مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران

روش‌های اجرای تونل‌های شهری و چالش‌های مرتبط

مطالعه موردی: تونل‌های رسالت، نیایش و مترو اهواز

۳۳۱

مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران

روش‌های اجرای تونل‌های شهری و چالش‌های مرتبط
مطالعه موردی: تونل‌های رسالت، نیایش و مترو اهواز

گزارش شماره‌ی ۳۳۱
آبان ماه ۹۴

معاونت مطالعات و برنامه‌ریزی امور زیرساخت و طرح جامع

مدیریت مطالعات و برنامه‌ریزی امور فنی و عمرانی، استانداردسازی و مدیریت بحران

تهیه‌کننده: مهندس هادی آجورلو

ناظر داخلی: مهندس مهدی آشتیانی

داور علمی: دکتر علی اکبر گلشنی

نشانی: تهران، خیابان شریعتی، پل رومی، خیابان شهید اکبری، نبش خیابان شهید آقابزرگی، شماره ۳۲، کد پستی ۱۹۶۴۶۳۵۶۱۱

امور مخاطبان: ۳-۲۲۳۹۲۰۸۰ داخلی ۱۰۸ http://rpc.tehran.ir

حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران است و استفاده از مطالب آن صرفاً با ذکر مأخذ بلامانع می‌باشد.

ضمناً متن (PDF) بر روی سایت فوق قابل دریافت است.

سخن نخست

از اصلی‌ترین فضاهای زیرسطحی در توسعه پایدار شهری، تونل‌های ترافیکی و مترو هستند که باهدف تسهیل و کاهش ترافیک در معابر شهری احداث می‌شوند. البته اجرای این قبیل تونل‌ها در محیط‌های شهری همواره با چالش‌های جدی و مسائل ویژه‌ای چون وضعیت خاک، تأسیسات زیرزمینی، سازه‌های موجود زیرسطحی، خطر نشست زمین و ... بوده است که در برخی موارد با توجه به نمود سطحی آن، این چالش‌ها را لمس کرده‌ایم. از دیگر سوی، در طراحی و اجرای پروژه‌های تونل شهری همواره مسائلی همچون هزینه، زمان، ایمنی، کیفیت مصالح و اجرا، محیط‌زیست و نهایتاً تداخل با محیط زنده شهری از درجه بالایی از اهمیت برخوردار بوده‌اند. تلفیق معیارهای فوق با مسائل و چالش‌های ذکرشده، همواره باعث شده تا تونل‌سازی مسئله‌ای دشوار و پیچیده باشد. گزارش حاضر سعی بر آن دارد تا این مسائل را تشریح نماید.

با توجه به رسالت مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران در راستای نشر دانش و افزایش سطح آگاهی، در این گزارش تلاش شده است با مطالعات کتابخانه‌ای، بازدیدهای میدانی و همچنین بر اساس نظرسنجی به‌عمل‌آمده از کارشناسان و مدیران متخصص تونل‌سازی در شهر تهران، چالش‌های اجرای تونل‌های شهری، علل بروز آنها و همچنین روش‌های مقابله با آنها تا حد ممکن بررسی گردد. امید است پس از مطالعه گزارش، مخاطب توانایی تشخیص اولیه چالش‌های محتمل در پروژه‌های تونل شهری و نیز گزینه‌های ممکن برای مقابله با هریک از آنها را به دست آورد.

بی‌شک نظرات سازنده شما خوانندگان محترم میتواند یاریدهنده نویسندگان و همچنین مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران در ارتقاء سطح کیفی گزارش‌ها باشد.

بابک نگاهداری

رئیس مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران

چکیده

فضاهای زیرسطحی نظیر تونل‌ها از عوامل مهم توسعه شهری هستند. اجرای تونل‌ها در محیط‌های شهری همواره با مشکلات مختلف و متعددی همراه بوده است. گزارش حاضر به بحث و بررسی چالش‌های پیش رو در اجرای تونل‌های شهری می‌پردازد. پس ارائه مقدمه‌ای در خصوص ویژگی‌های خاص تونل‌ها، انواع روش‌های اجرای تونل‌ها مورد بررسی قرار داده‌شده است. روش‌هایی چون کند و پوش، پوش و کند، روش نوین تونل‌سازی اتریشی و حفاری ماشینی تمام مقطع در این بخش ارائه‌شده‌اند. در توضیحات روش کند و پوش، روش‌هایی جهت تحکیم و تثبیت دیواره‌های گود نیز ارائه‌شده‌اند. در هر روش اجرای تونل، نقاط قوت و ضعف و کاربردهای هر یک نیز مطرح گردیده‌اند. بخش بعدی به چالش‌های اجرای تونل‌ها و عوامل کلیدی که در بروز این چالش‌های مؤثرند نظیر روش اجرای تونل، نوع و شرایط زمین و خاک اطراف تونل، مشخصات پوشش تونل و ... به بحث گذاشته‌شده‌اند. در قسمت بعد گزارش انواع چالش‌های اجرای تونل‌ها معرفی‌شده و در خصوص هریک توضیحاتی ارائه‌شده است. برخی از این چالش‌ها عبارت‌اند از اشتباهات در مراحل طراحی و اجرای تونل، مشکلات ناشی از ناشناخته بودن فضاهای زیرسطحی در مناطق شهری، قنات‌ها، انباره‌های فاضلاب و حفرات زیرزمینی ناشناخته، آب زیرزمینی، فرونشست، خاک‌های دستی و غیره. در بخش انتهایی گزارش برخی تجارب تونل‌سازی در کشور مطالعه شده‌اند. تونل رسالت، تونل نیایش و مترو اهواز تونل‌هایی هستند که برای هر یک، اطلاعاتی در خصوص کلیات پروژه، روش اجرا، چالش‌های خاص مطرح در اجرای آن‌ها و راهکارهای ارائه‌شده برای غلبه بر این چالش‌ها ارائه‌شده است.

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱۱

۲- انواع روش‌های اجرای تونل‌های شهری ۱۳

۲-۱- روش کند و پوش ۱۳

۲-۱-۱- تثبیت با سپرکوبی ۱۴

۲-۱-۲- شمع‌های فولادی کوبشی ۱۴

۲-۱-۳- اجرای شمع‌های بتنی حفرشده - حفاری با دستگاه حفار و نصب غلاف فلزی ۱۴

۲-۱-۴- روش اجرای شمع‌های بتنی درجا ۱۵

۲-۱-۶- تثبیت دیواره گودبرداری با استفاده از شمع درجا و مهاربندی داخلی ۱۵

۲-۱-۷- تثبیت دیواره گودبرداری از طریق مسلح سازی با استفاده از میل مهار ۱۵

۲-۲- روش پوش و کند ۱۸

۲-۳- روش نوین تونل‌سازی اتریشی ۲۰

۲-۴- روش حفاری ماشینی تمام مقطع ۲۵

۳- چالش‌های اجرای تونل‌ها ۲۸

۳-۱- فاکتورهای کلیدی در بروز چالش در اجرای تونل‌ها ۲۸

۳-۱-۱- روش اجرای تونل ۲۸

۳-۱-۲- نوع و شرایط زمین و خاک اطراف تونل ۲۸

۳-۱-۳- روباره تونل ۲۸

۳-۱-۴- شرایط آب زیرزمینی ۲۹

۳-۱-۵- مشخصات سازه پوشش و سیستم نگهداری تونل ۲۹

۳-۲- انواع چالش‌های اجرای تونل‌های شهری ۲۹

۳-۲-۱- اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی، تهیه مشخصات فنی و برآورد پارامترهای طراحی ۲۹

۳-۲-۲- اشتباهات محاسباتی یا عددی ۳۰

۳-۲-۳- بروز خطاها و اشتباهات در مرحله اجرای تونل ۳۱

۳-۲-۴- مشکلات ناشی از ناشناخته بودن فضاهای زیرسطحی در مناطق شهری ۳۲

۳-۲-۵- قنات‌ها، انباره‌های فاضلاب و حفرات زیرزمینی ناشناخته ۳۳

۳-۲-۶- مشکلات ناشی از برخورد با آب زیرزمینی در تونل ۳۴

۳-۲-۷- فرونشست زمین ۳۵

۳-۲-۸- مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی ۳۶

۳-۲-۹- خاک‌های دستی ۳۷

۳-۲-۱۰- خالی شدن خاک اطراف تونل به علت فرسایش ناشی از آب شستگی ۳۷

۳-۲-۱۱- اشتباهات مدیریتی و کنترلی ۳۸
٤- بررسی برخی تجارب تونل‌سازی در کشور ۳۸
۴-۱- مطالعه موردی ۱: تونل رسالت ۳۸
۴-۱-۱- کلیات و روش اجرا ۳۸
۴-۱-۲- چالش‌های اجرای تونل و راهکارهای ارائه‌شده ۴۱
۴-۲- مطالعه موردی ۲: تونل نیایش ۴۳
۴-۲-۱- کلیات و روش اجرا ۴۳
۴-۲-۲- چالش‌های اجرای تونل و راهکارهای ارائه‌شده ۴۷
۴-۳- مطالعه موردی ۳: خط یک قطار شهری اهواز ۵۴
۴-۳-۱- کلیات و روش اجرا ۵۴
۴-۳-۱-۱- روش اجرای Bottom-Up (BU) ۵۵
۴-۳-۱-۲- روش اجرای Top-Down با ستون موقت فلزی (TDC) ۵۶
۴-۳-۱-۳- روش Top-Down بدون ستون موقت (TD) ۶۰
۴-۳-۱-۴- مقایسه مزایا و معایب هر یک از روش‌های سه‌گانه به تفکیک مراحل اجرا ۶۱
۴-۳-۲- چالش‌های اجرای تونل و راهکارهای ارائه‌شده ۶۳
٥- جمع‌بندی ٦٦
فهرست مراجع ٦٩

فهرست اشکال و جداول

شکل ۱- گام‌های اجرایی ۱ و ۲ درروش کند و پوش ۱۶
شکل ۲- گام‌های اجرایی ۳ و ۴ در روش کند و پوش ۱۶
شکل ۳- گام‌های اجرایی ۵ و ۶ در روش کند و پوش ۱۷
شکل ۴- گام های اجرایی ۷ و ۸ در روش کند و پوش ۱۷
شکل ۵- تداخل با کانال‌های زیرزمینی حین اجرای تونل به روش کند و پوش ۱۸
شکل ۶- گام‌های اجرایی ۱ و ۲ درروش پوش و کند ۱۹
شکل ۷- گام‌های اجرایی ۳ و ۴ درروش پوش و کند ۱۹
شکل ۸- گام‌های اجرایی ۵ و ۶ در روش پوش و کند ۲۰
شکل ۹- گام های اجرایی ۷ و ۸ در روش پوش و کند ۲۰
شکل ۱۰- اجرای تونل به روش ناتم: (الف) تونل نیایش در محل سه‌راهی – مراحل اولیه اجرا، (ب) تونل نیایش در محل سه‌راهی – پس از اتمام خاک‌برداری، (ج) تونل خط ۳ متروی شهر تهران ۲۲
شکل ۱۱- گام‌های اجرایی ۱ و ۲ درروش ناتم ۲۴
شکل ۱۲- گام‌های اجرایی ۳ و ۴ درروش نایتم ۲۴
شکل ۱۳- گام‌های اجرایی ۵ و ۶ درروش ناتم ۲۴
شکل ۱۴- گام های اجرایی ۷ و ۸ در روش ناتم ۲۴
شکل ۱۵- دستگاه حفاری ماشینی تمام مقطع مترو شیراز ۲۶
شکل ۱۶- ریزش ایجادشده به علت حفاری بیش از حجم متعارف در یک رینگ در حفاری به روش TBM در خط ۳ مترو تهران ۲۷
شکل ۱۷- پلان تونل رسالت در نقشه تهران در زمان ساخت تونل ۳۹
شکل ۱۸- پروفیل طولی تونل رسالت ۴۰
شکل ۱۹- مراحل حفاری و نام‌گذاری گالری‌ها در تونل بلند رسالت (به همراه شماره پین‌های قرائت رفتارسنجی) ۴۰
شکل ۲۰- مشخصات تونل کردستان ۴۴
شکل ۲۱- مراحل اجرای تونل نیایش ۴۵
شکل ۲۳- چالش‌های اجرایی تونل نیایش ۵۱
شکل ۲۴- طرح رفتارسنجی ساختمان‌های مسیر تونل نیایش (گزارش فاز ۲ رفتارسنجی پروژه تونل نیایش ۱۳۹۰) ۵۳
شکل ۲۵- برخی جزئیات روش اجرای Top-Down ۶۰
شکل ۲۶- عبور مترو اهواز از زیر رودخانه و رود کارون ۶۴
شکل ۲۷- وجود تأسیسات رو و زیرزمینی در تلاقی با محل احداث ایستگاه‌های مترو اهواز و نحوه نگهداری ۶۵

فهرست جداول

جدول ۱- طول رمپ و تونل‌های نیایش ۴۴
جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های مسئله‌ساز روش‌های مختلف اجرایی ۶۶
جدول ۳- چالش‌های اجرای تونل‌های رسالت، نیایش و مترو اهواز ۶۸

۱- مقدمه

توسعه پایدار شهری با رویکرد استفاده از فضاهای زیرسطحی یکی از رهیافت‌های نوین درزمینه‌ی شهرسازی است. این رویکرد ضمن استفاده از قابلیت‌های مثبت فضاهای زیرسطحی تلاش می‌کند تا مسائل و مشکلات شهرها از قبیل کمبود فضا، مسائل حمل‌ونقل و مشکلات زیست‌محیطی را حل نماید. همچنین، ازجمله فاکتورهای توسعه اقتصادی، افزایش ساخت فضاهای زیرسطحی می‌باشد. به‌واسطه هزینه‌های سرسام‌آور و مشکلات عدیده تملک اراضی شهری، در مقایسه با توسعه روزمینی، فضاهای زیرسطحی ارزان‌تر می‌باشند.

در حال حاضر در تمام کشورهای جهان فضاهای زیرسطحی زیادی با کاربری‌های متنوع، در حال بهره‌برداری هستند. پایین‌تر بودن هزینه‌های اولیه و عملیاتی نسبت به ایجاد تأسیسات در سطح زمین، فراغت از مسائل توپوگرافی و عدم محدودیت در استفاده از فضا، ایمنی مناسب در مقابل حوادث طبیعی و حملات هوایی و بالاخره پایین بودن هزینه‌های سرمایش و گرمایش ازجمله مزایایی است که باعث رویکرد به استفاده از فضاهای زیرسطحی در عرصه‌های گوناگون شده است.

از اصلی‌ترین فضاهای زیرسطحی در توسعه پایدار شهری، تونل‌های ترافیکی و تونل‌های مترو هستند که باهدف تسهیل ترافیک سطحی احداث می‌شوند. البته اجرای این قبیل تونل‌ها در محیط‌های شهری همواره با چالش‌های جدی و مسائل ویژه‌ای همراه بوده است. تونل‌سازی در محیط‌های شهری ویژگی‌های خاصی به شرح زیر دارد (Guglielmetti et al. 2003):

- همانند سایر سازه‌ها، طرح تونل باید به‌طور قابل‌توجهی با کاربری نهایی و مشخصات عملکردی تونل مرتبط باشد. ولیکن، باوجود آزادی ظاهری از قید توپوگرافی و طراحی سه‌بعدی، قیدهای متعددی بروز می‌کنند تا موقعیت محور تونل را محدود کنند. درنتیجه، مزاحمت‌های مکرر و اغلب غیرقابل‌اجتنابی از طرف ساختمان‌های واقع بر روی سطح زمین، تأسیسات زیرزمینی و سایر سازه‌های زیرزمینی از قبل موجود حادث می‌شود.
- ازآنجاکه اخذ مجوزهای لازم یا اشغال سطح زمین در محیط‌های شهری دشوار است، دسترسی برای انجام مطالعات ژئوتکنیکی لازم می‌تواند محدود شود.
- به دلایل عملکردی و اقتصادی، تونل‌سازی شهری عموماً در اعماق سطحی انجام می‌شود. این مسئله یکسری عواقب و آثار زمین‌شناسی و زیرسطحی را به همراه دارد.
- اعماق سطحی زمین اغلب شامل خاک ضعیف، نهشته‌های رسوبی، یا خاک‌های دستی است. وضعیت زمین یکی از فاکتورهای کلیدی طراحی تونل و کنترل‌کننده‌های عملیات اجرایی است.
- در مناطق مختلفی از جهان، شهرها دارای پیشینه تاریخی مهم هستند. بدین روی، ممکن است زیرزمین در اعماق سطحی نهشته‌های باستان‌شناسی وجود داشته باشد؛ این نهشته‌ها باید شناخته‌شده و شیوه برخورد با آن‌ها، به‌ویژه هنگام طراحی دسترسی‌های تونل به شفت‌های سرویس مشخص شود.

- تونل‌سازی شهری در اعماق سطحی، حتی در کنترل‌شده ترین شرایط اجرایی تونل، باعث وقوع نشست می‌شود. مقدار نشست تابع فاکتورهای متعدد به هم وابسته‌ای است از قبیل مقاومت زمین، واکنش زمین به حفاری، کنترل پایداری جبهه و مقطع تونل در طول زمان اجرا، وجود آب زیرزمینی و رژیم هیدروژئولوژیکی و ... .
- واکنش ساختمان‌ها و تأسیسات به نشست‌های ناشی از تونل‌سازی هم در شرایط معمولی و هم در شرایط غیرمعمولی (با در نظرگیری چند سناریوی محتمل) باید به‌طور سخت‌گیرانه‌ای موردبررسی قرار داده شود.
- مبذول داشتن حداکثر تلاش در جهت کاهش رخداد شرایط نامتعارف (نشست‌های اضافی و/یا ریزش) تا حد امکان و منطقی، یک امر ضروری و الزامی است.
- سطح بالای اندرکنش با جریان زندگی روی سطح زمین باید تحلیل‌شده و توسط راه‌حل‌هایی که با کمترین تداخل و مزاحمت موردپذیرش مردم باشد، به‌دقت حل‌وفصل شود. این به معنای تهیه یک طرح مناسب برای انحراف موقت ترافیک، جانمایی دقیق کارگاه‌ها در پلان، توجه ویژه به مسئله کنترل غبار و سروصدای منتشره و مراقبت ویژه در خصوص مسائل مربوط به ایمنی است.
- یک طرح پایش گسترده ژئوتکنیکی، سازه‌ای و زیست‌محیطی لازم است که نه‌تنها به‌صرف هزینه مستقیم و اضافی؛ بلکه به نیروی انسانی اضافی نیز نیاز دارد.
- عموماً تونل‌سازی در محیط شهری، ارتباط تنگاتنگی با اجرای پروژه‌های زیرساخت‌های استراتژیک دارد. سیاستمداران و سرمایه‌گذاران پروژه در کنار عموم مردم، همگی امنیت بودجه پروژه در صرف هزینه و زمان اجرای آن را تقاضا خواهند نمود.

از دیگر سوی، در طراحی و اجرای پروژه‌های تونل شهری همواره مسائل زیر از درجه بالایی از اهمیت برخوردار بوده‌اند (فرزانه ۱۳۹۱):

- هزینه: شامل مجموع هزینه‌های طراحی و اجرای تونل
- زمان: که شامل زمان موردنیاز برای طراحی‌های مفهومی، پایه، مراحل اول و دوم و نیز زمان اجرای تونل می‌شود و در بسیاری پروژه‌ها تطویل زمان طرح و اجرای تونل مسائل ویژه‌ای به پروژه تحمیل کرده است.
- ایمنی: شامل ایمنی کارگران، مهندسین و پرسنل اجرای تونل، شهروندان و سازه‌ها و مستحدثات سطحی
- کیفیت مصالح و اجرا: این عامل همواره از عوامل مهم اجرای پروژه‌ها بوده‌اند. در اجرای تونل‌های شهری کیفیت مصالح و اجرا با توجه به دشواری‌های مربوط به ساخت تونل از اهمیت بالاتری برخوردار می‌شود.
- بهداشت محیط‌زیست: که مسائلی چون آلودگی هوا، آلودگی صوتی، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، لرزش‌ها و ... را دربر می‌گیرد.
- تداخل با محیط پیرامون: شامل مواردی چون اختلال در ترافیک، اختلال در کسب‌وکار و ...

تلفیق معیارهای فوق با مسائل و چالش‌های ذکرشده، همواره باعث شده تا تونل‌سازی مسئله‌ای دشوار و پیچیده باشد. گزارش حاضر سعی بر آن دارد تا این مسائل را تشریح نماید. با توجه به وجود برخی مراجع در خصوص چالش‌های ویژه تونل‌سازی در شهر تهران، به این موارد نیز اشاره‌شده است. در ادامه، ابتدا روش‌های مختلف اجرای تونل موردبررسی قرار داده‌شده و سپس، انواع مخاطرات و چالش‌های اجرای تونل‌ها تشریح شده‌اند. در انتها نیز تجارب کسب‌شده در جریان اجرای چند تونل شهری به‌طور خلاصه ارائه‌شده‌اند.

۲- انواع روش‌های اجرای تونل‌های شهری

پیشینه حفر تونل در کشور به احداث قنوات برای دستیابی به آب‌های زیرزمینی و به بیش از ۳۰۰۰ سال پیش می‌رسد. حفر قنات‌هایی به طول ده‌ها کیلومتر در عمق تا چند صد متر، نشان از توانایی و تبحر ایرانیان قدیم در تونل‌سازی دارد. در حال حاضر نیز با پیشرفت فناوری و افزایش نیروهای متخصص و مجرب، انواع تونل‌های شبکه حمل‌ونقلی، صنعتی، معدنی و ... به روش‌های گوناگون در کشور اجرا می‌شوند.

ازآنجاکه احداث تونل‌ها معمولاً بر عناصر طبیعی پیرامون مانند خاک و سنگ تأثیر می‌گذارد، توجهی ویژه در مورد کاهش اثرات مخرب آن ضروری است، چراکه این امر سبب از بین رفتن تعادل طبیعی این عناصر می‌شود. به همین علت است که هدف اصلی در انواع روش‌های حفاری، به حداقل رساندن تغییرات زمین در زمان حفاری است.

همچنین یکی از مهم‌ترین عوامل اصلی درزمینه پیشرفت و تکامل صنعت تونل‌سازی، پیشرفت‌هایی است که در مورد روش‌های حفاری آن انجام‌گرفته است. ازجمله روش‌های حفاری که بدین منظور ابداع‌شده‌اند می‌توان از روش‌های سنتی ابتدایی، روش‌های حفاری و حفاظت مرحله‌به‌مرحله، روش‌های حفاری با ماشین‌آلات اختصاصی، روش حفاری تمام مقطع و... نام برد. در ادامه به‌منظور آشنایی بیشتر با چگونگی حفر تونل بخصوص تونل‌های مترو، روش‌های حفاری که در احداث تونل‌های شبکه متروی تهران به‌کاررفته‌اند، تشریح می‌شوند.

روش‌های عمده برای اجرای تونل‌های شهری عبارت‌اند از:

- روش کند و پوش[1]
- روش پوش و کند[2]
- روش حفاری زیرزمینی اتریشی ناتم[3]
- روش حفاری ماشینی تمام مقطع[4]

۲-۱- روش کند و پوش

اجرای فضای زیرزمینی (تونل) بر مبنای روش کند و پوش (ترانشه باز) به این نحو انجام می‌شود که ابتدا مسیر تونل تا عمق نهایی به‌صورت کامل حفاری‌شده و سپس ساخت سازه تونل انجام می‌پذیرد. این روش در محل‌هایی

1. Cut & Cover Method
2. Cover & Cut Method
3. New Austrian Tunneling Method (NATM)
4. Tunnel Boring Machine (TBM)

قابل‌اجرا است که بتوان تردد و جریان ترافیک عبوری را در محل موردنظر تا اتمام عملیات ساخت سازه تونل متوقف نمود. در اغلب موارد به خاطر مسائل ترافیکی استفاده از این روش مقدور نیست.

اساسی‌ترین چالش در اجرای این روش، پایدارسازی گود است. در این روش پایدارسازی به دو شکل کلی زیر انجام می‌شود:

- خاک‌برداری با ***شیب پایدار زمین*** انجام می‌پذیرد که این شیب به مشخصات مکانیکی و پارامترهای ژئوتکنیکی در مسیر پروژه بستگی دارد.
- گودبرداری به‌صورت حفر ترانشه با دیواره قائم و پایدارسازی دیواره از طریق ***اجرای سازه نگهبان***. اجرای این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها ساده‌تر است. اگرچه این روش اثرات بیشتری روی محیط اطراف دارد اما نسبت به سایر روش‌ها ارزان‌تر است. البته در مواردی که عمق احداث تونل زیاد بوده و خاک ازنظر مقاومتی ضعیف باشد، هزینه‌های نگهداری جداره گود افزایش‌یافته و صرفه اقتصادی این روش باید بررسی گردد. سازه نگهبان خاک می‌تواند به یکی از این روش‌ها اجرا شود:

۲-۱-۱- تثبیت با سپرکوبی

روش استفاده از سپرکوبی امروزه توسعه گسترده‌ای در مناطق مختلف جهان برای ساخت دیواره‌های قائم که ملزم به تحمل بارهای ناشی از فشار آب‌وخاک باشند، پیداکرده است. این روش در زمینه‌های مختلف اجرایی ازجمله اجرای دیواره‌های ساحلی و اسکله‌ها، راه‌ها و گودبرداری‌های عمیق به‌کاربرده شده است.

درروش سپرکوبی برای دیواره‌های کم ارتفاع از پروفیل‌های ساده استفاده می‌شود ولی در مورد خاک‌های سخت و یا بسیار سست و همین‌طور دیواره‌های مرتفع از پروفیل‌های ترکیبی استفاده می‌شود که دارای مقاومت خمشی بسیار بالایی می‌باشند. همچنین در دیواره‌های موقت و کوتاه، سپری بدون مهار اجراشده و به‌صورت طره عمل می‌نماید. ولی لازم است در دیواره‌های عمیق از مهار برای پایدار ساختن سپری استفاده کرد.

۲-۱-۲- شمع‌های فولادی کوبشی

شمع‌های فولادی به‌عنوان سازه نگهبان جهت تثبیت و پایدارسازی دیواره ترانشه‌های عمیق، موارد استفاده گسترده‌ای در پروژه‌های عمرانی دارد. در این روش با کوبش شمع‌های فولادی در کنار یکدیگر به‌صورت مماسی، خاک‌برداری ازیک‌طرف ردیف شمع‌های کوبیده شده امکان‌پذیر می‌گردد. با توجه به عمق گودبرداری موردنیاز و مشخصات مکانیکی خاک منطقه، قطر شمع فولادی متغیر می‌باشد. البته باید اشاره کرد به دلیل ایجاد سروصدا و آلودگی صوتی و همچنین ایجاد لرزش در سازه‌های اطراف، از این روش نمی‌توان در مناطق شهری استفاده نمود.

