

رسالة محمد



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

مدلسازی عددی روش پیش‌نگهدارنده‌ی فورپولینگ در تونل البرز

نگارنده: علیرضا احمدی

اساتید راهنما

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر مجید نیکخواه

مشاور

مهندس سعید آلیکایی طالقان

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

که در تمامی مسیر زندگی و تصویب همچون چراغی،

روشنگر مسیر پر تلاطم پیش رویم هستند و برادر

بزرگوارم که همیشه و در هر شرایطی پشتیبانم بوده و و

تکیه‌گاهی برای پیشرفت‌هایم در زندگیست...

شکر و قدردانی

لازم است تا مراتب سپاس خویش را به حضور همه‌ی سروران، اساتید و دوستان ابراز دارم که بایاری و همراهی آنها، این

تحقیق به سرانجام رسید. شایسته است که تقدیر ویژه‌ی خود را به این بزرگواران تقدیم نمایم:

استادهای عزیزم جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر مجید نیکخواه که در تمامی مراحل این تحقیق صمیمانه و دلسوزانه مرا یاری

کردند و راهنمایی‌های ایشان، روشمگر راه من بود.

مهندس سعید آلیکایی طالقان که به عنوان مشاور در این تحقیق مرا یاری کردند.

دوست عزیزم مهندس فواتی و برادر بزرگوارم پوریا احمدی که در مسیر کامل شدن این تحقیق از زحمات بی‌دریغشان بهره‌بردم.

در خاتمه بر خود لازم میدانم مراتب شکر و قدردانی همیشگی خود را نسبت به خانواده‌ی عزیزم به ویژه پدر و مادر مهربانم که همیشه و در

همه حال پشتیبانم بودند بجای آورم.

علیرضا احمدی

زمستان ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب علیرضا احمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: مدل‌سازی عددی روش پیش‌نگهدارنده‌ی فورپولینگ در تونل البرز تحت راهنمایی آقایان دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر مجید نیکخواه متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

علی‌رغم توسعه‌ی روش‌ها و شیوه‌های متعدد حفاری و تحکیم تونل‌ها، امروزه یافتن راهی مناسب برای پایدارسازی بناهای درون زمین امری چالش برانگیز است. استفاده از سامانه‌های پیش-تحکیمی روشی مناسب برای بهبود بخشیدن وضعیت زمین قبل از شروع عملیات حفاری است. درک صحیح از نحوه‌ی عملکرد روش مذکور نیازمند بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های دقیق است. در این مطالعه به بررسی عملکرد سامانه چتری در تونل آزادراه تهران-شمال به طور عددی پرداخته شده است. مطالعات زمین‌شناسی منطقه‌ی اجرای تونل آزادراه تهران-شمال نشان داده است که بخشهایی از این تونل به دلیل قرار گرفتن در مناطق سست، دارای ظرفیت ریزشی بوده و لذا در این مناطق اجرای عملیات تونل‌سازی با روش‌های نگهداری متداول، امکان‌پذیر نیست. بر این اساس سامانه پیش‌تحکیم چتری که برای زمین‌های سست و ریزشی قابل استفاده است به صورت عددی توسط نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ مدل‌سازی شده است. در این تحقیق علاوه بر بررسی عملکرد سامانه چتری، اثر پارامترهای هندسی از جمله زاویه‌ی قرارگیری لوله‌ها نسبت به افق و فاصله‌ی بین لوله‌های سامانه چتری لوله‌گذاری با در نظر گرفتن شعاع تزریق مورد بررسی قرار گرفته است. معیار بررسی، جابجایی رخ داده در تاج تونل در نظر گرفته شده است. نتایج این مطالعه مبین این است که افزایش زاویه و کاهش فاصله‌ی بین لوله‌ها باعث افزایش پایداری شده و با استفاده از سامانه چتری، جابجایی تاج تونل به میزان ۶۰ درصد کاهش می‌یابد.

از دیگر نتایج قابل ذکر آن که سامانه پیشنهادی مهندسیین مشاور عملکردی بسیار خوب داشته و اجرای آن با توجه به مزومات اجرایی، سهولت بیشتری انجام می‌شود.

کلمات کلیدی: سامانه پیش‌تحکیم لوله‌گذاری، مدل‌سازی عددی، سامانه پیش‌تحکیم میله

گذاری، سامانه‌ی چتری

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول : مقدمه و کلیات.....
۲.....	۱-۱ مقدمه.....
۴.....	۲-۱ معرفی تحقیق.....
۵.....	۳-۱ ساختار تحقیق.....
۷.....	فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته.....
۸.....	۱-۲ مقدمه.....
۱۰.....	۲-۲ سامانه‌های پیش تحکیم در تونل‌ها.....
۱۰.....	۳-۲ روش‌های مختلف پیش تحکیم.....
۱۱.....	۱-۳-۲ روش میله گذاری.....
۱۲.....	۲-۳-۲ روش لوله گذاری.....
۱۴.....	۳-۳-۲ لوله‌رانی.....
۱۴.....	۴-۳-۲ تزریق با فشار زیاد.....
۱۵.....	۵-۳-۲ روش انجماد.....
۱۶.....	۴-۲ شیوه‌ی نصب لوله‌های پیش تحکیم.....
۱۶.....	۱-۴-۲ پیش حفاری.....
۱۸.....	۲-۴-۲ نصب همزمان لوله‌های پوشش.....
۱۹.....	۵-۲ مقایسه کلی سامانه‌های پیش تحکیم با سامانه‌های نگهداری سنتی.....
۲۰.....	۶-۲ سامانه پیش تحکیم چتری.....
۲۱.....	۱-۶-۲ اندازه‌گیری داده‌های مربوط به زمین.....
۲۲.....	۲-۶-۲ مشخصات سامانه چتری.....

- ۲۴.....۷-۲ ملزومات تحلیل و مدل سازی عددی سامانه چتری.
- ۲۵.....۸-۲ پارامترهای طراحی.
- ۳۲.....۹-۲ استاندارد سازی نام سامانه های چتری.
- ۳۷.....۱۰-۲ دسته بندی سامانه چتری.
- ۳۷.....۱-۱۰-۲ میله ای ها.
- ۳۸.....۲-۱۰-۲ لوله ای ها.
- ۴۰.....۳-۱۰-۲ تزریقی ها.
- ۴۱.....۱۱-۲ روش انتخاب سامانه پیش تحکیم چتری مناسب.
- ۴۱.....۱-۱۱-۲ گام اول : نوع.
- ۴۲.....۲-۱۱-۲ گام دوم : روش انتخاب بر پایه ی روش کاهش.
- ۴۳.....۳-۱۱-۲ گام سوم : شرایط زمین شناسی.
- ۴۴.....۴-۱۱-۲ گام چهارم : گزینه ها : انتخاب زیرگروه سامانه چتری.
- ۴۴.....۱۲-۲ نمودار انتخاب سامانه چتری.
- ۴۵.....۱-۱۲-۲ کنترل ساخت.
- ۴۵.....۲-۱۲-۲ مدیریت همگرایی.
- ۴۶.....۳-۱۲-۲ کاهش همگرایی بر پایه ی بهسازی زمین.
- ۴۶.....۴-۱۲-۲ مدیریت نشست سطحی.

۵۱..... فصل سوم : مطالعات موردی انجام شده.....

- ۵۲.....۱-۳ مقدمه.
- ۲-۳ کنترل نشست های سطح با استفاده از سیستم چتری در مرحله ی دوم حفاری مترو
استانبول..... ۵۲
- ۳-۳ رفتار تغییر شکل جبهه کار تونل تقویت شده با لوله های طولی..... ۵۵
- ۴-۳ نقش روش چتری و شعاع تزریق ایجاد شده در زمین های ریزشی (مطالعه ی موردی تونل
راه آهن قزوین-رشت-بندر انزلی)..... ۵۶

۵-۳ اثر پارامترهای روش چتری بر حفظ پایداری سینه‌کار؛ مطالعه موردی تونل سبزوکه
۵۷.....(۱۳۹۳)

فصل چهارم : معرفی ساختگاه تونل البرز مطالعه‌ی موردی.....۵۹

۱-۴ مقدمه.....۶۰

۲-۴ معرفی پروژه‌ی تونل البرز.....۶۱

۱-۲-۴ وضعیت زمین‌شناسی منطقه.....۶۲

۲-۲-۴ ساختار زمین‌شناسی منطقه محل مورد بررسی.....۶۵

۳-۲-۴ درجه درزه‌داری توده سنگ.....۶۷

۴-۲-۴ پایداری توده سنگ‌ها.....۷۰

۵-۲-۴ تعیین شاخص RMR و کلاس توده سنگ بر اساس طبقه‌بندی بنیاوسکی.....۷۱

۳-۴ حفاری و سامانه نگهداری.....۷۳

فصل پنجم : مدل‌سازی عددی و تحلیل نتایج.....۷۷

۱-۵ مقدمه.....۷۸

۲-۵ چگونگی مدل‌سازی سامانه‌ی چتری.....۷۸

۳-۵ مدل‌سازی مراحل مختلف حفاری و نصب سامانه‌های نگهداری.....۸۰

۴-۵ بررسی لزوم استفاده از سامانه پیش‌تحکیم.....۸۴

۱-۴-۵ مدل‌سازی بدون سامانه پیش‌تحکیمی.....۸۴

۲-۴-۵ مدل‌سازی با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی.....۸۷

۳-۴-۵ مدل‌سازی با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی و میل‌مهارهای شعاعی.....۸۸

۴-۴-۵ مقایسه‌ی حالات مختلف نگهداری و سامانه‌های پیش‌تحکیمی.....۹۱

۵-۵ رفتار ساختاری سامانه‌ی چتری.....۹۳

۶-۵ بررسی سامانه چتری لوله‌گذاری پیشنهادی.....۹۵

۹۵.....	۱-۶-۵ چگونگی مدل‌سازی سامانه لوله گذاری
۹۶.....	۲-۶-۵ مدل‌سازی سامانه نگهداری اولیه
۹۸.....	۳-۶-۵ بررسی مراحل مختلف حفاری و نصب سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری
۱۰۲.....	۴-۶-۵ بررسی اثر تغییر زاویه
۱۰۳.....	۵-۶-۵ بررسی اثر تغییر فاصله داری
۱۰۵.....	۷-۵ سامانه چتری پیشنهادی در تونل آزادراه تهران-شمال
۱۰۷.....	فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۸.....	۱-۶ مقدمه
۱۰۸.....	۲-۶ نتیجه‌گیری
۱۰۹.....	۳-۶ پیشنهادات
۱۱۰.....	منابع

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: شکل نمادین روش پیش‌تحکیم چتری در حفاری تونل.....	۳
شکل ۱-۲: نمای دهانه‌ی تونل البرز.....	۴
شکل ۱-۱: میله‌های نصب شده درون لتیس‌گیردرها در هر گام، بر روی جبهه کار.....	۱۱
شکل ۲-۲: نمایی از مقطع تونل‌سازی با استفاده از روش پیش‌تحکیم چتری.....	۱۲
شکل ۲-۳: شکل نمادین روش پیش‌تحکیم چتری در حفاری تونل.....	۱۳
شکل ۲-۴: روش لوله‌رانی در حفر فضاهای زیرزمینی.....	۱۴
شکل ۲-۵: نمایی از روش تزریق با فشار زیاد.....	۱۵
شکل ۲-۶: دستگاه حفر و سامانه نصب لوله‌های مربوط به سامانه پیش‌تحکیم چتری به روش پیش‌حفاری.....	۱۷
شکل ۲-۷: مقایسه‌ی مطالعه‌های عددی انجام گرفته روی همگرایی چالهای پیش‌حفاری و چالهای همزمان با نصب لوله.....	۱۹
شکل ۲-۸: سامانه‌ی چتری با لوله در سقف برای ورودی تونل بریگل (اتریش).....	۲۰
شکل ۲-۹: محل قرارگیری انحراف‌سنج‌های زنجیری.....	۲۳
شکل ۲-۱۰: روشهای قرارگیری لوله‌ها در سقف.....	۲۴
شکل ۲-۱۱: لایه‌های ساختاری سامانه نگهداری موقت سامانه‌ی چتری به همراه المانهای لوله گذاری.....	۲۶
شکل ۲-۱۲: کاربرد تحلیل‌های عددی برای پارامترهای طراحی نشان داده شده در شکل ۲-۱۱ و پاسخگویی کلی روش لوله گذاری.....	۲۸
شکل ۲-۱۳: نمایش دادن قوس‌زایی.....	۲۹
شکل ۲-۱۴: نمودار کاهش نشست سطحی برگرفته از UASC.....	۳۱
شکل ۲-۱۵: پارامترهای طراحی سامانه‌ی چتری.....	۳۳
شکل ۲-۱۶: نمایی از نام‌گذاری سامانه‌های پیش‌تحکیم چتری.....	۳۵
شکل ۲-۱۷: تقسیم بندی میله‌ها و لوله‌ها در سامانه چتری.....	۳۸
شکل ۲-۱۸: نمایش خط گسیختگی رانکین برای یک مورد سامانه‌ی چتری با لوله‌های دوبل محصور.....	۴۰
شکل ۲-۱۹: روشی برای کمک به روند انتخاب سامانه‌ی چتری مناسب.....	۴۲
شکل ۲-۲۰: جدول انتخاب سامانه چتری.....	۴۷
شکل ۲-۲۱: الگوی رفتاری تونل.....	۴۸
شکل ۲-۲۲: نمودار رفتار تونل برای توده سنگ.....	۴۹
شکل ۱-۳: مقطع ژئوتکنیکی محل تونل استانبول.....	۵۳
شکل ۲-۳: مقطع عرضی معمول از روش چتری با لوله و تقویت جبهه کار.....	۵۶
شکل ۴-۱ (الف): محل قرارگیری تونل البرز در مسیر آزادراه تهران-شمال.....	۶۲
شکل ۴-۱ (ب): محل قرارگیری تونل در قطعه‌ی دوم طرح آزادراه تهران-شمال است.....	۶۲
شکل ۴-۲: پروفیل طولی مسیر حفاری تونل با توجه به اطلاعات بدست آمده از تونل اکتشافی.....	۶۴
شکل ۴-۳: مقطع عرضی تونل.....	۷۳
شکل ۴-۴: پارامترهای بدست آمده از نرم‌افزار RocLab.....	۷۴
شکل ۵-۱: شمایی از بلوک مدلسازی شده.....	۸۲
شکل ۵-۲: نمای قرارگیری میله‌ها در سقف تونل.....	۸۲

- شکل ۵-۳: شکل جانمایی سامانه میله گذاری و میل مهارهای شعاعی..... ۸۳
- شکل ۵-۴: جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (بدون استفاده از سامانه پیش‌تحکیم) ۸۵
- شکل ۵-۵: نواحی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (بدون سامانه پیش‌تحکیمی) ۸۵
- شکل ۵-۶: جابجایی در مقطع طولی تونل مدل فاقد سامانه پیش‌تحکیمی..... ۸۶
- شکل ۵-۷: جابجایی قائم تاج تونل در طول گامهای حفاری در مدل فاقد سامانه پیش‌تحکیمی..... ۸۷
- شکل ۵-۸: جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیم) ۸۷
- شکل ۵-۹: ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی) ۸۸
- شکل ۵-۱۰: جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیم و میل مهارهای شعاعی) ۸۹
- شکل ۵-۱۱: ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی و میل مهارهای شعاعی) ۸۹
- شکل ۵-۱۲: توزیع نیروی محوری در لوله‌های سامانه‌ی چتری در راستای Y..... ۹۰
- شکل ۵-۱۳: توزیع لنگر خمشی در لوله‌های سامانه‌ی چتری در راستای Z..... ۹۰
- شکل ۵-۱۴: مقایسه‌ی شرایط مختلف با توجه به معیار خطر ساکورای..... ۹۱
- شکل ۵-۱۵: پروفیل جابجایی قائم تاج در سه حالت (بدون سیستم پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم و میل - مهارهای شعاعی)..... ۹۲
- شکل ۵-۱۶: جابجایی قائم نقطه‌ی روی تاج تونل در ابتدای حفاری (با سامانه پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم و میل مهارهای شعاعی) ۹۳
- شکل ۵-۱۷: چگونگی توزیع نیروها در مدل ساخته شده در تحقیق..... ۹۴
- شکل ۵-۱۸: نمایش نمادین یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲..... ۹۷
- شکل ۵-۱۹: شکل نمادین قرارگیری لوله‌ها در سقف تونل..... ۹۹
- شکل ۵-۲۰: جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری) ۱۰۰
- شکل ۵-۲۱: ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی لوله گذاری) ۱۰۱
- شکل ۵-۲۲: توزیع نیروی محوری در لوله‌های سامانه‌ی چتری در راستای Y..... ۱۰۱
- شکل ۵-۲۳: توزیع لنگر خمشی در لوله‌های سامانه‌ی چتری در راستای Z..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۴: جابجایی قائم تونل در ۳ زاویه‌ی ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۵: جابجایی قائم نقطه‌ی روی تاج تونل در ابتدای حفاری در ۳ زاویه‌ی ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۶: جابجایی قائم تاج تونل در فاصله‌داری متفاوت لوله‌ها در زاویه‌ی ۱۰ درجه (۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر)..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۷: جابجایی قائم نقطه‌ی روی تاج تونل در ابتدای حفاری در فاصله‌داری متفاوت لوله‌ها (۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر)..... ۱۰۵

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ خلاصه‌ای از پارامترهای عددی مورد تحقیق.....	۲۹
جدول ۲-۲ تقسیمات سامانه چتری و بازه‌ی پارامترهای طراحی موردهای مربوطه.....	۳۶
جدول ۳-۱ مشخصات ژئوتکنیکی مربوط به سازندهای مختلف تونل استانبول.....	۵۴
جدول ۴-۱ مشخصات سامانه‌های دسته درزه.....	۶۷
جدول ۴-۲ موقعیت سامانه درزه‌ها نسبت به محور تونل.....	۶۸
جدول ۴-۳ تقسیم‌بندی درزه‌ها براساس عرض بازشدگی.....	۶۹
جدول ۴-۴ وضعیت شاخص کیفیت توده سنگ.....	۷۰
جدول ۴-۵ تعیین مشخصات توده سنگ بر اساس طبقه‌بندی بنیاوسکی.....	۷۱
جدول ۴-۶ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ محل مورد بررسی.....	۷۴
جدول ۴-۷ برآورد نسبت تنش‌های افقی به قائم.....	۷۵
جدول ۵-۱ خصوصیات اجزای سامانه نگهداری و پیش‌تحکیم.....	۸۱
جدول ۵-۲ پارامترهای سویل‌کریت.....	۹۶

فصل اول : مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

در سالیان اخیر، استفاده از تونل‌ها برای حل مشکلات ترافیکی، از روند رو به رشدی برخوردار بوده است. اهمیت سازه‌های زیرزمینی به ویژه تونل‌ها را می‌توان از تعداد پروژه‌های اجرا شده و در حال اجرا دریافت. احداث تونل در شرایط مختلف زمین‌شناسی و مشکلات موجود گاهی دارای محدودیت‌هایی است که در صورت نادیده گرفته شدن، موجب بروز حوادث ناگوار و در بهترین شرایط ایجاد وقفه در روند انجام پروژه می‌شوند.

در پروژه‌های اخیر تونل‌سازی، استفاده از سامانه چتری^۱ در زمین‌های سست و ناپایدار برای پایدارسازی محل احداث سازه مورد توجه قرار گرفته است. این راهکار در مواردی که نگهداری سریع و کنترل تغییر شکل‌ها به منظور فراهم آوردن شرایط ایمن مد نظر است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، مواد تقویت کننده مانند دوغاب تزریقی از طریق لوله‌های سوراخ‌دار به درون منطقه‌ی مورد نظر تزریق می‌شود. این روش در مقایسه با روش‌های پرهزینه‌ی نگهداری دیگر مثل انجماد، لوله‌رانی و ستون‌های حاصل از تزریق با فشار زیاد کارآمدتر است.

استفاده از سامانه چتری در تحکیم تونل‌ها دارای چند مزیت است که عبارتند از:

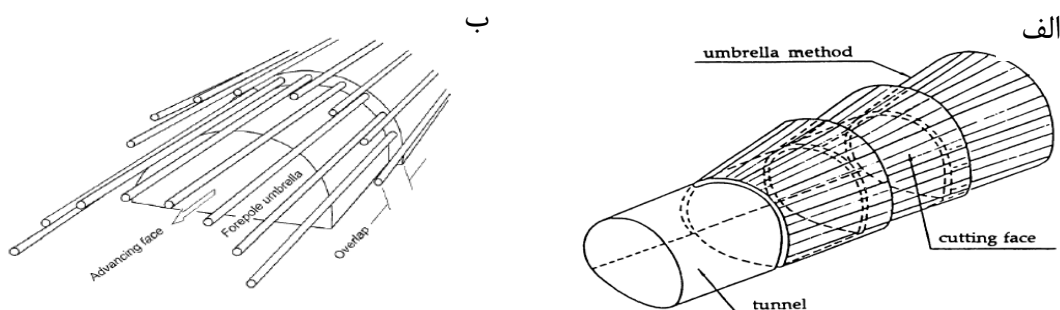
- افزایش پایداری جبهه کار
- کاهش ابعاد و تعداد نگهدارنده‌ها (قاب فولادی، شاتکریت و ...)
- کاهش نشست در جبهه کار
- تعریض جبهه کار که امکان استفاده از ماشین‌آلات بزرگتر و ماشین‌آلات حفاری را فراهم می‌کند (Muraki, 1997).

^۱ Umbrella Arch Method

سامانه‌های پیش‌تحکیم در واقع سامانه‌هایی هستند که جلوی جبهه کار را برای حفاری‌های آبی مقاوم سازی می‌کنند. همیشه سازه‌ای مورد نظر است که حتی در شرایطی که مقاومت زمین کم است، ایمن و اقتصادی باشد.

سامانه چتری جز روش‌های پیش‌تحکیم است و پیش از حفر هر گام پیشروی تونل، لوله‌هایی با قطر کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر با استفاده از ماشین آلات حفاری خاصی نظیر جامبوها با زاویه حدود ۵ تا ۱۰ درجه نسبت به امتداد تونل به سمت بیرون نصب می‌شوند. این سامانه نیازمند عریض‌تر کردن مقاطع به صورت تدریجی است که باعث می‌شود پروفیل کلی تونل به صورت دندان اره‌ای شود، شکل (۱-۱). طول لوله‌ها و مراحل تزریق‌ها می‌تواند بین ۱۲ تا ۱۵ متر باشد. پس از تزریق محیط درونی و فضای خالی محیط بین لوله و زمین، حفاری زمین در زیر این لوله‌ها انجام خواهد شد. بعد از حفاری به اندازه‌ای که از قبل تعیین شده است، عملیات مذکور مجدد انجام می‌شود (Volkman et al., 2006). از این روش در مرور ادبیات، با اسامی گوناگونی نام برده شده است، که خود در برخی موارد ممکن است باعث ایجاد سردرگمی شود. در بخش (۲-۱۰) برای رفع ابهام، به روند نام‌گذاری اجزای این سامانه پرداخته خواهد شد.

