط زمین‌شناسی، ویژگی‌های مکانیک خاک، توپوگرافی و عوارض موجود طبیعی زمین در محل پروژه تونل بستگی دارد و همه این موارد ذکر شده در احداث و ساخت هر پروژه تونل نقش مهم و بسزائی بازی می‌کنند در (تصویر ۳۰-۲) نمونه سازه‌های مختلف تونل‌های خطوط جابجایی و ایستگاه‌های حمل مسافران شبکه زیرزمینی مترو را در عمقهای متفاوت نشان می‌دهد.

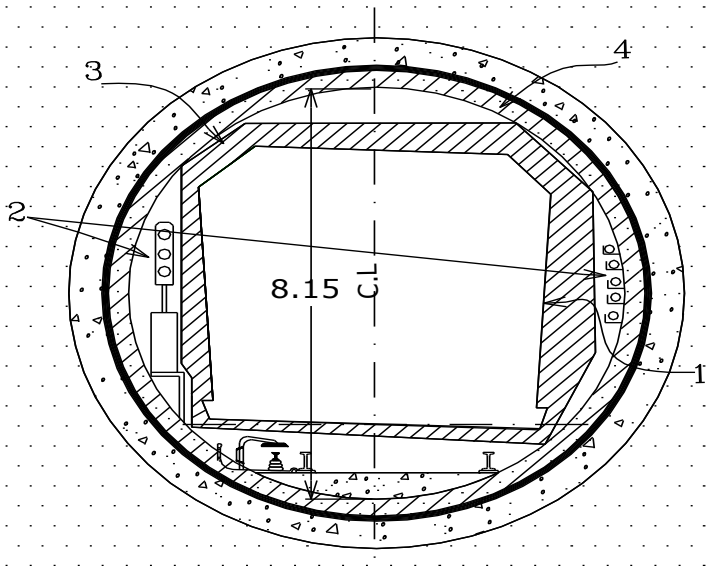
(تصویر ۳۰-۲)



در (تصویر ۳۰-۲) A-A تونل‌های مترو با سازه گرد شکل (زکور) و B-B ایستگاه مترو با سکوی سازه گرد و نیم دایره برای عمق زیاد و در تصویر C-C ایستگاه و سکوی جعبه‌ای شکل مترو و در تصویر T-T سکوی مترو با ایستگاه نیم دایره‌ای شکل و در تصویر E-E تونل‌های متروی جعبه شکل (باکس) که برای حفاری در عمق کم استفاده می‌گردد را نشان داده است. در پروژه‌های ساخت و مونتاژ تونل‌های مترو از نصب قالب‌های ساخته شده به صورت رینگ‌های دایره‌ای از جنس بتون‌آرمه و یا از جنس فولاد استفاده می‌گردد و تونل ساخته شده به صورت استوانه‌ای است که از قطعات گرد شکل ساخته شده و آماده بهره‌برداری قرار می‌گیرد، تونل‌های استوانه‌ای در مقایسه با دیگر سازه‌های تونل‌ها بیشترین تحمل را در مقابل فشارها و تنش‌های زمین از خود نشان می‌دهند و این تونل‌ها همچنین در تهویه مصنوعی هوای داخل تونل نسبت به دیگر تونل‌ها اثرات مثبت بیشتری از خود نشان می‌دهند، ابعاد مناسب مورد نیاز و قطر مفید داخلی تونل ارتباط مستقیم به گاباری (ابعاد قطار + تأسیسات داخلی تونل) ناوگان مسافربری دارد.

قطر تمام شده تونل‌های مترو اغلب برابر با $D = 8.15m$ می‌باشند (منظور تونل‌های جابجایی قطارهای مترو می‌باشد تونل‌های ایستگاه‌های متروی ابعادی بزرگتری دارند و این اندازه ارتفاع موجود از کف تمام شده تا سقف تمام شده است (تصویر ۳۱-۲) که در این طرح عرض واگن‌ها $L_v = 2.64m$، فاصله بین محور خطوط داخلی تونل $L = 3.2m$ می‌باشد، شبکه برق از نوع ریل سوم و سیستم روسازی از نوع دال بتنی است. (این ابعاد ذکر شده در بالا استانداردهای تونل‌های مترو در کشور روسیه و جمهوری‌های استقلال یافته از شوروی سابق می‌باشند) با مشخص بودن قطر مفید تونل و ضخامت سگمنت‌ها (اگر در اجرا و ساخت تونل از قطعات بتونی یا فولادی استفاده شود) قطر حفاری تونل آینده را می‌توان مشخص کرد در (تصویر ۳۱-۲) طرح هندسی تونل با مشخصات و ابعاد مقطع برای تونل گرد یا استوانه ی (زکور) شکل را نشان می‌دهد.

(تصویر ۳۱-۲)



ابعاد و اندازه‌های واگن‌های قطارهای متروی در طراحی تونل‌ها نقش مهمی دارند در طراحی بدنه داخلی تونل باید اندازه کامل واگن را با تمامی برجستگی‌ها و برآمدگی‌های واگن‌ها در نظر گرفته شود و برای تعیین دقیق ابعاد بدنه واگن‌ها آن‌ها را در حالت حرکت و جابجایی و حتی تکان خوردن و کج شدن واگن‌ها و انحراف واگن و یا در صورت خمیدگی و کج شدن ریل‌ها در داخل تونل‌ها مد نظر قرار می‌دهند و این ابعاد به دست آمده را در طراحی‌های تونل‌های شبکه مترو لحاظ می‌گردانند.

برای طراحی تونل‌های شبکه ریلی زیر زمینی مترو همیشه چهار اندازه مهم مورد نیاز می‌باشد که در طراحی هندسی و ساخت تونل‌های مترو توسط کارشناسان مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرند و در طراحی‌های ژنرال پلان مدنظر می‌گیرند:

۱. ابعاد و اندازه واگن‌های قطارهای مترو و ماکزیمم جابجایی و کج شدن واگن‌ها در حین جابجایی و حرکت.
۲. محل تجهیزات داخلی تونل (کابل چراغ‌های راهنما و غیره).
۳. مقدار اندازه فاصله حائل بین واگن‌ها و تجهیزات داخلی تونل (محل‌های هاشور زده شده).
۴. اندازه تمام شده پوشش داخلی بدنه تونل.

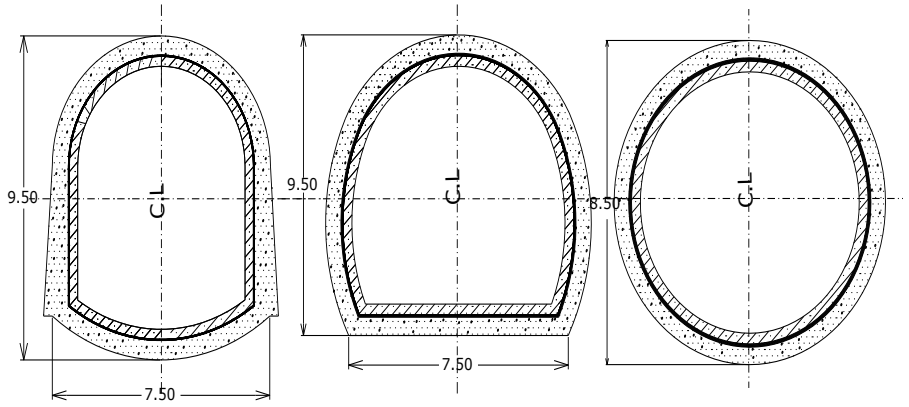
برای تعیین اندازه تمام شده پوشش دیواره داخلی تونل (تصویر ۳۱-۲ قسمت ۴) همیشه اندازه تمام شده بعد از نصب سگمنت‌ها و یا بعد از اتمام انجام لاینینگ(Lining) را اندازه‌گیری و در نظر می‌گیرند که نسبت به طراحی پروفیل مسیر تونل که در بعضی از قسمت‌های مسیر محور تونل به صورت مستقیم و در جاهای دیگر محور مسیر تونل ممکن است به صورت خمیده و یا قوس‌دار باشد.محل مابین قسمت هاشور زده و دیواره داخلی تونل (تصویر ۳۱-۲ قسمت ۲) مقدار ماکزیمم اندازه فاصله حائل بین واگن‌ها و تجهیزات داخلی مونتاژ شده در داخل تونل‌ها مانند کابل‌ها که در روی کنسول‌های جهت نگه‌داری آن‌ها در داخل بدنه تونل مونتاژ می‌گردند و همچنین اندازه چراغ‌های راهنما، جعبه‌های نگه‌داری وسایل جهت تعمیرات ریل‌ها و چراغ‌های روشنایی داخل تونل و غیره را در نظر می‌گیرند و فضای خالی و بازی که مابین واگن‌ها و دیواره تونل به وجود می‌آید و در (تصویر ۳۱-۲) به صورت هاشور زده شده نشان داده شده است به نام «فضای زاپاس» نامیده می‌گردد.

مقدار اندازه این فضا توسط طراحان مشاور شبکه خطوط مترو تعیین می‌گردد و پیاده کردن و تعیین مقدار اندازه فضا زاپاس در داخل تونل‌های متروی برای کارشناسان نقشه‌برداری پروژه تونل و مترو خیلی مهم می‌باشد و این مقدار اندازه صحیح فضا حائل تونل‌ها در حقیقت نشان دادن مقدار دقت عملیات نقشه‌برداری در حین پیاده کردن این سازه‌ها در محل می‌باشد.

اغلب تونل‌های شبکه زیر زمینی مترو به صورت دو خط ریلی رفت و برگشت طراحی و ساخته می‌شوند این تونل‌ها همیشه با اندازه‌های متغیر و متفاوت طراحی و ساخته می‌گردند، تونل‌ها در مسیر حرکت قطار زیر زمینی به مقدار زیادی کوچکتر از تونل‌های محل ایستگاه‌های مترو می‌باشند و ابعاد و اندازه تونل‌های دارای یک مسیر و یک خط کوچکتر از ابعاد و اندازه‌های تونل‌های با مسیر رفت و برگشت هستند.

شکل هندسی خاص تونل که از تقاطع صفحه قائم بر محور تونل و صفحه افق به وجود می‌آید این شکل مقطع تونل با توجه به کاربرد آن به عوامل خاصی مانند شرایط زمین‌شناسی و عوامل مؤثری که بر دیواره و سقف تونل فشار وارد می‌کنند بستگی دارد و در سازه تونل این سقف تونل است که همیشه تحت بیشترین فشار و تنش زیاد می‌باشد. بنابراین در پروژه‌های ساخت و مونتاژ تونل در عمق زیاد اکثراً از تونل‌های با مقطع فرم هندسی گرد و یا نعلی شکل استفاده می‌شود، در (تصویر۳۲-۲) برش پلان تونل‌های گرد (زکور) و نعلی شکل که برای پروژه‌های ساخت تونل که در عمق زیاد طراحی و ساخته می‌شوند را نشان می‌دهد.

(تصویر ۳۲-۲)



همینطور که در صفحات قبل ذکر شده است تونل‌های استوانه‌ای شکل به‌خوبی توزیع فشارهای مکانیک سنگ و خاک را در عمق زمین تحمل می‌کنند و اثرات بیشتری در تهویه مصنوعی هوای داخل تونل نسبت به دیگر اشکال هندسی مقطع تونل دارند (هم‌اکنون در بیشتر پروژه سازهای زیرزمینی تونل از نوع تونل با مقطع رینگ‌های گرد شکل برای سازه تونل‌ها استفاده می‌کنند) در ساخت سازه تونل‌های نعلی شکل از جنس فولاد و یا بتن‌آرمه مسلح استفاده می‌شود و در تونل‌های با شکل هندسی نعلی شکل ارتفاع تونل همیشه بیش از عرض تونل می‌باشد.

فصل سوم:

حفاری تونل

حفاری تونل

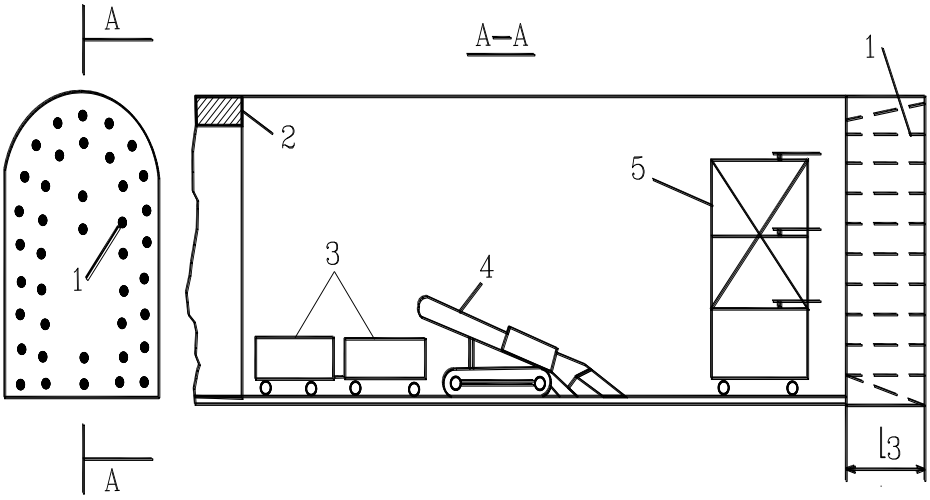
حفاری تونل همیشه به دو روش صورت می‌گیرد:

۱. حفاری به روش آتشباری

۲. حفاری مکانیکی

حفاری به روش آتشباری

این روش به علت سهولت در کار، صرفه اقتصادی و آزادی عمل در ایجاد حفاری تونل‌های معدنی و غیر معدنی یکی از ارزان‌ترین و پر کاربردترین و رایج‌ترین روش حفاری می‌باشد، در این روش کارشناسان بر اساس یکسری پارامترهای متعدد از قبیل نوع وضعیت زمین‌شناسی منطقه حفاری تونل، سطح مقطع تونل و مسائل اقتصادی دیگر طراحی با روش آتشباری را انجام می‌دهند، برای این منظور پس از مشخص شدن آکس تونل و با توجه به شکل هندسی فضای زیرزمینی محل در سینه کار تونل و مکان‌های زیرزمینی در قسمت‌های میانی جبهه کار تعدادی چال نزدیک به هم و با زوایای مخصوص با کمک دستگاه‌های حفاری مانند چکش دستی و یا دریل واگن و یا جامبو محل چال‌ها را حفاری کرده و سپس با چاشنی و دینامیت این محل‌ها را خرج گذاری کرده و منفجر می‌کنند. (تصویر ۱-۳)



در (تصویر ۱-۳) حفاری روش آتشباری را نشان داده است با مشخصات ۱- محل چال‌ها در سینه تونل که با و پس از پایان انفجار توسط دستگاه‌های مخصوص حمل سنگ و خاک را جمع‌آوری کرده و به بیرون از تونل منتقل می‌کنند و یک جبهه کار آزاد برای سایر چال‌ها و ادامه حفاری در تونل فراهم می‌کنند، همیشه کارشناسان نقشه انفجار در تونل‌ها را نسبت به ابعاد تونل، مقاومت سنگ‌ها، ضخامت فشنگ‌های مواد منفجره قدرت مواد منفجره و عواملی نظیر آن‌ها طراحی و اجرا می‌کنند. (تصویر۱-۳) مواد منفجره و یا دینامیت برای انفجار و تخریب پر می‌کنند ۲- طاق تونل که با فاصله مناسب از محل انفجار درست می‌کنند ۳- واگن‌های انتقال جمع‌آوری سنگ و خاک ناشی از انفجار برای حمل به بیرون از تونل ۴- دستگاه جمع‌آوری خاک و سنگ برای انتقال به واگن‌ها ۵ - دستگاه حفار که چال‌ها را در سینه تونل حفر می‌کند.

حفاری با روش مکانیکی

حفاری با روش مکانیکی دو گروه تقسیم‌بندی می‌شود:

- حفاری به صورت موضعی (با دستگاه کله‌گاوی)
- حفاری به صورت تمام مقطع (با دستگاه TBM)

حفاری تونل به با دستگاه کله‌گاوی:

در جلوی دستگاه کله‌گاوی یک یا دو بازوی است که به انتهای آن یک وسیله حفاری متصل گردیده است و این وسیله حفار حول بازوی دستگاه می‌چرخد و مقطع تونل را کم‌کم بزرگ می‌کند و خاک و سنگ حفاری شده را روی یک سینی که در جلوی دستگاه نصب گردیده ریخته شده و توسط یک تسمه نقاله به انتهای دستگاه انتقال داده و تخلیه می‌کند.

(تصویر ۲-۳)

در این دستگاه (تصویر ۲-۳) سطح مقطع وسیله حفاری آن به مراتب کمتر از سطح مقطع تونل می‌باشد و با حرکت دادن بازو توسط اپراتور در نقاط مختلف مقطع، تونل را حفاری می‌کند از این دستگاه‌ها در زمین‌هایی سست و ریزشی بسیار مورد استفاده قرار میگیرد.

دستگاه حفاری تمام مقطع به روش مکانیزه T.B.M:

در تکنولوژی حفاری و ساخت و اجرا شبکه تونل‌های مترو از روش‌های متفاوتی استفاده می‌گردد با نتایج به دست آمده از تجربیات بسیار کارشناسان این رشته که در طول سالیان متمادی در کار پروژه ساخت و اجرا تونل‌های شبکه زیرزمینی مترو نقش داشته‌اند باید گفت که تاکنون بهترین روش در حفاری و ساخت و مونتاژ تونل‌ها استفاده از دستگاه حفار و مکانیزه تمام مقطع T.B.M می‌باشد که روش مناسب‌تری نسبت به روش‌های دیگر حفاری و مونتاژ تونل‌های شبکه مترو

است. دستگاه‌های Tunnel Boring Machine یا T.B.M یکی از مهمترین ماشین‌آلات حفر تونل می‌باشند که در پروژه‌های ساخت و اجرا شبکه تونل‌های زیرزمینی مترو قادر به انجام حفاری به صورت تمام مقطع در تمامی مدت زمان شبانه‌روز هستند این دستگاه‌ها همزمان با حفاری مسیر پروژه تونل جایگذاری حلقه‌های بتونی را برای پوشش داخلی تونل انجام می‌دهند، این دستگاه‌ها به صورت کامل مقطع تونل را با یک صفحه برش که در جلو دستگاه نصب گردیده و حول محور تونل می‌چرخد حفاری می‌کنند این دستگاه‌ها در روی ریل نصب شده حرکت کرده و با پیشروی تونل ریل‌گذاری صورت گرفته و حفاری به صورت مداوم انجام می‌شود.

برای ادامه ساخت و اجرا هر چه سریع‌تر پروژه مسیر تونل دستگاه‌های خودکار حفار T.B.M در حین حفاری مسیر پروژه تونل قطعات سگمنت را هم در جداره داخلی تونل نصب می‌کنند البته این دستگاه‌ها از تکنولوژی پیچیده و خاصی برخوردار می‌باشند برای شروع کار با دستگاه حفار تمام مکانیزه T.B.M در محل محور مسیر تونل رمپی (شیب) در دو طرف انتهای تونل با ماشین‌آلات خاک‌برداری ساخته می‌شود تا بتوان دستگاه حفار T.B.M را به زیر زمین در مسیر امتداد محور تونل هدایت کرد و در آخر می‌توان از این رمپ پس از اتمام پروژه مترو برای راه خروجی مسیر راه‌آهن مترو از زیر زمین به داخل دپو (ایستگاه و تعمیرگاه واگن‌های مترو) بهره‌برداری کرد.

دستگاه حفار T.B.M به صورت استوانه است که از پوشش فولادی ضخیمی طراحی و ساخته شده است که در قسمت جلوی آن، کله حفار و یا صفحه برش دستگاه قرار دارد که در روی این صفحه برش تیغه‌های دیسک مدوری با دندانه‌های از جنس فولاد مخصوص واقع شده‌اند که برای کندن و خرد کردن لایه‌های زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند و همگی در جلوی دستگاه T.B.M نصب گردیده‌اند کله حفار و صفحه برش دستگاه کار حفر و خرد کردن لایه‌های زمین را انجام می‌دهد و در پشت سر کله حفار دستگاه محلی است که نصب سگمنت و جک‌های پیش برنده در آنجا قرار دارند، دستگاه‌های پیشرفته حفار T.B.M توانایی ایجاد حفره در هر نوع زمینی، از ماسه گرفته تا سنگ سخت را دارند، هم‌اکنون از دستگاه حفار و مکانیزه تونل T.B.M در شرایط سخت زمین‌شناسی و دارای آب‌های زیر زمینی با سطح بالا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از دستگاه‌های مکانیزه و تمام مقطع T.B.M (تصویر ۳-۳) کاربرد وسیعی در بسیاری از کشورهای جهان پیدا کرده‌اند در این دستگاه‌ها حفاری خاک به وسیله سیستم ویژه از

جلوی جبهه کار جمع‌آوری شده و به داخل نوار نقاله‌ای کـه از داخـل دسـتگاه تـا بـه پشـت آن می‌گذرد هدایت گردیده و سپس این خاک‌ها از آنجا توسط ماشین‌آلات حمل خاک و سـنگ بـه بیرون از محدوده تونل حمل و تخلیه می‌گردند، حرکت و جابجایی ماشین حفار T.B.M به سمت جلو و در روی ریل صورت می‌گیرد و با حرکت به سمت جلو ریل‌گذاری مسیر دستگاه هم توسط خود دستگاه انجام می‌گردد، حرکت روبه جلو دستگاه حفار و مکانیزه T.B.M توسط جـک‌هـای هیدرولیکی فشاری و از طریق اعمال نیرو و فشار توسط این جک‌های هیدرولیکی نصب شده در انتهای سپر تأمین می‌شود و دستگاه خود را به جلو و به داخل توده خاک میراند.

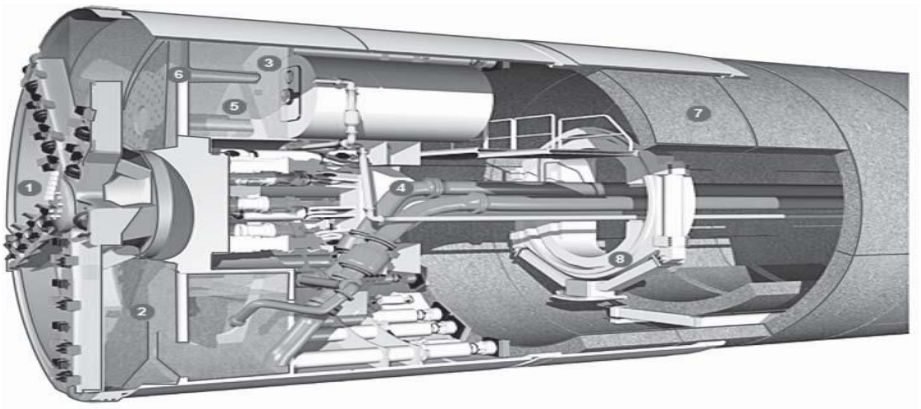
(تصویر ۳-۳)

با حرکت و رانش سپر فولادی استوانه شکل دستگاه T.B.M به سـمت جلـو حرکـت کـرده و از ریزش خاک و زمین به داخل تونل هم جلوگیری می‌کند ضمناً این دستگاه حفار عمل لاینینـگ تونل را با جاگذاری قطعات سگمنت بتونی و یا چدنی در پشت سر خود انجام مـی‌دهـد و بـرای حرکت بعدی به جلو جک‌ها هیدرولیکی قوی به این حلقه‌های ساخته شده از سگمنت‌های بتونی یا چدنی فشار وارد کرده و از فشار وارد شده به این حلقه های مونتاژ شده دستگاه به سمت جلو خیز بر می‌دارد، با توجه به شرایط خاص زمین‌شناسی و عوامل مـؤثر بـر پـروژه در یـک سـیکل کاری هر دستگاه T.B.M روزانه قادر اسـت حـدود ۱۸-۱۰ متـر حفـاری تونـل را انجـام دهـد. (تصویر ۴-۳) دستگاه حفار تمام اتوماتیک T.B.M را نشان می‌دهد.

دستگاه‌های T.B.M یک سازه فولادی است که متشکل از سه قسمت می‌باشد:

۱. بخش جلویی دستگاه که شامل سر حفار، سیستم محرک اصلی و نقاله مارپیچ است.
۲. قسمت میانی دستگاه که شامل سیستم رانش و سیستم نقاله حمل خاک می‌باشد.
۳. قسمت انتهایی آنکه شامل تجهیزات نصب پوشش تونل است.

(تصویر ۴-۳)



در (تصویر ۴-۳) مشخصات دستگاه حفار T.B.M به شرح زیر می‌باشد:

۱. بدنه.
۲. سر حفار دستگاه و ابزار برش.
۳. محفظه فشرده‌سازی خاک.
۴. دریچه ورود به جلوی محفظه سر دستگاه حفار.
۵. لوله‌های انتقال برای تزریق گروت.
۶. لوله‌ها تزریق هوای فشرده به جلوی محفظه دستگاه.
۷. صفحه آب‌بندی شده.
۸. دستگاه مونتاژ و نصب سگمنت‌ها.

دستگاه‌های حفار اتوماتیک T.B.M نسبت به نوع حفاری صورت گرفته به چند گروه تقسیم می‌شوند. (البته اصولاً تمامی ویژگی‌های اصلی دستگاه‌های T.B.M تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشند و همگی این دستگاه‌ها دارای سپر می‌باشند.)

در دستگاه‌های T.B.M نیروی رانش و حرکت به سوی جلو را به وسیله مجموعه‌ای از جک‌های قوی هیدرولیکی فشاری به وجود می‌آورد، این جک‌ها به لبه پوشش اجرا شده تونل به عنوان سکوی عکس‌العمل فشار وارد آورده و قسمت جلویی دستگاه را به سمت جلو رانده و باعث ایجاد حرکت دستگاه حفار T.B.M به سمت مخالف فشار جک‌ها را فراهم می‌کند.

در دستگاه‌های T.B.M جک‌های هیدرولیکی فشاری می‌توانند بطور جداگانه عمل کرده و یا به صورت گروه‌هایی برای فراهم نمودن قابلیت هدایت اصلی برای سپر جلویی عمل کنند.

کارخانه‌های سازنده دستگاه T.B.M برای هدایت و مانور حرکتی در قوس‌هایی پروفیل محور تونل با شعاع کم را مابین قوس میانی و قوس عقبی به صورت اتصال مفصلی می‌سازند. در روش‌های قدیمی که حفر تونل‌ها با استفاده از روش متە زنی و انفجار دینامیت انجام می‌گرفت اغلب اوقات باعث پدید آمدن مشکلاتی در محیط‌ها و مناطق اطراف تونل و همچنین باعث نامنظم شدن شکل داخلی تونل حفاری شده می‌گردید که در روش حفاری با دستگاه‌های حفار T.B.M این مشکلات برطرف شده‌اند، البته اگر در مسیر حفاری پروفیل پروژه تونل به محل‌های که به توده سنگ زمین سخت برخورد کنند و دستگاه حفار T.B.M نتواند پیشروی کند آن وقت از روش حفاری به صورت انفجاری استفاده می‌کنند.

دستگاه‌های T.B.M دارای مزایایی همچون کاهش تعرض به زمین‌های مجاور و ایجاد دیوارهای نرم در تونل را فراهم می‌سازد این دستگاه‌ها به صورت قابل توجهی هزینه آستره کشیدن دیواره داخلی تونل را کاهش داده که خود این عمل باعث شده که استفاده از دستگاه‌های حفار T.B.M در مناطق شهری بسیار مناسب و همچنین مورد رضایت کارفرماها گردد، با استفاده از دستگاه تی بی ام علاوه بر اینکه هیچ یک از دو مشکل ذکر شده در بالا به وجود نمی‌آید، ضمناً باعث کم شدن هزینه ساخت پروژه تونل‌های مترو هم می‌شود البته دستگاه‌های تی بی ام بسیار گران‌قیمت می‌باشند که هر کارفرمائی قادر به تهیه و خرید این دستگاه‌ها نمی‌باشد.

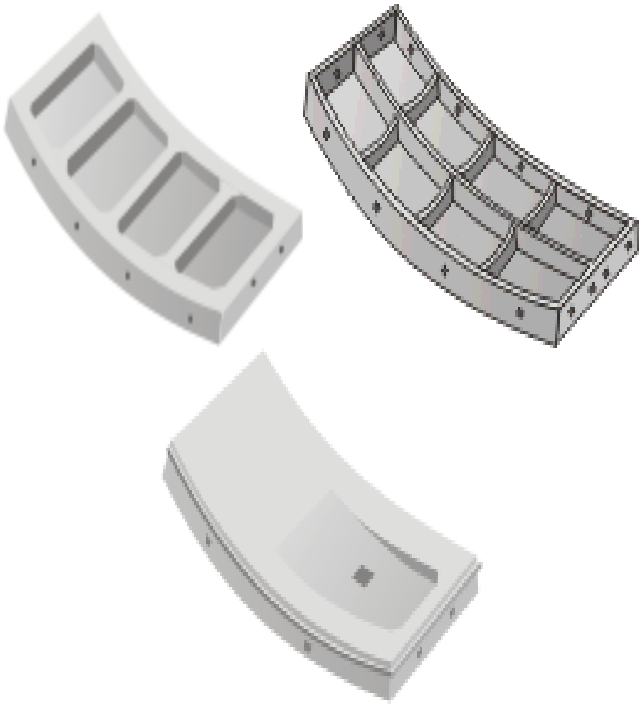
پوشش سازه درونی تونل‌های مترو

پوشش سازه درونی مسیر تونل‌های مترو پس از حفاری توسط دستگاه T.B.M با قطعات پیش‌ساخته که در (تصاویر ۵-۳) سگمنت نامیده پوشش گذاری می‌شوند.

در پروژه ساخت تونل با نصب قالب‌های ساخته شده (سگمنت) بتونی و یا فولادی که در کنار هم به صورت رینگ‌های گرد و یا نعلی شکل بتونی و فولادی صورت می‌گیرد و تونل به وجود آمده در حقیقت به صورت استوانه‌ای است که از رینگ‌های گرد شکل تشکیل گردیده است.

این سگمنت‌ها اغلب از جنس بتون‌آرمه و یا از جنس چدن و یا فولاد با عرض‌های ۱ تا ۲ متر ساخته می‌شوند که به صورت اتوماتیک توسط دستگاه حفار T.B.M این قطعات سگمنت را در مکان‌های خود قرار داده و مقطع تونل به صورت رینگ‌های پیش‌ساخته در می‌آید و از مونتاژ تعداد زیادی رینگ در مسیر محور تونل بدنه استوانه داخلی تونل به وجود می‌آید.

(تصاویر ۵-۳)



اگر پروژه سازه تونل در زمین‌های با شرایط سخت زمین‌شناسی قرار گرفته باشد طراحی پروژه سازه تونل توسط متخصصان تحت شرایط خاصی نسبت به شرایط ژئومتری، ژئولوژی و ژئومکانیک زمین محل اجرا پروژه سازه تونل طراحی و ساخته می‌شود، بنابراین همیشه سازه تونل‌ها را نسبت به وضعیتی که در منطقه احداث پروژه وجود دارد بررسی و طراحی می‌کنند.

با توجه به طبیعت ناهمگون لایه‌های و مشخصه‌های ژئوتکنیکی زمین در طول مسیر پروژه تونل طراحی محل پروژه و سازه تونل هم متغیر و متناسب با مشخصه‌ای زمین‌شناسی محل پروژه می‌باشد و برای اجرا حفاری مسیر پروژه تونل در منطقه احداث پروژه باید مطالعاتی توسط کارشناسان زمین شناسی در خصوص حفاری و مشخصه‌های ژئوتکنیکی زمین صورت پذیرد، مطالعات مزبور بسیار وقت‌گیر می‌باشند و همیشه قسمتی هنگفتی از هزینه ساخت پروژه را به خود تخصیص می‌دهند که طراحان و کسانی که هزینه ساخت مسیر پروژه تونل را محاسبه می‌کنند این هزینه‌ها را باید در نظر داشته باشند لزوم این تحقیقات بسیار برای احداث پروژه تونل ضروری می‌باشد و بدون تحقیقات زمین‌شناسی اجرا و ساخت مسیر پروژه تونل غیرممکن است و در آینده پروژه احداث و اجرا تونل با مشکلات جبران‌ناپذیری گریبانگیر می‌شود بنابراین در اجرا و احداث ساخت تونل نتایج دقیق و حرفه‌ای شناخت زمین‌شناسی مسیر حفاری پروژه تونل خیلی مهم و حیاتی می‌باشند و با به دست آوردن تحقیقات کامل زمین‌شناسی امکان ساخت و حفاری احداث پروژه تونل را آشکار و یا اینکه پروژه را منجمد و تعطیل می‌کند.

در هر دو روش حفاری پروژه تونل اگر در محل حفاری پروژه دارای سطح آب‌های زیرزمینی بالا باشد در مرحله اول باید آب را از محل حفاری صورت گرفته شده به بیرون از محل پروژه پمپ و یا اینکه خاک محل مورد نظر را با روش خاص منجمد کنند تا جلوگیری از ورود آب‌های سطحی به درون تونل شوند و مزاحمتی برای کارگران در حین کار کردن و اجرا پروژه تونل ایجاد نکند، برای حفاری تونل در شرایط سخت زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی با سطح بالای آب‌های زیر زمینی و فشار هیدرواستاتیکی بیش از ۲ اتمسفر از سگمنت‌های ساخته شده از جنس چدن یا فولاد که تحمل زیادی در قبال فشارهای هیدرواستاتیکی و همچنین در مقابل ورود آب به داخل مسیر تونل به علت خاصیت نفوذ ناپذیری و یا ضد آب را دارند استفاده می‌گردد. (در تونل‌های خطوط حمل و نقل شبکه متروی شهر مسکو استفاده از سگمنت‌های جنس چدن و فولاد خیلی بکار گرفته شده است).

سگمنت‌های فولادی و چدنی از نظر فرم ساخت هیچگونه تفاوتی با سگمنت‌های بتونی ندارند و فقط تفاوت در وزنشان می‌باشد وزن سگمنت‌های فولادی ۲ تا ۲,۵ برابر سبک‌تر از سگمنت‌های چدنی می‌باشند اما سگمنت‌های فولادی در قبال زنگ‌زدگی و خوردگی شیمیایی ضعیف می‌باشند و این زنگ‌زدگی‌ها در دراز مدت و در زیر زمین باعث خوردگی و ضعیفی و لاغر شدن سگمنت‌های فولادی بدنه تونل گردیده و حادثه‌ساز می‌شوند لازم است برای جلوگیری از زنگ‌زدگی از روش‌های معمول که اغلب جهت جلوگیری از زنگ‌زدگی اجسام فلزی استفاده می‌شود و یا اینکه مناسب است که سگمنت‌های فولادی را گالوانیزه کنند و در کل این دو نمونه سگمنت گران‌تر از سگمنت‌های با بتون‌آرمه می‌باشند.

سازه‌های ساخته شده تونل توسط این نوع سگمنت‌ها باید از استحکام و کیفیت بالای برخوردار باشند این قطعات پیش‌ساخته برای مونتاژ دیواره داخلی تونل‌های دایره‌ای (ذکور) طراحی و ساخته می‌شوند. در (تصاویر ۶-۳) شکل حلقه‌ای تونل با قطعاتی مونتاژ شده از سگمنت‌ها بتونی و فولادی که در ساخت تونل استفاده گردیده است را نشان می‌دهد.

(تصاویر ۶-۳)

سگمنت‌های ساخته شده برای تونل‌های مترو باید از کیفیت بالا و استحکام کافی جهت تحمل بارهای سنگین لایه‌های زمین و فشاری که خاک بر روی سازه تونل وارد می‌کنند باشند و دارای خاصیت ضد آب بودن و همچنین از عمر طولانی برخوردار باشند، تونل‌های که ساخت و اجرایشان با قطعات پیش‌ساخته شده بتونی (سگمنت‌ها) و یا با بتون مسلح می‌باشند اغلب در

کارخانه‌ای در نزدیک محل پروژه حفاری تونل ساخته و آماده می‌شوند و توسط ماشین‌آلات حمل به داخل تونل برای مونتاژ کردن حلقه‌های (رینگ‌ها) پیش‌ساخته برده می‌شوند. برای ساخت و اجرا سازه تونل‌های دایره شکل از سگمنت‌های استفاده می‌شوند که با مونتاژ آن‌ها حلقه‌های (رینگ‌ها) جداره پوشش داخلی تونل ساخته می‌شوند و از مونتاژ تعداد زیاد این رینگ‌های بتونی است که در نهایت پوشش استوانه مسیر تونل آینده به وجود می‌آید.

اندازه و تعداد سگمنت‌ها در حلقه‌های مونتاژ شده (رینگ‌ها داخل تونل) به شرایط حمل و نقل قطعات به داخل تونل و شرایط نصب و مونتاژ و محل مونتاژ آن‌ها در زیر زمین بستگی کامل دارند بنابراین در ساخت و تولید این قطعات پیش‌ساخته بتونی (از جنس فولاد و یا چدن هم استفاده می‌شود) یا همان سگمنت‌ها عواملی زیادی را باید در نظر بگیرند که توسط کارشناسان این امور طراحی و در ژنرال پلان پروژه ساخت شبکه‌های مترو پیش‌بینی و مشخص می‌گردند.

فصل چهارم:

عملیات نقشه‌برداری زیرزمینی در پروژه ساخت تونل

عملیات ژئودوزی برای اجرا و پیاده کردن محور تونل‌های مترو

پیاده کردن و اجرا سازه‌های زیرزمینی و تونل‌های مترو نیاز بـه حجـم زیـاد محاسـبات ریاضـی سنگین برای عملیات ژئودوزی دارد که بسیار متنوع، متفاوت و خاص نسـبت بـه سـایر مسـائل دیگر ژئودوزی می‌باشند، نقش کارشناسان ژئودوزی در اجرا سازه‌های زیرزمینـی و شـبکه‌هـای مترو همراه با حجم بسیار زیاد عملیات و محاسبات طولانی ژئودوزی برای بالای سطح زمـین و هم در پایین سطح زمین می‌باشد که در زیر سطح زمین به علت داشتن کمبود نور و روشـنائی و فضائی کوچک و وجود گرد و خاک و رفت و آمد ماشین‌آلات و حمل و جابجایی مصـالح بسـیار مشکل‌تر و سخت‌تر نسبت به روش‌ها و عملیات ژئودوزی موجود دیگر مـی‌باشـد، بـه ایـن نـوع ژئودوزی اغلب ژئودوزی زیرزمینی و یا معادن (کان‌ها)UNDER ground surveying می‌گویند.

برای حل مسائل ژئودوزی زیرزمینی در هنگام ساخت و اجرا پـروژه‌هـای سـازه‌هـای زیرزمینـی بخصوص شبکه‌های زیرزمینی مترو نیاز به انجام مجموعه‌ای از عملیات و محاسـبات متفـاوت و پیشرفته ژئودوزی می‌باشد، با توجه بـه ترکیـب و تنـوع متـدها و روش‌هـای تکنیکـی متفـاوت ژئودوزی اغلب در پیاده و اجرا کردن پروژه‌های سازه‌های زیر زمینی و بخصوص شبکه‌های تونل و مترو از این روش‌ها استفاده می‌گردد. برای حفاری و ساخت تونل‌های مترو کـه از دو طـرف و در دو سینه کاری جداگانه به وسیله دستگاه‌های حفار و تمام اتومات Tunnel Boring Machine یا T.B.M استفاده می‌گردد تمامی مجموعه کار را می‌توان به چندین گروه کلی تقسیم کرد:

۱. ایجاد شبکه مختصاتی و ارتفاعی اصلی (ژئودتیک) در بالای سطح زمین و در نزدیکی خـط پروژه شبکه‌های تونل و مترو.

۲. ایجاد تهیه پلان توپوگرافی و پلان خاص در سطح باریکی و در امتداد مسـیر پـروژه پـلان شبکه مترو.

۳. محاسبه تحلیلی ژئودوزی برای اجرا و آمادگی جهت پیاده‌سازی پروژه شبکه زیرزمینی مترو و اجرا آن در زیر سطح زمین.

۴. تعیین و تشکیل شبکه مختصاتی و ارتفاعی ژئودوزی اصلی در سطح بالا و سطح زیرین زمین.

۵. انتقال مختصات نقاط و ژیزمان سطح زمین به زیر زمین و به داخل تونل‌ها.

۶. انجام و پیاده‌سازی اجزاء اصلی سازه تونل در بالای سطح و زیر سطح زمین.

۷. انجام عملیات ژئودوزی برای حرکت صحیح دستگاه حفار اتومات تی بی ام (T.B.M).

۸. بررسی و نگه‌داری در خصوص تعیین نشست سگمنت‌های تونل، سازه و ساختمان‌های موجود و ساخته شده در بالای سطح زمین.

۹. تدوین و ترسیم نقشه و پلان اجرائی سازه‌های تونل‌های شبکه زیرزمینی مترو.

۱۰. عملیات ژئودوزی برای انجام و نصب اجرا ریل‌های راه‌آهن در مسیر پروژه تونل.

هر کدام از مسائل بالا نیاز به انجام عملیات ژئودوزی مخصوص به خود و با پیچیدگی‌ها و تحلیل‌های ریاضی مخصوص به خود را دارند که باید با دقت فراوان و دور از هرگونه خطائی محاسباتی انجام شوند.

شبکه‌های اصلی ژئودوزی در سطح و زیر سطح زمین

برای ادامه حفاری و ساخت و اجرا سازه تونل در زیر زمین در مسیر تعیین شده پروفیل پروژه تونل توسط کارشناسان ژئودوزی مختصات نقاط ثابت سطح زمین را به ایستگاه‌های زیرزمینی از طریق چاه‌ها و گالری‌های حفاری شده انتقال داده و سپس از طریق این نقاط مختصات مشخصه و معلوم محور تونل Centerline را پیاده می‌کنند و در حین پیشروی در مسیر محور تونل شبکه پیمایش و شبکه ترازیابی را در داخل تونل امتداد و پخش می‌کنند، این دو شبکه پیمایش و ترازیابی (ارتفاعی) اساس تمامی انجام عملیات نقشه‌برداری برای ساختن و مونتاژ پروژه سازه تونل و برداشت و تعیین مقطع تونل و هر گونه ساخت و ساز دیگری در روی سطح و زیر زمین می‌باشند.

در کل شبکه‌های ژئودوزی که در زیر سطح زمین استفاده می‌شوند به دو دسته تقسیم می‌گردند:

- شبکه نقشه‌برداری در روی سطح زمین در نزدیکی محدوده محور تونل‌های مترو.
- شبکه نقشه‌برداری در زیر سطح زمین واقع در تونل‌ها و گالری‌هایی شبکه مترو.

شبکه نقاط ژئودوتیک در سطح زمین پایه کار اصلی کارشناسان ژئودوزی برای اجرا پروژه تونل با طول طولانی می‌باشد مخصوصاً در مناطقی که ساخت و سازهای صورت گرفته شهری متراکم باشند. طبق آیین‌نامه‌ها ژئودوزی زیرزمینی شبکه نقاط ژئودوتیک باید چندین مرحله‌ای و در بر گیرنده تمامی سازه‌های مربوط به پیاده و اجرا کردن تونل‌های مترو که در مسیر پروفیل پروژه تونل می‌باشند و شبکه نقاط پیمایش موجود در محل این امکان را فراهم می‌سازد که اجرا، پیاده کردن، ساخت سازه‌های و حرکت دستگاه‌های حفار با دقت مناسب در هر قسمت از مسیر پروژه در ژنرال پلان لحاظ می‌گردد. همیشه ساخت ساز پروژه تونل‌های مترو در مناطق پر تراکم شهری با مشکلاتی همراه می‌باشد یکی از این مشکلات تهیه شبکه‌های ژئودتیکی در محل و امتداد پروژه خط مترو (شبکه‌های پیمایش برای انتقال مختصات نقاط اصلی و ترازیابی برای انتقال ارتفاع نقاط اصلی) برای اینکه محل استقرار این نقاط که باید از دقتی مناسب و بالائی برخوردار باشند بیشتر در نزدیکی پروژه سازه‌های زیرزمینی قرار گرفته‌اند که در این مناطق به علت جابجایی لایه‌های زمین ناشی از حفاری و خاک‌برداری در زیر زمین امکان نشست و حرکت و جابجایی نقاط اصلی شبکه‌های مختصاتی و ارتفاعی می‌باشد. برای کنترل استحکام و ثبات کافی این شبکه‌های ژئودوزی لازم است که نقاط اصلی شبکه حتماً در مناطقی دور از زون (zone) یا منطقه نشست و جابجایی لایه‌های زمین و با کنترل اندازه‌گیری‌های مجدد صورت پذیرد. در عملیات ژئودوزی پروژه مترو کارشناسان ژئودوزی برای اجرا مسیر حفاری تونل که توسط دستگاه‌های حفار صورت می‌گیرد انجام لاینینگ(Lining) شبکه پیمایش را در زیر زمین و در داخل تونل‌ها را به صورت باز (آنتنی) انجام می‌دهند، برای دقت بیشتر ایجاد نقاط و ایستگاه‌های اصلی شبکه‌های ژئودوزی که جهت پیاده و اجرا کردن پروژه شبکه تونل‌های مترو استفاده می‌شود باید از شبکه ژئودوزی نقشه‌برداری کشوری استفاده گردد، پروسه انتقال نقاط مختصات دار از سطح زمین به زیر زمین همیشه از طریق چاه‌ها و گالری‌ها متصل به تونل انتقال پیدا می‌کنند و به این پروسه عملیات جهت‌یابی و یا امتداد یابی گفته می‌شود.