۲-۱-۳- اجرای شمع‌های بتنی حفرشده - حفاری با دستگاه حفار و نصب غلاف فلزی

استفاده از شمع‌های بتنی حفرشده[1] به‌عنوان سازه نگه‌دارنده محل گودبرداری، به این‌گونه است که ابتدا ردیف چاه شمع‌ها به‌صورت یک‌درمیان و در امتداد دیواره قائم محل خاک‌برداری، حفر و به‌منظور جلوگیری از ریزش دیواره چاه، غلاف شده و بتن‌ریزی بدنه شمع اجرا می‌شود. سپس در فضای باقیمانده بین دو شمع کیسینگ گذاری

1. Drilled Pile

شده و به‌صورت مماس با آن‌ها، چاه شمع میانی حفاری و بتن‌ریزی می‌شود.

۲-۱-٤- روش اجرای شمع‌های بتنی درجا

چنانکه اشاره شد استفاده از شمع‌های بتنی درجا به‌عنوان دیواره نگه‌دارنده گودبرداری‌های عمیق یکی از روش‌های متداول و مرسوم در کشور ما برای اجرای خاک‌برداری است. ابتدا چاه به‌صورت دستی توسط مقنی و یا به‌صورت مکانیزه با استفاده از مته حفاری تا رسیدن به عمق مناسب حفاری می‌گردد و پس از جاگذاری شبکه آرماتورها، بتن‌ریزی شمع‌ها انجام می‌شود. روش حفر مکانیزه، پس از حفاری تا رسیدن به عمق مناسب با چرخاندن معکوس مته، مصالح حفرشده از چاه خارج می‌شود که این عمل با بتن‌ریزی همزمان به داخل چاه همراه است.

۲-۱-٥- اجرای دیوار (سپر) بتنی درجا به همراه مهار افقی

در این روش دیوار در طول به قطعات ۵ الی ۶ متری تقسیم می‌شود و عملیات حفاری، آرماتور گذاری و انجام می‌گردد. سپس با توجه به عمق گودبرداری، بتن‌ریزی این قطعات به‌تناوب در ارتفاعی از دیوار بتنی که پس از خاک‌برداری به‌صورت طره‌ای عمل می‌نماید از طریق نصب مهارهای افقی مقید شده و به‌این‌ترتیب پایدارسازی دیواره ترانشه محل گودبرداری تأمین می‌شود.

۲-۱-٦- تثبیت دیواره گودبرداری با استفاده از شمع درجا و مهاربندی داخلی[1]

این روش مشابه روش اجرای شمع بتنی درجا است با این تفاوت که لزومی به اجرای شمع‌ها به‌صورت چسبیده به یکدیگر نبوده و می‌توان شمع‌ها را بافاصله از هم اجرا نمود. این فاصله تابع مشخصات مکانیکی خاک و عمق گودبرداری است. روش اجرا به این صورت است که ابتدا چاه محل شمع‌ها حفاری می‌گردد که حفاری می‌تواند به‌صورت دستی به‌وسیله مقنی و یا به‌صورت مکانیزه و به کمک ماشین حفاری صورت گیرد. سپس شبکه آرماتور در درون چاه قرارگرفته و بتن‌ریزی انجام می‌شود. پس از اجرای شمع‌های بتنی درجا، خاک‌برداری از سطح زمین شروع‌شده و همزمان اجرای مهاربندی داخلی (استرات‌بندی) انجام می‌شود. همچنین می‌توان بجای استفاده از شمع بتنی درجا از شمع‌های فولادی با مقطع H استفاده نمود. شایان‌ذکر است درصورتی‌که ابعاد حفاری بزرگ باشد، استفاده از استرات‌بندی غیرممکن شده و طرح جایگزین استفاده از انکر[2] می‌باشد. انکرها اعضای کششی هستند که ازیک‌طرف به شمع وصل شده و از سوی دیگر در خاک مهار می‌شوند.

۲-۱-۷- تثبیت دیواره گودبرداری از طریق مسلح سازی با استفاده از میل مهار[3]

نصب میل مهار در خاک یکی از روش‌های مسلح سازی دیواره‌های ترانشه حاصل از خاک‌برداری بوده و به‌منظور تقویت دیواره‌های خاکی که احتمال ناپایداری تحت اثر وزن خود را دارند، اجرا می‌شود. در این روش بر اساس نتایج تحلیل‌های پایداری در محدوده گودبرداری و شناسایی مناطق مستعد لغزش و ناپایداری، سطوح گسیختگی احتمالی و قابل تشکیل در توده خاک از طریق نصب میلگردهای فولادی مهار می‌گردد. این میلگردها با طول‌های مختلف در گمانه‌هایی که قبلاً در پیشانی کار حفاری‌شده‌اند، قرار داده‌شده و با تزریق ملات ماسه سیمان

1. Cast in-situ pile with strut
2. anchor
3. Nailing

(یا پمپ کردن ملات) به داخل گمانه در محل خود نگهداری شده و پس از کسب گیرش کافی سیمان، سر میلگرد با استفاده از نصب صفحه و پیچ مهره مقید می‌شود به‌نحوی‌که با اعمال پیچش کافی بر پیچ، صفحه فلزی اندکی به سمت خاک رانده‌شده و میلگردها از طریق مقاومت برشی بین سطح ملات و خاک تحت کشش قرار گیرند.

مراحل اجرای روش کند و پوش در صورت استفاده از سازه نگهبان برای حفاظت ترانشه به‌صورت زیر می‌باشد:

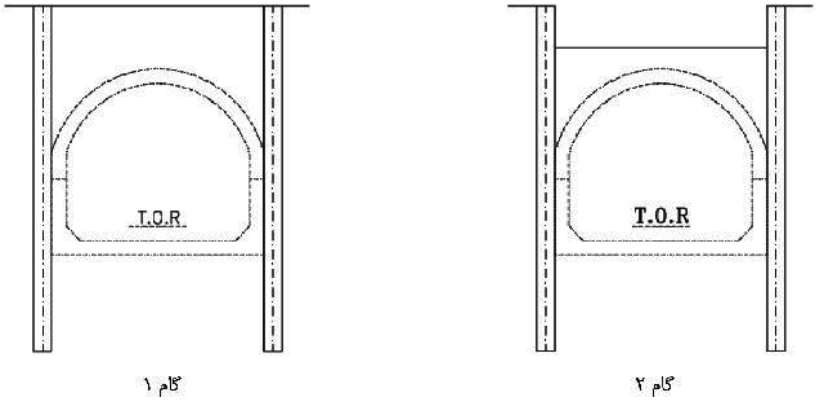
گام اجرایی ۱: اجرای شمع‌های سازه نگهبان (شکل ۱).

گام‌های اجرایی ۲ و ۳: حفاری بخش فوقانی و نصب استرات های ردیف اول (شکل‌های ۱ و ۲).

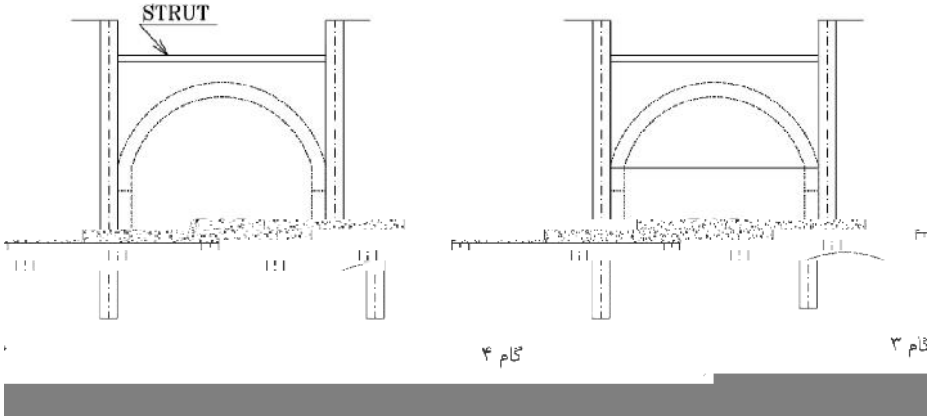
گام‌های اجرایی ۴ و ۵ و ۶: خاک‌برداری تا تراز استراتهای ردیف دوم، نصب استراتها و حفاری تا تراز کف تونل (شکل‌های ۲ و ۳).

گام‌های اجرایی ۷ و ۸: پس از اجرای بتن مگر، دال کف و قسمتی از دیواره سازه نهایی ساخته می‌شود (شکل ۴).

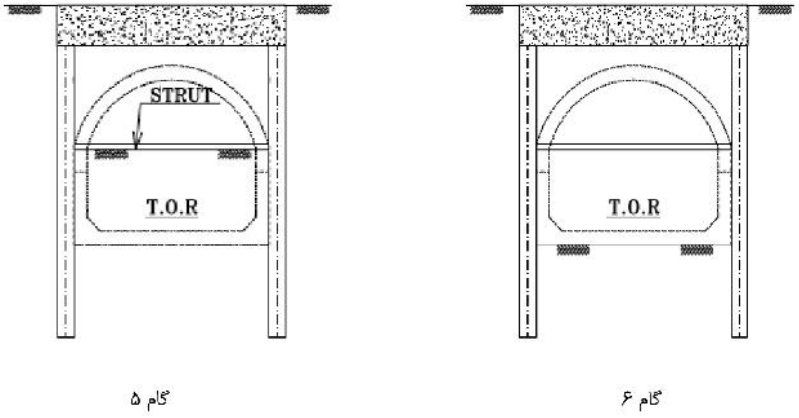
در مرحله بعد پس از برداشتن استراتهای ردیف دوم سازه نهایی تکمیل می‌گردد و در پایان استراتهای ردیف اول برداشته‌شده و قسمت فوقانی شمع نیز تخریب می‌گردد.



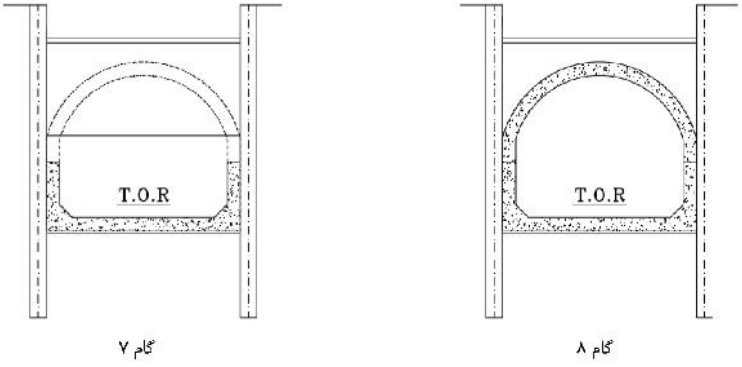
شکل ۱- گام‌های اجرایی ۱ و ۲ درروش کند و پوش



شکل ۲- گام‌های اجرایی ۳ و ۴ در روش کند و پوش



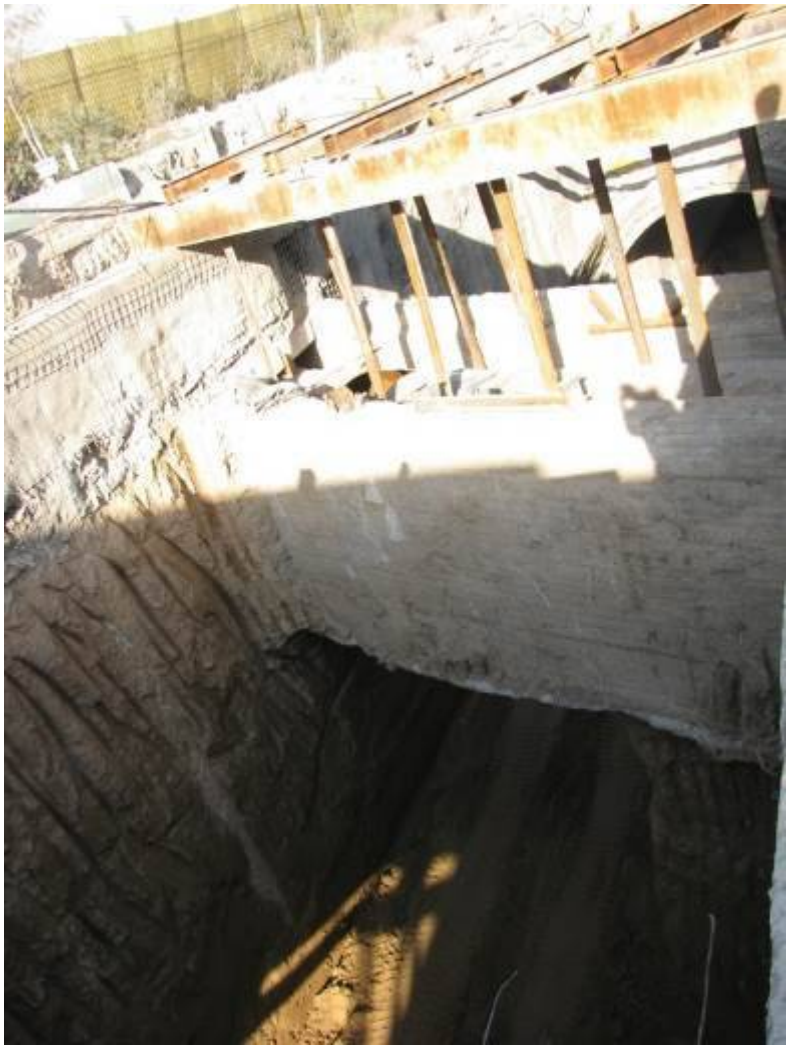
شکل ۳- گام‌های اجرایی ۵ و ۶ در روش کند و پوش



شکل ۴- گام های اجرایی ۷ و ۸ در روش کند و پوش

علاوه بر مسئله نحوه اجرای سازه نگهبان خاک جهت حفاظت از شیب طرفین گود که پیش‌تر بررسی شد، روش کند و پوش مسائل و مشکلات دیگری نیز دارد. به‌طورکلی برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های مسئله‌ساز روش‌های روباز عبارت‌اند از (فرزانه ۱۳۹۱):

- ✓ اختلال در ترافیک، کسب‌وکار و تردد ساکنین
- ✓ نشست‌ها و تغییر مکان‌های افقی زمین در بالای گود
- ✓ تداخل با کانال‌ها، لوله‌ها و سایر تأسیسات زیرزمینی (شکل ۵)
- ✓ تأثیر بارندگی بر روی راندمان کار
- ✓ مسائل مربوط به پر کردن بالای سقف تونل و اجرای زیرسازی و روسازی خیابان



شکل ۵- تداخل با کانال‌های زیرزمینی حین اجرای تونل به روش کند و پوش (فرزانه، ۱۳۹۱)

۲-۲- روش پوش و کند

مبنای روش پوش و کند بر این اصل استوار است که در طول دوره ساخت سازه زیرزمینی، تردد بر روی محل جریان داشته و فقط بتوان برای دوره کوتاهی جریان ترافیک را متوقف نمود. در این روش ابتدا با اجرای ردیف‌های شمع و نصب عرشه (به‌صورت پیش‌ساخته یا دال درجا) بر روی آن‌ها، امکان بازگشایی ترافیک را بر روی محدوده عملیات اجرایی برقرار کرده، سپس اقدام به خاک‌برداری و اجرای سازه زیرزمینی در محل موردنظر می‌نمایند.

گام‌های اجرای سازه زیرزمینی در این روش به‌صورت زیر می‌باشند:

گام اجرایی ۱: ردیف‌های شمع از طریق حفر چاه تا عمق موردنظر، نصب شبکه میلگرد بتن‌ریزی داخل چاهک (شکل ۶).

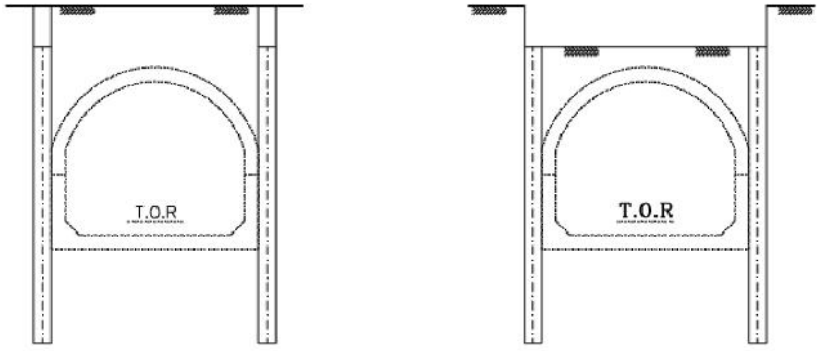
گام اجرایی ۲: مسدود کردن ترافیک و خاک‌برداری تا تراز زیر دال (شکل ۶).

گام اجرایی ۳: نصب شبکه میلگرد و بتن‌ریزی دال بتنی یا نصب تیرهای پیش‌ساخته (شکل ۷).

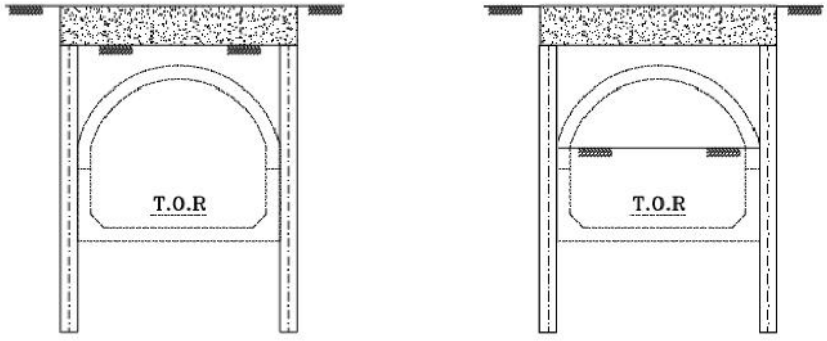
گام اجرایی ۴: برقرار کردن تردد ترافیک و خاک‌برداری زیر دال بتنی (شکل ۷).

گام‌های اجرایی ۵ و ۶: نصب استرات و خاک‌برداری زیر شمع‌ها تا تراز کف تونل (شکل ۸).

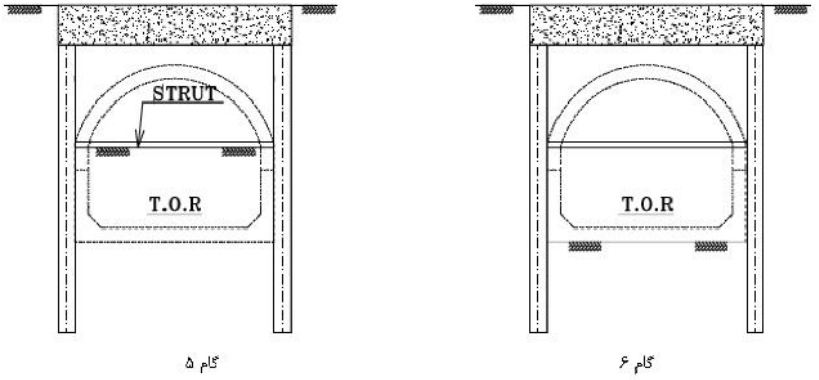
گام‌های اجرایی ۷ و ۸: اجرای سازه نهایی تونل (شکل ۹).



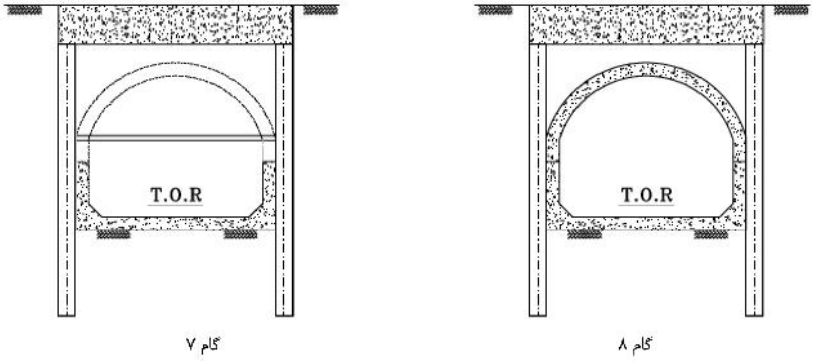
شکل ۶- گام‌های اجرایی ۱ و ۲ درروش پوش و کند



شکل ۷- گام‌های اجرایی ۳ و ۴ درروش پوش و کند



شکل ۸- گام‌های اجرایی ۵ و ۶ در روش پوش و کند



شکل ۹- گام های اجرایی ۷ و ۸ در روش پوش و کند

ویژگی‌های مسئله‌ساز روش پوش و کند عبارت‌اند از (قناد و همکاران، ۱۳۹۰):

- ✓ تداخل با کانال‌ها، لوله‌ها و سایر تأسیسات زیرزمینی
- ✓ نیاز به تأمین زمین جهت اجرای سقف تونل یا ایستگاه
- ✓ اختلال در ترافیک سطحی جهت اجرای دال کف
- ✓ دقت ناکافی در اجرای شمع‌های کناری و میانی درصورتی‌که در نما باشند

۲-۳- روش نوین تونل‌سازی اتریشی

روش نوین تونل‌سازی اتریشی یا به عبارتی روش ناتم (NATM)، از روش‌های بسیار متداول در احداث تونل است که بین سال‌های ۱۹۵۷ و ۱۹۶۵ در اتریش پایه‌گذاری شد. اساس این روش استفاده بهینه از تنش‌های ژئوتکنیکی خاک یا سنگ‌های پیرامونی برای پایداری تونل است. درواقع اساس این روش بر اتصال پوسته محافظ به بخشی از خاک است که دیگر تغییر شکل ندارد؛ به‌عبارت‌دیگر استفاده از مقاومت خود خاک برای پایدارسازی تونل. در این روش به کمک حفر یک شفت (چاه) و یا اجرای رمپ دسترسی بسته به شرایط ترافیکی به محل

موردنظر دسترسی یافته و ازآنجا شروع به عملیات حفاری به‌صورت زیرزمینی برای احداث تونل می‌نمایند. در پروژه‌های احداث زیرزمینی مسیر تونل‌های شهری، هندسه سازه عموماً به‌صورت تونل نعل اسبی تک مقطع بوده که عملیات حفاری به‌صورت دستی یا ماشینی بسته به ابعاد چاه یا رمپ دسترسی برای انتقال ماشین‌آلات و تجهیزات صورت می‌گیرد. در این روش مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش کار پایدارسازی توده سربار خاک فوقانی پس از حفاری تونل و باربرداری از توده خاک است. چنانچه ضخامت توده سربار خاک کم باشد، می‌توان اقدام به تقسیم مقطع تونل به جبهه‌های مختلف کاری نموده تا عمل باربرداری به علت حفاری و باز توزیع تنش در توده خاک به‌تدریج انجام پذیرد. روش ناتم همواره بر مبنای برداشت‌های ابزار دقیق و پایش پیوسته عکس‌العمل توده زمین به عملیات حفاری قرار داشته و طراحی سازه نگهبان خاک و نیز طول گام‌های حفاری و سرعت اجرا بر اساس نتایج حاصل از ابزار دقیق و رفتارسنجی مورد بازبینی و اصلاح قرار می‌گیرد. شکل ۱۰ چند تونل در شهر تهران که به روش ناتم حفر و اجرا شده‌اند را نشان می‌دهد.

مراحل اجرایی روش حفر تونل زیرزمینی به این صورت انجام می‌پذیرد که در ابتدا دسترسی به رقوم خط پروژه از طریق اجرای شفت یا رمپ دسترسی میسر گشته، سپس جبهه کاری بازگشایی می‌شود. در این مورد لازم به توضیح است درصورتی‌که دسترسی به رقوم پروژه از طریق حفر چاه شفت امکان‌پذیر باشد، پس از حفاری چاه تا رقوم موردنظر و تثبیت دیواره آن، ماشین‌آلات و تجهیزات از طریق بالابری با ظرفیت مشخص که در سر چاه مستقرشده به کف چاه انتقال‌یافته و عملیات حفاری تونل در دو جبهه مخالف جهت یکدیگر انجام می‌شود. لیکن در شرایطی که محوطه کاری موردنیاز برای حفاری شفت دسترسی قابل استحصال نباشد و نیز ازلحاظ مدت‌زمان عملیات اجرایی محدودیت وجود داشته باشد، اجرای شفت به دلیل صرف زمان زیاد برای حفاری و تحکیم دیواره آن تا رسیدن به رقوم موردنظر گزینه فنی و اجرایی مناسبی نبوده و با اجرای رمپ از سطح زمین تا رقوم پروژه، امکان دسترسی به جبهه کاری فراهم می‌گردد. در این حالت طول رمپ به نحوی در نظر گرفته می‌شود که با توجه به اختلاف رقوم سطح خیابان تا خط پروژه شیب ایجادشده از مقدار مجاز حداکثر ۱۵ درصد فراتر نرود. لذا با توجه به فضای پیش‌بینی‌شده برای عملیات اجرایی و تجهیز کارگاه می‌توان مسیر رمپ را به‌صورت قوسی یا مستقیم طرح نموده و از یک‌راه فرعی مانند کوچه یا خیابان اقدام به حفاری مسیر رمپ نمود. خاطرنشان می‌سازد رمپ دسترسی از طریق حفر ترانشه طولی احداث‌شده و با افزایش عمق گودبرداری، تحکیم دیواره ترانشه و ایمن‌سازی محدوده عملیات اجرایی ضروری خواهد بود. لذا پیش از اقدام به حفاری مسیر رمپ می‌بایست با اجرای شمع‌های درجا در فواصل مشخص بسته به مشخصات مکانیکی خاک و بارهای اعمالی حین ساخت (و نصب مهار یا قیدهای جانبی) به‌نحوی‌که اجازه تغییر مکان جانبی به سازه نگهبان داده نشود، اقدام به تثبیت دیواره محدوده گودبرداری مسیر رمپ نمود. لازم به ذکر است روش شرح داده‌شده در مورد تثبیت دیواره گود یکی از متداول‌ترین روش‌های قابل‌اجرا در مناطق شهری بوده و ازلحاظ اجرایی نیز نیازمند دانش فنی پیچیده یا تجهیزات خاص نمی‌باشد. علاوه بر این در صورت تأمین سربار کافی در بخش‌هایی از مسیر رمپ دسترسی، می‌توان ادامه مسیر رمپ را به‌صورت تونل زیرزمینی احداث نمود.

شکل ۱۰- اجرای تونل به روش ناتم: (الف) تونل نیایش در محل سه‌راهی – مراحل اولیه اجرا، (ب) تونل نیایش در محل سه‌راهی – پس از اتمام خاک‌برداری، (ج) تونل خط ۳ متروی شهر تهران (آرشیو شرکت مهندسین مشاور سیویار)

در بخش‌هایی از مسیر که روباره خاکی و شرایط ژئومکانیکی تودهٔ خاک ازنظر مقاومتی زمان خود ایستایی[1] کافی جهت اجرای سازه نگهبان را فراهم می‌سازد، امکان اجرای سازه به‌صورت زیرزمینی وجود خواهد داشت. بدیهی است در بخش‌هایی که به دلیل وجود ساختمان‌ها و خیابان‌های پرتردد شهری اجرای زیرزمینی الزامی می‌باشد و درعین‌حال به علت سست بودن تودهٔ خاک و ضعف پارامترهای ژئومکانیکی تودهٔ خاک، زمان خود ایستایی کافی جهت اجرای سازه نگهبان وجود نداشته باشد، لازم است با اجرای روش‌های خاص همچون پیش لوله‌گذاری[2]، تزریق و روش‌های پیش تحکیم پایداری، جبههٔ حفاری تأمین گردد که در این صورت هزینه‌های اجرایی به‌شدت افزایش می‌یابد.