چتر بوجود آمده که به صورت مخروط‌های ناقص و دارای همپوشانی است، نگهداری محل را فراهم می‌آورد.



شکل ۱-۱- نمای از روش پیش‌تحکیم سامانه‌ی چتری در حفاری تونل. الف)، چتر بوجود آمده در هر گام را نشان می‌دهد (Muraki, 1997). ب) نمایانگر دید از جلو (جلوی جبهه کار) و ستون‌های تزریق است (Schumacher, 2012)

۱-۲ معرفی تحقیق

آزادراه تهران-شمال یک پروژه‌ی بزرگ راه‌سازی است که شهر تهران را به شهرهای غربی استان مازندران متصل می‌کند. تونل مورد مطالعه از مجموعه‌ی تونل‌های البرز است که در قطعه‌ی دوم مسیر آزادراه تهران - شمال قرار دارد و شامل دو تونل اصلی و یک تونل خدمات (بین دو تونل اصلی) است. تونل البرز به طول تقریبی ۶۴۰۰ متر به عنوان بلندترین تونل راه کشور بوده که در سازند شمشک در حال احداث است. عرض دهانه هر یک از تونل‌ها حدود ۱۳/۱۱ متر و ارتفاع آن‌ها ۱۱/۴۵ است، که با احداث این تونل‌ها مسیر ۱۲ کیلومتری فعلی جاده چالوس با پیچ‌های خطرناک تبدیل به ۶ کیلومتر مسیر امن می‌گردد. هم‌اکنون این تونل با روش غیر مکانیزه در حال حفاری است. در این مطالعه، مدل‌سازی عددی برای یافتن روش بهینه‌ی اجرای سامانه پیش‌نگهدارنده‌ی لوله گذاری، که به عنوان گزینه‌ی انتخابی تحکیم توده سنگ دربرگیرنده‌ی تونل مطرح شده، انجام گرفته است. همچنین عملکرد کلی پیشرفت و مراحل انجام طرح با مدل‌سازی در شرایط مختلف اجرای عملیات مقایسه شده و در نهایت پایداری تونل نسبت به روش ارائه‌شده، ارزیابی گردیده است.



شکل ۱-۲ نمای دهانه‌ی ورودی تونل البرز. الف) دهانه‌ی غربی (ب) دهانه‌ی تونل شرقی

عملکرد ساختاری این روش در مراحل مختلف حفاری و همچنین در لوله‌های واقع در تاج تونل و پیرامون آن بررسی و مقایسه شده است. از آنجاکه پارامترهای هندسی سامانه‌ی چتری از قبیل زاویه قرارگیری لوله‌ها و فاصله‌ی بین آنها و همچنین پارامترهای فیزیکی از جمله نسبت آب به سیمان در دوغاب و شعاع تزریق در تامین پایداری تونل نقش موثری دارند، با بررسی داده‌های موجود و تعیین

پارامترهای دوغاب و ناحیه‌ی تحکیم در اطراف لوله‌ها و مدل‌سازی عددی به بررسی هریک از عوامل مذکور پرداخته شده است. معیار بررسی و قضاوت، جابجایی‌های رخ داده در تاج تونل است.

۱-۳ ساختار تحقیق

این تحقیق در پنج فصل اصلی به شرح زیر انجام و گزارش شده است.

فصل اول درباره‌ی کلیات و معرفی تحقیق است.

فصل دوم این تحقیق شامل مروری بر مطالعات انجام شده در مورد روش پیش تحکیمی و سامانه‌ی چتری و طبقه‌بندی و نام‌گذاری آن و معرفی جدول "انتخاب روش چتری تحکیم" است.

فصل سوم نمایی مختصر از زمین‌شناسی تونل مورد مطالعه را ارائه می‌دهد.

فصل چهارم شامل مدل‌سازی عددی روش سامانه‌ی چتری و تحلیل‌های صورت گرفته بر روی نتایج و داده‌های بدست آمده است.

در فصل پنجم نتیجه‌گیری تحقیق و پیشنهادات ارائه شده در رابطه با پروژه بیان شده است.

فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته

با مدرن شدن زیرساخت‌های شهری، فعالیت‌های تونل‌سازی درون زمین‌های ضعیف توسعه یافته است. همیشه سازه‌های مورد نظر است که حتی در شرایطی که مقاومت زمین کم است، ایمن و اقتصادی باشد (Volkman et al., 2006). در حفاری تونل‌های مربوط به مترو، کنترل نشست سطحی قبل و بعد از عملیات حفاری، از آنجا که ممکن است آسیبی جدی را به سازه‌های سطحی وارد کند بسیار ضروری است. در غیر این صورت تونل‌های مترو کارایی خود را از دست داده و از مزیت‌های آن‌ها کاسته می‌شود (Ocak, 2008) با توجه به پیشرفت‌های مدل‌سازی‌های عددی، این امکان ایجاد شده است که بتوان اندرکنش‌های پیچیده‌ی بین زمین و سامانه نگهداری را به صورت دو بعدی و سه بعدی برای تحلیل پایداری سامانه‌های نگهداری، بررسی کرد (Oke et al., 2014). در ادامه به معرفی روش‌های ایجاد شرایط مناسب حفاری و تامین ایمنی و پایداری تونل‌ها در زمینهای سست پرداخته خواهد شد. در ارتباط با این مطالب، سامانه چتری، روشی کارآمد با امکان اجرا در شرایط گوناگون زمین‌شناسی است که با استفاده از آن شرایط مطلوب برای کار کردن فراهم می‌شود.

سامانه نگهدارنده‌ی چتری جز سامانه‌های پیش‌تحکیم قرار گرفته که نسبت به برخی سامانه‌های پیش‌تحکیم از جمله انجماد، دارای مزایای بیشتری، از جنبه‌ی سهولت اجرا و هزینه‌های کمتر بوده و به طور کلی اجرای آن نیز به مراتب نسبت به روش‌هایی نظیر انجماد و... ساده‌تر است. سامانه چتری خود به زیر شاخه‌های زیادی تقسیم می‌شود که در قسمتهای بعد توضیح داده خواهد شد. این تقسیم بندی‌ها در ابتدا مربوط به سامانه‌های پیش‌تحکیم بوده که در گذر زمان و با توجه به شرایط استفاده از آن به طوری کلی تقسیم بندی شده‌اند (به نقل از Volkman & Schubert, 2007). با این حال اخیراً اوک^۱ و همکاران طبقه بندی جدید و جامع‌تری از این نوع سامانه نگهداری ارائه داده‌اند. آنها نموداری

^۱-Oke

برای انتخاب مناسب سامانه چتری در شرایط مختلف را در اختیار قرار داده‌اند که در بخش‌های آتی به آنها پرداخته شده است.

هفنی^۱ در مطالعات خود بیان کرده است که سامانه چتری اغلب به عنوان روش تقویت کننده‌ی کمکی در تونلهایی با قطر زیاد که به روش جدید تونل‌سازی اتریشی^۲ حفاری می‌شدند، به ویژه در ژاپن و ایتالیا استفاده شده است (Hefny et al., 2000). نتایج بدست آمده از کاربرد این نوع سامانه با توجه به تحقیقات انجام گرفته توسط یانگ و همکاران^۳ (۲۰۰۱)، هارویاما^۴ و همکاران (۲۰۰۱)، ماتسو^۵ و همکاران (۱۹۹۶) و باریسون^۶ و همکاران (۱۹۸۲) در پروژه‌های مختلف، بیانگر کارایی موثر این سامانه بوده است.

اوکاک^۷ (۲۰۰۸) با انجام مقایسه‌ای بین کاربرد روش تونل‌سازی اتریشی و استفاده از روش چتری برای کنترل نشست حفاری در زمین رس‌دار و ماری در مرحله دوم حفاری تونل متروی استامبول بین مناطق اونکاپانی و ینیکاپی^۸، گزارش نموده‌است که استفاده از سامانه چتری به صورت ترکیبی با روش تونل‌سازی اتریشی، دارای برتری‌هایی از لحاظ کنترل سطح است (Ocak, 2008).

ولکمن و شوبرت^۹ (۲۰۰۶) هم در مطالعات خود در مورد بهینه کردن حفاری و سامانه نگهداری بیان کردند که با استفاده از روش پیش‌تحکیم سامانه چتری، نتایج قابل قبولی در کنترل تغییر شکل‌ها در جبهه‌کار به دست می‌آید (Volkman et al., 2006). همچنین، ولکمن و شوبرت (۲۰۰۶) با انجام مطالعات عددی در پروژه‌ای، کاهش نشست تا ۳۰ درصد را گزارش داده‌اند (Tuncdemir et al., 2012).

^۱ Hefny

^۲ NATM

^۳ Young

^۴ Haroyama

^۵ Matsu

^۶ Barrison

^۷ Ocak

^۸ Unkapani and Yenikapi

^۹ Volkman and Schubert

۲-۲ سامانه‌های پیش‌تحکیم در تونل‌ها

سامانه‌های پیش‌تحکیم در واقع سامانه‌هایی هستند که جلوی جبهه کار (قسمتی که قابل دسترسی نیست) را برای حفاری مقاوم سازی می‌کنند. به طور کلی سازه‌های ایمن و اقتصادی در شرایط زمین سست مورد نظر هستند. این اهداف در مواردی با استفاده از سامانه‌های هزینه‌بر و زمان‌بر نظیر تزریق دوغاب با فشار زیاد^۱ و روش انجماد^۲ برآورده نمی‌شوند. در دهه‌های گذشته، روش‌های جدیدی برای پیش‌تحکیم ابداع شده‌اند، که یکی از آنها روش پیش‌تحکیم چتری با لوله در سقف است، که بیشتر مورد توجه طراح‌ها بوده و قابلیت سازگاری با روش‌های سنتی و مدرن را دارد. از این روش به صورت ترکیبی با روش حفاری تمام مقطع هم استفاده شده است. این روش زمین ناپایدار جلوی جبهه کار را انعطاف پذیرتر کرده تا قابلیت مقابله با شرایط خطرناک فراهم شود. هرچند که از دید محققین اطلاعات در مورد اندرکنش سامانه نگهداری زمین ناقص بوده و معیار طراحی خاص این روش هنوز در دسترس نیست (Volkman et al., 2006). سامانه پیش‌تحکیم چتری یا به اختصار، UA، همان‌طور که از نامش پیداست، بهره جستن از پوششی چتر مانند برای ایجاد ایمنی و پایداری فضای مورد نظر حفاری است. از لحاظ اقتصادی، در اکثر مواقع در عمق کم، این روش، روشی مناسب است. البته تحلیل‌های عددی سه بعدی و اقتصادی قبل از انتخاب این سامانه معمولاً انجام می‌گیرد. به طور کلی در مورد شیوه‌ی کار می‌توان گفت با استفاده از تزریق دوغاب و گاهی میله‌های مخصوص در بالای جبهه کار، شرایطی به وجود می‌آید که پوسته‌ای چتر مانند، فضای در حال حفاری را دربرمی‌گیرد.

۲-۳ روش‌های مختلف پیش‌تحکیم

ولکمن و شوبرت (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای به نقل از پروکتور و وایت^۳ در تحقیقات خود روش‌های مختلف پیش‌تحکیم را در ۵ طبقه اصلی برای استفاده در تونلسازی مدرن تعریف کرده‌اند که در ادامه

^۱ Jet Grouting

^۲ Freezing

^۳ Proctor and White

به هر کدام از آنها پرداخته شده است. این روشها به طور خلاصه عبارتند از:

- میله گذاری^۱
- لوله گذاری^۲
- لوله رانی^۳
- تزریق با فشار زیاد^۴
- انجماد

۲-۳-۱ روش میله گذاری

ساده‌ترین روش تزریق اطراف جبهه کار (لوله گذاری)، نصب میله‌ها از آخرین کمان نگهداری قبل از شروع فرایند حفاری است. اغلب قطر این میله‌ها کمتر از ۵۰ میلی‌متر بوده و به صورت فشاری و یا با حفاری، و با فواصل کمی نسبت به هم تاج تونل را پوشش می‌دهند. شکل (۱-۲) میله‌های نصب



شکل ۱-۲ میله‌های نصب شده درون لتیس گیردها در هر گام، بر روی جبهه کار (Volkman et al., 2006)

^۱ Spilling

^۲ Long Forepoling

^۳ Pipe Jacking

^۴ Jet Grouting

شده را نشان می‌دهد. بعد از نصب، فضاهای خالی محیطی با تزریق پر می‌شوند. میله‌های کوتاه‌تر (کمتر از ۳ تا ۴ متر) برای نگهداری موقتی فضای حفر شده توسط مقاومت برشی میله‌ها استفاده می‌شود. میله‌های بلندتر (تا ۸ متر) برای حداقل کردن توقف‌های فرایند حفاری معمول و نصب آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Volkmann et al., 2006).

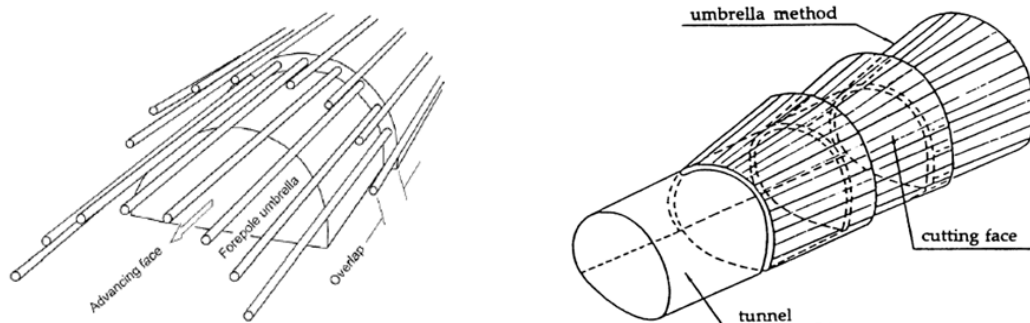
۲-۳-۲ روش لوله گذاری

برای نصب لوله‌های با قطر کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر می‌توان از ماشین آلات خاصی مثل حفارهای چند بازویی استفاده کرد. این سامانه نیازمند عریض‌تر کردن مقاطع به صورت تدریجی است که پروفیل کلی به صورت دندان اره‌ای خواهد شد شکل (۲-۲). طول لوله‌ها و تزریق‌ها می‌تواند بین ۱۲ تا ۱۵ متر باشد. پس از نصب لوله‌ها و تزریق دوغاب درون آنها، حفاری در زیر تحکیم به وجود آمده توسط این لوله‌ها پیشرفت خواهد کرد. پس از حفاری زیر تحکیمات به اندازه‌ای که از قبل تعیین شده‌است، عملیات نصب سامانه مجدد انجام می‌شود (Volkmann et al., 2006) شکل (۲-۳). از این روش در مطالعات مختلف، با اسامی متنوعی نام برده شده است که خود باعث ایجاد سردرگمی می‌شود. از جمله‌ی این اسامی



شکل ۲-۲: نمایی از مقطع تونل‌سازی با استفاده از روش پیش تحکیم سامانه‌ی چتری. افزایش سطح مقطع در هر گام قابل مشاهده است (Dywidage international catalogue, 2013).

می‌توان به نام‌های ذکر شده در منابع شامل Umbrella Arch, Pipe Roof Umbrella, Long Forepoling, Canopy Tube Umbrella اشاره کرد.



شکل ۲-۳: شکل نمادین روش پیش‌تحکیم سامانه‌ی چتری در حفاری تونل. شکل سمت چپ نمایانگر دید از جلو (جلوی جبهه کار) و ستون‌های تزریق است (Schumacher, 2012) و شکل سمت راست، چتر بوجود آمده در هرگام را نشان می‌دهد (Muraki, 1997).

بسته به روش حفاری، لوله‌های فولادی مورد استفاده در روش چتری اغلب دارای قطر، طول و ضخامت متفاوتی هستند. به علاوه، اگر محیط مورد نظر دارای شرایطی خاص باشد که انتخاب سامانه‌ی پیش‌تحکیمی را محدود کند، ضخامت لوله‌های فولادی، شعاع تزریق بین لوله‌ها و صلبیت لوله‌های اتصال باید در مقطع طولی از قبل مورد بررسی قرار گیرد.

تزریق درون لوله‌های و ایجاد شعاع تزریق مناسب، بسته به شرایط پایداری به شرح زیر است:

- در خاک‌های یکنواخت بدون چسبندگی تزریق ضروری است. دلیل وجود این ضرورت، جلوگیری از ریزش خاک بین لوله‌ها است.
- گاهی لازم است در زمین‌های بلوکی و دارای قله سنگ‌های نامنظم، برای پر کردن حفره‌های بین ناپیوستگی‌ها تزریق انجام شود. در این شرایط محیط بین لوله‌ها خود نگهدار است.
- در خاک‌هایی که چسبندگی زیاد است، در صورت لزوم، تزریق فقط برای پرکردن لوله‌ها به منظور افزایش مقاومت برشی در مکان‌های مستعد شکست انجام می‌شود.

۳-۳-۲ لوله‌رانی

از لوله‌هایی با قطر ۱ تا ۲ متر که با تجهیزات خاص و یا میکرو تی بی ام^۱ ها قابل نصب هستند، می‌توان در بیرون مقطع طراحی شده برای حفاری از یک شفت در ابتدای کار استفاده کرد. پس از انجام عملیات تزریق می‌توان در زیر یک چتر نگهداری خیلی مقاوم، به عملیات حفاری پرداخت. اصطلاح لوله‌رانی، اصطلاح رایج برای این نوع نگهداری است (Volkman & Krenn., 2005). در شکل (۲-۴) نمونه‌ای از این روش مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۴: روش لوله‌رانی در حفر فضاهای زیرزمینی به عنوان پیش‌تحکیم (www.ekyountunnel.com).

۳-۳-۲ تزریق با فشار زیاد

از شمع‌های به وجود آمده توسط روش تزریق با فشار زیاد می‌توان برای ساختن پوششی که فضای حفاری را احاطه می‌کند، استفاده کرد. این شمع‌ها می‌توانند ضد آب باشند، نسبت به یکدیگر همپوشانی داشته باشند و یا آنکه فاقد همپوشانی باشند (Volkman et al., 2006).

تزریق با فشار زیاد در واقع عملیاتی برجا با هدف حفر زمین و ترکیب آن با مخلوط سیال دوغاب برای ایجاد شمع‌های پایدار در زمین است، در این روش، دوغاب با فشاری زیاد تزریق می‌شود. موراکی (۱۹۹۷) فشار تزریق را بین ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال گزارش کرده است.

این روش از یک سامانه حفار برای به وجود آوردن شرایط پایداری خاک بهره می‌برد. سامانه حفار اغلب از تجهیزات متفاوت مرتبط به هم تشکیل شده است که در شکل (۲-۵) قابل مشاهده است.

^۱ Micro TBM

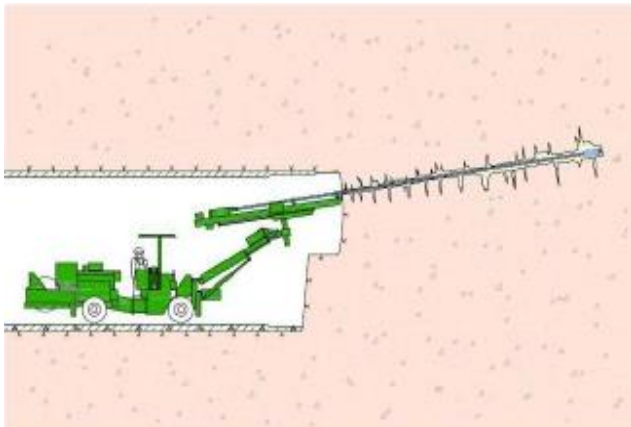
این روش در طیف وسیعی از خاک‌ها کاربرد دارد. موراکی اظهار داشته است که معمولاً ماسه‌ها به دلیل چسبندگی ناچیز برای تزریق با جت بسیار مناسب بوده و برای اجرای عملیات به انرژی کمتری نیاز دارد. البته فرار دوغاب بواسطه‌ی عدم چسبندگی و سیالیت تشدید می‌شود. تزریق در شن‌های دارای نفوذپذیری بالا منجر به از دست رفتن دوغاب و سیال‌های تزریقی شده و تاثیر تزریق را کاهش می‌دهند. در خاک‌های چسبنده قطر ستون خاک بستگی به چسبندگی خاک دارد.

برای تزریق دو شیوه وجود دارد:

- تزریق مسلح

- تزریق غیر مسلح

در روش تزریق مسلح پس از حفر چال‌ها، لوله‌ها یا تحکیمات دیگر مانند مش‌ها به درون چال فرستاده شده و سپس شمع‌ها به وسیله‌ی تزریق ایجاد می‌شوند. در روش تزریق غیر مسلح بلافاصله پس از حفر چال، شمع‌ها به وسیله‌ی تزریق ایجاد می‌شوند.



شکل ۲-۵: نمایی از روش تزریق با فشار زیاد (www.asconrouads.com)

۲-۳-۵ روش انجماد

انجماد زمین هزینه‌بر و زمانبرترین روش پیش‌تحکیم و بهسازی زمین است. با استفاده از این سامانه، با منجمد کردن آب زیرزمینی، پوششی برای نگهداری سازه بوجود می‌آید.

به عنوان جمع‌بندی مطالب فوق می‌توان گفت که روش لوله گذاری کاربرد بیشتری داشته و به روش‌های استفاده شده در فرآیند ساخت تونل‌ها در دهه‌ی گذشته شباهت بیشتری دارد. چند شیوه برای اجرا کردن این روش وجود دارد که در ادامه به معرفی و توضیح هر یک از این روش‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۴ شیوه‌ی نصب لوله‌های پیش‌تحکیم

برای حفاری چال‌ها و نصب لوله‌ها می‌توان از ماشین‌ها حفاری چند بازویی استفاده کرد. از دیدگاه ژئوتکنیکی دو روش برای انجام عملیات حفاری چال‌ها وجود دارد:

- پیش‌حفاری^۱
- نصب هم‌زمان لوله‌های پوشش

چگونگی نصب لوله‌ها نیز بر پایداری تونل موثر بوده و با انتخاب روش درست می‌توان نشست‌ها و تغییر شکل‌ها را به حداقل رساند.