همیشه پروسه عملیات جهت‌یابی (پیدا کردن امتداد) سیستم مختصاتی روی سطح زمین و زیر سطح زمین را به یک سیستم مشترک مختصاتی تبدیل می‌کنند. سیستم ترازیابی انتقال نقاط ارتفاعی در بالای سطح زمین و همچنین زیر سطح زمین با روش ترازیابی کلاس درجه II و کلاس درجه III و با توجه به طول پروفیل تونل در نظر گرفته می‌شود. انتقال نقاط ارتفاعی از سطح زمین به زیرزمین و داخل تونل همچنین از طریق چاه‌ها و گالری‌ها و پیشانی تونل (پارتال) انجام می‌شود. در هنگام اجرا و ساخت پروژه سازه‌های زیرزمین بخصوص تونل یک بخش مهم از کارها و عملیات ژئودوزی زیرزمینی پیاده کردن نقاط دهانه و محور *Centerline* و فرم مقطع تونل می‌باشد، پیاده کردن نقاط اصلی سازه تونل و در جبهه کار پیشرفت حفاری و لاینینگ تونل همگی بستگی به دقت سیستم مختصاتی موجود دارد همچنین پیکتاژ شروع محور قوس تونل، وسط، انتهای و بطور کلی پیاده کردن تمامی اجزاء قوس و هدایت دستگاه حفار تمام اتوماتیک T.B.M همگی بستگی به دقت سیستم مختصاتی و محاسبات دقیق را دارد، در هنگام اجرا پروژه تونل‌های شبکه مترو حتماً بررسی راهکارهای مهندسی برای رفتارنگاری سازه تونل جهت جلوگیری از نشست این سازه‌ها را باید انجام داد بخصوص در زمین‌های که از نظر زمین‌شناسی خاک ضعیف و سستی دارند و یا اینکه پروژه احداث تونل در مناطق زلزله‌خیز و یا منطقه‌ای که احتمال وجود گسل باشد و همچنین رفتارنگاری تمامی ساختمان‌های که در روی سطح زمین و در امتداد و فاصله کمی و یا در روی مسیر پروژه احداث تونل قرار دارند را انجام داد در شهر مسکو و سنت پترزبورگ روسیه ساختمان‌های قدیمی که در نزدیکی شبکه مترو واقع بودند پس از گذر چندین سال و یا چندین دهه به علت نشست لایه‌های خاکی که ناشی از ویبره و لرزش حرکت قطارهای مترو در زیر زمین به وجود می‌آمد تخریب شدند و خسارت جبران‌ناپذیری بر روی دست دولت روسیه بر جائی گذاشتند. یکی از اساسی‌ترین قدم‌های مهم برای اجرا پروژه تونل‌های شبکه مترو تهیه و تعیین پلان توپوگرافی از منطقه مورد نظر اجرا پروژه شبکه مترو می‌باشد که حتماً این پلان باید با همراهی و هماهنگی کارشناسان زمین‌شناسی و داشتن نقشه‌های زمین‌شناسی از محل باشد با در دست داشتن این نقشه‌های می‌توان مسیر مناسب و صحیح تونل را در لایه‌های سخت زمین پیاده و اجرا کرد و همچنین برای احداث چاه‌ها و گالری‌ها دسترسی به تونل و دیگر سازه‌ها و تأسیسات مورد نیاز مربوط به شبکه مترو در مناسب‌ترین و مطمئن محل در نظر گرفت، البته در هر مرحله از طراحی پروژه نیاز به نقشه‌های توپوگرافی و با مقیاس‌های متفاوت می‌باشد. برای مقدمه کار و در مرحله

پایه اجرا و ساخت پروژه شبکه تونل‌های مترو از نظر دید فنی و اقتصادی لزوم داشتن نقشه‌های توپوگرافی از محل پروژه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ – ۱:۵۰۰۰۰ و برای تهیه و اجرا جزئیات پروژه تونل‌ها و یا نقشه‌های اجرائی لزوم داشتن نقشه‌های با مقیاس ۱:۱۰۰۰– ۱:۵۰۰۰ می‌باشد و در مرحله تهیه نقشه‌های اسناد کاری نیاز به نقشه‌های با مقیاس ۱:۲۰۰– ۱:۵۰۰ و ۱:۱۰۰ می‌باشد. برای پلان پیشانی تونل (پارتال)، پله‌های برقی ورودی به تونل، سالن فروش بلیط مترو یا بطور کلی محل‌های که نیاز به حفاری روباز می‌باشد از پلان‌های در مقیاس ۱:۱۰۰– ۱:۲۰۰ استفاده می‌گردد. برای تهیه پلان توپوگرافی جهت طراحی محل پروژه اجرا و ساخت تونل‌های مترو نیاز به پلان کم عرض و باریکی در نزدیکی و در طول مسیر تونل به عرض ۱/۰ km– ۰/۳ (از ۳۰۰ متر تا یک کیلومتر) می‌باشد. برای سرعت بخشیدن به تهیه چنین پلانی اغلب از پلان‌های قبلی موجود از منطقه پروژه احداث تونل با کمی تغییرات و برداشت‌های مجدد جهت بهنگام سازی (بروزآوری) پلان محل استفاده می‌گردد.

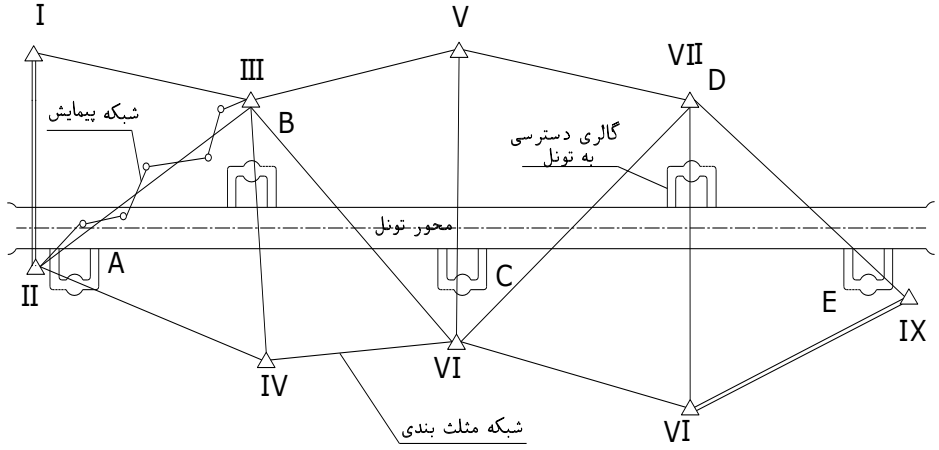
در تمامی پلان‌های مورد استفاده که در اجرا پروژه ساخت تونل استفاده می‌گردد حتماً باید مسیرهای سیستم تأسیسات شهری اعم از فاضلاب شهری (اگر تخلیه فاضلاب در چاه‌های جذبی صورت می‌گیرد باید محل و عمق چاه‌های معلوم شوند)، کابل‌های برق و تلفن و سیستم لوله‌کشی آب و گاز، لوله‌های حمل مواد سوختی و نفتی و همچنین وجود سازه‌های زیرزمینی در روی نقشه با دقت مکانی مناسب معلوم و مشخص شوند (در کشور ما که مکان‌های باستانی فراوانی وجود دارد همکاری و همیاری با کارشناسان اداره باستان‌شناسی میراث فرهنگی از ضروریات می‌باشد)، برای تهیه چنین پلانی لازمه همکاری کارشناسانی در این زمینه‌ها می‌باشد.

در هنگام انجام پروسه انجام طراحی پروژه امکان دارد که مختصات و نقاط ارتفاعی و ارتفاع ساختمان‌ها و سازه‌های که در محدوده ساخت تونل شبکه مترو می‌باشند و همچنین تعیین مقدار اندازه ارتباط فنی آن‌ها با پروژه تونل در دست احداث مورد نیاز و بررسی می باشد.

برای نشان دادن این سازه‌ها و ساختمان‌ها در روی پلان حتماً باید از سیستم مختصاتی که برای پیاده کردن پروژه تونل در محل استفاده می‌گردد بهره برد که در آینده مشکلی از نظر مختصاتی و جابجایی در روی نقشه‌ها به وجود نیاید، از این پلان‌ها برای آنالیز پروژه اجرا و ساخت تونل در عمق زیاد استفاده می‌شود. شبکه‌های ژئودوزی در زیر زمین از دقت بالا و اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند و به همین نحو از مشکلات و سختی‌های خاص خود به علت کمبود روشنائی

و تاریکی، وجود گرد خاک و آب و ریزش سنگ و خاک به کف تونل، کوچک بودن محل کار و همچنین کارکرد ماشین‌آلات حفار و غیره برخوردار می‌باشد. در اجرا پروژه‌های شبکه زیرزمینی تونل‌های مترو مسئولیت زیادی بر دوش کارشناسان نقشه‌برداری می‌باشد آن‌ها در بالای سطح زمین و در زیر سطح زمین شبکه‌های مثلث‌بندی و پیمایش را انجام می‌دهند (تصویر ۱-۴) که البته در زیر زمین و داخل تونل‌ها شرایط سخت محیطی و کاری بیشتر می‌باشد. اهمیت دقت شبکه نقشه‌برداری در زیر زمین به خاطر رسیدن دو محور مسیر تونل به همدیگر می‌باشد، برای حفاری تونل‌های شبکه زیر زمینی مترو حفاری زمین را از دو سوی پروفیل مسیر محور تونل توسط ماشین‌آلات مخصوص حفاری با هدایت کارشناسان نقشه‌برداری تا تلاقی محور تونل‌ها به همدیگر انجام می‌گیرد و دقت تلاقی دو محور تونل به هم دیگر بستگی به انتقال مختصات از «نقاط ثابت بنچ مارک» دارد.

(تصویر ۱-۴)



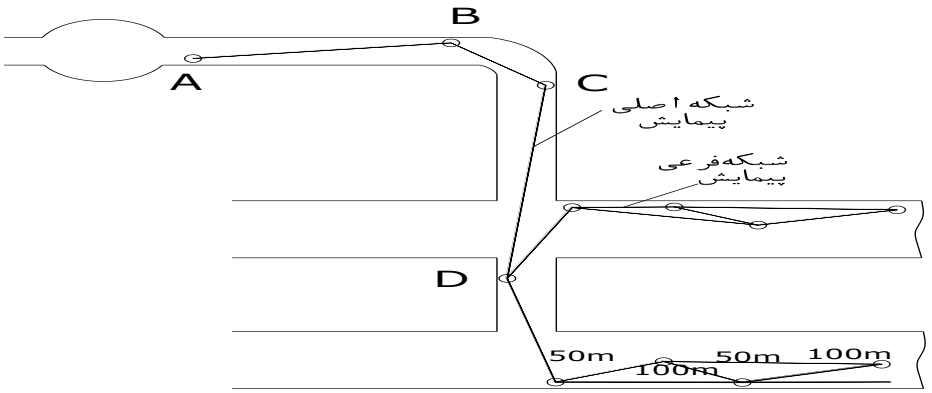
(نقاط ثابت نقاط معلومی هستندکه در آن‌ها مختصات X، Y و Z مشخص باشد) شبکه پیمایش در روی سطح زمین به داخل چاه‌ها و گالری‌های در زیر زمین که به صورت پیمایش بسته و یا زنجیره‌ای صورت می‌گیرد در دقت تلاقی دو سر پروفیل مسیر تونل نقش حیاتی برای کارشناسان نقشه‌برداری دارد. انتقال مختصات و ژیزمان نقاط شبکه پیمایش و مثلث‌بندی از سطح زمین به زیر زمین و به داخل تونل‌ها از طریق دهانه چاه و یا پیشانی چاه (پارتال) انتقال داده می‌شود، با توجه به پیشرفت حفاری پروفیل محور تونل توسط دستگاه‌های حفار شبکه

پیمایش هم توسط کارشناسان نقشه‌برداری در زیر زمین در محدوده محور پروفیل تونل گسترش و ادامه پیدا می‌کنند، طول شبکه اندازه‌گیری شبکه پیمایش نقاط مختصات دار به صورت یکطرفه (آنتنی) در شهرها برای به دست آوردن دقت بیشتر جهت پروفیل مسیر پروژه تونل تا ۱۰۰۰ متر (یک کیلومتر) در زیر زمین در نظر گرفته می‌شود و پس از انتقال نقاط به زیر زمین در داخل تونل‌ها و گالری‌ها پروژه مترو، توسط کارشناسان نقشه‌برداری دو شبکه اصلی و فرعی پیمایش در زیر زمین برای میخ‌کوبی ۲ محور تونل، برداشت مقطع تونل و تعیین اندازه نشست و دفرمه شدن تونل به صورت زیر انجام می‌گیرد:

۱. تشکیل شبکه پیمایش فرعی برای پروژه سازه تونل و عملیات نقشه‌برداری با طول‌های ۲۵–۷۰ متر.

۲. تشکیل شبکه پیمایش اصلی با طول‌های اضلاع ۷۰–۲۰۰ متر.

(تصویر ۲–۴)



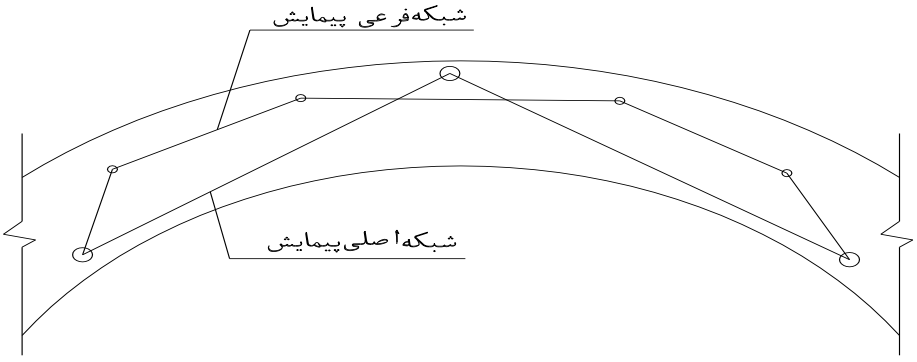
در (تصویر ۲–۴) شبکه پیمایش اصلی و فرعی را در داخل تونل‌های مترو نشان می‌دهد. برای اجرا شبکه پیمایش توسط کارشناسان ژئودوزی در زیر سطح زمین در داخل گالری‌ها و تونل‌ها جهت پیاده کردن محور تونل و برداشت مقطع تونل باید رعایت نکات زیر را انجام شود:

- طول اضلاع شبکه پیمایش در زیر زمین داخل تونل باید مابین ۳۰–۷۰ متر باشند.
- بیشترین طول شبکه پیمایش در زیر زمین داخل تونل نباید از ۳۰۰ متر تجاوز کند.
- به علت وجود خطای انکسار نباید نقاط پیمایش در روی محور آکس تونل پیاده شوند.

- اختلاف خطای بست ژیزمان شبکه پیمایش در زیر زمین نباید از ۸± ثانیه تجاوز کند.
- خطای مساوی نبودن تقسیمات ورنیه در اندازه‌گیری توسط دستگاه‌های زاویه‌یاب در شبکه پیمایش زیر زمین نباید از ۱۰± ثانیه تجاوز کند- بیشترین خطای نسبی در طول مترکشی رفت و برگشت اضلاع در شبکه پیمایش در زیر زمین نباید از ۱/۲۰۰۰۰ تجاوز کند. (البته هم‌اکنون دستگاه‌های اندازه‌گیری الکترونی طول به راحتی به این دقت اندازه‌گیری برای طول اضلاع دست پیدا می‌کنند).
- مقدار حد مجاز خطای بست زاویه‌ای در شبکه پیمایش برابر با رابطه روبرو $ff_\beta = 8'' \sqrt{n}\pi$ می‌باشد (در اینجا n تعداد زاویه‌های اندازه‌گیری شده در شبکه پیمایش می‌باشد).

کارشناسان نقشه‌برداری در زیرزمین داخل تونل در شروع کار در محدوده پروفیل مسیر تونل از شبکه پیمایش موقت با اضلاع کوچک برای عملیات نقشه‌برداری استفاده می‌کنند و سپس شبکه اصلی پیمایش را در داخل تونل در محدوده مسیر پروفیل تونل با طول اضلاع ۵۰-۱۰۰ متر گسترش و احیاء می‌کنند، شبکه پیمایش اصلی و فرعی در تونل‌های مترو بدون توجه به طول مابین چاه‌ها متروی در زیر زمین انجام می‌گردد.

(تصویر ۳-۴)



در (تصویر ۳-۴) شبکه پیمایش اصلی و فرعی برای تونل‌های با طول تا ۱۰۰۰ متر را نشان می‌دهد، شبکه پیمایش یک طرفه اصلی یا باز (نقشه‌بردارها به این شبکه پیمایش شبکه «آنتنی» هم می‌گویند) در زیر زمین که از سطح زمین و از طریق یک چاه به زیر زمین منتقل گردیده است و نباید طول تونل از ۱۰۰۰ متر بیشتر افزایش پیدا کند و در این شبکه بعضی از

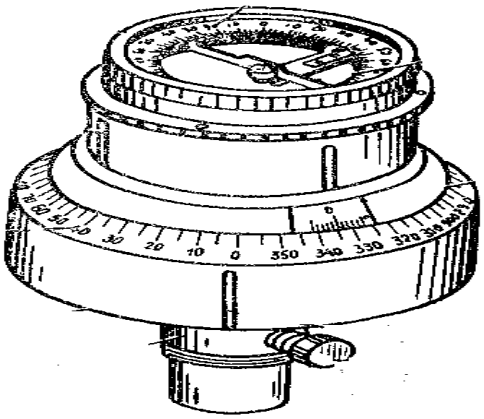
نقاط شبکه فرعی پیمایش بر نقاط اصلی منطبق می‌باشند و انتخاب محل کارگذاری نقاط شبکه پیمایش اصلی به شکل هندسی طول مسیر یک طرفه پروفیل سازه تونل در دست احداث بستگی دارد. برای سازه‌های تونل‌های زیرزمینی با طول پروفیل مسیر بزرگ و برای داشتن دقت لازم در تعیین ژیزمان شبکه پیمایش زیرزمینی باید توسط کارشناسان نقشه‌برداری در میان چاه‌های تونل در زیر زمین شبکه پیمایش اصلی را بر پا کنند و آنان حداکثر پس از تعیین دو یا سه زاویه پیمایش باید دوباره از بنچ مارک اصلی شبکه پیمایش اصلی پیمایش جدید را صورت دهند و انجام پیمایش بیشتر باعث به وجود آمدن و انباشته شدن خطاهای نقشه‌برداری می‌شود پس کارشناسان نقشه‌بردار باید برای تعیین شبکه پیمایش با طول بیشتر حتماً از نقاط اصلی شبکه پیمایش ژئودوزی (کلاس اول) در عملیات خود را استفاده کنند. ۳-۴ اساس کلی انتقال مختصات برای جهت‌یابی و اجرا پروژه تونل‌های شبکه مترو برای تعیین جهت‌یابی در زیر زمین و در داخل تونل نیاز به انتقال ژیزمان و مختصات و ارتفاع نقاط از سطح زمین به زیر زمین در داخل تونل‌ها می‌باشد برای این منظور انتقال مختصات نقاط و ارتفاع و ژیزمان از سطح زمین به زیر زمین اغلب از بنچ مارک‌های اصلی و یا نقاط کمکی پیمایش شده استفاده می‌گردد.

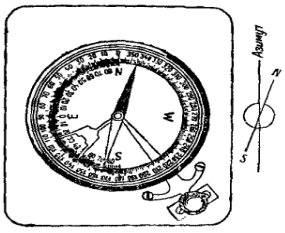
دقت دستگاه‌های ژئودوزی برای تعیین ژیزمان و جهت‌یابی در زیر زمین به شرح زیر می‌باشد:

تعیین ژیزمان با روش مغناطیسی در زیر زمین در داخل تونل

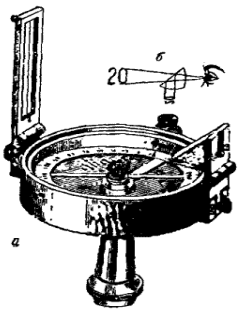
در این روش در بالای سطح زمین در روی بازی که ژیزمان آن مشخص باشد قطب‌نما کمپاس (قطب نمای مهندسی compass که توسط زمین‌شناس کانادایی به نام D.W. Brunton طراحی شده است) قرار داده و مقدار تغییرات عقربه قطب‌نما را که در جهت ژیزمان شبکه مختصاتی می‌باشد قرائت می‌کنم و سپس قطب‌نما را به زیر سطح زمین منتقل کرده و ژیزمان را و یا جهت را در آنجا پیاده می‌کنیم دقت انتقال مختصات توسط قطب‌نما ′۵ (پنج دقیقه) می‌باشد در (تصاویر-۴-۴) دو نمونه قطب‌نما را نشان می‌دهد که در حفاری تونل‌های معادن استفاده می‌شوند.

(تصاویر-۴-۴)

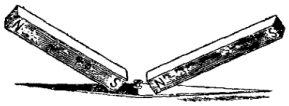




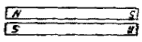
349



351



352



353

تعیین ژیزمان توسط دستگاه ژیروتئودولیت در زیرزمین و داخل تونل

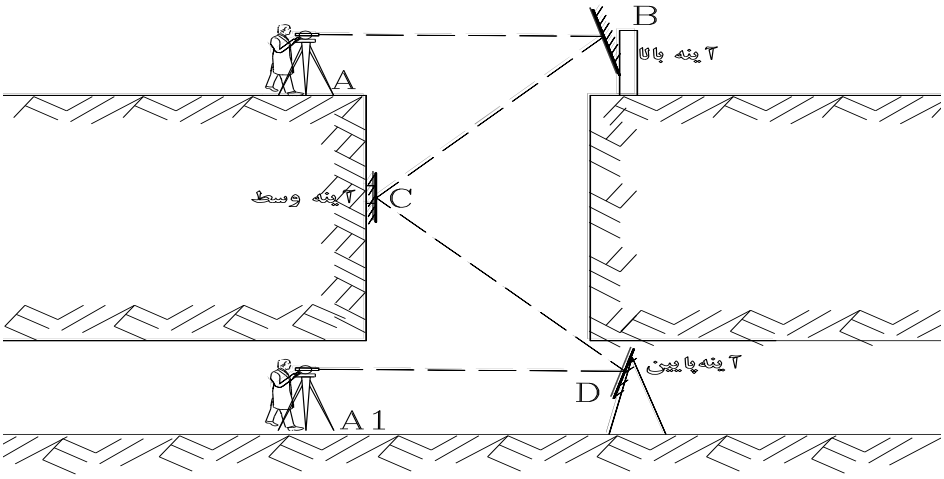
در این روش برای تعیین ژیزمان و جهت‌یابی در زیر سطح زمین و در هر قسمت مورد لزوم از تونل در دست احداث از دستگاه‌های ژیروتئودولیت استفاده می‌گردد، در این روش دقت تعیین ژیزمان در حدود "۲ تا "۳ ثانیه (دو تا سه ثانیه) می‌باشد، در (تصاویر۵-۴) دو نمونه دستگاه ژیروتئودولیت را نشان داده است.

(تصاویر ۵-۴)

تعیین ژیزمان توسط روش کلیماتور در زیر زمین

در این روش برای تعیین ژیزمان و جهت‌یابی در زیر سطح زمین و در داخل تونل از دو دستگاه تئودولیت کلیماتور و سه آینه تخت استفاده می‌شود برای این منظور یک دستگاه تئودولیت کلیماتور را در بالای سطح زمین و دیگری را در پایین سطح زمین و در داخل تونل قرار داده و همچنین سه آینه تخت را به ترتیب یکی در بالای چاه و دیگری در وسط چاه و سومی را در پایین چاه در زیر سطح زمین قرار می‌دهند و سپس با جابجایی اشعه نور تلسکوپ دستگاه تئودولیت کلیماتور که در بالای سطح زمین قرار دارد به آینه تخت شماره B و انعکاس نور دستگاه به آینه C تابش کرده و انعکاس نور از آینه C به آینه D تابش کرده و از آینه D به تلسکوپ دستگاه تئودولیت کلیماتوری که در زیر زمین داخل مستقر گردیده و باعث به دست آمدن ژیزمان در زیر سطح زمین و در داخل تونل می‌شود، در (تصویر- ۶۵) تعیین ژیزمان توسط روش کلیماتور نشان می‌دهد.

(تصویر ۶-۴)

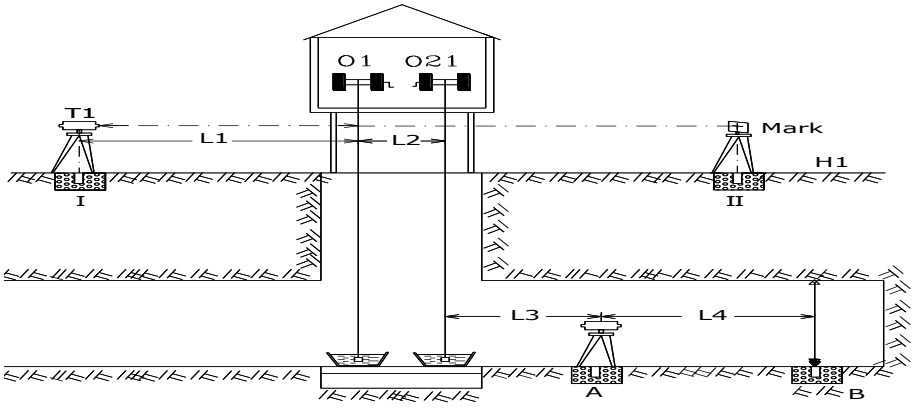


در این روش دقت تعیین ژیزمان در زیر سطح زمین تقریباً برابر با ۸ ثانیه (هشت ثانیه) می‌باشد.

انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از طریق یک چاه و دو شاغول

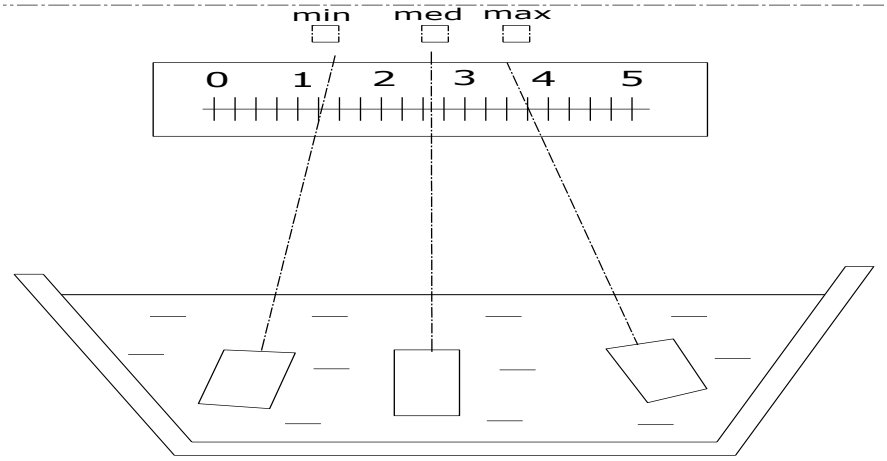
برای انتقال نقاط مختصاتی و ژیزمان به داخل چاه و گالری‌ها که در تعیین شبکه پیمایش اصلی و فرعی در داخل تونل‌ها استفاده می‌گردد، برای این منظور از دو شاغول که ژیزمان و مختصات آن‌ها مشخص است استفاده می‌شود که از سطح زمین به داخل چاه به پایین فرستاده می‌شوند و در روی سطح زمین توسط دستگاه زاویه‌یاب (تئودولیت) که در ایستگاه I (اول) کـه مختصـاتش مشخص می‌باشد مستقر می‌کنند و به صفحه تـارگتی کـه در روی سـه پایـه‌ای در ایسـتگاه II (دوم) که باز هم مختصاتش معین است قراول می‌گردد و در بین دو ایستگاه I (اول) و ایسـتگاه II (دوم) در جهت مسیر نوری افقی زاویه‌یاب با تارگت یک «باز» (امتداد) به وجود می‌آورند و در جهت این «باز» (امتداد) به وجود آمده با دقت زیاد دو عدد شاغول O1 و O2 به داخـل چـاه آویـزان می‌کنند برای کمتر شدن حرکت آونگی شاغول‌ها در داخل چاه به سـر دیگـر آن‌هـا وزنـه‌ای وصـل کرده و وزنه را در ظرف روغن و یا موم مایع قرار می‌دهند (وزن وزنه‌ها و قطـر سـیم‌هـا بسـتگی بـه عمق چاه‌ها دارد)، در زیر سطح زمین و در داخل تونـل دو ایسـتگاه در نظـر مـی‌گیرنـد، ایسـتگاه A برای استقرار دستگاه زاویه‌یاب و ایستگاه دیگـری B بـرای تعیـین ژیزمـان قـرار مـی‌دهـیم، انتقـال ژیزمان به داخل تونل در زیر زمین با این روش دارای دقتی برابر با "۳۰ ثانیه می‌باشد.

(تصویر ۷-۴)



در (تصویر ۷-۴) انتقال نقاط مختصات دار توسط دو شاغول و یک چاه نشان داده شده است در این روش بیشترین خطای به وجود آمده خطای حرکت آونگی شاغول‌ها می‌باشد برای کمتر شدن حرکت آونگی شاغول‌ها آن‌ها را در موم گرم و یا روغن قرار می‌دهند، از روش دیگری هم برای به دست آوردن دقت بیشتر اندازه‌گیری‌ها می‌توان استفاده می شود بدین ترتیب در فاصله CM ۲.... ۱ از شاغول‌ها جدولی با تقسیمات میلی‌متری نصب می‌گردد (تصویر ۸-۴) و از روی این جدول قرائت‌های لازم انجام می‌شود (اعداد مناسب را یادداشت می‌کنند) و این اعداد قرائت شده اعدای کناری (چپ و راست جدول) می‌باشند که سیم‌های شاغول تا آنجا نوسان می‌کنند و سپس از آن‌ها متوسط اندازه گرفته و اندازه اصلی و دقیق مورد نظر را به دست می‌آورند، البته در تمامی روش‌های انتقال ژیزمان که از شاغول با سیم و وزنه استفاده می‌شود برای دریافت دقت بالا و کم کردن حرکات آونگی شاغول‌های که در نتیجه ایجاد عامل باد و یا عواملی دیگری که در داخل چاه‌های دسترسی به تونل‌های مترو به وجود می‌یابد همیشه از ظرف‌های روغنی و یا موم گرم که آونگ‌ها را در داخل آن‌ها قرار داده استفاده می‌گردد در (تصویر ۸-۴) روش کم کردن حرکت نوسانی شاغول‌ها را در ظروف روغنی و یا مومی نشان داده است.

(تصویر ۸-۴)



در این روش مختصات شاغول‌ها در سطح زمین را با مشخصه Xa و Ya از طریق شبکه پیمایش موجود در سطح زمین به دست می‌آوریم و مختصات ادامه همین شاغول‌ها را در کف چاه و در زیر زمین با مشخصه‌های Xu و Yu تعیین می‌کنیم، پس از آن خطائی بست تغییرات طولی و عرضی مختصات را از طریق فرمول (فرمول ۱-۴ و ۲-۴) معلوم می‌گردد:

$$f_x = Xu - Xa$$
$$f_y = Yu - Ya$$

(فرمول ۱-۴ و ۲-۴)

با به دست آوردن خطائی بست f_x و f_y تغییرات طولی و عرضی مختصات می‌توان خطائی بست نسبی و خطائی بست قطعی شبکه زیر زمینی پیمایش را از طریق فرمول‌های (فرمول ۳-۴ و ۴-۴) به دست آورد:

$$f_s = \sqrt{{f_x}^2 + {f_y}^2}$$
$$\frac{f}{L} = \frac{1}{T}$$

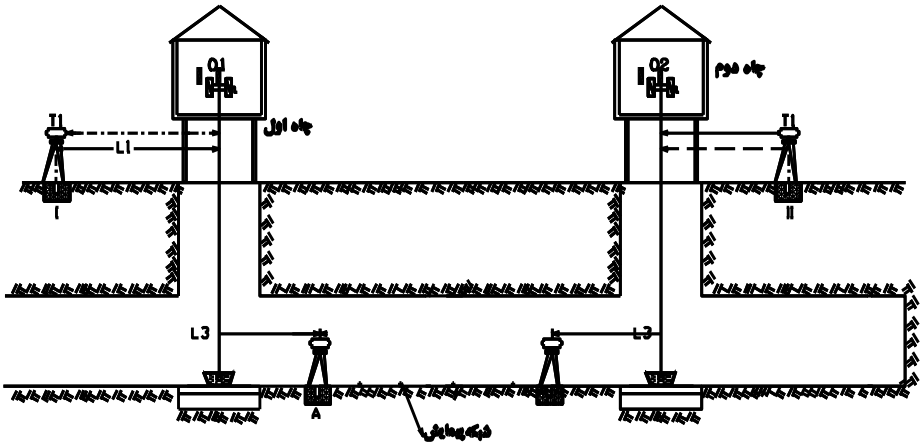
(فرمول ۳-۴ و ۴-۴)

پیمایش در زیر زمین قابل قبول نمی‌باشد و باید اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از اول تکرار گردد تا بدقت مورد نیاز دست پیدا گردد.

انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از طریق دو شاغول و دو چاه به زیر زمین و به داخل تونل

در این روش برای جهت‌یابی و انتقال ژیزمان به زیـرزمین و بـه داخـل تونـل از دو چـاه کـه در هرکدام از آن‌ها یک شاغول آویزان است که مختصات و ژیزمان آن‌ها مشخص می‌باشد استفاده می‌شود و توسط دستگاه‌های ژئودوزی در زیر زمین و در میان دو چاه از دو نقطـه بـا مختصـات مشخص شبکه پیمایش ایجاد می‌کنند، در این روش دقت انتقال مختصـات نقـاط و ژیزمـان در حدود "۸ ثانیه (هشت ثانیه) می‌باشد از ایـن روش بـرای پیـاده کـردن شـبکه پیمـایش جهـت اندازه‌گیری‌های مورد نظر پس از ساخت تونل‌های مترو استفاده می‌شود.

(تصویر ۹-۴)



روش انتقال مختصات نقاط با دو شاغول و یک چاه (روش مثلث)

در این روش از دو شاغول O1,O2 که به داخل دو چاه آویزان هستند و برای جهت‌یـابی در زیـر زمین و انتقال ژیزمان استفاده می‌شود در این روش در روی سطح زمین ژیزمان دو شاغول را که با هم یک «باز» کوچک تشکیل می‌دهند مشخص کرده و سپس از طریق شـاغول‌هـا بـه زیـر زمین انتقال داده می‌شوند و این باز در زیر سطح زمین مبناء پیاده کردن شبکه پیمایش می‌گردد، در این روش دقت انتقال نقاط و ژیزمان به زیر زمین و داخل تونل در زیر سطح زمین حدود "۱۰ تا "۱۲ ثانیه (ده تا دوازده ثانیه) می‌باشد.

بررسی و آنالیز روش‌های مختلف انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از روی سطح زمین به زیر سطح زمین

روش دو چاه و دو شاغول برای انتقال نقاط به زیر سطح زمین این امکان را برای جهت‌یابی به کارشناسان می‌دهد که ژیزمان شبکه پیمایش را برای جهت‌یابی و ادامه حفاری تونل بطور غیر مستقیم به دست آورند و بقیه روش‌های انتقال مختصات و ژیزمان به زیر سطح زمین فقط برای شروع حفاری در زیر زمین می‌باشند.

از روش دو چاه و دو شاغول (برای هر چاه یک شاغول) برای انتقال نقاط مختصات دار و ژیزمان به زیر سطح زمین فقط در مواردی که مسیر تونل به صورت خط مستقیم و یا اینکه دارای شعاع قوس بزرگی باشد استفاده می‌گردد.

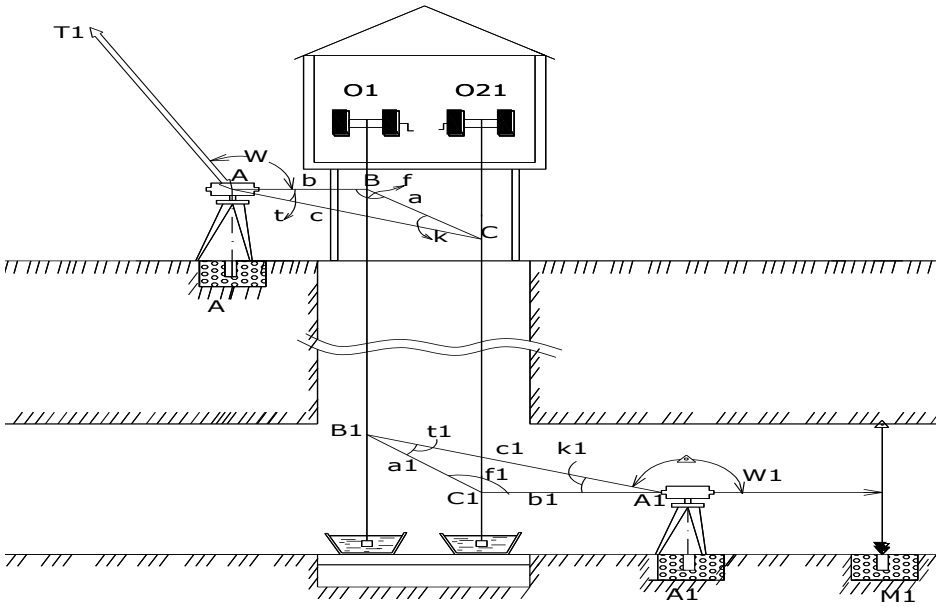
استفاده از روش ژیروتئودولیت برای انتقال و تعیین ژیزمان در زیر سطح زمین روش پیشرفته‌ای است که به کارشناسان ژئودوزی این امکان را می‌دهد که در هر قسمتی از زیرزمین بتوانند با دقت کافی و به راحتی در مدت زمان خیلی کم ژیزمان مسیر را برای شبکه پیمایش و ادامه حفاری‌ها را تعیین کنند.

استفاده از روش یک چاه با دو شاغول (روش مثلث) برای انتقال ژیزمان به زیر سطح زمین برای تعداد اندازه‌گیری‌ها و تعداد مشاهدات در بیشتر پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و ضمناً این امکان را به کارشناسان ژئودوزی می‌دهد که بتوانند از طریق روش کمترین مربعات سرشکنی خطاء اندازه‌گیری‌های گرفته شده را انجام دهند.

سرشکنی نتایج خطاء مشاهدات اندازه‌گیری‌های انجام شده در روش انتقال مختصات نقاط با دو شاغول و یک چاه (روش مثلث)

در بررسی محاسبه معادله سرشکنی خطاء در روش انتقال مختصات و ژیزمان با دو شاغول و یک چاه (روش مثلث)، برای شروع کار در نزدیکی دهانه چاه در روی سطح زمین نقطه ثابت A را با مختصات معلوم مشخص می‌کنند و در روی این نقطه دستگاه زاویه‌یاب (تئودولیت) را مستقر کرده و توسط این دستگاه زاویه t را که در بین ضلعی که در جهت شاغول واقع شده است را قرائت می‌کنند و فاصله‌های a مابین شاغول‌ها و فاصله b و c از دستگاه زاویه‌یاب تا هر کدام از شاغول‌ها را اندازه می‌گیرند.

(تصویر ۱۰-۴)



در (تصویر ۱۰-۴) انتقال نقاط مختصات دار و ژیزمان به زیر زمین و در داخل تونل را نشان داده است که در بالای سطح زمین مثلث A, B, C را تعیین می‌کنند که سه ضلع و یک زاویه آن مشخص می‌باشد با توجه به مقدارهای مشخص اندازه‌های تعیین شده می‌توان زوایای مجهول k,f را از رابطه سینوس‌ها به دست آورد.

$$\text{Sin } A/a = \text{Sin } B/b = \text{Sin } c/C \qquad \text{(فرمول ۵-۴)}$$

در (تصویر ۱۰-۴) ژیزمان جهت AT1 در سطح زمین مشخص می‌باشد و زاویه W هم مشخص می‌باشد بنابراین می‌توان ژیزمان ضلع BC را محاسبه کرد یعنی سطحی که شاغول‌ها از آن عبور می‌کنند. در زیر سطح زمین در نزدیکی چاه نقطه A1 (ایستگاه محل استقرار دوربین زاویه‌یاب) را احیاء کرده و دستگاه نقشه‌برداری را در روی آن مستقر می‌کنند، در زیر سطح زمین برای محاسبه ژیزمان توسط دستگاه زاویه‌یاب زاویه‌های k1 و W1 و همچنین مقدار اندازه ضلع‌های b1, c1, a1 را که در سطحی قرار دارند که با امتداد شاغول‌ها مثلث A1, B1, C1 را تشکیل می‌دهند اندازه‌گیری می‌کنند، با داشتن مقدار زاویه k1 زوایای f1 و t1 زوایای مثلث را از طریق فرمول سینوس‌ها محاسبه می‌کنند، با به دست آوردن زوایای و طول اضلاع مثلث می‌توان ژیزمان جهت A1 و M1 را برای شبکه پیمایش محاسبه کرد.

دقت این روش بستگی به اندازه‌گیری زوایایی مثلث‌ها و فرم و شکل مثلث‌ها در روی سطح زمین و زیر سطح زمین در داخل تونل را دارد، برای بالا بردن دقت انتقال ژیزمان و مختصات نقاط لازم است که اندازه مقدار تفاوت زوایای t1 و t2 مثلث‌های مذکور از 2 تا 3 درجه بیشتر تغییر نکند و نسبت b/a و b1/a1 نباید بیش از ۱,۵ باشد، مقدار اختلاف اندازه طول اضلاع مثلث مابین دستگاه تئودولیت و شاغول در بالای سطح زمین و زیر سطح زمین (b و b1) نباید بیش از ۲ mm بیشتر باشد.

در (تصویر ۱۰-۴) وقتی که زاویه‌های t و t_1 و ω و ω_1 را در بالا و پایین سطح زمین و در داخل تونل اندازه گرفتیم آن‌ها را از طریق فرمول شماره ۴- کنترل می‌کنیم:

(فرمول ۶-۴)

$$\left.\begin{aligned}
\Delta\omega_{teo} &= \frac{l}{b}\rho, \\
\Delta\omega_{1teo} &= \frac{l}{c_1}\rho, \\
\Delta a_{teo} &= \frac{l}{b}\rho - \frac{l}{c}\rho, \\
\Delta a_{1teo} &= \frac{l}{b_1}\rho - \frac{l}{c_1}\rho,
\end{aligned}\right\}$$

در فرمول (شماره ۶-۴) مقدار اندازه جابجای حرکت آونگی شاغول‌ها l است و برابر با ۱۵ mm می‌باشد. در روش بالا مقدار اندازه واقعی اختلاف اندازه زاویه‌ها از طریق فرمول (شماره ۷-۴) محاسبه می‌گردد.