این روش تأثیرات کمی بر ترافیک و تردد وسایل نقلیه و عابرین در سطح شهر دارد اما به‌هرحال ممکن است منجر به وقوع نشست‌های قابل‌ملاحظه در سطح زمین گردد و ساختمان‌های اطراف و تأسیسات شهری مدفون را تحت تأثیر قرار دهد که در این صورت اجرای تمهیدات موردنیاز جهت کاهش تغییر شکل‌های زمین ممکن است موجب کندی روند اجرا و افزایش هزینه‌های پروژه گردد.

در ادامه گام‌های اجرای تونل به روش حفاری زیرزمینی سنتی برای تونلی که در دو مرحله حفاری می‌شود ارائه‌شده است.

گام‌های اجرایی ۱ و ۲: خاک‌برداری و اجرای سازه اولیه نیمه فوقانی مقطع (شکل ۱۱).

گام‌های اجرایی ۳ و ۴: حفاری و اجرای سازه اولیه نیمه چپ بخش تحتانی در طول محدود (شکل ۱۲).

گام‌های اجرایی ۵ و ۶: حفاری و اجرای سازه اولیه نیمه راست بخش تحتانی در طول محدود (شکل ۱۳).

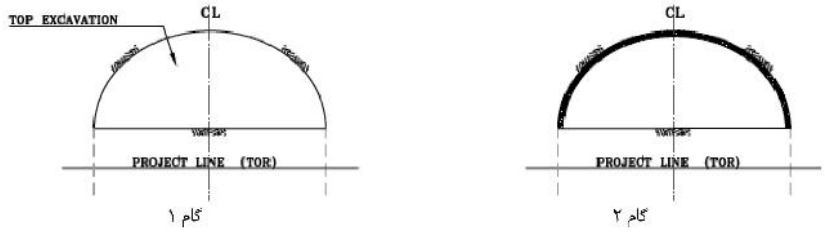
گام اجرایی ۷: اجرای کف بند پوشش اولیه (شکل ۱۴).

گام اجرایی ۸: اجرای سازه نهایی تونل (شکل ۱۴).

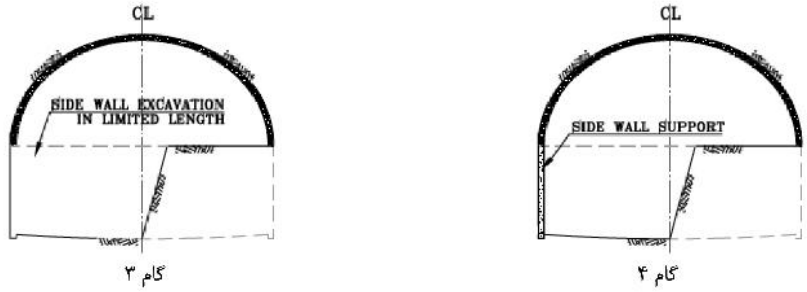
ویژگی‌های مسئله‌ساز روش ناتم عبارت‌اند از (فرزانه ۱۳۹۱):

- ✓ کندی پیشرفت
- ✓ نیاز به تملیک و دسترسی‌های بیشتر
- ✓ خطر ناپایداری و ریزش در جبهه حفاری
- ✓ خطر نشست سطح زمین
- ✓ مشکلات مربوط به اجرای ابزار دقیق لازم و کافی
- ✓ خطرات مربوط به آلودگی محیط
- ✓ نیاز به پایین آوردن سطح سفره آب زیرزمینی
- ✓ مشکلات کنترل کیفیت اجرا
- ✓ مسائل مربوط به تزریق‌های تماسی و تحکیمی موردنیاز

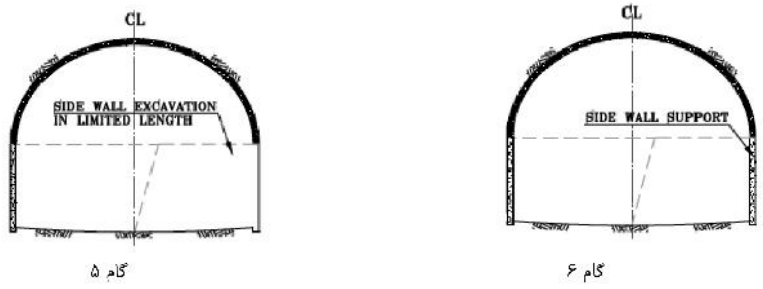
1. Stand-Up time
2. forepoling



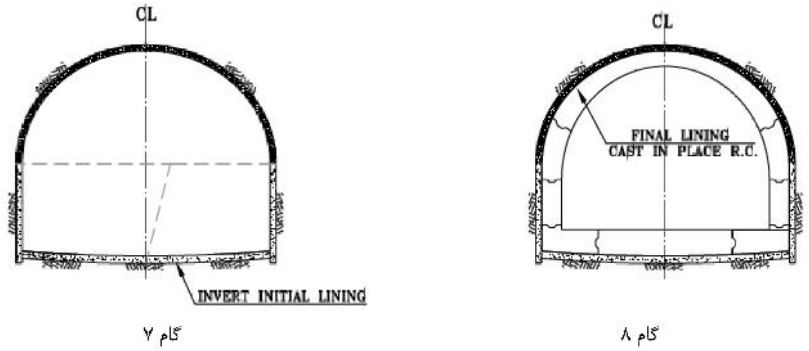
شکل ۱۱- گام‌های اجرایی ۱ و ۲ درروش ناتم



شکل ۱۲- گام‌های اجرایی ۳ و ۴ درروش نایتم



شکل ۱۳- گام‌های اجرایی ۵ و ۶ درروش ناتم



شکل ۱۴- گام های اجرایی ۷ و ۸ در روش ناتم

۲-٤- روش حفاری ماشینی تمام مقطع

دستگاه حفاری تونل[1] یا تی‌بی‌ام که با نام مول[2] نیز شناخته می‌شود، دستگاه مکانیزه‌ای است که برای حفاری تونل‌ها از آن استفاده می‌گردد (شکل ۱۵). این دستگاه با استفاده از یک سطح مقطع مدور، قادر است در قشرهای خاکی و سنگی زمین حفاری کند. این نوع از ماشین‌آلات توانایی ایجاد حفره در هر نوع زمینی، از سنگ سخت گرفته تا ماسه را دارد. قطر تونل‌هایی که این دستگاه ایجاد می‌کند در محدوده یک متر (با استفاده از میکرو-تی‌بی‌ام‌ها) تا نزدیکی ۱۶ متر (تی‌بی‌ام‌های امروزی) قرار دارند. برای کندن تونل‌هایی که کم‌تر از یک متر قطر دارند، به‌طورمعمول، به‌جای استفاده از تی‌بی‌ام‌ها، از روش ساخت‌وساز بدون گودال یا حفاری افقی استفاده می‌کنند.

با توجه به روش اجرایی و سرعت‌بالای حفاری و نصب سیستم نگه‌دارنده در دستگاه TBM، این روش به‌تدریج به‌عنوان یک روش اصلی ساخت در تونل‌های مترو موردتوجه قرارگرفته است. از مزایای عمدهٔ این روش، مدت اجرای کوتاه، ایمنی بالا، دقت زیاد، نشست‌های سطحی کم و مساحت کم برای کارگاه می‌باشد، ضمن آنکه مزاحمتی برای ترافیک خیابان‌ها در سطح و شریان‌های حیاتی زیرزمینی ایجاد نمی‌کند. باوجود مزایای فوق، ازجمله نقاط ضعف این روش هزینهٔ بالای سرمایه‌گذاری اولیه برای تهیه ماشین حفار، نیاز به پرسنل کاملاً متخصص در استفاده از ماشین و ارتباط نزدیک بین شرایط ژئومکانیکی و نوع ماشین حفار می‌باشد.

دستگاه‌های حفاری تونل، به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های حفاری و انفجار صخره‌ها و کندن زمین با دست مورداستفاده قرار می‌گیرد. تی‌بی‌ام‌ها مزایایی همچون کاهش تعرض به زمین‌های مجاور و ایجاد دیوارهای نرم در تونل را دارند. این دستگاه به‌صورت قابل‌توجهی هزینه آسترکشی تونل را کاهش می‌دهد که خود این باعث شده برای استفاده در مناطق شهری با تراکم بالای جمعیت مناسب باشند. ایراد عمده این دستگاه قیمت بالای آن است. تی‌بی‌ام‌ها برای استفاده در ساخت‌وسازها گران‌قیمت بوده و آن‌ها را به‌سختی می‌توان جابجا کرد. در کنار تمام مزایایی که دستگاه‌های TBM دارند در طول مسیرهای کوتاه (زیر شش کیلومتر) با توجه به هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه به‌هیچ‌عنوان توجیه اقتصادی نخواهد داشت.

ویژگی‌های مسئله‌ساز روش حفاری ماشینی تمام مقطع عبارت‌اند از (فرزانه ۱۳۹۱):

- ✓ مسائل ناشی از شرایط ژئوتکنیکی
  - مسائل ناشی از وجود حفرات موجود در زمین (قنوات، فاضلاب، چاه و ...)
  - مشکلات ناشی از وجود خاک ناهمگن و یا بولدر های بزرگ
  - مشکلات ناشی از عدم طراحی‌های مناسب سیستم حفاری مکانیزه
  - مشکلات مربوط به انتخاب دستگاه حفار مناسب
  - مشکل تعیین ترکیبات مناسب گروت و فشارهای کاری تزریق

1. Tunnel Boring Machine
2. Mole

- مشکل محاسبه دقیق فشار جبهه کار

✓ مسائل ناشی از راهبری نامناسب دستگاه

- نداشتن تجربه پیمانکار در امر حفاری مکانیزه و عدم آموزش کافی پرسنل
- مشکلات ناشی از کنترل ناکافی: ۱) فشار مناسب جبهه کار و سرعت پیشروی ۲) مقدار وزن و حجم خاک حفاری در یک رینگ (شکل ۱۶) ۳) فشار و حجم دوغاب تزریق

✓ مسائل ناشی از تداخل با سازه‌های واقع در مسیر تونل اجراشده

شکل ۱۵– دستگاه حفاری ماشینی تمام مقطع مترو شیراز

شکل ۱۶- ریزش ایجادشده به علت حفاری بیش از حجم متعارف در یک رینگ در حفاری به روش TBM در خط ۳ مترو تهران (آرشیو شرکت مهندسین مشاور سیویار)

علاوه بر مسائل فوق، مشاوران نیز در طراحی و نظارت بر اجرای فضاهای سطحی دچار چالش‌هایی به شرح زیر هستند (فرزانه ۱۳۹۱):

۱. زمان ناکافی برای مطالعات امکان‌سنجی و مرحله اول
۲. همزمانی اجرا با مطالعات مرحله دوم
۳. مطالعات ژئوتکنیکی ناکافی
۴. کمبود دستورالعمل‌ها و سایر مدارک فنی پایه
۵. زمان‌بندی‌های فوق‌العاده فشرده
۶. انتخاب پیمانکاران ضعیف
۷. معیارهای نادرست و یا غیردقیق در تعیین حق‌الزحمه مطالعات
۸. عدم توجه کافی به تخصص و سوابق مرتبط در ارجاع خدمات مهندسی

- عدم تداوم و استمرار
- ناپایداری نیروی انسانی متخصص

- برون‌سپاری‌های بی‌اندازه

۹. کنترل ناکافی عملکرد مشاور

۳- چالش‌های اجرای تونل‌ها

۳-۱- فاکتورهای کلیدی در بروز چالش در اجرای تونل‌ها

با توجه به مسائلی که در بخش قبل بدان‌ها اشاره شد، چنین به نظر می‌رسد که به دلیل ماهیت منحصربه‌فرد سازه‌های زیرزمینی، اجرای تونل‌ها باید با در نظر گرفتن اثرات متقابل عوامل خرابی و نوع و وضعیت سازه و زمین اطراف آن بررسی و ارزیابی گردد. عوامل کلیدی که می‌توانند بر چگونگی اجرای تونل‌ها تأثیرگذار باشند، عبارت‌اند از (مصطفوی و آشتیانی ۱۳۹۰):

۳-۱-۱- روش اجرای تونل

به‌طورکلی، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در بروز چالش در اجرای تونل‌ها، روش اجرای آن‌هاست. همان‌طور که در بخش‌های قبل به‌تفصیل ازنظر گذشت، روش‌های مختلف اجرای تونل، ضمن آنکه می‌توانند در پروژه‌های مختلف بکار آیند، هریک دارای نقاط ضعف و مشکلاتی هستند. ضمن آنکه، پتانسیل آسیب‌پذیری تونل‌های مستغرق و حفاری روباز در حین اجرا، به دلیل پوشش کم تونل و طبیعت مصالح خاک‌ریز اطراف آن، به‌مراتب بیشتر از تونل‌های اجراشده با ماشین‌های حفاری تونل است. اگر بنا به هر دلیلی، شکافی در تونل مستغرق ایجاد شود، احتمال جاری شدن سیل در آن وجود دارد و درصورتی‌که تونل‌ها به یکدیگر متصل باشند ممکن است در بسیاری از شریان‌های زیرزمینی سیستم حمل‌ونقل، جاری شدن سیلاب به وقوع بپیوندد.

۳-۱-۲- نوع و شرایط زمین و خاک اطراف تونل

وجود عدم قطعیت در شناخت وضعیت محیط پیرامون تونل‌ها، بارها به‌عنوان یکی از دلایل اصلی گسیختگی آن‌ها عنوان‌شده است و متخصصین بسیاری در خصوص تأثیرگذاری پارامترهای مرتبط با این عامل در یک پروژه خاص تونل تأکید داشته‌اند (Seidenfuß, 2006). در این زمینه، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، عدم امکان شناسایی کامل شرایط زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و ژئوسایزمیکی در محدوده حفاری‌ها می‌باشد. ازاین‌رو، مسلم است که باید در مراحل اولیه هر پروژه تلاش‌های زیادی برای دستیابی به یک تصویر روشن از شرایط و خصوصیات زمین انجام پذیرد. این بدین معنی است که منابع (چه ازنظر مالی و چه نیروی کار) و زمان کافی باید به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و ژئوسایزمیکی و بررسی‌های اکتشافی در پروژه‌های حفاری تونل تخصیص یابند تا بتوان از پیچیدگی‌ها و مشکلات خاصی که در خصوص عدم شناخت شرایط زمین اطراف تونل وجود دارد تا حد زیادی کاست.

۳-۱-۳- روباره تونل

همان‌گونه که در مقدمه این گزارش ازنظر گذشت، در مناطق شهری، به دلایل عملکردی و اقتصادی، تونل‌سازی شهری عموماً در اعماق سطحی انجام می‌شود. این مسئله یکسری عواقب و آثار زمین‌شناسی و

زیرسطحی را به همراه دارد. اعماق سطحی زمین اغلب شامل خاک ضعیف، نهشته‌های رسوبی، یا خاک‌های دستی است. وضعیت زمین یکی از فاکتورهای کلیدی طراحی تونل و کنترل‌کننده‌های عملیات اجرایی است. هرچه روباره تونل بیشتر باشد، اثر قوس زدگی توده خاک عاملی مؤثر در ایجاد پایداری و جلوگیری از ریزش‌های تونل خواهد بود. درحالی‌که با کاهش روباره تونل، پتانسیل و احتمال آسیب به تونل افزایش می‌یابد. هر چه روباره تونل کاهش یابد احتمال گسترش گسیختگی به وجود آمده در اطراف تونل به سطح زمین افزایش‌یافته که این امر به‌نوبه خود موجب آسیب رساندن به سازه‌های سطحی اطراف تونل نیز خواهد شد.

۳-۱-٤- شرایط آب زیرزمینی

قرار گرفتن تونل در معرض آب زیرزمینی، پتانسیل آسیب‌پذیری آن را افزایش می‌دهد. مهم‌ترین چالش ایجادشده در اثر برخورد با آب اجرای بسیار دشوار تونل است. چراکه در زمان حفاری و اجرای سازه اولیه و نهایی تونل حجم بالایی از آب زیرزمینی به فضای حفاری وارد خواهد شد و ضمن دست و پاگیری کار، پایداری توده خاک را کاهش داده و اجرای سازه نگهبان خاک را با دشواری قابل‌توجهی همراه می‌کند. در این شرایط زهکشی آب که به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد، راهگشای اجرای تونل است. البته این راهکار هزینه‌های بالایی را نیز به دنبال خواهد داشت. در این خصوص باید خاطرنشان ساخت که هرچه اندازه دانه‌های خاک اطراف تونل بزرگ‌تر باشد، احتمال آسیب وارده به تونل و شدت آن بیشتر خواهد بود. همچنین، برای یک تونل واقع در محیطی با جریان ملایم آب[1] (به‌طور مثال، تونل‌های مستغرق خاک‌ریزی شده توسط مصالح شنی) یا جریان زیاد آب[2] (به‌طور مثال، تونل‌های مستغرق خاک‌ریزی شده توسط مصالح سنگریزه‌ای درشت‌دانه)، به دلیل جاری شدن سیل و همچنین آسیب‌های وارده بر سیستم‌های عملیاتی، احتمال آسیب کلی سیستم بسیار بالا خواهد بود.

۳-۱-۵- مشخصات سازه پوشش و سیستم نگهداری تونل

مشخصات سازه‌ای تونل در میزان پتانسیل آسیب‌پذیری این نوع سازه نقش بسیار مهمی دارد. به‌طورکلی، یک پوشش سازه‌ای با ضخامت بیشتر، مقاومت نسبی سازه‌ای بزرگ‌تر، مسلح کننده‌های محصورکننده بیشتر (در پوشش‌های بتنی) و دارای قابلیت شکل‌پذیری بالاتر، تحت اثر بارگذاری‌های بسیار بزرگ (مانند، انفجار، زلزله و ...) عملکرد بهتری دارد.

۳-۲- انواع چالش‌های اجرای تونل‌های شهری

در ادامه گزارش، برخی از چالش‌ها که ممکن است در طول دوران ساخت برای تونل‌ها رخ دهند، موردبررسی قرار می‌گیرند (فرزانه و همکاران ۱۳۹۳، مصطفوی و آشتیانی ۱۳۹۰).

۳-۲-۱- اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی، تهیه مشخصات فنی و برآورد پارامترهای طراحی

بروز اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی ممکن است ناشی از طراحی نامناسب و تصمیم‌های نادرست مهندسی در خصوص اجرا و مباحث فنی، ترتیب و توالی اجرای مراحل حفاری تونل و همچنین عدم رعایت معیارها و ضوابط

1. Semi-Flowing Water
2. Flowing Water

جهت حصول به مشخصات فنی مناسب (به‌طور مثال، مشخصات فنی موردنیاز برای انتخاب مصالح مورداستفاده در پوشش تونل) باشند. بدیهی است عواقب ناشی از اتخاذ این نوع تصمیم‌گیری‌ها در مرحله برنامه‌ریزی ممکن است برای تونل بسیار خطرناک و بعضاً فاجعه‌آمیز باشد.

خطاها و اشتباهات متداول در مرحله برنامه‌ریزی عبارت‌اند از:

- انتخاب نادرست تراز تونل نسبت به سطح زمین و درنتیجه کافی نبودن ضخامت روباره تونل
- تخمین و برآورد اولیه نادرست مشخصات محیط پیرامون تونل و مصالح و درنهایت انتخاب پوشش نامناسب برای تونل
- انتخاب روش‌های حفاری و نگهداری تونل بدون توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه
- عدم‌کفایت مشخصات فنی پیشنهادی برای مصالح در ساخت تونل
- عدم‌کفایت مشخصات فنی روش‌های پیشنهادی جهت تعمیر پوشش تونل
- عدم برنامه‌ریزی یا برنامه‌ریزی نادرست در مواقع اضطراری و پیش‌بینی‌نشده
- انتخاب روش نادرست حفاری

باید خاطرنشان ساخت که جهت حصول به یک برنامه‌ریزی صحیح و منسجم و همچنین عدم مواجهه با هر یک از اشکالات فوق، باید پارامترها و مشخصات توده دربرگیرنده تونل به‌عنوان داده‌های ورودی در طراحی آن، پس از تعیین در محل و آزمایشگاه، موردبررسی و ارزیابی دقیق قرارگرفته و از میزان صحت و اعتبار آن‌ها اطمینان حاصل گردد.

۳-۲-۲- اشتباهات محاسباتی یا عددی

اشتباهات محاسباتی به نحوه محاسبه و استخراج پارامترهایی برمی‌گردد که اساساً در محل و یا در آزمایشگاه تعیین می‌شوند و یا اینکه مستخرج از تحلیل داده‌های حاصله از پایش تونل‌ها می‌باشند. عموماً در مرحله برنامه‌ریزی و طراحی، این نوع اشتباهات ناشی از عدم دقت در انجام محاسبات می‌باشند که منجر به تعیین مقادیر غیرواقعی و یا نادرست پارامترهای مربوط به توده دربرگیرنده تونل و مصالح مورداستفاده در ساخت تونل می‌گردد. همچنین، در مرحله ساخت و اجرای تونل، اشتباهات محاسباتی بیشتر به نحوه پردازش و استفاده از اطلاعات پایش حین حفاری برمی‌گردد.

اشتباهات عددی نیز در مرحله انجام تحلیل‌های موردنیاز برای طراحی و اجرای تونل‌ها و همچنین تفسیر نتایج حاصل از آن‌ها رخ می‌دهد که اصولاً در مرحله طراحی تونل حادث می‌گردند.

انواع خطاها و اشتباهات محاسباتی و عددی محتمل در تحلیل، طراحی و اجرای یک تونل عبارت‌اند از:

- اتخاذ مقادیر نادرست برای پارامترهای طراحی

- مدل‌سازی نادرست اثرات متقابل آب‌وخاک بر سازه تونل
- استفاده از برنامه‌های کامپیوتری نامتناسب و یا نامعتبر در تحلیل و طراحی
- بروز اشتباهات عددی در جمع‌آوری اطلاعات مربوط به پایش تونل‌ها
- عدم موفقیت در پردازش سریع و دقیق اطلاعات عددی پایش
- وجود پیچیدگی‌های ذاتی در مصالح (از قبیل، وجود ناپیوستگی در توده سنگ، اثرات مقیاس، مصالح موجود در زون تحت تأثیر حفاری و ...) و اثرات مستقیم آن بر مدل‌سازی
- بروز اشتباهات فردی و یا عدم تجربه کافی در نحوه مدل‌سازی، تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از تحلیل
- در نظر گرفتن فرضیات ساده‌سازی نادرست در مدل‌سازی تونل و یا استفاده از روش‌های تحلیل عددی نامتناسب

۳-۲-۳- بروز خطاها و اشتباهات در مرحله اجرای تونل

بروز خطاها و اشتباهات در مرحله اجرای تونل، درنتیجه کیفیت نامناسب عملیات حفاری، استفاده از مصالح و ابزار معیوب و عدم کنترل کیفیت آن‌ها، عدم تطابق مابین موارد طراحی و اجرا و همچنین برآورده نشدن معیارها و مشخصات فنی تونل به وجود می‌آیند. برای مثال، عدم رعایت مقررات ایمنی توسط کارگران هنگام کار با هوای فشرده، ممکن است سبب ورود سریع آب‌وخاک به داخل تونل و درنتیجه آسیب رسیدن به آن‌ها و تأخیر در اجرای تونل شود. همچنین اگر در زمین‌های نسبتاً ناپایدار و یا شدیداً ناپایدار از سیستم نگهداری درزمانی مناسب استفاده نشود، ممکن است حفراتی در تونل ایجادشده و درنهایت باعث گسیختگی آن شود.

برخی از متداول‌ترین خطاهای اجرایی که می‌توانند باعث بروز چالش‌هایی در اجرای تونل شوند عبارت‌اند از:

- اجرا نشدن ضخامت تعیین‌شده پوشش تونل در طراحی
- مقاومت و ضخامت ناکافی شاتکریت که باعث کاهش مقاومت نهایی پوشش می‌شود
- نصب دیرهنگام سیستم نگهداری که درنتیجه باعث افزایش طول حفاری‌شده بدون نگهداری و همچنین کاهش محدوده اطمینان پایداری تونل می‌شود
- نصب نادرست انکرها و قاب‌های مشبک
- ریزش مصالح حفاری تونل و مصالح بازگشتی[1] ناشی از پاشش شاتکریت بر روی بتن کف
- تعمیرات نامناسب پوشش اجراشده
- برداشت و تفسیر نادرست از گزارش‌ها (گزارش‌های طراحی، بررسی اطلاعات پایش و ...)
- استفاده از ماشین‌های حفاری با عملکرد نامناسب: نوع روش و نوع ماشین حفاری بسته به نوع زمین و

1. Rebound Material

شرایط زمین‌شناسی منطقه تعیین می‌گردد. اگر بنا به هر دلیلی نوع ماشین حفاری درست انتخاب نشود ممکن است خسارت‌های جانی و اقتصادی زیادی را به پروژه تحمیل کند. به‌طور مثال، برای حفاری در زمین‌هایی که سطح آب زیرزمینی بالاست و احتمال ورود آب به داخل تونل وجود دارد، باید از ماشین‌های حفاری EPB[1] و یا Slurry shield استفاده نمود یا درصورتی‌که حفاری در زمین‌های نرم انجام می‌گیرد، نمی‌توان از دستگاه‌های حفاری از قبیل رودهدر[2] استفاده کرد و حتماً باید از ماشین‌های حفاری تمام مقطع[3] بهره جست.

۳-۲-٤- مشکلات ناشی از ناشناخته بودن فضاهای زیرسطحی در مناطق شهری

با افزایش روزافزون میزان جمعیت در مناطق شهری و صنعتی شدن شهرها و همچنین به‌منظور بالا بردن کیفیت زندگی مردم، نیاز به توسعه بیش‌ازپیش زیرساخت‌ها و تأسیسات شهری از قبیل شبکه‌های آب‌رسانی، انتقال برق و گاز، جمع‌آوری فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، تونل‌های مترو و ...، روزبه‌روز نمود بیشتری پیدا می‌کند. امروزه، برای ساخت و توسعه این نوع زیرساخت‌ها و تأسیسات بخصوص در کلان‌شهرها، سعی می‌گردد تا از فضاهای زیرسطحی بیشترین استفاده به عمل آید. استفاده از این نوع فضاها علاوه بر حفظ زیبایی شهر، مشکلات کمتری را برای رفت‌وآمد مردم در هنگام اجرای تأسیسات به همراه خواهند داشت. در این خصوص یکی از اقدامات مهم در زمینه کاهش مخاطرات ناشی از احداث تونل‌ها در محیط‌های شهری، تهیه نقشه‌های چون ساخت مربوط به تأسیسات فوق‌الذکر پس از اتمام عملیات اجرایی آن‌ها می‌باشد تا بدین‌وسیله نسبت به موقعیت دقیق اجرای آن‌ها اطلاعات کافی فراهم شود. یکی از موارد کاربرد این نقشه‌ها، استفاده از آن‌ها هنگام برنامه‌ریزی به‌منظور تعیین بهترین مسیر و موقعیت ممکن و همچنین انتخاب شیب مناسب برای احداث یک سازه زیرزمینی است. ازاین‌رو، عدم وجود نقشه‌های چون ساخت می‌تواند مشکلات زیادی را در فاز برنامه‌ریزی به لحاظ ناشناخته بودن فضای زیرسطحی و عدم اطلاع دقیق از موقعیت تأسیسات شهری معارض، متوجه احداث تونل نموده و علاوه برافزایش پتانسیل خطرات متنوع وارد بر این نوع سازه زیرزمینی، هزینه و زمان اجرای پروژه را به نحو قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد.