۲-۴-۱ پیش‌حفاری

این روش از نصب لوله‌ها در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا چال حفر شده و پس از آن، لوله‌ها با فشار زیاد به درون چال فرستاده می‌شوند. برای استفاده از این روش، اغلب نیازمند ابزارهای خاص حفاری و نیروی انسانی بیشتری هستیم. ابزارهای حفاری به طور کلی دارای یک یا چند بازوی بلند هستند که عملیات حفاری توسط آن صورت می‌گیرد، به این ترتیب که سر مته وظیفه‌ی حفاری چال را به عهده داشته و سیال حفاری (آب یا هوا) از درون لوله تزریق شده، هم چال را تمیز کرده و هم سر مته را خنک می‌کند. پس از تزریق سیال حفاری و تمیز کردن چال، خرده‌های حفاری از چال خارج می‌شوند. پس از آن سر مته به صورت چند بار به جلو و عقب حرکت داده می‌شود، تا چال به کلی تمیز

^۱ Pre-Drilling

شده و شکل خود را مجدداً به دست آورد. در صورت لزوم پس از تعویض سرمته یک لوله‌ی یک‌پارچه درون چال برای نگهداری قرار داده می‌شود. سپس معمولاً چند چال آماده شده تا در هنگام تعویض سرمته لوله‌ها در چال‌ها قرار گیرند و زمان کمتری صرف گردد. شکل (۲-۶) نشان‌دهنده‌ی نوعی دستگاه پیش‌حفر است (Volkman & Schubert, 2007).



شکل ۲-۶: نمایی از دستگاه حفر و سامانه نصب لوله‌های مربوط به سامانه پیش‌تحکیم چتری به روش پیش‌حفری (Volkman & Schubert, 2007).

در زمین‌های نرم، استفاده از سامانه پیش‌حفری، باعث بروز ریسک بیشتری برای نشست سطحی زمین می‌شود، زیرا چال‌ها تا زمان نصب لوله‌ها بدون نگهداری باقی مانده و در زمین‌های ضعیف و ناپایدار این فرایند باعث تضعیف چال‌ها می‌شود که خود باعث تغییر شکل چال‌ها و در نتیجه افزایش جابجایی می‌شود. از آنجا که سیال حفری تماس مسقیم با دیواره‌ی چال دارد و آب باعث هوازگی و تضعیف سطح سنگ و خاک می‌شود، استفاده از هوا بجای آب خسارت وارد به چال‌ها را کاهش می‌دهد (Volkman & Schubert, 2007).

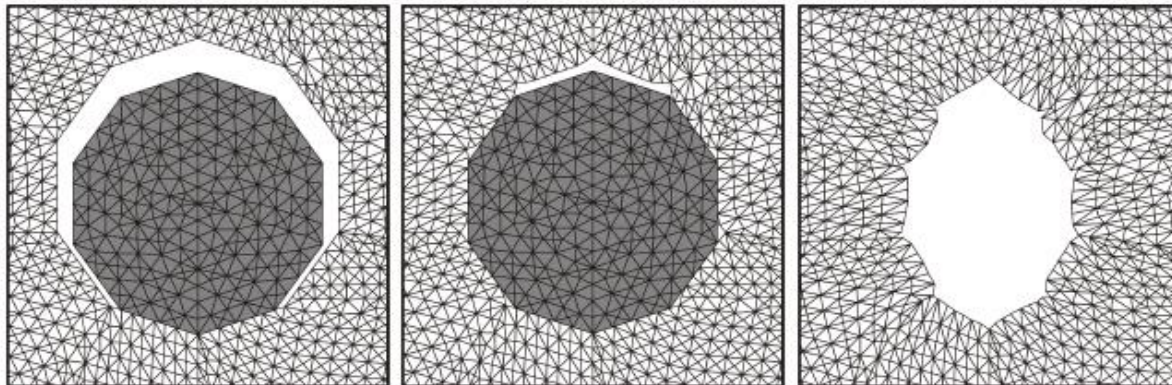
۲-۴-۲ نصب همزمان لوله‌های پوشش

ویژگی این روش نصب همزمان لوله با عملیات حفاری چال است. به طور کلی تفاوت بارز این دو روش در این است که وقتی از سامانه نصب همزمان لوله استفاده می‌شود، لوله به طور مستقیم پشت سرتمه حرکت کرده و در یک گام عملیات حفاری و نگهداری انجام می‌شود. اپراتور برای اجرای این روش می‌تواند از دستگاه‌های حفاری چند بازویی استفاده کند. این دستگاه‌ها اغلب دارای ۲ یا تعداد بیشتری بازو هستند که می‌توان از آنها به صورت همزمان استفاده کرد. از این رو زمان لازم برای نصب یک سامانه چتری کاهش می‌یابد. جان و میتل^۱ بیان کردند که یک چتر کامل در یک شیفت ۲۴ ساعته قابل اجرا بوده که این زمان شامل تزریق دوغاب هم می‌شود. اگر طول لوله‌ها بیشتر از طول بازوها باشد، می‌توان با اضافه کردن طول بازو مجدداً کار را ادامه داد، اما این مراحل کمی زمان‌بر است. در این سامانه اغلب از آب به عنوان سیال حفاری و خنک کننده استفاده می‌شود. آب از درون بازوی حفاری به داخل چال رانده می‌شود و از جلوی سرتمه شروع به تمیز کردن چال و شستن خرده‌های حفاری می‌کند، تا آنها از دهانه‌ی چال خارج شوند (John & Mattle, 2002).

در این روش لوله‌ها به عنوان پوشش نگهداری چال عمل می‌کنند، این کار دو مزیت ذاتی نسبت به روش نصب پیش‌حفاری دارد. مزیت اول این‌که میله‌ی حفاری و حرکت سیال درون چال است. بنابراین آب فقط در کنار سرتمه با سطح سنگ برخورد و تماس داشته و این خود باعث جلوگیری از تخریب سنگ و جلوگیری از افزایش قطر چال می‌شود. مزیت دوم، نگهداری بلافاصله‌ی چال توسط لوله است که خود باعث کاهش مشکلات پایداری چال، از بین بردن مشکل نصب لوله و جلوگیری از افزایش جابجایی به علت فضا‌های موجود در اطراف چال می‌شود (Volkman & Schubert 2007). شکل (۲-۷)

^۱ John & Mattle, 2002

بیانگر مطالعه‌ی دو بعدی انجام شده بر روی دو سامانه پیش حفاری و حفاری همزمان با نصب لوله است که توسط ولکمن و همکاران انجام گرفته است.



شکل ۲-۷: مقایسه‌ی مطالعه‌های عددی انجام گرفته روی همگرایی چال‌های پیش‌حفاری و چال‌های همزمان با نصب لوله، ابعاد هر شکل ۳۰ X ۳۰ سانتی‌متر است. (Volkman & Schubert, 2007).

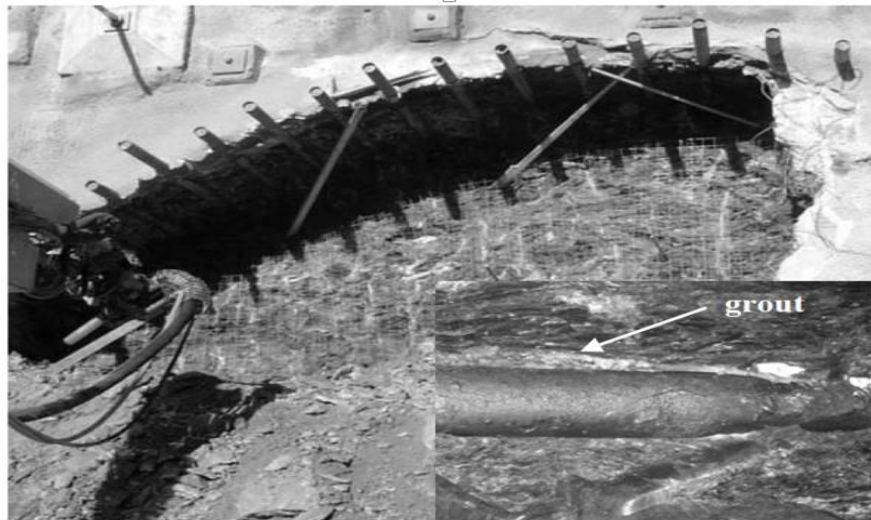
۲-۵ مقایسه کلی سامانه‌های پیش‌تحکیم با سامانه‌های نگهداری سنتی

در روش‌های سنتی تونل‌سازی، جابجایی‌های سطحی داخل تونل توسط برداشت‌های نقشه برداری^۱ در تونل اندازه‌گیری می‌شود. به علاوه، در تونل‌های کم عمق، نشست‌های سطح زمین نیز رفتارنگاری می‌شود. با مشاهدات پیوسته‌ی جابجایی‌ها، می‌توان به رفتار تغییر شکل محیط پی برد. لازم است تغییرات این رفتار تحلیل شده و در صورت نیاز انطباق لازم در سامانه نگهداری اعمال شود. اما سامانه‌های پیش‌تحکیم مانند روش چتری با لوله در سقف، اصولاً هم در جلوی جبهه کار و هم قسمت بدون نگهداری پشت جبهه کار عمل می‌کنند. هر دوی این قسمت‌ها با برداشت‌های نقشه برداری قابل کنترل نیستند. بنابراین باید از وسایل اندازه‌گیری دیگری نیز برای کنترل سامانه پیش‌تحکیم استفاده کرد. انحراف سنج‌های زنجیره‌ای^۲ شامل سامانه برداشت داده‌ای است که این شرایط را مهیا می‌کند. آرایش قرارگیری به ما امکان اندازه‌گیری و پردازش نشست را تا ۲۰ متر جلوتر از سینه کار را می‌دهد (Volkman & Schubert., 2008).

^۱ Geodetic survey

^۲ Chain Inclinometer

در حال حاضر قوانین طراحی جامع برای طراحی سامانه چتری وجود ندارد اما مطالعات عددی در اکثر بررسی‌های انجام گرفته و به عنوان روشی مشابه برای بررسی بهبود مقاومت جلوی جبهه کار تونل استفاده می‌شود. این شیوه با استفاده از مدل ژئوتکنیکی برای چتر تشکیل شده از ستون‌های هم‌پوشان تزریق شده با نازل، در اطراف محیط تونل که با سیمان کاری محکم شده است، مطابقت بیشتری دارد (Aksoy & Onargan, 2010). اغلب لوله‌ها با فشار کم تزریق شده و مانند روش تزریق با نازل، فشار تزریق بالا نیست. درون لوله‌ها را تزریق می‌کنند و ملات از سوراخ‌های محیطی لوله وارد فضاهای خالی شده و درزه و ترک‌های اطراف خود را پر می‌کند، شکل (۲-۸).



شکل ۲-۸. سامانه‌ی چتری با لوله در سقف برای ورودی تونل بریگل (اتریش)؛ جزئیات نشان دهنده‌ی پر شدگی فضاهای محیطی توسط دوغاب است (Volkman et al., 2006).

۲-۶ سامانه پیش‌تحکیم چتری

استفاده از سامانه نگهداری با لوله‌های چتری در سقف^۱ به طور روز افزون، حتی با این که طراحی آن تجربی است، افزایش یافته است. نتایج اندازه‌گیری‌های دقیق و سختگیرانه شامل اندازه‌گیری‌های نشست جلوی جبهه کار برای مشخص کردن مدل ژئوتکنیکی برای این سامانه نگهداری استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های اندرکنش زمین و سامانه نگهداری در محاسبات سه بعدی توسط نرم‌افزار

^۱ Pipe Roof

FLAC 3D استفاده شده‌اند. مطالعه‌ی انجام شده توسط ولکمن و شوبرت (۲۰۰۷)، مدل ساخته شده توسط داده‌های برجا را تایید کرده و تاثیر پارامترهای طراحی بر نگهداری و کنترل جابجایی را روشن نموده است. این کار قدرت تصمیم‌گیری برای انتخاب این سامانه یا سامانه‌ی با هزینه اقتصادی و زمانی بیشتر را فراهم کرده است (Volkmann & Schubert, 2007).

در دهه‌های گذشته سامانه نگهداری چتری با لوله در سقف به طور چشمگیری در توده سنگ-های ضعیف با روباره‌ی کم توسعه پیدا کرده است. از آنجا که دانش این روش عمدتاً بر پایه‌ی تجربه است، رویه‌ای برای اندازه‌گیری توسعه داده شده و در محل برای ثبت اندرکنش نگهداری زمین پیاده سازی شده است. بر اساس داده‌ها و آزمایش‌های آزمایشگاهی برای لوله‌ها و توده سنگ، مطالعات عددی برای تایید و پیش‌برد مدل ژئوتکنیکی بر پایه‌ی داده‌های اندازه‌گیری‌های برجا انجام گرفته است. با یافته‌های حاصل از این مطالعات و پارامترهای صحیح برای رفتار توده سنگ تحت شرایط الاستیک و پلاستیک، تغییر شکل‌ها و پارامترهای اساسی طراحی برای سامانه چتری با لوله در سقف قابل تخمین زدن هستند. با استفاده از تمهیدات و وسایل اندازه‌گیری مناسب از جمله ارزیابی درست و روش‌های پردازش، نشست‌های^۱ القا شده توسط سازه در مقاطع بحرانی که دارای احتمال فرونشست^۲ در حین ساخت هستند، قابل کنترل خواهد بود. اطلاعات به دست آمده از تحلیل‌های عددی و امکان کنترل کارایی در حین ساخت، از طریق پایش مناسب منتج به گرفتن نتیجه در شرایطی ایمن و پیش‌برد سازه به صورت اقتصادی در تونل‌های نگهداری شده توسط سامانه چتری با لوله در سقف می‌شوند (Volkmann & Schubert, 2007).

^۱ Settlement

^۲ Subsidence

۲-۶-۱ اندازه‌گیری داده‌های مربوط به زمین

از آنجا که در روش اتریشی، زمین به عنوان جزئی از سیستم نگهداری فضای حفاری شده به حساب می‌آید، مشاهده و تفسیر جابجایی‌ها یکی از مهمترین اصول و مفاهیم این روش حفاری است. این مشاهدات امکان کنترل اندرکنش‌های موجود درون سامانه‌ی نگهداری را می‌دهند. با مشاهده‌ی هر قسمت از فرآیند پیشرفت حفاری، سامانه نگهداری مربوطه، متناسب با نتایج حاصل شده از مشاهدات ابزاربندی آن قسمت طراحی می‌شود. مشکل اساسی توسعه‌ی مدل‌های ژئوتکنیکی برای سامانه‌های پیش‌تحکیم این است که برداشت‌ها فقط در محدوده‌ی حفاری شده امکان پذیر بوده در حالی که اساس عملکرد این سامانه‌ها در قسمت‌هایی است که قابل دیدن نبوده، دسترسی به آن‌ها امکان ناپذیر است و در واقع جلوی جبهه کار قرار دارند. مشاهده‌ی تاثیر سامانه پیش‌تحکیم چتری بر رفتار سامانه و اندازه‌گیری‌ها، با استفاده از انحراف سنج‌های زنجیری نصب شده در تاج تونل امکان پذیر می‌شود (Volkman & Schubert, 2007).

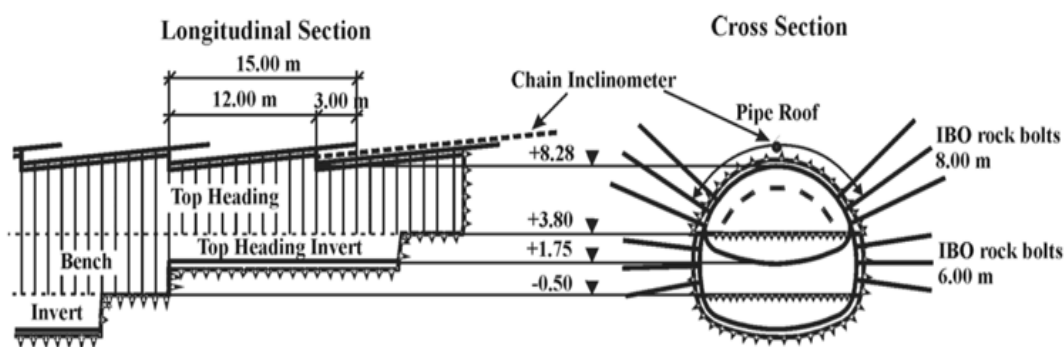
اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌های برجا با انحراف سنج‌های زنجیری در تعیین عامل موثر کلیدی و ملزومات مطالعات سه بعدی قابل استفاده هستند. با اطلاعات بدست آمده از ابزاربندی و مدل ساخته شده در نرم‌افزارهای عددی، می‌توان تغییر شکل‌ها را محاسبه کرد و پارامترهای طراحی سامانه چتری با لوله در سقف را برای مدل‌سازی تعیین نمود (Volkman et al., 2007). محل قرارگیری انحراف سنج‌های زنجیری در شکل (۲-۹) قابل مشاهده است.

۲-۶-۳ مشخصات سامانه چتری

سامانه چتری یکی از انواع سامانه‌های نگهداری تزریقی طولی است. قطر لوله‌های فلزی معمولاً بین ۶۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت آن بین ۴ تا ۸ میلی‌متر است. طول هر چتر، بسته به طول لوله‌های مورد استفاده، معمولاً ۱۲ تا ۱۵ متر است. طول گام‌های حفاری زیر چتر نیز معمولاً بین ۶ تا ۱۲ متر است که طول هم‌پوشانی چترها و کیفیت پایداری زمین، از عوامل اصلی تاثیرگذار بر تعیین این مهم

هستند. هنگام رسیدن به آخر گام حفاری، هنوز مقداری از لوله‌ها در سقف و جلوی جبهه کار وجود داشته که به آن طول همپوشانی می‌گویند (Volkman & Schubert, 2008).

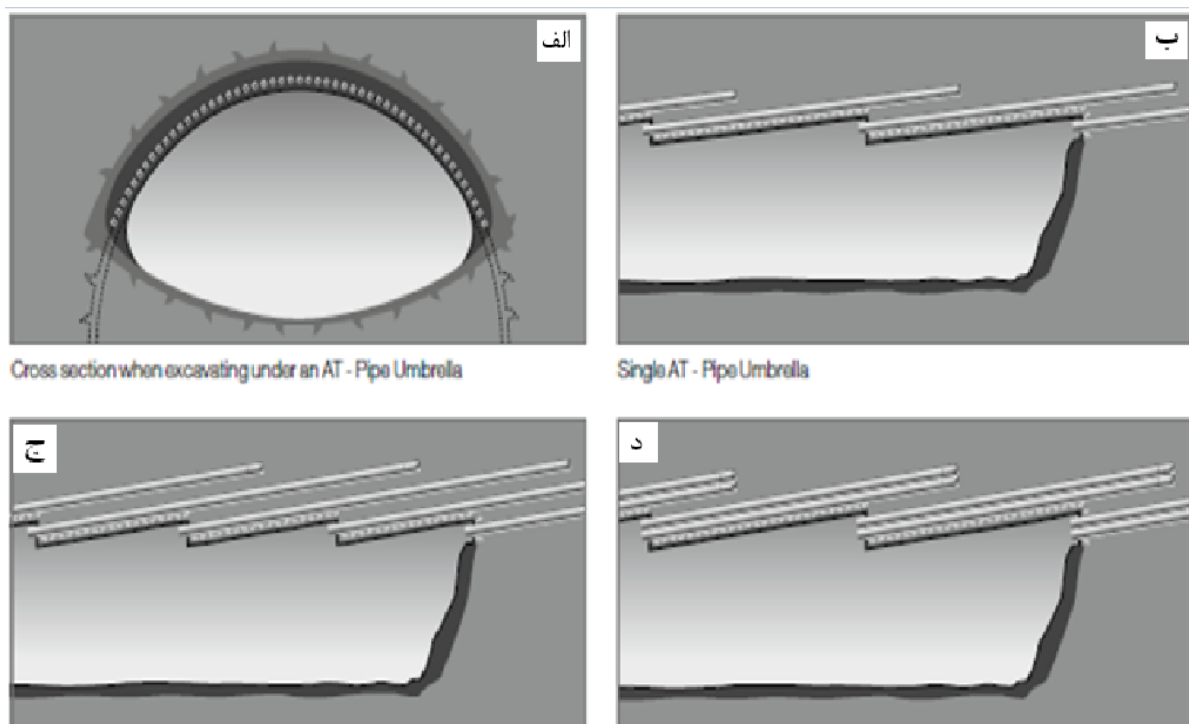
همانطور که پیش از این بیان شد، نصب گام بعدی سامانه‌های چتری، نیازمند گسترش ثابت هر گام است. انتهای هرگام پس از نصب و تزریق دوغاب، شاتکریت می‌شود و حلقه‌های شاتکریتی تشکیل می‌شوند. بعد از دو تا سه سیکل، انحراف سنج‌ها مقادیر کمتری از نشست را نشان می‌دهند. دلیل این اتفاق، تاق صلب ایجاد شده توسط شاتکریت است، که به عنوان یک پی برای اثر قوس‌زایی طولی در هنگام فرآیند انتقال تنش‌ها ایفای نقش می‌کند (Volkman & Schubert, 2007).



شکل ۲-۹: محل قرارگیری انحراف‌سنج‌های زنجیری (Volkman et al., 2006)

در مورد اثر نگهداری طولی می‌توان گفت سختی لوله‌ها نسبت به زمینی که نیازمند نصب لوله و تزریق دوغاب است خیلی بیشتر است. در نتیجه حرکت ثانویه زمین در طی حفاری باعث درگیری بیشتر مرحله‌ی دوم اثر نگهداری می‌شود. دو مزیت ازران بودن و سرعت در اجرای سامانه در دهه‌های اخیر، با وجود عدم در اختیار بودن فرمول‌های مشخص برای طراحی و اجرا، باعث مورد توجه قرار گرفتن این سامانه شده‌اند. با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری، اندازه‌گیری‌های مورد نظر از جمله نشست زمین و دیگر پارامترهای رفتاری مشخص شده و در محاسبات مربوط به مدل‌سازی عددی به کار می‌روند. نتایج محاسبات نشان می‌دهند که این سامانه نگهداری با انتقال بارهای شعاعی و طولی (که در اثر نیروهای جانبی و طولی به وجود آمده‌اند) به سامانه نگهداری، توانایی کنترل مناطق و شرایط بحرانی را دارد (Volkman & Schubert, 2007).

سامانه چتری را می‌توان بنا به شرایط پروژه، به صورت‌های مختلف اجرا کرد. همانطور که در شکل (۲-۱۰) دیده می‌شود، روش‌های اجرا متفاوت است. لوله‌های تکی با همپوشانی، لوله‌های تکی با دو همپوشانی و لوله‌های جفتی با یک همپوشانی از جمله روش‌های اجرای این سامانه است. در شرایط زمین سست و ناپایدار و برای کنترل نشست سطح زمین از لوله‌های تکی با یک همپوشانی شکل (۲-۱۰-ب) استفاده می‌شود. در صورت وجود آب و برای جلوگیری از ورود آب به داخل و یا جلوگیری از تماس آب با محیط کار، تونل نیازمند آب‌بندی است. برای مقاصد آب‌بندی، از لوله‌های تکی با دو همپوشانی شکل (۲-۱۰-ج) و در صورت وجود شرایط حاد، ناپایداری‌های زیاد و برای آب‌بندی از لوله‌های جفتی با همپوشانی شکل (۲-۱۰-د) استفاده می‌شود (Dywidag-systems international catalogue, 2013)



شکل ۲-۱۰: روش‌های قرارگیری لوله‌ها در سقف. الف) مقطع تونل و آرایش قرارگیری لوله‌ها ب) لوله‌های تک با یک همپوشانی ج) لوله‌های تک با دو همپوشانی د) لوله‌های جفت با یک همپوشانی (Dywidag-systems international catalogue, 2013).