(فرمول ۷-۴)

$$\left.\begin{aligned}
\Delta\omega_{meas} &= \omega_{\mathrm{II}} - \omega_{\mathrm{I}}, \\
\Delta\omega_{meas} &= \omega_{\mathrm{I}} - \omega_{\mathrm{III}}, \\
\Delta\alpha_{meas} &= \alpha_{\mathrm{I}} - \alpha_{\mathrm{II}}, \\
\Delta\alpha_{meas} &= \alpha_{\mathrm{III}} - \alpha_{\mathrm{I}},
\end{aligned}\right\}$$

در فرمول (شماره ۷-۴) مشخصات $\omega_{\mathrm{I}}, \omega_{\mathrm{II}}, \omega_{\mathrm{III}}, \ \alpha_{\mathrm{I}} \ \alpha_{\mathrm{II}}, \alpha_{\mathrm{III}}$ که اندازه زاویه‌های ω و α می‌باشند که با جابجایی شاغول‌ها در سه حالت و در سطح زمین اندازه گرفته شده‌اند که از طریق فرمول (شماره ۸-۴) به دست آمده‌اند.

(فرمول ۸-۴)

$$\left.\begin{aligned} \Delta\omega_{1meas} &= \omega_{1,\mathrm{II}} - \omega_{1,\mathrm{I}} \\ \Delta\omega_{1meas} &= \omega_{1,\mathrm{III}} - \omega_{1,\mathrm{I}} \\ \Delta\alpha_{1meas} &= \alpha_{1,\mathrm{II}} - \alpha_{1,\mathrm{I}} \\ \Delta\alpha_{1meas} &= \alpha_{1,\mathrm{I}} - \alpha_{1,\mathrm{III}} \end{aligned}\right\}$$

در فرمول (شماره ۸-۴) مشخصات $\omega_{1,\mathrm{I}}, \omega_{1,\mathrm{II}}, \ \omega_{1,\mathrm{III}}, \alpha_{1,\mathrm{I}}, \alpha_{1,\mathrm{II}}, \alpha_{1,\mathrm{III}}$ اندازه زاویه‌های ω و α می‌باشند که در سه حالت جابجایی شاغول‌ها در زیر سطح زمین و در داخل تونل اندازه گرفته شده‌اند.

پس از به دست آوردن اندازه‌های صورت گرفته شده آن‌ها را با اندازه‌های به دست آمده به صورت تئوری مقایسه باید کرد و اختلاف اندازه‌های آن‌ها نباید بیش از "۱۰ ثانیه در بالای سطح زمین و بیش از "۱۵ ثانیه در زیر سطح زمین و در داخل تونل باشند.

در حین انتقال ژیزمان نقاط از طریق روش مثلث مقدار اندازه سه ضلع $a,\ b,\ c$ و زاویه حاده α مثلث را اندازه‌گیری می‌کنند در اینجا تعداد اندازه‌گیری اضافه (مشاهده اضافه دارد) وجود دارد که امکان انجام سرشکنی خطاء معادله اندازه گرفته شده را امکان‌پذیر و فراهم می‌سازد.

البته سرشکنی خطاء از طریق تعیین خطای بست اندازه‌گیری اضلاع مثلث بدون تغییر در مقدار اندازه زاویه انجام می‌شود که با اندازه‌گیری طول‌های α, b و زاویه α مثلث مقدار اندازه طول ضلع سوم c را از طریق فرمول‌های (شماره ۹-۴ و ۱۰-۴) به دست می‌آوریم.

(فرمول ۹-۴، ۱۰-۴)

$$\left.\begin{aligned} \sin\beta &= \frac{b}{a}\sin\alpha \\ c_{Fakt} &= b.\cos\alpha + a.\cos\beta_t \end{aligned}\right\}$$

پس از تعیین مقدار اندازه طول ضلع سوم c مثلث از طریق فرمول (شماره ۱۰-۴) این مقدار انـدازه را با مقدار اندازه گرفته شده توسط متر با طول ضلع سوم c مثلـث مقایسـه کـرده و از یکـدیگر طبـق فرمول (شماره ۱۱-۴) کم می‌کنیم تا مقدار اندازه خطای بست طول f_S را به دست آوریم.

$$f_S = c_{Fakt} - c_{Meas}$$ (فرمول ۱۱-۴)

با به دست آوردن مقدار اندازه خطای بست طول f_S باید این مقدار اندازه خطاء را بطور مسـاوی در بین طول‌های دیگر از طریق فرمول (شماره ۱۲-۴) پخش می‌کنیم.

(فرمول ۱۲-۴)

$$\left.\begin{aligned} \langle a \rangle &= -\frac{f_S}{3}; \\ \langle b \rangle &= -\frac{f_S}{3}; \\ \langle c \rangle &= -\frac{f_S}{3}; \end{aligned}\right\}$$

مقدار اندازه قابل قبول ($Admissible\ sizes$) خطای بست اضلاع مثلث برای روش مثلث در بالای سطح زمین و در زیر سطح زمین داخل تونل از طریـق فرمـول (شـماره ۱۳-۴) و فرمـول (شماره ۱۴-۴) محاسبه می‌گردد.

(فرمول ۱۳-۴) برای بالای سطح زمین: $f_{SAs} = 1.6\sqrt{3} = 2.8mm$

(فرمول ۱۴-۴) در پایین سطح زمین داخل تونل: $f_{SAs} = 2.4\sqrt{3} = 4.4mm$

با توجه به مشخص بودن مقدار اندازه طول اضلاع مثلث در بالا و پایین سطح زمـین سرشـکنی زوایای β و γ مثلث را در بالا و پایین سطح زمین از طریق قانون سینوس‌هـا (فرمـول ۱۵-۴) انجام می‌دهیم.

فرمول سینوس‌ها (فرمول ۱۵-۴)

$$\left.\begin{aligned} \sin\beta &= \frac{b}{a}\sin\alpha; \end{aligned}\right\}$$

$$\sin\gamma = \frac{c}{a}\sin\alpha;$$

مجموع زوایایی مثلث پس از سرشکنی شدن خطاء زوایای مثلث‌ها ممکن است کمی متفاوت از مجموع کل زوایای مثلث یعنی ۱۸۰ درجه شود و مقدار تغییرات قابل قبول نباید بیش از"۳. +/- ثانیه باشد. محاسبه ژیزمان شبکه پیمایش$A1D1$ (تصویر ۱۰-۴) بر اساس موقعیت هر شاغول و به صورت جداگانه انجام می‌شود و برای این منظور از ژیزمان اصلی $T1$ در روی سطح زمین و با سرشکنی زوایای $w1$, w و سه مرتبه جابجایی شاغول‌ها و مثلث‌ها سه اندازه متفاوت برای ژیزمان به دست می‌آید که از این مقادیر متوسط حسابی گرفته می‌شود.

مقدار قابل قبول اندازه‌های به دست آمده ژیزمان نباید با هم دیگر بیش از "۲۵ ثانیه اختلاف داشته باشند.

برای تعیین نقاط مختصات دار شبکه پیمایش در زیرزمین و داخل تونل‌ها نسبت به موقعیت شاغول‌ها برای هر کدام بطور جداگانه محاسبه مختصات انجام می‌شود، برای این منظور مقدار اندازه ژیزمان و مختصات نقطه ثابت A در بالای زمین (تصویر ۱۱-۴) از محاسبه و به دست آوردن نتایج اندازه‌گیری‌ها مختصات نقاط متوسط حسابی گرفته می‌شود در اینجا مقدار قابل قبول خطاء نباید بیش از ۳mm بیشتر باشد.

ارزیابی دقت و صحت انتقال نقاط و ژیزمان از سطح زمین به زیرزمین و به داخل تونل‌ها با روش مثلث در سه حالت و موقعیت شاغول‌ها از طریق فرمول (شماره ۱۶-۴) انجام می‌گردد.

$$M_0 = \sqrt{\mathrm{m}_a^2 + \frac{(m_0)_S^2 + (m_0)_\beta^2 + (m_0)_P^2}{3} + (m_0)_b^2};$$ فرمول (۱۶-۴)

مشخصات داده‌های فرمول (شماره ۱۶-۴) به شرح زیر می‌باشد:

- m_α خطاء ژیزمان زاویه α مثلث انتقال نقاط در بالای سطح زمین می‌باشد.
- $(mo)_S$ خطاء انتقال نقاط و ژیزمان از سطح زمین به زیرزمین که ناشی از خطاء اندازه‌گیری طول اضلاع مثلث در بالای سطح زمین و در زیر سطح زمین و داخل تونل می‌باشد.
- $(mo)_p$ خطاء انتقال نقاط و ژیزمان از سطح زمین به زیر زمین که ناشی از اشتباه و خطاء در اجرا پروژه شاغول‌ها به وجود می‌آید.

- $(mo)_{\beta}$ خطاء انتقال نقاط و ژیزمان از سطح زمین به زیـرزمین کـه ناشـی از اثـر خطـاء اندازه‌گیری‌های زوایای α و α_1 و w و w_1 در بالا و زیر سطح زمین به وجود می‌آیند.

مقدار اندازه خطاهای $(mo)_{\beta}$ و $(mo)_S$ از طریق فرمول (شماره ۱۷-۴ و ۱۸-۴) به دست می‌آید:

(فرمول ۱۷-۴ و ۱۸-۴)

$$\left.\begin{aligned}(\mathrm{m}_0)_S^2 &= (\mathrm{tg}^2\,\alpha \times \mathrm{P}^2\,\frac{a^2+b^2}{a^4} + \mathrm{tg}^2\,\alpha_1 \times \mathrm{P}^2\,\frac{a^2+b^2}{a_1^4})m_s^2;\\ (\mathrm{m}_0)_\beta^2 &= 2m^2(1+\frac{b}{a}+\frac{b^2}{a^2}) + 2m_1^2(1+\frac{b_1}{a_1}+\frac{b_1^2}{a_1^2});\end{aligned}\right\}$$

در فرمول (شماره ۱۷-۴ و ۱۸-۴) m_s و m_1 خطاء قابل قبول مقدار اندازه‌گیری زاویه است کـه توسط دستگاه زاویه‌یاب (تئودولیت) اندازه‌گیری شده است که برابر به "۳ و"۴ ثانیه مـی‌باشـند و m_S خطای متوسط مربع اندازه‌گیری طول اضلاع مثلث اسـت کـه برابـر بـا ۸ mm میلـی‌متـر می‌باشد و مقدار اندازه قابل قبول خطاء برای اندازه‌گیری ژیزمان اصلی از شبکه پیمایش در روی سطح زمین توسط دستگاه‌های زاویه‌یاب (تئودولیت) برابر با "۳ ثانیه می‌باشد.

در حین انتقال ژیزمان نقاط از سطح زمین به زیر زمین و به داخل چاه‌های تونـل از عمـق ۲۰ متر تا عمق ۱۰۰ متر و با مقدار انداز فاصله عرضی مابین شاغول‌ها تا ۵ m مقدار انـدازه قابـل قبول برای خطاهای سیستماتیک "۶ ثانیه و برای خطاهای اتفاقی برابر با "۵ ثانیه می‌باشد.

نمونه محاسبه عملیات انتقال ژیزمان نقاط از سطح زمین به زیر زمین و به داخل تونـل بـا روش مثلث

در حقیقت این نمونه مثال کنترل نتایج عملیات نقشه‌برداری برای انتقال نقاط مختصات دار و ژیزمان از شبکه پیماش و همچنین سرشکنی خطاهای لازم در حین انجام عملیات نقشه‌برداری می‌باشد.

در اینجا مختصات نقطه ثابت اصلی PA در بالای سطح زمـین (تصـویر ۱۲-۴) بـه شـرح زیـر می‌باشند:

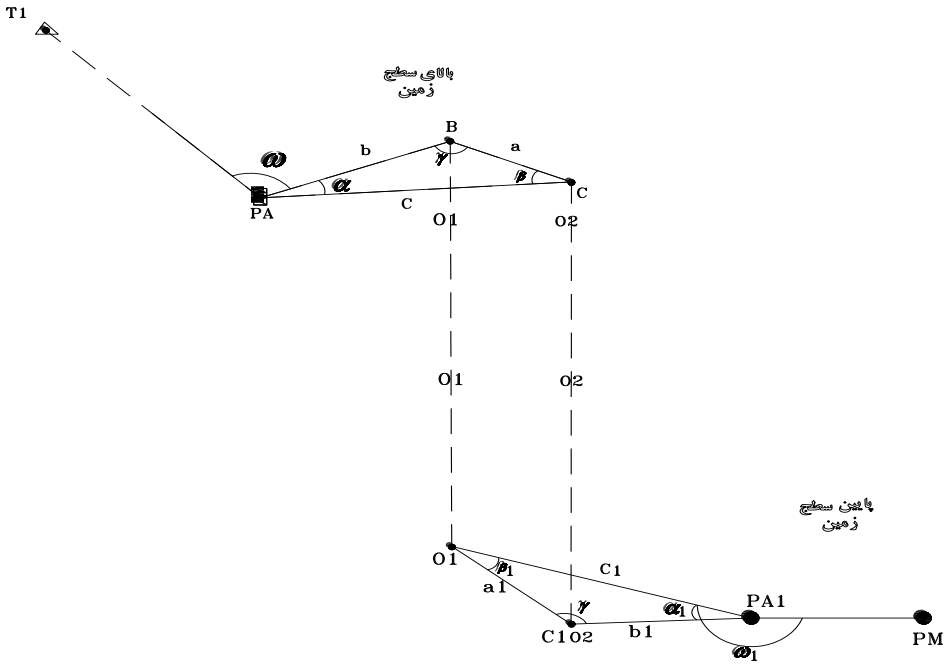
(فرمول ۱۹-۴)

$$\left.X_{PA} = 4583,493m\right\}$$

$Y_{PA} = 2740,523.m$

مقدار اندازه ژیزمان محاسبه شده در سطح زمین و بر گرفته شده از شـبکه پیمـایش موجـود در محل برابر $\alpha t = 144^{\circ}28'39''$ می‌باشد.

(تصویر ۱۲-۴)



در تصویر (شماره ۱۲-۴) مقدار فاصله اندازه گرفته شده مـابین نقطـه ثابـت $PA1$ و PM برابـر $S = 50,075\ m$ می‌باشد، در جداول (شماره ۱-۴ و ۲-۴) اندازه‌های گرفته شده مابین اضلاع مثلث تشکیل شده مابین دو شاغول را در سه حالت در بالای سطح زمین و در زیر سطح زمین و در داخل تونل مشخص گردیده است.

(جدول ۱-۴)

نتایج اندازه گیری اضلاع و زوایایی مثلث در سطح زمین	حالت قرار گرفتن شاغولها در بالای سطح زمین		
	I	II	III
a (m)	4.2883	4.2871	4.289
b (m)	5.4331	5.4338	5.4324
c (m)	9.7219	9.7215	9.7223
α	$0^{o}16'55''$	$0^{o}12'40''$	$0^{o}21'10''$
ω	$65^{o}54'28''$	$66^{o}04'02''$	$65^{o}54'28''$

(جدول ۲-۴)

نتایج اندازه گیری اضلاع و زوایایی مثلث در زیر سطح زمین (داخل تونل)	حالت قرار گرفتن شاغولها در تونل و زیر زمین		
	I	II	III
a1 (m)	4.2906	4.2886	4.2926
a2 (m)	6.8801	6.8808	6.8794
a3 (m)	11.1648	11.1642	11.1654
α1	$1^{o}13'45''$	$1^{o}16'35''$	$1^{o}10'55''$
ω1	$179^{o}02'59''$	$178^{o}58'15''$	$179^{o}07'28''$

کنترل و محاسبه عملیات ژئودوزی انتقال مختصات و ژیزمان به داخل تونل در زیر سطح زمین (روش مثلث)

کنترل و محاسبه مقدار اختلاف اندازه مابین طول اضلاع مثلث (a و $a1$) شاغول‌ها در سه حالت قرار گرفته در بالا و پایین سطح زمین به شرح زیر می‌باشند:

$$\left.\begin{aligned}\Delta a_{\mathrm{I}} &= a_{\mathrm{I}} - a_{1,\mathrm{I}} = 4.2883 - 4.2906 = -2.3mm\\ \Delta a_{\mathrm{II}} &= a_{\mathrm{II}} - a_{1,\mathrm{II}} = 4.2871 - 4.2886 = -1.5mm\\ \Delta a_{\mathrm{III}} &= a_{\mathrm{III}} - a_{1,\mathrm{III}} = 4.2890 - 4.2926 = -3.6mm\end{aligned}\right\}$$

کنترل اندازه‌گیرهای زوایایی α،α1 و ω، ω1 از طریق فرمول‌های (شماره ۲۰-۴، ۲۱-۴، ۲۲-۴) صورت می‌گیرد، برای محاسبه تفاوت اختلاف زوایا ($\Delta\omega$) بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و نتایج به دست آمده به صورت نظری برای بالای سطح زمین و همچنین در زیر سطح زمین و در داخل تونل به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

محاسبه برای بالای سطح زمین:

(فرمول ۲۰-۴)

$$\left.\begin{aligned}\omega_{\mathrm{II}-}\omega_{\mathrm{I}} &= 65^0 04'02'' - 65^0 54'28'' \rightarrow \Delta\omega_{meas} = 09'34''\\ \omega_{\mathrm{I}-}\omega_{\mathrm{III}} &= 65^0 54'28'' - 65^0 44'54'' \rightarrow \Delta\omega_{meas} = 09'34''\\ \Delta\omega_{teo} &= \frac{15}{b}\rho = \frac{15mm}{5433.4mm}206265'' = 569'' = 9'29''\end{aligned}\right\}$$

محاسبه برای زیر سطح زمین (داخل تونل):

(فرمول ۲۱-۴)

$$\left.\begin{aligned}\omega_{1,\mathrm{I}-}\omega_{1,\mathrm{II}} &= 179^0 02'59'' - 178^0 58'15'' \rightarrow \Delta\omega_{1meas} = 04'44''\\ \omega_{1,\mathrm{III}-}\omega_{1,\mathrm{I}} &= 179^0 07'28'' - 179^0 02'59'' \rightarrow \Delta\omega_{1meas} = 04'29''\\ \Delta\omega_{teo} &= \frac{15}{c1}\rho = \frac{15mm}{11164.8mm}206265'' = 277'' = 4'37''\end{aligned}\right\}$$

محاسبه اختلاف $\Delta\alpha$ در بالای سطح زمین و در زیر سطح زمین براساس نتایج اندازه‌گیری‌ها و همچنین نتایج به دست آمده با (فرمول ۲۲-۴) محاسبه می‌گردند:

(فرمول ۲۲-۴)

$$\left.\begin{aligned}\alpha_{\mathrm{I}}-\alpha_{\mathrm{II}}&=0^{0}16'55''-0^{0}12'40''\rightarrow\Delta\alpha_{meas}=04'15''\\ \alpha_{\mathrm{III}}-\alpha_{\mathrm{I}}&=0^{0}21'10''-0^{0}16'55''\rightarrow\Delta\alpha_{meas}=04'15''\end{aligned}\right\}$$

محاسبه برای بالای سطح زمین:

$$\Delta\alpha_{teo}=\frac{15}{b}\rho-\frac{15}{c}\rho=\frac{15mm}{5433,4mm}206265''-\frac{15mm}{9721,9mm}206265''=569''-318''=251''=4'11'';$$

محاسبه برای زیر سطح زمین (داخل تونل):

$$\left.\begin{aligned}\alpha_{1,\mathrm{II}}-\alpha_{1,\mathrm{I}}&=1^{0}16'35''-1^{0}13'45''\rightarrow\Delta\alpha_{1meas}=02'50''\\ \alpha_{1,\mathrm{I}}-\alpha_{1,\mathrm{III}}&=1^{0}13'45''-1^{0}10'55''\rightarrow\Delta\alpha_{1meas}=02'50''\end{aligned}\right\}$$

$$\Delta\alpha_{1teo}=\frac{15}{b1}\rho-\frac{15}{c1}\rho=\frac{15mm}{6880,1mm}206265''-\frac{15mm}{11164,8mm}206265''=450''-277''=173''=2'53'';$$

سرشکن کردن خطای اندازه‌گیری اضلاع مثلث

برای سرشکن کردن خطاء اندازه‌گیری اضلاع مثلث براساس تصحیح نتایج اندازه‌گیری‌های شده اضلاع مثلث در جدول‌های (شماره ۳-۴ و ۴-۴) انجام می‌شود و این سرشکنی کردن خطاها موجود با توجه به (فرمول‌های ۲۱-۴ و ۲۲-۴) صورت می‌گیرند.

در جدول (شماره ۳-۴) ردیف ۹ (caculate) C_{cacu} محاسبه شده و ردیف ۹ (measurement) C_{meas} اندازه‌گیری شده و در ردیف‌های ۱۱ و ۱۲ و ۱۳(correction) a_{corre} و b_{corre} و c_{corre} اندازه‌های تصحیح شده اضلاع مثلث قرار گرفته‌اند.

(جدول ۳-۴)

سرشکن کردن خطاهای اضلاع مثلث در بالای سطح زمین	حالت قرار گرفتن شاغولها		
	I	II	III
Sin α	0,004921	0,003685	0,006157
Cos α	0,999988	0,999993	0,999981
b/a	1.266959	1.267477	1.266589
Sin β	0,006235	0,004671	0,007798
β	0o12'26,0"	0o16'03,5"	0o26'45,5"
Cos β	0,999980	0,999989	0,999970
$a \times Cos\,\beta$	4.2882	4.2871	4.2889
$b \times Cos\,\alpha$	5.433	5.4338	5.4323
c_{cacu}	9.7212	9.7209	9.7212
c_{meas}	9.7219	9.7215	9.7223
$fs = c_{cacu} - c_{meas}$	-0,0007	-0,0006	-0,0011
a_{corre}	4,2885 м	4,2873 м	4,2894 м
b_{corre}	5,4334 м	5,4340 м	5,4327 м
c_{corre}	9,7217 м	9,7213 м	9,7219 м

(جدول ۴-۴)

سرشکن کردن خطاهای اضلاع مثلث در پایین سطح زمین	حالت قرار گرفتن شاغولها در چاه		
	I	II	III
Sin α1	0,021452	0,022276	0,020628
Cos α1	0,999770	0,999752	0,999788
b1/a1	1.603529	1.60444	1.602619
Sin β1	0,034399	0,035739	0,033059
β1	1o58'16,5"	2o02'53,5"	1o53'40,2"
Cos β1	0,999408	0,999362	0,999453
$a \times Cos\ \beta 1$	4.2881	4.2859	4.2902
$b \times Cos\ \alpha 1$	6.8785	6.8791	6.8779
C_{cacu}	11,1666 м	11,1650 м	11,1681 м
C_{meas}	11,1648 м	11,1642 м	11,1654 м
$fs = c_{cacu} - c_{meas}$	+0,0018 м	+0,0008 м	+0,0027 м
$a1_{corre}$	4,2900 м	4,2883 м	4,2917 м
$b1_{corre}$	6,8795 м	6,8806 м	6,8785 м
$c1_{corre}$	11,1654 м	11,1645 м	11,1663 м

محاسبات نهایی حل معادله سرشکنی اضلاع مثلث در بالای سطح زمین در جداول (شماره ۴-۴ و ۵-۴) آمده است که با نتایج تصحیح اضلاع مثلث a_{corre} و b_{corre} و c_{corre} می‌توان محاسبه سرشکنی خطاء زوایای β و γ از طریق فرمول (شماره ۱۵-۴) انجام داد و در آخر کنترلی برای مجموع خطای سرشکنی زوایای مثلث که مجموع اضلاعش باید تقریباً برابر با 180^0 درجه گردند انجام می‌شود مقدار مجاز خطاء مجموع زوایای مثلث نباید از " ۳. بیشتر شود.

(جدول ۵-۴)

سرشکن کردن خطاهای اضلاع مثلث در بالای سطح زمین	حالت قرار گرفتن شاغولها در بالای سطح زمین		
	I	II	III
α	0°16'55,0"	0°12'40,0"	0°21'10,0"
Sin α	0,004921	0,003685	0,006157
γ	179°21'38,8"	179°31'16,5"	179°12'01,5"
Sin γ	0,011156	0,008356	0,013955
c/a	2.266923	2.267465	2.266494
a_{corre}	9,7217 м	9,7213 м	9,7219 м
b_{corre}	4,2885 м	4,2873 м	4,2894 м
c_{corre}	5,4334 м	5,4340 м	5,4327 м
b/a	1.26697	1.267465	1.266541
Sin β	0,006235	0,004671	0,007798
β	0o21'26,0"	0o16'03,5"	0o26'48,5"
α + β + γ	179o59'59,8"	180o00'00,0"	180o00'00,0"

(جدول ۶-۴)

سرشکن کردن خطاهای اضلاع مثلث در بالای سطح زمین	حالت قرار گرفتن شاغولها در بالای سطح زمین		
	I	II	III
α	0°16'55,0"	0°12'40,0"	0°21'10,0"
Sin α	0,004921	0,003685	0,006157
γ	179°21'38,8"	179°31'16,5"	179°12'01,5"
Sin γ	0,011156	0,008356	0,013955
c/a	2.266923	2.267465	2.266494
a_{corre}	9,7217 м	9,7213 м	9,7219 м
b_{corre}	4,2885 м	4,2873 м	4,2894 м
c_{corre}	5,4334 м	5,4340 м	5,4327 м
b/a	1.26697	1.267465	1.266541
Sin β	0,006235	0,004671	0,007798
β	0o21'26,0"	0o16'03,5"	0o26'48,5"
α + β + γ	179o59'59,8"	180o00'00,0"	180o00'00,0"

محاسبه سرشکنی ژیزمان شبکه پیمایش در زیرزمین (داخل تونل‌ها)

برای شروع کار در وهله نخست محاسبه ژیزمان زوایای را در سطح شاغول‌های $\alpha O1$ و $\alpha O2$ طبق جدول (شماره ۷-۴) محاسبه و انجام می‌گردد.

(جدول ۷-۴)

محاسبه ژیزمان شبکه پیمایش در سطح شاغولها	حالت قرار گرفتن شاغولها در چاه		
	I	II	III
$\alpha PA-K$	$324^o\ 28'39,0''$	$324^o28'39,0''$	$324^o28'39,0''$
ω	65 54 28	66 04 02	65 44 54
$\alpha PA-O1$	30 23 07	30 32 41	30 13 33
$180^o-\gamma$	0 38 21	0 28 44	0 47 58
αO1-O2	31 01 28	31 01 25	31 01 31

محاسبه ژیزمان مسیر پیمایش در زیرزمین (داخل تونل‌ها) $PA1$ و $PM1$ در جدول (شماره ۸-۴) نشان داده شده است.

(جدول ۸-۴)

محاسبه ژیزمان زوایای مثلث در سطح شاغولها(داخل تونل)	حالت قرار گرفتن شاغولها در چاه		
	I	II	III
'αO1'-O2	$31^o\ 01'28,0''$	$31^o01'25,0''$	$31^o01'31,0$
β1	1 58 17	2 02 54	1 53 41
αO1'-PA	29 03 11	28 58 31	29 07 50
$180^o-\omega1$	0 57 01	1 01 45	0 52 32
$\alpha PA1-PM$	30 00 12	30 00 16	30 00 22
$\alpha PA1-PM=30^o00'17''$			

محاسبه مختصات نقطه PM در شبکه پیمایش زیرزمین انجام داده شده است و نتایج را در جدول (شماره ۸-۴) جایگذاری می‌کنیم.

محاسبه متوسط مربع خطای تعیین جهت

مقدار اندازه تعیین خطاء جهت با فرمول‌های (شماره ۱۷-۴ و ۱۸-۴) محاسبه و تعیین می‌شوند.

اگر مقدار اندازه $\alpha = 0,3^o$ ، $\alpha 1 = 1,2^o$ ، $ms = 0,8\text{mm}$ ، $a = 4,3m$ ، $b = 5,4m$ مقدار اندازه $(mo)s = 1,3''$ می‌شود.

اگر مقدار اندازه $m = 3''$ ، $m1 = 4''$ ، $b/a = 1,2$ و $b1/a1 = 1,6$ آن وقت خطای متوسط مربع زاویه β برابر با $(mo)\beta = 15,8''$ می‌شود.

اگر مقدار اندازه $(mo)_p = 5''$ و $(mo)_b = 6''$ و $m_\alpha = 3''$ آن وقت از (فرمول ۱۶-۴) نتیجه می‌گیریم:

$$M_0 = \sqrt{(3'')^2 + \frac{(1.3'')^2 + (15.8'')^2 + (5'')^2}{3} + (6'')^2} = 11.0''$$

مختصات نقطه PM در زیر زمین و در داخل تونل در جدول (شماره ۹-۴) آورده شده است:

$Y_{M\,PM} = 2773,34\ м$; $X_{MPM} = 4641,304\ м$

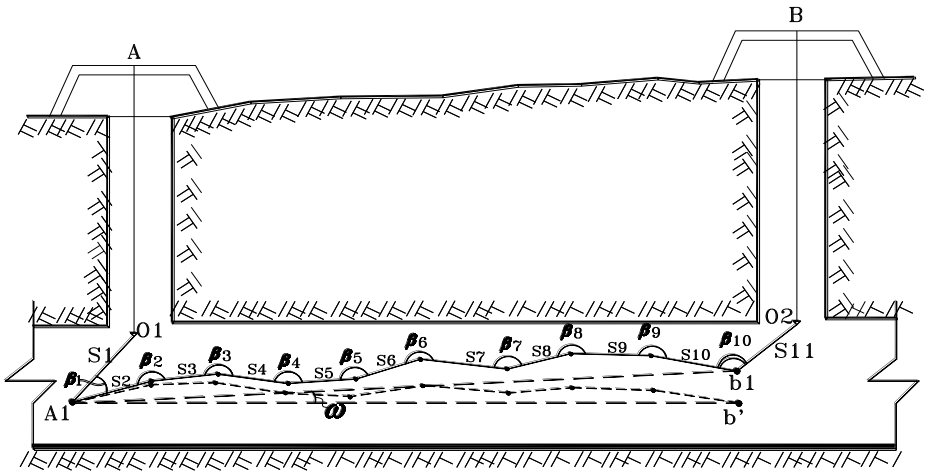
(جدول ۹-۴)

محاسبه مختصات شبکه پیمایش در زیر زمین	ژیزمان	طول (M)	Sin α	Cos α	Δy	Δx	y	x
	144°28'39"							
PA							2740.523	4583.493
	30°23'07"	5.433	+0,505812	+0,862644	2.748	4.687		
O1								
	29°03'11"	11.165	+0,485619	+0,874171	5.422	9.76		
PA1							2748.693	4597.94
	30°00'17"	50,075 / 66,673	+0,500071	+0,865984	25,041 / 33,211	43,364 / 57,811		
PM							2773.734	4641.304
K								
	144°28'39"							
PA							2740.523	4583.493
	30°32'41"	5.434	+0,508211	+0,861233	2762	4680		
O1								
	28°58'31"	11.164	+0,484432	+0,874829	5408	9767		
PA1							2748.693	4597.94
	30°00'17"	50,075 / 66,673	+0,500071	+0,865984	25,041 / 33,211	43,364 / 57,811		
PM							2773734	4641.304
K								
	144°28'39"							
PA							2740523	4583.493
	30°30'33"	5433	+0,505812	+0,862644	2748	4687		
O1								
	29°07'50"	11166	+0,485619	+0,874171	5422	9760		
PA1							2748693	4597.94
	30°00'17"	50,075 / 66,674	+0,500071	+0,865984	25,041 / 33,212	43,364 / 57,812		
PM							2773.735	4641.305

انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از طریق دو شاغول و دو چاه

بررسی محاسبات سرشکنی خطاء انتقال ژیزمان نقاط در شبکه پیمایش در زیر زمین داخل تونل، شمای اصلی ژئومتری انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از طریق دو شاغول و دو چاه بـه صـورت (تصویر ۱۲-۴) می‌باشد.

(تصویر ۱۲-۴)



در (تصویر ۱۲-۴) و در چاه شماره A شاغول O_1 را که مختصات آن از طریـق شـبکه پیمـایش در بالای زمین معلوم گردیده است به پایین فرستاده می‌شود، با اندازه‌گیری زاویـه β_1 و فاصـله S_1 در چاه شماره A شبکه پیمایش نقاط را به مختصات شاغول وصل می‌کنیم و برای تعیین جهت و اندازه ژیزمان مسیر O_1A_1 از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد و قبلاً توضیح داده شده است.

با ادامه حفاری در زیر زمین و در ادامه اجرا پروژه تونل از چـاه شـماره A از سـطح زمـین چـاه شماره B را برای سرعت بخشیدن به فرستادن هوای تازه و مصالح به زیر زمین حفاری می‌کنند و در چاه شماره B شاغول شماره O_2 را به پایین می‌فرستند که به انتهای شبکه پیمایش نقطـه b_1 را با اندازه‌گیری زاویه β_{10} و فاصله S_{11} متصل می‌کنند که با کمک آن‌ها می‌توان مختصات X_{2Z} و Y_{2Z} و X, Y زیرزمین را با این نام شماره‌گذاری می‌کنـیم) شـاغول شـماره O_2 را در زیر زمین به دست آورد، مختصات X_{2S} و Y_{2S} شاغول را در سـطح زمـین را از طریـق شـبکه پیمایش موجود واقع در سطح زمین به دست آورد.

با به دست آوردن مختصات شاغول O_2 در سطح بالا و زیر زمین می‌توان خطاء بست شبکه پیمایش را از طریق (فرمول ۲۳-۴) محاسبه و به دست آورد.

(فرمول ۲۳-۴)

$$\left.\begin{aligned} f_X &= X_{2Z} - X_{2S} \\ f_Y &= Y_{2Z} - Y_{2S} \end{aligned}\right\}$$

با به دست آوردن خطاء بست شبکه پیمایش f_X و f_Y می‌توان خطاء بست مطلق شبکه پیمایش از طریق (فرمول ۲۴-۴) به دست آورد.

$$f_S = \sqrt{{f_X}^2 + {f_Y}^2}; \qquad \text{(فرمول ۲۴-۴)}$$

خطاء نسبی شبکه پیمایش را می‌توان از (فرمول ۲۵-۴) به دست آورد.

$$\frac{f_S}{L} = \frac{1}{T} \qquad \text{(فرمول ۲۵-۴)}$$

در فرمول شماره (فرمول ۲۵-۴) اگر مقدار اندازه 1/T بیش از ۱ به ۱۰۰۰۰ باشد این نشانگر است که دقت شبکه پیمایش در زیر زمین و در داخل تونل برای اجرا پروژه کافی نمی‌باشد و لازم است که اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از نو و دوباره تکرار شوند.

در روش انتقال مختصات نقاط و ژیزمان از طریق دو شاغول و دو چاه شبکه پیمایش در زیر زمین با تعداد زیادی زوایای و طول‌های اضلاع اندازه‌گیری شده می‌باشد، بنابراین مقدار اندازه خطاء بست f_X و f_Y را در روی خطای بست طولیt و خطای بست عرضی u با فرمول شماره (فرمول ۲۶-۴) پخش می‌گردد.

(فرمول ۲۶-۴)

$$\left.\begin{aligned} t &= \frac{f_y[\Delta Y] + f_x[\Delta X]}{L}; \\ u &= \frac{f_y[\Delta X] - f_x[\Delta Y]}{L}; \end{aligned}\right\}$$

در (فرمول ۲۶-۴) مجموع طول اضلاع شبکه پیمایش را با L نمایش داده شده که در داخل تونل و مابین دو چاه انجام گرفته است البته طول‌های اضلاع $S1$ و $S11$ که در شروع و پایان شبکه پیمایش (امتدادهای شروع و پایان شبکه پیمایش) می‌باشند در محاسبه مجموع اضلاع طول‌های پیمایش لحاظ نمی‌شوند.

مجموع طول اضلاع $S1 + S11$ (امتدادهای شروع و پایان شبکه پیمایش) نباید بیش از 0.1 طول کلی L شبکه پیمایش افزایش پیدا کنند.

کنترل صحت خطاهای بست طولی t و بست عرضی u از طریق (فرمول ۲۷-۴) محاسبه می‌گردد.

$$\sqrt{t^2+u^2} = \sqrt{f_X{}^2+f_Y{}^2} = f_S \qquad \text{(فرمول ۲۷-۴)}$$

برای به دست آوردن مقدار اندازه انتظار خطاء بست عرضی m_u از (فرمول ۲۸-۴) استفاده می‌کنیم.

$$m_u = \sqrt{m_{u1}{}^2+m_{u2}{}^2+m_{u3}{}^2} \qquad \text{(فرمول ۲۸-۴)}$$

در (فرمول ۲۸-۴) m_{u1} خطاهای ژئودوزی در بالای سطح زمین و m_{u2} خطاء اندازه‌گیری زوایا در شبکه زیرزمینی پیمایش و m_{u3} خطاء تعیین جهت ژیزمان اولین ضلع شبکه زیرزمینی پیمایش می‌باشد.

محاسبه جداگانه برای تعیین روش مربع متوسط خطای از طریق فرمول‌های زیر محاسبه می‌گردند:

$$m_{u1} = \frac{L}{30000\sqrt{2}} \approx \frac{L}{45000} \qquad \text{(فرمول ۲۹-۴)}$$

$$m_{u2} = \frac{m_\beta}{\rho} L = \sqrt{\frac{n+1.5}{3}} \qquad \text{(فرمول ۳۰-۴)}$$

$$m_{u3} = \frac{m_0}{\rho} L \qquad \text{(فرمول ۳۱-۴)}$$

مشخصات فرمول‌های بالا:

- مقدار اندازه طول L برابر با فاصله مابین دو چاه A و B (طول شبکه پیمایش) می‌باشد.
- ۱ به ۳۰۰۰۰ خطاء نسبی شبکه پیمایش در بالای سطح زمین می‌باشد.

- m_β خطاء متوسط مربع اندازه‌گیری زوایای شبکه پیمایش.
- n شماره تعداد اضلاع شبکه پیمایش در زیرزمین.
- m_o خطاء ژیزمان زاویه ضلع اول شبکه پیمایش در زیر زمین.

با مشخص شدن خطاء بست عرضی u آن را به دو قسمت تقسیم می‌کنند، یک قسمت از این مقدار را به صورت تصحیح برای ژیزمان زاویه ضلع $O1\,A1$ و قسمت دیگر برای تصحیح اندازه‌گیری زاویه‌های شبکه پیمایش زیرزمینی استفاده می‌شود.

قسمت اول خطای بست عرضی از طریق (فرمول ۳۲-۴) محاسبه می‌گردد.

$$u_{_3} = u\,\frac{m_{u1}^2}{m_u^2} \qquad \text{(فرمول ۳۲-۴)}$$

مقدار اندازه تصحیح زاویه ژیزمان اصلی در نزدیکی چاه از طریق (فرمول ۳۳-۴) محاسبه می‌شود.

$$\Delta_a^{"} = -\frac{u_3}{L}\rho" \qquad \text{(فرمول ۳۳-۴)}$$

قسمت دوم خطاء بست عرضی را $(u-u_3)$ برای محاسبه زاویه $\omega^{"}$ که مورب با شبکه پیمایش است (تصویر ۱۲-۴) از طریق (فرمول ۳۴-۴) محاسبه می‌شود.

$$\omega^{"} = -\frac{(\mathrm{u}-\mathrm{u}_3)}{L}\rho^{"} \qquad \text{(فرمول ۳۴-۴)}$$

تصحیحات زاویه‌ها شبکه پیمایش زیرزمینی از طریق (فرمول ۳۵-۴) محاسبه می‌شود.

$$V_\beta{}^{"} = \omega - \frac{6\left[n-2(i-1)\right]}{(\mathrm{n}+1)(\mathrm{n}+2)} \qquad \text{(فرمول ۳۵-۴)}$$

در فرمول بالا n شماره تعداد اضلاع شبکه پیمایش و i نقطه فعلی شبکه می‌باشد.

خطاء بست طولی t شبکه پیمایش بطور متناسب در طول اضلاع شبکه پیمایش توزیع می‌شود و از (فرمول ۳۶-۴) محاسبه می‌شود.

$$V_{S_i} = -\frac{t}{L}S_i \qquad \text{(فرمول ۳۶-۴)}$$

در فرمول بالا اندازه طول L بدون در نظر گرفتن طول اضلاعی که به شبکه پیمایش بسته می‌شوند محاسبه می‌شوند (اضلاع $S1$ و $S11$ امتدادهای شروع و پایان شبکه پیمایش).

Si مجموع طول کلی اضلاع شبکه پیمایش (طول اضلاع شبکه پیماش $S10 \ldots S3, S2$) می‌باشد. پس از تعیین تصحیحات ژیزمان و امتداد شبکه پیمایش محاسبه تصحیحات مختصات شبکه پیمایش از طریق (فرمول ۳۷-۴) انجام می‌گیرد.

(فرمول ۳۷-۴)

$$\left.\begin{aligned} V_{\Delta Yi} &= V_{Si}.\sin(\alpha_i) + \frac{\Delta X_i . V_{\alpha i}}{\rho''} \\ V_{\Delta Xi} &= V_{Si}.\cos(\alpha_i) - \frac{\Delta Y_i . V_{\alpha i}}{\rho''} \end{aligned}\right\}$$

کنترل صحت محاسبه تصحیحات مختصات شبکه پیمایش با (فرمول ۳۸-۴) انجام می‌پذیرد.

(فرمول ۳۸-۴)

$$\left.\begin{aligned} [V_{\Delta Y1}] &= -f_Y \\ [V_{\Delta X1}] &= -f_X \end{aligned}\right\}$$

خطاء تعیین جهت امتداد در روش انتقال ژیزمان از طریق دو چاه از طریق (فرمول ۳۹-۴) محاسبه می‌شود.

(فرمول ۳۹-۴)

$$m_0 = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2 + m_6^2}$$

- m_1 مربع متوسط خطاء شبکه ژئودوزی در سطح زمین می‌باشند.
- m_2 مربع متوسط خطاء اندازه‌گیری طول امتدادهای که نزدیک به چاه در سطح زمین می‌باشند.
- m_3 مربع متوسط خطاء اندازه‌گیری طول در داخل چاه می‌باشد.
- m_4 مربع متوسط خطاء اندازه‌گیری طول در امتدادهای نزدیک به شبکه پیمایش در زیر زمین داخل تونل.

– m_5 خطاء مربع متوسط اندازه‌گیری طول در زیر زمین نزدیک به شبکه پیمایش.

– m_6 خطاء مربع متوسط خطاء اندازه‌گیری زوایا در شبکه پیمایش در زیر زمین می‌باشد.

همگی خطاهای مربع متوسط محاسبه شده از طریق فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$m_1 = \frac{1}{45000}\rho'' \qquad \text{(فرمول ۴۰–۴)}$$

$$m_2 = m_3 = \frac{\mathrm{D}.\rho''}{15000.L} \qquad \text{(فرمول ۴۱–۴)}$$

$$m_4 = m_5 = \frac{l.\rho''}{15000.L} \qquad \text{(فرمول ۴۲–۴)}$$

$$m_6 = m_\beta = \sqrt{\frac{n+1.5}{3}} \qquad \text{(فرمول ۴۳–۴)}$$

در فرمول‌های بالا مشخصات به شرح زیر می‌باشد:

– ۱ به ۴۵۰۰۰ اثر قابل انتظار در خطاء بست طولی در بالای سطح زمین.

– D مقدار اندازه طول شبکه پیمایش نزدیک به چاه در بالای زمین (تقریباً برابر با ۱۰۰ متر گرفته می‌شود).

– Lمقدار اندازه فاصله مابین چاه A و B بدون اندازه‌های امتدادهای شروع و پایان شبکه پیمایش $S1$ و $S11$ می‌باشند.

– ۱ به ۱۵۰۰۰ خطاء نسبی اندازه‌گیری طول می‌باشد.

– l طول امتداد شروع شبکه پیمایش در زیر زمین (اغلب برابر با ۵۰ متر در نظر گرفته می‌شود).

– m_βمربع متوسط خطا اندازه‌گیری زاویه شبکه پیمایش اصلی (اغلب با "۴ در نظر گرفته می‌شود)

– n تعداد امتداد (اضلاع) در شبکه زیرزمینی پیمایش می‌باشد.