تهران ازجمله کلان‌شهرهایی است که تأسیسات قابل‌توجهی در فضاهای زیرسطحی آن تعبیه‌شده که ممکن است اجرای تونل‌ها را در این شهر همواره با مشکلات و خطراتی همراه نماید.

دراین‌ارتباط، عدم توجه کافی به موقعیت دقیق تأسیسات زیرزمینی در فازهای شناسایی و طراحی فضاهای زیرزمینی، نبود نقشه‌های چون ساخت تأسیسات، عدم هماهنگی و همکاری بین سازمان‌های ذی‌ربط در فازهای ابتدایی پروژه در خصوص شناسایی محل تأسیسات حین تعیین مسیر تونل و احتمال برخورد حفاری‌ها با هر یک از تأسیسات و موانع طبیعی فوق‌الذکر، ازجمله خطراتی است که تونل‌های زیرسطحی در شهر تهران را در مرحله اجرا همواره تهدید می‌کنند. درواقع، این خطرات می‌توانند در حین اجرا و در صورت برخورد با هر یک از موانع تأسیساتی

1. Earth Pressure Balance
2. Roadheader Machine
3. Full-Face Tunnel Boring Machine

از قبیل لوله‌های گاز، مجاری فاضلاب، لوله‌های آب و یا موانع طبیعی نظیر قنوات روی دهند که به ترتیب ممکن است منجر به انفجار داخل فضای تونل، وارد شدن فاضلاب، ورود آب به داخل فضای آن و به‌صورت عام موجب بروز ریزش‌های موضعی و حتی کلی گردد.

همچنین عدم در نظر گرفتن اثر موانع تأسیساتی –که از مجاورت یک تونل عبور می‌نمایند– در تحلیل و طراحی آن ممکن است سازه را در حین مراحل اجرا و بهره‌برداری دچار مشکل نماید. به‌عنوان‌مثال، چنانچه در اطراف سازه تونل، حفره یا حفراتی وجود داشته باشند که تأثیر آن‌ها بر سازه در تحلیل و طراحی بررسی نشده باشد، ممکن است سازه را در حین اجرا و یا دوره بهره‌برداری دچار تغییر شکل‌های زیاد نموده که وقوع این نوع تغییر شکل‌ها می‌تواند نشست‌های قابل‌توجهی را در اطراف سازه تونل به وجود آورده و درنهایت موجب فرونشست سطح زمین و یا خرابی سازه‌ای در تونل شوند.

این نقص باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای مانند برخورد غیرمنتظره TBM به کانال زیرزمینی در عمق ۷ متری دریکی از مناطق قدیمی شهر و یا کشف کانال انتقال آب‌های سطحی مدفون در بالای سر تونل در دست اجرا در جنوب تهران شده است که در اجرا و بهره‌برداری از تونل‌ها در کلان‌شهرهایی نظیر تهران وجود دارد، برخورد با عوارضی چون لوله‌ها، کانال‌ها و حفرات است که از قبل نیز هیچ نقشه یا اطلاعاتی در مورد آن‌ها در دسترس نیست.

۳-۲-۵- قنات‌ها، انباره‌های فاضلاب و حفرات زیرزمینی ناشناخته

حفرات زیرزمینی که از قبل موقعیت و اندازه آن‌ها قابل‌شناسایی نیست می‌توانند اجرای تونل را با مشکلات عدیده‌ای مواجه کنند. این مشکلات می‌تواند تا مرحله ریزش تونل پیش رود.

بسیاری از قنات‌های حفرشده در تهران از سوی مسئولان شهری شناسایی‌شده است و سعی می‌شود در ساخت‌وسازها و اجرای پروژه‌های شهری از به وجود آمدن حوادث جلوگیری شود. مسئولان شهری طرح سامان‌دهی قنات‌های تهران را مدت‌هاست در دست تدوین و بررسی دارند. در همین راستا نقشه‌ای با مقیاس یک دوهزارم شهری از موقعیت قنات‌های شناخته‌شده شهر تهران توسط سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران تهیه‌شده و در اختیار مسئولان و نهادهای مرتبط، مشاوران و پیمانکاران پروژه‌های شهری قرار می‌گیرد (سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، ۱۳۸۶). لیکن هنوز هم قنات‌های ناشناخته‌ای وجود دارند که به علل مختلف، ازجمله تخلیه تصادفی یا عمدی فاضلاب بعضی ساختمان‌ها و کارگاه‌ها در داخل آن‌ها، جمع شدن آب و یا فاضلاب در پشت مقاطع مسدود شده در طول قنات، تغییرات رخ‌داده در ابعاد میله‌ها و کوره‌ها در اثر آب‌شستگی، در هنگام اجرای تونل و سایر سازه‌های زیرزمینی مشکلات عدیده‌ای را به وجود می‌آورند.

یکی دیگر از مسائل مهم در اجرای زیرزمینی تونل‌ها به‌ویژه در مناطق قدیمی شهر تهران، وجود چاه‌های قدیمی و سرپوشیده و نیز انباره‌های فاضلاب منازل است که تقریباً در اثر تعریض خیابان‌ها، در زیر خیابان‌های کنونی واقع‌شده‌اند. در مورد اماکنی نظیر حمام‌های عمومی قدیمی، این حفرات ممکن است بسیار بزرگ باشند. علاوه بر این بعضاً به حفرات دست‌ساز بزرگی در برخی از محلات قدیمی برخورد شده است. ساکنین محلی از وجود آن‌ها هیچ‌گونه اطلاعی نداشته‌اند.

علاوه بر این، در بعضی از نقاط، وقتی‌که لوله‌های اصلی آب شهری دچار نشتی شده‌اند و در نزدیکی آن‌ها چاه یا حفره دیگری برای فرار خاک بوده، حفرات بزرگی در اثر آب شستگی به وجود آمده که تعدادی از آن‌ها کاملاً ناشناخته هستند. همچنین فرسایش داخلی و شسته شدن بخش ریزدانه خاک‌های واقع در محل شکستگی لوله‌های آب نیز می‌تواند به تشکیل شنی سست و فاقد ریزدانه بیانجامد.

اگرچه بعضاً با مطالعات ژئوفیزیک مانند رادارهای زمین کاو GPR[1] حدود محل و ابعاد این حفرات به‌صورت تقریبی قابل‌شناسایی هستند، لیکن دقت این مطالعات هنوز در حد کفایت نمی‌باشد. یک‌راه حل دیگر برای جمع‌آوری اطلاعات در این موارد انجام بررسی‌های محلی است.

۳-۲-۶- مشکلات ناشی از برخورد با آب زیرزمینی در تونل

تونل‌سازی در فضاهای زیرسطحی اشباع و حاوی آب زیرزمینی، همواره مخاطره‌آمیز بوده و مشکلات و چالش‌های بسیاری را در حین عملیات حفاری متوجه تونل‌ها نموده است. مشکلاتی که ممکن است در اثر وجود آب زیرزمینی در اطراف تونل برای این سازه به وجود آید را می‌توان از بررسی‌های گسترده در موقعیت‌های مختلف و با استفاده از گمانه‌های اکتشافی پیش‌بینی نمود. هرچند، پیش‌بینی دقیق مقدار دبی آب ورودی به تونل معمولاً دشوار است.

قرارگیری تراز زیرین تونل در زیر تراز آب زیرزمینی و یا در معرض حفرات زیرزمینی[2] قرار گرفتن تونل‌ها در حین اجرا، می‌تواند احتمال جریان یافتن مصالح اشباع و سست به داخل فضای تونل را میسر سازد. درنتیجه، شناسایی و پیشگیری این قبیل شرایط مخاطره‌آمیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده و حیاتی است.

از سوی دیگر، وجود جریان آب زیرزمینی، فرآیند حفاری تونل را در تمامی مراحل تحت تأثیر قرار خواهد داد. در حین حفاری تونل، وجود گرادیان هیدرولیکی ناشی از آب زیرزمینی ممکن است سبب شسته شدن مصالح اطراف این سازه زیرزمینی گردد. بعلاوه، در اثر این گرادیان، فشارهای هیدرودینامیک در محیط پیرامون به وجود خواهد آمد که موجب کاهش پایداری سینه حفاری تونل خواهد شد. بعد از حفاری، این امکان نیز وجود خواهد داشت که آب موجب نرم شدگی خاک‌های سیلتی و رسی شود. زمین‌هایی که شامل انیدریت[3] و یا کانی‌های رسی خاصی نظیر مونتموریونیت[4] هستند، تمایل به متورم شدن دارند. متورم شدن این خاک‌ها، فشارهای اضافی به پوشش تونل وارد خواهند نمود که در صورت لحاظ نکردن آن‌ها در طراحی ممکن است پوشش تونل دچار ترک‌خوردگی و احیاناً گسیختگی گردد که درنهایت هجوم آب و مصالح خاکی را به داخل تونل به همراه خواهد داشت. در مرحله بهره‌برداری، پوشش آب‌بند تونل‌ها باید قبلاً برای فشار هیدرواستاتیک ناشی از محیط اشباع پیرامون خود طراحی‌شده باشد. همچنین، سیستم‌های زهکشی تونل‌ها نیازمند نگهداری و تعمیرهای دوره‌ای منظم به‌منظور حصول اطمینان از فرآیند دائمی زهکشی می‌باشند.

1. Ground Penetration Radar
2. Cavities
3. Anhydrite
4. Montmorionit

از سوی دیگر، با توجه به آن‌که تونل‌های حمل‌ونقل درون‌شهری نظیر تونل‌های مترو با یکدیگر در ارتباط هستند، اگر در بخشی از سازه یک تونل واقع در محیط اشباع گسیختگی به وجود آید، به‌عنوان‌مثال پوشش تونل دچار شکاف موضعی شده و یا درز اتصال سگمنت‌ها دچار گسیختگی گردد، وقوع این امر می‌تواند سبب ورود آب به داخل تونل و متعاقب آن آب‌گرفتگی کامل تونل و درنهایت جاری شدن سیل و انتقال آن به سایر تونل‌های متصل گردد. همچنین این احتمال وجود دارد که جاری شدن سیل، باعث ورود حجم قابل‌توجهی خاک از قبیل ماسه، سیلت، شن، یا واریزه‌های زون‌های گسله به داخل تونل گردد. ازاین‌رو، در مدت‌زمان کوتاهی ممکن است بخش قابل‌توجهی از فضای داخلی تونل با واریزه یا گل ناشی از ورود مصالح اطراف پر شوند و که وقوع این پدیده می‌تواند باعث مسدود شدن بخشی از تونل گردد. بعلاوه، وقوع پدیده شل شدگی خاک زیر پی سازه‌های فوقانی تونل در اثر وقوع رویداد فوق‌الذکر ممکن است سبب فرورفتن و نشست قابل‌توجه پی سازه‌ها و یا حتی انهدام کامل آن‌ها گردد.

۳-۲-۷- فرونشست زمین

پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پائین سطح زمین است که می‌تواند همراه با جابجایی افقی اندکی نیز باشد. این پدیده بسته به منشأ آن ممکن است موضعی یا منطقه‌ای باشد. فرونشست می‌تواند در اثر پدیده‌های طبیعی زمین‌شناختی مانند انحلال، فرسایش ناشی از آب شستگی، حرکات تکتونیکی، فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت آب زیرزمینی و یا فرونشست توده‌های خاک دستی در اثر لرزش و یا نفوذ آب ایجاد شود. در ایران، به سبب برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی، فرونشست‌ها و پیامدهای حاصل از آن به پدیده‌ای مشکل‌ساز بخش‌هایی از کشور تبدیل گشته است.

تعدادی از فرونشست‌های مهم زمین و بررسی‌های موردی این پدیده در استان تهران به شرح ذیل است:

- فرونشست دشت معین‌آباد ورامین در استان تهران که در آن شکاف زمین به طول ۲/۴ کیلومتر در منطقه مشاهده‌شده است.
- فرونشست دشت نظرآباد در استان تهران که بعضی از آثار فرونشست به‌صورت بالا آمدن لوله چاه‌ها از سطح زمین و ماسه دهی چاه‌ها مشاهده گردیده است.
- فرونشست در جنوب باختر تهران بزرگ که در آن اندازه‌گیری‌های سازمان نقشه‌برداری کشور نشستی به میزان حدود یک و نیم متر را در طول ۹ سال نشان می‌دهد. شایان‌ذکر است که فرونشست کوچکی نیز به طول حدود ۱۰۰۰ متر در بخش جنوبی تونل خط ۳ مترو تهران مشاهده شد که جریان اجرای این تونل را تحت تأثیر خود قرارداد.

فرونشست اخیر با مساحت حدود ۴۱۵/۶۴ کیلومترمربع در موقعیت جغرافیایی '۳۱ °۳۰ تا '۴۱ °۳۵ عرض شمالی و '۵۸ °۵۰ تا '۲۲ °۵۱ طول شرقی قرار دارد. محیط این پهنه حدود ۹۷/۱۷ کیلومتر است و میزان فرونشست در قسمت‌های مختلف متفاوت و دارای الگوی "v" شکل است. بیشینه نرخ فرونشست حدود ۱۶ سانتیمتر بر سال برآورد شده است.

اجرای تونل در مناطق شهری ممکن است با وقوع اثرات مخرب بر روی ساختمان‌ها، سازه‌ها و تأسیسات مجاور محل حفاری همراه باشد که انتخاب روش حفاری صحیح تا حد زیادی خطرات ناشی از آن را کاهش خواهد داد؛ اما نباید فراموش نمود که به‌هرحال، حفاری تونل باعث ایجاد دست‌خوردگی خاک و به هم خوردن تعادل تنش اطراف محدوده حفاری تونل می‌گردد که درنتیجه آن، تغییر شکل‌هایی در محیط اطراف تونل و درنهایت، در لایه‌های فوقانی ناحیه حفاری تونل و همچنین در سطح زمین به وجود خواهد آمد. درصورتی‌که این تغییرشکل‌ها به سطح زمین برسند، بر روی سازه‌های رو سطحی مجاور بخش حفاری اثرات منفی خواهند گذاشت. از مشخصه‌های تونل‌های شهری می‌توان به عمق کم روباره آن‌ها، دهانه بزرگ این فضاها و همچنین قرارگیری ساختمان‌ها بر روی آن‌ها و یا در مجاورت آن‌ها نام برد که همگی کنترل نشست سطحی را دشوار می‌کنند.

۳-۲-۸- مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی

یکی از چالش‌هایی که در تونل‌سازی شهری ممکن است بروز کند، مسائل مربوط به زمین‌شناسی مهندسی است. این مشکلات، به‌ویژه، در شهر تهران نمود داشته است. شهر تهران بر روی رسوبات آبرفتی نسبتاً ضخیم دوران چهارم زمین‌شناسی قرار دارد که در طول گسل معکوس شمال تهران، بر روی توده‌های سنگی سازند کرج رانده‌شده است. این آبرفت‌ها به ترتیب قدمت به چهار سازند A، B، C و D تقسیم می‌شوند. سازند A، موسوم به سازند هزار دره متشکل از مخلوط نسبتاً همگن شن و ماسه همراه با مقداری لای و رس، با تراکم و سیمانتاسیون بالا است که تحت اثر نیروهای تکتونیکی چین‌خورده شده و مناطق تپه‌ماهوری شمال شهر تهران را تشکیل داده است.

بر روی بخش‌هایی از سازند A، رسوبات شن و ماسه‌ای سازند B با شیب کم قرارگرفته است که ویژگی مهم آن ناهمگنی و وجود قطعات بزرگ سنگ در بعضی نقاط و لایه‌های ریزدانه نفوذناپذیر ضخیم در نقاط دیگر است.

بخش‌های مرکزی و جنوبی شهر تهران بر روی سازند C قرار دارند که جنس آن از مخلوط شن و ماسه همراه با مقداری رس و لای، همگن و با سیمانتاسیون و تراکم متوسط در شمال مرکز تا لایه‌های ضخیم رس و لای با خاصیت خمیری کم در جنوب شهر تهران، تغییر می‌کند.

این سازند در فاصله تقریبی بین محورهای خیابان انقلاب و خیابان شوش از ترکیبی از لایه‌های درشت‌دانه و ریزدانه در محدوده انتقالی تشکیل‌شده است که در آن، از شمال به جنوب، لایه‌ها و میان لایه‌های درشت‌دانه جای خود را به لایه‌های خاک ریزدانه رسی می‌دهند.

سازند D، موسوم به سازند کهریزک، از رسوبات ریزدانه باضخامت کم تشکیل یافته که در بخش‌هایی از مرکز و جنوب شهر بر روی سازند C قرار می‌گیرد.

از ویژگی‌های مهم این آبرفت‌ها در ارتباط با اجرای تونل‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- وجود تعداد زیادی رشته گسل فرعی در بخش‌های چین‌خورده شمالی شهر
- وجود سفره‌های آب زیرزمینی موضعی در ناودیس‌های بخش‌های چین‌خورده

- وجود جریان‌های آب زیرزمینی در امتداد شیب کلی زمین (شمال به جنوب)
- تشکیل موضعی سفره‌های آب زیرزمینی معلق بر روی لایه‌های بانفوذ پذیری کمتر در بخش‌های شمالی (به‌ویژه در سازند B) و مرکزی
- حضور لنزهای شن و ماسه سیمانی شده بسیار مقاوم (دج) در برخی نقاط و برعکس و حضور لنزهای شن و یا ماسه فاقد ریزدانه و ریزشی در برخی نقاط دیگر در سازندهای A و C
- وجود شیل های رسی بسیار متراکم در برخی نقاط در سازند A (مانند شهرک غرب)
- وجود بلوک‌های سنگی بسیار بزرگ در برخی نقاط در سازند B (مانند قیطریه)

۳-۲-۹- خاک‌های دستی

وجود توده‌های سست و دستی در برخی از مناطق تهران و درنتیجه فروریزش روباره تونل و یا بروز نشست‌های ناگهانی در اثر عملیات حفر تونل، یکی از خطراتی است که باید در هنگام طراحی و اجرای تونل‌ها موردتوجه قرار گیرد. این مشکل در مرکز و جنوب شهر، در محل خندق قدیمی شهر تهران و نیز در شمال شهر در محل تسطیح تپه‌ها در مناطقی مانند میدان ونک، خیابان گاندی، عباس‌آباد و شهرک غرب بسیار جدی است.

۳-۲-۱۰- خالی شدن خاک اطراف تونل به علت فرسایش ناشی از آب شستگی

تراوش آب‌های زیرزمینی و جریانات زیرسطحی یکی از اصلی‌ترین دلایل آبشستگی و ایجاد حفره در خاک اطراف تونل‌ها می‌باشد و نگرانی‌های مهمی برای مهندسان و سازندگان ابنیه زیرزمینی به وجود می‌آورد.

حفرات ایجاد شده براثر آبشستگی ازجمله پدیده‌هایی است که در منابع مربوط به نگهداری و تعمیر لوله‌ها و تونل‌ها بسیار به آن اشاره‌شده است. لوله‌های آسیب‌دیده براثر این حفرات به‌راحتی با حفر زمین و تعویض آن‌ها قابل اصلاح هستند، حال‌آنکه بروز این پدیده در تونل‌ها و اصلاح و تعمیرات آن، مشکلات اجرایی بسیاری را به همراه دارد که گاه این امر را ناممکن می‌سازد. ازاین‌رو لازم است دقت خاصی بر روی این موضوع در تونل‌ها صورت گیرد.

تراوش آب می‌تواند باعث بروز فرسایش در خاک شده و تغییراتی را در فشار زمین ایجاد کند. حفرات آبشستگی بخشی از خاک محیط تونل است که براثر تراوش آب از ترک‌های پوشش، پوک و ضعیف شده است. آب درحرکت به سمت تونل به همراه خود ذرات ریز خاک را شسته آن‌ها را پوک می‌کند. باگذشت زمان، این پدیده خاک اطراف محل ترک پوشش تونل را ضعیف و توخالی خواهد کرد.

اثرات تشکیل حفره در پیرامون پوشش تونل می‌تواند خود را به شکل‌های مختلفی نشان دهد. بعضاً به علت ریزش این حفره‌ها و یا به سبب توزیع مجدد میدان تنش، تغییر مکان‌ها و یا نشست‌هایی در سطح زمین به وجود می‌آید. در مواردی نیز تشکیل پدیده قوس زدگی و توزیع مجدد فشاری منجر به تغییراتی در نیروهای وارده بر پوشش می‌شود. در حالت‌های بسیار جدی‌تر که حفرات بزرگی در پیرامون تونل تشکیل می‌شود، تغییرات توزیع نیروهای وارده بر پوشش می‌تواند باعث بروز پدیده بیضی شدگی در تونل شود.

۳-۲-۱۱- اشتباهات مدیریتی و کنترلی

اطلاعاتی که قبل از اجرای تونل و درنتیجه حفر گمانه‌ها از بررسی و شناخت وضعیت لایه‌های زمین‌شناسی و پروفیل محیط خاک دربرگیرنده تونل به دست می‌آید و بر اساس آن طراحی صورت می‌گیرد، باید حتماً در هنگام اجرا، پایش و صحت‌سنجی گردند. هدف از انجام عملیات پایش، به‌روز کردن اطلاعات به‌دست‌آمده از وضعیت سازه تونل و محیط پیرامون آن و همچنین اعتبارسنجی پیش‌بینی‌ها و تخمین‌های انجام‌شده اولیه حین طراحی است که شامل نقشه‌برداری از سینه‌کار و دیواره‌های تونل، نصب حسگرها و به دنبال آن اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها، نشست‌ها، لرزش‌ها و تراز آب زیرزمینی حین اجرای تونل است. ازاین‌رو، کنترل پایداری سازه تونل و محیط پیرامون آن در حین اجرا، باید به‌صورت پیوسته و از طریق مقایسه بین پیش‌بینی‌ها و تخمین‌های مختلف در مراحل برنامه‌ریزی و طراحی و اندازه‌گیری‌ها در مرحله اجرا صورت گیرد.

در این خصوص، موارد محتملی که رویداد آن‌ها در قالب اشتباهات مدیریتی، نظارتی و کنترلی ممکن است احداث تونل را به خطر اندازند، عبارت‌اند از:

- بهره‌گیری از طراحان فاقد تجربه کافی
- بهره‌گیری از مدیران کارگاهی فاقد تجربه کافی
- ناتوانی مدیریتی در یادگیری و تجربه‌اندوزی از تجارب قبلی (چه تجارب خوب و چه تجارب بد)
- بهره‌گیری از پیمانکاران اجرایی فاقد صلاحیت و تجربه کافی
- نظارت نامناسب بر فعالیت‌های اجرایی حین طراحی و ساخت
- ناتوانی و عدم تجربه کافی در استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از پایش تونل و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها
- استفاده از ابزارهای پایش دارای عملکرد نامناسب و دقت ناکافی: استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری و حسگرها و بهره‌گیری از نتایج حاصله از آن‌ها به‌منظور اعتبارسنجی طراحی‌های انجام‌شده، تعیین احتمال وقوع خرابی‌ها و همچنین به‌کارگیری آن‌ها در پروژه‌های آتی، مدنظر می‌باشند. ازاین‌رو، ابزارهای پایش باید به‌گونه‌ای باشند که اطلاعات درست و دقیقی را در اختیار مهندسین قرار دهند. به‌عبارت‌دیگر، استفاده از ابزارهای معیوب و با دقت ناکافی، پتانسیل وقوع خطر بر سلامت و ایمنی تونل‌ها را افزایش خواهد داد. ازاین‌رو، باید با تدوین یک برنامه زمان‌بندی مناسب و متعاقب آن با انجام عملیات بازرسی دوره‌ای منظم، از صحت و دقت این نوع ابزارها اطمینان کافی حاصل نمود.

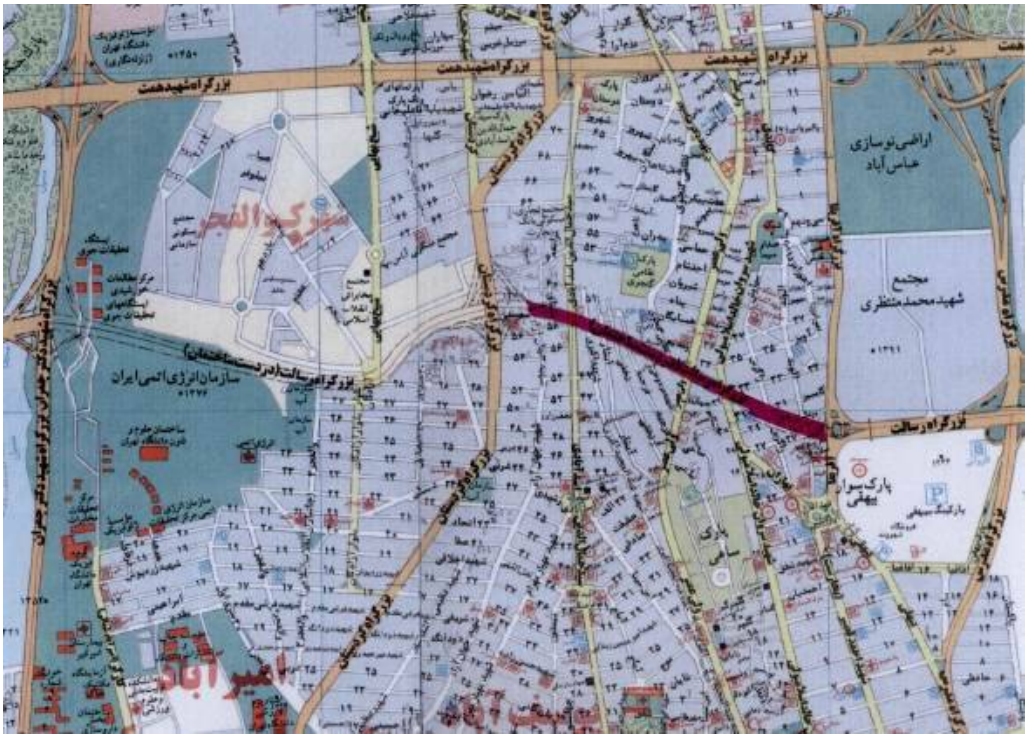
٤- بررسی برخی تجارب تونل‌سازی در کشور

٤-١- مطالعه موردی ۱: تونل رسالت

٤-١-١- کلیات و روش اجرا

بزرگراه رسالت یکی از طولانی‌ترین مسیرهای شرقی–غربی تهران است. به علت وضعیت تپه‌ماهور و توپوگرافی

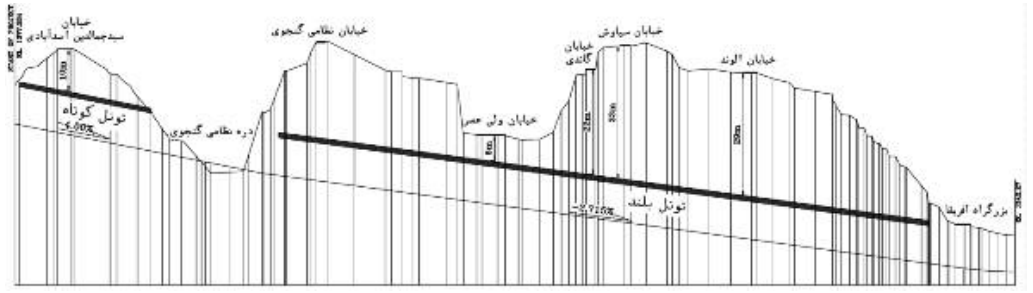
منطقه و سایر ملاحظات فنی، بخشی از بزرگراه حدفاصل میدان آرژانتین تا خیابان سید جمال‌الدین اسدآبادی به طول جمعاً حدود ۱۰۰۰ متر به‌صورت تونل در نظر گرفته‌شده است (شکل ۱۷). علت انتخاب زیرگذر در مرحله نخست عبور خیابان‌های متعدد در این مسیر و اختلاف ارتفاع بسیار زیاد این خیابان‌ها و در مرحله بعدی استفاده مناسب از سطح زمین می‌باشد. تونل رسالت از دو تونل تشکیل‌شده است که هر یک از آن‌ها شامل سه خط عبوری به عرض ۳/۶ متر برای عبور وسایل نقلیه و دو پیاده‌رو به عرض ۰/۹ متر در طرفین می‌باشد. ارتفاع ناخالص تونل در حدود ۱۰ متر، ارتفاع قابل‌استفاده در داخل تونل برای عبور ماشین‌آلات ۵/۳۵ متر و قطر خارجی تونل ۱۶/۷ و قطر داخلی تونل حدود ۱۳/۵ متر است (صدقیانی ۱۳۸۲).