۲-۷ ملزومات تحلیل و مدل‌سازی عددی سامانه چتری

با توجه به پیشرفت‌های دهه‌ی اخیر در فرآیند مدل‌سازی عددی، این امکان ایجاد شده است که بتوان اندرکنش‌های پیچیده‌ی بین زمین و سامانه نگهداری را دو بعدی و سه بعدی بررسی نمود.

البته این نوع تحلیل‌ها، به دلیل وقت‌گیر بودن و نیازمندی به وجود داده‌های واقعی و جامع در مورد تمامی خصوصیات زمین و سیستم‌های نگهداری، برای کارهای ساخت و ساز معمولی هنوز کمی پیچیده هستند. با استناد به کارهای انجام شده توسط محققان و مطالعات جدید انجام شده توسط اوک و همکاران (۲۰۱۴) بر روی تونل دریسکس^۱ در یونان و متروی استانبول، مطالعات اهمیت تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌های عددی را بر ساده‌سازی و درک تاثیر پارامترهای طراحی ذکر شده در قسمت‌های پیشین، بر روی اجزای سامانه پیش‌تحکیم لوله‌گذاری در فاز طراحی نشان می‌دهد. به علاوه این مطالعه نشان دهنده پیچیدگی اندرکنش زمین و سامانه نگهداری، هنگام استفاده از نرم افزارهای المان محدود دو بعدی در منطقه‌ی تقویت شده‌ی همگن^۲ و نرم افزارهای تفاضل محدود سه بعدی با مولفه ساختاری، بوده است. همچنین این مطالعه نشانگر بهینه‌سازی زنجیره‌ای دو پارامتر طراحی (فاصله‌گذاری و همپوشانی) با استفاده از مدل‌سازی عددی بوده است (Oke et al., 2014).

۲-۸ پارامترهای طراحی

پارامترهای طراحی سامانه چتری در شکل (۲-۱۱) با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. شکل (۲-۱۱-الف) طول لوله‌های سامانه^۳ (L_{fp}) و طول همپوشانی (L_{fpo}) را نمایش می‌دهد. جزء L_{fp} به علت وجود عوامل زیادی که ژئومکانیکی نبوده و بسیار موثر بر این المان است، توسط روش‌های عددی بهینه نمی‌شود. L_{fp} به ملاحظات اقتصادی، دقت حفاری، قابلیت دسترسی وسایل و قابلیت حفاری با توجه به شرایط زمین وابسته است. L_{fpo} را با استفاده از نرم افزارهای عددی می‌توان بهینه کرد. برای اطمینان از پایداری سامانه و واکنش زمین، مانند آنچه در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است، نیاز به همپوشانی وجود دارد. بنابراین برای موثر بودن در جهت طولی، لوله‌های سامانه نیازمند داشتن فاصله‌ی کافی از منطقه‌ی آشفته است. این عمل باعث اطمینان از به وجود آمدن تاقی در اطراف تونل برای انتقال تنش‌ها

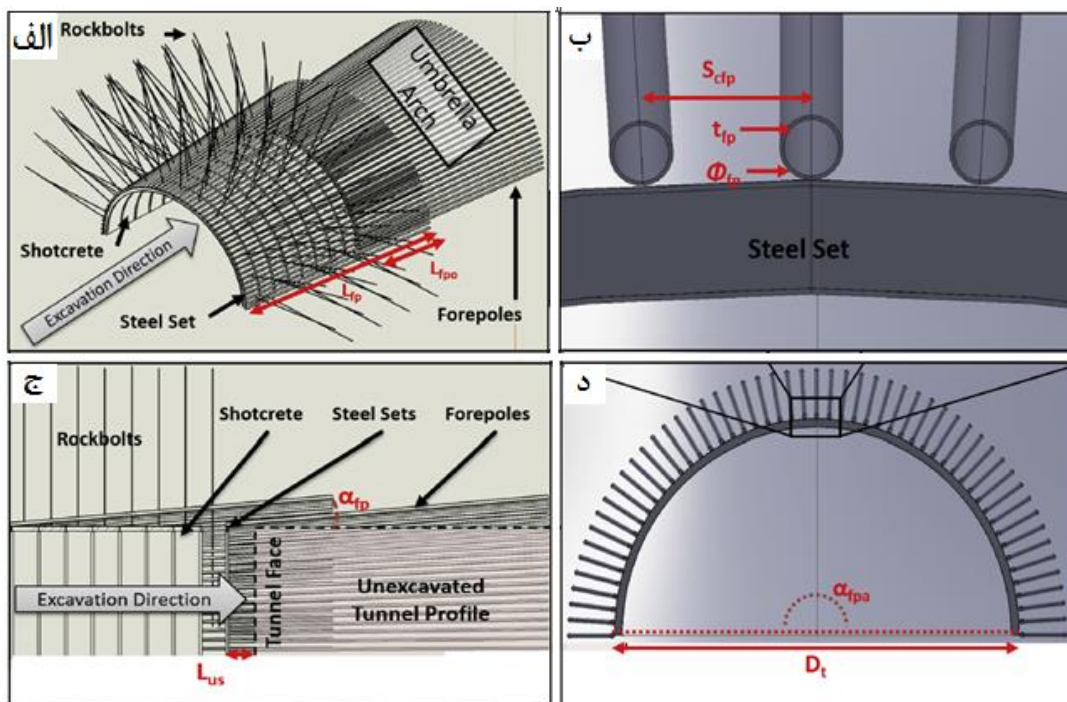
^۱ Driskos

^۲ Homogenous Reinforced Region

^۳ Forepole element

از جبهه کار به سامانه نگهداری و زمین پایدار (در جلوی تونل) مانند شکل (۲-۱۳-ب) می‌شود (Oke et al., 2014).

شکل (۲-۱۱-ب) نشان دهنده‌ی فاصله مرکز به مرکز لوله‌های سامانه (S_{cfp})، ضخامت لوله‌های سامانه (t_{fp}) و قطر بیرونی لوله‌های سامانه (Φ_{fp}) است. حداکثر S_{cfp} توسط نیاز به وجود اثر قوس‌زایی مانند شکل (۲-۱۱-الف) تعریف می‌شود (Volkman and Schubert, 2007). اثر قوس‌زایی محلی (ساخته شدن قوس بین دو لوله از سامانه) از مدل‌های عددی مانند شکل (۲-۱۳) قابل حصول است. قطر لوله‌های سامانه با دو عامل قطر جداره (t_{fp}) و قطر بیرونی لوله (Φ_{fp}) تعریف می‌شود. این پارامترها صلبیت^۱ لوله‌ها را مانند منطقه‌ی بارگذاری توصیف می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی می‌تواند در مشخص کردن طول بهینه‌ی لوله‌های سامانه درون آرایش چتری، موثر باشد.



شکل ۲-۱۱: لایه‌های ساختاری سامانه نگهداری موقت سامانه‌ی چتری به همراه اجزاء لوله گذاری، متن‌ها و پیکان‌های قرمز نمایانگر ابعاد کلیدی طراحی هستند. الف) نمایی از لایه‌ی دارای نگهداری‌های مایل، ب) نمای نزدیک شکل د. ج) نمای طولی از لایه نگهداری. د) نمای مقطع عرضی (Oke et al, 2014).

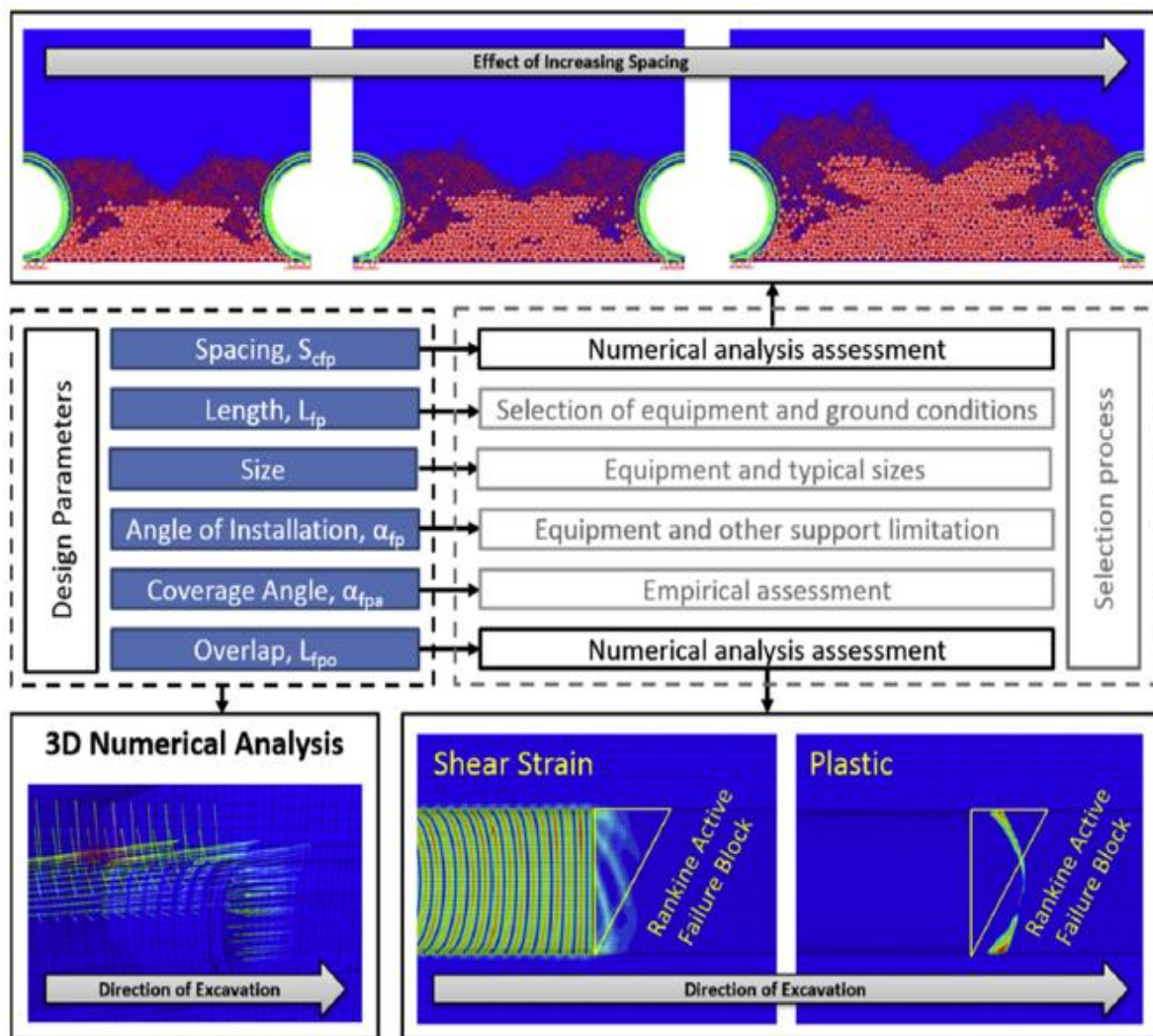
^۱ Stiffness

شکل (۲-۱۱-ج) نشانگر زاویه‌ی استقرار (α_{fp}) لوله‌های سامانه و طول منطقه‌ی بدون نگهداری (L_{us}) است. زاویه (α_{fp}) برای میله‌های استفاده شده^۱ در سامانه چتری می‌تواند بین ۵ تا ۴۰ درجه باشد، زیرا برای قفل کردن جزء ساختاری یا اطمینان از ضخامت تزریق اطراف حفریه طراحی شده است. برای لوله‌های سامانه (α_{fp}) توسط دیگر عوامل نگهداری موقت (ضخامت شاتکریت و نگهداری فلزی) تعریف می‌شود تا به این زاویه اجازه داده شود که به کمترین مقدار خود برسد. لازم بذکر است که سامانه‌ی چتری لوله گذاری و انواع دیگر سامانه‌های چتری به صورت تنها بکار نرفته و به صورت ترکیبی با دیگر سامانه‌ها استفاده می‌شود (Oke et al., 2014).

شکل (۲-۱۱-د) معرف زاویه‌ی پوشش تاج توسط لوله‌ها (α_{fpa}) است. قطر تونل (D_t) یکی از پارامترهای طراحی بوده که فرق بین سامانه‌ی لوله گذاری و سامانه‌ی میله گذاری را مشخص می‌کند. عامل اصلی تعیین زاویه‌ی (α_{fpa}) مکانیزم شکست سامانه بوده و تاثیر این عامل بیشتر از تاثیر پاسخ‌گویی مکانیکی سامانه است. برای گسیختگی‌های ناشی از وزن، لوله‌های سامانه‌ی لوله گذاری، تنها نیازمند یک زاویه‌ی پوشش تاج توسط لوله‌ها (α_{fpa}) در اطراف تاج تونل (تقریباً ۱۲۰ درجه) در قسمت جبهه کار به منظور حفاظت از کارگران در حال کار زیر آن و جلوگیری از ریزش‌های احتمالی در آن قسمت می‌باشد. برای گسیختگی‌های ناشی از فرونشست مرسوم است که با زاویه‌ی پوشش ۱۸۰ درجه در بالای جبهه کار این عمل انجام شود (مانند شکل (۲-۱۱-د)). سانگ و همکاران (۲۰۱۳) به طور مشابه گزارش کرده‌اند که زاویه ۱۲۰ درجه برای سنگ هوازده و ۱۸۰ درجه برای خاک، مقداری بهینه است. در شرایط زمین مچاله شونده، هوک (۲۰۰۱) آبیان کرد که با افزایش شدت مچاله شوندگی از شدید به بسیار شدید، این زاویه از ۱۲۰ تا ۱۸۰ تغییر خواهد کرد (Oke et al., 2014).

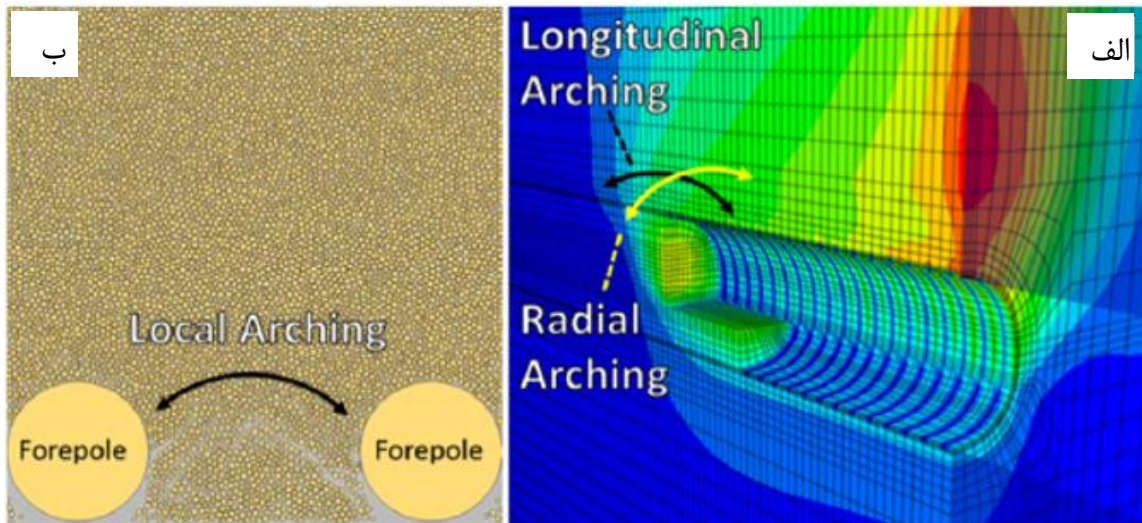
^۱ Spiles

^۲ Hoek



شکل ۲-۱۲: کاربرد تحلیل‌های عددی برای پارامترهای طراحی نشان داده شده در شکل ۲-۱۱ و پاسخگویی کلی روش لوله گذاری چتری (Schumscher, 2012).

ولکمن و همکاران (۲۰۰۶) آزمایش‌های برجا، آزمایشگاهی و عددی مختلفی روی سامانه‌ی چتری و طول لوله‌ها انجام دادند. در نتیجه‌ی این آزمایش‌ها امکان مقایسه‌ی هزینه، اندازه، طول لوله‌ها (L_{fp})، تاثیر اندازه‌گیری‌های برجا، نیروهای اندرکنشی، طول همپوشانی لوله‌ها و روش‌های نصب سامانه‌ی لوله گذاری، فراهم شد. ولکمن و همکاران ۲۰۰۶ در مورد پاسخگویی سامانه‌ی نگهداری، که منفعل است یا فعال، اظهار داشتند که با جابجایی‌های زمین، سامانه‌ی نگهداری فعال می‌شود. در مواردی که قطر بیرونی لوله‌ها و ضخامت جداره (t_{fp} و ϕ_{fp}) کمتر باشد، جابجایی‌های کمتری برای فعال سازی سامانه نگهداری نیاز است. تحلیل‌های ولکمن و شوبرت ۲۰۰۶، گسیختگی قوس‌زایی محلی را که ممکن است



شکل ۲-۱۳: نمایش دادن قوس‌زایی. الف) قوس‌زایی طولی و شعاعی (Schumscher, 2012). ب) قوس‌زایی محلی (اصلاح شده بر پایه‌ی Doi et al. (2009).

به علت افزایش فاصله‌ی بین لوله‌ها باشد، در نظر گرفته شده است. نتایج ولکمن و شوبرت ۲۰۰۶a و دستورالعمل (FHA 2009) باعث شد که مراحل طراحی که به طور مستقیم بر پاسخگویی محلی و کلی سامانه تاثیرگذار است، اهمیت بیشتری یابد (Volkman & Schubert, 2007).

تحلیل‌های عددی و تحلیلی توسط سانگ و همکاران (۲۰۱۳) بر روی سامانه نگهداری چتری تقویت شده با لوله‌های فلزی دارای قطر زیاد انجام گرفته است که پارامترهای آن در جدول (۱-۲) آمده است. تمام بررسی‌ها با ضرایب ایمنی خمشی (FOS_b) و برشی (FOS_s) مقایسه شده است. لازم به ذکر است نگهداری‌های دیگر بکار رفته در این مدل عددی تغییر نیافته‌اند (مثلاً ضخامت شاتکریت ثابت بوده است) و اثر گسیختگی برای سنجیدن این مساله در قسمت‌های بعدی توضیح داده شده است.

از تحلیل‌های پارامتری انجام شده توسط سانگ و همکاران (۲۰۱۳) نتایج زیر بدست آمده است جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از پارامترهای عددی مورد تحقیق (Song et al., 2013).

سوابق تحقیقاتی تحلیل‌های عددی	جنس زمین	(m) رو باره	ضریب فشار جانبی زمین coefficient, K_0	زاویه نصب α_{pa} (°)	قطر ϕ_{fp}	ضخامت t_{fp}	S_{fp} فاصله مرکز به مرکز
Volkman and Schubert (2006a)	-	-	-	-	در مقایسه با ۲۰ لوله ۱۳۹,۷*۸,۰ میلی‌متر، ۳۰ لوله ۱۱۴,۳*۶,۳ میلی‌متر همان تاثیر را می‌گذارد.	-	-
Song et al. (2013)	-	10-40	0.4-0.6	20-180	60-114.3 mm	-	40-60 cm
Kim et al. (2005)	Weathered soil - weathered rock	(0.5-3.0) D_t	-	-	-	-	-

۱. با افزایش FOS_s ، ϕ_{fp} و FOS_b افزایش می‌یابد.

۲. با افزایش روباره، FOS_s و FOS_b کاهش یافته و همگرا می‌شوند.

۳. با افزایش S_{cfp} از ۴۰ به ۶۰ سانتی‌متر، FOS_s و FOS_b کاهش می‌یابند.

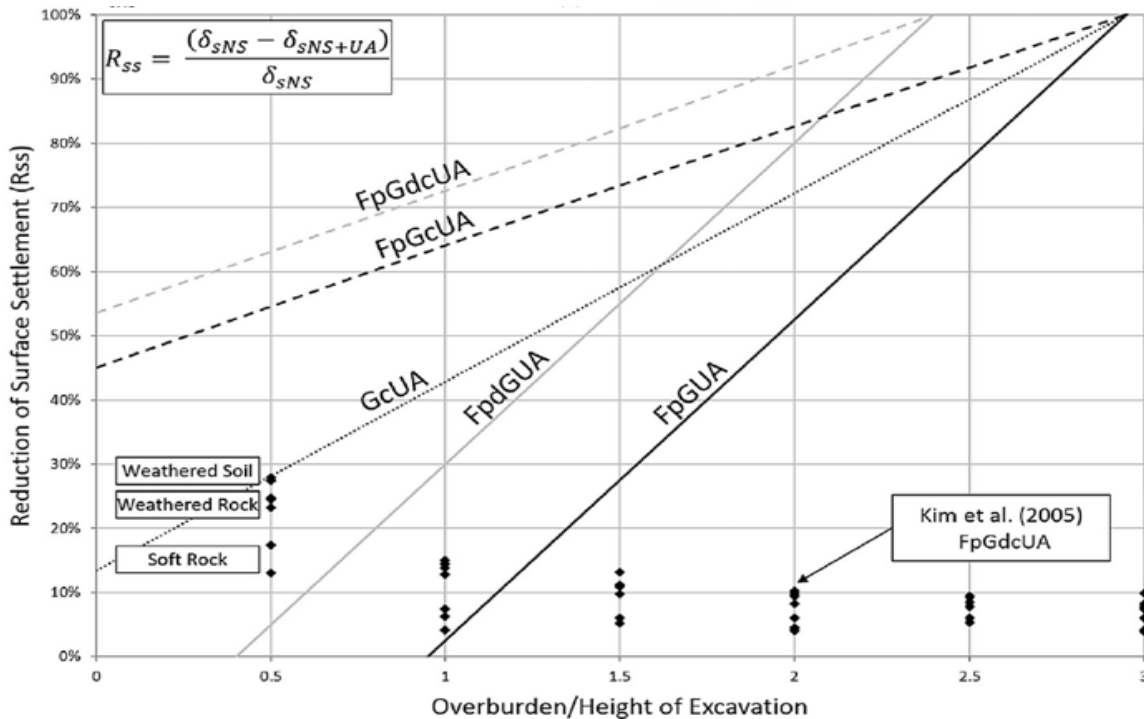
۴. با کاهش مدول یانگ زمین، FOS_s و FOS_b هم کاهش می‌یابند. به طور کلی FOS_b حساسیت

بیشتری نسبت به FOS_s دارد.