نمونه‌ای از انتقال ژیزمان نقاط به زیر زمین با روش دو چاه و دو شاغول و مثلث

در این نمونه مثال مجهولات زیر را به دست می‌آوریم:

– محاسبه مختصات نقاط امتداد شبکه پیمایش در زیرزمین از شاغول $O2$ از نتایج اندازه‌گیری‌های زاویه‌ای – اندازه‌گیری طول‌های امتداد در شبکه پیمایش زیرزمینی پیمایش (تصویر ۱۳–۴).

– محاسبه خطاء بست طولی (t) و بست عرضی (u).

– تعیین میزان تأثیر مقدار اندازه مورد انتظار از منابع خطاء در انتهای نقاط مشترک شبکه زیرزمینی پیمایش.

– محاسبه تصحیح ژیزمان اولین امتداد $O1-1101$.

– محاسبه تصحیح در اندازه‌گیری زوایا و امتدادها شبکه زیرزمینی پیمایش.

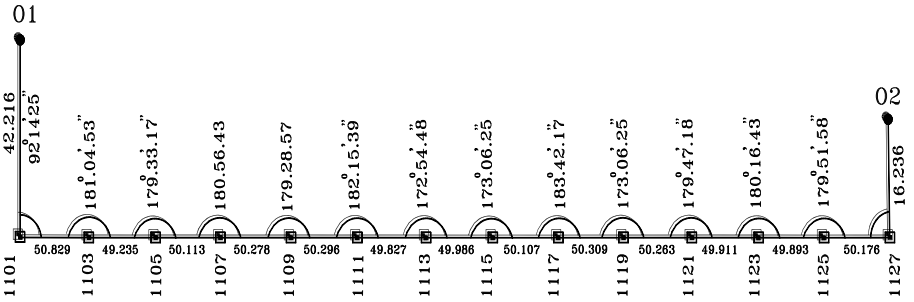
– تعیین اصلاح مختصات و محاسبه معادله مختصات نقاط ثابت شبکه زیرزمینی پیمایش.

– محاسبه و تعیین خطاء ژیزمان در روش دو چاه و دو شاغول.

داده‌های مسئله به شرح زیر می‌باشند:

– شمای شبکه پیمایش در زیر زمین و داخل تونل‌ها.

(تصویر ۱۳–۴)



- مختصات چاه اول ($O1$) برابر $XO_1 = 7478,220m$ و $YO_1 = 5848,036m$ می‌باشند.

- مختصات چاه دوم ($O2$) برابر $XO_2 = 7212,912m$ و $YO_2 = 6440,151m$ می‌باشند.

- مربع متوسط خطاء اندازه‌گیری زوایا در شبکه زیرزمینی پیمایش برابر $m_\beta = 4''$ ثانیه می‌باشد.

- خطاء ژیزمان اولین امتداد در شبکه پیمایش زیرزمینی با دو کوپل اندازه‌گیری با روش دوشاغول و دو مثلث برابر $m_o = 8''$ ثانیه می‌باشد.

- خطاء نسبی شبکه پیمایش اصلی در روی زمین برابر با ۱ به ۳۰۰۰۰ می‌باشد.

- ژیزمان زاویه αo_{1-1101} نزدیک به چاه و برابر با $\alpha o_{1-1101} = 202^O 29'45''$ می‌باشد.

محاسبه تغییرات طولی و عرضی مختصات ΔX و Δy را محاسبه می‌کنیم برای این منظور در وهله اول خطاء بست مختصات از طریق (فرمول ۴۴-۴) را به دست می‌آوریم.

(فرمول ۴۴-۴)

$$t = \frac{f_y[\Delta Y] + f_X[\Delta X]}{L}$$

$$u = \frac{f_y[\Delta X] - f_X[\Delta Y]}{L}$$

جایگذاری اعداد را در فرمول‌ها زیر انجام می‌دهیم:

$$\mathrm{fx} = [\Delta X] - (XO2 - XO1) = -265,329 + 265,308 = -0,021\ м$$

$$\mathrm{fy} = [\Delta Y] - (YO2 - YO1) = 592,067 - 592,115 = -0,048\ м$$

$$\mathrm{L} = [S] - (S1 + S15) = 712,675 - 61,452 = 651,223\ м$$

مقدارهای به دست آمده را در (فرمول ۴۴-۴) جایگذاری می‌کنیم و نتیجه را به شرح زیر به دست می‌آوریم:

$$t = \frac{(-0.048)\times(592.067) + (-0.021)\times(-265.329)}{651} = -0.035m$$

$$u = \frac{(-0.048)\times(-265.329)-(-0.021)+(-592.067.329)}{651} = -0.039m$$

$$f_s = \sqrt{t^2+u^2} = 0.052m$$

– محاسبه مقدار اندازه انتظار خطاء بست عرضی m_u در انتهای مسیر شبکه پیمایش در زیر زمین:

با جایگذاری در (فرمول‌های ۲۹–۴ و ۳۰–۴) مقدار اندازه انتظار خطاء بست عرضی m_u را به دست می‌آوریم:

$$m_{u1} = \frac{L}{45000} = \frac{651000}{45000} = 14mm$$

$$m_{u2} = \frac{m\beta}{\rho} L\sqrt{\frac{n+1.5}{3}} = \frac{4''\times 651000}{206265''}\sqrt{\frac{16.5}{3}} = 30mm$$

$$m_{u3} = \frac{m\beta}{\rho} L = \frac{8''\times 651000}{206265''} = 2.5mm$$

$$m_u = \sqrt{m_{u1}^2+m_{u2}^2+m_{u3}^2} = \sqrt{196+900+625} = 41mm$$

– مقدار اندازه تصحیح خطاء را در زاویه ژیزمان مبناء شبکه پیمایش در زیر زمین به شرح زیر به دست می‌آوریم:

مقدار اندازه تصحیح خطاء $\Delta\alpha''$ در ژیزمان زاویه خط پیمایش1101-O1 از (فرمول‌های ۳۲–۴ و ۳۳–۴) به دست می‌آوریم:

$$u_3 = u\frac{m_{u_3}^2}{m_u^2} = 39\frac{25^2}{41^2} = 14mm$$

$$\Delta\alpha'' = \frac{-u_3}{L}\rho = \frac{-14}{651000}.206265'' = -4.4''$$

– محاسبه مقدار اندازه تصحیح خطاء $\mathbf{V\beta i}$ در اندازه‌گیری زاویه را به دست می‌آوریم:

برای این منظور مقدار اندازه تصحیح خطاء $\mathbf{V\beta i}$ را با استفاده (فرمول‌های ۳۴–۴ و ۳۵–۴) و جایگذاری در آن‌ها به دست می‌آوریم:

$$u - u_3 = 39 - 26 = 14mm$$

$$\omega = -\frac{u - u_3}{L}\rho = -\frac{14 \times 206265''}{651000} = -4.4''$$

$$V_{\beta}^{''} = \omega - \frac{6\left[n - 2(i-1)\right]}{(n+1)(n+2)}$$

برای راحتی در حل مسئله مناسب است محاسبه (فرمول ۳۵-۴) را از طریق جایگذاری در (جدول ۱۰-۴) انجام پذیرد:

(جدول ۱۰-۴)

شماره نقاط شبکه پیمایش	in = 13	$\frac{6[n-2(i-1)]}{(n+1)(n+2)}$	تصحیح خطاء در راویه چپ Vβi	تصحیح خطاء در زاویه زوایای ژیزمان $v_{\alpha 1}=\Delta\alpha''+\sum_{1}^{i}v_{\beta}$
چاه شماره.O1				- 4,4
1101	1	+ 0,37	- 2,9	- 7,3
1103	2	+ 0,31	- 2,4	- 9,7
1105	3	+ 0,26	- 2,0	- 11,7
1107	4	+ 0,20	- 1,6	- 13,3
1109	5	+ 0,14	- 1,1	- 14,4
1111	6	+ 0,09	- 0,7	- 15,1
1113	7	+ 0,03	- 0,2	- 15,3
1115	8	- 0,03	+ 0,2	- 15,1
1117	9	- 0,09	+ 0,7	- 14,4
1119	10	- 0,14	+ 1,1	- 13,3
1121	11	- 0,20	+ 1,6	- 11,7
1123	12	- 0,26	+ 2,0	- 9,7
1125	13	- 0,31	+ 2,4	- 7,3
1127	14	- 0,37	+ 2,9	- 4,4
چاه شماره.O2				

در نتیجه محاسبه مقدار اندازه $\Sigma V''_{\beta}=0$ در ستون چهارم (جدول ۱۰-۴) برابر با صفر می‌شود.

برای تعیین مقدار اندازه خطای **Vβi** و **Vαi** از (جدول ۱۱-۴) استفاده می‌کنیم:

(جدول ۱۱-۴)

شماره نقاط	اندازه زوایه	ژیزمان	طول شبکه پیمایش	محاسبه تغییرات طولی و عرضی مختصات				مختصات شبکه پیمایش	
				محاسبه تغییرات طولی و عرضی		تصحیح محاسبه تغییرات طولی و عرضی			
	o ' "	o ' "		ΔX	ΔY	VΔX	VΔY	X	Y
چاه شماره.O1		-4,4	0,0			0	1	7,478,220	5,848,036
	- 2,9	202 39 45	45,216	-41,725	-17,422	0-0,4=-0,4	0+0,9=0,9		
1101	92 14 25	-7,3	+ 2,7			0	3	7,436,495	5,830,615
	-2,4	114 54 10	50,829	-21,403	46,103	-1,1+1,6=0,4	2,4+0,8=3,2		
1103	181 04 53	- 9,7	+ 2,6			1	3	7,415,092	5,876,721
	- 2,0	115 59 03	49,235	-21,571	44,258	-1,1+2,1=1,0	2,3+1,0=3,3		
1105	179 33 17	- 11,7	+ 2,7			1	4	7,393,522	5,920,982
	- 1,6	115 32 20	50,113	-21,605	45,217	-1,2+2,6=1,4	2,4+1,2=3,6		
1107	180 56 43	- 13,3	+ 2,7			2	4	7,371,918	5,966,203
	- 1,1	116 29 03	50,278	-22,422	45,002	-1,2+2,9=1,7	2,4+1,4=3,8		
1109	179 28 57	- 14,4	+ 2,7			2	4	7,349,498	6,011,209
	- 0,7	115 58 00	50,296	-22,022	45,218	-1,2+3,2=2,0	2,4+1,5=3,9		
1111	182 15 39	- 15,1	+ 2,7			2	4	7,327,478	6,056,431
	- 0,2	118 13 39	49,827	-23,567	43,901	-1,3+3,2=1,9	2,4+1,7=4,1		
1113	172 54 48	- 15,3	+ 2,7			2	4	7,303,913	6,100,336
	+ 0,2	111 08 27	49,986	-18,028	46,622	-1,0+3,4=2,4	2,5+1,3=3,8		
1115	173 06 25	- 15,1	+ 2,7			3	4	7,285,887	6,146,962
	+ 0,7	104 14 52	50,107	-12,332	48,566	-0,7+3,6=2,9	2,6+0,9=3,5		
1117	183 42 17	- 14,4	+ 2,7			2	4	7,273,558	6,195,532
	+ 1,1	107 57 09	50,309	-15,507	47,860	-0,8+3,3=2,5	2,6+1,1=3,7		
1119	179 37 49	- 13,3	+ 2,7			2	4	7,258,053	6,243,396
	+ 1,6	107 34 58	50,263	-15,184	47,915	+0,8+3,1=2,3	2,6+1,0=3,6		
1121	179 47 18	- 11,7	+ 2,7			2	3	7,242,871	6,291,315
	+ 2,0	107 22 16	49,911	-14,901	47,635	-0,8+2,7=1,9	2,6+0,8=3,4		
1123	180 16 43	- 9,7	+ 2,7			1	3	7,227,972	6,338,953
	+ 2,4	107 38 59	49,893	-15,127	47,544	+0,8+2,2=1,4	2,6+0,7=3,3		
1125	179 51 58	- 7,3	+ 2,7			1	3	7,212,846	6,386,500
	+ 2,9	107 30 57	50,176	-15,101	47,850	-0,8+1,7=0,9	2,6+0,5=3,1		
1127	93 24 19	- 4,4	0,0			0	0	7,197,746	6,434,353
		20 55 16	16,236	15,166	5,798	0+0,1=0,1	0-0,3=-0,3		
چاه شماره.O2								**7,212,912**	**6,440,151**

$\Sigma\beta = 2338o15'31 \quad \Sigma S = 712,675 \quad -265,329 \quad +592,067 \quad \Sigma V\Delta X = 22,4 \quad \Sigma V_{\Delta y} = 46,9$

$\Sigma V_{\beta} = 0 \quad \Sigma V_{S} = 35.0 \quad \Sigma = -265,308 \quad +592,115 \quad \Sigma V_{\Delta X} = 21.0 \quad \Sigma V_{\Delta y} = 48.0$

$f_{\Delta X} = -0.021 \quad f_{\Delta y} = -0.048$

زیگما گرد شده است:

$$f_S = -0.052$$

$$V_S = -\frac{35}{651,223}\,\mathrm{Si} = +0.0537\mathrm{Si} \qquad \frac{f_S}{S} = \frac{1}{13000}$$

– محاسبه مقدار اندازه تصحیح خطاء VSi در طول مسیر شبکه و همچنین مقدار تصحیح خطاهای پیمایش در تغییرات مختصات مسیر $V\,\Delta Yi$ و $V\,\Delta Xi$ را محاسبه می‌کنیم.

محاسبه اندازه تصحیحات را از فرمول‌های شماره (۴۰–۴ و ۴۱–۴) به دست می‌آوریم و برای این منظور مقدار اندازه آن‌ها را از (جدول ۱۱–۴) استخراج و برداشت می‌کنیم. محاسبه مقدار اندازه تصحیح خطاء VSi و $V\,\Delta Yi$ و $V\,\Delta Xi$ را به میلی‌متر (mm) و تا دو رقم بعد از اعشار محاسبه می‌کنیم و پس از به دست آوردن مقدار تصحیح خطاهای مربوطه آن‌ها را گرد کرده و باید تلاش کرد که مجموع خطاهای به دست آمده با خطاهای بست $f\,X$ و fy برابر باشد.

– محاسبه مقدار اندازه خطائی متوسط مربع تعیین جهت‌یابی در حفاری به روش دو چاه:

ارزیابی مقدار اندازه دقت جهت‌یابی در سازه‌های زیرزمینی از طریق فرمول‌های (۴۰–۴ تا ۴۳–۴) محاسبه می‌گردد:

$$m_1 = \frac{1}{45000}\rho'' = 4,6''$$

$$m_2 = m_3 = \frac{D.\rho''}{15000L} = \frac{100.206265}{15000L}$$

اگر مقدار اندازه $L = 700m$ باشد آن وقت $m_2 = m_3 = 1,4''$ به دست می‌آید.

$$m_4 = m_5 = \frac{l.\rho''}{15000L} = \frac{50.206265}{15000.L}$$

اگر مقدار اندازه $L = 700m$ باشد و $l = 50m$ آن وقت مقدار اندازه $m_4 = m_5 = 0,9''$ می‌گردد.

$$m_4 = m_\beta = \sqrt{\frac{n.1,5}{3}} = 4''\sqrt{\frac{n.1,5}{3}}.$$

اگر مقدار اندازه $n = 15$ و $m = 3''$ آن وقت مقدار اندازه $m_6 = 7,0''$ می‌گردد.

با در نظر گرفتن مقدار اندازه ارزیابی‌های به دست آمده $m_1, m_2, m_3, m_3, m_5, m_6$ در فرمول خطائی متوسط مربع تعیین جهت‌یابی قرار می‌دهیم:

در نتیجه مقدار اندازه متوسط خطائی مربع جهت‌یابی به شرح زیر محاسبه و به دست می‌آید:

$$M_0 = \sqrt{(4,6)^2 + (1,4)^2 + (1,4)^2 + (0,9)^2 + (0,9)^2 + (0,7)^2} = 8,7''$$

با توجه به دریافت نتیجه محاسبه‌ها متوجه می‌شویم که مقدار اندازه $M_0 = 8,7''$ می‌باشد و این مقدار اندازه کمتر از مقدار حد مجاز خطائی متوسط مربع تعیین جهت‌یابی در حفاری به روش دو چاه می‌باشد و مورد قبول است.

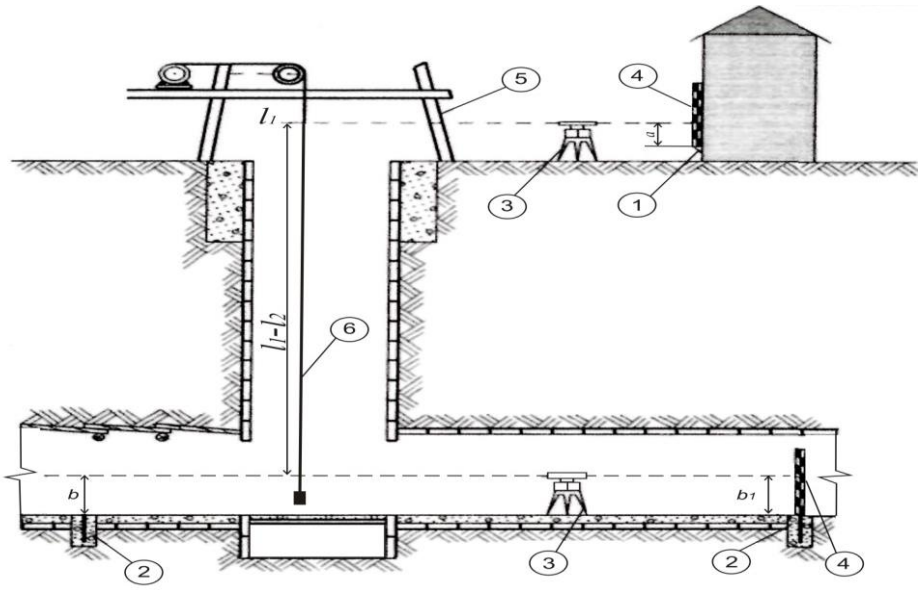
انتقال ارتفاع از سطح زمین به زیر زمین داخل تونل

برای پیاده کردن پروفیل مسیر تونل نیاز به شبکه ارتفاعی انتقال نقاط به زیر زمین می‌باشد انتقال نقاط ارتفاعی به زیر زمین توسط دستگاه‌های ترازیاب (نیو) انجام می‌گردد، دقت و انتخاب کلاس شبکه ترازیابی و دستگاه‌های ترازیاب بستگی کامل به طول پروفیل مسیر تونل و دقت خواسته شده از سوی مهندسین مشاور پروژه برای تلاقی مسیر حفاری پروفیل تونل از دو طرف می‌باشد. لزوم دقت تلاقی پروفیل مسیر سازه تونل در ارتفاع به دقت شبکه ترازیابی در روی زمین بستگی دارد، برای این منظور در روی سطح زمین برای شبکه ترازیابی دقت کلاس IV (چهارم) را در نظر می‌گیرند البته تجربه ساخت و تکمیل شبکه‌های ارتفاعی (ترازیابی) تونل‌های در زیر زمین توسط کارشناسان با تجربه نشان داده است که بهتر است در سطح زمین شبکه ترازیابی با دقت کلاس III (سوم) استفاده گردد، انتقال ارتفاع به داخل چاه‌های و گالری‌ها و تونل از طریق «رپرهای» دقت کلاس سوم III شبکه ترازیابی که در روی سطح زمین در محدوده مسیر پروفیل تونل توسط کارشناسان نقشه‌برداری به داخل تونل‌ها و گالری‌ها انتقال داده شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای انتقال ارتفاع نقاط از سطح زمین به زیر زمین و داخل تونل جهت ترازیابی مسیر پروفیل تونل از دو دستگاه ترازیاب و دو خط کش مدرج و یک متر فولادی استفاده می‌گردد همانطور که در (تصویر ۱۴-۴) مشخص است در روی سطح زمین خط کش مدرج را در روی نقطه که ارتفاع مشخصی (بنچمارک) دارد قرار داده و به وسیله دو ترازیاب یکی در بالای سطح زمین و دیگری در زیر سطح زمین ارتفاع را در روی خط کش مدرج و متر فولادی و یا (متر انوار) را که از قبل

کالیبره گردیده است قرائت می‌کنند و برای کمتر شدن حرکات آونگی متر در درون چاه به سر آن وزنه‌ای ۱۰ کیلوگرمی وصل می‌کنند (محلی که نقطه صفر متر قرار دارد) در این هنگام کارشناسان نقشه‌برداری با دو دستگاه ترازیاب یکی مستقر در روی سطح زمین و دیگری در زیر سطح زمین داخل چاه با همدیگر و همزمان اعداد روی متر آویزان شده به داخل چاه و شاخص مدرج را در بالا و پایین زمین قرائت کرده و در ژورنال ترازیابی یادداشت می‌کنند.

(تصویر ۱۴-۴)



در (تصویر ۱۴-۴) که جهت انتقال ارتفاع نقاط به زیرزمین نشان داده شده است مشخصات شماره‌گذاری شده به شرح زیر می‌باشد:

۱- بنچ مارک (نشانه مختصاتی) دیواری ۲- نشانه شبکه پلی گونه متری ۳- ترازیاب ۴- خط کش مدرج ۵- نگه دارنده متر فولادی در روی دهانه چاه ۶- متر فولادی به وزنه.

برای انتقال ارتفاع به داخل چاه لازم است درجه حرارت محیط کنترل گردد و اگر اختلاف درجه دماء در روی سطح زمین و در زیر سطح زمین داخل تونل (تقریباً برابر با 5°درجه) باشد باید قرائت‌های انجام شده با سه ارتفاع متفاوت سه پایه دستگاه ترازیاب و یا به سه مرتبه جابجایی متر فولادی صورت گیرد و پس از در پایان عملیات ترازیابی باید از اندازه‌های قرائت‌های شده متوسط گیری انجام داد.

برای تعیین مقدار اندازه ارتفاع می‌توان از طریق (فرمول ۴۵-۴) استفاده کرد.

(فرمول ۴۵-۴)

$$H_m = H_n + a - \left[\left(l_1 - l_2\right) + \Delta_k + \Delta_{t^\circ}\right] - b_1$$

در (فرمول ۴۵-۴) مشخصات به شرح زیر می‌باشد:

- H_m قرائت ارتفاع در روی بنچ مارک زیر زمین.
- H_n قرائت ارتفاع در روی بنچ مارک در بالای سطح زمین.
- a قرائت در روی خط کش مدرج در بالای سطح زمین.
- b_1 قرائت در روی خط کش مدرج در زیر سطح زمین داخل تونل.
- l_1 قرائت در روی متر فولادی در بالای سطح زمین.
- l_2 قرائت در روی متر فولادی در زیر سطح زمین داخل تونل
- Δ_k مقدار اندازه خطای کالیبره متر فولادی.
- Δ_{t° مقدار اندازه خطای تغییر طول متر فولادی ناشی از درجه حرارت و دما.

برای تعیین مقدار اندازه خطای طول متر ناشی از تغییر دما از (فرمول ۴۶-۴) استفاده می‌شود.

$$\Delta_{t^\circ} = kl\left(t^\circ_{cp} - t^\circ_0\right)$$ (فرمول ۴۶-۴)

مشخصات (فرمول ۴۶-۴) به شرح زیر می‌باشد

- k مقدار اندازه ضریب $k = 0{,}0000125$ ناشی از تغییر طول متر فولادی در (1°) است.
- t°_{cp} مقدار متوسط اندازه گرفته شده دماء در سطح زمین، داخل چاه و در زیر سطح زمین می‌باشد.
- t°_0 مقدار اندازه مجاز دماء استاندارد متر فولادی.

برای انتقال ارتفاع به داخل چاه‌های با عمق بیش از $H \geq 150m$ حتماً خطای طول متر ناشی از وزن خودش از طریق (فرمول ۴۷-۴) باید حساب و در محاسبات مزبور لحاظ می‌کنند.

$$\Delta l = \frac{Ql}{EF}$$ (فرمول ۴۷-۴)

مشخصات (فرمول ۴۷-۴) به شرح زیر می‌باشد:

- Q نصف وزن کلی متر فولادی.
- l طول متر فولادی مورد استفاده.
- E مقدار ضریب کششی متر فولادی. (برای متر فولادی $E = 2-10\ кг/см^2$)
- F مقدار اندازه عرض متر فولادی برحسب سانتی مترمربع $см^2$.

برای انتقال ارتفاع به چاه (عمیق) با عمق بیش از $H \geq 150m$ مناسب است از سیم‌های مخصوص فولادی برای تعیین عمق چاه‌های استفاده شود این سیستم‌های اندازه‌گیری دارای کنتوری می‌باشند که مقدار دور دیسک اندازه‌گیری شده را محاسبه می‌کند، در این روش با تغییر و جابجای سیم فولادی اندازه‌گیری

تفاوت در ارقام قرائت شده نباید بیش از ۴mm میلی‌متر افزایش یابد و تفاوت در تغییرات اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف نباید بیش از ۷ mm میلی‌متر تجاوز کند.

در (فرمول ۴۵-۴) n مقدار تعداد ایستگاه‌های استقرار ترازیاب می‌باشند.

در چاه‌های با عمق بیش از $H \geq 150m$ باید از سیم فولادی به قطر ۱٫۵..... ۰٫۸ میلی‌متر که به یک سر آن وزنه‌ای وصل گردیده و سر بالای آن در روی سطح زمین از روی قرقره‌ای مخصوص گذشته استفاده می‌شود، برای قرائت سیم توسط دستگاه ترازیاب در روی سیم فولادی با وسیله نوک تیز علامتی (خطی می‌کشند) در محل تلاقی تار رتیکول و سیم فولادی را در روی سطح زمین و زیر سطح زمین علامت‌گذاری می‌گردد و بعد از علامت‌گذاری سیم فولادی آن را از چاه بیرون کشیده و توسط وزنه‌ای با همان وزن درون چاه کشش داده و سپس با متر انوار کالیبره شده مقدار اندازه علامت‌گذاری شده را متر کشی می‌کنند، پس از قرائت متر انوار و شاخص در روی سطح زمین و زیر سطح زمین اعداد قرائت شده برای انتقال و تعیین ارتفاع در زیر زمین استفاده می‌گردد، در (فرمول ۴۸-۴) H1 ارتفاع بنچ مارک در روی سطح زمین، A اعداد قرائت شده توسط ترازیاب روی شاخص و در روی سطح زمین، L1 اعداد قرائت شده توسط ترازیاب (نیو) در روی متر و در روی سطح زمین، L2 اعداد قرائت شده توسط ترازیاب (نیو) در روی متر و در (فرمول ۴۸-۴)

$$H2 = H1 + A - \{(L1 - L2) + \Delta t + \Delta k + \Delta l\} - B$$

زیر سطح زمینمی باشد، Δt مقدار خطای تغییر طول متر بر اثر تغییر درجه دما در محل مترکشی و Δk خطای کالیبراسیون طول متر، Δl خطای به وجود آمده در طول متر انوار، B اعـداد قرائـت شده توسط ترازیاب (نیو) روی شاخص و در زیر سطح زمین می‌باشد، خطاء به وجود آمده بر اثـر تغییر دما در طول متر در محل اندازه‌گیری از طریق (فرمول ۴۹-۴) محاسبه می گرد.

$$\Delta t = A(L1 - L2)\ (tm - t0) \qquad \text{(فرمول ۴۹-۴)}$$

در (فرمول ۴۹-۴) t0 مقدار اندازه درجه دماء استاندارد برای متر می‌باشد (این مقـدار دمـا توسـط کارخانه سازنده متر فولادی و یا متر انوار تعیین می‌گردد) و A مقدار ضریب انبساط طولی بـرای متر فولادی است که برابر با 0,0000125 می‌باشد، tm مقدار متوسط اندازه‌گیری دماء در سـطح زمین و در داخل چاه است، برای به دست آوردن مقـدار متوسـط دمـاء در داخـل چـاه از طریـق اندازه‌گیری در هر ۵ متر از لبه چاه تا کف چاه صورت می‌گیرد و از این تعداد مقدار اندازه‌گیری‌ها دما متوسط می‌گیرند و در محاسبات لحاظ می‌کنند (tm)، مقدار اندازه خطاء مجاز انتقال ارتفاع از بنچ مارک‌های سطح زمین به بنچ مارک‌های در زیر سطح زمین توسط متـر و دسـتگاه ترازیـاب نباید بیش از ۴ mm میلی‌متر در ارتفاع افزایش پیدا کند.

در انتقال ارتفاع از سطح زمین به زیر زمین از طریق چاه‌های عمودی توسط ترازیاب و خط کش مدرج مقدار اندازه خطاء ارتفاع نباید بیش مقدار اندازه (فرمول ۵۰-۴) باشد.

$$\pm 2мм\sqrt{n} \qquad \text{(فرمول ۵۰-۴)}$$

برای انتقال نقاط ارتفاعی در محدوده پروفیل مسیر تونل از شبکه ترازیابی با بنچ مـارک‌هـای نصـب شده در مسیر پروفیل تونل استفاده می‌گردد، ارتفاع آن‌ها از بنچ مارک شـبکه ترازیـابی سـطح زمـین از طریق چاه‌ها و گالری‌ها که به داخل تونل‌ها انتقال داده شده به دست می‌آید، انتقال ارتفـاع از بـنچ مارک اصلی به بنچ مارک‌های دیگر از طریق ترازیابی هندسی توسط دستگاه ترازیاب (نیـو) صـورت می‌گیرد و مقدار خطای بست شبکه ترازیابی از طریق فرمول (فرمول ۵۱-۴) محاسبه می‌شود.

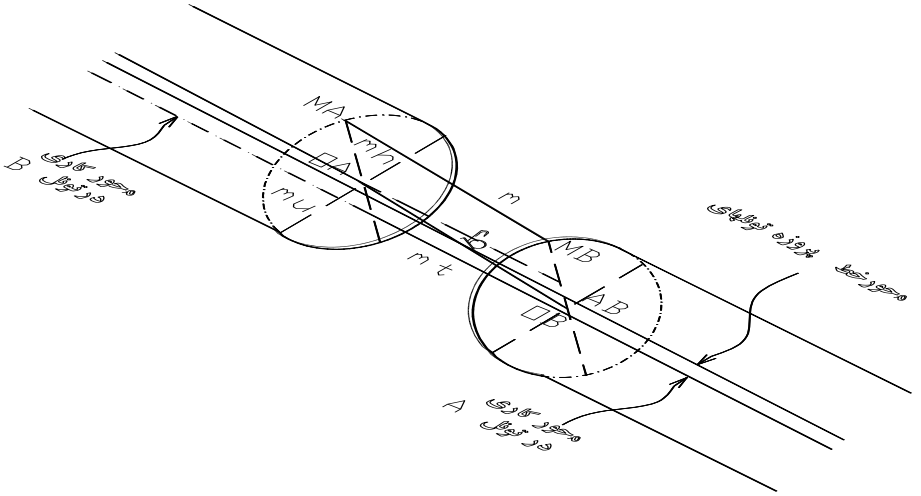
$$f_h = \pm 2мм\sqrt{n} \qquad \text{(فرمول ۵۱-۴)}$$

در اینجا مقدار n برابر با تعداد استقرار سه‌پایه‌های دوربین ترازیاب و یا نیو در مسیر ترازیابی می‌باشند.

حفاری تونل از دو جبهه کاری

برای سرعت عمل در کار ساخت پروژه تونل همیشه از دو طرف مسیر پروفیل پروژه حفاری تونل را شروع می‌کنند و یکی از وظایف اصلی کارشناسان ژئودوزی تونل و مترو در پروژه‌های ساخت و اجرا شبکه زیر زمینی تونل‌های مترو تلاقی و به هم رسانیدن دو سر مسیر حفاری تونل از دو طرف با کمترین خطاء می‌باشد، مقدار اندازه مجاز خطای تلاقی تونل‌ها بستگی به نوع استفاده و کاربرد سازه تونل دارد، بطور مثال برای تونل‌های مورد استفاده در شبکه زیر زمینی مترو مقدار مجاز خطای «تلاقی تونل‌ها» بستگی به مقدار «فضای زاپاس» در داخل تونل هم دارد در (تصویر ۱۵–۴) مقدار متوسط اندازه و حد مجاز خطای متوسط مربع «تلاقی تونل» پروفیل مسیر تونل که تقریباً برابر با ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

(تصویر ۱۵–۴)



در (تصویر ۱۵–۴) خطاهای که در تلاقی دو مسیر تونل مؤثرند را به شرح زیر نشان داده شده است:

– خطاء تلاقی تونل‌های A و B (در عرض تونل) خطاء جانبی است که با mu نشان داده است.

– خطاء تلاقی تونل‌های A و B (در طول محور تونل) که با mt نشان داده است.

– خطاء تلاقی تونل‌های A و B (در ارتفاع محور تونل) که با mh نشان داده است.

طبق استانداردهای دولت فدرال روسیه برای حفاری مسیر یک تونل از دو طرف مقدار اندازه واگرائی تونل‌ها (مقدار اختلاف اندازه به هم نرسیدن محور تونل از دو طرف مسیر) نباید بیش از ۱۰۰ میلی‌متر باشد، البته سؤال پیش می‌آید چه قسمتی از این اندازه ۱۰۰ میلی‌متر را می‌توان برای محاسبه دقت خطائی کار ژئودوزی در نظر گرفت؟

برای جواب به این سؤال دو نظر وجود دارد:

۱. لازم است مقدار اندازه خطای مونتاژ و نصب سگمنت‌ها را در محور تونل و همچنین مقدار اندازه تغییر رینگ‌های مونتاژ شده از مقدار فرم اندازه اصلی (پروژه) رینگ‌ها محاسبه شوند.
۲. مقدار اندازه همه این خطاها مشخص و معلوم می‌باشند، تمام این مقدار اندازه خطاها را می‌توان در هنگام تلاقی دو محور تونل محاسبه کرد، همگی این خطاها را می‌توان در اندازه‌گیری‌های شبکه‌های نقشه‌برداری تعیین کرد.

البته هر دو موضوع بالا تقریباً نتیجه‌ای مشابه نسبت به همدیگر به صورت زیر دارند: در نتیجه مقدار اندازه «متوسط مربع خطای اندازه‌گیری‌ها» در سطح (مختصات X,Y) نباید از ۵۰mm–۴۵ میلی‌متر افزایش یابد.

در اتصال محور دو تونل مقدار اندازه «متوسط مربع خطای اندازه‌گیری‌ها» در ارتفاع نباید از مقدار mm ۲۲–۲۰ میلی‌متر می‌باشد.

روش دیگری را جهت رسیدن به نتایج دقیق ژئودوزی بررسی می‌کنیم که در آن مقدار اندازه متوسط مربع خطای اندازه‌گیری‌های را می‌توان از طریق (فرمول ۵۲–۴) به دست آورد.

$$D = txm$$ (فرمول ۵۲–۴)

در (فرمول ۵۲–۴) D مقدار واگرای تونل‌های مترو و t تعداد مراحل اندازه‌گیری شبکه‌های نقشه‌برداری و m مقدار خطای متوسط مربع تلاقی محور تونل‌ها می‌باشد) کارشناسان نقشه‌برداری در دو مرحله این شبکه‌ها را اندازه‌گیری و کنترل می‌کنند (منظور زوایا و اندازه طول‌ها در شبکه‌های پیمایش و ترازیابی و در مراحل اندازه‌گیری بیشترین مدت زمان اندازه‌گیری‌ها نباید بیش از یک ماه فاصله در میان آن‌ها باشد بنابراین مقدار زمان اندازه‌گیری برابر با $t = 2$ (t تعداد مرحله اندازه‌گیری شبکه‌های نقشه‌برداری) در نظر می‌گیرند و اگر مقدار واگرائی تونل‌ها (انحراف از محور تونل در هنگام تلاقی) $D = 100mm$ میلی‌متر باشد مقدار اندازه خطای متوسط مربع برابر با $(m = \frac{D}{2}) \le 50mm$ می‌باشد.

لازم به ذکر است در هنگام ساخت و مونتاژ تونل‌های با محور مستقیم مقدار اندازه خطاء در طول محور تونل به مقدار ناچیزی می‌باشد، بنابراین تمامی مقدار اندازه خطاء m را می‌توان به خطاهای جانبی mU ساخت تونل‌ها ربط داد.

در اجرا ساخت و ساز تونل‌های مترو به شکل قوس‌دار هر دو خطاها، خطاء در طول محور تونل m و خطاء جانبی محور تونل mU را باید در نظر گرفت اغلب اوقات در حین حفاری و هنگام تلاقی تونل‌ها و اتصال محور آن‌ها به هم دیگر اتصال رأس محور تونل با مقدار خطای همراه می‌باشد که این خطاء ناشی از خطای دقت عمل کارکرد کارشناسان نقشه‌برداری تونل و مترو و خطای ساخت و مونتاژ سگمنت‌های (اعوجاج سگمنت‌ها) در کارخانه مونتاژ این قطعات و همچنین خطای که در هنگام مونتاژ و ساختن دیواره داخلی تونل که به صورت حلقه‌های بتونی (رینگ) توسط دستگاه T.B.M صورت می‌گیرد می‌باشند که در این مرحله‌ای نصب احتمال بروز خطاها زیاد می‌گردد که به مجموعه کل این خطاها، خطای «تلاقی تونل» می‌گویند.

تعیین مقدار اندازه خطاء تلاقی محور تونل

برای تعیین مقدار خطاهای نقشه‌برداری و خطای تلاقی به هم رسیدن تونل‌ها به همدیگر کل خطاهای موجود را به شرح زیر در نظر می‌گیرند:

–m1 متوسط مربع خطا در شبکه (مثلث‌بندی و یا پیمایش) در سطح زمین.

–m2 متوسط مربع خطا در انتقال مختصات از نقاط ثابت سطح زمین به درون تونل از طریق چاهA.

–m3 متوسط مربع خطا در انتقال مختصات از نقاط ثابت سطح زمین به درون تونل از طریق چاه B.

– m4 متوسط مربع خطا در پیمایش در زیر زمین از سمت چاه شماره A تا محل تلاقی تونل‌ها.

– m5 متوسط مربع خطا در پیمایش در زیر زمین از سمت چاه شماره B تا محل تلاقی تونل‌ها.

در کل مجموع خطاها نقشه‌برداری در اجرا و در هنگام تلاقی و به هم رسیدن دو تونل از طریق فرمول (فرمول ۵۳–۴) معلوم می‌گردد.

$$m \le m_5^2 + m_4^2 + m_3^2 + m_2^2 + m_1^2 \qquad \text{(فرمول ۵۳–۴)}$$

برای تونل‌های با طول متوسط 1-1.5km کیلومتر مقدار خطاهای در (فرمول ۵۴-۴) را می‌توان به صورت مساوی نشان داد، و خطا متوسط مربع تلاقی رسیدن تونل‌ها را از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$mc = m1 = m2 = m3 = m4 = m5 = m / \sqrt{5} = 0.45m \qquad \text{(فرمول ۵۴-۴)}$$

اگر مقدار خطای تلاقی و اتصال محور تونل‌ها را برابر با $m = 50mm$ در نظر بگیریم آن وقت خطائی متوسط مربع برابر با $mc = \pm 22.5mm$ می‌گردد.

اگر طول مسیر پروژه را با اندازه طول (T) کیلومتر در نظر بگیریم برای اندازه‌گیری‌های خطای تونل‌های بیش از طول (T>1.5 km) کیلومتر مقدار اندازه خطاها با روش بالا متفاوت می‌گردد و از روش‌های دیگری برای تعیین خطاء استفاده می‌شود و در اینجا نمی‌توان مقدار اندازه خطاها را با هم برابر گرفت و برای هر اندازه‌گیری خطای مربوط به خودش را باید در نظر گرفت.

محاسبه خطاهای اندازه‌گیری که در رسیدن و اتصال محور تونل به صورت جداگانه و با (فرمول ۵۵-۴) شرح زیر محاسبه می‌گردند:

$$m1 = 0.7X \times mC, m2 = m3 = 2.5 \times mC, m4 = m5 = mC \qquad \text{(فرمول ۵۵-۴)}$$

(در محاسبات حل مسائل سرشکنی کردن خطاها در ژئودوزی نمی‌توان مقدار اندازه خطاها را با هم برابر گرفت و برای هر اندازه‌گیری خطای مربوط به خودش را باید در نظر گرفت).

اگر مقدار اندازه خطاها متناسب با (فرمول ۵۶-۴) باشد آن وقت مقدار اندازه متوسط مربع خطا تلاقی محور تونل به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

(فرمول ۵۶-۴)

$$m = \sqrt{(0.7 \times \mu_C)^2 + (2.5 \times \mu_C)^2 + (2.5 \times \mu_C)^2 + \mu_C \times \mu_C} = \sqrt{1.5} \times mC$$

از طریق (فرمول ۵۷-۴) استفاده می‌شود. mC و برای تعیین مقدار اندازه

$$mC = 0.26 \times m \qquad \text{(فرمول ۵۷-۴)}$$

با توجه به مقدار اندازه خطای تلاقی محور تونل که برابر با ۵۰ میلی‌متر باشد که این مقدار را در (فرمول ۵۷-۴) جایگذاری کرده و نتیجه خطاء شبکه نقشه‌برداری برابر با $mC = 13mm$

$$mC = 0.26 \times 50 = 13mm.$$

تعیین مقدار خطای تلاقی محور تونل با انتقال مختصات از طریق پارتال (پیشانی تونل)

هنگامی حفاری تونل از طریق پارتال (پیشانی) صورت می‌گیرد در این حالت خطاهای انتقال نقاط از طریق چاه‌ها وجود ندارند m2 , m3 آن وقت خطای متوسط مربع از طریق فرمول (فرمول ۵۸-۴) محاسبه می‌شود.

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_4^2 + m_5^2}$$ (فرمول ۵۸-۴)

اگر مقدار خطای شبکه‌های نقشه‌برداری در سطح زمین (m1) و خطائی انتقال نقاط مختصات از سطح زمین به زیر سطح زمین (m4,m5) با هم برابر در نظر بگیریم آن وقت مقدار خطای متوسط مربع را به صورت زیر می‌توان تعیین کرد:

$$mc = m/\sqrt{3} = 0.58 \approx 0.6m \quad mc = 0.6 \times m = 30mm$$ (فرمول ۵۹-۴)

البته خطاهای دیگری هم که باعث هم‌محور نشدن یا متصل شدن دو تونل به همدیگر نمی‌شوند به شرح زیر توضیح داده شده است:

- هم‌مرکز نشدن محور رینگ‌های مونتاژ شده (مقاطع دایره‌ای).
- انحراف محور رینگ‌ها (مقاطع دایره‌ای) از فرم اصلی در هنگام مونتاژ شدن در داخل تونل.
- دفرمه شدن مقاطع دایره‌ای (رینگ‌ها) در هنگام مونتاژ در داخل تونل از فرم اصلی پروژه.
- انحراف رینگ‌ها (مقاطع دایره‌ای) پس از مونتاژ بر اثر فشار و تنشی که از سوی لایه‌های زمین بر دیواره و سقف تونل وارد می‌گردد.
- ساخت و نصب نادرست سگمنت‌ها در داخل تونل در هنگام مونتاژ کردن آن‌ها.
- اعوجاج سگمنت رینگ‌ها (مقاطع دایره‌ای)

عملیات ژئودوزی برای هدایت صحیح دستگاه T.B.M

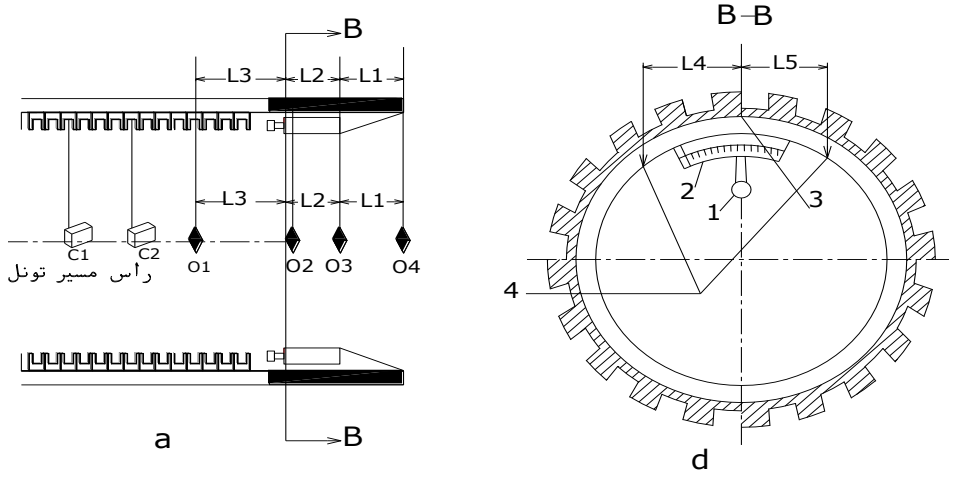
یکی از مشکلاتی که در حفاری تونل‌های مترو با دستگاه حفار T.B.M به وجود می‌آید خطای انحراف حرکت دستگاه از مسیر در نظر گرفته و یا همان خط پروژه می‌باشد، در هنگام حفاری مسیر پروفیل تونل با دستگاه حفار T.B.M همزمان قطعات سگمنت بتونی و یا فولادی را طبق پروژه ساخت تونل در جای خود قرار می‌دهد که از مجموعه آن‌ها حلقه داخلی دیواره تونل (رینگ‌ها) به وجود می‌آیند، موقعیت حلقه‌های مونتاژ شده از نظر ارتفاع و مکانی بستگی به موقعیت دستگاه T.B.M دارند، بنابراین کارشناسان نقشه‌برداری پروژه باید حتماً دستگاه T.B.M را طبق خط پروژه در مسیر پروفیل تونل هدایت کنند و ماکزیمم خطای انحراف (خطای جابجایی در عرض و ارتفاع) تونل از مسیر محور خط پروژه تونل نباید بیشتر از ۵۰ میلی‌متر باشد.