شکل ۱۷- پلان تونل رسالت در نقشه تهران در زمان ساخت تونل

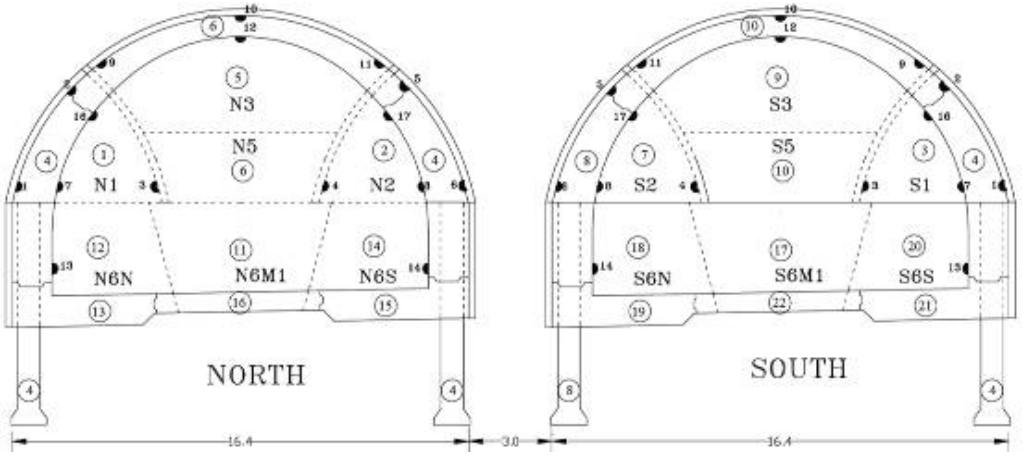
مقطع بزرگراه شامل دو نوار موازی با دهانه ۱۶/۵ متر و ارتفاعی برابر ۱۱ متر در محور تونل‌ها است. شکل عمومی تونل به‌صورت یک نیم‌دایره در بالا و یک مقطع مستطیل در پایین آن می‌باشد. سه خط عبور به عرض ۳/۵ متر در یک‌جهت از هر یک از تونل‌ها عبور می‌کند. ارتفاع عبور مجاز ۵/۵ متر است.

روش اجرای تونل به شیوه اتریشی جدید (NATM) بر مبنای تبدیل مقطع بزرگ حفاری به بخش‌های کوچک‌تر و استفاده از روش حفاری چندمرحله‌ای بوده است (آقامالیان و همکاران ۱۳۸۶). ضخامت روباره در امتداد طول تونل از ۶ تا ۳۴ متر متغیر بوده و توده به‌طور عمده از شن و ماسه رس دار همراه با قلوه‌سنگ تشکیل یافته است (شکل ۱۸). ابتدای تونل بلند در دره نظامی گنجوی با کیلومتراژ ۱+۵۶۰ و انتهای آن در میدان آفریقا با کیلومتراژ ۲+۳۵۰ می‌باشد.



شکل ۱۸- پروفیل طولی تونل رسالت (آقامالیان و همکاران ۱۳۸۶)

مراحل روش اجرا: با توجه به ابعاد زیاد دهانه حفاری تونل‌ها، فاصله آزاد کم مابین دو تونل (۴ متر)، مشخصات ژئوتکنیکی زمین و ارتفاع نسبتاً کم خاک روی تاج تونل‌ها، عبور از زیر مناطق مسکونی و خیابان‌های مهم شهر، حفاری تونل‌ها به‌صورت تمام مقطع میسر نبوده است. به‌منظور حفظ پایداری و کنترل تغییر شکل‌های ناشی از عملیات تونل‌سازی، حفاری مقطع تونل با تقسیم سطح مقطع به بخش‌های کوچک‌تر به‌صورت چندمرحله‌ای انجام‌شده است که شیوه تقسیم و تقدم و تأخر عملیات اجرایی آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های اندرکنش خاک-سازه، ضوابط مربوط به کنترل پایداری، نشست‌های سطحی و تغییر شکل‌های توده خاک و همچنین ملاحظات اجرایی تعیین گردیده است. عملیات حفاری و حفاظت جداره تونل به‌طور همزمان از دهانه‌های ورودی و خروجی انجام گردیده و جبهه‌های حفاری در میانه مسیر به یکدیگر رسیده‌اند. سازه نگه‌دارنده تونل متشکل از پوشش‌های اولیه و نهایی است که برای تحمل فشارهای استاتیکی و لرزه‌ای طراحی‌شده‌اند. سازه نگه‌دارنده اولیه که برای تحمل بارهای حین ساخت طراحی‌شده است از ۱۵ الی ۲۵ سانتیمتر شاتکریت، شبکه فولادی و قاب‌های فولادی یا تیرهای مشبک به فواصل ۰/۵ الی ۱/۰ متر تشکیل یافته است. سازه نهایی تونل از بتن مسلح درجا به ضخامت ۱/۲ متر در کف و دیوارهای و ۰/۷ متر در تاج تشکیل یافته است که برای تحمل بخشی از نیروهای حین ساخت، بار وزن سازه، بار ناشی از زوال مقاومت سازه اولیه در طول عمر مفید سازه، بارهای ناشی از کاهش پارامترهای ژئوتکنیکی توده خاک و بارهای لرزه‌ای ناشی از زلزله طراحی‌شده است. در شکل ۱۹، مراحل مختلف اجرایی زوج تونل بلند رسالت همراه با ترتیب مراحل اجرایی نمایش یافته است.



شکل ۱۹- مراحل حفاری و نام‌گذاری گالری‌ها در تونل بلند رسالت (به همراه شماره پین‌های قرائت رفتارسنجی) (آقامالیان و همکاران ۱۳۸۶)

٤-۱-۲- چالش‌های اجرای تونل و راهکارهای ارائه‌شده

چالش‌های اجرای تونل رسالت عبارت بودند از:

- روباره خیلی کم زیر خیابان ولیعصر یا گاندی سرعت اجرای کم: تونل رسالت از زیر مناطق تجاری و مسکونی، شبکه‌های آب، برق، مخابرات و گاز و خیابان‌های مهم شهر مانند خیابان‌های گاندی، ولیعصر و سید جمال‌الدین اسدآبادی عبور می‌کند (اورنگ فرزانه و همکاران ۱۳۸۰).
- دهانه بزرگ و فاصله کم دو تونل، مقطع حفاری تحتانی بزرگ و نشست زیاد: همان‌گونه که گفته شد، مقطع تونل از دو نوار موازی با دهانه ۱۶/۵ متر تشکیل‌شده است. فاصله تونل‌های از هم در حدود ۳ متر است. با توجه به روباره ۶ تا ۳۴ متری و ضخامت خاک دستی ۰/۵ تا ۸/۵ متری و خاک نسبتاً ضعیف محدوده تونل، نتایج محاسبات نشست زیادی را در سطح زمین نشان دادند.
- برخورد با لنزهای ریزشی
- پایدارسازی خاک بین دو تونل
- مشکلات اجرایی (ورود شمع سازه نگهبان به داخل سازه نهایی–دسترسی و ویبره دشوار برخی مقاطع)

راهکارهای ارائه‌شده به‌منظور حل چالش‌های فوق عبارت بودند از:

- انجام مطالعات ژئوتکنیکی تکمیلی: در مطالعات مرحله اول و دوم، گمانه‌های ماشینی و چاهک‌های دستی متعددی در محدوده مسیر پروژه حفر گردیده و آزمایش‌های صحرایی همچون نفوذ استاندارد در گمانه‌ها و بارگذاری صفحه‌ای در چاهک‌های دستی انجام‌شده بود. در مرحله مطالعات تکمیلی با توجه به حفر گالری‌های جانبی تونل شمالی امکان دسترسی به توده خاک اطراف تونل‌ها به شکل بهتری فراهم گردید. لذا به امکان انجام آزمایش‌های بر جای مناسب برای تخمین پارامترهای برجای خاک توجه شد. با حفر ۷ گمانه در داخل گالری‌ها و ۲ گمانه در محدوده خیابان یوسف‌آباد آزمایش فشارسنجی[1] برای تخمین پارامترهای ارتجاعی خاک همراه با نمونه‌گیری انجام شد. علاوه بر آن در داخل گالری‌ها برش مستقیم برجا در ابعاد بزرگ ۵۳×۵۷×۵۷ cm در مقطع با حداکثر سربار و مقطع خیابان ولیعصر انجام شد. همچنین تعداد ۴ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای تا دستیابی به بار حدی در داخل گالری به انجام رسید. علاوه بر این آزمایش‌ها محدوده خاک دستی اطراف خیابان ولیعصر با حفر ۹ چاهک دستی به‌طور کامل شناسایی گردید (جبروتی ۱۳۸۵).
- اتکا به نتایج ابزار دقیق: اهداف اصلی برنامه رفتارسنجی و ابزار دقیق تونل رسالت عبارت بودند از: کنترل صحت فرضیات به‌عمل‌آمده در هنگام آنالیز و طراحی تونل، تعیین دقیق‌تر پارامترهای رفتاری زمین مانند ضریب چسبندگی، مدول ارتجاعی و نسبت تنش‌های افقی به قائم و کنترل ایمنی و پایداری تونل و نیز سازه‌ها و تأسیسات مجاور. با توجه به این اهداف و در نظر داشتن مواردی چون عبور تونل به فاصله کمی از

1. Pressure-meter test

زیر ساختمان‌های مسکونی، خطوط اصلی آب، برق و بخصوص گاز، بزرگ بودن دهانه حفاری و همچنین نزدیک بودن دو تونل به یکدیگر، کمیت‌های در نظر گرفته‌شده جهت اندازه‌گیری در این تونل به شرح زیر می‌باشد (اورنگ فرزانه و همکاران ۱۳۸۰):

- تغییر شکل پوشش موقت و دائم تونل: برای اندازه‌گیری تغییر شکل پوشش تونل، از همگرایی سنج نواری استفاده می‌شود. مزیت این نوع اندازه‌گیری دقت بالای آن است (برای فواصل کوچک‌تر از ۱۰ متر، دقت اسمی آن در حدود ۰/۰۱ میلی‌متر و دقت مطلق آن در حدود ۰/۱ میلی‌متر است). مشکل عمده این ابزار ایجاد تداخل در عملیات حفاری تونل است، زیرا هنگام همگرایی سنجی در نزدیکی سینه کار، امکان ادامه حفاری نیست. اشکال دوم این است که تنها تغییر شکل‌های پس از نصب پوشش تونل قابل‌اندازه‌گیری به‌وسیله همگرایی سنجی است و اندازه‌گیری تغییر شکل کل زمین با این روش مقدور نیست.
- نشست سطح زمین: روش بکار رفته جهت کنترل نشست در سطح زمین، ترازیابی با استفاده از ترازیاب دقیق (N3) است. نکته قابل‌توجه، حساسیت زیاد نتایج به شرایط جوی همچون باد و گرما و نور خورشید می‌باشد. به‌هرحال با توجه به نقش این اندازه‌گیری در کنترل تغییرشکلهای موجود، یکی از اندازه‌گیری‌های اصلی و اساسی در برنامه رفتارسنجی است.
- تنش در پوشش موقت و دائم: اندازه‌گیری تنش در پوشش موقف و دائم توسط سلول‌های فشارسنجی شعاعی و مماسی انجام می‌شود. سلول‌های شعاعی جهت اندازه‌گیری تنش وارده بر پوشش موقت، بین شاتکریت و خاک نصب می‌شوند. همچنین امکان نصب این سلول‌ها بین پوشش موقت و پوشش دائم وجود دارد. سلول‌های فشارسنجی مماسی نیز جهت تعیین نیروی محوری در پوشش‌های موقت و دائم بکار می‌روند.
- تغییر شکل زمین در اطراف تونل: تغییر شکل در زمین اطراف تونل توسط انبساط (کشیدگی) سنج‌های چندنقطه‌ای داخل گمانه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. نصب این انبساط‌سنج‌ها به دو صورت انجام می‌شود: (الف) انبساط‌سنج‌های شعاعی در داخل تونل که تغییر شکل‌های پس از حفاری هر مقطع را در اطراف تونل اندازه‌گیر می‌کنند (ب) انبساط‌سنج‌های چندنقطه‌ای نصب‌شده در گمانه‌هایی که از سطح زمین حفر می‌شوند. این انبساط‌سنج‌ها تغییر شکل نسبی قائم را اندازه‌گیری می‌کنند.
- البته شایان‌ذکر است که به علت تغییراتی که در برنامه اجرایی پروژه پیش آمد، برنامه رفتارسنجی مطابق با طرح اولیه انجام نگرفت و به‌اندازه گیری همگرایی در ۲۴ مقطع، اندازه‌گیری نشست زمین در ۸ مقطع عمود بر محور گالری‌ها و یک مقطع در امتداد محور یکی از گالری‌ها و نصب دو انبساط‌سنج ۴ و ۶ نقطه‌ای بر روی یک گالری محدود گردید.
- – اصلاح روش حفر و اجرای تونل: کاهش سرعت حفاری، تغییر روش حفاری، اصلاح سازه نگهبان، اضافه کردن مراحل حفاری و تحکیم جبهه‌های کاری از مواردی بوده‌اند که در اصلاح روش حفر و اجرای تونل بکار رفته‌اند و نقش مؤثری در حل چالش‌های موجود داشته‌اند. بخش از این تغییرات به‌صورت تجربی

صورت داده‌شده‌اند و بخش مهم دیگر با استفاده از تحلیل‌های برگشتی. ارزیابی مجدد مقادیر پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در اصلاح و تنظیم مدل‌های عددی و محاسباتی تونل در نواحی مختلف پروژه و پیش‌بینی عملکرد تونل طی مراحل اجرایی آینده داشته است (اورنگ فرزانه و همکاران ۱۳۸۰). این ارزیابی مجدد پارامترها و نتایج با تکیه‌بر نتایج برداشت‌های رفتارسنجی و ابزار دقیق بوده است. درواقع، به‌منظور تضمین بازه محتمل پارامترهای مدل رفتاری توده خاک با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در طول مراحل ساخت، تحلیل مراحل کامل اجرای تونل با در نظر گرفتن اندرکنش کامل سازه نگه‌دارنده تونل و توده خاک پیرامون به ازای مقادیر مختلف پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک با استفاده از روش المان محدود تکرار می‌شود و همگرایی جداره سازه اولیه و نشست سطحی ناشی از مراحل مختلف حفاری محاسبه می‌شود و با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌شود. بدین ترتیب محدوده تغییرات پارامترهای مقاومتی توده خاک تعیین می‌شود که ازلحاظ کاربردی بسیار حائز اهمیت است (آقا مالیان و همکاران ۱۳۸۶).

- استفاده از تکنولوژی های نوین نظیر بتن خود تراکم (SCC) در اجرای بخشی از لاینینگ تونل: دلیل عمده کاربرد بتن خود تراکم استفاده از روانی زیاد آن است تا امکان بتن‌ریزی در مقاطع با آرماتور زیاد را فراهم آورد. این بتن باقابلیت‌های سه‌گانه پرکنندگی، عبور و مقاومت در برابر جداشدگی کارایی مناسب برای استفاده در سازه تونل رسالت را داشته است. در پروژه تونل رسالت، به هنگان بتن‌ریزی در پشت یکی از قطعات امکان دسترسی و ویبره کردن بتن وجود نداشته و به همین دلیل استفاده از بتن خود تراکم الزامی شده است. بر اساس آزمایش‌ها و مطالعات انجام‌یافته در پروژه تونل رسالت و بر اساس مقتضیات پروژه، مصرف ۴۰۰ کیلوگرم سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ توصیه‌شده است. علاوه بر آن، در بتن مصرفی از پودر سنگ به‌عنوان فیلر و افزودنی‌های منبسط شونده و مواد اصلاح‌کننده لزجت (VMA) استفاده‌شده است (جبروتی ۱۳۸۵).

٤-۲- مطالعه موردی ۲: تونل نیایش

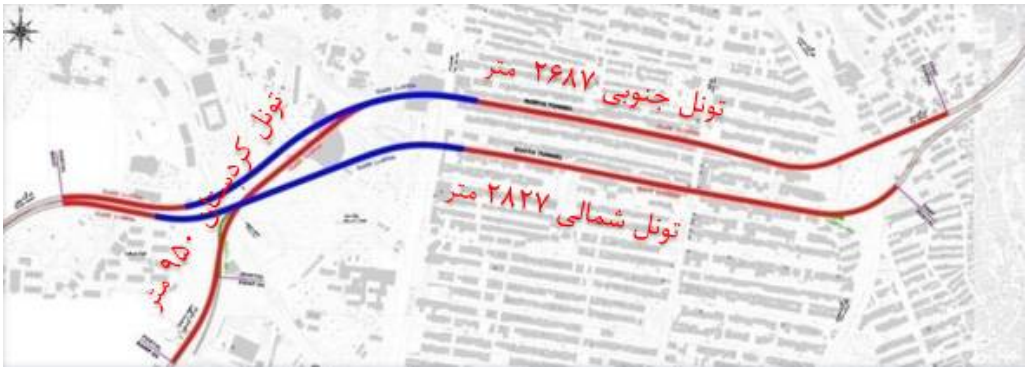
٤-۲-۱- کلیات و روش اجرا

با خاتمه بزرگراه نیایش در تقاطع ولی‌عصر، بار ترافیکی تردد از غرب به شرق، وارد خیابان‌های ولیعصر، اسفندیار و بزرگراه مدرس می‌گردد. همچنین جهت تردد از شرق به غرب نیز بار ترافیکی بزرگراه صدر وارد بزرگراه مدرس و چمران شده و ترافیک سنگینی را به منطقه وارد می‌نماید لذا به‌منظور حل مشکل ترافیکی منطقه، تونل نیایش با دو تونل رفت‌وبرگشت شرقی و غربی طراحی‌شده است. به‌این‌ترتیب ترافیک عبوری از پل طبقاتی صدر از طریق تونل شرقی- غربی به‌صورت مستقیم به بزرگراه نیایش و کردستان وارد می‌شود و ترافیک عمده بزرگراه نیایش در مسیر غرب به شرق از طریق تونل به‌طور مستقیم به پل طبقاتی صدر می‌رسد (شکل ۲۰ و جدول ۱).

این تونل به‌عنوان یک تونل «ایمن»، «استاندارد» و «هوشمند»، بر اساس آخرین استانداردهای روز دنیا ساخته‌شده است.

روش اجرای تونل نیایش به‌صورت ناتم بوده و در مقاطع بزرگ دوراهی از سیستم شمع و ریب استفاده‌شده است. درواقع، پس از حفر دریفت های کناری، شمع و ریب در صورت نیاز اجراشده و سپس بخش میانی تونل اجرا گردید. در مقاطع دوخطه نیز ابتدا نیم مقطع فوقانی در دو مرحله و سپس نیم مقطع تحتانی و درنهایت عملیات کف برداری انجام شد (شکل ۲۱).

پوشش اولیه تونل شامل شاتکریت مسلح به دو یا چهار لایه شبکه آرماتور و لتیس گریدر می‌باشد. پوشش نهایی نیز از بتن مسلح طراحی و اجرا گردید.



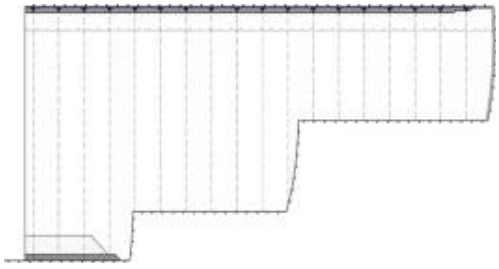
شکل ۲۰- مشخصات تونل کردستان (پورهاشمی ۱۳۹۱)

جدول ۱- طول رمپ و تونل‌های نیایش (پورهاشمی ۱۳۹۱)

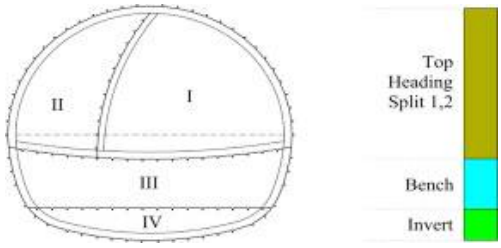
موقعیت	رمپ (m)	تونل (m)	کل (m)
تونل‌های اصلی	۱،۳۵۴	۶،۶۵۸	۸،۰۱۳
تونل‌های دسترسی	۳۳۷	۱،۹۰۲	۲،۲۳۹
کل پروژه	۱،۶۹۱	۸،۵۶۰	۱۰،۲۵۲

حفاری و اجرای پوشش تونل نیایش به روش ناتم انجام شده است. تونل شامل بخش‌هایی با مقطع دوخطه و بخش‌هایی با مقطع سه خطه و دوراهی است. شکل ۲۲ مراحل اجرای تونل را در مقاطع دو و سه خطه نشان می‌دهد. در محل دوراهی‌ها با توجه به عرض زیاد مقطع تونل از روش شمع و ریب جهت تقویت خاک و جلوگیری از ریزش بخش میانی (مراحل V تا VII شکل ۲۱) استفاده‌شده است. در این روش ابتدا دریفت های کناری (مراحل I تا IV شکل ۲۱) حفاری می‌شوند. سپس با حفر تونل‌های کوچکی در کنار تونل، حفاری شمع‌های کناری به سمت بالا و پایین انجام می‌شود (شکل ۲۲–الف). سپس در بالای تاج تونل، شمع‌های دو طرف مقطع به‌صورت کمانی با حفر ریب[1]های افقی به هم متصل می‌شوند (شکل ۲۲–ب). در رأس ریب‌ها و در راستای محور تونل نیز ریب‌ها با یک گالری به هم متصل می‌شوند (شکل ۲۲–پ). پس از انجام حفاری شمع‌ها، ریب‌ها و گالری ارتباطی، درون آن‌ها آرماتوربندی و بتن‌ریزی می‌شود (شکل ۲۲–ت و ث). پس از اجرای ریب‌ها عملیات حفاری بخش میانی تونل انجام می‌شود.

۱. قوس بتنی که در بالای سقف تونل یا ایستگاه جهت محافظت از فضای حفاری قبل اجرای تونل یا ایستگاه و عمدتاً در خاک‌های ضعیف اجرا می‌شود.

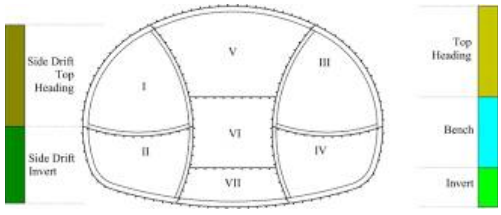


مقاطع دوخطه- مقطع طولی مراحل حفاری



مراحل حفاری مقاطع دوخطه

مقاطع سه خطه- مقطع طولی مراحل حفاری

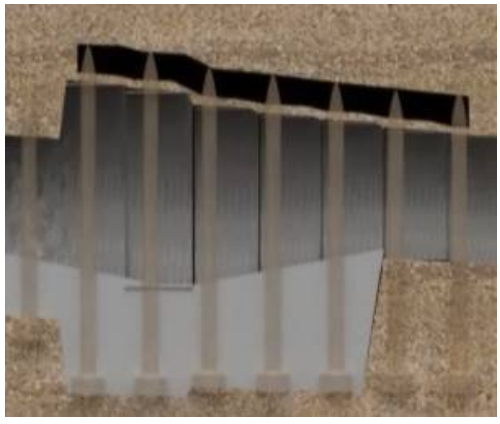


مراحل حفاری مقاطع سه خطه

شکل ۲۱- مراحل اجرای تونل نیایش (فرزانه ۱۳۹۱)

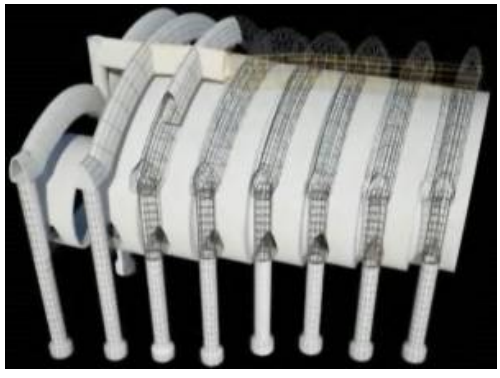
الف- حفاری دریفت های کناری و حفاری شمع‌ها

ب- حفاری ریب‌های فوقانی مقطع



پ- حفاری گالری فوقانی (نمای جانبی)

ت- آرماتوربندی شمع و ریب‌ها



ث- بتن‌ریزی شمع و ریب‌ها

ج-مقطع مسلح شده و آماده حفاری بخش میانی

شکل ۲۲- مراحل اجرای روش شمع و ریب برای تحکیم خاک اطراف مقاطع بزرگ حفاری تونل نیایش (پورهاشمی ۱۳۹۱)

٤-۲-۲- چالش‌های اجرای تونل و راهکارهای ارائه‌شده

چالش‌های اجرای تونل نیایش به دو دسته چالش‌های اجرایی و چالش‌های مدیریتی تقسیم‌شده است (پورهاشمی ۱۳۹۱). چالش‌های اجرایی تونل نیایش عبارت‌اند از (شکل‌های ۲۳ تا ۲۵):

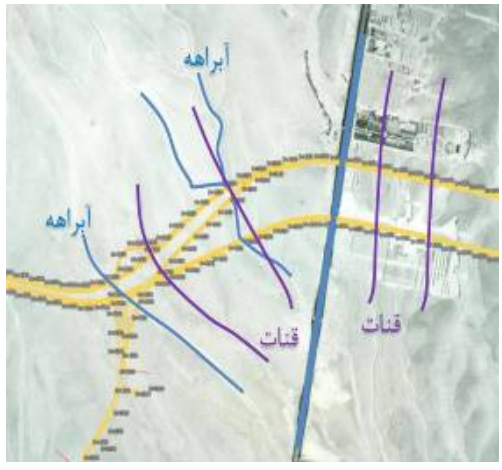
- کنترل همزمان کیفیت، سرعت و ایمنی در هنگام حفاری به‌منظور اجرا در ۲۴ ماه (۲ پیمانکار – ۸ کارگاه – ۴۲ جبهه کاری در هنگام حفاری)
  - حفاری ۱۲۰،۰۰۰ مترمکعب خاک در ماه
  - ابزاربندی با کنترل تغییر شکل‌های تونل با روش سه‌بعدی و نشست سنج‌های سطحی و تغییر گام‌های حفاری بر این اساس تا ۲ متر
  - کاهش هزینه حفاری به میزان ۳۸۰ میلیارد ریال
- تأسیسات زیرزمینی شهری
  - مشخص نبودن موقعیت تأسیسات
  - نیاز به سونداژ
  - هزینه‌های زیاد جابجایی
  - جابجایی ۶ کیلومتر تأسیسات در یک ماه
- شرایط زمین‌شناسی
  - سازند: تونل در سازند A و B قرار دارد. ضخامت سازند A، ۱۲۰۰ متر است. به دلیل شرایط رسوب‌گذاری، مشخصات سازند A بسیار متغیر است
  - وجود آبراهه‌های قدیمی
  - وجود خاک دستی با عمق زیاد
  - وجود لایه‌های آب بر– ایجاد مسیرهای عبور آب و تأثیر بر حفاری
- روباره کم– عرض حفاری تونل‌ها ۱۴ و ۱۸ متر – حفاری تونل در روباره حداقل ۴/۷ متر–استفاده از فورپولینگ
- عبور تونل از زیر بافت فرسوده مسکونی
- عبور از زیر بزرگراه در حال بهره‌برداری مدرس (با روباره ۵ الی ۸ متر با تونلی به قطر ۱۸ متر بدون هیچ‌گونه تأثیر در ترافیک بزرگراه مدرس)
- مدت‌زمان اجرای تقاطع‌ها (کاهش زمان اجرا به یک هفته)

- بزرگ‌ترین دوراهی در آبرفت با عرض حفاری ۳۱ متر و ارتفاع ۱۹ متر (بزرگ‌ترین مقطع تونلی در مناطق آبرفتی)
- دوراهی کردستان
  - عبور از زیر دریاچه پارک ملت با روباره ۱۵ متر–اجرای سیستم شمع و ریب
  - عایق‌بندی دریاچه پارک ملت در مدت یک ماه
- امکان بروز خطا در اتصال تونل‌های شرقی و غربی: این مسئله با دقت ویژه در برداشت‌ها با محدود کردن خطای اجرای مسیر تونل به ۲ سانتی‌متر مرتفع شد.