FOSها با استفاده از داده‌های خروجی در نرم‌افزارهای متفاوت مانند SAP بدست می‌آیند، به این صورت که مقاومت‌های برشی و خمشی در هر مرحله استخراج شده و در نرم‌افزار ذکر شده، پوش منحنی رسم می‌شود که همان مقدار مورد نظر است.

مشاهدات سانگ و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهند که برای اندازه‌گیری پایداری لوله‌های سامانه، ضریب ایمنی خمشی (FOS_b) باید به عنوان شاخص اصلی در نظر گرفته شود (Song et al., 2013). کیم و همکاران (۲۰۰۵) مطالعاتی عددی بر روی تاثیر سامانه چتری وقتی که لوله‌های سامانه درون ناحیه‌ی تزریق شده پیرامون فضای حفاری شده به کار گرفته می‌شوند، انجام داده‌اند. پارامترهای استفاده شده در این مطالعه، همان پارامترهای ذکر شده در جدول ۲-۱ بوده است. لوله‌های استفاده شده در این مطالعه دارای قطر بیرونی ۰٫۸، ۶۰ میلی‌متر، ضخامت جداره‌ی ۳ میلی‌متر و طول ۱۲ متر بوده‌اند. لوله‌ها با فاصله‌داری (S_{cfp}) برابر با ۰٫۴ میلی‌متر و طول هم‌پوشانی (L_{fpo}) برابر با ۶ متر نصب شده و زاویه‌ی پوشش اطراف تاج (α_{fp}) سامانه چتری برابر با ۱۲۰ درجه بوده است. شبیه‌سازی دوغاب تزریق شده با دو برابر کردن مدول تغییر شکل‌پذیری زمین انجام گرفته است. نتایج کار آنها نشان داد که استفاده از سامانه‌ی چتری تاثیر بسیاری بر کاهش و کنترل نشست‌های سطحی و جابجایی‌های قائم تاج تونل در زمین‌های ضعیف‌تر دارد. این کاهش و کنترل در مقایسه با نمونه‌هایی که از این سامانه بهره نگرفته‌اند، (اما نگهداری‌های دیگر اعمال شده است) به صورتی قابل توجه، مشهود است (شکل ۲-۲). (Kim et al., 2005) ((۱۴

در طی تحلیل‌های برگشتی، این نتیجه حاصل شده‌است که پیش‌بینی جابجایی سطح و تاج تونل امکان‌پذیر است. اما نتایج آنها در تایید نمودار کاهش نشست سطحی بدست آمده در جدول انتخاب سامانه چتری مناسب^۱ تجربی (به نقل از اوک و همکاران (۲۰۱۴a))، که در شکل (۲-۱۴) آمده است، منطبق نبوده است. انجام مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده توسط کیم و همکاران (۲۰۰۵) و



شکل ۲-۱۴: نمودار کاهش نشست سطحی برگرفته از UASC (Oke et al 2014). علامت‌های الماسی مشکی مشخص شده در شکل، نتایج اقتباس شده از (Kim et al., 2005) هستند. FpGUA=سامانه‌ی چتری لوله گذاری با تزریق. FpdGUA=سامانه‌ی چتری لوله گذاری با لوله گذاری با لوله‌های دوبل و تزریق. FpGcUA=سامانه‌ی چتری لوله گذاری با تزریق پیوسته. FpGdcUA=سامانه‌ی چتری لوله گذاری دوبل با تزریق پیوسته. GcUA=سامانه‌ی چتری تزریقی پیوسته (Oke et al, 2013a).

نمودار کاهش نشست سطح بیان شده توسط اوک و همکاران (۲۰۱۴a) نشان دهنده‌ی دو عامل مهم است. اول آن که تحلیل پارامتری با مدل‌سازی عددی باید به یک مطالعه‌ی موردی واسنجی^۲ شود تا صحت آن مورد سنجش قرار گیرد و دوم این که، ثابت شده است که مدل‌سازی عددی سامانه چتری امری است چالش برانگیز که علت آن پیچیدگی این سامانه است (Oke et al., 2014a).

^۱ UASC

^۲ Calibrate

۲-۹ استاندارد سازی نام سامانه‌های چتری

اوک و همکاران (۲۰۱۳) طبقه بندی روش‌های پیش‌تحکیم را به صورت استاندارد ضروری دانسته‌اند و در طی مقاله‌ای طبقه بندی خود را ارایه نموده‌اند. آنها از عبارت "سامانه چتری" برای توصیف سامانه پیش‌تحکیم که در طی آن از ابتدای عملیات حفاری تا قی از بتن فضای حفر شده را در بر می‌گیرد استفاده کرده‌اند. همانطوری که پیش‌تر گفته شد، سامانه‌ی چتری، جبهه کار و سنگ دربرگیرنده را با انتقال بار به صورت طولی در قالب اندرکنش زمین و سامانه نگهداری، محافظت و نگهداری می‌کند. سامانه چتری در سه دسته طبقه‌بندی می‌شود. طبقه‌بندی وابسته به اجزای نگهداری استفاده شده است.

این اجزا عبارتند از:

- میله‌ها^۱
- لوله‌ها^۲
- تزریق‌ها^۳

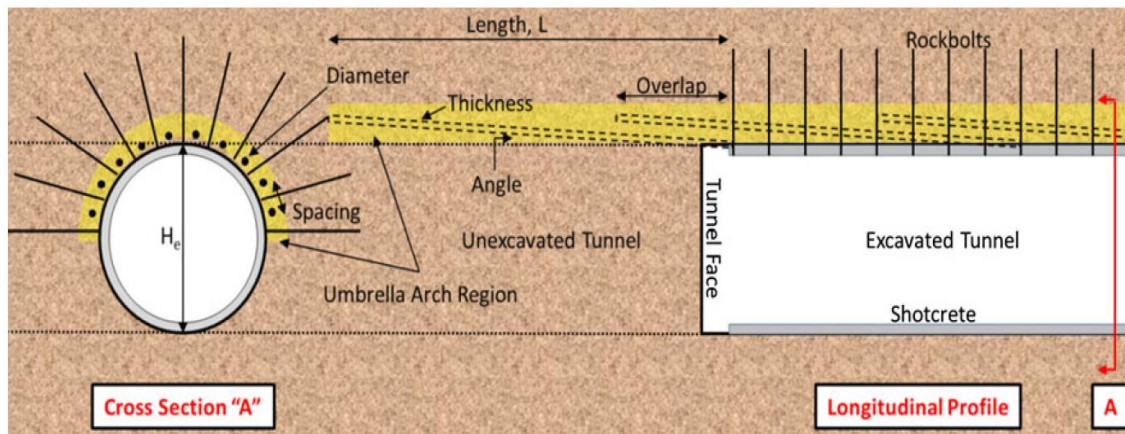
این طبقه‌بندی، خود قابل تقسیم‌بندی به ۱۱ زیرگروه، بنا به مقدار دوغاب استفاده شده است. زیر طبقه‌ها طبق اولویت استفاده در سامانه چتری برپایه‌ی تجربیات و تحقیقات کامل و جامع اوک و همکاران (۲۰۱۴)، شامل انتشارات و گزارش‌های دسته بندی شده‌اند. علاوه بر این، در این مطالعه از طریق بکارگیری جداول طراحی موجود و شواهد تجربی، روشی برای انتخاب به صورت کمی، بنام "جدول انتخاب سامانه چتری" معرفی شده است.

^۱ Spiles

^۲ Forepoles

^۳ Grout

بسته به شرایط زمینی که در آن حفاری می‌شود ممکن است سامانه‌های مختلفی نیاز باشد. در بعضی از مواقع انتخاب سامانه‌های کمکی هم لازم خواهد بود. پیش‌تحکیم به دو روش اصلی تقسیم می‌شود، نگهداری جبهه کار و نگهداری اضافه شده به اطراف تاج در بالای جبهه کار (شکل (۲-۱۵) قسمت زرد رنگ).



شکل ۲-۱۵: پارامترهای طراحی سامانه‌ی چتری، که در اینجا سامانه‌ی چتری با لوله‌های محصور نشان داده شده است. قسمت‌های زرد رنگ محل قرارگیری سامانه‌ی چتری است. پیش‌تحکیم‌های دیگر قبل از حفر جبهه‌کار نصب شده‌اند. H_e ارتفاع فضای حفاری می‌باشد که در شکل نشان داده شده است (Oke et al., 2014).

همانطور که قبلاً بیان شد، برای این طبقه بندی‌ها نام‌گذاری استاندارد، با توجه به استفاده‌ی مناسب اجزا به عنوان قسمتی از سامانه چتری (UA)، برای توصیف دقیق گسیختگی زمین‌شناسی مورد نظر نیاز است. این فرایند استاندارد سازی به کنترل استفاده‌ی درست از نام اجزا و پرهیز از مغایرت‌ها در سامانه چتری کمک خواهد کرد. سامانه چتری اغلب با روش‌های سنتی ترکیب می‌شود. اما موارد استفاده از آن به روش‌های سنتی محدود نبوده و در کنار ماشین‌های حفار تمام مقطع هم از آن استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این استفاده، حفاری بخشی از تونل انتقال آب نیاگارا است به وسیله‌ی ماشین حفار تمام مقطع باز^۱ است. مولفه‌های نگهداری بر طبق خصوصیات فیزیکی خود به چند زیر گروه تقسیم می‌شوند (Oke et al., 2014).

^۱ Open TBM

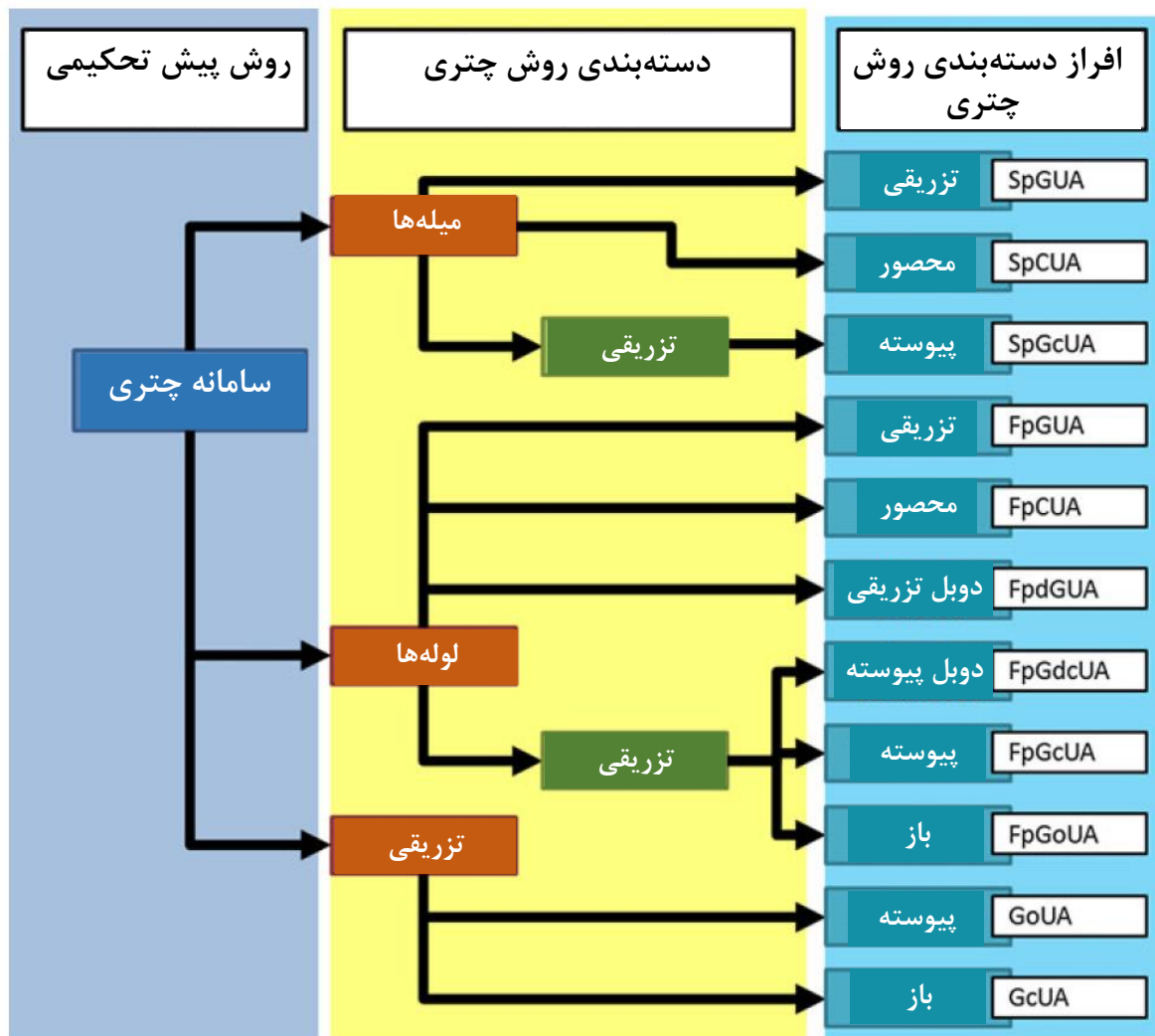
- Sp میله‌های فلزی که به صورت طولی نصب شده و طوشان کمتر از قطر تونل (H_e) است؛
- Fp لوله‌های فلزی که به صورت طولی نصب شده و طوشان بیشتر از قطر تونل (H_e) است و
- تزریقی‌ها (G)، که فقط دوغاب درون لوله‌ها تزریق شده و به صورت ترکیبی با موارد بالا نیز استفاده می‌شوند.

تفاوت اصلی بین سامانه‌های چتری با میله (Sp)، سامانه‌ی چتری با لوله (Fp) و سامانه‌های چتری تزریقی در تغییرات شرایط به دلیل دشواری اجرا، هزینه‌ها و التزام زمان برای نصب آنها در بازه‌ی کارایی آنها است (Tuncdemir et al., 2012) و (Volkman & Schbert, 2007).

شکل (۲-۱۶) نمایی از زیر گروه‌های سامانه چتری و بازه مربوط به عوامل طراحی آنها است (با توجه به مطالعات کتابخانه‌ای و مرور ادبیاتی گسترده) که توضیحات مربوط به آن در ادامه آمده است. در جدول (۲-۲) تعداد مقالات و انتشارات مربوط به مطالعات موردی هر زیر گروه در پراکنش آمده است و میزان استفاده از هر روش بنا به جدول معلوم می‌شود (Oke et al., 2014a).

شکل (۲-۱۶) نشان دهنده‌ی شیوه‌ی دسته‌بندی سامانه‌ی چتری به زیر گروه‌های این سامانه است. برای درک روند کار جدول، بهتر است ابتدا با اختصارات آن آشنا شویم. (Fp) به معنی استفاده از لوله‌ها برای سامانه بوده، (Sp) نشانگر استفاده از میله‌ها درون سامانه و G نشان دهنده‌ی تزریق دوغاب است. با توجه به این که لوله‌ها و میله‌ها می‌توانند به دو روش گیردار شدن درون چال به صورت محصور شوندگی، به دلیل همگرایی چال، و استفاده از تزریق دوغاب برای گیرداری درون زمین قرار گیرند، از دو حرف (C) و (G) به ترتیب برای نمایش دادن گیرداری ناشی از محصور شدگی و گیرداری توسط تزریق دوغاب استفاده شده است. همچنین در قسمت انتهایی اختصارات، از دو حرف (o) و (c) استفاده شده که به ترتیب نشانگر تزریق باز و تزریق پیوسته است. تزریق باز حالتی است که چال تزریق می‌شود و اتصال دوغاب بین لوله‌ها برقرار نمی‌شود، تزریق پیوسته حالتی است که دوغاب تزریق شده به هم اتصال پیدا کرده و یک پوسته‌ی پیوسته در قسمت تزریق شده، به وجود می‌آید. با توجه به مطاب بیان

شده، اختصارات درون شکل به این صورت تشریح می‌شوند: (SpGUA) سامانه‌ی چتری با میله و تزریق، (SpCUA) سامانه‌ی چتری با میله‌های محصور، (SpGcUA) سامانه‌ی چتری با لوله و تزریق پیوسته، (FpCUA) سامانه‌ی چتری با لوله‌های محصور، (FpGUA) سامانه‌ی چتری با لوله‌ها و تزریق، (FpdGUA) سامانه‌ی چتری با لوله‌های دوبل و دوغاب، (FpGoUA) سامانه‌ی چتری با لوله‌ها و تزریق باز، (FpGcUA) سامانه‌ی چتری با لوله‌ها و تزریق پیوسته، (FpGdcUA) سامانه‌ی چتری با لوله‌های دوبل و تزریق پیوسته، (GoUA) سامانه‌ی چتری با تزریق باز، (GcUA) سامانه‌ی چتری با تزریق پیوسته (Oke et al., 2014a).



شکل ۲-۱۶: نمایی از نامگذاری سامانه‌های پیش‌تحکیم چتری (Oke et al., 2014a).

جدول ۲-۳. تقسیمات سامانه سامانه چتری و بازوی پارامترهای طراحی مربوطه (Oke et al., 2014a).

	Umbrella Arch (141)				Forepole (56)				Groat (15)		
	Spile (31)		Groat(1)		FpGUA (1)		FpGUA (2)		Groat(9)		
	SpCUA (4)	SpGUA (14)	SpGUA(1)	FpCUA (1)	FpGUA (23)	FpMGUA (2)	FpGoUA(1)	FpGoUA (2)	FpGoUA (6)	GoUA (6)	GoUA (6)
<i>Range of Umbrella Arch design criteria</i>											
Length	<H _c	<H _c	<H _c	>H _c	>H _c	>H _c	>H _c	>H _c	>H _c	>H _c	>H _c
Angle (°)	5-16	5-10	10-20	73-5	3-8	~3	?	~5	~11	?	6-11
Overlap (m)	1-4.5	1-6	2-3	<L/2	<L/2	>L/2	<L/2	<L/2	>L/2	?	1-3
Spacing center-to-center (cm)	20-50	25-50	60-100	35-60	30-60	30-30.5	~50	50-60	40-76	?	40-45
Diameter (mm)	25-50.8	25-101.6	~27.5	~114.3	50-325	101.6-114	~114 (*?)	114.3	89-168.3	?	*500-970
Groat penetration	NA	~1	~80	NA	0.20-1	0.21-0.41	?	?	(>spacing-800)	?	35-50
Groat Pressure (MPa)	NA	~1	~80	NA	0.20-1	0.21-0.41	?	?	40	?	35-50
<i>Range of geological consideration</i>											
Overburden	(1.35-6.67)H _c	(0.31-7.63)H _c	?	(~2.15)H _c	(0.45-30)H _c	(0.36-2.86)H _c	(~2.53)H _c	(0.52-2.87)H _c	(0.36-7.50)H _c	?	(0.59-3.5)H _c
GSI	25	20-35	20-35	?	20-45	20-35	RQD	?	?	?	?
Cohesion (kPa)	7.5-70	7.5-200	?	?	0-500	~80	?	~15	0-50	?	0-20
Internal friction angle (°)	21-27	24-33	?	?	20-36	(residual ~30)	?	30	20-37	?	30-40
Water table [distance from top of crown] (m)	?	18-0 m	~>11 m	?	~6 to ~4 m	?	12.7-21.7	16.5-21	Below invert to ?high?	?	-3 to?
Permeability (cm/s)	?	?	1.3-1.7 × 10 ⁻⁵	?	1.0 × 10 ⁻⁵ -2.9 × 10 ⁻⁵	?	?	1.0 × 10 ⁻² -2.9 × 10 ⁻³	?	?	?

۲-۱۰ دسته‌بندی سامانه چتری

در این بخش، برای دسته‌بندی کردن این سامانه، مجدداً توضیح مختصری درباره‌ی اجزای سامانه داده شده است. با شناخت اجزای سامانه چتری می‌توان برای جلوگیری از اشتباهات و همچنین سهولت در انتخاب سامانه چتری مورد نظر، یک نظام دسته‌بندی ارائه کرد. این اجزا عبارتند از:

- میله‌ای‌ها
- لوله‌ای‌ها
- تزریقی‌ها

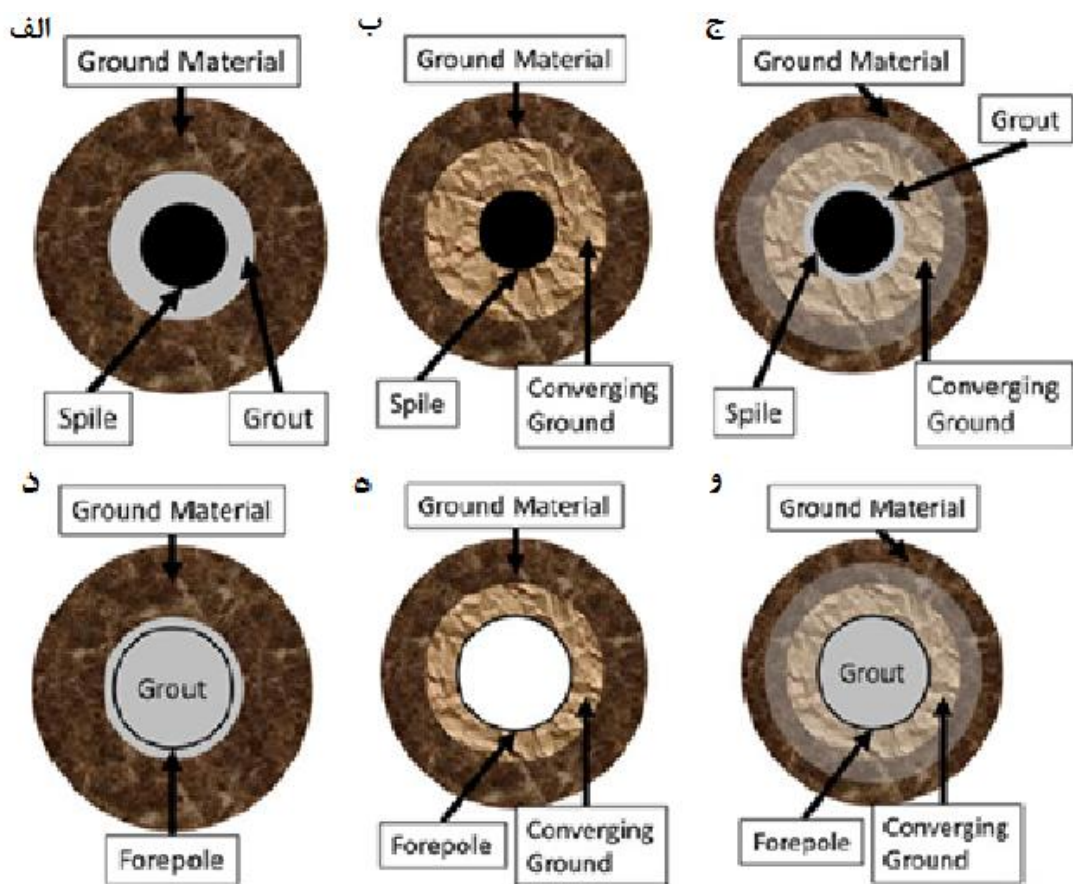
۲-۱۱-۱ میله‌ای‌ها

میله‌ای‌ها در طبقه‌ی نگهداری طولی با طول کمتر از ارتفاع تونل (H_e) قرار می‌گیرند. اغلب زمانی نصب می‌شوند که زمین‌شناسی منطقه توانایی جلوگیری از بخشی از ریزش‌ها را داشته باشد (Volkman et al., 2006). به علاوه میله‌ها با زاویه‌ی متغیر بین ۵ تا ۴۰ درجه نسبت به صفحه‌ی افقی در برگیرنده‌ی محور طولی برای دستیابی به کنترل ساختار مناسب نصب می‌شوند. توصیه می‌شود که فاصله‌ی مرکز به مرکز میله‌ها کمتر از ۳۰ سانتی‌متر باشد. میزان هم‌پوشانی میله‌ها بستگی به ظرفیت مشکلات توده سنگ در پروفیل مربوط دارد. معمولاً این هم‌پوشانی در حدود نصف طول میله‌ها است با این حال بین ۱/۳ تا ۲/۳ هم استفاده می‌شود. در مناطقی که تنش‌های محصور کننده کم هستند، استفاده از لوله‌های سوراخ‌دار یا بدون سوراخ برای تزریق و محکم کردن میله‌ها راحت‌تر است که این روش را سامانه‌ی چتری میله گذاری تزریقی می‌نامند^۱. اما در مناطقی که تنش زیاد بوده و چال‌ها به خودی خود همگرا می‌شوند، ممکن است نیاز به تزریق نباشد که با این روش چتری با میله‌های محصور شده^۲ می‌گویند. از این روش در پروژه تونل‌سازی نیاگارا استفاده شده است. وقتی که اندازه‌ی ذرات

^۱ SpGUA (Spile Grouted Umbrella Arch)

^۲ SpCUA (Spile Confined Umbrella Arch)

زمین بزرگتر از شن است و زمین نیازمند بهسازی است، Sp (یا Fp) را می‌توان برای تزریق دوغاب به داخل زمین استفاده کرد. در شکل (۲-۱۷-الف تا ج) استفاده‌های مختلف بسته به شرایط زمین قابل مشاهده است. این حالات شامل: الف- SpGUA دوغاب فقط فضای بین میله‌ها و زمین را پر می‌کند؛ ب- SpCUA، میله‌ها توسط همگرایی زمین در جای خود قفل می‌شود؛ ج- SpGcUA، نفوذ دوغاب به داخل سنگ باعث ایجاد تماس و ارتباط دادن دوغاب تزریقی چال‌های دیگر می‌شود.