کارشناسان نقشه‌برداری در پروژه‌های ساخت و اجرا شبکه‌های زیر زمینی مترو وظایف و مسئولیت‌های سختی بر عهده دارند آنان با استفاده کنترل مضاعف گسترش شبکه‌های مسطحاتی و ارتفاعی از سطح زمین تا پشت دستگاه حفار T.B.M می‌آورند و سپس انتقال این مختصات را به ایستگاه‌های ثبتی نصب شده در روی دستگاه حفار T.B.M انجام می‌دهند.

کنترل هندسی محور تونل‌های مترو و هدایت دستگاه تی بی ام را با استفاده از شبکه‌های نقشه‌برداری در روی سطح زمین و انتقال مختصات نقاط این شبکه‌ها را به زیر زمین برای هدایت درست و صحیح دستگاه T.B.M یکی از مهمترین عملیات حفاری مکانیزه تونل می‌باشد.

کارشناسان نقشه‌برداری با وسایل و ابزار نقشه‌برداری مختصات نقاط شبکه پیمایش موجود در زیر زمین را به مختصات و نشانه‌های و ایستگاه‌های که در روی سازه تونل نصب گردیده انتقال می‌دهند و هر بار با حرکت دستگاه تی بی ام به سمت جلو و سینه کار (بعد از هر گام) موقعیت مکانی و وضعیت دستگاه T.B.M از نوع دوباره تعیین و معلوم می‌گردانند.

(تصویر ۱۶-۴)



در (تصویرa,۱۶-۴) علامات ژئودوزی را در روی دستگاه حفار T.B.M به شرح زیر نشان توضیح داده شده است:

۱. سیستم اندازه‌گیری اپتیکی دستگاه T.B.M.

۲. خط کش کمانی شکل.

۳. تعداد سه عدد نشانه برای تعیین مسیر و امتداد صحیح دستگاه T.B.M.

۴. مارک (نشانه‌های نقشه‌برداری) برای تعیین انحراف دستگاه حفار به سمت چپ و راست، دو نشانه‌ای که در مرکز رأس تونل قرار می‌دهند و به آن‌ها مختصات شبکه پیمایش زیرزمینی را منتقل می‌کنند. (نقاط C1 و C2 تصویر a ,۱۶-۴) و به این نشانه‌ها به اندازه کافی نور می‌تابند که از میدان (محل) کوچکی که در داخل دستگاه T.B.M وجود دارد این نقاط به وضوح برای کارشناسان نقشه‌برداری قابل مشاهده باشند و در روی این میدان (محل) تمامی وسایل کار نقشه‌برداران مانند دستگاه‌های اپتیکی برای هدایت دستگاه T.B.M قرار می‌دهند و در (تصویر d ,۱۶-۴) علامت شماره ۱ سیستم اپتیکی دستگاه هدایت T.B.M می‌باشد و در (تصویر d ,۱۶-۴) علامت شماره ۲ خط کش کمانی قرار دارد در (تصویر d ,۱۶-۴) علامت شماره ۳ برای کنترل و قرار گرفتن رأس دستگاه T.B.M با رأس طولی تونل. در (تصویر d ,۱۶-۴) علامت شماره ۴ دو نشانه (علامات نقشه‌برداری) می‌باشند که در روی بدنه تونل جهت کنترل موقعیت افقی تونل نصب

گردیده‌اند. تمامی این ابزارها برای تصحیح مسیر دستگاه حفار T.B.M و انحراف از مسیر رأس پروفیل تونل می‌باشند و حتماً باید اندازه‌گیری تمامی ابعاد هندسی شکل تونل هم صورت گیرد، در (تصویر ۱۶, d–۴) صفر خط کش کمانی دستگاه با رأس عمودی دستگاه T.B.M برهم منطبق می‌گردند، برای تعیین انحراف رأس مسیر پروفیل دستگاه T.B.M از پروفیل محور مسیر تونل باید تلسکوپ دستگاه اپتیکی را به سمت راست و سمت چپ جابجا کنند تا جایی که امتداد شعاع نوری بر دو نشانه و بر امتداد سیگنال‌ها (نشانه‌ها) دستگاه حفار T.B.M منطبق شوند آن وقت می‌توان مقدار خطای انحراف دستگاه ماشین حفار را مشخص و تعیین کرد، مقدار انحراف دستگاه T.B.M با توجه به نصب نشانه‌های O2 و O3 در (تصویر ۱۶, a–۴) که در روی صفحه حلقه آب‌بندی دستگاه حفار نصب گردیده‌اند را می‌توان به دست آورد.

مقدار انحراف دستگاه T.B.M در سطح صفحه برش و انتهای دستگاه حفار (نقاط O1, O4 در قسمت a در (تصویر ۱۶, d–۴) از طریق (فرمول ۶۰–۴) به دست می‌آیند:

(فرمول ۶۰–۴)

$$X1 = X2 + (X2 - X3)L3/L2 \quad \text{و} \quad X4 = X3 + (X3 - X2)L1/L3$$

در اینجا (X2 و X3) مقدار انحراف در قسمت بالای دستگاه می‌باشد و L1, L2, L3 مقدار اندازه مشخص قسمت برش عرضی رأس دستگاه حفار T.B.M می‌باشد.

البته در بعضی جاها برای سرعت بخشیدن در پیشرفت ساخت سازه تونل و برای تعیین موقعیت دستگاه T.B.M بجایی سیستم اپتیکی از سیستم‌های لیزری هم استفاده می‌گردد این سیستم‌ها امکان قراول روی در فاصله زیاد و در شرایط نامطلوب دید کم و کمبود روشنایی در زیر زمین را به صورت مناسبی مهیاء می‌کنند. عملکرد سیستم لیزر در تعیین موقعیت صحیح دستگاه حفار قابل مقایسه با دیگر روش‌ها نمی‌باشد و از کار کرد و کیفیت بالاتری نسبت به سیستم‌ها دیگر برخوردار است، استفاده از سیستم لیزر برای کنترل مسیر حفار دستگاه T.B.M با استفاده از یک دسته اشعه لیزر و دو نشانه انجام می‌گیرد. بدین ترتیب مولد سیستم لیزر را در فاصله‌ای در پشت دستگاه T.B.M قرار گرفته و از طریق آن یک دسته اشعه لیزر را در امتداد مسیر از قبل تعیین شده بر روی دو مارک (نشانه) که بر روی ماشین دستگاه T.B.M به فاصله ۱,۲ متر تا ۳ متر نصب شده‌اند می‌تابانند، از آنجا که اشعه لیزر باید همواره بر نقاط معینی بتابد بدین علت این دو

نشانه را در امتداد خطی به موازات محور ماشین و به فاصله ۱,۲ تا ۳ متری نصب می‌کنند، اشعه لیزر با تابیدن بر نقاط ذکر شده لکه قرمزی ایجاد می‌کند که به آسانی می‌توان دریافت که آیا ماشین در مسیر مورد نظر از پیش تعیین شده حرکت می‌کند یا خیر و انحراف از پروژه مستقیم دارد بدیهی است پس از مقداری پیشروی باید مولد لیزر را به نقطه جدیدی منتقل کرد.

البته با پیشرفت تکنولوژی کار حفاری تونل هم آسان‌تر گشته است هم‌اکنون برای جلوگیری از انحراف تونل از خط پروژه و کنترل هندسی مسیر حفاری تونل از دستگاه پی پی اس (P.P.S) کمک می‌گیرند این دستگاه برای ایجاد حداکثر اطلاعات مختصات مورد نیاز در ماشین‌های حفاری T.B.M طراحی و ساخته شده است با این دستگاه می‌توان به طور اتوماتیک موقعیت دقیق و میزان رانش دستگاه حفاری T.B.M را در یک فضایی سه بعدی به دست آورد و در روی صفحه نمایشی که در جلوی اپراتور دستگاه تی بی ام نصب گردیده شده است به صورت اتومات نشان داده می‌گردد و در صورت دیدن این انحراف‌ها اپراتور مربوطه این مقادیر را بر طرف کرده و به صفر می‌رساند و اپراتور با کمک دستگاه پی پی اس (P.P.S) به راحتی می‌تواند حرکت دستگاه را نسبت به خط پروژه تصحیح بکند.

از دستگاه پی پی اس (P.P.S) می‌توان در پروژه اجرا تونل‌های که با قطعات سگمنت ساخته می‌شوند استفاده کرد در اینجا دستگاه پی پی اس با بهترین گزینه چیدمان سگمنت‌ها را در یک تونل محاسبه می‌کند.

فصل پنجم:

نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی

نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی

سازه‌های زیر زمینی بخصوص شبکه تونل‌های متروی شهری برای هر کشور و هر شهری سرمایه بزرگی شناخته می‌شوند و ساخت و مونتاژ و اتمام چنین پروژه‌های بزرگی همیشه هزینه‌های زیاد و سرسام‌آوری بر بودجه دولت‌ها تحمیل می‌گرداند بازدهی سرمایه و برگشت هزینه‌های مصرف شده برای خزانه دولت‌ها خیلی مهم و حیاتی می‌باشد، بنابراین همیشه سعی می‌گردد که مدت بازدهی سرمایه برای پروژه‌های با این عظمت و گرانقیمت بودن مدت زمانی طولانی داشته باشند که در کشورهای غربی این مدت زمان در حدود تقریباً ۱۵۰–۱۰۰ سال در نظر گرفته می‌شود و در این مدت کارشناسان باید شرایط اطمینان و امنیت پروژه جهت استفاده برای عموم مردم را محیاء گردانند.

بطور کلی تجربه نشان داده است که در ۱۰ سال اول بهره‌وری و استفاده از شبکه‌های زیرزمینی مترو هیچگونه اتفاقی جدی برای سازه پروژه به وجود نمی‌آید، بعد از مدت زمان ۲۵– ۱۵ سال استفاده و بهره‌وری از سیستم شبکه‌ای زیرزمینی مترو و بررسی تمام مدت توسط کارشناسان این امور یکسری مشکلات در سازه پروژه گزارش گردیده است و بهره‌وری از سیستم شبکه مترو بعد از گذشت مدت زمان ۷۰–۵۰ سال با کنترل سازه توسط کارشناسان امور گزارش‌های بدین شرح اعلام کرده‌اند:

۱. گزارش مبنی بر خرابی در هنگام اجرا کردن ناصحیح در سازه پروژه شبکه مترو مشاهده گردیده است.

۲. گزارش بروز و دیده شدن مصالح نامرغوب مصرف شده در هنگام اجرا کردن پروژه تونل.

۳. گزارش مبنی بر تغییراتی در لایه‌های زمین و خاک احاطه شده در محدوده پروفیل مسیر تونل‌های ساخته شده در زیر زمین.

۴. گزارش مبنی بر اینکه در مدت زمان بهره‌برداری طولانی از شبکه زیر زمینی مترو در بعضی از قسمت‌های سازه آن تغییراتی به وجود می‌آید که ناشی از فضای خالی مابین بدنه خارجی تونل و محیط اطرافش در حین مونتاژ و ساخت سازه تونل‌ها می‌باشد.

۵. حفاری و خاک‌برداری به جهت اجرا پروژه سازه تونل در لایه‌های خاکی زمین که باعث به هم خوردن تعادل لایه‌های زمین و به وجود آمدن دفرمه شدن و جابجایی نشست‌های نامتقارن سازه تونل باعث می‌گردد.

علت‌های نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی

در حقیقت مشکلی که برای کارشناسان در حین طراحی تونل‌های مترو به وجود می‌آید در این است که تقریباً اکثراً شهرهای بزرگ و کوچک از دوران گذشته در روی مناطق آبرفتی و خاک‌های رسی ساخته گردیده‌اند و این شاید به علت وجود نیاز ساکنین این شهرها به آب دسترسی و نزدیکی به محل شرب رودخانه‌ها و زمین‌های حاصلخیز می‌باشد، طبعاً طراحی و ساخت و مونتاژ سازه‌های زیر زمینی باید در زمین‌ها و مناطقی با مشکلاتی از نظر زمین‌شناسی لایه‌های خاک برای اجرا ساخت چنین سازه‌ها صورت بگیرد، شبکه ساخت و اجرا تونل‌های مترو در زمین‌های سست و آبرفتی در اثر وقوع زلزله بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند چون خاک رس در مقایسه با سازه اجرا شده تونل‌ها صلب می‌باشد بنابراین در محدوده شبکه تونل‌های ساخت شده مترو در صورت به وجود آمدن زلزله باعث حرکت و جابجایی خاک می‌گردد و سازه تونل‌ها همراه با خاک حرکت و جابجا می‌شود و این حرکت و جابجایی باعث به وجود آمدن تخریب و نشست و دفرمه شدن سازه‌های تونل‌های مترو می‌گردد.

در بیشتر اوقات جابجایی لایه‌های زمین در محدوده تونل‌های مترو باعث نشست و جابجایی لایه‌های روی خاک سطح زمین می‌گردد که در محله‌های مسکونی اغلب همراه با تخریب منازل مسکونی سکنه این محل‌ها و سیستم‌های شبکه تأسیسات شهری می‌گردد.

عوامل دیگری هم در طبیعت وجود دارند که بر سازه تونل‌های شبکه مترو اثر تخریبی زیادی بر جا می‌گذارند مثل ساخت و اجرا شبکه تونل‌های مترو زیر زمینی در مناطق زلزله‌خیز و دارای گسل که مشاهده چنین تخریب‌های در مناطق زلزله‌خیز جهان بسیار دیده شده است، در اکثر

شهرهای بزرگ کشور ما ایران شبکه متروی در حال طراحی و ساخت و یا در حال بهره‌برداری در روی مناطقی زلزله‌خیز و دارای گسل‌های خطرناک ساخته می‌شوند (البته گسلش از ویژگی‌های زلزله به شمار نمی‌رود اما در حقیقت عامل ایجاد کنند زلزله‌ها می‌باشند).

یکی از عواملی که می‌تواند در روی شبکه‌های زیرزمینی ریلی اثر تخریبی بگذارد اثر حرکات تکتونیکی صفحات زمین است بر اساس تئوری صفحه زمین ساخت (زمین‌ساخت صفحه‌ای یا تکتونیک صفحه‌ای به بررسی و مطالعه حرکات وسیع‌مقیاس در سنگ‌کُره که در زبان انگلیسی لیتوسفرکره زمین نامیده می‌شود می‌پردازد، این نظریه بر اساس نظریه رانش قاره‌ای در نخستین دهه‌های قرن بیستم مطرح شد و پس از اثبات مفهوم گسترش بستر دریا در سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ میلادی توسط بسیاری از زمین شناسان پذیرفته شده است) پوسته خارجی صلب زمین (لیتوسفر) به تکه‌های متعددی شکسته شده است که هرکدام از آن‌ها صفحه نام دارند و این صفحه‌ها همیشه در حال حرکت و جابجایی بوده و به صورت بی‌وقفه تغییر شکل و اندازه می‌دهند و جابجایی و حرکات این صفحه‌ها باعث وقوع زلزله‌ها می‌گردند و همچنین امکان حرکت گسل‌ها را با خود به همراه دارند و این حرکت گسل‌ها در مسیر تقاطع با تونل‌های شبکه مترو باعث تخریب آن‌ها می‌گردند، بنابراین توجه به پدیده گسلش در هنگام طراحی ژنرال پلان شبکه تونل‌های مترو از اهمیت بالای در امنیت سازه تونل‌ها برخوردار می‌باشد و محکم سازی سازه‌های زیرزمینی هیچ کمکی در این زمینه نمی‌کند فقط برای این منظور توسط کارشناسان امور مربوطه در حین طراحی سعی می‌گردد که در مسیر پروفیل تونل برخوردی با گسل‌ها موجود در منطقه طراحی شبکه آینده مترو صورت نگیرد، البته روش‌های دیگری هم وجود دارد که باعث تخریب کمتر سازه‌های زیر زمینی تونل‌های شبکه مترو در هنگام حرکت و جابجایی و برخورد با گسل‌ها می‌توان انجام داد که ادامه و توضیح دادن به این موضع ملال‌آور و از بحث و موضوع این کتاب خارج می‌باشد.

در هنگام اجرا پروژه‌های سازه‌های زیر زمینی بخصوص در موقع عملیات خاک‌برداری و زهکشی و منجمد کردن آب‌های زیرزمینی در مسیر پروژه پروفیل تونل احتمال جابجایی و حرکت کردن لایه‌های زمین در زمین‌های که از نظر زمین‌شناسی مشکل‌ساز می‌باشند وجود دارد بخصوص در مناطقی که با خاصیت خاک‌های سست و رسی و سنگ‌های هوازده می‌باشند این حفاری و جابجایی لایه‌های زمین در هنگام اجرا پروژه پروفیل سازه تونل و بعد از اتمام ساخت سازه‌های

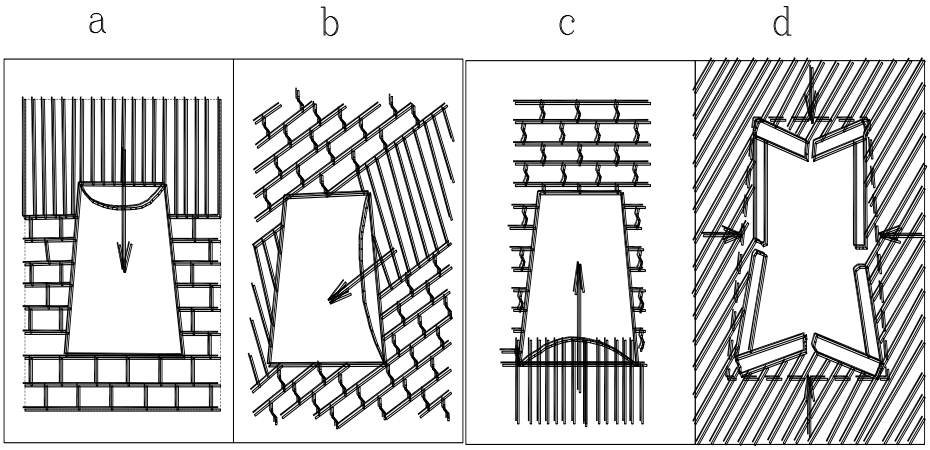
زیرزمینی فشار زیادی بر سازه ساخته شده بخصوص بر دیواره و سقف تونل و تنش‌های افقی و قائم وارد می‌کنند و این قسمت‌های دیواره و سقف تونل سازه همیشه تحت فشار و تنش زیاد لایه‌های زمین قرار دارند.

فشار و تنش لایه‌های زمین در قسمت‌های خاص سازه تونل به شرح زیر اثر می‌گذارد:

- دفرمه شدن و نشست طاق و سقف سازه تونل.
- دفرمه و نشست دیواره‌های تونل.
- جابجایی دیواره‌های تونل در سطح افق.
- نشست کف سازه تونل.
- پیچیدگی تکیه‌گاه‌های سازه تونل.

حتی دیده شده است که در زمین‌های با شرایط نامناسب ژئوتکنیکی بقدری فشار و تنش بر سازه تونل وارد می‌گردد که گاهی اوقات باعث تخریب و خرد شدن سازه تونل می‌گردد در (تصویر ۱–۵) انواع فشار در روی سازه بدنه تونل را نشان می‌دهد.

(تصویر ۱–۵)



در تصویر بالا انواع فشارها بر بدنه تونل به شرح زیر می‌باشند:

- a فشار لایه‌های زمین به صورت عمودی بر سقف تونل.
- b فشار لایه‌های زمین به صورت جانبی بر بدنه دیواره تونل.
- c فشار لایه‌های زمین به صورت قائم از زیر سطح زیرین بر کف تونل.
- d فشار لایه‌های زمین از چهار طرف بر بدنه تونل.

بررسی نشست و دفرمه شدن سازه‌های زیرزمینی

برای پیشگیری و جلوگیری از نشست و تخریب سازه تونل‌های مترو و همچنین به منظور تأمین امنیت شبکه زیر زمینی تونل‌های مترو لازم است که در تمامی مدت بهره‌برداری موقعیت شرایط ساخت سازه تونل مورد بررسی و کنترل احتمالی نشست و دفرمه شدن سازه تونل صورت گیرد.

یکی از نکات مهمی که باید مورد بررسی کارشناسان امور قرار گیرد کنترل دیواره‌ها و کف و سقف سازه تونل می‌باشد و شروع این بررسی نشست و دفرمه شدن را از وقتی صورت می‌گیرد که سازه تونل در دست احداث می‌باشد و تا پایان ساخت پروژه سازه باید ادامه داشته باشد در صورتی کار کنترل و بررسی نشست سازه تونل به پایان می‌پذیرد که هیچ گونه حرکت و جابجایی و نشست در ارتفاع و در سطح سازه ساخته شده تونل‌ها دیده نشود. در پروژه‌های که در آن سازه‌های زیر زمینی در مکان‌های که از نظر زمین‌شناسی برای حفاری مسیر پروژه تونل دردسرساز و مناسب نمی‌باشند و تنش‌ها و فشارهای زیادی از سوی لایه‌های زمین بر دیواره و سقف تونل وارد می‌گردد که در نتیجه باعث به وجود آمدن نشست و دفرمه شدن سازه تونل را ممکن می‌شود.

اندازه‌گیری و تعیین مقدار نشست سازه‌های زیرزمینی

بنابراین برای مشخص شدن مقدار اندازه نشست و دفرمه شدن سازه تونل اندازه‌گیری‌های توسط کارشناسان ژئودوزی در هنگام اجرا و مونتاژ سازه تونل تا اتمام و پایان اجرا پروژه صورت می‌گیرد و این اندازه‌گیری‌ها همچنین پس از اتمام ساخت و اجرا پروژه و در حین بهره‌برداری

شبکه تونل‌های مترو توسط دستگاه‌های ترازیاب و با استفاده از شبکه ترازیابی موجود در داخل شبکه تونل‌ها و همچنین توسط رپرهای (نشانه‌های ارتفاعی ترازیابی) که در محل‌های خود نصب گردیده‌اند ادامه باید داشته باشند. برای تعیین اندازه نشست عمودی سازه (در ارتفاع) از روش ترازیابی با سیکل‌های مشخص و همیشگی بر روی نقاط تحت‌الارضی تونل‌ها و گالری‌ها که در محل‌های (نقاط اصلی و رفرانس سقفی یا کفی) که از قبل در دیواره و کف تونل نصب شده‌اند انجام می‌گیرد.

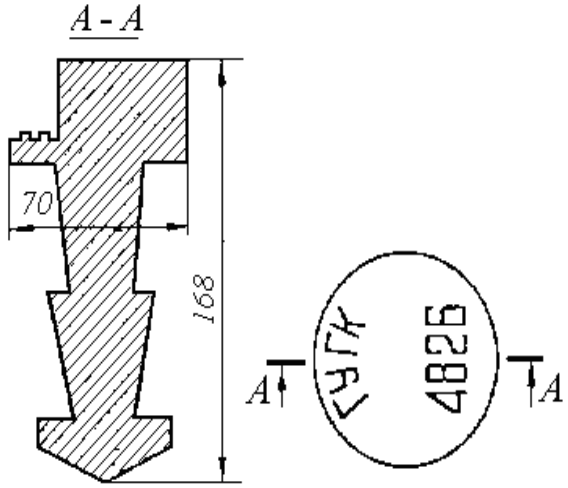
همیشه از نقاط اصلی شبکه ارتفاعی زیر زمین (که ارتفاع آن‌ها از نقاط روی زمین یا سطح‌الارضی به زیر زمین و یا تحت‌الارضی انتقال داده شده است) نقاط ثابت رپرهای که در داخل شبکه تونل کار گذاشته شده‌اند را اندازه‌گیری می‌کنند، همیشه مکان‌های از سازه تونل که بیشتر تحت تأثیر نشست و دفرمه شدن قرار می‌گیرند مانند کف و دیواره تونل و قسمت طاق تونل توسط کارشناسان نقشه‌برداری با کمک رپرهای (نشانه‌ها) که از قبل در مکان‌های مناسب نصب شده‌اند و با کمک دستگاه‌های نقشه‌برداری دقت بالا در سیکل‌های مختلف ترازیابی و پیمایش می‌شوند و این بررسی و اندازه‌گیری‌ها را با نرم‌افزارهای و برنامه‌های خاص و محاسبه و ترسیم نمودار می‌کنند و در سیکل‌های متفاوت این نمودارهای را باهم مقایسه می‌کنند و از مقایسه این نمودارها کارشناسان می‌توانند پی به نشست، دفرمه و یا جابجایی سازه پروژه شوند.

همیشه برای نصب نقاط ثابت و نشانه‌های که باید در داخل تونل‌های مترو کار گذاشته می‌شوند رعایت یکسری نکات باید انجام شود که در آینده به مشکل برخورد نشود و باید به صورتی آن‌ها را در محل‌های مناسب کار گذاشت که کارشناسان نقشه‌برداری بتوانند با استقرار دستگاه ترازیاب (نیو) در روی یک ایستگاه تعداد زیادی نقاط را توسط شاخص مدرج برداشت کنند.

اگر در سازه تونل نقاط رپر (نشانه) به تعداد کمی نصب گردیده شده باشد لازم است که نقاط کمکی بیشتری نصب گردد که با نقاط اصلی بطور همراه و همگام قرائت و برداشت شوند.

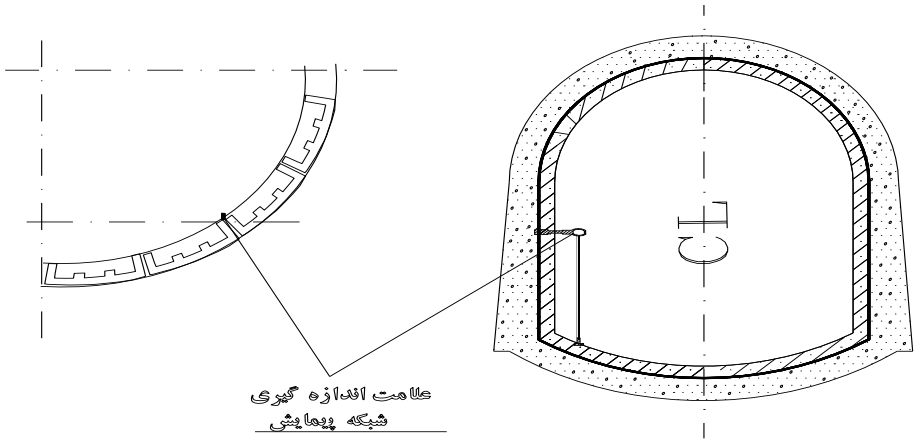
در (تصویر ۲–۵) رپر (نشانه) که جهت ترازیابی در داخل تونل و در پوشش بدنه تونل نصب می‌گردد نشان داده شده است.

(تصویر ۲–۵)



برای کنترل و بررسی نزدیک شدن دیوارهای بتونی تونل (مقطع تونل) می‌توان از متر انوار و یا متر لیزری از نقاط مشخصی (رپر و نشانه) که در امتداد قطر اصلی سازه تونل در مقابل هم دیگر و تقریباً در یک ارتفاع و سطح مساوی نصب گردیده‌اند اندازه‌گیری را انجام داد. کارشناسان باید این نکته را در نظر بگیرند که تعیین و بررسی نشست سازه تونل و زمان انجام و تعداد سیکل‌های ترازیابی که باید صورت بگیرد نسبت کامل به مقدار فشار و شدت لایه‌های زمین بر دیواره و سقف سازه تونل دارد و هر چه این فشارها بیشتر باشد سیکل‌های اندازه‌گیری‌ها و ترازیابی‌ها هم نیز بیشتر می‌گردند. اگر پروژه تونل‌های مترو با سازه فرم گرد شکل یکپارچه طراحی و ساخته شده باشند برای تعیین نشست و دفرمه شدن این سازه کافی است که قطر افقی و قطر مایل حلقه‌های تونل را اندازه‌گیری کرد و کارشناسان باید این نکته را در نظر بگیرند که تعیین و بررسی نشست سازه تونل و زمان انجام و تعداد محل استقرار علامت نقشه‌برداری را در سازه تونل و در (تصویر ۳–۵) نشان داده شده است.

(تصویر ۳-۵)



در سازه تونل‌های چهارگوش برای تعیین نشست و دیفرمه شدن سازه مونتاژ شده مقدار اندازه فاصله ارتفاع از سقف تا کف تونل و در قسمت‌های متفاوتی دیگر از عرض تونل را اندازه‌گیری می‌کنند البته برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری‌ها و تعیین سیکل‌های مناسب اندازه‌گیری‌ها نشست در مکان‌های مورد نظر سازه از قبل نشانه‌ها و رپرهای برای تعیین نشست و دفرمه شدن سازه نصب می‌کنند. در ساخت و مونتاژ سازه تونل‌های مترو (یا دیگر سازه‌های زیرزمینی) در عمق کم بیشترین احتمال به وجود آمدن نشست و دفرمه شدن سازه تونل در هنگام خاک‌ریزی و دفن سازه توسط فشار لایه‌های خاک و زمین و یا حرکت ماشین‌آلات است که در روی سازه تونل تازه مونتاژ و ساخته شده به وجود می‌آید.

برای تعیین نشست سازه تونل‌های که به صورت حلقه و یا قطعات بلوکی شکل مونتاژ گردیده‌اند حداکثر احتمال نشست یا دفرمه شدن در آن‌ها از سمت پهلوها وجود دارد که برای مشخص شدن اندازه نشست در این نمونه سازه‌ها بطور تقریبی از هر ۵ تا ۱۰ تای حلقه‌های مونتاژ شده در سازه تونل در سیکل‌های اندازه‌گیری شده معلوم و در مدت زمان‌های ۱۰ تا ۲۰ روزه قطر حلقه‌های مونتاژ شده را اندازه‌گیری می‌کنند.

برای اندازه‌گیری سطح افقی و عمودی و تعیین بررسی و کنترل احتمالی همگرایی دیواره‌های و سازه تونل (رینگ‌های مونتاژ شده از سگمنت‌های بتونی و یا فولادی) توسط نقاط نصب شده در دو سوی دیواره تونل که در یک سطح افقی و در مقابل همدیگر قرار دارند اندازه‌گیری می‌شوند،

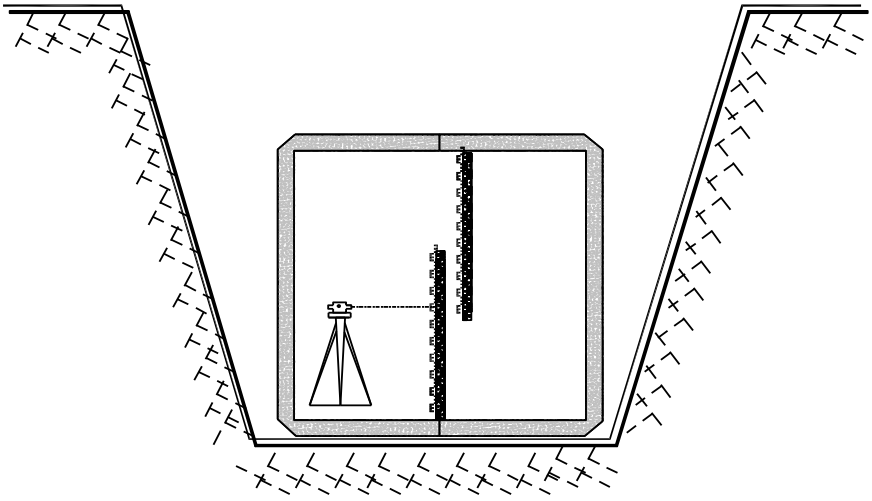
این نقاط نصب شده با توجه به فشار لایه‌های زمین با فواصل هر ۲۰ متر دو نشانه (رپر) در مقابل همدیگر و در یک سطح از نظر ارتفاعی در روی رینگ‌های سازه و در داخل تونل نصب می‌کنند و اندازه فاصله مابین آن‌ها را در یک سطح افقی توسط مترهای فولادی و یا مترهای لیزری و یا دستگاه‌های توتال استیشن اندازه‌گیری و با اندازه قطر پروژه سازه داخلی تونل مقایسه می‌کنند، مقدار اندازه مجاز خطای حلقه‌های بتونی (رینگ‌های که از مونتاژ سگمنت‌ها به وجود آمده‌اند) مونتاژ شده در داخل تونل برابر است با اندازه متوسط مربع $m_l = 5mm$ (۵ میلی‌متر) می‌باشد، سیکل‌های اندازه‌گیری‌های انجام شده برای تعیین خطاء توسط کارشناسان در دفترچه‌های مخصوصی ثبت می‌گردند و از طریق جمع‌آوری اطلاعات اندازه‌گیری شده و مقایسه آن‌ها می‌توان مقدار اندازه نشست و دفرمه شدن سازه تونل را مشخص کرد.

در سازه‌های زیرزمینی برای تعیین نشست و دفرمه شدن سازه در اندازه ارتفاع با کمک دستگاه‌های نقشه‌برداری ارتفاع سازه مزبور را اندازه‌گیری کرده و با محاسبه اندازه اختلاف ارتفاع در مرحله اول نسبت به مراحل بعدی مقدار اندازه نشست و دفرمه سازه را مشخص و تعیین می‌کنند و تعیین دفرمه و نشست سازه‌های زیرزمینی توسط دستگاه‌های توتال استیشن صورت می‌گیرد، برای تعیین اندازه‌گیری قسمت‌های داخلی سازه تونل در هنگام ساخت و اجرا سازه‌های تونل در جداره بدنه داخلی تونل رپرهای اندازه‌گیری را در سطح افق و در ارتفاع تقریبی دوربین نقشه‌برداری نصب می‌کنند و این نقاط را بطور پیوسته در سیکل‌های تعیین شده اندازه‌گیری می‌کنند.

یکی از این روش‌ها برای تعیین تغییر ارتفاع سقف تا کف سازه تونل استفاده از دستگاه‌های دقیق ترازیاب نیو می‌باشد که در (تصویر ۴–۵) نشان داده شده است.

در (تصویر ۴–۵) برای اندازه‌گیری نشست سقف تونل‌های مترو (از این روش در اندازه‌گیری نشست طاق پل‌ها هم استفاده می‌گردد) با دستگاه ترازیاب در دو مرحله یک بار اندازه‌گیری کف را با شاخص (میر) انجام می‌دهند بار دیگری با سر و ته کردن شاخص (معکوس کردن) سقف تونل را اندازه می‌گیرند و از طریق در (فرمول ۱–۵) مقدار اندازه کامل ارتفاع از کف تا سقف تونل به دست می‌آید این روش از دقت بالای برخوردار است و در اندازه‌گیری نشست پل‌ها هم کاربرد دارد.

(تصویر ۴-۵)

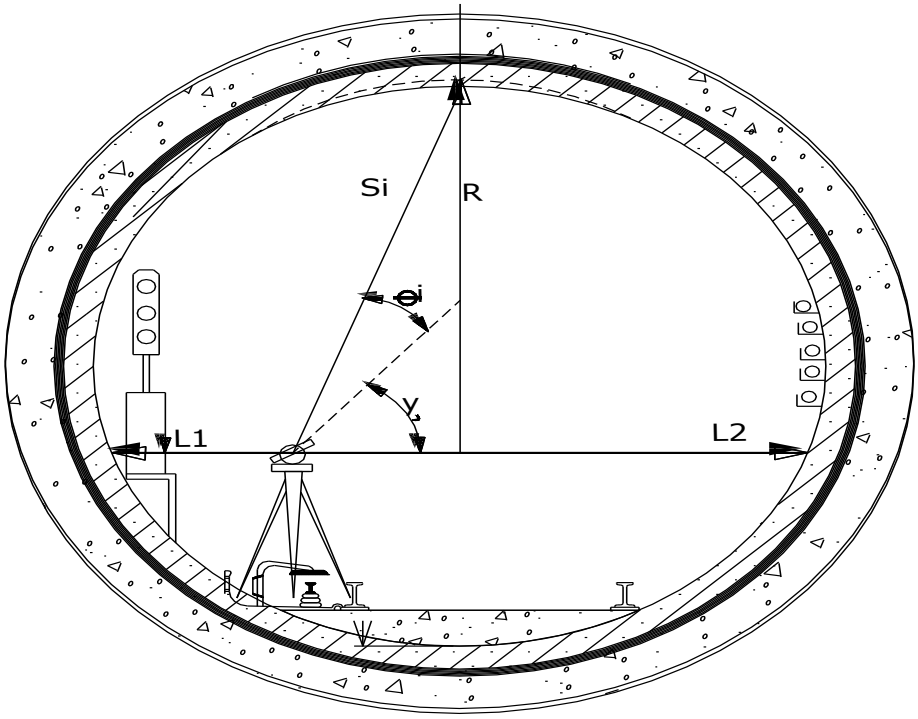


$$H = h1 + h2$$ (فرمول ۱-۵)

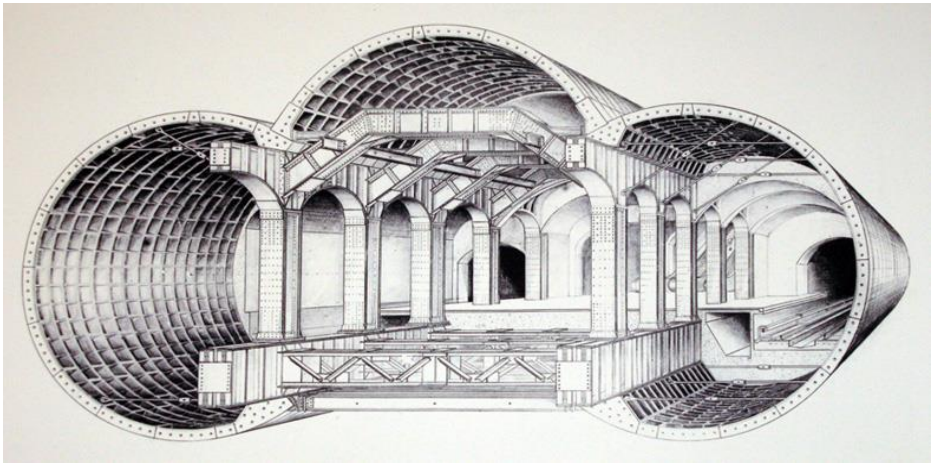
گاهی اوقات با دستگاه‌های توتال استیشن می‌توان جابجایی رینگ‌های مونتاژ شده در سطح و در ارتفاع را تعیین و مشخص کرد در (تصویر ۵-۵)، برای اندازه‌گیری زاویه‌ها افقی می‌توان از نقاطی که از قبل در بدنه داخلی سازه تونل نصب شده‌اند (رپرها) براحتی با دستگاه‌های توتال استیشن این اندازه‌گیری‌ها زاویه‌ها را انجام داد، اگر سازه تونل توسط دستگاه‌های (تی بی ام) حفاری و توسط رینگ‌های متشکل از سگمنت‌های بتونی و یا فولادی نصب و مونتاژ شده باشد و یا اینکه از روش‌های دیگر برای حفاری تونل استفاده شده و با سازه بتون‌آرمه تونل یک تکه ساخته شده باشد لزوم همیشگی تعیین اندازه ارتفاع قسمت مهم بالای طاق تونل (بیشترین فشار لایه‌های زمین بر طاق تونل وارد می‌گردد) و دو طرف بدنه سازه تونل می‌باشد که توسط کارشناسان نقشه‌برداری اندازه‌گیری می‌شود برای این منظور در قسمت بالای طاق و بدنه تونل (بالای رینگ‌ها) نشانه‌های در بدنه رینگ‌ها و قسمت بتونی طاق تونل برای تعیین اندازه‌گیری‌های مورد نیاز از قبل نصب می‌کنند، برای زمین‌های که از نظر ژئوتکنیکی مناسب برای ساخت و ساز می‌باشند و مشکلی در نشست سازه تونل در آن‌ها پدیدار نمی‌گردد بعد از هر ۱۰ (ده) رینگ مونتاژ شده یک نشانه در طاق و دو نشانه در بدنه آن‌ها نصب می‌گردد و سپس نشانه‌های نصب شده را از نظر ارتفاعی و سطحی در سیکل‌های معین اندازه‌گیری می‌کنند، در

زمین‌های که از نظر ژئوتکنیکی برای ساخت و ساز از نظر کیفیت لایه خاک و زمین در رده متوسط می‌باشند بعد از هر سه و یا دو رینگ ارتفاع و عرض نشانه‌های نصب شده را اندازه‌گیری می‌کنند و در زمین‌های که از نظر ژئوتکنیکی مشکل سازند و احتمال بیشتر نشست سازه ساخته شده تونل در آن‌ها دیده می‌شوند توسط کارشناسان نقشه‌برداری نشانه‌های نصب شده در بالای طاق و در عرض بدنه هر یک از رینگ‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند، زمان اندازه‌گیری اولیه نقاط نباید بیش از دو یا سه روز از نصب و مونتاژ رینگ‌های بدنه داخلی تونل گذشته باشد و برای اندازه‌گیری سیکل‌های بعدی نسبت به موقعیت ژئوتکنیکی محل مونتاژ سازه تونل هر ۵ و ۱۰ روز اندازه‌گیری‌ها نقاط مورد نظر تکرار می‌شوند در (تصویر ۶-۵) اتصالات اصلی و ستون‌های حائل سقف‌های مابین سازه تونل‌ها سازه و ایستگاه جابجایی مسافران نشان داده شده است.

(تصویر ۵-۵)



(تصویر ۶–۵)



در ایستگاه‌های مترو (تصویر ۶–۵) در مکان‌های مانند اتصالات عمودی بین سازه تونل‌های با توجه به سه و یا چهار نتایج اندازه‌گیری اولیه توسط کارشناسان ژئودوزی می‌توان نشست و یا دفرمه شدن سازه تونل و همچنین جهت و سوی فشار دینامیکی لایه‌ها زمین که باعث به وجود آمدن نشست و دفرمه در سازه تونل را می‌شوند مشخص کرد.

در شبکه زیرزمینی مترو ایستگاه‌های قطارها که محل سوار و پیاده شدن مسافران می‌باشند احتمال نشست و دفرمه شدن سازه تونل با درصد بیشتری وجود دارد لازم است که برای تعیین تعداد سیکل‌های اندازه‌گیری جهت تعیین نشست در این قسمت‌ها توسط کارشناسان نقشه‌برداری برنامه‌ریزی کاملی صورت گیرد.