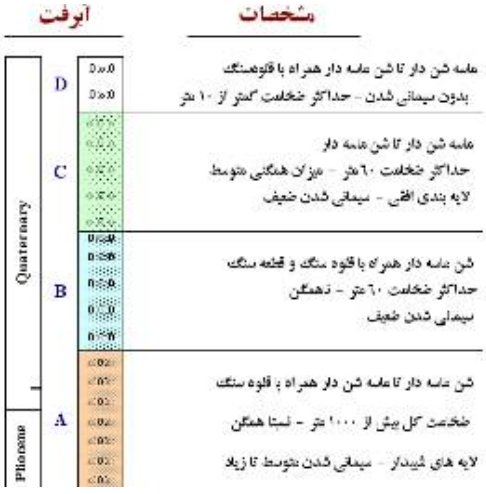
چالش‌های مدیریتی تونل نیایش عبارت‌اند از:

- هماهنگی با سایر سازمان‌های وابسته به شهرداری
- هماهنگی با سایر سازمان‌های خدماتی
- عدم وجود سازمان یا شرکت تخصصی تونل‌های شهری در شهرداری
  - سلیقه‌ای بودن تصمیم‌های کارشناسی
  - عدم تصمیم‌گیری‌های به‌موقع
  - اظهارنظرهای غیر کارشناسی
  - انجام تصمیم‌گیری‌های مدیریتی درباره موضوعات کارشناسی
  - ثبت نشدن تجربیات سازمانی
  - نبود استانداردهای مدون و بومی‌شده مربوط به تونل‌های شهری
- تملک دائم یا موقت اراضی یا ساختمان‌ها در محدوده طرح
  - توافق با مالکین
  - نبود بودجه لازم
- ادعاهای برخی شهروندان و سازمان‌های مجاور محدوده طرح
  - ایجاد اخلال در روند اجرای پروژه
  - ادعاهای مالی

الف- جبهه‌های کاری فراوان



ب- وجود آبراهه‌های قدیمی



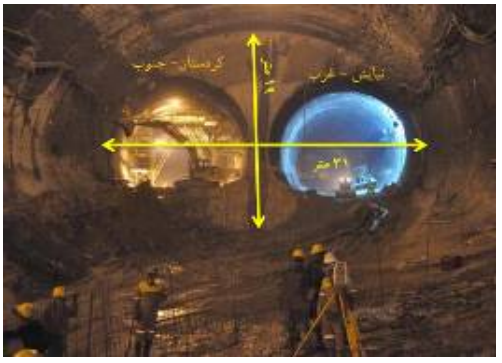
پ- مشخصات متغیر سازند A زمین‌شناسی تهران

الف- وجود خاک دستی با ضخامت زیاد

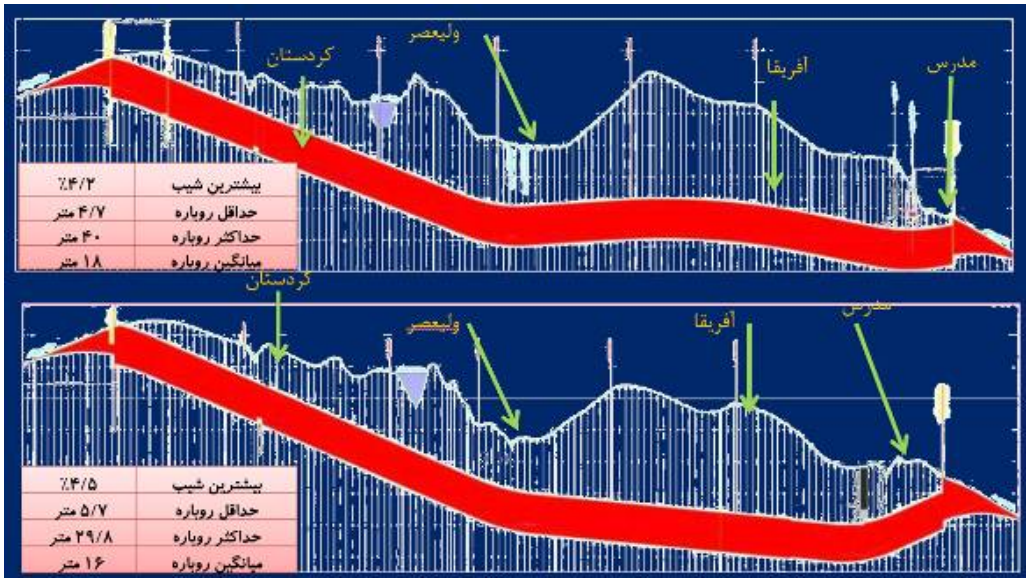
ب- دوراهی در آبرفت با عرض حفاری ۳۱ متر و ارتفاع ۱۹ متر (بزرگ‌ترین مقطع تونلی در مناطق آبرفتی)

پ- عبور از زیر بزرگراه در حال بهره‌برداری مدرس (با روباره ۵ الی ۸ متر با تونلی به قطر ۱۸ متر)

ت- تأثیر وجود لایه‌های آب‌بر بر حفاری و ایجاد مسیرهای عبور آب



ث- دوراهی کردستان عبور از زیر دریاچه پارک ملت با روباره ۱۵ متر با اجرای سیستم شمع و ریب-عایق بندی دریاچه پارک ملت در مدت یک ماه



الف- روباره کم- عرض حفاری تونل‌ها ۱۴ و ۱۸ متر - حفاری تونل در روباره حداقل ۴/۷ متر-استفاده از فورپولینگ

ب- کاهش مدت‌زمان اجرای تقاطع‌ها به یک هفته (در مقایسه با یک ماه زمان اجرای تقاطع تونل‌های دسترسی در مترو)

شکل ۲۳- چالش‌های اجرایی تونل نیایش (پورهاشمی ۱۳۹۱)

راهکارهای ارائه‌شده جهت حل چالش‌های اجرایی و مدیریتی تونل نیایش عبارت‌اند از:

۱. استفاده از نتایج برداشت‌های ابزار دقیق و رفتارسنجی: با توجه به عبور تونل از زیر بافت مسکونی، دریاچه پارک ملت، نیاز به دستیابی به‌سرعت اجرای بالا، وجود خاک دستی باضخامت زیاد و موارد مشابه، بهترین راهکار پیشگیری از خطرات احتمالی ناشی از این موارد، استفاده از ابزار دقیق و رفتارسنجی بوده است. پیش‌بینی ابزار دقیق تونل نیایش، طراحی مفصلی است شامل برداشت‌های همگرایی سنجی، ترازیابی

با پین‌های ژئودتیکی، کرنش‌سنج‌های مدفون در بتن، نشست سنجی، کشیدگی سنج‌های چندنقطه‌ای در گمانه‌ها، انحراف سنج گمانه‌ای و رفتارسنجی ساختمان‌ها در محدوده تأثیر تونل‌ها شامل نصب نقاط نقشه‌برداری روی ساختمان‌ها، نصب نقاط نقشه‌برداری خودکار (GPS)، شیب سنجی و ترک سنجی (شکل ۲۴). اجرای عملیات رفتارسنجی در پروژه تونل نیایش و اصلاح ویژگی‌های طرح و شرایط اجرا، موجب کاهش هزینه‌های اجرای تونل به میزان قابل‌توجهی گردیده است.

۲. راهکارهای طراحی و اجرایی: با توجه به ویژگی‌های خاص تونل نیایش برخی راهکارها به‌تناسب مسئله موردنظر ارائه‌شده‌اند. راهکار ارائه‌شده برای حفاری دهانه‌های بزرگ در دوراهی‌ها جهت جلوگیری از نشست سطحی و ریزش‌های محتمل، اجرای سیستم شمع و ریب توأم با روش NATM بوده است (حسینی و همکاران ۲۰۱۴). استفاده از قوانین رفتاری مناسب در مدل‌های دو و سه‌بعدی جهت در نظر گرفتن صحیح رفتار توده سیمانه زمین و پیش‌بینی نزدیک به واقعیت تغییر شکل‌ها و نشست‌های خاک، کاربرد فورپولینگ (تزریق چتری) و کاهش گام حفاری راهکار دیگری جهت مقابله با چالش‌های ژئوتکنیکی پروژه در نقاط حساسی نظیر عبور از زیر بزرگراه در حال بهره‌برداری کردستان بوده است (یثربی و همکاران، ۲۰۱۳).

۳. تأسیس سازمان یا شرکت تخصصی تونل‌های شهری: مهم‌ترین راهکار پیشنهادشده در جهت حل مسائل و چالش‌های متعدد مدیریتی در اجرای تونل‌های شهری تأسیس سازمان یا شرکت تخصصی تونل‌های شهری در شهرداری است تا از بروز مشکلاتی همچون سلیقه‌ای بودن تصمیم‌های کارشناسی، عدم تصمیم‌گیری‌های به‌موقع، اظهارنظرهای غیر کارشناسی، انجام تصمیم‌گیری‌های مدیریتی درباره موضوعات کارشناسی و ثبت نشدن تجربیات سازمانی جلوگیری کند. این سازمان درعین‌حال می‌تواند با تدوین استانداردهای مدون و بومی‌شده مربوط به تونل‌های شهری در جهت رفع موانع و مشکلات متعدد در حفر و اجرای این تونل‌ها کمک شایانی کند.

الف- طرح کلی

ب- شیب‌سنج

پ- ترک سنج دوبعدی با گیج قرائت عقربه‌ای

ت- نصب منشور بر روی ساختمان‌ها برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های سه‌بعدی آن‌ها

ث- GPS دو فرکانسه برای کنترل دورسن‌های توتال استیشن مجهز به منشور ۳۶۰ درجه

شکل ۲۴-طرح رفتارسنجی ساختمان‌های مسیر تونل نیایش (گزارش فاز ۲ رفتارسنجی پروژه تونل نیایش ۱۳۹۰)

٤-۳- مطالعه موردی ۳: خط یک قطار شهری اهواز

٤-۳-۱- کلیات و روش اجرا

پروژه خط یک قطار شهری اهواز به طول ۲۴ کیلومتر و ۲۳ ایستگاه زیرزمینی، توسط دو تونل به قطر داخلی ۵/۹۰ متر و قطر حفاری ۶/۸۰ متر که به یکدیگر وصل می‌شوند، از شمال شرقی اهواز با عبور از مرکز شهر و زیر رودخانه کارون و درنهایت به جنوب غربی شهر ختم می‌گردد. بر اساس مطالعات و بررسی‌های سطحی و زیرسطحی و آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام‌شده، شرایط ژئوتکنیکی و لایه‌بندی خاک به سه ناحیه برای ایستگاه‌ها تقسیم‌بندی شده است.

ناحیه اول: ناحیه شمالی پروژه شامل لایه اول تا عمق حدود ۲ متر خاک دستی، تا عمق ۹ الی ۱۳ متر خاک ریزدانه با لنزهای ماسه‌ای و سپس به لایه‌های فوقانی سازند آغاجاری گلسنگ تشکیل‌شده است و تراز آب زیرزمینی در این ناحیه حدود ۲ متر زیر سطح زمین است.

ناحیه دوم: ناحیه میانی پروژه شامل ایستگاه‌های واقع شده در مرکز شهر و عبور از زیر رودخانه کارون و رسیدن به تلاقی لایه‌های آبرفت جوان و ریزدانه آبدار است. در این ناحیه لایه اول تا عمق حدود ۲ متر خاک دستی بوده و سپس تا عمق ۳۵ متری که گمانه‌زنی انجام‌شده است، تناوبی از لایه‌های رس و سیلت و ماسه دیده می‌شود. سطح آب در این ناحیه در عمق ۲ متری زیر سطح زمین بوده و به علت وجود لایه‌های ماسه‌ای نشت آب و نفوذپذیری بسیار بالا می‌باشد.

ناحیه سوم: ناحیه جنوبی پروژه به طول تقریبی ۶ کیلومتر از محل تلاقی دولایه آبرفت جوان و ماسه‌ای آبدار شروع‌شده و تا انتهای پروژه ادامه می‌یابد. در این قسمت خاک تا عمق حدود ۲ متر از جنس خاک دستی بوده و سپس یک‌لایه خاک ریزدانه رسی تا عمق ۴ تا ۶ متر و پس‌ازآن تا عمق ۳۵ متری (که گمانه‌زنی انجام‌شده است)، ماسه ریزدانه و در برخی قسمت‌ها لنز و لایه‌هایی از سیلت و رس وجود دارد. در این ناحیه نفوذپذیری بسیار بالا بوده و در برخی قسمت‌ها پتانسیل روانگرایی وجود دارد.

در هر سه ناحیه، درصد سولفات (SO4--) بین ۰/۳ الی ۰/۵ و درصد کلر بین ۰/۱ الی ۰/۸ متغیر است. با توجه به شرایط خاک و آب اهواز و همچنین قرارگیری سازه در مجاورت دائم با خاک و آب زیرزمینی و بر اساس ویژگی‌های شرایط محیطی مختلف ذکرشده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، شرایط محیطی شدید در پروژه حاکم می‌باشد و لازم است الزامات آیین‌نامه برآورده شود.

انتخاب روش اجرای سازه ایستگاه‌ها، بر این اساس و متناسب با شرایط و پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک و سنگ در ساخت گاه پروژه انجام‌شده است و به‌کارگیری هر روش منوط به موقعیت ایستگاه و قرارگیری در هرکدام از سه ناحیه می‌باشد. شایان‌ذکر است که در بخش شمالی خط از روش‌های اول و دوم و در بخش جنوبی خط از روش سوم استفاده‌شده است. در ادامه، این روش‌ها تشریح شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند (مصاحبه با مهندسین شرکت کیسون، ۱۳۹۳).

٤-۳-۱-۱- روش اجرای Bottom-Up (BU)

روشی که هم‌اکنون در ساخت ایستگاه‌های پروژه قطار شهری اهواز بکار می‌رود عبارت است از: اجرای دیوار حفاظت گود، حفاری تا رسیدن به عمق موردنظر و نصب استرات‌ها در ترازهای مشخص، احداث پی گسترده کف ایستگاه، اجرای دیوارها، ستون‌ها و سقف‌های سازه ایستگاه و برچیدن استرات‌ها[1] از سمت پایین به بالا و درنهایت اجرای سقف نهایی، بدین گونه ساخت سازه زیرزمینی ایستگاه پایان می‌یابد. این روش متداول‌ترین روش اجرایی در احداث سازه‌های زیرزمینی بوده و به‌این‌علت که سازه از کف به سمت بالا ساخته می‌شود این روش را اصطلاحاً Bottom-Up (BU) می‌نامند.

مشکلات روش اجرایی BU برای ایستگاه‌های واقع در بخش جنوب غربی رود کارون را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- ✓ مشکل اصلی احداث ایستگاه‌های بخش جنوب غربی رود کارون، بدی کیفی خاک منطقه و پایین بودن مشخصات مکانیکی خاک و وجود لنزهای ماسه‌ای در آن است. درنتیجه محاسبات نشان می‌دهد برخلاف طرح یک ردیفه استرات با وزن ۲۸۰ تن در نقشه‌های قبلی با شرایط خاک مناسب‌تر، دو ردیف استرات هر یک با وزن ۴۲۵ تن برای طرح ایستگاه‌های جدید، ضروری می‌شود.
- ✓ نصب استرات‌ها که عموماً در تراز ۵- و تراز ۱۲- نصب می‌شوند، منجر به‌کندی بیش‌ازحد عملیات اجرایی خاک‌برداری بین استرات‌ها می‌گردد.
- ✓ عدم امکان آزادسازی استراتهای تراز ۱۲- قبل از اتمام عملیات اجرایی سقف تراز میانی ایستگاه (تراز ۷/۶-) درنتیجه عدم امکان اجرای پایه‌های اطمینان مشکلات زیادی را در قالب‌بندی تراز موردنظر سبب می‌گردد و روش اجرای سقف میانی را پیچیده و زمان اجرا را بسیار افزایش می‌دهد.
- ✓ با انجام خاک‌برداری تا تراز ۱۷/۵- با نصب دو ردیف استرات و در شرایطی که پیوستگی کامل به بارتهای۲ بتنی وجود ندارد و عملیات حفاری نیز طولانی‌تر است، ریسک ایجاد شکست در بارتها و استرات‌ها حین اجرا، افزایش می‌یابد (این در حالی است که در روش Top-Down با اجرای سقف‌های پیوسته با بارتها، صلبیت سقف نیز بسیار بیشتر از استرات بوده و با محدود شدن هرچه بیشتر تغییر شکل جانبی خاک و بارتها، امکان ایجاد شکست بسیار کاهش می‌یابد.)

---

1. Struts

۲. در اجرای دیوار دیافراگمی، این دیوار به قطعات کوچک‌تری به نام پانل تقسیم می‌شود. حفاری در پانل‌های کوچک به‌صورت یک مرحله‌ای و در پانل‌های بلندتر تا سه مرحله انجام می‌شود. بدین ترتیب که برای حفاری هر پانل، آن را به قطعات کوچک‌تری که بارت نامیده می‌شود تقسیم می‌کنند، تعداد بارت‌ها بستگی به طول و ابعاد کلامشل (Clamshell) گراب دارند (کلامشلها گراب وسیله حفاری پانل‌هاست). اندازه هر بارت حداکثر برابر با اندازه طول کلامشل حفاری است. نحوه انجام عملیات حفاری بدین‌صورت است که پس از اجرای (حفاری و بتن‌ریزی) دیوار راهنما، پانلی که طول زیادی دارد به سه قسمت تقسیم‌بندی می‌شود. ابتدا دستگاه گراب در محل بارت اول مستقر و تراز شده و شروع به حفاری می‌کند، سپس ماشین به محل حفاری بارت دوم و سوم منتقل می‌شود. بدین ترتیب یک پانل حفاری می‌شود. سپس دستگاه پانل بعدی را حفاری می‌کند. همچنین هم‌زمان با حفاری هر بارت، برای جلوگیری از ریزش و پایداری جداره‌های بارت در حین حفاری، گل بنتونیت به صورت مداوم به درون چال هدایت می‌شود.

٤-۳-۱-۲- روش اجرای Top-Down با ستون موقت فلزی (TDC)

در بخش‌های مرکزی و جنوبی، به علت قرارگیری ایستگاه‌ها در مرکز شهر و مناطق تجاری و اداری و همچنین به علت فاصله کم از این سازه‌ها با سازه ایستگاه و ضمناً به دلیل نفوذپذیری بالای خاک، باید روشی انتخاب می‌شد که خطر نشست و تخریب سازه‌های اطراف را به حداقل برساند. این امر مستلزم آن است که ساخت ایستگاه کمترین تأثیر را در شرایط خاک و آب زیرزمینی منطقه ایجاد نماید. مضافاً اینکه غلبه بر نیروی بالا زدگی ناشی از فشار آب (uplift) در زمان ساخت و قرارگیری سازه تا زمان بارگذاری تحت سرویس و نهایی باید با اصطکاک بدنه بتن دیوار دیافراگمی و خاک تأمین گردد. در این راستا جهت تأمین کلیه موارد فوق و بخصوص جلوگیری از نفوذ آب و حمله سولفات‌ها از روش اجرای بالا به پایین استفاده شد. این روش که منحصر به احداث سازه‌های زیرزمینی می‌باشد به‌گونه‌ای است که طی آن از دیوارهای دیافراگمی یا دیوارهای شمعی درجا که به‌عنوان دیوار حفاظت گود در ابتدا احداث می‌شوند به‌عنوان دیوارهای اصلی سازه زیرزمینی استفاده گردد (همانند گزینه اول روش BU)، با این تفاوت که در این روش ستون‌ها نیز با استفاده از سیستم اجرای بارت‌های دیافراگمی یا روش‌های اجرایی دیگر از قبیل ستون‌های پیش‌ساخته فلزی، ستون‌های درجا، شمع‌های درجا و یا به‌صورت ترکیبی از روش‌های ذکرشده حفاری و اجرا گردیده و سپس نسبت به احداث سقف‌ها از بالاترین تراز به سمت پایین و خاک‌برداری زیر هر سقف اقدام می‌گردد. در این روش، سقف طبقات به‌عنوان سازه‌های دائمی هستند که جایگزین استرات‌ها یا سایر سیستم‌های مهاربندی درروش اجرای BU می‌شوند که وظیفه مهار دیوارهای سازه نگهبان در برابر بارهای جانبی ناشی از خاک پشت و سایر سربارها را بر عهده‌دارند.

در این روش، ساخت سازه زیرزمینی با تکمیل مراحل حفاری و ساخت فونداسیون کف به پایان می‌رسد و کاربرد آن در ساخت ساختمان‌های بلند دارای تعداد طبقات زیرزمینی زیاد، به جهت کاهش مدت‌زمان اجرا و هزینه‌های پروژه بسیار تأثیرگذار است به‌گونه‌ای که احداث ساختمان فوقانی همزمان با عملیات حفاری و احداث طبقات زیرین قابل انجام است و سرعت اجرای سازه روزمینی به‌هیچ‌عنوان وابسته به پیشرفت ساخت سازه زیرزمینی نخواهد بود. نکته مهم در این روش این است که با توجه به اینکه بار وارد بر ستون‌ها در این روش قابل‌توجه بوده لذا باربری ستون‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به همین علت در این روش عموماً از فونداسیون‌های عمیق و یا با اضافه نمودن سطح و یا عمق ستون از ظرفیت باربری اصطکاکی شمع‌ها برای ساخت ستون‌ها استفاده می‌شود.

به دلیل ملاحظات معماری در طرح فضای داخلی ایستگاه‌ها، ابعاد ستون‌ها از مقادیر بیشینه ۱/۵۰×۰/۶ متر فراتر نمی‌رود حال‌آنکه کلامشل گرب های موجود در پروژه به ابعاد (۲/۵۰×۰/۸) و (۲/۷۰×۰/۸) متر بوده و چنانچه ستون‌ها با این ابعاد و به روش بتن درجا اجرا شوند، ناگزیر به رعایت رواداری حداقل ۳۰ سانتیمتری خواهیم بود که نهایتاً منجر به اجرای ستون‌های با ابعاد به‌مراتب بزرگ‌تر از ابعاد کلامشل می‌گردد و این موضوع مغایر با اهداف معماری و طرح فضای داخلی ایستگاه خواهد بود. درنتیجه به جهت اجتناب از بروز این مشکل با بررسی روش‌های مختلف و متعدد و انجام محاسبات متناسب با روش‌های اجرایی، از ستون‌های مرکب فلزی و بتنی استفاده‌شده است. اجرای ایستگاه به روش فوق طبق مراحل زیر انجام می‌گیرد.

الف – اجرای دیوار دیافراگمی و اجرای ستون موقت فلزی

در مرحله اول همزمان با اجرای دیوارهای دیافراگمی پیرامونی، با استفاده از دستگاه گرب محل ستون‌ها فلزی حفاری می‌شود. حفاری محل احداث ستون تا اعماق زیرتر از فونداسیون سازه اصلی ادامه می‌یابد. طول ستون فلزی با مقطع باکس به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که تراز زیرین آن پس از استقرار در محل، هم‌تراز کف فونداسیون سازه اصلی گردد. شبکه میلگرد انتظار انتهای ستون که از قبل بااتصال جوشی به ستون متصل شده ضامن پیوستگی شمع بتنی زیرین با ستون فلزی است. پس از نصب و استقرار ستون فلزی در جایگاه مناسب و مستحکم ساختن آن، بتن‌ریزی آغاز می‌شود. عملیات بتن‌ریزی تا جایی ادامه می‌یابد که محل حفاری‌شده تا تراز بالاتر از کف فونداسیون با بتن مرغوب پر شود. پس‌ازاین مرحله بتن‌ریزی فقط از طریق فضای داخلی باکس ستون فلزی انجام‌گرفته و تا جایی که کل باکس از بتن مرغوب پر شود ادامه می‌یابد.

ب – اجرای سقف نهایی ایستگاه

پس از اجرای دیوار دیافراگمی دور ایستگاه و ستون‌های میانی نسبت به اجرای سقف نهایی ایستگاه اقدام خواهد گردید. به این منظور جهت تسریع در عملیات اجرایی پروژه می‌توان پس از اجرای هر بخش از دیوارها و ستون‌ها، عملیات گودبرداری تا عمق موردنظر جهت ساخت سقف نهایی را به‌تدریج انجام داده و پس از رگلاژ کف و اجرای زهکش جهت هدایت آب‌های زیرزمینی باضخامت حدود ۲۰ سانتیمتر سرباره و ۱۰ سانتیمتر بتن مگر، نسبت به آرماتوربندی و بتن‌ریزی سقف نهایی اقدام نمود. برای اتصال سقف نهایی به دیوار دیافراگمی دور، همانند روش BU از درگیری مناسب میلگردهای سقف و ستون استفاده‌شده و جهت اتصال سقف به ستون فلزی، نشیمن فلزی با سخت‌کننده‌های خاص پیش‌بینی‌شده است. با دسترس بودن جدار ستون فلزی، هرگونه اتصال و انتظار فلزی را می‌توان به سهولت به ستون جوش داده و پیوستگی کامل بین سقف و ستون ایجاد نمود. میلگردهای انتظار جهت اتصال به ستون بتنی نیز می‌بایست در سقف نهایی در محدوده ستون‌های فلزی پیش‌بینی گردد.