شکل ۲-۱۷: تقسیم بندی میله‌ای‌ها و لوله‌ای‌ها در سامانه چتری (Oke et al., 2014a).

۲-۱۰-۲ لوله‌ای‌ها

زمانی که درصد زیادی از منطقه‌ی اجرایی ضعیف و یا دارای شرایط پیچیده‌ی زمین‌شناسی باشد و ظرفیت رخ دادن ریزش‌ها زیاد باشد و زمین‌شناسی شرایط ریزش را فراهم کند، از لوله‌ای‌ها استفاده می‌شود. همانطور که قبلاً بیان شد، لوله‌ها (Fp) قطر بزرگتری نسبت به میله‌ها (Sp) داشته و طول آن‌ها بیشتر از ارتفاع فضای حفاری است. پایداری دیواره‌ی تونل زمانی تامین می‌شود که طول

لوله‌ها به اندازه‌ای باشند که از خط شکست رانکین^۱ عبور کنند، مانند شکل (۲-۱۸). این طول طراحی عموماً مطابق مطالعات انجام گرفته توسط وانگ^۲ (۲۰۱۲)، فنگ و همکاران^۳ (۲۰۱۲) و ویتکه و همکاران^۴ (۲۰۰۶) است. یکی دیگر از ملاحظات برای طول لوله‌ها، عبور از منطقه‌ی پلاستیک پیرامون و جلوی جبهه کار تونل درون سنگ‌های ضعیف منطقه مانند آنچه ولاکوپولس و دیدریک^۵ (۲۰۰۹) نشان دادند، است. به علاوه، زاویه‌ی نصب بین ۳ تا ۸ درجه از افق در صفحه‌ی دربرگیرنده‌ی محور طولی است. فاصله‌ی مرکز به مرکز Fp در بازه‌ی ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر است، اگرچه، فاصله‌داری با ملزومات به وجود آمدن اثر قوس‌زدگی^۶ (ساخته شدن قوس) بین دو دسته از لوله‌های جایگذاری شده تعیین می‌شود (اثر همپوشانی اجزای نگهداری). همچنین اثر قوس‌زدگی با اندازه‌ی لوله‌ها (Fp) هم تعریف شده که دارای قطر بین ۶۰ تا ۱۶۸/۳ میلی‌متر و ضخامت دیواره‌ی ۵ تا ۱۰ میلی‌متر است. طول همپوشانی بین ۰ تا ۰/۵ طول هر لوله است. بازه اغلب وابسته به استفاده از روش‌های مضاعف پیش‌تحکیم مانند میل‌هارهای جبهه کار^۷ است. اگر طول همپوشانی بیشتر نصف لوله‌ها باشد، به آن لوله گذاری دوگانه می‌گویند، یعنی همیشه دو لایه نگهداری بین دیوار تونل و سنگ در برگیرنده وجود دارد. انواع استفاده‌ی لوله‌ها با توجه به دوغاب تزریقی در شکل (۲-۱۷-د) تا شکل (۲-۱۷-و) آمده است. لوله‌ها (Fp) بسته به مقدار محصورشدگی در سنگ می‌تواند بدون دوغاب نصب شود FpCUA-شکل (۲-۱۷-د). در صورت لزوم کنترل همگرایی چال‌ها، می‌توان برای افزایش سختی، درون آنرا با دوغاب پر کرد FpGUA-شکل (۲-۱۷-ه). اگر نیاز به تحکیم مازاد سامانه و یا ورود آب به داخل مطرح باشد، می‌توان از دوغاب برای تقویت خواص محیط استفاده کرد (FpGoUA-FpGcUA-شکل (۲-۱۷-و)).

^۱ Rankin Failure Line

^۲ Wang, 2012

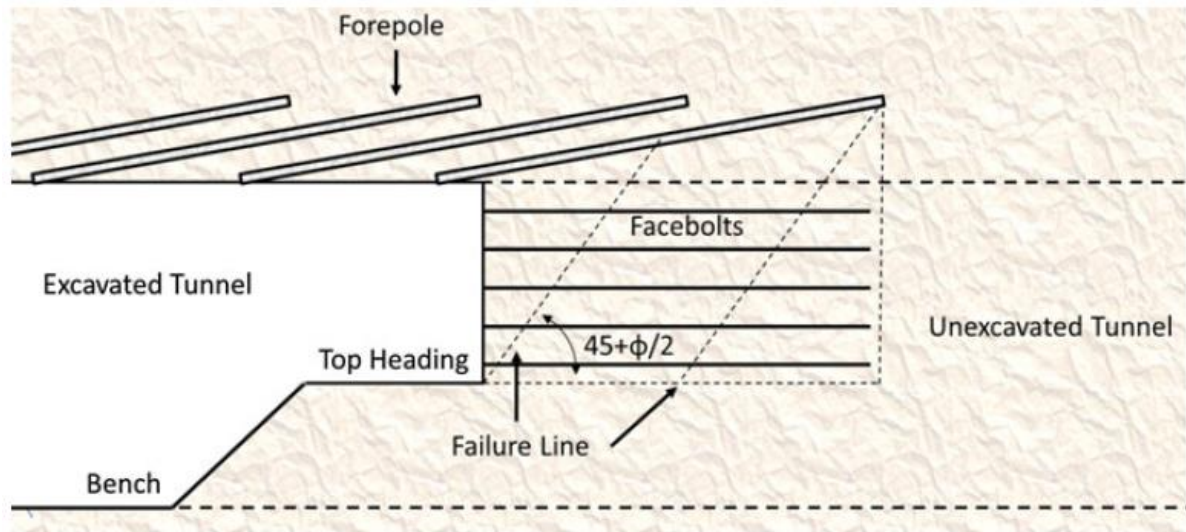
^۳ Fang et al., 2012

^۴ Wittke et al., 2006

^۵ Vlachopoulos and Diederich, 2009

^۶ Arching

^۷ Face bolting



شکل ۲-۱۸: نمایش خط گسیختگی رانکین برای یک مورد سامانه چتری با لوله‌های دابل محصور (Oke et al., 2014a).

۲-۱۰-۳ تزریقی‌ها

تزریق دوغاب اغلب در پروژه‌های تونل‌سازی برای کنترل نشت آب به داخل استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای آن می‌توان تقویت زمین، پرکردن فضاهای خالی، محکم کردن میله‌ها و لوله‌ها (Sp) و در چال‌های حفاری شده برای مهار دیواره و جلوگیری از همگرایی آنها، نام برد. در این طبقه از سامانه چتری (UA)، دوغاب به صورت مستقل تزریق می‌شود، به این معنی که دوغاب به صورت تنها و بدون وجود لوله‌ها و میله‌ها درون چال تزریق می‌شود. روند نصب سامانه مانند حالتی است که لوله و میله‌ها (Sp و Fp) نصب می‌شوند و می‌توان هم‌پوشانی لازم را به وجود آورد. اما فاصله‌داری، توسط فشار مجاز تزریق برای اتصال تزریقات چال‌ها بهم و به وجود آوردن چتری پیوسته در بالای فضای حفاری، تعریف می‌شود. زیرگروه‌های این سامانه عبارتند از سامانه‌ی چتری تزریقی پیوسته‌ی (GcUA) و سامانه‌ی چتری تزریقی باز (GoUA). طول تزریق دوغاب بسته به ابزار و شرایط حاکم بر پروژه است اما معمولاً تزریق دوغاب در بازه‌ی گفته شده برای لوله‌ها اقتصادی است (طول تزریق بیشتر از ارتفاع تونل باشد). پس از معرفی و استفاده از دوغاب به عنوان ابزاری برای جلوگیری از ورود آب به داخل تونل، برای

مصارف دیگر هم توسعه داده شد. بالا بردن مقاومت سنگ، جلوگیری از گسترش و در نتیجه آماس در زمین‌های آماسی و رس‌دار، نمونه‌ی این پیشرفت‌ها است. استفاده از دوغاب چسبندگی خاک، مقاومت و چگالی را بالا برده و نشست را کاهش می‌دهد. در صورت عدم پایش این فرایند، امکان بیرون زدن دوغاب از زمین در زمان اجرا وجود دارد^۱. (Oke et al., 2014a).

۲-۱۱ روش انتخاب سامانه پایش تحکیم چتری مناسب

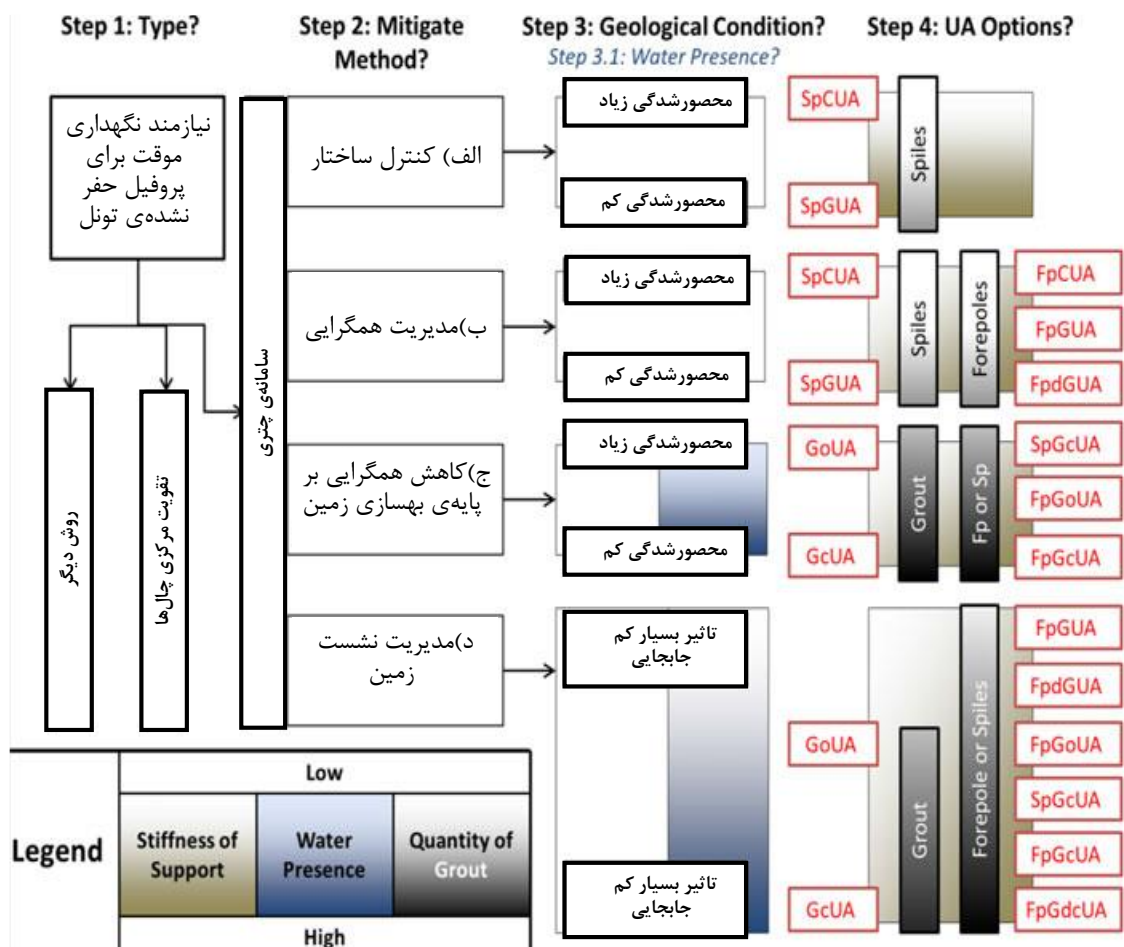
در طی توسعه‌ی سامانه‌ی چتری و استفاده از آن در پروژه‌های مختلف در سال‌های اخیر، شاهد استفاده از اسامی متفاوت و پراکنده‌ای برای این سامانه بوده که گاهی باعث سردرگمی می‌شود و باعث ایجاد مشکلاتی برای طراح در انتخاب سامانه‌ی مناسب می‌شود. در بخش‌های گذشته تلاش بر منسجم‌سازی نام‌گذاری شده و در این بخش نموداری برای بررسی و انتخاب سامانه‌ی چتری ارائه شده است (شکل ۲-۲۰). این روش انتخاب سامانه چتری، تناقض‌ها را مشخص کرده و شکلی اجمالی برای انتخاب سامانه چتری خاص برپایه‌ی افزایش کمیت شکستگی‌ها، محصورشدگی^۲ و فشار جانبی، کنترل همگرایی، نشست و حضور آب ارائه می‌دهد. شکل (۲-۱۹) به عنوان کمکی در طراحی برای سامانه چتری (مثلاً تصمیم‌گیری برای بکارگیری کدام نوع سامانه نگهداری) برای پاسخگویی به شرایط سختی که نیاز به پایش تحکیم دارند در نظر گرفته می‌شود. روش انتخاب نگهداری ۴ مرحله‌ی مجزا دارد که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود (Oke et al., 2014a).

۲-۱۱-۱ گام اول : نوع

گام اول در فرایند طراحی عبارت از تحلیل و تصمیم‌گیری در مورد لزوم استفاده از سامانه پایش تحکیم است. انتخاب سامانه پایش تحکیم بستگی به تجارب شخصی طراح تونل و کارفرما دارد. به علاوه، شرایط محیطی ممکن است استفاده‌ی ترکیبی از سامانه‌های پایش تحکیم را لازم سازد (مثلاً

^۱ Grout jacking

^۲ Confinement



شکل ۲-۱۹: روشی برای کمک به روند انتخاب سامانه‌ی چتری مناسب (Oke et al., 2014a).

قرارگیری شمع‌ها در جبهه کار، قرار دادن میله‌مهارهای شعاعی برای حصول اطمینان از پایداری سازه و سامانه چتری).

۲-۱۱-۲ گام دوم: روش انتخاب بر پایه‌ی کاهش خطر^۱

در این مرحله، سامانه نگهداری برپایه‌ی شناخت محدودیت‌ها و یافتن بهترین راه کنترل برای مقابله با رفتار مورد انتظار زمین به علت حفاری تونل است. لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به این مرحله باید حتی قبل از گام اول در دسترس بوده و تحلیل شده باشد. بنابراین طراح باید روش تحقیق

^۱ Mitigation Method

برای رفتار زمین را بر پایه‌ی محدودیت‌های موجود انتخاب کند. ۴ روش ممکن زیر بر پایه‌ی افزایش درزه‌ها و افزایش همگرایی/نشست ارایه شده است.

- الف) کنترل ساخت: نشانگر مشکلی ساختاری در زمین بوده که باید برای بدست آوردن ایمنی زمین کنترل شود. به بیانی دیگر، مدل گسیختگی تونل تابع درزه‌های موجود در سنگ است. تصمیم به استفاده از سامانه چتری نیازمند اطلاعات اولیه در مورد مدل زمین‌شناسی و تحلیل ناپیوستگی‌ها است تا بتوان به کمک آنها گسیختگی‌های ساختاری مورد نظر را تعریف کرد. به علاوه، سامانه نگهداری می‌تواند به عنوان عمل احتیاطی به تنهایی نصب گردد.
- ب) مدیریت همگرایی: این حالت زمانی در نظر گرفته می‌شود که همگرایی نامطلوب به علت افزایش در گسیختگی‌های تاثیر پذیر از وزن (ریزش دودکشی) و یا شرایط افزایش تنش (گسیختگی مچاله شونده) وجود داشته باشد. اگر گسیختگی ناپیوستگی‌ها و دیگر انواع گسیختگی قبل از نصب اولین نگهداری اتفاق بیافتد، باید از سامانه چتری استفاده شود. در صورت وقوع گسیختگی مچاله شونده (در عمق)، برای کنترل تغییر شکل ابتدایی و توزیع مجدد شرایط تنش‌ها به سمت سامانه‌های نگهداری موقت، باید از سامانه چتری استفاده شود.
- ج) کاهش همگرایی بر مبنای تقویت زمین: این مورد مانند مورد قبل بوده و تنها تفاوت آن در این است که برای به وجود آوردن شرایط حفاری، تقویت پارامترهایی بر اساس تحلیل‌ها باید انجام گیرد. برای مثال در محیط آبدار ضروری است از نشت آب به داخل تونل برای جلوگیری از کاهش کیفیت توده سنگ کاسته شود.
- د) مدیریت نشست: این بخش نشان می‌دهد که نشست یک عامل طراحی است و همگرایی باید از طریق به کارگیری سامانه UA با سختی زیاد کنترل شود (Oke et al., 2014a).

۲-۱۱-۳ گام سوم : شرایط زمین شناسی

وجود تنش‌های محصور کننده‌ی برجا، شرایط لازم برای استفاده از روش انتخاب بر مبنای محدودیت‌های بیان شده در قسمت ۲-۸-۲ الف تا ج را تشریح می‌کند. شرایط محصور شودگی برای لوله‌ها و میل‌ها (زیاد یا کم)، که گیرداری آنها را نشان دهنده‌ی گیرداری آنها است، میزان دوغاب (به عنوان عامل گیردار کننده) را مشخص خواهد کرد که مولفه‌های ساختاری سامانه چتری را معین می‌کند. برای آخرین مرحله از روش انتخاب بر مبنای محدودیت‌ها (قسمت ۲-۸-۲-د) تاثیر فرونشست زمین، شرایط زمین شناسی را توصیف می‌کند. از روش‌های آبکشی در زمان وجود آب می‌توان استفاده کرد. در اینگونه موارد، فرونشست به دلیل افت سطح آب نباید مورد بحث باشد. تجهیزات آبکشی می‌توانند بیرون یا درون تونل نصب گردند. به دلیل ایجاد گسیختگی توسط آب زیرزمینی در جبهه کار تونل و تضعیف شرایط مکانیکی، مشخصات مکانیک سنگی ضعیف منطقه، و مشخصات مواد، فرایند آبکشی لازم خواهد بود.

۲-۱۱-۴ گام چهارم : گزینه‌ها : انتخاب زیرگروه سامانه چتری

گام چهارم انتخاب زیر گروه سامانه چتری مناسب است. با گذراندن سه مرحله‌ی قبل، طراح با داشتن دید کلی و اطلاع از شرایط پیش‌رو در این مرحله به انتخاب زیرگروه مناسب سامانه چتری برای شرایط از پیش تعیین شده و عوامل مربوط می‌پردازد. همانطور که در شکل (۲-۲۰) دیده می‌شود، بیش از یک انتخاب برای برآورده کردن ملزومات وجود دارد. تحلیل‌های نهایی ممکن است بیانگر این نکته باشد که سامانه چتری منتخب اولیه سختی مورد نظر را نداشته باشد. برای کمک به انتخاب سامانه سخت‌تر، آرایش گزینه‌های سامانه چتری از چپ به راست و از بالا به پایین در جدول به نحوی است که سختی افزایش یابد. اگر شرایط نشست زمین مطرح باشد، تحلیل‌های مربوط به آن باید انجام گیرد و نتیجه در سطح زمین بررسی شود.

۲-۱۲ نمودار انتخاب سامانه چتری

نمودار انتخاب سامانه‌ی چتری برای ساده سازی شرایط انتخاب سامانه مناسب، توسط اوک و همکاران (۲۰۱۴) توسعه داده شده است. انتخاب نوع سامانه چتری در شکل (۲-۲۰) آورده شده است. علاوه بر این، از نمودار برای اعتبار سنجی روش‌های استفاده شده برای انتخاب سامانه‌ی چتری در شکل (۲-۱۹) استفاده می‌شود. ابتدا جدول به بخش‌های کنترل اندازه‌گیری‌های لازم برای کاهش رفتارهای مورد انتظار در قالب کنترل ساختار، مدیریت همگرایی، کاهش همگرایی و مدیریت فرو نشست تقسیم می‌شود. گردآوری و تعیین اینکه کدام سامانه چتری با توجه به شرایط و محدودیت‌های زمین باید انتخاب گردد، دارای مراحل است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۲-۱۲-۱ کنترل ساخت

در جهت کمک به مراحل روش انتخاب سامانه چتری، می‌توان از نمودار رفتار تونل^۱ که توسط مارینوس (۲۰۱۳)^۲ توسعه داده شده است، برای کنترل ساختار بهره جست (شکل ۲-۲۲). این نمودار به طراح اجازه می‌دهد تا موارد گسیختگی را پیش‌بینی کند. از این جدول برای تایید کارهای انجام گرفته در مطالعه‌های موردی استفاده شده است.