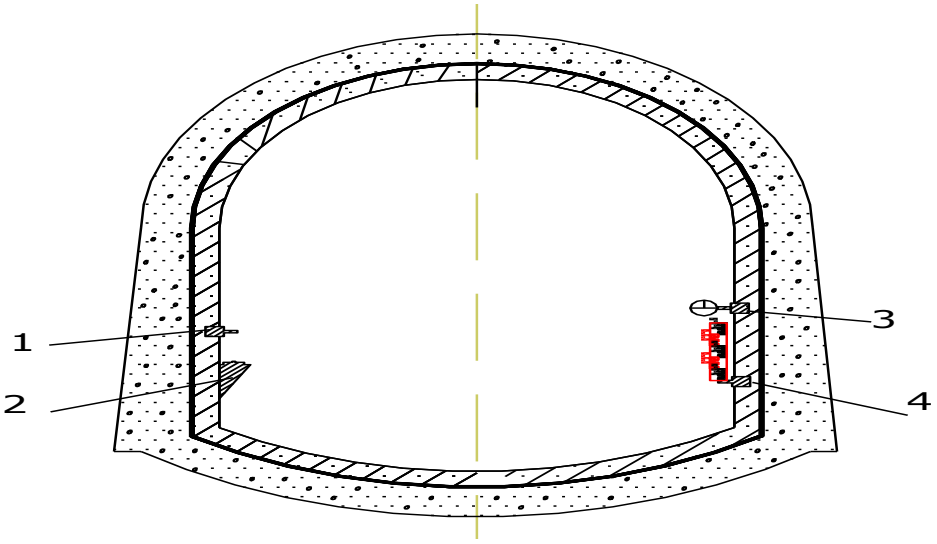
تغییر شکلی رأس محور تونل‌ها همیشه همراه با کرنش‌های کششی و فشارهای لایه‌های زمین همراه می‌باشد و تغییر شکل‌های انحنایی سازه تونل‌های زیرزمینی که بر اثر عوامل ذکر شده در بالا به وجود می‌آید باعث ایجاد انحناهای مثبت و منفی در امتداد سازه طول مسیر تونل می‌شوند و در انحناء مثبت جدار فضای زیر زمینی در قسمت فوقانی دچار فشردگی و در قسمت تحتانی دچار کشیدگی می‌شود و برعکس این فشردگی‌ها در انحناء منفی سازه تونل‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد. برای مشخص کردن فشارها و تنش‌های لایه‌های زمین از سمت و جهت افقی بر سازه تونل در روی پایه‌های ستون‌های داخلی تونل‌های ایستگاه‌های مترو نشانه‌های نصب می‌کنند که بعداً توسط کارشناسان ژئودوزی اندازه‌گیری طول در راستایی افق مابین ستون‌ها را

توسط متر فولادی و یا متر لیزری انجام دهند. در سیستم شبکه زیرزمینی مترو بررسی نشست طاق‌های بتونی اجرا شده پس از اتمام بتون‌ریزی ستون‌ها و دیوارهای حمال صورت می‌گیرد، در داخل ستون‌های سازه تونل‌ها نشانه (رپر) نصب می‌کنند و همینکه قالب‌ها را باز کردند و ستون‌ها تحت فشار بارهای وارده بر آن قرار گرفتند توسط دستگاه‌های ترازیاب و با استفاده از نقاط ارتفاع دار (رپر) شبکه پیمایش که در داخل تونل‌ها از قبل نصب شده‌اند اندازه‌گیری‌ها را با سیکل‌های دو یا سه روز انجام می‌دهند، البته سعی می‌گردد که نشانه‌های (یک و یا دو رپر) جهت اندازه‌گیری نشست در امتداد محور تونل در طاق بتونی نصب شوند اگر در بدنه سازه تونل یک نشانه نصب گردد همیشه سعی می‌شود که این نشانه را در مرکز قوس طاق تونل نصب کنند و اگر دو نشانه بخواهند نصب کنند این نشانه‌ها را با فاصله مساوی از مرکز قوس طاق تونل نصب کرده تا بعداً بتوانند مقدار نشست طاق سازه تونل را به راحتی اندازه‌گیری بکنند.

پس از جاگذاری رپرها در دیواره تونل و یا محل‌های ذکر شده و خشک شدن بتون اطراف آن‌ها برای ترازیابی آماده می‌باشند و در مرحله اولیه این نشانه‌ها را به جهت تعیین نشست سازه تونل هر ۳ تا ۵ (سه تا پنج) روز اندازه‌گیری می‌کنند و پس از آن ادامه اندازه‌گیری نشست و دفرمه شدن سازه تونل بستگی به اندازه‌گیری‌های اولیه دارد اگر نشستی در اندازه‌گیری‌های اولیه سازه دیده شود آن وقت سیکل‌های اندازه‌گیری بعدی توسط کارشناسان نقشه‌برداری مشخص می‌گردد.

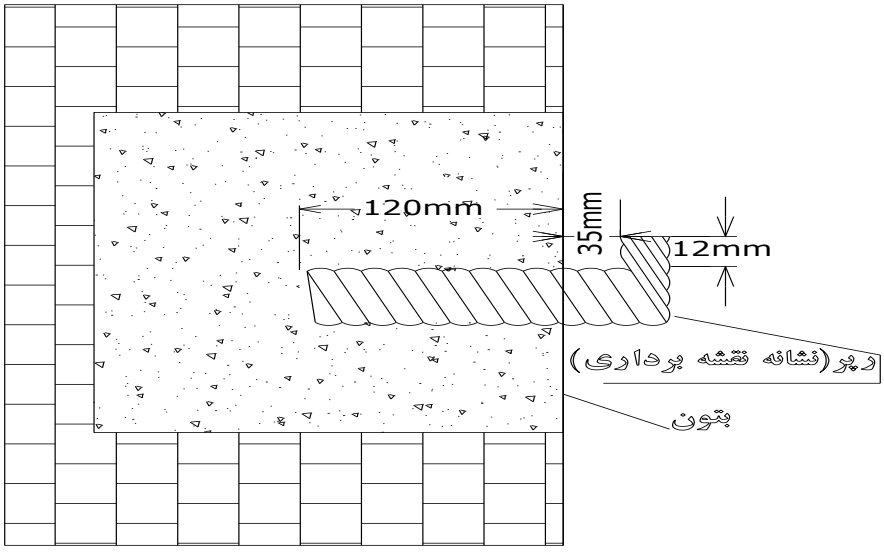
اندازه‌گیری نشست طاق‌های تونل مترو بستگی به محل و مکان اجرا سازه پروژه تونل از نظر زمین‌شناسی دارد بعضی اوقات نشانه‌های (رپرها) در کف تونل دور از ریل‌ها توسط شاغول و یا اینکه به صورت نقاط ثابتی در پاشنه سازه تونل نصب می‌کنند و مابین طاق تونل و نقاط کار گذاشته توسط متر و یا دوربین نقشه‌برداری اندازه‌گیری‌های لازم را انجام می‌دهند، در (تصویر ۷–۵، ۸–۵) نمونه‌ای از نشانه‌ها (رپرها) شبکه پیمایش که در بدنه داخلی سازه تونل‌های با پوشش سنگی و یا بتونی نصب می‌شوند.

(تصویر ۷-۵)



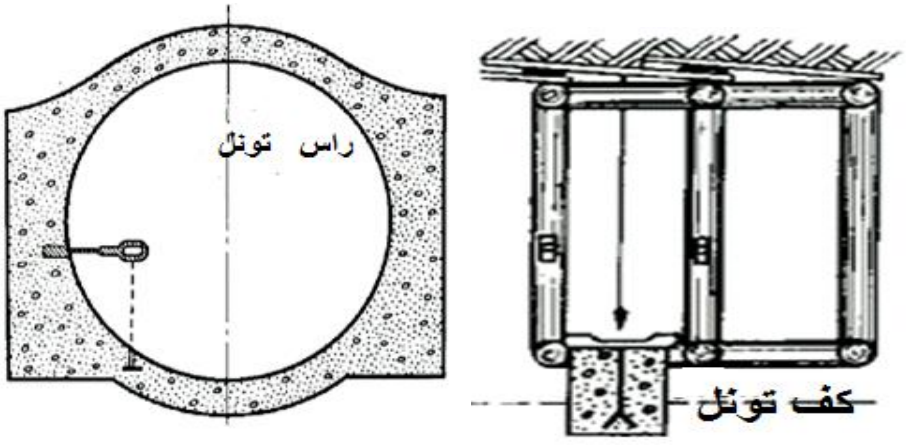
در تونل‌های با پوشش داخلی سنگی و یا ساخته شده از بتون‌آرمه اغلب نشانه‌های انـدازه‌گیـری شبکه پیمایش را در دیواره تونل نصب می‌کنند.

(تصویر ۸-۵)

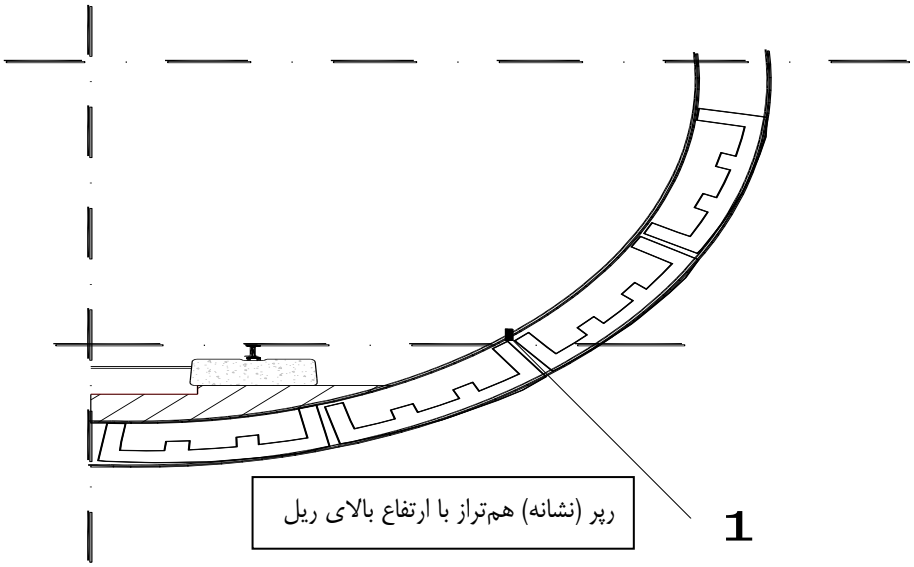


برای تعیین مقدار اندازه نشست سازه تونل‌های ساخته شده و اجرا شده از سگمنت‌های فولادی و یا چدنی اغلب نشانه‌ها (رپرها) را با قرار دادن در دنده‌های سگمنت‌ها اندازه‌گیری می‌کنند، برای کار گذاشتن این نشانه‌ها در روی سگمنت‌ها مقدار ۲ تا ۳ سانتی‌متر در روی سطح سگمنت‌ها هم سطح با ارتفاع بالای ریل‌ها را تراش داده و در وسط این محل تراشیده شده با دریل سوراخ و منفذ کوچکی برای قرار دادن و جا زدن نشانه و یا رپر انجام می‌دهند که بعداً کارشناسان نقشه‌برداری برای اندازه تعیین مقدار نشست از آن‌ها استفاده می‌کنند. در تصویر شماره (تصویر ۹–۵) عدد ۱(یک) محل نصب رپرهای ژئودوزی را نشان می‌دهد که پس از نصب آن‌ها در محل حتماً مکان این نشانه را با مختصات و ارتفاع موجود و اسم آن‌ها را در روی نقشه نقاط اندازه‌گیری مشخص و ثبت می‌کنند.

(تصویر ۹–۵)

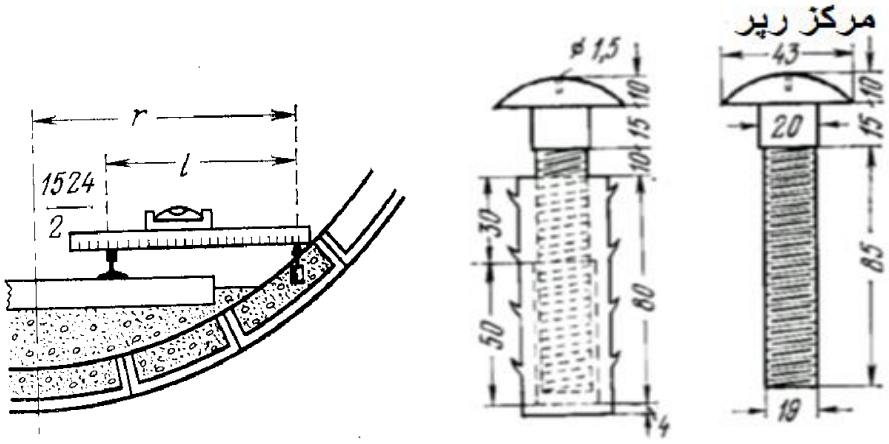


(تصویر ۱۰–۵)



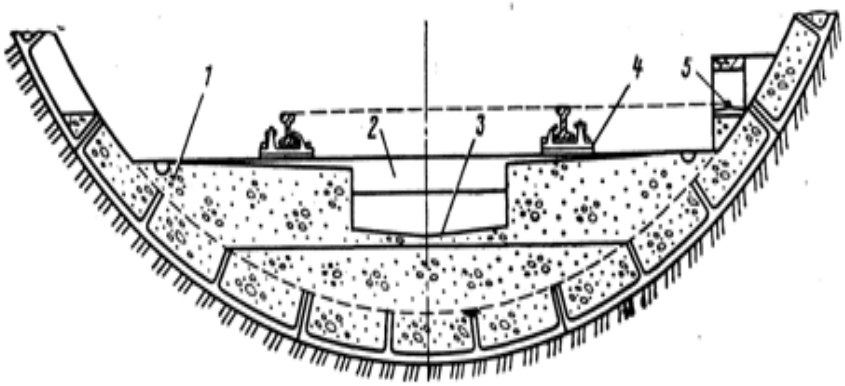
در تصویرهای (تصاویر ۱۱–۵، ۱۲–۵) نمونه و نصب نشانه‌ها (رپرهای نقشه‌برداری) و تنظیم ارتفاع آن را با کله ریل در تونل‌های شبکه مترو را نشان می‌دهد.

(تصاویر ۱۱–۵، ۱۲–۵)



در (تصویر ۱۳–۵) روش دیگر نصب نشانه‌ها (رپرهای نقشه‌برداری) را در هم سطح با ریل‌های قطار در تونل‌های شبکه مترو نشان می‌دهد.

(تصویر ۱۳–۵)



در تصویر (۱۳–۵) مشخصات بدین شرح می‌باشند: ۱– بتون زیر ریل‌ها ۲– تکیه‌گاه زیر ریل‌ها ۳– کانال جمع‌آوری آب‌های ورودی به تونل ۴– نشانه (رپرهای) نقشه‌برداری.

برای تعیین نشست و جابجایی سازه تونل همیشه در یک زمان مشخص اندازه‌گیری فاصله بین نقاط ثابت در داخل تونل را با دستگاه‌های ترازیاب (نیو) با دقت بالا اندازه‌گیری کرده و از نظر ارتفاعی این نقاط را نسبت به بنچ مارک‌های اصلی ارتفاعی ترازیابی و اندازه‌گیری می‌کنند.

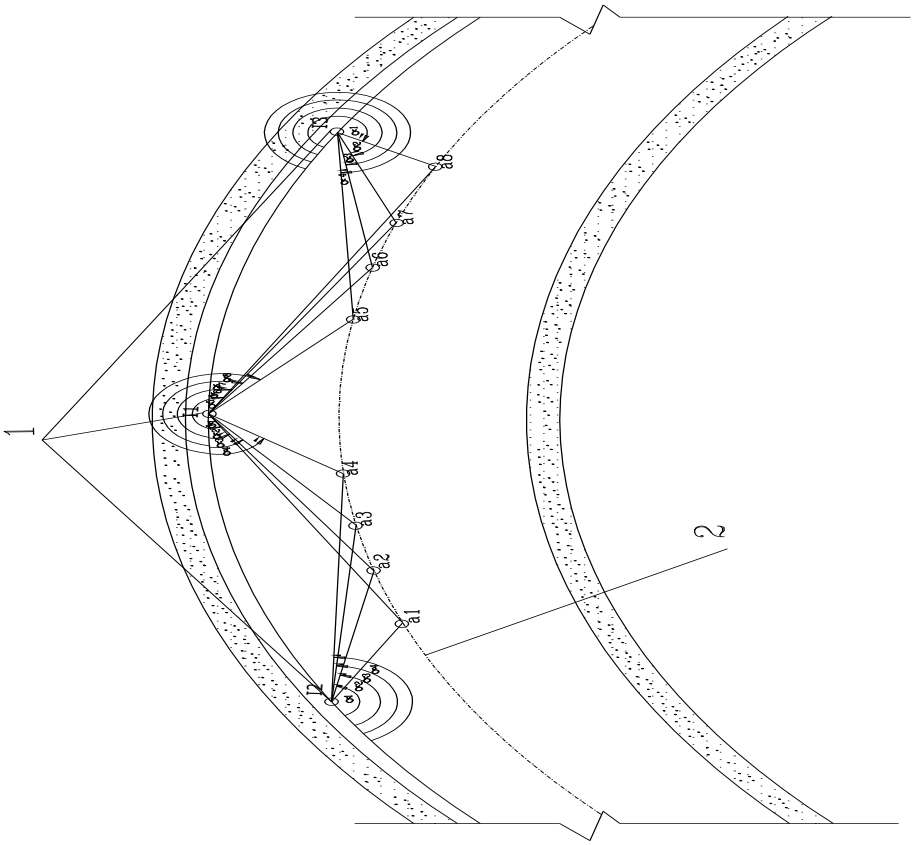
بررسی نشست طاق تونل مونتاژ شده از قطعات سگمنت

برای بررسی نشست طاق تونل ساخته شده از قطعات سگمنت در زمین‌های مناسب از نظر زمین‌شناسی توسط کارشناسان ژئودوزی هر ده رینگ مونتاژ شده (رینگ‌ها از سرهم کردن و مونتاژ سگمنت‌ها درست می‌گردند) بطور مثال برداشت رینگ‌ها را با شماره‌های ۱–۱۰–۲۰–۳۰– و ... الی آخر در سیکل‌های مشخص ترازیابی و برداشت می‌کنند.

برای تعیین نشست طاق تونل با روش ترازیابی نقاط ثابت (نشانه‌ها) نصب شده را در روی طاق و در رأس تونل که در روی سگمنت مرکزی طاق تونل این نقاط را با رنگ زدن علامت و نشانه‌گذاری می‌کنند و سپس مثل طاق‌های یکپارچه بتون‌آرمه‌ای تونل آن‌ها را ترازیابی می‌کنند.

وقتی که طاق تونل توسط کارشناسان ژئودوزی با دستگاه نیو اندازه‌گیری می‌گردد در همان زمان با مترهای لیزری و یا متر فولادی (انوار) قطر تونل را در جهت‌های افقی و عمودی تونل اندازه‌گیری می‌کنند تا فشارهای جانبی لایه‌های زمین از سمت افقی و عمودی بر دیواره تونل مشخص گردند، البته «اندازه جابجایی قطر» رینگ‌های مونتاژ شده در حالت عمودی سازه تونل را می‌توان از طریق اندازه‌گیری قسمت تحتانی (پایین) رینگ‌ها توسط دستگاه ترازیاب (نیو) همزمان با طاق تونل اندازه‌گیری‌های لازم را انجام داد. اولین بررسی نشست سازه تونل پس از جاگذاری سگمنت‌ها شروع می‌شود و این بررسی در سه سیکل با فواصل ۱–۵–۱۰ روز صورت می‌گیرد (تقریباً بطور متوالی بعد از هر پنج روز) در (تصویر ۱۴–۵) شمای اندازه‌گیری رأس طاق تونل بتونی را با دستگاه‌های نقشه‌برداری نشان می‌دهد.

(تصویر ۱۴–۵)



در (تصویر ۱۴–۵) مشخصات بدین شرح می‌باشند: ۱– محل‌های استقرار دوربین نقشه‌برداری در روی نقاط ثابت شبکه پیمایش را نشان می‌دهد عدد ۲– رأس طاق تونل را نشان می‌دهد که برای تعیین اندازه نشست علامت‌گذاری گردیده است.

برای تعیین نشست سازه تونل از نظر ارتفاعی و در قسمت‌های از مسیر پروفیل تونل که قوس‌دار می‌باشند زاویه‌های افقی α1, α2, α3,... مابین نشانه‌های (بنچ مارک‌های) شبکه پیمایش که در قسمت‌های مناسب پایین بدنه تونل نصب شده‌اند در (تصویر ۱۴–۵) و نقاط (نشانه‌های) نصب شده در رأس طاق تونل توسط دستگاه‌های (توتال استیشن) و یا تئودولیت T1 (زاویه‌یاب) و قرائت زاویه‌های افقی را با چهار کوپل اندازه‌گیری و به دست می‌آورند، البته در سیکل‌های تعیین شده برداشت افقی این زاویه‌ها توسط دستگاه‌های نقشه‌برداری صورت می‌گیرد.

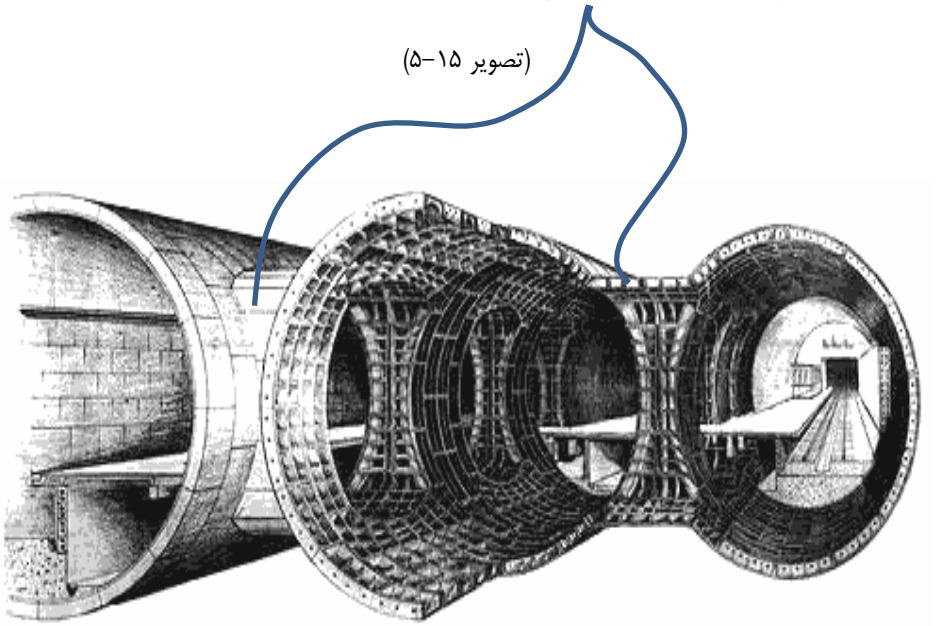
برای تعیین جابجایی این نقاط (تغییر و جابجایی اندازه این نقاط نشان می‌دهند که قسمتی از سازه تونل نشست و یا دفرمه گردیده است) می‌توان توسط دستگاه‌های توتال استیشن طول و زاویه را از نقاط ثابت شبکه پیمایش تا مرکز بالای نقاط نصب شده در بدنه چپ و راست تونل را اندازه‌گیری نمود، اندازه‌گیری مقدار نشست بدنه و طاق تونل توسط این روش در هر ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر از طول مسیر پروفیل تونل صورت می‌گیرد، توصیه می‌شود که هر کدام از نقاط شبکه پیمایش که برای تعیین مقدار جابجایی و اندازه تونل استفاده می‌گردد به دو نقطه دیگر شبکه پیمایش بسته و از نظر مختصاتی کنترل کامل انجام شود.

برای تعیین موقعیت نقاط ثابت شبکه پیمایش موجود در مسیر داخلی پروفیل تونل همیشه زوایای افقی β1 ,β2, β3 مابین خطوط شبکه پیمایش AB, BC, CO و BE را اندازه‌گیری می‌کنند در صورت مشاهده انحراف و تغییر و جابجایی در نقاط ثابت شبکه پیمایش این مقدار انحراف و جابجایی را در تغییرات نشست سازه تونل محاسبه و لحاظ می‌کنند، با تغییر مقدار اندازه این زاویه‌ها می‌توان مقدار اندازه جابجایی نشست و تغییر این نقاط و جهت تغییر آن‌ها عمود بر رأس تونل را مشخص و تعیین کرد و بعد از این سیکل‌های اندازه‌گیری نشست سازه تونل ادامه بررسی و برداشت سازه تونل بستگی به موقعیت محل زمین‌شناسی سازه تونل و نتایج به دست آمده از بررسی نشست سازه دارد. برای تعیین و تغییر جابجایی سگمنت‌های تونل از نظر ارتفاعی بدین ترتیب باید عمل کرد:

در روی نقاط ثابت مانند (تصویر ۱۴–۵) (بنچ مارک‌های) که در شبکه پیمایش داخل تونل با حرف لاتین A نشان داده شده است دستگاه تئودولیت یا توتال استیشن را مستقر کرده و پس از سانتراژ دستگاه زاویه‌یاب تلسکوپ دستگاه را به سمت نقطه ثابت B (بنچ مارک) شبکه پیمایش داخل تونل می‌چرخانیم و به سوی وی قراول روی می‌کنیم و مابین نقاط Aو B یک بازه درست می‌کنیم و این فاصله را در (تصویر ۱۴–۵) به اندازه زوایا برابر با اسامی a1, a2..., a4 و با اندازه‌های طولی ... b1, b2,…., b4 و الی آخر با متر انوار و یا متر لیزری اندازه‌گیری کرده و در سطح افقی تونل تقسیم می‌کنیم.

در (تصویر ۱۵–۵) ایستگاه مترو و محل تلاقی دو تونل که باید اندازه‌گیری نشست در روی آن‌ها صورت همیشگی انجام شود را نشان می‌دهد.

(تصویر ۱۵–۵)



اندازه‌گیری نقاط تعیین شده برای تعیین نشست تونل به صورت همیشگی با سیکل‌های مشخص در تمامی مدت بهره‌وری از تونل‌ها با استفاده از دستگاه‌های نقشه‌برداری صورت می‌گیرد، یکی از مکان‌های که این روش اندازه‌گیری‌ها در شبکه زیر زمین مترو خیلی استفاده می‌گردد، مکان‌های است که دو تونل به صورت موازی در کنار یکدیگر و یا تونل فرعی دیگری که مابین دو تونل اصلی قرار گرفته‌اند اندازه‌گیری نشست در روی آن‌ها انجام و در این روی محل‌ها بیشترین توجه صورت می‌گیرد و این اندازه‌گیری‌های نشست در ایستگاه‌های مترو قابل

توجه و از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند و توصیه می‌گردد در تونل‌های اتصال و تونل‌های ایستگاه‌ها برای هر کدام از حلقه‌ها (رینگ‌های ساخته شده از سگمنت‌های که جنس بتون‌آرمه می‌باشند) مونتاژ شده اندازه‌گیری نشست صورت گیرد.

برای تعیین نشست سازه‌های تونل ساخته شده از سگمنت‌های فولادی و چدنی با روش خاص مربوط به خودشان و با تعیین موقعیت و قرارگیری پیچ‌های اتصال سگمنت‌ها به یکدیگر اندازه‌گیری انجام می‌گردد.

بررسی نشست سازه‌های تونل‌های متروی ساخته شده از بتون‌آرمه

برای تعیین نشست سازه تونل در پروژه‌های شبکه‌های متروی واقع در زمین‌های که از نظر زمین‌شناسی مشکل‌ساز می‌باشند و یا در مناطق زلزله‌خیز و یا گسل خیز واقع هستند و اغلب این تونل‌ها برای استحکام و مقاومت بیشتر به صورت یکپارچه از بتون‌آرمه طراحی و ساخته شده‌اند در این نوع موارد برای تعیین نشست سازه تونل در قسمت‌های مختلف شبکه تونل‌های مترو توسط متخصصان ژئودوزی از نظر ارتفاعی سازه تونل و از نظر همگرائی دیوارهای تونل (نزدیک شدن دیواره‌های تونل) و همچنین از روش خاص دیگری به شرح زیر برای تعیین نشست در ارتفاع سازه استفاده می‌کنند:

در این روش برای تعیین نشست در طاق بتونی تونل علامت و یا نشانه‌ای را نصب می‌کنند و توسط شاغول امتداد قائم تونل را در روی سازه علامت‌گذاری می‌کنند و در سیکل‌های مناسب این امتداد شاغولی را براحتی می‌توان توسط دستگاه نقشه‌برداری با تغییر لمب چپ و راست اندازه‌گیری و متوسط گیری کرد در صورت نشست و جابجایی سازه بتونی تونل در زمین‌های مشکل‌ساز براحتی می‌توان این جابجایی و انحراف طاق تونل را در حالت قائم مشخص کرد.

در مناطقی که مسیرهای مشکل‌ساز از نظر زمین‌شناسی برای سازه تونل می‌باشند به غیر از نصب نقاط در رأس طاق تونل در امتداد این نقاط در سمت چپ و راست بدنه تونل هم نقاط و نشانه‌های نصب می‌کنند که با اندازه‌گیری این نقاط می‌توان تغییر و جابجایی همگرائی دیوارهای تونل را محاسبه کرد. بررسی نشست سازه‌های زیر زمینی واقع در نزدیکی شبکه‌های تونل‌های قطارهای زیرزمینی به صورت خاصی انجام می‌پذیرد و شرایط و اندازه‌گیری مخصوص به خود را دارند.

اگر در نزدیکی شبکه زیرزمینی متروی فعال قصد ساخت و ساز سازه در زیرزمین باشد مانند مخازن نگه‌داری سوخت، لوله‌های پرفشار آب و سازه‌های مهم دیگر زیرزمینی، باید قطعاً در مورد تغییر جابجایی و نشست آن‌ها در سیکل‌های مختلف تعیین نشست بررسی همیشگی را انجام داد برای این منظور در مکان‌های مختلف در روی لوله‌های فشار قوی آب حفاری صورت می‌دهند تا به جدار بالای لوله آب برسند و در روی جدار بالای لوله آب نقاطی را علامت‌گذاری می‌کنند و هر ۲ تا ۳ روز این نقاط را با دستگاه ترازیاب اندازه‌گیری و تعیین ارتفاع می‌کنند، اگر در منطقه مزبور از نظر زمین‌شناسی مشکل‌ساز نباشد این تعداد دفعات سیکل اندازه‌گیری‌های را کمتر می‌کنند، اگر در مکان‌های خطوط متروی جدید با خطوط متروی قدیم با هم تلاقی کنند حتماً لازم است که در تونل‌های شبکه متروی ساخته شده جدید نقاط ثابت شبکه پیمایش و همچنین نقاط (نشانه‌های) تعیین مقدار اندازه‌گیری نشست و جابجایی تونل نصب گردیده و در سیکل‌های مختلف آن‌ها را اندازه‌گیری کنند، اگر حفاری پروفیل جدید مترو در زیر تونل‌های قدیمی و در حال فعال شبکه مترو صورت گرفته و سازه آن ساخته شود حتماً باید اندازه‌گیری ارتفاعی نقاط نصب شده در بالای طاق تونل را به صورت مکرر در سیکل‌های مختلف انجام داد.

اگر سازه جدید تونل ساخته شده واقع در زیر ایستگاه متروی در حال فعال و یا در زیر سالن ورودی ایستگاه در بالای زمین و یا در زیر تونل‌های ارتباطی و تونل‌های عمودی پله برقی‌ها باشد در این مناطق حتماً باید نشانه‌های (رپر) تعیین نشست نصب شود برای این منظور اغلب این نشانه‌ها را در روی ستون‌ها، سنگ‌های مرمر سالن ایستگاه‌ها و در مکان‌های مشابه دیگر نصب می‌کنند.

برای تعیین مقدار اندازه رپرهای (نشانه) نصب شده در سازه تونل‌های مترو (موارد ذکر شده در بالا) باید از بنچ مارک‌های اصلی که در محدوده‌ای دور از زون نشست سازه مترو باشند استفاده کرد.

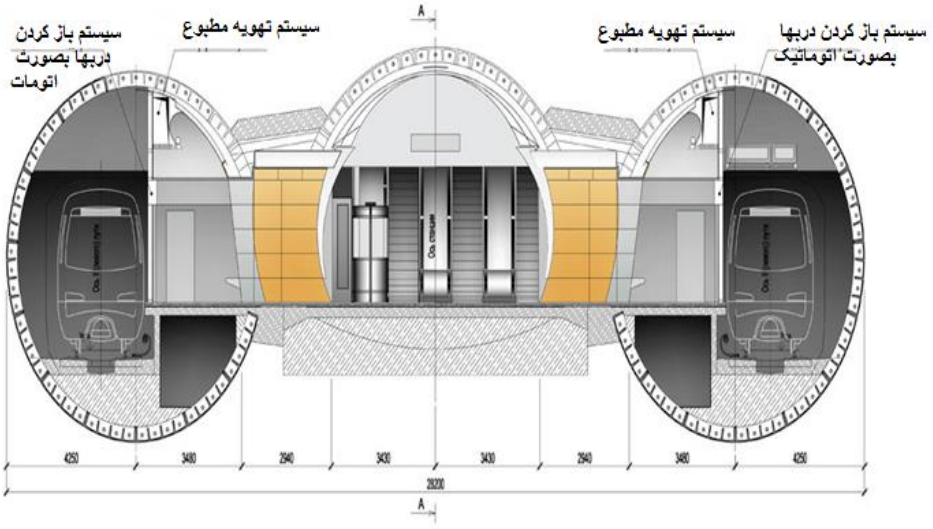
برای پروژه‌های جدید تونل‌های مترو که موازی با شبکه تونل‌های فعال و در دست بهره‌برداری هستند باید هم از نظر ارتفاعی و هم از نظر مختصاتی (جابجایی در پلان و در ارتفاع) و همچنین بررسی همگرائی دیواره‌های تونل را با دستگاه‌های نقشه‌برداری اندازه‌گیری کرد.

محاسبه و تعیین مقدار اندازه نشست سازه‌های زیرزمینی

لازم است تمامی عملیات و برداشت‌های انجام شده در سیکل‌های مختلف جهت تعیین نشست و جابجایی سازه تونل‌های مترو را در ژورنال‌های مشخص و خوانا و قابل فهم ثبت کرد، ارزش این برداشت‌های صورت گرفته وقتی نزول پیدا می‌کنند که عمل‌آوری اطلاعات تعیین نشست و جابجایی سازه تونل با تأخیر و بدون ترسیم نمودار گرافیکی نشست سازه صورت انجام شود.

متخصصین ژئودوزیست برای تعیین نشست سازه‌های زیرزمینی حتماً پرونده جداگانه برای سازه مزبور درست کرده و در این پرونده مشخصات کامل و آدرس بنچ مارک‌های اصلی و رپرها و نشانه‌های نصب شده در بدنه سازه تونل و ایستگاه‌های مترو و جداول سیکل‌ها و پریودهای (سیکل‌های) انجام برداشت‌های صورت گرفته و نشانه‌ها نصب شده جهت تعیین نشست و مقدار نشست و جابجایی سازه و نزدیک شدن و همگرائی سازه و همچنین ترسیم نمودار پایداری و یا نشست و جابجایی سازه از اولین روز تا آخرین برداشت‌های انجام گرفته سازه تونل را جمع‌آوری و ثبت و در بایگانی محفوظ نگه می‌دارند، در (تصویر ۱۶–۵) نمونه سالن ورودی و تونل‌های شبکه متروی شهر مسکو پایتخت کشور روسیه را نشان می‌دهد.

(تصویر ۱۶–۵)



برای تعیین نشست سازه‌های زیر زمینی از مشابه (جدول ۱–۵) استفاده می‌کنند، در این نمونه روش توسط کارشناسان نقشه‌برداری در سیکل‌های مختلف اندازه‌گیری‌های مورد نظر را از طاق رینگ‌های تونل انجام داده و در جداول مورد نظر یادداشت می‌شود و از این نوع جدول‌ها برای تعیین مقدار اندازه نشست سازه‌های پروژه‌های زیرزمینی استفاده می‌گردد.

در جدول (۱–۵) برداشت‌های صورت گرفته جهت تعیین نشست سازه را نشان داده شده است.

جدول (۱–۵)

شماره رپر / تاریخ برداشت صورت گرفته	1 طاق حلقه №135		2 طاق حلقه №134		3 طاق حلقه №133		4 طاق حلقه №132		5 طاق حلقه №131	
	H	Δ	H	δ	H	δ	H	δ	H	δ
09.07.2005	92,267	-3	92,323	+1	92,200	-3	92,158	+5	92,169	+3
12.07. 2005	92,267	-3	92,323	+1	92,203	-	92,152	-1	92,167	+1
15.07. 2005	92,270	-	92,324	+2	92,201	-2	92,154	+1	92,167	+1
18.07. 2005	92,268	-2	92,324	+2	92,202	-1	92,153	-	92,165	-1
21.07. 2005	92,269	-1	92,322	-	92,201	-2	92,151	-2	92,163	-3

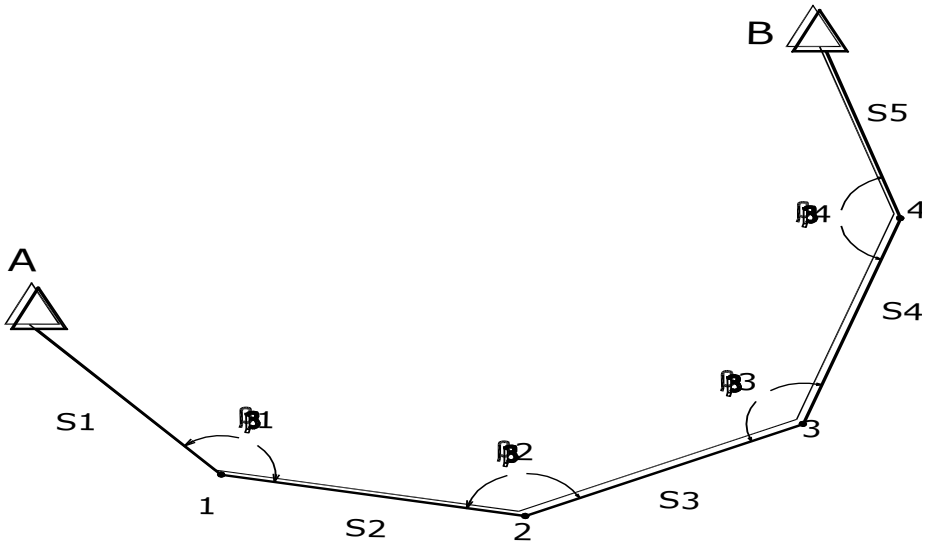
روش انتقال مختصات و ژیزمان به زیر زمین برای تعیین نشست تونل‌های مترو

بررسی نشست سازه‌های زیرزمینی در زمین‌های که از نظر زمین‌شناسی برای ساخت و ساز تونل مشکل‌ساز می‌باشند بخصوص در زمین‌های زلزله‌خیز و دارای گسل نیاز به تهیه و برداشت دقیق با روش‌های خاص نقشه‌برداری است، در چنین مواقعی شبکه نقاط اصلی ثابت (بنچ مارک‌های اصلی) روی زمین باید در مکان‌های ثابت و دور از لغزش و جابجایی زمین نزدیک پروفیل تونل قرار داشته باشند و برای تعیین نشست و جابجایی سازه تونل در زیرزمین باید مختصات نقاط ثابت و ژئودتیک را از سطح زمین به زیر زمین انتقال داد و برای انجام عملیات نقشه‌برداری و تعیین شبکه‌های پیمایش باید از طریق چاه به زیرزمین مختصات دو نقطه ثابت (بنچ مارک) را با کمک دو شاغول و یا توسط دستگاه‌های اپتیکی اندازه‌گیری محور عمودی (خط شاغولی) مختصات را به داخل چاه و به کف چاه منتقل کرده و در آنجا این نقاط را به صورت ثابت با نصب نشانه‌های ژئودوزی نگه‌داری می‌کنند، در (تصاویر ۱۷–۵) دو نمونه از دستگاه اندازه‌گیری ژئودوزی محور عمودی (خط شاغولی) را با کارکرد سیستم لیزر (سمت راست) و سیستم اپتیکی (سمت چپ) که برای انتقال نقاط مختصات دار از سطح زمین به زیرزمین استفاده می‌شود.

(تصاویر ۱۷–۵)

پس از انتقال نقاط مختصات دار به داخل چاه و نصب این نقاط با علامت‌های ژئودوزی در زیر زمین بین دو نقطه ثابت جدید (بنچ مارک) شبکه پیمایش برقرار می‌کنیم (تصویر ۵-۶-۲) یکی از خصوصیات این شبکه پیمایش نسبت به شبکه‌های پیمایش معمولی در این است که این شبکه پیمایش نقاط فاقد آزیموت (ژیزمان) اولیه است و در این شبکه پیمایش ژیزمان اولیه معلوم و مشخص نیست. در (تصویر ۱۸-۵) زیر شبکه پیمایش برای تعیین نشست سازه‌های زیرزمین در داخل تونل‌ها مترو را نشان می‌دهد.

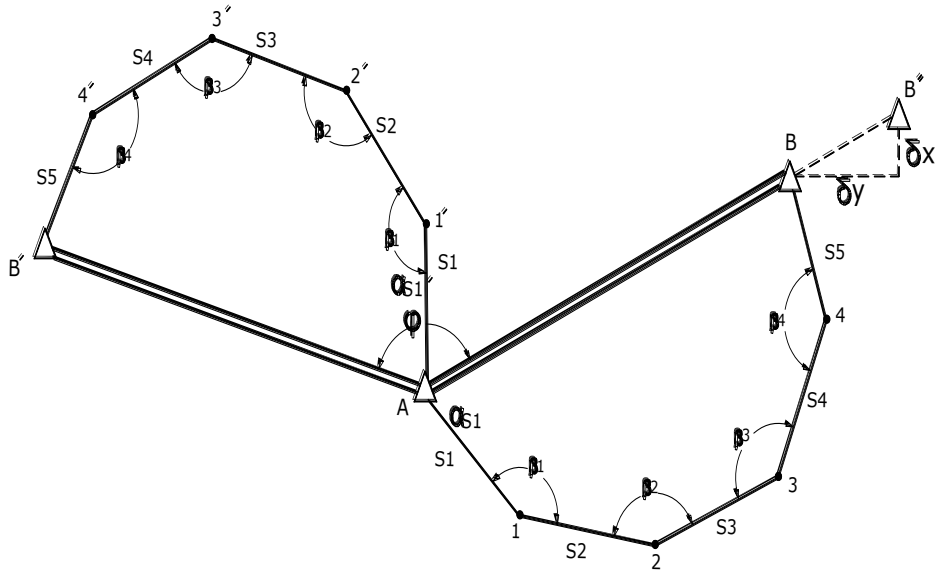
(تصویر ۱۸-۵)



چنین حل مسائلی بدین طریق انجام می‌شود که برای انجام عملیات ژئودوزی شبکه پیمایش در زیر زمین در میان دو تونل از یک نقطه ثابت که مختصات آن مشخص و معلوم و ژیزمان اولیه نامشخص و نامعلوم است استفاده می‌شود، برای این منظور یک مقدار اندازه دلخواه برای آزیموت در نظر می‌گیریم و در محاسبات عملیات شبکه پیمایش لحاظ می‌کنیم: بطور مثال ژیزمان فرضی برای مسیر S1 (ضلع پیمایش $A-1$) مقدار ژیزمان را $\alpha'_{S_1}=0$ را در نظر می‌گیریم و از مختصات نقطه ثابت A استفاده می‌کنیم و در اینجا با مقدار فرضی ژیزمان α'_{S_1} می‌توان مختصات همگی نقاط شبکه پیمایش را محاسبه کرد و همچنین مختصات نقطه ثابت B که در انتهای دیگر شبکه پیمایش و در چاه دوم قرار دارد (شمای این شبکه پیمایش را در (تصویر ۱۸-۵) نمایش داده شده است).

در (تصویر ۱۹–۵) شبکه پیمایش را با ژیزمان فرضی را نشان داده است (در سیستم ژئودوزی کشور روسیه سیستم بردار مختصاتی برعکس سیستم بردار مختصات فارسی می‌باشد و در شکل زیر به طبع محل X و Y هم برعکس نوشته شده‌اند).

(تصویر ۱۹–۵)



با استفاده از مختصات نقاط ثابت (بنچ مارک) شبکه پیمایش بالا مقدار اندازه مختصات نقطه 'B و زاویه φ شبکه پیمایش مابین دو نقطه 'B و B را نسبت به نقطه A را می‌توان تعیین کرد همچنین مقدار اندازه تصحیح آزیموت (ژیزمان) زاویه مسیر اول شبکه پیمایش را می‌توان محاسبه کرد.