نکته بسیار مهم در اجرای سقف‌های سازه‌های زیرزمینی درروش Top–Down تعیین موقعیت بازشوها در زمان اجرای هر سقف می‌باشد؛ زیرا پس از اجرای سقف نهایی کلیه عملیات در ترازهای پایین‌تر از طریق این بازشوها انجام خواهد گردید و عملاً ارتباط بین کارگاه روزمینی و زیرزمینی از طریق این بازشوها خواهد بود. لذا این بازشوها باید به‌گونه‌ای تعیین و اجرا گردند که بتوانند کلیه نیازهای اجرایی کارگاه را تأمین نمایند.

ج– گودبرداری زیر سقف نهایی تا تراز اجرای سقف میانی

پس از تکمیل سقف نهایی ایستگاه، عملیات گودبرداری زیر این سقف آغاز می‌شود. طی این مرحله ماشین‌آلات به‌تدریج گودبرداری طبقه فوقانی ایستگاه را تا تراز زیر سقف سالن فروش بلیط انجام می‌دهند و طی عملیات، مصالح ناشی از حفاری با استفاده از لودر، بولدوزر یا بیل‌های بکهو[1] در زیر نزدیک‌ترین بازشو تعبیه‌شده در سقف دپو شده و با استفاده از یکی از روش‌هایی که توضیح داده خواهد شد به بیرون از باکس ایستگاه منتقل و جهت خروج از کارگاه بارگیری می‌گردد.

برای انتقال مصالح به بیرون از باکس بهتر است در ابتدای حفاری از بیل‌های مکانیکی دکل بلند جهت افزایش

1. backhoe loader

سرعت حفاری و خروج مصالح استفاده شود و به این طریق سرعت‌پایین رفتن ماشین‌آلات مستقر بر روی بازشو بیشتر خواهد گردید. نکته بسیار مهمی که در مرحله حفاری می‌بایست در نظر گرفته شود این است که انتخاب ماشین‌آلات مورد نیاز عملیات خاکی در هر ایستگاه می‌بایست به‌دقت و بر اساس گزارش‌های زمین‌شناسی منطقه صورت گرفته و حتی‌المقدور از ماشین‌آلات با ارتفاع کم و ابعاد کوچک استفاده گردد. پس از رسیدن به اعماق پایین‌تر، برای خارج کردن مصالح از درون بازشوها چهار روش قابل‌استفاده است:

استفاده از بیل‌های مکانیکی با بازوی تلسکوپی[1]: در این روش مصالح دپو شده در زیر بازشوها با استفاده از بیل مکانیکی دارای کلامشل با بازوی تلسکوپی که توانایی بارگیری خاک‌های دپوشده را دارند مطابق شکل‌های زیر به بیرون حمل و مستقیماً بارگیری می‌گردند.

در روش دوم با استفاده از باکتهای بسته‌شده بر روی جرثقیل این مصالح به بیرون از باکس آورده شده و دپو می‌گردند که این روش با توجه به نیاز به یک سیستم بارگیری باکت در کف (لودر یا بیل مکانیکی) و یک سیستم بارگیری در سطح زمین برای بارگیری خاک‌های دپو شده در کامیون‌ها نسبت به روش اول پرهزینه‌تر خواهد بود.

استفاده از گرب: این روش نیز به دلیل محدودیت در تعداد گربهای کارگاه با کاربرد کمتری توأم خواهد بود.

استفاده از بالابرها: این روش نیز به دلیل هزینه بالا و نیاز به جابجایی حجم بالایی از خاک در زیر سقف‌ها جهت بارگیری در باکت بالابر توصیه نمی‌شود؛ اما درصورتی‌که بتوان با طراحی یک سیستم بالابر که قابل جابجایی بر روی سطح را دارد، جابجایی خاک در گود را به حداقل رسانید، به‌صرفه خواهد بود.

با در نظر گرفتن کلیه جوانب و مزایا و معایب هر یک از روش‌ها جهت ساخت ایستگاه‌های پروژه قطار شهری اهواز استفاده از گزینه اول (بیل مکانیکی با بازوی تلسکوپی) جهت انتقال و بارگیری مصالح ناشی از حفاری پیشنهاد می‌شود.

د- اجرای سقف میانی ایستگاه

پس از رسیدن به تراز موردنظر و رگلاژ کف نسبت به اجرای بتن مگر، آرماتوربندی و بتن‌ریزی سقف اقدام می‌گردد. البته درصورتی‌که شرایط زمین مساعد باشد می‌توان بدون اجرای بتن مگر و با کشیدن پلاستیک روی کف رگلاژ شده نسبت به آرماتوربندی و بتن‌ریزی سقف با استفاده از پمپ زمینی بتن اقدام نمود که البته در موقعیت ایستگاه‌های جنوبی معمولاً به علت نامناسب بودن شرایط خاک و نیز جهت حصول به شرایط مناسب‌تر سطح بتن در کف، اجرای بتن مگر ضروری می‌باشد.

در اتصال سقف میانی و فونداسیون طبقات به دیوار دیافراگمی در این روش، اجرا همانند روش Bottom Up می‌بایست از طریق اتصالات مکانیکی یا جوشی نسبت به اتصال میلگردهای انتظار به میلگردهای سقف اقدام نمود. (مشابه روش گزینه اول BU) با استفاده از این اتصالات نیاز به همپوشانی میلگردها در محل اتصال از بین خواهد رفت.

1. Excavator with telescopic boom

علاوه بر اتصالات مکانیکی که به‌صورت رزوه‌ای می‌باشند می‌توان از اتصالات جوشی نیز جهت اتصال میلگردهای سقف به میلگرد انتظار قرارگرفته در سبد دیوار دیافراگمی استفاده نمود.

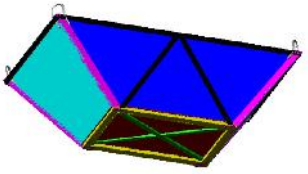
۵- گودبرداری تا تراز زیر فونداسیون و اجرای فونداسیون

پس از انجام مراحل فوق و حفاری زیر سقف میانی تا تراز اجرای فونداسیون ایستگاه اقدام و پس از اجرای زیرسازی موردنیاز، اجرای بتن مگر و عایق‌های رطوبتی و زهکش‌ها نسبت به آرماتوربندی و بتن‌ریزی فونداسیون سازه ایستگاه اقدام می‌گردد. پس از ساخت فونداسیون و سکوهای عبور ماشین حفار تونل و سوارشدن مسافرین، عملاً ساخت سازه ایستگاه به روش Top-Down پایان می‌یابد. از نکات مهم در حفاری زیر سقف میانی تا فونداسیون خصوصاً در تراز ۱۰ متری زیر سطح زمین این است که در حین حفاری، در صورت برخورد با لایه‌های سخت و سنگی می‌بایست با نصب ریپر بر روی بولدوزرها و یا نصب کاترهد یا پیکور بر روی بیل‌های مکانیکی، نسبت به حفاری این لایه‌ها اقدام نمود. به همین دلیل انتخاب ماشین‌آلات جهت حفاری هر ایستگاه می‌بایست به‌دقت و بر اساس گزارش‌های زمین‌شناسی محل انجام گیرد. لازم به ذکر است در کلیه مراحل عملیات خاکی در زیر سقف می‌بایست از ماشین‌آلات با ارتفاع کم و به خصوص از بیل‌های مکانیکی با بازوی کوتاه استفاده شود.

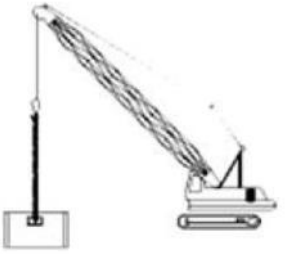
۶- انتقال ماشین‌آلات از کف از محل بازشوها

با تکمیل تدریجی فونداسیون ایستگاه و به‌منظور صرفه‌جویی در زمان تکمیل سازه ایستگاه اقدام به قالب‌بندی یکی از دو بازشو پیشنهادی و سایر بازشوهای کوچک موجود در سقف شده و در انتها از طریق یکی از بازشوهای پیشنهادی موجود در سقف‌ها ماشین‌آلات به‌صورت مستقیم یا درصورتی‌که عدم امکان پس از دمونتاژ شدن به‌صورت چند قطعه جداگانه با استفاده از جرثقیل به بالا کشیده شده و سپس نسبت به قالب‌بندی، آرماتوربندی و بتن‌ریزی محل آخرین بازشو پیشنهادی در سقف میانی و سپس سقف نهایی اقدام می‌گردد.

در شکل ۲۵ برخی از جزئیات این روش به تصویر کشیده شده است.

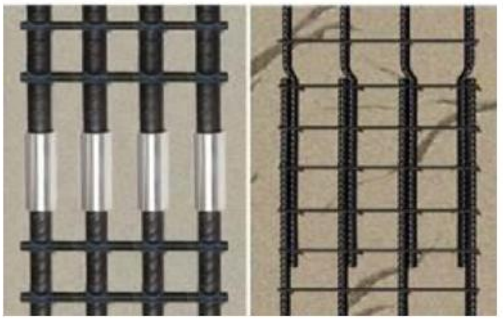


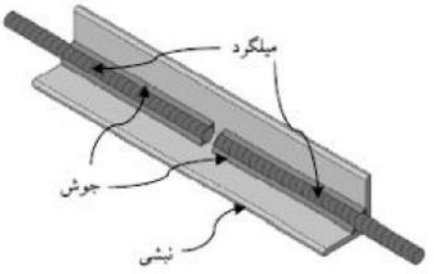
الف- نمونه‌ای از یک باکت-جرثقیل



ب- سیستم تخلیه خاک با استفاده از جرثقیل و باکت

پ- سیستم تخلیه خاک با استفاده از بیل مکانیکی با بازوی تلسکوپی





اتصالات مکانیکی یا جوشی در اتصال سقف میانی و فونداسیون طبقات به دیوار دیافراگمی

شکل ۲۵- برخی جزئیات روش اجرای Top-Down

٤-۳-۱-۳- روش Top-Down بدون ستون موقت (TD)

این روش کاملاً مشابه با روش معرفی‌شده دربند قبل است با این تفاوت که ستون‌ها در ابتدا اجرانشده بلکه در هر دو تراز ایستگاه پس از اتمام حفاری و خاک‌برداری آن تراز و بتن‌ریزی کف، ستون تراز موردنظر اجرا خواهد گردید. به‌عبارت‌دیگر پس از اجرای دیوارهای دیافراگمی دورتادور ایستگاه و سقف نهایی ایستگاه با روش مشابه با روش بند قبل بدون اجرای ستون‌ها، نسبت به شروع عملیات اجرایی خاک‌برداری زیر سقف نهایی اقدام شده و پس از اتمام عملیات خاک‌برداری و اجرای بتن‌ریزی سقف میانی بازهم مشابه با روش بند قبل، نسبت به اجرای ستون‌های تراز موردنظر اقدام خواهد گردید. پس از عملیات اجرایی فوق، عملیات خاک‌برداری زیر سقف میانی ایستگاه تا رسیدن به تراز کف فونداسیون ادامه یافته و پس از اجرای فونداسیون نسبت به اجرای ستون‌های مابین فونداسیون و تراز میانی، اقدام خواهد شد. عملیات اخیر نیز به‌جز مرحله اجرای ستون، کاملاً مشابه با روش قبلی ذکرشده دربند قبل است.

بدیهی است که در این روش از اجرا، سقف‌های تراز نهایی و میانی می‌بایست قوی‌تر از گذشته طراحی گردد تا بدون اجرای ستون توانایی مقابله با بار ناشی از وزن بتن سقف به‌علاوه وزن دستگاه‌های حفاری موردنیاز روی سقف نهایی را داشته باشد.

٤-٣-١-٤- مقایسه مزایا و معایب هر یک از روش‌های سه‌گانه به تفکیک مراحل اجرا

بامطالعه مطالب فوق در مورد روش‌های اجرایی، نتایجی در خصوص مقایسه کیفیت، زمان و ایمنی هریک از سه روش اجرایی به تفکیک مراحل اجرا حاصل می‌شود که دربندهای زیر ذکر می‌گردد:

✓ دیوار دیافراگمی

اجرای دیوار دیافراگمی در هر سه روش جزء عملیات اجرایی اولیه بوده و باکیفیت و زمان مشابه ای انجام می‌شود. با توجه به اینکه اجرای بنتونیت حین عملیات حفاری جهت جلوگیری از ریزش جداره گود اجتناب‌ناپذیر است، جهت جبران اختلاف مقاومت بتن حاصله از آزمایش مقاومت فشاری و بتن اجراشده در دیوار دیافراگمی در مجاورت بنتونیت، مقاومت فشاری مفروض در محاسبات، با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان مناسب، کمتر از مقاومت فشاری اسمی درج‌شده در نقشه‌های اجرایی در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است نمای بتن حاصله از دیوار دیافراگمی جهت لحاظ نمودن در ردیف بتن نمایان مناسب نبوده و با طرح ملاحظات معماری، نمای مناسب قابل‌دستیابی است.

سرعت اجرای دیوار دیافراگمی نیز در مقایسه با سایر روش‌های ساخت دیوار مناسب است.

✓ سقف نهایی

در روش BU سقف نهایی با قالب‌بندی درجا و با استقرار پایه‌های اطمینان اجرا می‌شود و کیفیت نمای بتن حاصله در زیر سقف به کیفیت قالب مصرفی بستگی دارد. به دلیل دسترسی مناسب، بتن‌ریزی و عمل آوردن بتن به‌راحتی قابل انجام است اما به دلیل ضخامت نسبتاً زیاد بتن و مواجه بودن بتن با تغییرات دمایی زیاد در هردو وجه فوقانی و تحتانی، احتمال وقوع ترک‌ها انقباضی در آن بسیار بیشتر از سایر روش‌هاست.

پایه‌های اطمینان با مقاومت کافی، به‌صورت داربست مدولار فلزی، جهت تحمل وزن قالب‌بندی و بتن مربوطه به کار می‌روند. استقرار این پایه‌ها در میان استرات‌های حفاظت گود بسیار دشوار و زمان‌بر بوده و در بعضی مواقع منجر به اجرای مرحله‌ای بتن سقف می‌شود به‌طوری‌که با بتن‌ریزی بعضی از بخش‌ها و باز کردن جزئی استرات‌های مجاور بخش‌های بتن‌ریزی شده، در چند مرحله بتن‌ریزی سقف تکمیل می‌گردد. بدیهی است که این روش بسیار وقت‌گیر بوده و زمان اجرای آن تا دو برابر حالتی که بدون حضور استرات اجرای پایه‌های اطمینان قالب صورت گیرد، تخمین زده می‌شود.

جهت اتصال سقف به دیوارها در این روش می‌بایست بتن کثیف دیوارهای دیافراگمی تخریب‌شده تا با نمایان شدن میلگرد دیوار، میلگرد سقف به نحو مناسبی با آن درگیر شود. در این روش بیم آن می‌رود که با تخریب بتن به میلگردهای اصلی دیوار نیز آسیب وارد گردد که جهت رفع این موضوع ایزوله کردن قسمت فوقانی میلگردهای دیوار با پلاستوفوم، نوار لاستیکی و ... می‌تواند مؤثر باشد.

در روش TDC با متراکم ساختن خاک بستر و اجرای یک‌لایه بتن مگر در کف، سقف نهایی اجرا می‌گردد و قالب‌بندی فقط منحصر به لبه‌های پیرامونی سقف و بازشوها می‌گردد. کیفیت نمای بتن حاصله در کف بستگی به میزان صافی سطح بتن مگر اجراشده دارد و معمولاً با اجرای ماله‌کشی بتن مگر و لیسه ای کردن آن همراه با گریس مالی، کیفیت نمای مناسب قابل‌دستیابی است. این روش اجرایی با بتن نمایان در بسیاری از پروژه‌های داخل و خارج کشور، به‌خصوص پروژه‌های پل‌سازی، مورداستفاده قرار می‌گیرد. درصورتی‌که نمای عالی در بتن مدنظر باشد می‌توان از قالب‌های مخصوص استفاده نمود؛ اما در این پروژه با توجه به اجرای سقف کاذب در کلیه قسمت‌های سرپوشیده، نمای مناسب زیر بتن سقف امتیاز محسوب نشده و نیازی به هزینه اضافی نیست. به دلیل استقرار بتن روی سطح زمین می‌توان انتظار داشت که ترک‌های انقباضی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش‌یافته و عمل‌آوری بتن به نحو مناسب‌تری انجام پذیرد. زمان اجرای سقف در این روش بسیار کوتاه بوده و بتن باکیفیت خوب و با دسترسی کامل قابل‌اجراست. اتصال سقف به دیوار نیز در این روش کاملاً مشابه با روش BU می‌باشد.

روش TD در اجرای سقف نهایی از کلیه جهات مشابه با روش TDC است با این تفاوت که به دلیل مجوف بودن سقف، قالب‌بندی اضافی موردنیاز می‌باشد که باعث بالاتر رفتن زمان اجرا نسبت به روش TDC می‌شود اما زمان اجرای آن به‌مراتب از روش BU کمتر می باشد.

✓ اجرای سقف میانی

اجرای سقف میانی در روش BU کاملاً مشابه سقف نهایی است و استقرار سقف در ارتفاع پایین‌تر معمولاً مشکلی به لحاظ دسترسی برای آن ایجاد نمی‌نماید. زمان اجرا در این مرحله اجرایی نیز نسبتاً زیاد می‌باشد.

در روش TDC هم اجرای سقف میانی کاملاً مشابه با سقف نهایی بوده با این تفاوت با وجود سرپوشیده بودن نسبی محل اجرا، شرایط بتن‌ریزی و عمل‌آوری بسیار مناسب‌تر بوده و احتمال وقوع ترک‌های انقباضی نیز بسیار کم می‌شود. شرایط اجرایی نیز از سرعت قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار است.

اجرای سقف میانی در روش TD نیز مشابه با روش TDC می‌باشد. البته نبود ستون‌ها می‌تواند به‌سرعت بیشتر عملیات اجرایی کمک نماید.

✓ اجرای فونداسیون

اجرای فونداسیون در هر سه روش اجرایی مشابه یکدیگر است. اجرای بتن در هرسه روش بر روی زمین و با اجرای یک‌لایه بتن مگر انجام می‌شود با این تفاوت که در روش BU بتن‌ریزی در شرایط سرباز و از میان دو ردیف استرات انجام می‌شود اما در روش‌های TDC و TD بتن‌ریزی در فضای سرپوشیده با روش عمل‌آوری مناسب‌تر انجام می‌شود.

✓ ستون‌ها

در هر سه روش اجرایی موردبحث، اجرای بتن با قالب‌بندی درجا انجام می‌شود و کیفیت بتن حاصله در هر سه روش برابر است اما در روش TDC نسبت به دو روش دیگر (TD,BU)، به علت اجرایی ستون فلزی در مرحله

اول و اجرای بتن پیرامونی در مرحله بعدی، زمان اجرای ستون‌ها به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. البته می‌توان با اجرای همزمان مرحله اول احداث ستون با دیوارهای پیرامونی، این افزایش زمانی را به حداقل رسانید.

✓ استرات‌ها

اجرای استرات به‌طور مستقیم تأثیری بر کیفیت عملیات نداشته فقط در روش BU مورد نیاز است و زمان بسیار و هزینه زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به شرایط نامناسب خاک و زمین در ایستگاه‌های جنوبی دو ردیف استرات با وزن تقریبی ۴۲۵ تن در هر ردیف می‌بایست به کار گرفته شود. این در حالی است که در ایستگاه‌های شمالی فقط یک ردیف استرات به وزن تقریبی ۲۸۰ تن موردنیاز بود.

✓ خاک‌برداری

روش اجرای عملیات خاکی تأثیر مستقیم بر کیفیت کار ندارد. بخش عمده‌ای از عملیات خاک‌برداری در روش BU با مجموعه‌ای از بیل‌های مکانیکی انجام‌شده و خاک حاصله به خارج گود حمل می‌شود. باوجود استرات‌ها در دو تراز مختلف عملیات خاک‌برداری با کندی زیادی روبرو است اما هزینه خارج ساختن خاک از گود در مقایسه با دو روش دیگر کمتر است.

در روش TDC با توجه به نبود استرات‌ها سرعت عملیات خاک‌برداری به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد اما باوجود نیاز به بیل‌های دکل بلند جهت خارج نمودن خاک گود در اکثر مراحل خاک‌برداری، هزینه عملیات خاکی افزایش می‌یابد. عملیات خاک‌برداری در روش TD کاملاً مشابه با روش TDC است اما با توجه به نبود ستون سرعت عملیات خاک‌برداری بازهم بیشتر از قبل می‌شود.

✓ ایمنی

همان‌گونه که پیش‌تر تشریح گردید روش‌های TDC و TD ایمنی بیشتری حین عملیات اجرایی نسبت به روش BU ایجاد می‌نمایند. لازم به ذکر است سازه‌های نهایی ازنظر عملکرد، مشابه با یکدیگر عمل می‌نمایند.

٤-۳-۲- چالش‌های اجرای تونل و راهکارهای ارائه‌شده

چالش‌های اجرای تونل مترو اهواز عبارت بوده‌اند از (باقری نیا ۱۳۹۱):

- تحریم
- سطح بالای آب زیرزمینی
- عبور از زیر رودخانه کارون (شکل ۲۶)
- تملک اراضی
- عدم پرداخت صورت‌وضعیت‌ها و تحصن کارگران
- تأمین بودجه

- شرایط جوی نامناسب (گرما و آلودگی هوا و غبار)
- وجود تأسیسات رو و زیرزمینی در تلاقی با محل احداث ایستگاه‌ها و نحوه نگهداری (شکل ۲۷)
- شرایط محیطی اجرای پروژه
- نشتی آب به سطح زمین ناشی از فرسودگی و پوسیدگی خطوط لوله آب
- تلاقی خطوط مترو با گسل اهواز (اصغری ۱۳۸۸)

شکل ۲۶- عبور مترو اهواز از زیر رودخانه و رود کارون (باقری نیا ۱۳۹۱)

شکل ۲۷- وجود تأسیسات رو و زیرزمینی در تلاقی با محل احداث ایستگاه‌های مترو اهواز و نحوه نگهداری (باقری نیا ۱۳۹۱)

در پروژه مترو اهواز با استفاده از بتن آب‌بند با بکار گیری از بتن توانمند و عدم استفاده از عایق، اصطکاک بین دیوار دیافراگمی و خاک تأمین‌شده و غلبه بر فشار بالازدگی آب (uplift) به‌طور چشمگیری افزایش‌یافته است. در صورت استفاده از عایق، اگر عایق از محلی نامعلوم در زمان اجرا سوراخ شده و دچار پارگی شود و یا نشتی داشته باشد، این سوراخ شدگی یا نشتی لزوماً با محل نشت آب از بتن منطبق نخواهد بود و رفع عیب مشکلات زیادی را به همراه خواهد داشت. همچنین، در روش دیوار دیافراگمی با اجرای از بالا به پایین، حدفاصل دیوار دیافراگمی و عایق جهت پوشش عایق باید دیوار دیگری اجرا شود که این روش مستلزم صرف زمان و هزینه است. عایق کردن ایستگاه به روش‌های سنتی و با استفاده از ژئوممبرین ها نیز مستلزم ساخت یک باکس بیرونی، عایق‌کاری روی دیوارهای آن و سپس ساخت باکس داخلی است. در این روش نیز چگونگی حفاظت باکس بیرونی در مقابل عوامل مخرب بتن و دوام باکس بیرونی و عمر آن باید مدنظر قرار گیرد.

راهکارهای ارائه‌شده جهت مقابله با چالش‌های اجرای تونل مترو در اهواز عبارت‌اند از (باقری نیا ۱۳۹۱):

- ✓ محافظت در برابر خوردگی با استفاده از روش‌های:
  - استفاده از بتن نفوذناپذیر
  - استفاده از مواد شیمیایی بازدارنده خوردگی
  - پوشش محافظ روی آرماتور (اپوکسی یا فولاد گالوانیزه)
  - استفاده از فولاد مقاوم در برابر خوردگی (فولاد ضدزنگ)
  - مسلح کردن بتن با استفاده از مصالح غیر فولادی (فیبرهای پلاستیک)

- پوشش سطح در معرض بتن به‌وسیله پوشش‌های محافظ
- حفاظت کاتدیک
- ترکیبی از روش‌های فوق

✓ کاهش نفوذپذیری با استفاده از میکروسیلیس

✓ اتخاذ روش‌های اجرایی متناسب با شرایط زمین

حفاظت گود با شمع‌های درجا و دیوار دیافراگمی و اجرای از بالا به پایین که در بخش روش اجرا به‌طور کامل تشریح شد.

✓ به‌کارگیری بتن پر مقاومت بتن توانمند (High Performance Concrete-HPC)» برای آب‌بندی و جلوگیری از نفوذ مواد محلول مخرب در آب‌های زیرزمینی (کلر و سولفات).

با توجه به ترازبالای سطح آب‌های زیرزمینی و وجود یون کلر و قرار داشتن در معرض حمله سولفات‌ها، پس از بررسی روش‌های فوق، استفاده از بتن توانمند مناسب‌ترین و مطمئن‌ترین روش تشخیص داده شد. بتن توانمند بتنی است که بتواند خواص موردنیاز را برای عمر سازه در شرایط بهره‌برداری حفظ کرده و در برابر شرایط محیطی خورنده پایایی مناسب دارد. سطوح عملکردی مختلفی نظیر دوام در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب‌شدگی، مقاومت در برابر نمک‌ها، مقاومت در برابر سایش، نفوذ یون کلر ناشی از نمک‌ها و ... استفاده از بتن توانمند را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. در ساخت این بتن علاوه بر سنگ‌دانه و سیمان معمول در ساخت بتن، از خاکستر بادی و سرباره کوره‌های آهن‌گدازی، فوق ران کننده‌های ممتاز (super plasticizer)، الیاف و دیگر افزودنی‌های شیمیایی و نیز میکروسیلیس استفاده می‌شود. میکروسیلیس نقش مؤثری در دوام و پایایی بتن، کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت سایشی، ایجاد مقاومت در برابر سولفات‌ها (خوردگی شیمیایی) و یون‌های کلراید (خوردگی فولاد) و کاهش واکنش قلیایی سیمان با سنگ‌دانه‌ها دارد.

۵- جمع‌بندی

در گزارش حاضر ابتدا انواع روش‌های اجرای تونل در محیط‌های شهری موردبحث و بررسی قرار گرفتند. روش‌های کند و پوش، پوش و کند، روش نوین اتریشی و روش حفاری مکانیزه از مهم‌ترین روش‌های اجرای تونل‌های شهری هستند. در هر بخش به بیان نقاط قوت و ضعف هریک پرداخته شد. مهم‌ترین ویژگی‌های مسئله‌ساز در هر یک از روش‌های مذکور در جدول ۲ ارائه‌شده است.