۲-۱۲-۲ مدیریت همگرایی

به صورت مشابه، از نمودار رفتار تونل (TBC) برای تعیین کیفیت انتخاب سامانه چتری (UA) تحت روش انتخاب بر اساس محدودیت‌ها برای مدیریت همگرایی استفاده کرده است. هرچند که TBC به تنهایی قابلیت تفکیک تفاوت‌های بین مولفه‌های UA، یعنی F_p و S_p را ندارد. انتخاب مولفه‌ها همچنان بر عهده‌ی قضاوت مهندسين طراح تونل است.

^۱ TBC (Tunnel Behavior Chart)

^۲ Marinos, 2013

۲-۱۲-۳ کاهش همگرایی برپایه‌ی بهسازی زمین

استفاده از نمودار رفتاری تونل دارای محدودیت‌هایی بوده و قابلیت ساده‌سازی کامل استفاده از روش کاهش همگرایی بر پایه‌ی کاهش خطر^۱ را دارا نیست. یکی از این محدودیت‌ها در نظر گرفتن تنها جنس و مواد تشکیل دهنده‌ی توده سنگ است که قابلیت پردازش با سامانه GSI^۲ را داشته باشند، که در خاک‌ها اینطور نیست. محدودیت دوم عدم در نظر گرفتن تاثیرات آب است. کاهش همگرایی برپایه‌ی بهسازی زمین با استفاده از اضافه کردن ابعاد ذرات به نمودار انتخاب سامانه چتری، قابلیت ساده‌سازی را پیدا خواهد کرد.

۲-۱۲-۴ مدیریت نشست سطحی

قسمت مدیریت نشست سطحی بر پایه‌ی مطالعات کتابخانه‌ای و انواع پروژه‌های تونلی و تحلیل-های عددی است. در پروژه‌های تونلی، کاهش نشست بر اساس تحلیل‌های عددی و مشاهدات عینی با استفاده از سامانه چتری در نظر گرفته شده است. در این قسمت با استفاده از اطلاعات حاصل از نمودارهای مشخصه که محققین مختلفی روی آنها کار کرده‌اند، شرایط انتخاب بهترین سامانه چتری برای کنترل نشست فراهم خواهد شد.

شکل (۲-۲۲) نمودار رفتار تونل برای توده سنگ‌های مختلف را نشان می‌دهد که با توجه به آن می‌توان شرایط محتمل را پیش‌بینی کرد. شکل (۲-۲۱) نمایانگر رده رفتاری تونل بوده و به تشریح عبارات موجود در شکل (۲-۲۲) می‌پردازد.

^۱ Convergence Reduction Mitigation Method

^۲ Global Strength Index


























Umbrella Arch Selection Chart (Oke, Vlachopoulos, and Marinos 2013)

مدیریت فرو نشست محدودسازی نشست نیازمند پیش- نگهداری برای کنترل همگرایی حفریه مه باشد	کاهش همگرایی بر اساس بهسازی زمین مواد دارای خواص چسبندگی کم/تراوایی زیادند و نیازمند بهسازی برای شروع عملیات حفر هستند.	مدیریت همگرایی مکانیزم شکست اجازه‌ی حفر بدون پیش‌نگهداری را نمی‌دهد.	کنترل ساختاری مکانیزم شکست در حین حفاری باعث ایجاد خطر برای کارگران و ایجاد شکستگی زیاد می‌شود.																																																																																																																																														
	<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">محورشدگی کم (روپاره، کم)</th> <th rowspan="2">محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)</th> <th colspan="4">Grout/Spile</th> <th colspan="4">Grout/Forepole</th> </tr> <tr> <th>Water Presence</th> <th>Water Presence</th> <th>Water Presence</th> <th>Water Presence</th> <th>Water Presence</th> <th>Water Presence</th> <th>Water Presence</th> <th>Water Presence</th> </tr> <tr> <td>Block/Grain</td> <td>TBC #</td> <td>None³</td> <td>Low</td> <td>High</td> <td>None¹</td> <td>Low</td> <td>High</td> <td>Low</td> <td>High</td> </tr> <tr> <td>Sand</td> <td>-</td> <td>SpGUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> <td>FpGoUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> </tr> <tr> <td>Gravel</td> <td>-</td> <td>SpGUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> <td>FpGoUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> <td>GoUA</td> </tr> <tr> <td>Cobble</td> <td>19,20</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> </tr> <tr> <td>Boulder</td> <td>15,16</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> </tr> <tr> <td>Sand</td> <td>-</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>FpGUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> </tr> <tr> <td>Gravel</td> <td>-</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>FpGUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> <td>GCUA</td> </tr> <tr> <td>Cobble</td> <td>17,18</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> </tr> <tr> <td>Boulder</td> <td>13,14</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>SpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> <td>FpGUA</td> </tr> </table>	محورشدگی کم (روپاره، کم)	محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)	Grout/Spile				Grout/Forepole				Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Block/Grain	TBC #	None ³	Low	High	None ¹	Low	High	Low	High	Sand	-	SpGUA	GoUA	GoUA	FpGoUA	GoUA	GoUA	GoUA	GoUA	Gravel	-	SpGUA	GoUA	GoUA	FpGoUA	GoUA	GoUA	GoUA	GoUA	Cobble	19,20	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	Boulder	15,16	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	Sand	-	GCUA	GCUA	GCUA	FpGUA	GCUA	GCUA	GCUA	GCUA	Gravel	-	GCUA	GCUA	GCUA	FpGUA	GCUA	GCUA	GCUA	GCUA	Cobble	17,18	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	Boulder	13,14	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	<table border="1"> <tr> <th>محورشدگی کم (روپاره، کم)</th> <th>محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)</th> </tr> <tr> <td>TBC #</td> <td>Spille</td> </tr> <tr> <td>15,16</td> <td>SpCUA</td> </tr> <tr> <td>19,20</td> <td>SpCUA</td> </tr> <tr> <td>23,24</td> <td>FpCUA</td> </tr> <tr> <td>9,10</td> <td>SpGUA</td> </tr> <tr> <td>13,14*</td> <td>SpGUA</td> </tr> <tr> <td>17,18*</td> <td>SpGUA</td> </tr> <tr> <td>21,22</td> <td>SpGUA</td> </tr> </table>	محورشدگی کم (روپاره، کم)	محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)	TBC #	Spille	15,16	SpCUA	19,20	SpCUA	23,24	FpCUA	9,10	SpGUA	13,14*	SpGUA	17,18*	SpGUA	21,22	SpGUA	<table border="1"> <tr> <th>محورشدگی کم (روپاره، کم)</th> <th>محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)</th> </tr> <tr> <td>TBC #</td> <td>Spille</td> </tr> <tr> <td>7,8</td> <td>SpCUA design parameters are made to prevent blocks from falling out</td> </tr> <tr> <td>11,12</td> <td>SpCUA design parameters are made to prevent blocks from falling out</td> </tr> <tr> <td>15,16</td> <td>SpCUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure</td> </tr> <tr> <td>5,6</td> <td>SpGUA design parameters are made to prevent blocks from falling out</td> </tr> <tr> <td>9,10*</td> <td>SpGUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure</td> </tr> <tr> <td>13,14*</td> <td>SpGUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure</td> </tr> </table>	محورشدگی کم (روپاره، کم)	محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)	TBC #	Spille	7,8	SpCUA design parameters are made to prevent blocks from falling out	11,12	SpCUA design parameters are made to prevent blocks from falling out	15,16	SpCUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure	5,6	SpGUA design parameters are made to prevent blocks from falling out	9,10*	SpGUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure	13,14*	SpGUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure
محورشدگی کم (روپاره، کم)	محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)			Grout/Spile				Grout/Forepole																																																																																																																																									
		Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence	Water Presence																																																																																																																																								
Block/Grain	TBC #	None ³	Low	High	None ¹	Low	High	Low	High																																																																																																																																								
Sand	-	SpGUA	GoUA	GoUA	FpGoUA	GoUA	GoUA	GoUA	GoUA																																																																																																																																								
Gravel	-	SpGUA	GoUA	GoUA	FpGoUA	GoUA	GoUA	GoUA	GoUA																																																																																																																																								
Cobble	19,20	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA																																																																																																																																								
Boulder	15,16	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA																																																																																																																																								
Sand	-	GCUA	GCUA	GCUA	FpGUA	GCUA	GCUA	GCUA	GCUA																																																																																																																																								
Gravel	-	GCUA	GCUA	GCUA	FpGUA	GCUA	GCUA	GCUA	GCUA																																																																																																																																								
Cobble	17,18	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA																																																																																																																																								
Boulder	13,14	SpGUA	SpGUA	SpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA	FpGUA																																																																																																																																								
محورشدگی کم (روپاره، کم)	محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)																																																																																																																																																
TBC #	Spille																																																																																																																																																
15,16	SpCUA																																																																																																																																																
19,20	SpCUA																																																																																																																																																
23,24	FpCUA																																																																																																																																																
9,10	SpGUA																																																																																																																																																
13,14*	SpGUA																																																																																																																																																
17,18*	SpGUA																																																																																																																																																
21,22	SpGUA																																																																																																																																																
محورشدگی کم (روپاره، کم)	محورشدگی زیاد (روپاره، زیاد)																																																																																																																																																
TBC #	Spille																																																																																																																																																
7,8	SpCUA design parameters are made to prevent blocks from falling out																																																																																																																																																
11,12	SpCUA design parameters are made to prevent blocks from falling out																																																																																																																																																
15,16	SpCUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure																																																																																																																																																
5,6	SpGUA design parameters are made to prevent blocks from falling out																																																																																																																																																
9,10*	SpGUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure																																																																																																																																																
13,14*	SpGUA: Spacing <30cm, Angle of installation 10-15°, in location of potential Ch failure																																																																																																																																																
<p>حضور آب انتخاب حداقل کلاس نگهداری بر پایه‌ی انتخاب از کاهش همگرایی مربوط به بهسازی زمین در شرایط حضور آب (که توانایی ضربه زدن به عملیات را دارد) خواهد بود.</p> <p>Decreasing Permeability: When there is a high presence of water it is necessary to minimize the inflow of water through additional pre-support to act as a plug to the unexcavated core underneath the umbrella arch.</p> <p>Dewatering: Dewatering is suggested for low presence of water to prevent the increase of pore water pressure acting on the support and further disintegration of the face.</p> <p>COST ANALYSIS (Spile/Forepole) Both spiles and forepoles can be employed for convergence management. Cost analysis of upgrading to a larger jumbo (forepole) based on availability of equipment will dictate the selection between the two different types.</p>																																																																																																																																																	

شکل ۲-۲۰ نمودار انتخاب سامانه چتری (Oke et al, 2014).

TUNNEL BEHAVIOUR TYPES			
St	زمین پایدار: مقطع تونل پایدار به همراه ریزش‌های ثقلی محلی. توده سنگ فشرده به همراه ناپیوستگی‌های محدود و ایزوله می‌باشد.		
Br	شکست شکننده: شکست شکننده یا انفجار سنگ در عمق زیاد		
Wg	ریزش گوه‌ای: گوه‌های لغزنده یا گسیختگی‌های ثقلی. کرنش ناچیز. توده سنگ بلوکی یا شدت بلوکی است. بلوک‌ها توانایی لغزش و سقوط دارند. پایداری توسط خصوصیات هندسی و مکانیکی ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. نسبت مقاومت توده سنگ به تنش برجا بالاست (بیشتر از ۰.۶-۰.۷). و کرنش‌های خیلی کوچکی ممکن است (کمتر از ۰.۱).		
Ch	گسیختگی دودکشی: توده سنگ شدت درزه‌دار است. توده سنگ قفل شدگی خوبی ندارد (ساختار باز) و در ترکیب با محصور شدگی ضعیف (تنش‌های جانبی) گرایش به سقوط بلوک‌ها دارد که منجر به گسترش شکستگی‌ها و ایجاد گسیختگی دودکشی می‌شود. پیشرفت شکستگی‌ها در توده‌های سنگ با کیفیت بالاتر بسته به شرایط برجا گام‌ها متوقف می‌شود. این نوع از شکستگی در توده سنگ‌های برشی و خرد شده در زمینهای با محصور کنندگی بالا ممکن است اتفاق بیفتد (تنشهای جانبی بالا).		
Rv	زمین ریزشی: توده سنگ برشی و خرد شده یا متورق با چسبندگی تقریباً صفر و بسته به قفل شدگی سنگ بکر (حالت RV1 بدون برش‌دهی) و امکان وجود کانی میزبان ثانویه، (حالت RV2 با وجود مواد پرکننده مثل رس)، که در این حالات امکان به وجود آمدن فوری ریزش در جبهه‌کار و محیط تونل وجود دارد. تفاوت این حالت با حالت دودکشی (Ch) در در ابعاد بلوک است. که در اینجا خیلی کوچک است. زمان خود نگهداری در این مورد خیلی محدود است و گسترده‌ی ریزش بنا به عدم وجود توده سنگ با کیفیت بالاتر		
Fi	زمین جاری شونده: توده سنگ شدت خرد شده با چسبندگی تقریباً صفر و حضور شدید آب در طول ناپیوستگی‌ها است. تکه‌های سنگ به همراه آب به داخل تونل جریان می‌یابند.		
Sh	شکست خمشی: کرنش‌های کوچک تا متوسط، به همراه گسترش شکست‌های خمشی نزدیک محیط اطراف تونل. توده سنگ با سنگ‌های بکر دارای مقاومت کم (کمتر از ۱۵ مگاپاسکال) مشخص می‌شوند در حالی که ساختار توده سنگ از مقاومت کلی توده سنگ می‌کاهد. کرنش‌ها در تونل‌های با روبرای کم تا متوسط (۵۰ تا ۷۰ متر) در موارد توده سنگ‌های ضعیف و درزه‌دار، یا در روبرای زیاد در موارد توده سنگ با کیفیت بیشتر اتفاق می‌افتند. نسبت مقاومت توده سنگ به تنش برجا کم (بین ۰.۳ و ۰.۴۵) است و کرنشهای متوسط (۱ تا ۲.۵٪) مورد انتظار است.		
Sq	زمین مجاله‌شونده: کرنش‌های بزرگ، به علت تنش بیش از حد با گسترش گسیختگی خمشی در زون گسترش یافته‌ی اطراف تونل. توده سنگ متشکل از سنگ‌های بکر با مقاومت کم است در حالی که ساختار توده سنگ از مقاومت کلی توده سنگ می‌کاهد. نسبت مقاومت توده سنگ به تنش برجا خیلی کم است (کمتر از ۰.۳) و کرنش‌های بیشتر از ۲.۵٪ مورد انتظار است، و همچنین می‌توانند در سطح اتفاق بیافتند.		
Sw	زمین‌های آماسی: توده سنگ حاوی مقادیر قابل توجهی از کانی‌های آماسی (مونتموریلونیت، اسمکتیت، آنیدریت) است که در هنگام حضور آب آماس کرده و تغییر شکل می‌دهند. آماس اغلب در کف تونل و در زمانی که حلقه‌ی نگهداری کاملاً بسته نیست اتفاق می‌افتد.		
San	کرنش‌های ناهمسانگرد: توده سنگ دارای چینه‌بندی یا تورق یا متشکل از زون‌های ضعیف مشخص بوده و خصوصیات کرنش افزوده را در مسیری که تورق تعیین می‌کند گسترش می‌یابد.		

شکل ۲- ۲۱ الگوی رفتاری تونل (Oke et al., 2013a)

TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinos)*						
ساختمان توده سنگ (با توجه به GSI, Hoek & Marinos, 2000)	OVERBURDEN (H) (Rock masses for up to several hundreds metres**)				OVERBURDEN (H) LIMIT: ~150 m	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~100 m
	Small overburden		Large overburden			
	INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low σ_c High σ_c		INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low σ_c High σ_c			
 بکر یا توده‌ای نمونه‌های سنگ بکر یا سنگ توده‌ای برجا به همراه تعدادی درزه با فاصله‌داری زیاد	 1 St	 2 St	 3 Sh	 4 St	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~70 m	
 بلوکی توده سنگ بدون اغتشاش با درگیری مناسب متشکل از بلوک‌های حاصل از سه دسته درزه‌ی قائم متقاطع	 5 Wg	 6 Wg	 7 Sh-Wg	 8 St-Wg		
 شدیدا بلوکی توده سنگ گیردار دارای مقداری اغتشاش به همراه بلوک‌های چندوجهی متشکل از ۴ دسته درزه یا بیشتر	 9 Wg-Ch Sh	 10 Wg-Ch	 11 Sh	 12 Wg		
 بلوکی/اغتشاشی/درزه‌دار چین‌خورده به همراه بلوک‌های حاصل از چندین دسته درزه‌ی متقاطع ادامه‌داری صفحات بستر یا شیست‌زیمته. اغتشاش توده سنگ مشهود است و می‌تواند گسترش یابد	 13 Ch-Wg Sh	 14 Ch-Wg	 15 S(Sh-Sq) Ch	 16 Ch-Sh		
 متلاشی شده توده سنگ به شدت شکسته با درگیری ضعیف به همراه مخلوط قطعات گرد و زاویه‌دار سنگ	 17 Sh-Rv	 18 Rv	 19 Sq-Ch	 20 Ch-Sh		
 لایه‌ای/متورق/چیده‌شده توده سنگ لایه‌ای، متورق و بشد تکنیکی. تورق بر تمام دسته درزه‌ها تسلط دارد که در نتیجه هیچ ساختار بلوکی ندارد	 21 Sh-Ch	 22 Sh-Ch	 23 Sq	 24 Sq		
Tunnel rock mass behaviour types (St, Wg, Sh, Sq, Rv, Ch) as defined in figure 3 The engineering geological behaviour may be also controlled by two or three different mechanisms (e.g. Sh-Ch)						
توجه: *اطلاعات استفاده شده در جدول رفتار تونل از تونل‌های حفاری شده در مناطق غیر شهری با روبراه‌ی چند صد متر (تا ۲۰۰ متر) با قطر ۱۲ متر به روش سنتی که در آن دو مقطع بالا و پایین به ترتیب حفر شده‌اند بنست آمده‌است. ** جدول به روبراه‌های زیاد (بیش از ۱۰۰۰ متر) که در آنجا مکانیزمهای شکست متفاوت است، اشاره ندارد. *حد پایه‌ی مقاومت فشاری تک محوره‌ی سنگ بکر و ضخامت روبراه نماینده هستند. دلیل این امر جلوگیری از استانداردسازی توسط یک اپراتور غیر حرفه‌ای است. هدف این دیاگرام، پیش‌بینی مکانیزم شکست چند تپ توده سنگ معمول است. *وضعیت سطحی ناپیوستگی‌ها، مولفه‌ی دوم در سیستم GSI، اساسا بر شدت پدیده‌ی گسیختگی تاثیر گذار است. *حضور زیاد رس درون ناپیوستگی‌ها یا زون‌های داخل توده سنگ ممکن است تپ رفتاری حرکت تظلی در مسیر محور عمودی جدول را تغییر دهد (برای مثال از Wg[9] به Ch [13]). *حضور آب در روی زمین اساسا ضریب ایمنی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و تاثیر روی مدل رفتاری ندارد. با این حال در بعضی موارد، مثل توده سنگ "بلوکی-مغتشاشی" و "از هم پاشیده"، ممکن است حضور آب ممکن است شرایط را از Ch یا Rv به حالت رفتاری FI تغییر دهد. *موارد شماره‌ی ۸، ۴ و ۱۲ زمانی که روبراه بصورت قلیل توجیهی افزایش یابد (مثلا بیشتر از ۸۰۰ متر)، بسته به مقاومت سنگ بکر، ممکن است باعث گسترش شکست شکننده (BF) شوند. *شکل تونل‌ها شتابی است؛ این شکل مشابه مسیر حرکت مقطع بالایی است.						

شکل ۲-۲۲ نمودار رفتار تونل در توده سنگ‌های مختلف (Marinos, 2012)

فصل سوم : مطالعات موردی انجام شده

در این قسمت به بیان مطالعات موردی انجام گرفته درباره‌ی موارد استفاده شده از سامانه‌های چتری پرداخته شده است. جمع‌بندی و نتایج حاصل شده از این مطالعات بیانگر پاسخگویی موثر سامانه چتری در زمین‌های سست بوده است.

۳-۲ کنترل نشست‌های سطح با استفاده از سیستم چتری در مرحله‌ی دوم حفاری مترو

استانبول (۲۰۰۸)

از آن‌جا که در حفاری تونل‌های مربوط به مترو، نشست سطحی قبل و بعد از عملیات حفاری، آسیب جدی به سازه‌های سطحی وارد می‌کند، کنترل آن بسیار ضروری است. در غیر این صورت تونل‌های مترو کارایی خود را از دست داده و از فاکتورهای مثبت آن کاسته می‌شود. برای این منظور، اوکاک و همکاران (۲۰۰۸) مطالعه‌ای بر روی گام دوم حفاری تونل متروی استانبول واقع در بین منطقه‌ی اونکاپانی و ینیکاپی^{۵۵} انجام داده‌اند. زمین‌شناسی محل متشکل از رس، سنگ‌های رسی، ماسه و مارل است. از روش اتریشی برای این تونل با سطح مقطع ۳۶ مترمربع استفاده شده است. در این مطالعه به مقایسه‌ی بین نشست در روش اتریشی (NATM) و روش چتری (UAM) پرداخته می‌شود (Ocak, 2008).

خط متروی استانبول در ۲ و ۳ فاز ساخته شده است. فاز اول در سال ۱۹۹۲ شروع و در سال ۲۰۰۰ بهره‌برداری شده است. زمانی که تونلی در شرایط زمین نرم و یا سخت حفر می‌شود، به طور معمول از روش‌های پایدارسازی از جمله روش چتری برای تحکیم زمین استفاده می‌شود. در تونل‌های حفر شده در زمین رسی مقطع ینیکاپی از مسیر ینیکاپی - تاکسیم^{۵۶} علاوه بر استفاده از روش چتری، از سامانه‌های تقویتی اضافه مانند میل‌مهارهای سیستماتیک و شاتکریت نیز استفاده شده است.