(فرمول ۲–۵)

$$\alpha_{S_1} = \alpha'_{S_1} \pm \varphi$$

ارزیابی دقت و صحت محاسبه اندازه‌گیری ژیزمان در شبکه پیمایش

با تعیین مقدار اندازه زاویه ژیزمان (α_{S_1}) از طریق (فرمول ۲–۵) می‌توان مختصات جدید نقاط شبکه پیمایش را در حدفاصل میان دو چاه در زیر زمین و داخل تونل را محاسبه کرد، با توجه به

محاسبات جدید به دست آمده مختصات نقطه انتهای شبکه یعنی "B در روی مسیر AB در (تصویر ۱۹–۵) جای می‌گیرد، مقدار اندازه خطای بست طول شبکه پیمایش "BB و اغلب شبکه‌های پیمایش بسته در مجموع مقدار اندازه تعیین طول‌های مسیر اضلاع شبکه پیمایش می‌باشد و این مجموع مقدار اندازه‌های طول‌ها اضلاع شبکه پیمایش مقدار مرجعی است که برای تعیین و سرشکنی خطا شبکه‌های پیمایش استفاده می‌شود و در این بررسی مقدار اندازه خطا با کنترل محاسبه دقیق ژئودوزی خطای بست عرضی مسیر از بین می‌رود، با تعیین مقدار اندازه خطای بست شبکه پیمایش δx و δyدر (تصویر ۱۹–۵) می‌توان محاسبه مقدار اندازه جابجایی طولی (t) و عرض (u) شبکه پیمایش را به شرح زیر به دست آورد:

$$t=\frac{\delta y\left(y_B-y_A\right)+\delta x\left(x_B-x_A\right)}{L}$$ (فرمول ۳–۵)

$$u=\frac{\delta y\left(x_B-x_A\right)+\delta x\left(y_B-y_A\right)}{L}$$ (فرمول ۴–۵)

در فرمول بالا مقدار اندازه L از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L=\sqrt{\left(x_B-x_A\right)^2+\left(y_B-y_A\right)^2}$$ (فرمول ۵–۵)

در (فرمول ۵–۵) مقدار L اندازه کلی طول شبکه پیمایش می‌باشد.

ارزیابی دقت و صحت محاسبه اندازه زاویه ژیزمان (آزیموت) در شبکه پیمایش بسته در امتداد رأس بردار y با در نظر گرفتن طول‌های مساوی اضلاع S شبکه پیمایش تعیین می‌گردد.

مقدار اندازه خطای زاویه ϕ در شبکه پیمایش با مقدار اندازه جابجایی عرضی u شبکه پیمایش تعیین می‌گردد و معادله خطی آن به شرح زیر می‌باشد:

$$\Delta_{non}=\left[(n-1)S\frac{\Delta\beta_1}{\rho}+(n-2)S\frac{\Delta\beta_2}{\rho}+\ldots S\frac{\Delta\beta_n}{\rho}\right]$$ (فرمول ۶–۵)

در فرمول بالا n تعداد مسیرهای (اضلاع) شبکه بسته پیمایش می‌باشد و $\Delta\beta i$ مقدار اندازه‌گیری شده خطای حقیقی زاویه مسیر می‌باشد که در اینجا مقدار اندازه خطای زاویه φ برابر است با:

$$\Delta\alpha=\frac{\Delta_{non}\rho}{nS}=\frac{n-1}{n}\Delta\beta_1+\frac{n-2}{n}\Delta\beta_2+\frac{n-3}{n}\Delta\beta_3+\ldots+\frac{1}{n}\Delta\beta_n$$

(فرمول ۷-۵)

در چنین صورتی خطای زاویه آزیموت شبکه پیمایش مابین دو چاه در زیر زمین بدین صورت انجام می‌دهیم که مقدار اندازه تصحیح به دست آمده را به مقدار اندازه زاویه ژیزمان اضافه می‌کنیم و علامت پشت مقدار اندازه تصحیح (منظور علامت مثبت و یا منفی $\pm$) بستگی به علامت مقدار اندازه تغییر مکان عرضی شبکه پیمایش دارد که اگر مثبت بود برای تصحیح علامت منفی می‌گذاریم و اگر منفی بود برای مقدار تصحیح زاویه علامت مثبت را در نظر مانند فرمول‌های (فرمول ۸-۵) باید گرفت.

(فرمول ۸-۵)

$$\Delta\alpha_1=-\Delta\alpha;$$

$$\Delta\alpha_2=-\Delta\alpha+\Delta\beta_1;$$

$$\Delta\alpha_3=-\Delta\alpha+\Delta\beta_1+\Delta\beta_2;$$

$$\Delta\alpha_i=-\Delta\alpha+\Delta\beta_1+\Delta\beta_2+\ldots+\Delta\beta_{i-1}.$$

با توجه به (فرمول ۸-۵) در اینجا مقدار اندازه حقیقی خطای زاویه ژیزمان شماره i برابر می‌شود:

(فرمول ۹-۵)

$$\Delta\alpha_i=\left(-\frac{n-1}{n}+1\right)\Delta\beta_1+\left(-\frac{n-2}{n}+1\right)\Delta\beta_2+\left(-\frac{n-3}{n}+1\right)\Delta\beta_3+\ldots+$$

$$\left(-\frac{n-i+1}{n}+1\right)\Delta\beta_{i-1}-\frac{n-i}{n}\Delta\beta_i+\ldots-\frac{1}{n}\Delta\beta_n$$

و نتیجه‌گیری می‌شود:

(فرمول ۱۰-۵)

$$\Delta\alpha_i=\frac{1}{n}\Delta\beta_1+\frac{2}{n}\Delta\beta_2+\frac{3}{n}\Delta\beta_3+\ldots\frac{i-1}{n}\Delta\beta_{i-1}-\frac{n-i}{n}\Delta\beta_i-\ldots\frac{1}{n}\Delta\beta_n$$

با توجه به اندازه خطای حقیقی اندازه‌گیری زاویه ژیزمان و برای تبدیل آن بـه خطـای متوسـط مربع اضلاع شبکه پیمایش کافی است که از مجموع این خطاها مشـتق بگیـریم ماننـد فرمـول معادله (فرمول ۱۱–۵) که به شرح زیر نشان داده شده است:

(فرمول ۱۱–۵)

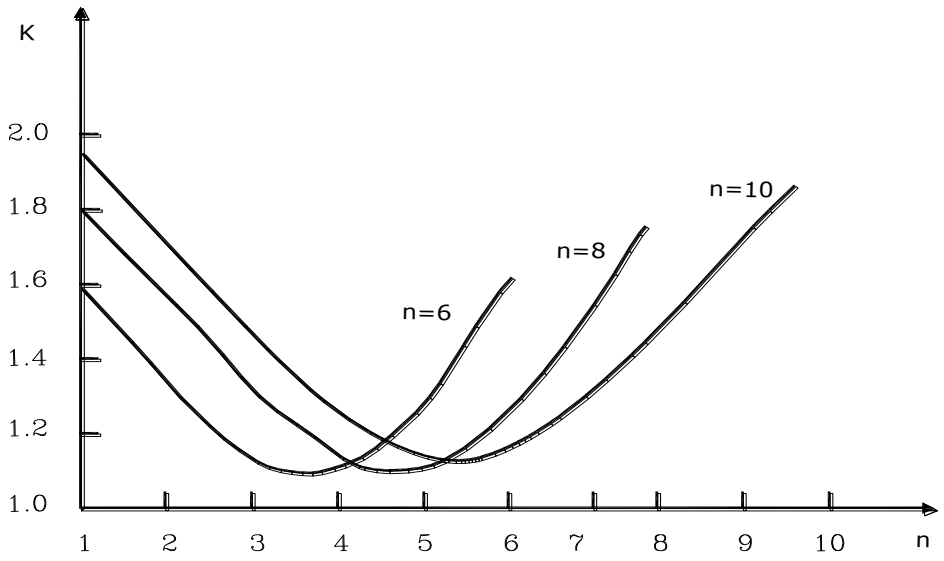
$$m_{\alpha_i}=\frac{m_\beta}{n}\sqrt{\frac{(n-i+1)(n-i+2)(2n-2i+3)+i(i+1)(2i+1)}{6}}$$

در تصویر ۲۰–۵ نمودار مشخصه مقدار اندازه خطای ژیزمان شبکه بسـته پیمـایش را بـا تعـداد (امتداد) اضلاع‌های ۶ و ۸ و ۱۰ تا را ترسیم گردیده است.

مشخصه مشترک و غیر عادی این روش شبکه پیمایش بسته در این اسـت کـه دقیـق‌تـرین انـدازه زاویه (ژیزمان) این شبکه زاویه‌ای است که در اضلاع وسطی این شبکه پیمایش قرار داشته باشد.

در (تصویر ۲۰–۵) مقدار تغییرات ضریب k به صورت نمودار زیر نشان داده شده است.

(تصویر ۲۰–۵)



در (تصویر ۲۰–۵) مقدار اندازه خطای ژیزمان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m_{\alpha_i} = m_{\beta} k$$ (فرمول ۱۲–۵)

و مقدار اندازه k از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد و برابر است با:

$$k = \frac{\sqrt{(n-i+1)(n-i+2)(2n-2i+3)+i(i+1)(2i+1)}}{n\sqrt{6}}$$ (فرمول ۱۳–۵)

دومین خصوصیت بارز و مشخص این شبکه پیمایش نسبت به دیگر شبکه‌های پیمایش در این است که از دو نقطه (بنچ مارک) با سیستم مختصاتی مشخص استفاده گردیده است و اگر سهل‌انگاری در محاسبات ژئودوزی این شبکه پیمایش صورت گیرد امکان و احتمال برعکس شدن سیستم مختصاتی شبکه پیمایش می‌شود.

برای کنترل محاسبات و جلوگیری از این نمونه اتفاق‌ها و خطاها باید زاویه‌های چپ و راست شبکه پیمایش را با اندازه‌های به دست آمده مقایسه کرد.

تعیین خطای متوسط مربع زاویه ژیزمان در این شبکه پیمایش تقریباً برابر با به دست آوردن خطای متوسط مربع تمامی زاویه‌ها شبکه پیمایش در داخل تونل و در میان دو چاه می‌باشد. در شبکه پیمایش بسته مذکور در زیر زمین اگر سمت‌های (جهت‌های) شبکه پیمایش (اضلاع) تا ۱۰ عدد باشند و خطای متوسط مربع زوایای شبکه پیمایش از "۳–۲ افزایش پیدا نکند، در این صورت بیشترین خطای موجود در این روش شبکه پیمایش می‌تواند فقط خطا در انتقال مختصات نقاط ژئودوتیک از روی سطح زمین به زیرزمین و به داخل چاه‌ها باشند.

با توجه به آنالیز و تجزیه و تحلیل در دقت و صحت صورت گرفته عملیات و محاسبات ژئودوزی انتقال نقاط از سطح زمین به زیرزمین فقط از طریق دو نقطه مختصات دار (یک نقطه مختصات دار برای هر چاه) معلوم می‌توان گفت که از این روش انتقال نقاط به زیر زمین برای شبکه پیمایشی که توسط آن مقدار اندازه تعیین نشست را به دست می‌آورند، می‌تواند دقت و صحت مورد نیاز خواسته شده لازم را برای نظارت بر وضعیت تونل جهت انجام بررسی و تعیین نشست موقعیت سازه تونل به دست آورد. قسمت عمده ضعیف و منفی در این روش کنترل کردن و جلوگیری از خطاهای سیستماتیک می‌باشد که در این صورت لازم است عملیات ژئودوزی و پیمایش را با دقت بیشتری انجام داد، کارشناسان ژئودوزی حتماً تکرار در اندازه‌گیری‌های از نو و مجدداً در برنامه خود را باید قرار بدهند و به خصوص با دقت و اطمینان زیاد کنترل‌ها مناسب و لازم را باید انجام داد.

بررسی و محاسبه نشست و دفرمه شدن رینگ‌های تونل

پاره نکاتی درباره برخی از ویژگی‌های پردازش نتایج اندازه‌گیری در کار ژئودوزی مدرن:

پذیرش گسترده دستگاه‌های جدید در اندازه‌گیری مدرن نقشه‌برداری منجر به ظهور چالش‌های زیادی در حل مسائل ژئودوزی گردیده است که راه‌حل آنان نیاز به بررسی دقیق با توجه به ویژگی خاص به خود را دارند، یکی از این نمونه‌ها حل مسائل مربوط به نتایج اندازه‌گیری مختصات توسط سیستم‌های ماهواره‌ای می‌باشد. در حین حل و پردازش نتایج مختصاتی به دست آمده توسط گیرنده‌های ماهواره همیشه درگیر شش پارامتر معادلات کپلر و هشت ضرایب خطای بست می‌گردیدم که با دقت‌های متفاوتی همراه می‌باشند. اگر از حل سنتی فرمول اصلی برای حل اینگونه مسائل یعنی کمترین مربعات مجهولات استفاده کنیم.

$$\sum_{i=1}^{n} P_i v_i^2 \rightarrow \min \qquad \text{(فرمول ۱۴-۵)}$$

آن وقت با مشکل دیگری برخورد خواهیم کرد: چگونه وزن پارامترهای معادلات کپلر و خطای بست ضرایب را باید محاسبه کرد؟ این مشکل همراه با تبدیل مختصات از سیستم WGS-84 به سیستم مختصات ملی U.T.M و یا سیستم مختصات محلی (لوکال) می‌باشد. برای حل این مسئله تابع جدید دیگری فرموله شده: تابعی که حداقل مینیمم جمع باقی مانده مربعات تبدیل مختصات به سیستم مختصاتی کشوری و یا محلی می‌باشد. در این مورد بلافاصله می‌توان ادعا کرد که فرمول تابع جدید متفاوت از فرمول معادله پیشنهاد شده توسط دانشمند بزرگ «گوس» برای حل معادله کمترین مربعات مجهولات می‌باشد: یعنی مینیمم مجموع مربعات خطای بست در اندازه‌گیری مقدار مختصات می‌باشد. اگر از فرمول‌های جدید برای حل معادلات استفاده کنیم به دو مشکل سخت‌تر برخورد می‌کنیم:

- ✓ چگونه مقدار ارزش وزن معادله را محاسبه کنیم.
- ✓ چگونه ارزیابی دقت و صحت پارامترهای تبدیل سیستم مختصاتی را انجام باید داد، چون گوس این روش ارزیابی دقت و صحت پارامترهای را برای معادله‌های دیگری انجام داده است.

ضمناً حل مسائل و روش تجزیه و تحلیل تعیین نشست و دیفرمه شدن تونل‌های متروی به این نمونه حل مسائل نزدیک می‌باشد. الگوریتم‌های نوینی که برای پردازش نتایج اندازه‌گیری و محاسبه موقعیت احتمالی گردی رینگ‌های تونل با شرط مجموع مینیمم مربعات اختلافات مقدار اندازه رینگ‌ها در حالت طبیعی (اندازه‌های پروژه) با احتمال جابجایی رینگ‌ها باشد. با توجه به مثال‌های فوق به ما این نتیجه‌گیری می‌رسیم که برای حل نتایج اندازه‌گیری‌ها در ژئودوزی مدرن می‌توان از توابعی جدیدی به غیر از تابع گوس استفاده کنیم. البته توابع جدید هم مشکلات دیگری به همراه دارند مثلاً امکان اجازه پردازش انجام ارزیابی عینی از نتایج اندازه‌گیری را در حین محاسبه نتایج اندازه‌گیری‌های نمی‌دهد، با توجه به این مشکلات مجبور می‌گردیم که از روش کمترین مربعات مجهولات برای حل مسائل استفاده کنیم. برای حل و پردازش نتایج اندازه‌گیری مسائل ژئودوزی علاوه بر اندازه‌گیری مقادیر واقعی مجبور به استفاده از بسیاری مقادیرهای اضافه برای حل اینگونه مسائل می‌گردیم. برای حل و محاسبه پارامترهای تبدیل به غیر از مختصات به دست آمده اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌ها از سیستم مختصات کشوری هم استفاده می‌کنیم. تغییر شرایط به وجود آمده نیاز به فرمولاسیون جدید توابع به شرح زیرمی باشد: حداقل مجموع مربعات اصلاحات در حدود ارزش‌های شناخته شده با توجه به دقت آن‌ها بدون در نظر گرفتن اینکه آیا آن‌ها از طریق اندازه‌گیری‌ها و یا از طریق منابع دیگر به دست آمده‌اند است. شناخت و مفهوم وزن وقتی مشخص می‌گردد که در آن وقت کارشناس ژئودوزی پردازش تنها دو نوع اندازه‌گیری را انجام داده است: اندازه‌گیری نیولمان (ترازیابی) و دیگری اندازه‌گیری زاویه در مثلث‌بندی و برای به دست آوردن وزن مسئله به هیچگونه مشکلی بر نمی‌خورد. در اندازه‌گیری و حل مسائل ژئودوزی و با توسعه تجهیزات اندازه‌گیری فاصله بخصوص دیستومات‌ها و دستگاه‌های توتال استیشن‌ها در عملیات اندازه‌گیری‌های ژئودوزی بیشتر از روش‌های پیمایش و روش‌های اندازه‌گیری طول و زاویه استفاده می‌گردد. البته در حل و تعیین معادلات خطا در چنین روش‌های اندازه‌گیری‌ها به مشکلات دیگری بر می‌خوریم: مثلاً چگونه در معادله اندازه‌گیرهای ترازیابی و زوایای وزن را محاسبه کنیم؟ آیا وزن مقدار اندازه دارد یا خیر؟ این سؤالات وقتی قابل فهم می‌باشند که تابع هدف (۱۵–۵) به صورت زیر نوشته شود:

$$F=\sum_{i=1}^{n}\left(P_{\beta_i}v_{\beta_i}^2+P_{S_i}v_{S_i}^2\right)\rightarrow\min$$

(فرمول ۱۵–۵)

در فرمول بالا P_{β_i} وزن زوایا اندازه‌گیری شده و v_{β_i} خطای بست زوایای اندازه‌گیری شده می‌باشد و همچنین P_{S_i} وزن در اندازه‌گیری طولی می‌باشد و v_{S_i} خطای بست در اندازه‌گیری طولی است. در فرمول بالا اگر وزن را یک ارزش و کمیت بدون بعد در نظر گرفته شده است و از ابتدا به عنوان یک معیار نسبی طراحی شده باشد و اما در (تابع ۱۵–۵) به صورت وزن با مربع ثانیه و وزن با مربع میلی‌متر نشان داده شده است و این فرمول مزخرفی در ریاضیات به نظر می‌رسد و چنین فرمولی نمی‌تواند در ریاضیات صحت داشته باشد. در نتیجه سؤالاتی پیش می‌آید که نسبت و ارتباط وزن در توابع ریاضی با اندازه‌گیری زاویه‌ها و اندازه‌گیری طول‌ها چگونه می‌باشد. وقتی که قصد حل مشکلاتی ناهمگن ارتباط وزن p را با اندازه‌گیری‌های گوناگونی داشته باشیم در عمل ما برخی از ویژگی‌های را که باید نشان بدهیم در این است که ارزش یک مقدار چقدر دقیق‌تر و یا اشتباه‌تر می‌باشد نسبت به مقدار دیگری می‌باشد. بطور مثال وقتیکه ما ارتباط وزن p را در اندازه‌گیری زوایا و یا طول انجم شده را در نظر می‌گیریم در حقیقت ما عملاً سؤال می‌کنیم: «که یک سانتی‌متر دقیق‌تر است و یا یک دقیقه»؟.

البته به همین شکل که معلوم است در معرض سؤال قرار گرفتن چنین مسئله بی‌معنی و از درجه اعتبار ساقط است، برای مهندسان و کارشناسان برق و قدرت هیچ وقت چنین سؤالاتی برایشان به وجود نمی‌آید که به طور مثال: «که یک ولت دقیق‌تر است و یا یک آمپر»؟ همین جور که معلوم شد چنین سؤالاتی در علم ژئودوزی برای کارشناسان مزبور پیش می‌آید، البته کارشناسان ژئودوزی این مسائل را از طریق (فرمول ۱۴–۵) معروف «به فرمول گوس» حل می‌کنند، باید توجه داشته باشید که حل چنین مسائلی فقط از طریق فرمول گوس انجام و امکان اثبات می‌باشد. البته حل این گونه مسائل با فرمول گوس هم با مشکلاتی همراه است که برای اینکه وضعیت متناقض را رفع کنیم (فرمول ۱۵–۵) را به شکل دیگری می‌نویسیم:

$$F = \sum_{i=1}^{n} P_i v_i^2 = \mu^2 \sum_{i=1}^{n} \frac{v_i^2}{m_i^2} \rightarrow \min \qquad \text{(فرمول ۱۶–۵)}$$

در (فرمول ۱۶–۵) خطای متوسط مربع واحد وزن μ^2 را در جلوی علامت سیگما قرار می‌دهیم که حداقل تأثیر را بر روی فرمول ۱۶–۵) می‌گذارد بنابراین فرمول بالا را قدری ساده‌تر کرده و به صورت زیر می‌نویسیم:

$$F=\sum_{i=1}^{n}\frac{v_i^2}{m_i^2}\rightarrow \min \qquad \text{(فرمول ۱۷–۵)}$$

در (فرمول ۱۷–۵) به دست آمده در حقیقت این همان فرمول گوس می‌باشد و تغییر خاصی در آن به وجود نیامده است و فقط به صورت دیگری آن را نوشته‌ایم. البته این فرمول تغییر یافته و به دست آمده گوس براحتی مسائل مرتبط وزن P و اندازه‌های گرفته شده را در ژئودوزی را حل می‌کند.

در (فرمول ۱۷–۵) در جلوی علامت سیگما ضریبی وجود دارد که واحد اندازه‌گیری در صورتی که خطای متوسط مربع و خطای بست اندازه‌گیرها در یک واحد اندازه‌گیری تعیین شوند.

با توجه به گفته‌های بالا و نظر به (فرمول ۱۷–۵) امکان محاسبه تعیین خطا در هر مقدار اندازه گرفته و تعیین شده به شرح زیر را می‌توان مشخص کرد: در اندازه‌گیری زاویه‌ها، طول خطوط، اختلاف ارتفاع، مختصات، زمان، نشست و جابجایی فازی و پارامترهای معادلات کپلر و غیره بدون پرداختن به نسبت و ارتباط P وزن بین این اندازه‌گیرها. اگر دقت کنیم خیلی دشوار و سخت نمی‌باشد که تحت چنین شرایطی می‌توان براحتی معادله خطی زاویه‌ای شبکه ژئودوزی را حل کرد. در (فرمول ۱۷–۵) اهمیت و جایگاه وزن P در این است که برگشت مربع متوسط مربع خطا را محاسبه می‌کند، همین‌جور که گوس تعیین کرده است.

وضعیت مشابهی را در تجزیه و تحلیل نتایج بررسی نشست حلقه‌های تونل ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ وجود دارد. با توجه به نتایج اندازه‌گیری زوایا و طول‌های گرفته شده می‌توان مختصات چندین نقطه از اطراف محیط رینگ‌های تونل در سیستم مختصاتی را به دست آورد و سپس با توجه به مختصات به دست آمده نشست احتمالی رینگ‌های مونتاژ شده با (فرمول ۱۸–۵) محاسبه کرد:

$$F=\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2\rightarrow \min \qquad \text{(فرمول ۱۸–۵)}$$

در فرمول بالا Δ_i^2 مقدار اندازه انحراف «اعوجاج» رینگ‌ها نسبت به اندازه‌های پروژه رینگ‌ها و همچنین نسبت به اندازه محور انحراف تونل می‌باشد. در (فرمول ۱۸–۵) اجازه این را می‌دهد که پارامترهای مورد نظر در تونل را محاسبه کرد و اما اجازه محاسبه دقیق مقدار اندازه‌های گرفته شده را نمی‌دهد و امکان استفاده از الگوریتم گوس برای تعیین مقدار اندازه دقت پارامترهای تونل را هم نمی‌باشد.

با توجه به وجود گستردگی استفاده از فرمول (فرمول ۱۸–۵) متأسفانه این فرمول ارزش کاربرد وسیعی برای حل مسائل مهندسی ژئودوزی ندارد.

بررسی محاسبه نشست یک نقطه از رینگ‌های تونل

معمولاً حل و محاسبه مسائل ژئودوزی شامل چندین مرحله و فاز جداگانه مجزا می‌باشند که به شرح زیر توضیح داده می‌شود:

فاز (مرحله) اول:

- ✓ در این مرحله باید دقیقاً هدف اصلی کار و عملیات نقشه‌برداری را برای تعیین نشست را بیان و مشخص کرد چون مشخص شدن، بطور مثال باید آنالیز تجزیه و تحلیل نشست و دفرمه شدن رینگ‌های تونل را با خطای متوسط مربع ۳ میلی‌متر تعیین و مشخص کرد.
- ✓ انحراف و تغییرات اندازه‌های اجرا شده سازه تونل از اندازه واقعی اندازه‌ای پروژه تونل.
- ✓ انحراف و تغییرات به وجود آمده در گردی تونل (اعوجاج سگمنت رینگ).

در هنگام آنالیز اندازه‌های تونل اجرا شده از اندازه‌های پروژه آن تمامی اندازه‌های پروژه‌ای تونل در هنگام حل مسئله دارای نشست ثابت می‌باشند و هیچ خطای بستی را برای آنان نباید محاسبه کرد. در هنگام حل مسائل نشست حلقه‌های تونل (منظور رینگ‌های مونتاژ شده از سگمنت‌ها بتونی و یا فولادی) احتمال حل اینگونه مسئله از دو طریق و یا دو روش موجود امکان‌پذیر می‌باشد البته در برخورد با بیشترین موارد حل مسائل ژئودوزی تونل احتمال به دست آوردن چندین ویژگی برای تعیین دقت کار کردن پروژه تونل می‌باشد.

به عنوان مسائل اگر مقدار اندازه خطای مجاز برای اندازه شعاع تونل در حین اجرا و همچنین مقدار اندازه خطای مجاز برای اندازه انحراف تونل از خط پروژه را باید تعیین کرد، در چنین مواردی بهتر است که محاسبه اندازه واقعی تونل را پس از اتمام اجرا آن انجام داد و در ادامه بهره‌برداری این اندازه‌گیری‌ها را ادامه باید داد و با توجه به نتایج به دست آمده روش نهایی را برای اندازه‌گیری خطاها و همچنین مقدار اندازه دقت اندازه‌گیری‌ها برای استفاده در عملیات نقشه‌برداری میدانی را مشخص می‌کنیم.

فاز (مرحله) دوم:

- ✓ در این مرحله لازم است که نوع روش اندازه‌گیری که برای حل اینگونه مسائل به کار می‌رود را مشخص و در نظر گرفت.

در مرحله دوم با تعیین نوع روش اندازه‌گیری باید با رابطه ریاضی مقدارهای اندازه‌گیری‌های صورت گرفته را محاسبه و به عمل آورد (در اینجا باید این مراحل را در مورد نشست حلقه‌های تونل انجام داد) ارتباط ریاضی دقیق مابین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و محاسبه مقدار این اندازه‌ها کاملاً مانع انتخاب بیشتر هر پارامتر مستقل دیگری می‌شود مخصوصاً در جایی که محاسبه مقدار اندازه‌گیری مربوط به معادلات غیرخطی باشد، در اینجا تبدیل مشخصات این معادلات به معادله خطی ممکن می‌باشد و وقتی بتوان ارزش تقریبی محاسبات صورت گرفته را به دست آورد در آن صورت جای برای پارامترهای مستقل نمی‌باشد.

فاز (مرحله) سوم:

- ✓ در این مرحله ارزیابی مقدماتی و اولیه تعیین مقدار اندازه دقت حل مسائل نشست را با استفاده از روش نتایج کمترین مربعات مجهولات به دست می‌آوریم (لازم به ذکر است در هر همچنین مقدار اندازه دقت برای استفاده در عملیات نقشه‌برداری میدانی).

فاز (مرحله) چهارم:

- ✓ در این مرحله عملیات اندازه‌گیری سازه داخلی تونل را انجام می‌دهند.

فاز (مرحله) پنجم:

- ✓ در این مرحله حل و عمل آوردن نتایج اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و همچنین محاسبه معادلات ارزش دقت به دست آمده برای ارزیابی مقدار خطای مجاز لازم و تعیین مقدار اندازه خطای موجود در عملیات ژئودوزی را انجام می‌دهند.

برای پردازش نتایج اندازه‌گیری عملیات میدانی که توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری نقشه‌برداری انجام گرفته‌اند باید اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از دقت تجزیه و تحلیل روش‌های اندازه‌گیری‌ها برخوردار باشند و همچنین کنترل صحت و درستی و کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیرهای ژئودوزی باید قبل از شروع عملیات صورت انجام داد که این مراحل در کتاب‌های ژئودوزی توضیح و تکرار گشته است که در این کتاب از آن صرف‌نظر گردیده است. برای بررسی نشست و دفرمه شدن رینگ‌های داخل تونل (منظور حلقه‌های ساخته شده از سگمنت‌ها فولادی و یا بتنی) کارشناسان نقشه‌برداری باید از یک و یا دو دستگاه توتال استیشن و یا در صورت نبودن این

دستگاه‌های در محل عملیات اندازه‌گیری نشست می‌توان از دستگاه‌های دقیق زاویه‌یاب موجود با مترهای لیزری اندازه‌گیری‌های لازم را صورت داد، لازم به ذکر است اگر از دستگاه‌های توتال استیشنی که در این عملیات استفاده می‌گردد بهتر است از دستگاه‌های توتال استیشنی با دقت بالای استفاده شود که برای اندازه‌گیری نیازی به استفاده از ژالون و منشور نداشته باشند.

عملیات اندازه‌گیری نشست رینگ‌های تونل به شرح زیر انجام می‌دهیم:

دستگاه توتال استیشن را در روی نقاطی مانند A مستقر کرده (تصویر ۲۱–۵) و زاویه Bi و فاصله S را تا دیواره تونل (داخل رینگ‌ها) قرائت و اندازه‌گیری می‌کنیم یا اینکه می‌توان مقدار اندازه مختصات نقاط مورد نظر را با دستگاه توتال استیشن مشخص کرد و این تعداد مقدار اندازه‌های گرفته شده نقاط در سطح افقی و قائم بر رأس تونل برای تعیین مقدار اندازه شعاع تونل و تعیین اندازه امتداد رأس تونل کافی می‌باشند. با توجه به اندازه‌های معلوم پروژه تونل و مختصات معلوم ایستگاه استقرار دستگاه اندازه‌گیری توتال استیشن می‌توان مختصات نقاط اندازه گرفته شده در روی دیواره تونل با خطای متوسط مربع ۳ تا ۴ میلی‌متر به دست آورد (البته در پروسه اندازه‌گیری این مقدار دقت دقیق‌تر می‌گردد).

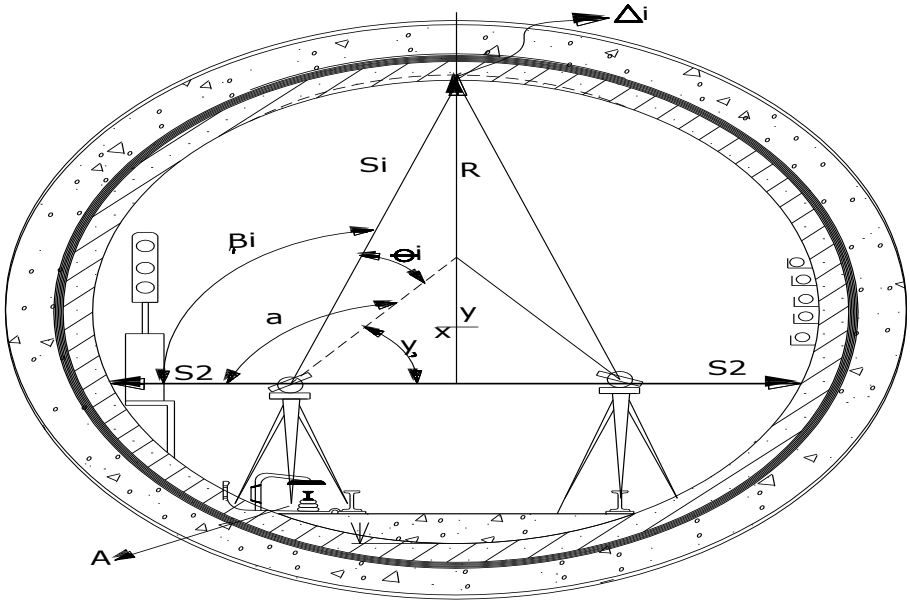
همین‌جور که از (تصویر ۲۱–۵) مشخص است معادله که به ما کمک برای حل این مسائل می‌کند معادله کسینوس‌ها به شرح زیر می‌باشد:

$$(R+\Delta_i)^2 = S_i^2 + X^2 + Y^2 - 2S_i\sqrt{X^2+Y^2}\cos\varphi_i \qquad \text{(فرمول ۱۹–۵)}$$

در (فرمول ۱۹–۵) مقدار اندازه‌های آمده فرمول بدین صورت می‌باشند:

- R شعاع تونل
- Δi مقدار انحراف موقعیت رینگ‌های نصب شده در تونل نسبت به اندازه‌های پروژه تونل
- Si فاصله از دستگاه توتال استیشن تا نقاط مورد نظر در داخل تونل
- X فاصله از دستگاه توتال استیشن تا مرکز تونل در امتداد محور X
- Y فاصله از مرکز تونل تا محور افقی دستگاه توتال استیشن در محور Y
- φi زاویه مابین جهت و سمت نقاط مورد نظر برای اندازه‌گیری و محور مرکز تونل.

(تصویر ۲۱-۵)



$$tg\gamma = \frac{X}{Y}$$ (فرمول ۲۰-۵)

$$\alpha = 180^{\circ} - \gamma$$ (فرمول ۲۱-۵)

در فرمول بالا α مقدار زاویه افقی مابین محور افقی دستگاه نقشه‌برداری و جهت انـدازه‌گیـری می‌باشد.

(فرمول ۲۲-۵) $\phi_i = \alpha - \beta_i$ اگر $\alpha > \beta_i$ در فرمول بالا βi زاویه مابین محور افقی دستگاه نقشه‌برداری و محور دیدگانی دوربین در نقطه A استقرار دوربین می‌باشد.

$\phi_i = \beta_i - \alpha$ اگر $\alpha < \beta_i$ (فرمول ۲۳-۵)

بر طبق فرمول بالا لازم است در خصوص علامت مختصات X و Y تصـمیم‌گیـری شـود. در محاسبات بعدی علامت Y را مثبت در نظر می‌گیریم وقتی که مرکز دسـتگاه توتـال استیشـن (تقاطع دو محور نوری و محور چرخش) پایین‌تر از محور مرکزی تونل باشد و مقدار X را مثبت در نظر می‌گیریم اگر مرکز دستگاه توتال استیشن در سمت چپ محور مرکزی تونل قرار (تصویر ۲۱-۵) داشته باشد.

معادلات ارتباطات به شکل زیر نوشته و محاسبه می‌گردد:

$$\left.\begin{aligned} R &= \tilde{R} + V_R \\ \Delta i &= \tilde{\Delta}_i + V_{\Delta_i} \\ X &= \tilde{X} + V_X \\ Y &= \tilde{Y} + V_Y \\ \varphi_i &= \tilde{\varphi}_i + V_{\varphi_i} \\ S_i &= \tilde{S}_i + V_{S_i} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(فرمول ۲۴–۵)}$$

در (فرمول ۲۴–۵) مقادیری که علامت ^ در بالای آنان نشان داده شده‌اند مقدار اندازه گرفتـه و یا مقدار اندازه تقریباً نزدیک به مقدار واقعی می‌باشند که با مقادیر V_{Δ_i} VR , ... الی آخر که مقادیر تصحیح شده است جمع می‌شوند.

با توجه به مقدار اندازه گرفته شده موجود (فرمول ۲۴–۵) به معادله خطی تبدیل می‌کنیم البته در مرحله نخست وابستگی مابین مقادیر تصحیح شده β_i و φ_i با در نظر گـرفتن (فرمـول ۲۲–۵) نسبت به فرمول‌های ۲۳–۵ و ۲۴–۵) که نتیجه‌اش به صورت فرمول زیر می‌شود:

$$V_{\phi_i} = -V_\gamma - V_{\beta_i} \quad \text{اگر } \alpha > \beta_i \qquad \text{(فرمول ۲۵–۵)}$$

(فرمول ۲۶–۵) $V_{\phi_i} = V_\beta + V_{\gamma_i}$ اگر $\alpha < \beta_i$ با توجه به (فرمول‌هـای ۲۵–۵ و ۲۶–۵) تصـحیح خطای زاویه V_γ که از (فرمول ۲۰–۵) به دست آمده و به شکل (فرمول ۲۷–۵) نوشته می‌شوند:

$$V_\gamma = \rho \frac{\cos\tilde{\gamma}}{\tilde{D}} V_X - \rho \frac{\sin\tilde{\gamma}}{\tilde{D}} V_Y \qquad \text{(فرمول ۲۷–۵)}$$

مقدار $\tilde{D}$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tilde{D} = \sqrt{\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2} \qquad \text{(فرمول ۲۸–۵)}$$

اگر $\alpha > \beta i$ در نتیجه:

$$V_{\phi_i} = -\rho \frac{\cos\tilde{\gamma}}{\tilde{D}} V_X + \rho \frac{\sin\tilde{\gamma}}{\tilde{D}} V_Y - V_{\beta_i}$$ (فرمول ۲۹–۵)

اگر $\alpha < \beta i$ در نتیجه:

$$V_{\phi_i} = \rho \frac{\cos\tilde{\gamma}}{\tilde{D}} V_X - \rho \frac{\sin\tilde{\gamma}}{\tilde{D}} V_Y + V_{\beta_i}$$ (فرمول ۳۰–۵)

(فرمول ۳۱–۵) را از طریق اندازه‌گیری خطای بست می‌نویسیم:

$$\left(\tilde{R} + V_R + \tilde{\Delta}_i + V_{\Delta_i}\right)^2 = \left(\tilde{S}_i + V_{S_i}\right)^2 + \left(\tilde{X} + V_X\right)^2 + \left(\tilde{Y} + V_Y\right)^2 - 2\left(\tilde{S} + V_{S_i}\right) + \sqrt{\left(\tilde{X} + V_X\right)^2 + \left(\tilde{Y} + V_Y\right)^2} \cos\left(\tilde{\phi}_i + V_{\phi_i}\right)$$ (فرمول ۳۱–۵)

فرمول (۳۱–۵) را به شرح زیر در سری تیلر قرار داده و فرمول دیگری را به شرح زیر به دست می‌آوریم:

(فرمول ۳۲–۵)

$$2\left(\tilde{R} + \tilde{\Delta}_i\right)V_R + 2\left(\tilde{R} + \tilde{\Delta}_i\right)V_{\Delta_i} - 2\tilde{S}_i V_{S_i} - 2\tilde{X}V_X - 2\tilde{Y}V_Y + 2\tilde{D}\cos\tilde{\phi}_i V_{S_i} + \\ + \frac{2\tilde{S}_i\tilde{X}\cos\tilde{\phi}_i}{\tilde{D}} V_X + \frac{2\tilde{S}_i\tilde{Y}\cos\tilde{\phi}_i}{\tilde{D}} V_Y - 2\tilde{S}_i\tilde{D}\sin\tilde{\phi}_i \frac{V_{\phi_i}}{\rho} + \left(\tilde{R} + \tilde{\Delta}_i\right)^2 - \\ -\tilde{S}_i^2 - \tilde{X}^2 - \tilde{Y}^2 + 2\tilde{S}_i\tilde{D}_i\cos\tilde{\phi}_i = 0.$$

با در نظر گرفتن فرمول‌های (۲۹–۵ و ۳۰–۵) و (فرمول ۳۲–۵) اگر مقدار $\alpha > \beta i$ باشد فرمول (فرمول ۳۳–۵) به شرح زیر به دست می‌آید:

(فرمول ۳۳–۵)

$$\left(\frac{\tilde{S}_i\tilde{X}\cos\tilde{\phi}_i}{\tilde{D}} - \tilde{X} + \tilde{S}_i\sin\tilde{\phi}_i\cos\tilde{\gamma}_i\right)V_X + \left(\frac{\tilde{S}_i\tilde{Y}\cos\tilde{\phi}_i}{\tilde{D}} - \tilde{Y} - \tilde{S}_i\sin\tilde{\phi}_i\sin\tilde{\gamma}\right)V_Y + \\ + \left(\tilde{R} + \tilde{\Delta}_i\right)V_{\Delta_i} + \left(\tilde{D}\cos\tilde{\phi}_i - \tilde{S}_i\right)V_{S_i} + \tilde{S}_i\tilde{D}\sin\tilde{\phi}_i\frac{V_{\beta_i}}{\rho} + \left(\tilde{R} + \tilde{\Delta}_i\right)V_R + \\ + \frac{\left(\tilde{R} + \tilde{\Delta}_i\right)^2 - \tilde{S}_i^2 - \tilde{X}_i^2 - \tilde{Y}_i^2 + 2\tilde{S}_i D\cos\tilde{\phi}_i}{2} = 0$$

اگر $\alpha < \beta i$ آن وقت نتیجه می‌گیریم:

(فرمول ۳۴–۵)

$$\left(\frac{\tilde{S}_i\tilde{X}\cos\tilde{\phi}_i}{\tilde{D}}-\tilde{X}-\tilde{S}_i\sin\tilde{\phi}_i\cos\tilde{\gamma}_i\right)V_X+\left(\frac{\tilde{S}_i\tilde{Y}\cos\tilde{\phi}_i}{\tilde{D}}-\tilde{Y}+\tilde{S}_i\sin\tilde{\phi}_i\sin\tilde{\gamma}\right)V_Y+$$

$$+\left(\tilde{R}+\tilde{\Delta}_i\right)V_{\Delta_i}+\left(\tilde{D}\cos\tilde{\phi}_i-\tilde{S}_i\right)V_{S_i}-\tilde{S}_i\tilde{D}\sin\tilde{\phi}_i\frac{V_{\beta_i}}{\rho}+\left(\tilde{R}+\tilde{\Delta}_i\right)V_R+$$

$$+\frac{\left(\tilde{R}+\tilde{\Delta}_i\right)^2-\tilde{S}_i^2-\tilde{X}_i^2-\tilde{Y}_i^2+2\tilde{S}_iD\cos\tilde{\phi}_i}{2}=0,$$

اگر $\alpha > \beta i$ آن وقت:

(فرمول ۳۵–۵)

$$a_{1i}=\frac{\tilde{S}_i\tilde{X}\cos\varphi_i}{\tilde{D}}-\tilde{X}+\tilde{S}_i\sin\varphi_i\cos\tilde{\gamma};$$

$$a_{2i}=\frac{\tilde{S}_i\tilde{Y}\cos\varphi_i}{\tilde{D}}-\tilde{Y}-\tilde{S}_i\sin\varphi_i\sin\tilde{\gamma};$$

$$a_{3i}=\tilde{R}+\tilde{\Delta}_i;$$

$$a_{4i}=\sqrt{\tilde{X}^2+\tilde{Y}^2}\cos\beta_i;$$

$$a_{5i}=\frac{\tilde{S}_i\sqrt{\tilde{X}^2+\tilde{Y}^2}\sin\beta_i}{\rho''};$$

$$a_{6i}=a_{3i}=\tilde{R}+\tilde{\Delta}_i;$$

اگر $\alpha < \beta_i$ آن وقت:

(فرمول ۳۶–۵)

$$a_{1i} = \frac{\tilde{S}_i \tilde{X} \cos\phi_i}{\tilde{D}} - \tilde{X} + \tilde{S}_i \sin\phi_i \cos\tilde{\gamma};$$
$$a_{2i} = \frac{\tilde{S}_i \tilde{Y} \cos\phi_i}{\tilde{D}} - \tilde{Y} - \tilde{S}_i \sin\phi_i \sin\tilde{\gamma};$$
$$a_{3i} = \tilde{R} + \tilde{\Delta}_i;$$
$$a_{4i} = \sqrt{\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2} \cos\beta_i;$$
$$a_{5i} = \frac{\tilde{S}_i \sqrt{\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2} \sin\beta_i}{\rho''};$$
$$a_{6i} = a_{3i} = \tilde{R} + \tilde{\Delta}_i;$$

اگر $\alpha < \beta_i$ آن وقت:

(فرمول ۳۷–۵)

$$a_{1i} = \frac{\tilde{S}_i \tilde{X} \cos\tilde{\phi}_i}{\tilde{D}} - \tilde{X} - \tilde{S}_i \sin\phi_i \cos\tilde{\gamma}_i;$$
$$a_{2i} = \frac{\tilde{S}_i \tilde{Y} \cos\phi_i}{\tilde{D}} - \tilde{Y} + \tilde{S}_i \sin\phi_i \sin\tilde{\gamma}_i;$$

الباقی ضرایب تغییراتی در آن‌ها صورت نمی‌گیرد.