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های مسئله‌ساز روش‌های مختلف اجرایی

روش	مهم‌ترین ویژگی‌های مسئله‌ساز
کند و پوشش	اختلال در ترافیک، کسب‌وکار و تردد ساکنین نشست‌ها و تغییر مکان‌های افقی زمین در بالای گود تداخل با کانال‌ها، لوله‌ها و سایر تأسیسات زیرزمینی تأثیر بارندگی بر روی راندمان کار مسائل مربوط به پرکردن بالای سقف تونل و اجرای زیرسازی و روسازی خیابان
پوش و کند	تداخل با کانال‌ها، لوله‌ها و سایر تأسیسات زیرزمینی نیاز به تأمین زمین جهت اجرای سقف تونل یا ایستگاه اختلال در ترافیک سطحی جهت اجرای دال کف دقت ناکافی در اجرای شمع‌های کناری و میانی درصورتی‌که در نما باشند
ناتم	کندی پیشرفت نیاز به استملاک و دسترسی های بیشتر خطر ناپایداری و ریزش در جبهه حفاری خطر نشست سطح زمین مشکلات مربوط به اجرای ابزار دقیق لازم و کافی خطرات مربوط به آلودگی محیط نیاز به پایین آوردن سطح سفره آب زیرزمینی مشکلات کنترل کیفیت اجرا مسائل مربوط به تزریق‌های تماسی و تحکیمی موردنیاز
حفاری ماشینی تمام مقطع (TBM)	مسائل ناشی از شرایط ژئوتکنیکی ▪ مسائل ناشی از وجود حفرات موجود در زمین (قنوات، فاضلاب، چاه و ...) ▪ مشکلات ناشی از وجود خاک ناهمگن و یا بولدر های بزرگ ▪ مشکلات ناشی از عدم طراحی‌های مناسب سیستم حفاری مکانیزه ▪ مشکلات مربوط به انتخاب دستگاه حفار مناسب ▪ مشکل تعیین ترکیبات مناسب گروت و فشارهای کاری تزریق ▪ مشکل محاسبه دقیق فشار جبهه کار مسائل ناشی از راهبری نامناسب دستگاه ▪ نداشتن تجربه پیمانکار در امر حفاری مکانیزه و عدم آموزش کافی پرسنل ▪ مشکلات ناشی از کنترل ناکافی: ۱) فشار مناسب جبهه کار و سرعت پیشروی ۲) مقدار وزن و حجم خاک حفاری در یک رینگ ۳) فشار و حجم دوغاب تزریق مسائل ناشی از تداخل با سازه‌های واقع در مسیر تونل اجراشده

در ادامه نیز چالش‌های مختلف اجرای تونل‌ها در محیط‌های شهری موردبررسی قرار گرفتند. روش اجرای تونل، نوع و شرایط زمین اطراف تونل، روباره، شرایط آب زیرزمینی و مشخصات سازه پوشش و سیستم نگهداری تونل از مهم‌ترین فاکتورهای بروز چالش در اجرای تونل‌ها هستند. بدین ترتیب، انواع چالش‌های اجرای تونل‌های شهری عبارت‌اند از: اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی، تهیه مشخصات فنی و برآورد پارامترهای طراحی، اشتباهات

محاسباتی یا عددی، بروز خطاها و اشتباهات در مرحله اجرای تونل، مشکلات ناشی از ناشناخته بودن فضاهای زیرسطحی در مناطق شهری، قنات‌ها، انباره‌های فاضلاب و حفرات زیرزمینی ناشناخته، مشکلات ناشی از برخورد با آب زیرزمینی در تونل، فرونشست زمین، مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی، خاک‌های دستی، خالی شدن خاک اطراف تونل به علت فرسایش ناشی از آب شستگی و نهایتاً اشتباهات مدیریتی و کنترلی برخی از مسائل چالش‌برانگیز در اجرای تونل‌ها هستند.

ادامه گزارش به بررسی سه مطالعه موردی در اجرای تونل‌های شهری در کشور اختصاص‌یافته است. تونل‌های ترافیکی رسالت و نیایش و نیز مترو اهواز در این بخش بررسی‌شده‌اند. در هر مورد، مشخصات کلی تونل و روش اجرا بررسی‌شده است و در ادامه، چالش‌های پیش رو در اجرای تونل‌ها و روش مواجهه با آن‌ها موردمطالعه قرار داده‌شده است. جدول ۳ به خلاصه‌ای از چالش‌های مهم اجرای تونل‌های فوق و نیز راهکارهای کاهش پیامدهای ناشی از این چالش‌ها اشاره نموده است.

جدول ۳- چالش‌های اجرای تونل‌های رسالت، نیایش و مترو اهواز

تونل	مهم‌ترین چالش‌ها	راهکارهای ارائه‌شده برای حل چالش‌ها
رسالت	- روباره خیلی کم زیر خیابان ولیعصر یا گاندی سرعت اجرای کم - دهانه بزرگ و فاصله کم دو تونل، مقطع حفاری تحتانی بزرگ و نشست زیاد - برخورد با لنزهای ریزشی - پایدارسازی خاک بین دو تونل - مشکلات اجرایی (ورود شمع سازه نگهبان به داخل سازه نهایی-دسترسی و ویبره دشوار برخی مقاطع)	- انجام مطالعات ژئوتکنیکی تکمیلی - اتکا به نتایج ابزاردقیق - اصلاح روش حفر و اجرای تونل - استفاده از تکنولوژی های نوین نظیر بتن خود تراکم (SCC) در اجرای بخشی از لاینینگ تونل
نیایش	- چالش‌های اجرایی نظیر حجم بالای کار در زمان کم، برخورد با تأسیسات شهری، شرایط زمین‌شناسی، روباره کم، عبور از زیر بافت فرسوده، عبور از زیر بزرگراه در حال بهره‌برداری مدرس و مقطع بزرگ تونل - چالش‌های مدیریتی نظیر هماهنگی با سایر سازمان‌ها، عدم وجود شرکتی تخصصی برای تونل‌های شهری، تملک اراضی و ادعاهای شهروندان	- استفاده از نتایج برداشت‌های ابزار دقیق و رفتارسنجی - راهکارهای طراحی نظیر استفاده از قوانین رفتاری متناسب و مدل‌سازی دو و سه‌بعدی - راهکارهای اجرایی شامل کاربرد سیستم‌هایی نظیر شمع و ریب برای دوراهی‌های عریض، کاهش گام حفاری و فورپولینگ برای غلبه بر مسائل و مشکلات ژئوتکنیکی - تأسیس سازمان یا شرکت تخصصی تونل‌های شهری
مترو اهواز	- سطح آب بالا - عبور از زیر رودخانه کارون - تملک اراضی - عدم پرداخت صورت‌وضعیت‌ها و تحصن کارگران - تأمین بودجه - شرایط جوی نامناسب (گرما و آلودگی هوا و غبار) - وجود تأسیسات رو و زیرزمینی در تلاقی با محل احداث ایستگاه‌ها و نحوه نگهداری - شرایط محیطی اجرای پروژه - نشتی آب به سطح زمین ناشی از فرسودگی و پوسیدگی خطوط لوله آب - تلاقی خطوط مترو با گسل اهواز	- محافظت در برابر خوردگی - کاهش نفوذپذیری با استفاده از میکروسیلیس - اتخاذ روش‌های اجرایی متناسب با شرایط زمین - به‌کارگیری بتن توانمند برای آب‌بندی و جلوگیری از نفوذ مواد محلول مخرب در آب‌های زیرزمینی

فهرست مراجع

- آر. استرلینگ و جی. کارموردی، (و.ر. ابراهیمی، ترجمه.)، «طراحی فضاهای زیرزمینی»، نشر مرندیز، مشهد ایران، ۱۳۸۸
- امیرعلی مصطفوی مقدم، مهدی آشتیانی، «خطرهای محتمل بر تونل‌های درون شهری»، گزارش دانش شهر، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، مهر ۱۳۹۰
- اورنگ فرزانه، شهرام وهدانی، امیرقاسم زند، «طرح ابزاردقیق و تحلیل نتایج رفتارسنجی در یک تونل بزرگراه شهری»، پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، آبان ۱۳۸۰
- اورنگ فرزانه، «روش های حـفاری تونل‌ها و چالش‌های پیش رو»، نشست تخصصی چالش‌های پیش رو در اجرای تونل‌های شهری، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، اسفند ۱۳۹۱
- اورنگ فرزانه، فرج‌الله عسکری، هادی آجورلو، «مطالعه و تدوین دستورالعمل برای انجام مطالعات، طراحی، اجرا و نگهداری برای پایش تونل‌های شهر تهران در زمان ساخت و دوران بهره‌برداری»، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، آبان ۱۳۹۳
- تقی عبداللهی، «تاثیر تونل‌سازی در مناطق شهری بر ساختمان‌های سطحی»، سمینار کارشناسی ارشد، استاد راهنما: احمد جعفری، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران، بهمن ۱۳۸۹
- خشایار باقری نیا، «چالش‌های موجود در حفر ایستگاه‌ها و تونل‌های قطار شهری اهواز و راهکارهای مقابله با آن»، نشست تخصصی چالش‌های پیش رو در اجرای تونل‌های شهری، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، اسفند ۱۳۹۱
- خشایار باقری نیا، بهروز قرا پنجه، مهدی جوانمردی، «استفاده از بتن توانمند (HPC) در آب‌بندی ایستگاه‌های مترو اهواز و حذف عایق»، پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ۱۵ مهرماه ۱۳۹۲
- رضا غفار زاده، «کاربری و طراحی فضاهای بزرگ زیرزمینی»، ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، بهمن ۱۳۸۲
- سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، «نقشه موقعیت قنوات شهر تهران»، ویرایش اول، جلد چهارم، ۱۳۸۶
- سحر اصغری، حسین معماریان، مهدی زارع، «بررسی پایداری تونل‌های دوقلوی قطار شهری اهواز در محل برخورد با گسل اهواز»، ششمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیطزیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، مهر ۱۳۸۸
- گزارش «مطالعات فاز ۲ رفتارسنجی ژئودتیکی-ژئوتکنیکی پروژه تونل نیایش»، مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار-D2 Consult، تیرماه ۱۳۹۰
- محمدحسین صدقیانی، سید علیرضا میر حبیبی، «تحلیل و بررسی اجرای تونل‌های کم‌عمق در مناطق شهری-مطالعه موردی تونل رسالت در بخش زیر خیابان ولیعصر»، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۲
- محمدرضا جبروتی، «مروری بر طرح و اجرای پروژه تونل رسالت»، ماهنامه ساختمان و کامپیوتر، سال سوم شماره ۱۳، مرداد و شهریور ۱۳۸۵.
- مصاحبه با کارشناسان در خصوص «مقایسه روش‌های اجرای ایستگاه‌های مترو اهواز»، شرکت کیسون، ۱۳۹۳
- ملو آقامالیان، امیرعباس بصیری طهرانی، اورنگ فرزانه، «تحلیل برگشتی بخشی از داده‌های رفتارسنجی مراحل حفاری زوج تونل رسالت»، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تبریز، تبریز، ۱۳۸۶
- مهدی پورهاشمی، «تونل شهری، چالش‌ها و راهکارها»، نشست تخصصی چالش‌های پیش رو در اجرای تونل‌های شهری، مرکز

مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، اسفند ۱۳۹۱

- مهدی حاجی میرزا آقا قناد، رشید گرانمایه وانقی، شکرا... زارع، «اجرای تونل‌های پوشش و کند در محیط های شهری–مطالعه موردی: تونل راه آهن تهران–تبریز»، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، دانشگاه علم و صنعت، تهران، آبان ۱۳۹۰
- A.Parriaux, L.Huanqing, ”Gestion de l’espace sous la ville: Des geosciences a l’urbanisme, La méthodologie Deep City”, presentation in École polytechnique fédérale de Lausanne, 2010
- E.Zolqadr, M.Pasdarpour, A.Golshani, “Temporary support of excavation walls-case study”, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea,2014
- J.Carmody, R.Sterling, “Underground space design”, Van Nostrand Reinhold, 1993
- J.Dunnicliff, “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, John Wiley and Sons Publications, United States, 1988
- M.Hosseini, A.Golshani, S.Majidian, “Numerical Modeling for Construction of Large Span Bifurcations of Niayesh Tunnel, Iran”, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 19, 2014
- R.L.Sterling, J.P.Godard “GeoEngiginneering Consideration in the Optimum Use of Underground Space”, ITA. Technical. Report. ITA. AIETS, 2005
- S.G.Golany, T.Ojima, “Geo-space urban design”, Wiley publications, USA, 1996
- S.Yasrobi, S.Majidian, M.Ghorbani, “Geotechnical Challenges in the Niayesh Tunnel Project”, 10th Iranian Tunnelling Conference, Tehran, 4-7 Nov 2013
- T.Seidenfuß, “Collapses in Tunnelling”, Master of Science Thesis, EPFL University, Lausanne, Switzerland, 2006
- V.Guglielmetti, P.Grasso, A.Mahtab, S.Xu, “Mechanized Tunnelling in Urban Areas”, Taylor & Francis Group, Geodata S.p.A., Turin, Italy, 2003

عناوین انتشارات مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران سال ۱۳۹۳:

کتب:

- مبانی نظری حسابداری و گزارشگری مالی شهرداری ها؛ جلد اول و دوم
- طرح جامع شهر تهران
- Strategic-structure comprehensive plan of Tehran city
- مجموعه قوانین و مقررات شهرداری تهران؛ حوزه تخصصی خدمات شهری جلد ۱
- مجموعه قوانین و مقررات شهرداری تهران؛ حوزه تخصصی فرهنگی اجتماعی جلد ۲
- مجموعه قوانین و مقررات شهرداری تهران؛ حوزه تخصصی حمل و نقل و ترافیک جلد ۳
- مجموعه قوانین و مقررات شهرداری تهران؛ حوزه تخصصی فنی و عمرانی جلد ۴
- مجموعه قوانین و مقررات شهرداری تهران؛ حوزه تخصصی مالی و اداری جلد ۵
- مجموعه قوانین و مقررات شهرداری تهران؛ حوزه تخصصی شهرسازی، معماری، اراضی و املاک جلد ۶
- مجموعه قوانین و مقررات شهرداری تهران؛ حوزه تخصصی بودجه جلد ۷
- قانون خودگردانی محلی کلان‌شهر توکیو
- قوانین مدیریت شهری ترکیه و جمهوری کره
- قوانین شهرداری کلان‌شهر لندن
- مدیریت محلی و حکمروایی شهری
- جهان مسطح است
- جهان‌شهرها
- تولید فضا
- چکیده مقالات همایش ملی شهر جهانی
- حسابداری محیط زیست در شهر تهران
- گزارش وضعیت محیط زیست شهر تهران (SOE)
- مبانی توسعه پایدار با تاکید بر محیط زیست شهری
- دستورالعمل پایش تونل‌های شهر تهران در زمان بهره‌برداری
- دستورالعمل پایش تونل‌های شهر تهران در زمان ساخت
- سند راهبردی بحران و پدافند غیرعامل شهر تهران
- سیاست‌گذاری اجتماعی در خاورمیانه دینامیسم‌های اقتصادی، سیاسی و جنسیتی
- توسعه اجتماعی در شهر تهران
- نرخ سفرسازی کاربری‌های شهر تهران
- گزارش تحولات اقتصادی ایران و جهان (۱۹ جلد)
- اولین نمایشگاه فناوری‌های نوین مدیریت شهری؛ پایداری شهری و شهر آینده (۲ جلد)
- ابرشهرها فرم شهری حکمروایی و پایداری
- الگوی مداخله در منطقه ۱۲ مبتنی بر طرح توسعه و تعالی فرهنگی و اجتماعی
- مجموعه مقالات در موضوع جهانی شدن، شهرهای جهانی و نقش فراملی شهرها
- مجموعه مقالات برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک، سوانح و شرایط اضطراری شهری
- نقشه راه تحول اقتصاد شهری و درآمد پایدار
- نقشه راه تحول گروه فرهنگی اجتماعی (دیپلماسی عمومی)
- نقشه راه تحول گروه اداری و سرمایه انسانی شهرداری تهران
- نقشه راه تحول به سوی تعالی
- نقشه راه تحول گروه فرهنگی اجتماعی (رسانه)
- تحول جامع مدیریت شهری؛ توسعه و تعالی فرهنگی اجتماعی
- نقشه راه شهر اسلامی – ایرانی
- نقشه راه اقتصاد مقاومتی و راهبردهای اجرایی آن در شهرداری تهران
- نقشه راه جهان‌شهر تهران
- مجموعه نشست های مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران (۳ جلد)
- بازآرایی مناسبات مالی دولت و شهرداری (۲ جلد)
- مطالعات پشتیبان نقشه راه تحول گروه فرهنگی اجتماعی (حوزه دیپلماسی عمومی)
- مطالعات پشتیبان نقشه راه تحول گروه فرهنگی اجتماعی (حوزه رسانه)
- مطالعات پشتیبان نقشه راه تحول گروه اداری و سرمایه انسانی شهرداری تهران
- زنان و زندگی شهری (۸ جلد)

گزارش‌های دانش شهر:

- رفتارها و واکنش‌های اجتماعی تجربه شده در هنگام وقوع سوانح
- ارائه چارچوب مدیریت بصری در شهر تهران
- نقش حاکمیتی شهرداری در مدیریت و اولویت‌بندی پروژه‌های شهری (روش‌ها و ابزارها)
- آسیب‌شناسی دفاتر خدمات نوسازی محله
- الزامات شناسایی نقاط پر تصادف شبکه معابر شهر تهران
- تحلیل پراکندگی پارک‌ها و بوستان‌ها، مکان‌یابی آن‌ها در سطح شهر تهران با رویکرد توسعه همگون
- مصالح نوین در ارتقاء کیفیت بصری و محیطی در بناهای عمومی و ساختمان‌های شهر
- کیفیت زندگی گروه‌های اجتماعی در شهر تهران
- بررسی رهیافت پیشایندی و ارتباط آن با برنامه‌ریزی شهری
- سنجش سرزندگی در فضاهای شهری و ارائه راهکار (حدفاصل میدان تجریش و میدان قدس)

گزارش‌های مدیریتی:

- راهکارهای ترویج محصولات کشاورزی ارگانیک در شهر تهران
- آسیب‌های اجتماعی کارگران میادین میوه و تره بار در شهر تهران: با تاکید بر تجربه زندگی روزمره
- بررسی شاخص‌های توسعه پایدار شهری در شهر تهران (با تاکید بر رویکرد اجتماعی)
- بررسی پتانسیل آب گرفتگی معابر و سیل‌خیزی شهر تهران و راه‌های کنترل آن
- مطالعه و تعیین نظام محاسبه تعرفه بهینه و متناسب عوارض مالکیت خودرو تهران بزرگ
- فرصت‌ها و تهدیدها در انتخاب شیوه حمل‌ونقل سفرهای تحصیلی
- مقدمه‌ای بر شناخت تحولات الگوی محله در قرن بیستم و چشم‌انداز آن در قرن حاضر
- بررسی عوامل موثر در طراحی المان‌ها و مجسمه‌های شهری در فضاهای عمومی شهر تهران
- مطالعه و بررسی نقش پایش تونل‌ها در مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری
- نقش ژئوسنتتیک‌ها در کاهش ترک و روکش‌های آسفالتی
- ارزیابی خطر سیل خیزی شهر تهران و ارائه راهکارهای مدیریتی
- جایگاه روش فعالیت مبنا در برنامه‌ریزی شهری
- مطالعه و بررسی ابعاد زیباشناختی نقاشی‌های دیواری در سطح شهر تهران
- مجموعه عملیات حفاظتی پیشنهادی برای زمان وقوع بحران
- جایگاه علم جامعه‌شناسی در تبیین مسائل و مدیریت زیست محیطی شهر تهران
- بررسی انطباق سند طرح جامع شهر تهران با اصول ارتقای کیفیت زندگی شهری
- الزامات تعیین معیارهای طراحی فیزیکی مراکز عملیات شرایط اضطراری (EOC)
- هدف‌گذاری اقتصادی کلان‌شهرها، نگاهی مقایس‌های به تجارب جهانی و تهران
- رهیافتی بر شناخت مدل‌ها و تکنیک‌های مکان‌یابی ارائه خدمات شهری
- وندالیسم؛ زمینه‌های ایجاد و پیامدهای آن در محیط شهری
- مطالعه و بررسی الگوهای مناسب رفتاری شهروندان در برابر زلزله (با تاکید بر پناه‌گیری)
- مفاهیم و اصول مدیریت منابع در بلایا و حوادث طبیعی
- ایمنی در زمین بازی
- بازیافت ضایعات لاستیک
- بررسی و آسیب‌شناسی اختیارات شوراها و شهرداری‌ها در وضع و وصول عوارض محلی
- روش‌های نوین مدیریت رواناب‌های سطحی شهری
- بررسی علل ترافیک در روزهای بارانی و برفی و راهکارهای کاهش آن
- بررسی تمایل به مشارکت شهروندان در مدیریت و توسعه‌ی فضای سبز پارک‌های محل‌های شهر تهران
- خاطره‌ی جمعی در شهر تهران (تحلیل فضای گورستان: هتراتوپیا و مکان خاطره)
- ساماندهی و توسعه‌ی میادین میوه و تره بار شهر تهران
- ساماندهی و مکان‌یابی ایجاد و توسعه مراکز سوخت‌رسانی
- واکاوری مفهوم عدالت در توسعه و بهره‌برداری از پروژه‌های حمل‌ونقل شهری
- مطالعه‌ی جایگزینی روسازی بتنی در ساخت معابر شهری به جای روسازی آسفالتی
- پیامدهای زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های عمرانی با نگاه ویژه به ژئوتکنیک
- نقش احداث و توسعه ساختمان‌های سبز و بهبود وضعیت محیط زیست شهری
- آشنایی با توسعه شهری بدون خودرو (نمونه موردی: محله کن)
- خوردگی مواد در هوای شهری روش‌های مطالعه خوردگی و پایش در کلان‌شهر تهران (فاز سوم)
- تحلیل نقش و عملکرد فروشگاه شهروند در فرآیند مشتری‌مداری
- الزامات اقلیمی در برنامه‌ریزی و طراحی شهرها و ارائه راهکار برای شهر تهران
- تحلیل ترافیک تهران از منظر جامعه‌شناختی
- مقدمه‌ای بر الگوی کاربری زمین در راستای کاهش مصرف انرژی
- امنیت اجتماعی در شهر تهران (مرور نظام مند تحقیقات انجام شده در موضوع امنیت اجتماعی شهر تهران)
- رویکردهای کنترل رشد افقی شهرها؛ نمونه مورد مطالعه: تهران
- بررسی فناوری‌های نوین در ساخت و بهره‌برداری از پیاده‌روهای شهری
- طراحی مدل مفهومی دیپلماسی شهری
- کاربرد بتن خود تراکم (SCC) در پروژه‌های عمرانی شهری
- مقایسه تطبیقی سند طرح جامع شهر تهران با اصول و ویژگی‌های رهیافت اندک افزای برنامه‌ریزی شهری
- بررسی و امکان‌سنجی تأسیس مجتمع‌های خدماتی در دروازه‌ها و مبادی ورودی شهر تهران
- معرفی روش‌های ارزیابی پس از اجرا برنامه‌های توسعه شهری (با تأکید بر سند طرح جامع تهران)
- نقش شبکه پایش در مدیریت کمیت و کیفیت آب‌های سطحی شهری
- شهرسازی اسلامی «روش‌شناسی و طرح مسئله»
- تبیین اجتماع‌محوری در مدیریت بحران با تأکید بر زلزله
- نظام پشتیبان تصمیم (DSS) در مدیریت شهری تهران با تأکید بر حوزه شهرسازی
- شهرسازی اسلامی (گفتاری پیرامون کلان نظریه شهرسازی عبادت محور)
- بازنگری در الگوی قیمت گذاری بیمه خودرو
- اهمیت حمایت اجتماعی (مطالعه موردی تحلیل مقایسه‌ای مناطق ۱۷ و ۱۲ در شهر تهران)
- شهر رویداد–مدار؛ گردشگری و اقتصاد فرهنگ در کلانشهرها؛ مروری بر تجربه‌های جهانی
- بررسی عملکرد ساختمان ها در برابر گسیختگی سطحی ناشی از گسل ها در محیط‌های شهری
- ارزیابی راهبردی زیستمحیطی (SEA) راهبردهای سند طرح جامع (راهبردی- ساختاری) شهر تهران
- بررسی الزامات و چالش‌های حقوقی و اجرایی واگذاری میادین میوه و تره‌بار به مدیریت محلات
- بررسی نظام کنترل و پایش آلاینده‌ها در محصولات کشاورزی درمیادین میوه و تره‌بار و راه‌های ارتقاء آن
- چالش‌ها و فرصت‌های احداث پیاده‌راه در تهران
- نقش تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) در مدیریت روسازی معابر
- عوامل موثر بر تأخیر پروژه‌های عمرانی با تاکید بر تجارب
- 'گزارش پشتیبان «سند سیاست‌گذاری و هدایت توسعه اراضی بوستان ولایت»
- مدیریت تعارض کنشگران در فرآیند تهیه و اجرای برنامه‌های توسعه شهری
- ارزیابی خرابی‌های رایج آسفالت معابر شهر تهران و ارائه راهکار به منظور کاهش آن

فضاهای زیرسطحی نظیر تونل‌ها از عوامل مهم توسعه شهری هستند. اجرای تونل‌ها در محیط‌های شهری همواره با مشـکلات و چالشـهای مختلف و متعددی همراه بوده است؛ بنابراین بحث و بررسی چالش‌های پیش رو در اجرای تونل‌های شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در گزارش حاضر، ابتدا ویژگی‌های خاص تونل‌ها و انواع روش‌های اجرای تونل‌ها موردبررسـی اجمالی قرارگرفته اسـت. در ادامه، این گزارش باهدفی آموزشی ترویجی به معرفی چالش‌های اجرای تونل‌ها و عوامل کلیدی که در بروز این چالش‌ها مؤثرند، پرداخته شده است. عواملی نظیر روش اجرای تونل، نوع و شرایط زمین و خاک اطراف تونل، مشخصات پوشش تونل و ... ازجمله مهم‌ترین عواملی هسـتند که میتوانند در بروز چالش‌های اجرایی تونل‌ها تأثیرگذار باشند. در بخش انتهایی گزارش برخی تجارب تونل سازی در کشور موردبررسی و مطالعه قرارگرفته‌اند. در این بخش برای دو مطالعه موردی در شـهر تهران (تونل نیایش و رسالت) و یک مطالعه موردی در شهر اهواز (مترو شهر اهواز) پس از ارائه اطلاعاتی در خصوص کلیات پروژه و روش اجرا، چالش‌های ویژه مورد مواجهه در هر پروژه معرفی شده و روش‌هایی که جهت مقابله با این چالش‌ها به کار گرفته‌شده، بیان شده است.

مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران
معاونت علـــم و فنـــــاوری
http:rpc.tehran.ir
email:info@rpc.tehran.ir