با توجه به شرایط در نظر گرفته شده در بالا معادلات سرشکنی خطا را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$a_{1i}V_X + a_{2i}V_Y + a_{3i}V_{\Delta_i} + a_{4i}V_{S_i} + a_{5i}V_{\beta_i} + a_{6i}V_R + l_i = 0 \qquad \text{(فرمول ۳۸–۵)}$$

مقدار اندازه زاویه‌های βi اندازه‌گیری شده و فاصله Si تا دیواره داخلی تونل (رینگ‌ها) در (جدول ۳–۵) آمده است:

(جدول ۳–۵)

№ p/p	βi	Si, см	φi

1	0º00'00"	188,5	159º56'38"
2	30º00'00"	209,7	129º56'38"
3	60º00'00"	234,7	99º56'38"
4	90º00'00"	266,0	69º56'38"
5	120º00'00"	302,8	39º56'38"
6	150º00'00"	323,8	90º56'38"
7	180º00'00"	318,0	20º03'22"

در (فرمول ۳۴–۵) شعاع تونل $R = 255\ см$ می‌باشد و $h1$ ارتفاع دستگاه نقشه‌برداری و $h2$ ارتفاع کف تونل می‌باشد با توجه به این معلومات (فرمول ۳۴–۵) که مقدار تقریبی $\tilde{X}$ به دست می‌آید.

$$\tilde{X} = R - h_1 - h_2$$

(فرمول ۳۴–۵)

اگر مقدار $h_1 + h_2 = 232\ см$ را در نظر گرفته شود و در فرمول بالا جایگذاری گردد در نتیجه مقدار $\tilde{X}$ برابر با $\tilde{X} = 23\ см$ می‌شود.

و مقدار اندازه تقریبی $\tilde{Y}$ را از طریق مدار اندازه فاصله‌های افقی $S1$ و $S7$ را به شرح زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\tilde{Y} = \frac{S_1 + S_7}{2} - \tilde{S}_1 = \frac{\tilde{S}_7 - \tilde{S}_1}{2}$$

(فرمول ۳۵–۵)

از جدول (جدول ۲–۵) مقدار اندازه‌های طولی $S_1 = 188,5\ см$ و $S_7 = 318,0\ см$ را در فرمول (۳۵–۵) قرار داده و مقدار اندازه $\tilde{Y}$ را برابر $\tilde{Y} = 64,8\ см$ به دست می‌آوریم.

با توجه به مقدار به دست آمده تقریبی مختصات محور دستگاه نقشه‌برداری مقدار اندازه زاویه $\tilde{\gamma}$ (آلفا) را به شرح زیر از طریق فرمول زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\tilde{\gamma}=arctg\frac{\tilde{X}}{\tilde{Y}}=20°03'22''$$

(فرمول ۳۶–۵)

ضرایب aij زوایای $\tilde{\gamma}+\tilde{\beta}_I$ که در (جدول ۳–۵) نشان داده شده در جدول دیگری یعنی (جدول ۴–۵) محاسبه کرده و می‌نویسیم.

برای ما مقدار اندازه نشست رینگ‌های مونتاژ شده تونل معلوم است و این مقدار اندازه ناچیز و کم می‌باشد، اولین اندازه تقریبی نزدیک به حقیقت مورد قبول را با $\tilde{\Delta}_i = 0$ را با خطای متوسط مربع $3-4см$ در نظر می‌گیریم.

همانطور که می‌بینید در ادامه نمونه مثال دیده و مشخص گردید و این روش به ما اجازه می‌دهد تا ما محاسبه ویژگی‌های تغییر شکل و نشست رینگ‌های تونل را انجام دهیم اما در این روش کم کاستی‌های هم وجود دارد، در هنگام سرشکن کردن نتایج اندازه‌گیری‌های و تعیین مقدار اندازه خطای اندازه‌گیری‌ها با روش بالا و حل از طریق (فرمول ۱۸–۵) اندازه خطای انحراف رینگ‌های تونل از مقدار اندازه پروژه آنکه در واقع انحراف واقعی رینگ‌های تونل هستند معلوم می‌شود بنابراین مقدار اندازه $\tilde{\Delta}_i = 0$ مورد قبول واقع گردیده است که در ادامه به بررسی حل و محاسبه اندازه‌گیری‌های انجام شده می‌پردازیم: برای تعیین مقدار اندازه مختصات محور دستگاه نقشه‌برداری از (فرمول ۳۷–۵) زیر استفاده می‌کنیم:

$$\tilde{\gamma} = \text{arctg}\frac{\tilde{X}}{\tilde{Y}} = 20°03'22''$$

(فرمول ۳۷–۵)

در (فرمول ۳۷–۵) مقدار اندازه زاویه $\tilde{\gamma}$ را از طریق مقدار اندازه‌های تقریبی $\tilde{Y}$ و $\tilde{X}$ که قبلاً به دست آورده‌ایم محاسبه می‌کنیم مقدار اندازه خطای بردارها یعنی l_i' را از فرمول (فرمول ۳۸–۵) به دست می‌آوریم:

$$l_i' = \frac{\left(\tilde{R}+\tilde{\Delta}_i\right)^2 - \tilde{S}_i'^2 - \tilde{X}_2^2 - \tilde{Y}_2^2 + 2\tilde{S}_i'\tilde{D}'\cos\tilde{\phi}_i'}{2}$$

(فرمول ۳۸–۵)

در (فرمول ۳۸–۵) مقدار اندازه زاویه $\tilde{\varphi}_i$ را از (جدول ۳–۵) به دست می‌آوریم.

ماتریس خطای بردارها مقادیر اندازه‌گیرهای گرفته شده را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$L_i^{'} = \begin{vmatrix} 24376,49 \\ 17308,27 \\ 5438,74 \\ -11237,70 \\ -31159,80 \\ -43562,50 \\ -40344,50 \end{vmatrix}$$

(جدول ۴-۵)

V							
V_{β_7}	0	0	0	0	0	0	-0,04
V_{β_6}	0	0	0	0	0	0,02	0
V_{β_5}	0	0	0	0	0,06	0	0
V_{β_4}	0	0	0	0,08	0	0	0
V_{β_3}	0	0	0,08	0	0	0	0
V_{β_2}	0	0,05	0	0	0	0	0
V_{β_1}	0,02	0	0	0	0	0	0
V_{S_7}	0	0	0	0	0	0	-381,031
V_{S_6}	0	0	0	0	0	-389,892	0
V_{S_5}	0	0	0	0	-354,244	0	0
V_{S_4}	0	0	0	-289,011	0	0	0

V_{S_3}	0	0	-223,113	0	0	0	0
V_{S_2}	0	-166,619	0	0	0	0	0
V_{S_1}	-125,470	0	0	0	0	0	0
V_{Δ_7}	0	0	0	0	0	0	255
V_{Δ_6}	0	0	0	0	0	255	0
V_{Δ_5}	0	0	0	0	255	0	0
V_{Δ_4}	0	0	0	255	0	0	0
V_{Δ_3}	0	0	255	0	0	0	0
V_{Δ_2}	0	255	0	0	0	0	0
V_{Δ_1}	255	0	0	0	0	0	0
V_Y	-251,419	-244,544	-180,331	-63,042	88,293	217,272	254,862
V_X	-22,970	81,872	180,263	242,984	239,193	138,846	-23,050
	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7

برای تعیین وزن ماتریس معکوس باید از فرمول $P=\left(M^{2}\right)^{-1}$ استفاده کنیم که در اینجا M^2 خطایی متوسط مربع است و مشخصات پارامترهای ماتریس قطری متقارن M می‌باشد که اندازه درایه‌های آن 24×24 و خطاهایی متوسط مربع آن به شرح زیر می‌باشند:

$$m_{x,y}=3\,см, m_{\Delta}=3\,см, m_S=0,3\,см, m_{\beta}=20'', m_R=3\,см$$

در اینجا بردار کاریلات را از طریق (فرمول ۳۹–۵) به دست می‌آوریم:

(فرمول ۳۹–۵)

$K=N^{-1}L$ و مقدار N از رابطه $N=BP^{-1}B$

بردار تصحیحات را از حل (فرمول ۴۰–۵) به دست می‌آید:

(فرمول ۴۰–۵)

$$V=P^{-1}BK$$

مشخص است که اندازه نشست حلقه‌های تونل (رینگ‌ها) مقدار خیلی بسیار ناچیز و کم می‌باشند و در تقریب اول اگر مقدار اندازه $\Delta_i = 0$ در نظر بگیریم مقدار اندازه خطای متوسط مربع $3-4мм$ می‌باشد.

اگر مقدار اندازه خطای بردار تصحیحات V را به دست بیاوریم می‌توان بطور روشن مقدار حقیقی اندازه‌های کنونی و وضع موجود دیواره تونل (رینگ‌ها) و شعاع تونل را از طریق (فرمول ۲۶–۵) به دست آورد.

با توجه به محاسبات انجام پذیرفته بردار تصحیحات را به صورت تصحیحات خطی از طریق حل ماتریس زیر به دست می‌آورد (مقدار اندازه خطای بست طولی به سانتی‌متر و مقدار اندازه زاویه‌ها را به ثانیه نشان می‌دهیم):

$$V_i = \begin{vmatrix} -0,450 \\ -0,041 \\ 0,240 \\ -0,046 \\ -0,212 \\ -0,098 \\ 0,100 \\ 0,254 \\ -0,244 \\ -0,024 \\ 0,004 \\ 0,020 \\ 0,009 \\ -0,010 \\ -0,026 \\ 0,024 \\ 0,207 \\ -0,095 \\ -0,624 \\ -0,313 \\ 0,243 \\ 0,169 \end{vmatrix}$$

با توجه به حل ماتریس تصحیحات خطی مقدار اندازه خطای تصحیحات برای ما مشخص گردیده است، بنابراین با جایگذاری این مقادیر در (فرمول ۲۵–۵) مقدار واقعی وضع موجود دیواره تونل (رینگ‌ها) و شعاع تونل به شرح زیر به دست می‌آیند:

$X = 23 – 0,45 = 22,55$ см,

$Y = 63 – 0,04 = 62,96$ см,

$\Delta_1 = 0 + 0,24 = 0,24$ см,

$\Delta_2 = 0 – 0,05 = -0,05$ см,

$\Delta_3 = 0 – 0,21 = -0,21$ см,

$\Delta_4 = 0 – 0,10 = -0,10$ см,

$\Delta_5 = 0 + 0,10 = 0,10$ см,

$\Delta_6 = 0 + 0,25 = 0,25$ см,

$\Delta_7 = 0 – 0,24 = -0,24$ см

$S_1 = 188,5 – 0,02 = 188,48$ см,

$S_2 = 209,7 + 0,0 = 209,70$ см,

$S_3 = 234,7 + 0,02 = 234,72$ см,

$S_4 = 266,0 + 0,01 = 266,01$ см,

$S_5 = 302,8 – 0,01 = 302,79$ см,

$S_6 = 323,8 – 0,03 = 323,77$ см,

$S_7 = 318,0 + 0,02 = 318,02$ см,

$\beta_1 = 0^o00'00'' + 0,2'' = 0^o00'00,2''$,

$\beta_2 = 30^o00'00'' - 0,1'' = 29^o59'59,9''$,

$\beta_3 = 60^o00'00'' - 0,6'' = 59^o59'59,4''$,

$\beta_4 = 90^o00'00'' - 0,3'' = 89^o59'59,7''$,

$\beta_5 = 120^o00'00'' + 0,2'' = 120^o00'00,2''$,

$\beta_6 = 150^o00'00'' + 0,2'' = 150^o00'00,2''$,

$\beta_7 = 180^o00'00'' + 0,4'' = 180^o00'00,4''$,

$R = 255 - 0.72 = 254,28$ см.

با توجه به آنالیز نتایج برداشت‌های صورت گرفته و سرشکنی خطای این برداشت‌ها و مشاهدات خطای رینگ‌های تونل معلوم و مشخص گردید که مقدار اندازه خطای نشست حلقه‌های تونل با خطای متوسط مربع $3\ мм$ به گردیده است و خطای متوسط مربع موقعیت محور تونل با خطای متوسط مربع $1,9\ мм$ به دست آمده که قابل قبول می‌باشند.

تعیین و تهیه متد و روش نشست و محاسبه اعوجاج گردی دیواره تونل

در این روش بررسی نتایج اندازه گرفته شده مختصات قطبی (قطبین و فاصله‌ها) از یک ایستگاه استقرار دستگاه توتال استیشن را انجام می‌دهیم. در این روش مناسب است که بررسی نتایج اندازه گرفته شده از طریق (فرمول ۴۱–۵) صورت گیرد:

$$\Delta_i = \sqrt{S_i^2 + X^2 + Y^2 - 2S_i\sqrt{X^2+Y^2}\cos\varphi_i} - R \qquad \text{(فرمول ۴۱–۵)}$$

از طریق (فرمول ۴۱–۵) وقتی می‌توان استفاده کرد که تمامی پارامترهای تونل با فرمول سرشکنی خطاء معلوم شوند و ضمناً مشخصات مقادیر فرمول بالا از طریق (فرمول‌های ۴۲–۵ و ۴۳–۵) زیر به دست می‌آیند:

$$S_i = \tilde{S}_i + v_{S_i} \qquad \text{(فرمول ۴۲–۵)}$$

$$\phi_i = \tilde{\beta}_i + v_{\phi_i} \qquad \text{(فرمول ۴۳–۵)}$$

مقدار اندازه تقریبی نشست مشخص و معلوم و برابر با $\tilde{\Delta}_i = 0$ می‌باشد با توجه به مقدار کم این اندازه تقریبی نشست به دست آمده تصحیح خطای بست عملاً مقدار اندازه تفاوت ابعاد پروژه نسبت به اندازه ابعاد وضع موجود رینگ‌های تونل از طریق (فرمول ۴۴–۵) به دست آورد.

$$\Delta_i = \tilde{\Delta}_i + v_{\Delta_i} \qquad \text{(فرمول ۴۴–۵)}$$

مقدار اندازه جابجایی احتمالی و تغییر اندازه‌های گردی رینگ‌های تونل (اعوجاج گردی دیواره تونل) از مقدار واقعی آن‌ها (اندازه پروژه) را از طریق روابط زیر می‌توان به دست آورد:

$$X = \tilde{X} + \delta X \qquad \text{(فرمول ۴۵–۵)}$$

(فرمول ۴۶–۵)

$$Y = \tilde{Y} + \delta Y$$

$$R = \tilde{R} + \delta R \qquad \text{(فرمول ۴۷–۵)}$$

در روابط بالا مقدار اندازه δR , δY , δX مجهولات اضافی و کمکی می‌باشند که در این صورت معادله سرشکنی خطا از طریق (فرمول ۴۸–۵) به دست آورد.

(فرمول ۴۸–۵)

$$\Delta_i = \sqrt{\left(\tilde{S}_i + vS_i\right)^2 + \left(\tilde{X} + \delta X\right)^2 + \left(\tilde{Y} + \delta Y\right)^2 - 2(S_i + vS_i)\sqrt{\left(\tilde{X} + \delta X\right)^2 + \left(\tilde{Y} + \delta Y\right)^2}\cos\left(\varphi_i + v_{\varphi_i}\right)} -$$

$$-\tilde{R} - \delta R.$$

مناسب است که تصحیحاتی که در روی مقدار اندازه‌های گرفته شده صورت گرفته است را در سری «تیلور» قرار داده و معادله غیر خطی (فرمول ۴۸–۵) را به معادله خطی (فرمول ۴۹–۵) تبدیل می‌کنیم.

(فرمول ۴۹–۵)

$$\Delta_i = \left(\frac{\tilde{S}_i}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{D}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i}\right)v_{S_i} + \frac{\tilde{S}_i\tilde{D}\sin\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i}\cdot\frac{v_{\varphi_i}}{\rho} + \left(\frac{\tilde{X}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i\tilde{X}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i\tilde{D}}\right)\delta X +$$

$$+\left(\frac{\tilde{Y}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i\tilde{Y}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i\tilde{D}}\right)\delta Y + \delta R + \tilde{P}_i - R,$$

در رابطه (فرمول ۴۹–۵) مقدار اندازه P_i از فرمول‌های زیر به دست می‌آید:

$$P_i = \sqrt{\tilde{S}_i\ + \tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2 - 2\tilde{S}_i\sqrt{\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2}\cos\tilde{\varphi}_i} \qquad \text{(فرمول ۵۰–۵)}$$

$$D = \sqrt{\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2} \qquad \text{(فرمول ۵۱–۵)}$$

مشخصات داده شده را در به صورت زیر برای تعیین معادله سری تیلور شرح زیر می‌نویسیم:

$$a'_{1i} = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{P}_i} \cdot \frac{\tilde{D}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i};$$

$$a'_{2i} = \frac{\tilde{S}_i \tilde{D}\sin\tilde{\varphi}_i}{\rho\tilde{P}_i};$$

$$a'_{3i} = \frac{\tilde{X}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i \tilde{X}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i \tilde{D}};$$

$$a'_{4i} = \frac{\tilde{Y}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i \tilde{Y}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i \tilde{D}}.$$

با توجه به (فرمول ۴۹–۵) جایگذاری‌ها را در (فرمول ۵۱–۵) به صورت زیر انجام می‌دهیم:

$$\psi_i = a'_{1i} v_{S_i} + a'_{2i} v_{\varphi_i} + a'_{3i}\delta X + a'_{4i}\delta Y + \delta R - v_{\Delta_i} + l_i = 0 \qquad \text{(فرمول ۵۱–۵)}$$

و خطای بست از طریق (فرمول ۵۲–۵) محاسبه و نوشته می‌شود.

$$l_i = \tilde{P}_i - R - \tilde{\Delta}_i \qquad \text{(فرمول ۵۲–۵)}$$

با توجه به در نظر گرفتن رابطه‌های (فرمول ۳۰–۵) و (فرمول ۳۱–۵) جایگذاری‌ها را در (فرمول ۵۱–۵) به صورت (فرمول ۵۳–۵) انجام می‌دهیم:

$$\psi_i = a_{1i} v_S + a_{2i} v_{\beta_i} + a_{3i}\delta X + a_{4i}\delta Y + \delta R - v_{\Delta_i} + l_i = 0 \qquad \text{(فرمول ۵۳–۵)}$$

در اینجا اگر $\alpha > \beta_i$ آن وقت:

$$a_{1i} = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{D}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i};$$

$$a_{2i} = -\frac{\tilde{S}_i \tilde{D}\cos\tilde{\varphi}_i}{\rho\tilde{P}_i};$$

$$a_{3i} = \frac{\tilde{X}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i \tilde{X}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i \tilde{D}} + \frac{\tilde{S}_i \cos\tilde{\gamma}\cos\varphi_i}{\tilde{P}_i};$$

$$a_{4i} = \frac{\tilde{Y}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i \tilde{Y}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i \tilde{D}} - \frac{\tilde{S}_i \sin\tilde{\gamma}\cos\varphi_i}{\tilde{P}_i}.$$

و اگر $\alpha < \beta_i$ آن وقت:

$$a_{1i} = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{D}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i};$$

$$a_{2i} = -\frac{\tilde{S}_i\tilde{D}\cos\tilde{\varphi}_i}{\rho\tilde{P}_i};$$

$$a_{3i} = \frac{\tilde{X}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i\tilde{X}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i\tilde{D}} - \frac{\tilde{S}_i\cos\tilde{\gamma}\cos\varphi_i}{\tilde{P}_i};$$

$$a_{4i} = \frac{\tilde{Y}}{\tilde{P}_i} - \frac{\tilde{S}_i\tilde{Y}\cos\tilde{\varphi}_i}{\tilde{P}_i\tilde{D}} + \frac{\tilde{S}_i\sin\tilde{\gamma}\cos\varphi_i}{\tilde{P}_i}.$$

در اینجا با در نظر گرفتن (فرمول ۵۳–۵) معادله را با روش کمترین مربعات و به صورت (فرمـول ۵۴–۵) به دست می‌آوریم:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{n}\frac{v_i^2}{m_i^2} - 2\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\psi_i \qquad \text{(فرمول ۵۴–۵)}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{S_1}} = \frac{v_{S_1}}{m_S^2} - \lambda_1 a_{11} = 0;$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{S_2}} = \frac{v_{S_2}}{m_S^2} - \lambda_2 a_{12} = 0;$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{S_n}} = \frac{v_{S_n}}{m_S^2} - \lambda_n a_{1n} = 0;$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{\beta_1}} = \frac{v_{\beta_1}}{m_\beta^2} - \lambda_1 a_{21} = 0;$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{\beta_2}} = \frac{v_{\beta_2}}{m_\beta^2} - \lambda_2 a_{22} = 0;$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{\beta_n}} = \frac{v_{\beta_n}}{m_\beta^2} - \lambda_n a_{2n} = 0;$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{\Delta_1}} = \frac{v_{\Delta_1}}{m_\beta^2} + \lambda_1 = 0;$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{\Delta_2}} = \frac{v_{\Delta_2}}{m_\beta^2} + \lambda_2 = 0;$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_{\Delta_n}} = \frac{v_{\Delta_n}}{m_\beta^2} + \lambda_n = 0.$$

سپس از معادلات دیفرانسیل‌گیری کرده و از دریافت نتیجه حل دیفرانسیل معادله بالا مـی‌تـوان معادله تصحیح را با (فرمول ۵۵–۵) محاسبه کرد.

$$\left.\begin{aligned} v_{S_i} &= \lambda_i a_{1i} m_S^2 \\ v_{\beta_i} &= \lambda_i a_{2i} m_\beta^2 \\ v_{\Delta_i} &= -\lambda_i m_\Delta^2 \end{aligned}\right\} \qquad \text{(فرمول ۵۵–۵)}$$

با در نظر گرفتن معادله تصحیحات (فرمول ۵۵–۵) این عبارت را از طریقه معادله ارتباط (کاریالات) معادله شرط (فرمول ۵۶–۵) به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda_i\left[a_{1i}^2 m_S^2 + a_{2i}^2 m_\beta^2 + m_\Delta^2\right] + a_{3i}^2 \delta X + a_{4i}^2 \delta Y + \delta R + l_i = 0 \qquad \text{(فرمول ۵۶–۵)}$$

برای تعیین پارامترهای احتمالی گردی تونل از معادله (فرمول ۵۳–۵) معادله هدف‌داری را تشکیل از طریق (فرمول ۵۷–۵) را تغییر می‌دهیم. l_i و مقدار اندازه اعضای آزاد.

(فرمول ۵۷–۵)

$$F_2 = \sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2 = \left[\sum_{i=1}^{n} a_{1i} v_{S_i} + a_{2i} v_{\beta_i} + a_{3i}\delta X + a_{4i}\delta X + \delta R - v_{\Delta_i} + l_i'\right]^2 \to \min$$

از طریق (فرمول ۵۸–۵) به دست می‌آید. l_i' در (فرمول ۵۷–۵) مقدار اندازه

$$l_i' = \widetilde{P}_i - R \qquad \text{(فرمول ۵۸–۵)}$$

در (فرمول ۵۷–۵) با مقدار اندازه‌های عبارت‌های $\delta X, \delta Y$ و δR مینیمم می‌شوند.

$$\frac{\partial F_2}{\partial \delta X} = 2\sum_{i=1}^{n}\left[a_{1i}v_{S_i} + a_{2i}v_{\beta_i} + a_{3i}\delta X + a_{4i}\delta Y + \delta R - v_{\Delta_i} + l_i'\right]a_{3i} = 0;$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \delta Y} = 2\sum_{i=1}^{n}\left[a_{1i}v_{S_i} + a_{2i}v_{\beta_i} + a_{3i}\delta X + a_{4i}\delta Y + \delta R - v_{\Delta_i} + l_i'\right]a_{4i} = 0;$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \delta R} = 2\sum_{i=1}^{n}\left[a_{1i}v_{S_i} + a_{2i}v_{\beta_i} + a_{3i}\delta X + a_{4i}\delta Y + \delta R - v_{\Delta_i} + l_i'\right] = 0,$$

و در نتیجه (فرمول ۵۹–۵) به دست می‌آید.

(فرمول۵۹–۵)

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{n}a_{1i}a_{3i}v_{S_i} + \sum_{i=1}^{n}a_{2i}a_{3i}v_{\beta_i} + \delta X\sum_{i=1}^{n}a_{3i}^2 + \delta Y\sum_{i=1}^{n}a_{4i}a_{3i} - \delta R\sum_{i=1}^{n}a_{3i} - \\
&\sum_{i=1}^{n}a_{3i}v_{\Delta_i} + \sum_{i=1}^{n}a_{3i}l_i' = 0; \\
&\sum_{i=1}^{n}a_{1i}a_{4i}v_{S_i} + \sum_{i=1}^{n}a_{2i}a_{4i}v_{\beta_i} + \delta X\sum_{i=1}^{n}a_{3i}a_{4i} + \delta Y\sum_{i=1}^{n}a_{4i}^2 + \delta R\sum_{i=1}^{n}a_{4i} - \\
&- \sum_{i=1}^{n}a_{4i}v_{\Delta_i} + \sum_{i=1}^{n}a_{4i}l_i' = 0; \\
&\sum_{i=1}^{n}a_{1i}v_{S_i} + \sum_{i=1}^{n}a_{2i}v_{\beta_i} + \delta X\sum_{i=1}^{n}a_{3i} + \delta Y\sum_{i=1}^{n}a_{4i} + n\delta R - \sum_{i=1}^{n}v_{\Delta_i} + \sum_{i=1}^{n}l_i' = 0.
\end{aligned}\right\}$$

با توجه به تعیین اندازه تصحیح خطاها در مقدار اندازه‌های صورت گرفته می‌توان این عبارت را از طریق معادله کاریلات (فرمول ۵۵–۵) معادله سرشکنی خطاء (فرمول ۵۹–۵) به صورت (فرمـول ۶۰–۵) تبدیل می‌گردد:

(فرمول ۶۰–۵)

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{n} a_{1i}^2 a_{3i}\lambda_i m_S^2 + \sum_{i=1}^{n} a_{2i}^2 a_{3i}\lambda_i m_\beta^2 + \sum_{i=1}^{n} a_{3i}\lambda_i m_\Delta^2 + \delta X \sum_{i=1}^{n} a_{3i}^2 + \delta Y \sum_{i=1}^{n} a_{4i}a_{3i} + \\
&+ \delta R \sum_{i=1}^{n} a_{3i} + \sum_{i=1}^{n} a_{3i} l_i' = 0; \\
&\sum_{i=1}^{n} a_{1i}^2 a_{4i}\lambda_i m_S^2 + \sum_{i=1}^{n} a_{2i}^2 a_{4i}\lambda_i m_\beta^2 + \sum_{i=1}^{n} a_{4i}\lambda_i m_\Delta^2 + \delta X \sum_{i=1}^{n} a_{3i} a_{4i} + \delta Y \sum_{i=1}^{n} a_{4i}^2 + \\
&+ \delta R \sum_{i=1}^{n} a_{4i} + \sum_{i=1}^{n} a_{4i} l_i' = 0; \\
&\sum_{i=1}^{n} a_{1i}^2 \lambda_i m_S^2 + \sum_{i=1}^{n} a_{2i}^2 \lambda_i m_\beta^2 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i m_\Delta^2 + \delta X \sum_{i=1}^{n} a_{3i} + \delta Y \sum_{i=1}^{n} a_{4i} + n\delta R + \sum_{i=1}^{n} l_i'' = 0.
\end{aligned}\right\}$$

در اینجا با گروه‌بندی مجدد مقدار مجموع مشتق‌هـای معادلـه (فرمـول ۶۰–۵) در آخـر معادلـه (فرمول ۶۱–۵) به دست می‌آید.

(فرمول ۶۱–۵)

$$
\left.
\begin{aligned}
&\lambda_1\left(a_{11}^2 a_{31} m_S^2 + a_{21}^2 a_{31} m_\beta^2 + a_{31} m_\Delta^2\right) + \lambda_2\left(a_{12}^2 a_{32} m_S^2 + a_{22}^2 a_{32} m_\beta^2 + a_{32} m_\Delta^2\right) + \\
&+ \lambda_3\left(a_{13}^2 a_{33} m_S^2 + a_{23}^2 a_{33} m_\beta^2 + a_{33} m_\Delta^2\right) + \ldots + \\
&+ \lambda_n\left(a_{1n}^2 a_{3n} m_S^2 + a_{2n}^2 a_{3n} m_\beta^2 + a_{3n} m_\Delta^2\right) + \\
&+ \delta X \sum_{i=1}^{n} a_{3i}^2 + \delta Y \sum_{i=1}^{n} a_{4i} a_{3i} + \delta R \sum_{i=1}^{n} a_{3i} + \sum_{i=1}^{n} a_{3i} l_i = 0; \\
&\lambda_1\left(a_{11}^2 a_{41} m_S^2 + a_{21}^2 a_{41} m_\beta^2 + a_{41} m_\Delta^2\right) + \lambda_2\left(a_{12}^2 a_{42} m_S^2 + a_{22}^2 a_{42} m_\beta^2 + a_{42} m_\Delta^2\right) + \\
&+ \lambda_3\left(a_{13}^2 a_{43} m_S^2 + a_{23}^2 a_{43} m_\beta^2 + a_{43} m_\Delta^2\right) + \ldots + \\
&+ \lambda_n\left(a_{1n}^2 a_{4n} m_S^2 + a_{2n}^2 a_{4n} m_\beta^2 + a_{4n} m_\Delta^2\right) + \\
&+ \delta X \sum_{i=1}^{n} a_{3i}^2 a_{4i} + \delta Y \sum_{i=1}^{n} a_{4i}^2 + \delta R \sum_{i=1}^{n} a_{4i} + \sum_{i=1}^{n} a_{4i} l_i = 0; \\
&\lambda_1\left(a_{11}^2 m_S^2 + a_{21}^2 m_\beta^2 + m_\Delta^2\right) + \lambda_2\left(a_{12}^2 m_S^2 + a_{22}^2 m_\beta^2 + m_\Delta^2\right) + \\
&+ \lambda_3\left(a_{13}^2 m_S^2 + a_{23}^2 m_\beta^2 + m_\Delta^2\right) + \ldots \\
&+ \delta X \sum_{i=1}^{n} a_{3i} + \delta Y \sum_{i=1}^{n} a_{4i} + nR + \sum_{i=1}^{n} l_i = 0.
\end{aligned}
\right\}
$$

معادله سرشکنی خطاء (فرمول ۶۱–۵) همراه با معادله (فرمول ۵۶–۵) محاسبه می‌گردد که با یکدیگر معادله سرشکنی خطاء به صورت (فرمول ۶۲–۵) و (فرمول ۶۳–۵) نمایش داده می‌گردد:

(فرمول ۶۲–۵)

$$
\begin{aligned}
&A_{11}\lambda_1 + A_{21}\delta X + A_{31}\delta Y + \delta R + l_1 = 0; \\
&A_{12}\lambda_1 + A_{22}\delta X + A_{32}\delta Y + \delta R + l_2 = 0; \\
&A_{13}\lambda_1 + A_{23}\delta X + A_{33}\delta Y + \delta R + l_3 = 0; \\
&\ldots \\
&A_{1n}\lambda_1 + A_{2n}\delta X + A_{3n}\delta Y + \delta R + l_n = 0;
\end{aligned}
$$

(فرمول ۶۳–۵)

$$B_{11}\lambda_1 + B_{21}\lambda_2 + B_{31}\lambda_3 + \ldots + B_{n1}\lambda_n + C_{11}\delta X + C_{12}\delta Y + C_{13}\delta R + L_1 = 0;$$
$$B_{12}\lambda_1 + B_{22}\lambda_2 + B_{32}\lambda_3 + \ldots + B_{n2}\lambda_n + C_{21}\delta X + C_{22}\delta Y + C_{23}\delta R + L_2 = 0;$$
$$B_{13}\lambda_1 + B_{23}\lambda_2 + B_{33}\lambda_3 + \ldots + B_{n3}\lambda_n + C_{31}\delta X + C_{32}\delta Y + C_{33}\delta R + L_3 = 0;$$

از آنجا به نتیجه معادلات (فرمول ۶۴–۵) و (فرمول ۶۵–۵) دست می‌آبیم:

(فرمول ۶۴–۵)

$$A_{1i} = a_{1i}^2 a_{3i} m_S^2 + a_{2i}^2 a_{3i} m_\beta^2 + m_\Delta^2;$$
$$A_{2i} = a_{3i};$$
$$A_{2i} = a_{4i};$$
$$B_{i1} = a_{1i}^2 a_{3i} m_S^2 + a_{2i}^2 a_{3i} m_\beta^2 + a_{3i} m_\Delta^2;$$
$$B_{i2} = a_{1i}^2 a_{4i} m_S^2 + a_{2i}^2 a_{4i} m_\beta^2 + a_{4i} m_\Delta^2;$$
$$B_{i3} = a_{1i}^2 m_S^2 + a_{2i}^2 m_\beta^2 + m_\Delta^2;$$
$$C_{11} = \sum_{i=1}^{n} a_{3i}^2;$$
$$C_{12} = \sum_{i=1}^{n} a_{4i} a_{3i};$$
$$C_{13} = \sum_{i=1}^{n} a_{3i};$$
$$C_{21} = C_{12};$$
$$C_{22} = \sum_{i=1}^{n} a_{4i}^2;$$

(فرمول ۶۵–۵)

$$C_{23} = \sum_{i=1}^{n} a_{4i};$$

$$C_{31} = C_{13};$$

$$C_{32} = C_{23};$$

$$C_{33} = n;$$

$$L_1 = \sum_{i=1}^{n} a_{3i} l'_i;$$

$$L_2 = \sum_{i=1}^{n} a_{4i} l'_i;$$

$$L_3 = \sum_{i=1}^{n} l'_i.$$

از حل معادلات بالا به نتیجه می‌رسیم که در واقع این روش حل معادلات کاریلات (کمترین مربعات) هست که برای تکمیل مجهولات در حل مسائل سرشکنی خطاء استفاده می‌شود.

ویژگی تفاوت اصلی این روش در این است که برای تکمیل مجهولات شرایط جدیدی را مطرح می‌کند بطوری که مقداری را برای Δ_i^2 برآورد می‌کند که مجموع مربعات باقیمانده‌ها مینیمم شوند.

$$F_2 = \sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2 \to \min$$

در نمونه حل سرشکنی خطا به روش کاریلات دقت مشاهدات تقریباً تغییر پیدا نمی‌کند اما خطاء در اندازه‌گیری‌های طول کمتر گردیده است و مقدار اندازه شناسائی نشست و دیفرمات با متوسط ۲ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند، مزیت اصلی این روش در این است که برای انجام پردازش ریاضی نتایج اندازه‌گیری‌های گرفته شده از یک متد سرشکنی خطاهای اندازه‌گیری‌ها کاریلات با الگوریتمی استاندارد برای مجهولات اضافی استفاده گردیده است.

منابع

- «ولاسینکو. ای.پ، فرامرزپور. ح. ح»، مشخصات و ویژگی‌های پیاده کردن پروژه شبکه‌های ژئودوزی تونل‌های مترو از طریق روش دو چاه سال ۲۰۰۶ میلادی چاپ دانشگاه دولتی و کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.
- «آفاناسیف. و.گ، یگوروف. آ. پ»، کتاب ژئودوزی برای ساخت و ساز تونل‌های حمل و نقل چاپ ۱۹۷۸ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «بارانوف. آ.ان، اگونوف. ک.ای، زیلتسیر. ی.ای، لیبیدوف. آن. آن، سلابودچیکوف. د.آ، چیرمیسین. آم. سی»، کتاب ژئودوزی در ساخت و ساز تونل چاپ ۱۹۵۳ میلادی نشر دانشگاه کارتوگرافیو ژئودوزی مسکو.
- «بولشاکف. و.د، مارکوزه. یو.ای»، کتاب تئوری ریاضی حل مسائل ژئودوزی چاپ ۱۹۸۳ میلادی نشرNIDRA مسکو.
- «بولشاکف. و.د، کلوشین. ی.ب، واسوتینسکی. ای. یو»، کتاب روش‌ها وسایل و روش‌های اندازه‌گیری‌های دقیق در ساخت و ساز سازه‌های بزرگ چاپ ۱۹۷۶ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «بولشاکف. و.د، مارکوزه. یو.ای، گالوبیف. و.و»، کتاب راهنمای مرجع سرشکن کردن خطاهای نتایج اندازه‌گیری‌های ژئودوزی چاپ سال ۱۹۸۹ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «واسوتینسکی. ای.یو، یامبایف. ه.ک»، کتاب دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری ژئودوزی جهت ساخت و مونتاژ سازه‌های سنگین چاپ سال ۱۹۸۲ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «زایتسف آ. ک.، مارفینکو. سی.وی، میخلیف. د.ش»، کتاب روش‌های و متدهای ژئودوزی برای تعیین نشست سازه‌ها چاپ سال ۱۹۹۱ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «زاکاتف. پ.سی.»، ژئودوزی مهندسی چاپ سال ۱۹۶۹ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «کلوشین. ای.بی، ولاسینکو. ای.پی، فرامرزپور. ح.ح»، مقاله در خصوص حل و محاسبه نتایج ژئودزی مدرن گرفته شده از کتاب ۲۲۵ سال تأسیس دانشگاه دولتی و کارتوگرافی مسکو در کنفرانس بین‌المللی و ژئودوزی سال ۲۰۰۴ میلادی چاپ دانشگاه کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.

❖ «کلوشین. ای.بی، نواک. بی.ای»، کتاب در خصوص حل و محاسبه نتایج ژئودزی در خصوص نشست و جابجایی خطی شکل آلمان‌ها سازه‌های سنگین سال ۱۹۸۰ میلادی چاپ دانشگاه کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.

❖ «کلوشین. ای.بی»، روش‌های نوین برای دقت بالا تنظیم تجهیزات ژئودوزی استفاده شده در کنفرانس استفاده از وسائل نوین نقشه‌برداری در مهندسی ژئودوزی در شهر کیف سال ۱۹۸۴ میلادی.

❖ «کلوشین. ای.بی، نواک. بی.ای»، تعیین دقت شبکه ژئودوزی برای حلقه شتاب دهنده اتمی «سیکلو ترون» برای پروژه شتاب دهنده اتمی واقع در نزدیکی شهر مسکو در مجموعه پروژه شتاب دهنده‌های اتمی چاپ سال ۱۹۷۲ میلادی.

❖ «کلوشین. ای.بی، نواک. بی.ای»، محاسبه و تعیین دقت نشست و جابجایی سازه‌ها سال ۱۹۷۹ چاپ دانشگاه ژئودوزی مسکو.

❖ «کلوشین. ای.بی، نواک. بی.ای»، محاسبه و تعیین دقت نشست و جابجایی سازه‌ها خطی سال ۱۹۷۸ چاپ دانشگاه ژئودوزی مسکو.

❖ «کلوشین. ای.بی، نواک. بی.ای، میخلیف. د.ش، فیلدمان. و.د»، مهندسی ژئودوزی سال ۲۰۰۶ میلادی چاپ دانشگاه ژئودوزی مسکو.

❖ «کوگیا. و.آ، گروزینف. و.و، مالکوسکی. او. ان»، عملیات ژئودزی برای ساخت پل‌ها سال ۱۹۸۶ نشر NIDRA مسکو.

❖ «لوکیانف. و.ف»، محاسبه دقت عملیات ژئودوزی مهندسی سال ۱۹۸۱ نشر NIDRA مسکو.

❖ «لیوچوک. گ.پ، نواک. ب.ی، لیبیدیف. ان.ان»، کتاب ژئودوزی عملی برای پروژه احداث سازه‌های مهندسی سال ۱۹۸۳ میلادی نشر NIDRA مسکو.

❖ «لیوچوک. گ.پ، نواک. ب.ی، لیبیدیف. ان.ان، کونوسف. و.گ»، کتاب مهندسی ژئودوزی برای عملیات ژئودوزی سال ۱۹۸۱ میلادی نشر NIDRA مسکو.

❖ «ماتویف. سی.ای.کوگیا. و.ای، تسویکوف. و.د»، ژئواینفورماتیک سیستم تکنولوژی خطوط راه‌آهن سال ۲۰۰۲ چاپ دانشگاه مسکو.

- «ماتویف. سی.ای.»، نمونه جدید نقاط شبکه‌های ژئودوزی برای موارد خاص از کتاب ۲۲۵ سال تأسیس دانشگاه دولتی و کارتوگرافی مسکو در کنفرانس بین‌المللی و ژئودوزی سال ۲۰۰۴ میلادی چاپ دانشگاه کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.
- «ماتویف. سی.ای.»، سرشکنی کردن خطاهای شبکه‌های نقشه‌برداری در زمین‌های نامناسب سال ۱۹۸۶ میلادی چاپ دانشگاه کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.
- «ماتویف. سی.ای.کوگیا. و.ای، تسویکوف. و.د»، ژئو اینفورماتیک سیستم تکنولوژی خطوط راه‌آهن وزارت حمل و نقل روسیه سال ۲۰۰۲ چاپ دانشگاه کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.
- «مارکوزه. یو.ای، بایکو. ای.گ، گالوبیف. و.و»، محاسبه و سرشکنی خطاهای شبکه‌های ژئودوزی سال ۱۹۹۴ میلادی چاپ دانشگاه کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.
- «مارکوزه. یو.ای»، محاسبه و سرشکنی خطاهای شبکه‌های ارتفاعی ژئودوزی سال ۱۹۸۲ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «مارکوزه. یو.ای»، الگوریتم مؤثر برای آنالیز نشست و جابجایی سازه‌های مهندسی از کتاب ۲۲۵ سال تأسیس دانشگاه دولتی و کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو در کنفرانس بین‌المللی و ژئودوزی سال ۲۰۰۴ میلادی چاپ دانشگاه کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.
- «مارفینکو. سی.و»، کتاب عملیات ژئودوزی برای پروژه‌های سازه‌های زیر زمینی تونل و مترو سال ۲۰۰۴ میلادی چاپ دانشگاه دولتی و کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.
- کتاب قوانین ایمنی در عملیات ژئودوزی و کارتوگرافی زیرمجموعه وزارت خانه‌های اتحاد شوروی سال ۱۹۹۱ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- «بولشاکف. و.د» کتاب راهنمای مرجع ژئودوزی عملی سال ۱۹۸۷ میلادی نشر NIDRA مسکو.
- دستورالعمل‌های فنی برای ساخت پروژه‌های تونل‌های شبکه زیر زمینی مترو وزارت خانه حمل و نقل اتحاد جماهیر شوروی سال ۱۹۷۰ میلادی چاپ وزارت خانه حمل و نقل اتحاد جماهیر شوروی.
- دستورالعمل نقاط مرکزی شبکه‌های ژئودوزی برای مناطق شهری و روستایی و پروژه‌های مهندسی سال ۱۹۸۲ میلادی نشر NIDRA مسکو.

❖ «چیرمیسین. ام.سی»، شبکه‌های ژئودوزی برای پروژه‌های بزرگ سازه‌های زیرزمینی سال ۱۹۶۰ میلادی چاپ دانشگاه دولتی و کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.

❖ «چیرمیسین. ام.سی، ورابیف. ای.و»، علمی‌ات ژئودوزی برای پیاده کردن برای پیاده کردن و اجرا سازه‌های زیرزمینی سال ۱۹۶۰ میلادی چاپ دانشگاه دولتی و کارتوگرافی و ژئودوزی مسکو.

❖ «کارپیک. آ.پ، چیشیوف ی.ان، دیمیتریف د.و»، انتقال نقاط شبکه پیمایش در زیر سطح زمین و داخل تونل.

❖ اصول گودبرداری و ایمنی گود آقای مهندس محمدحسین اجرایی.