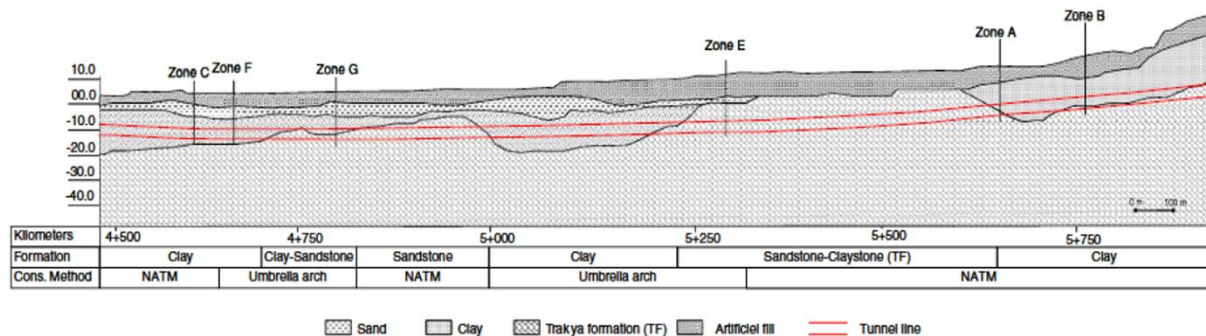
^{۵۵} Unkapani and Yenikapi

^{۵۶} Taksim

گام دوم حفاری تونل متروی استانبول در سازند تراکیا^{۵۷} و گون گورن^{۵۸} قرار داشت. سازند تراکیا (TF) از توالی سنگ آهک-لای سنگ-سنگ رسی-شیل تشکیل شده است. لایه‌های سنگ آهک و کنگلومرا هم به ندرت دیده می‌شود. دایک‌های دیاباز و آندزیت هم موجود و دارای ضخامتی معادل با ۱۰ متر هستند. در قسمت جنوبی تونل، رسوب‌های متشکل از سازند کوکورچشمه^{۵۹} که دارای شن-ماسه-سیلت، سازند گون گورن دارای لایه‌های رس-مارن و سازند باکیرکوی^{۶۰} دارای سنگ آهک، شیل و مارن موجود هستند. گسل‌ها و ناپیوستگی‌های زیادی در مسیر منطقه‌ی کوهستانی آلپ وجود دارند. روباره‌ی تونل بین ۱۱ تا ۴۲ متر و فاصله‌ی دو خط رفت و برگشت بین ۳۰ تا ۳۲ متر است (Ocak, 2008). آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی سازند در مسیر ذکر شده در جدول (۲-۲) آمده است. مشخصات مربوط به سازندها در جدول (۱-۳) قابل مشاهده است (Ocak, 2008).

مقطع طولی ژئوتکنیکی منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.

در مطالعه‌ی اخیر، نشست‌های سطحی به طور تجربی برای سه سازند مختلف با ۸ نقطه‌ی اندازه‌گیری در نظر گرفته شده‌اند. نشست‌های سامانه چتری و NATM باهم مقایسه شده و نتایج آنها به صورت زیر است.



شکل ۱-۳: مقطع ژئوتکنیکی تونل استانبول (Ocak, 2008).

^{۵۷} Trakya

^{۵۸} Gungoren

^{۵۹} Cukurcesme

^{۶۰} Bakirkoy

جدول ۳-۱ مشخصات ژئوتکنیکی مربوط به سازندهای مختلف تونل استانبول (Ocak, 2008).

Strata	Unit weight (kN/m ³)	Modulus of elasticity (kN/m ²)	Cohesion (kN/m ²)	Poisson ratio	Angle of friction
Filling	18	5000	1	0.4	10
Sand	17	15,000	1	0.35	25
Süleymaniye formation	18.9	38,000	20	0.33	14
Trakya formation	25	60,000	80	0.2	25

- نشست سطحی در زمین رسی که در حین حفاری تونل غیر قابل اجتناب بود، با استفاده از سامانه چتری در همان منطقه متوقف شد، زیرا کشش اعمال شده بر سقف تونل به اطراف تونل توسط سامانه چتری و تزریق انتقال یافت. مطالعه‌ی اخیر نشان داد که نگهداری سقف با سامانه چتری در مقایسه با سامانه اتریشی کارایی بیشتری در جلوگیری از نشست داشته و نشست را تا حدود سه برابر کاهش می‌دهد.
 - واضح است که برای اجرای سامانه چتری هزینه‌های مازاد نیاز است. اما باید توجه داشت که در طول پروژه هزینه‌های زیادی وجود دارد که در صورت عدم استفاده از این روش ممکن است بر هزینه‌ی پروژه اضافه شود. در صورت عدم استفاده، نشست‌های سطحی ممکن است خسارات بسیار زیادی را بر سازه‌های سطحی وارد کرده و هزینه‌های زیادی را برای پروژه تحمیل کند. علاوه بر آن اعتبار مشاور و پیمانکار کاهش می‌یابد.
 - اجبار استفاده از میله‌های چوبی برای نگهداری جبهه کار با استفاده از این روش از بین می‌رود. در این روش، تواتر حفاری با کم کردن فاصله‌ی بین حفاری مقطع بالایی و پایینی کامل می‌شود و سازه‌های دایره‌ای در مقطع عرضی به وجود می‌آیند.
- در هر گام حفاری برای جلوگیری از هوازدگی و در معرض آب نبودن قسمت‌های رسی، شاتکریت به قطر ۵ سانتی‌متر اجرا شده که خود باعث افزایش پایداری تونل می‌شود. بنابر دلایل ذکر

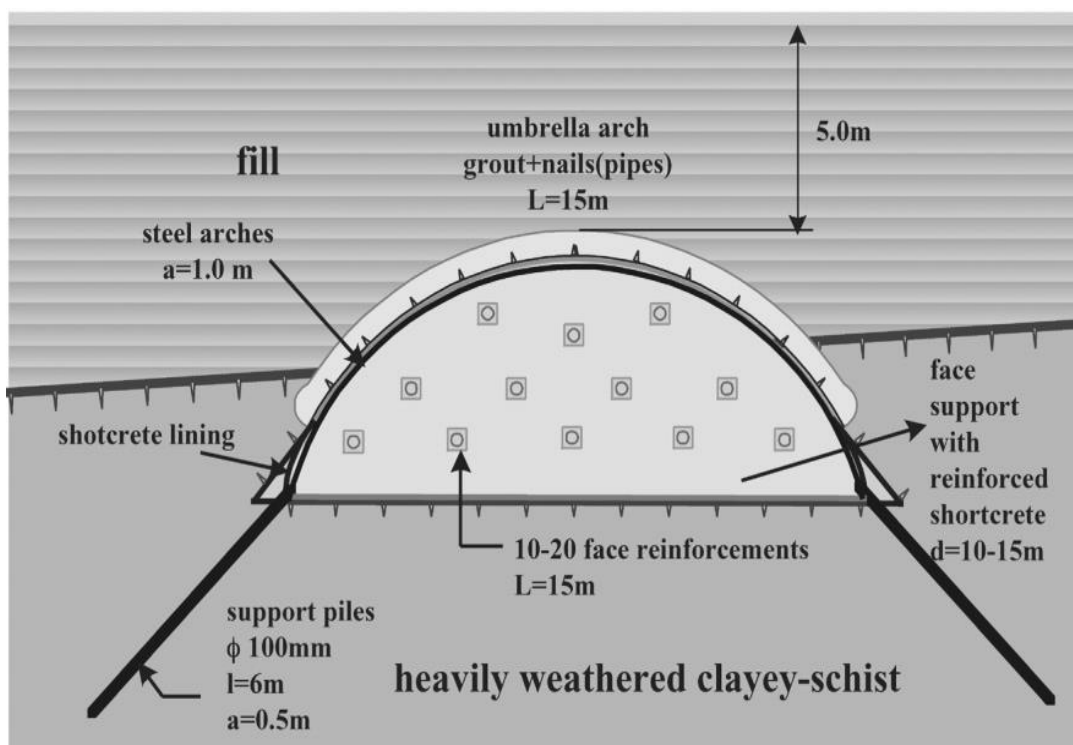
شده، سامانه چتری برای جلوگیری از نشست در زمین‌های رسی، با موفقیت استفاده شده و معلوم شده است که نشست‌ها با استفاده از روش چتری به طور موثری قابل کنترل هستند (Ocak, 2008).

۳-۳ رفتار تغییر شکل جبهه‌کار تونل تقویت شده با لوله‌های طولی (۲۰۰۲)

یو و شین (۲۰۰۲) اظهار داشتند که رشد سریع و توسعه‌ی شهرنشینی باعث به وجود آمدن تقاضای زیاد برای سازه‌های تونلی به منظور استفاده در خطوط برق و ارتباطات و سامانه‌های نقل و انتقال گشته است. بمنظور دسترسی، تعمیر و نگهداری و از نظر اقتصادی این تونل‌ها را در اعماق کم می‌سازند. تونل‌های کم عمق اغلب به دلیل قرار گرفتن در خاک نرم و وجود گسل‌ها توسط حفارهای مکانیزه‌ی سپردار و یا روش اتریشی به همراه روش‌های به‌سازی ساخته می‌شوند. در این شرایط پایدار نگه‌داشتن جبهه کار تونل یکی از مهمترین دغدغه‌هاست، زیرا در صورت ریختن جبهه کار، زمین نرم شده و ممکن است باعث ریزش تمام تونل گردد. یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در تونلسازی شهری کم عمق، کنترل نشست سطحی نه فقط به دلیل پایداری تونل بلکه برای جلوگیری از وارد شدن خسارات به بناهای سطحی است. تونل کاری در مناطق شهری اغلب نیازمند نگهداری‌های جبهه کار است. کشورهای اروپایی از جمله ایتالیا و فرانسه تاکنون با موفقیت از لوله‌های فایبر گلاس طولی همراه تزریق دوغاب برای نگهداری جبهه کار بهره جسته‌اند. لوله‌های فایبر گلاس به علت داشتن مزایا (مقاومت محوری زیاد) و اقتصادی بودن از محبوبیت زیادی برخوردار شده‌اند. این روش به همراه روش‌های دیگر مانند سامانه‌ی چتری استفاده شده‌اند (شکل (۲-۳)) (Yoo & Shin, 2002).

نتایج آزمایش‌های عددی و آزمایشگاهی یو و شین (۲۰۰۲) بر روی رفتار تغییر شکل جبهه کار تونل تقویت شده با لوله‌های طولی، به طور خلاصه بازگو می‌شود. مجموعه آزمایش‌های مقیاس کوچک از جمله تحلیل سه بعدی المان محدود با تاکید خاص بر اثر پارامترهای طراحی از جمله تعداد، طول و سختی لوله‌ها بر روی رفتار تغییر شکل جبهه کار انجام گرفته است. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که نه تنها استفاده از این روش تغییر شکل جبهه کار را کاهش داده، بلکه نشست سطحی زمین را هم تا

مقدار زیادی می‌کاهد. مطلب بیان شده بدین معناست که این روش، روشی مناسب و مثبت برای کنترل نشست سطحی در تونل کاری در مناطق شهری است. این مطالعه نشان می‌دهد که تاثیر سامانه تقویتی مشخصا تحت تاثیر عواملی از جمله توزیع لوله‌هاست و مقادیری بحرانی برای هر یک از پارامترها وجود دارد که روی اثر تقویتی تاثیر گذارند.



شکل ۳-۲: مقطع عرضی معمول از روش چتری با لوله و تقویت جبهه کار (Yoo & Shin, 2002)

۳-۴ نقش روش چتری و شعاع تزریق ایجاد شده در زمینهای ریزشی (مطالعه‌ی موردی

تونل راه آهن قزوین-رشت-بندر انزلی) (۱۳۹۱)

باقرزاده و گشتاسبی (۱۳۹۱) درباره‌ی نقش روش چتری در تونل راه آهن قزوین-رشت-بندر انزلی مطالعاتی انجام دادند. مطالعه‌ی انجام شده در مورد چگونگی عملکرد روش چتری و نقش شعاع تزریق در کاهش جابجایی‌ها و نشست است. پایدارسازی جبهه کار با ایجاد زون قوسی شکل در دو جهت طولی و عرضی ایجاد شده است. به طوری که تمرکز تنش در جلو و عقب جبهه کار کاهش یافته و میزان افزایش تنش در نتیجه‌ی حفاری کنترل شده و نهایتاً منجر به کاهش تغییر شکل می‌شود.

همچنین تاثیر مثبت این روش در تونل راه آهن قزوین-رشت-بندر انزلی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا تونل توسط نرم افزار FLAC 3D مدل سازی شده و تحلیل پایداری بر روی آن انجام گرفته است. نتایج نشان داده است که روش چتری با کاهش جابجایی به میزان ۴۵ درصد و ۶۵ درصد در سقف و سطح زمین، گزینه ای مناسب برای غلبه بر ریزش این تونل است. همچنین لازم است که با توجه به جنس مصالح منطقه دوغاب با ترکیب و فشار تزریق مناسب به منظور فراهم کردن شعاع تاثیر مرکز به مرکز و افزایش پایداری انتخاب شود، زیرا کاهش شعاع تزریق از ۱۰۰ درصد به ۷۵ درصد، باعث افزایش جابجایی و نشست به میزان ۱۹ درصد و ۳۲ درصد شده است (باقرزاده و گشتاسبی، ۱۳۹۱).

۳-۵ اثر پارامترهای روش چتری بر حفظ پایداری سینه کار؛ مطالعه موردی تونل سبزکوه (۱۳۹۳)

زارعی و همکاران (۱۳۹۳) سامانه چتری موجود برای حفظ پایداری سینه کار تونل انتقال آب سبزکوه واقع در استان چهارمحال و بختیاری را مورد بررسی قرار دادند. استفاده از سامانه پایپ روفینگ و میل مهارهای سینه کار سبب کاهش چشم گیر جابجایی عمودی تاج تونل می شود. طبق نتایج استفاده از سامانه مذکور نسبت به عدم استفاده از سامانه پیش تحکیم، سبب کاهش نشست تاج تونل در راستای طولی ۱۴ متر تونل به میزان ۵۷ درصد گردیده است. همچنین افزایش زاویه ی نصب لوله ها سبب افزایش نشست تاج تونل می شود. طبق نتایج بدست آمده افزایش زاویه ی نصب از ۵ به ۱۲ درجه سبب افزایش جابجایی تاج تونل در راستای طولی ۱۲ متر تونل به میزان ۱۱ درصد گردیده است. زارعی و همکاران پیش بینی نموده اند که برای انتخاب زاویه ی نصب لوله ها باید جنبه ی اقتصادی، پایداری سامانه و قابلیت دستگاه های حفاری در نظر گرفته شود. به علاوه، افزایش قطر و ضخامت دیواره ی لوله ها سبب کاهش جابجایی عمودی تاج تونل می شود. بر اساس نتایج تحقیق زارعی و همکاران، استفاده از لوله هایی با قطر و ضخامت دیواره ۱۱۴ و ۸ میلی متر نسبت به لوله هایی با قطر و ضخامت دیواره ی ۶۰/۳ و ۴ میلی متر سبب کاهش نشست تاج در راستای طولی ۹ متر به میزان ۲۳ درصد گردیده است. با افزایش قطر، به

دلیل افزایش مقاومت خمشی لوله‌ها، تاثیر باربری این سامانه افزایش می‌یابد. از بین پارامترهای طراحی، قطر لوله‌ها تاثیر بیشتری بر میزان نشست تاج تونل دارد. قابل توجه است که افزایش فاصله‌ی عرضی بین لوله‌ها سبب افزایش نشست تاج تونل می‌شود. طبق نتایج افزایش فاصله‌ی عرضی لوله‌ها از ۳۰ به ۵۰ سانتی‌متر سبب افزایش نشست تاج تونل در راستای طولی ۱۲ متر تونل به میزان ۵,۵ درصد گردیده است. برای استفاده از ظرفیت باربری خاک، فاصله‌ی عرضی لوله‌ها باید به گونه‌ای باشد که یک مقدار حداقل قوس محلی بین دو لوله متوالی تشکیل شود. در آخر، با مقایسه‌ی زوج مولفه‌ی ممان خمشی-نیروی محوری در مقاطع مختلف با نمودار اندرکنش ممان خمشی-نیروی محوری سامانه نگهداری اولیه مشخص گردید که سامانه نگهداری اولیه نصب شده در مقابل بار وارده از استحکام کافی برخوردار می‌باشد(زارعی و همکاران، ۱۳۹۳).

فصل چهارم : معرفی ساختگاه تونل البرز (مطالعه موردی)

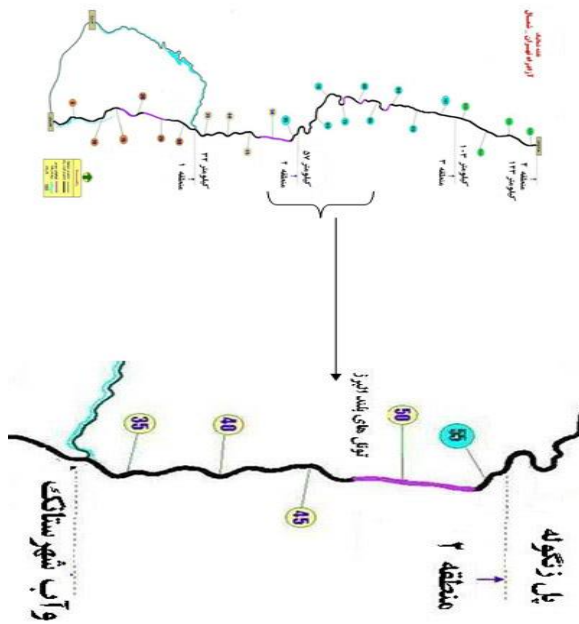
۱-۴ مقدمه

در این فصل به معرفی پروژه‌ی تونل البرز پرداخته می‌شود. اطلاعات مربوط به شرایط زمین و خصوصیات مکانیک سنگی و زمین‌شناختی مربوط به محل احداث تونل آورده شده‌اند. با توجه به مقطع طولی تونل اطلاعات سنگ دربرگیرنده و روباره در قسمت مورد تحلیل مشخص شده است و داده‌های مربوط به آن قسمت بیان شده است. سپس سامانه‌های نگهداری و پیش‌تحکیم هر بخش با توجه به نقشه‌ی مشخص شده از طرف مهندسین مشاور پروژه بیان گشته و طبق روند پیشرفت تونل و شرایط اصلی اجرای پروژه تصحیح شده است. در نهایت مدل‌سازی عددی سه بعدی سامانه‌های پیش‌نگهدار و سامانه‌های پیشنهادی بیان شده است. با قرار دادن نتایج حاصل از تحلیل‌های مختلف در یک جدول در کنار هم به مقایسه‌ی آنها پرداخته می‌شود. از آنجا که هدف این تحلیل پرداختن به سامانه‌های پیش-تحکیم است، با توجه به نقشه‌های پیشنهادی مهندسین مشاور آن قسمت‌هایی از مسیر حفاری که مستعد ناپایداری‌های بیشتر است (مناطق گسلی) مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از استخراج، جمع-بندی و پالایش داده‌های ورودی، شرایط تونل و مساله در نرم افزار FLAC 3D مدل‌سازی شده است. بدلیل کافی نبودن سامانه‌های ابزارگذاری و اینکه حفاری در منطقه انتخاب شده هنوز انجام نگرفته است، لازم است تا نتیجه‌ی حاصل از مدل پیشنهادی طراح با مدل‌های پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق مقایسه شوند.

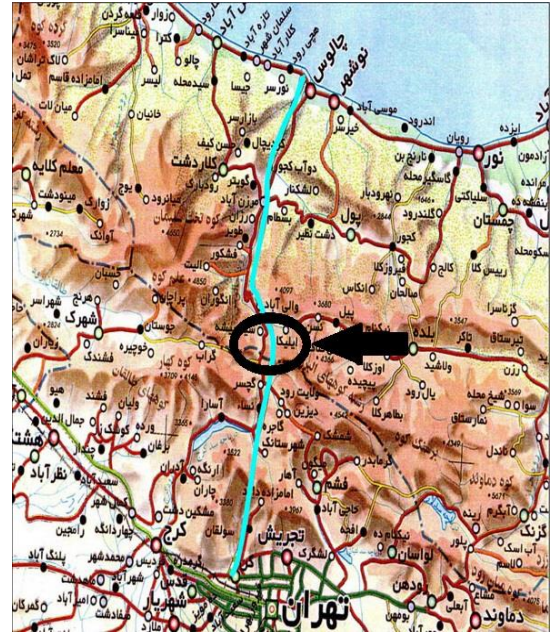
۲-۴ معرفی پروژهی تونل البرز

طرح احداث بزرگراه ۱۲۱ کیلومتری تهران - شمال از سال ۱۳۵۳ برنامه‌ریزی شده که از سال ۱۳۷۷ عملیات احداث آن آغاز شده‌است. این طرح به چهار قسمت تقسیم شده که تاکنون تنها قطعه‌ی چهارم آن راه‌اندازی شده و به بهره‌برداری رسیده است. مسیر آزادراه از تقاطع غیر هم‌سطح با بزرگراه شهید همت و بزرگراه آزادگان شروع و در امتداد دره‌ی کن پس از گذشتن از حاشیه‌ی روستای سولقان به تدریج از منطقه‌ی کوهستانی توچال عبور کرده و سپس توسط تونل بلند تالون به طول ۴۹۰۰ متر این رشته کوه را قطع نموده و در دامنه‌ی شمالی آن در منطقه‌ی دوآب شهرستانک قرار می‌گیرد. (اجرای این قسمت که طول تقریبی آن ۳۲ کیلومتر است باعث می‌شود مسیر فعلی در حدود ۶۰ کیومتر کوتاه‌تر گردد). از آن پس، مسیر به موازات جاده‌ی قدیم کرج - چالوس امتداد می‌یابد و در دره سرهنگ وارد تونل البرز شده و در پل زنگوله خارج می‌شود. سپس با عبور از ارتفاعات البرز به موازات جاده‌ی موجود کرج - چالوس تا شهر چالوس ادامه یافته و در نهایت با یک تقاطع غیر هم‌سطح به کمربندی چالوس - تنکابن متصل می‌شود. تونل البرز در مسیر قطعه‌ی دوم این پروژه قرار داشته که این قطعه از دوآب شهرستانک تا پل زنگوله را شامل می‌شود و ۲۵ کیلومتر طول دارد. تونل البرز که با ۶ هزار و ۳۸۷ متر طول، بزرگترین تونل این آزادراه محسوب می‌شود، در این قطعه قرار دارد (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).

شایان ذکر است که این قسمت از طرح آزادراه تهران - شمال شامل دو تونل در مسیر رفت و برگشت (شرقی و غربی) است که در حال حاضر تونل در مسیر رفت (شرقی) در حال احداث است. موقعیت تونل از لحاظ جغرافیایی در شکل‌های (۴-۱-الف) و (۴-۱-ب) قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱ (ب)- محل قرارگیری تونل در قطعه‌ی دوم طرح آزادراه تهران-شمال است.



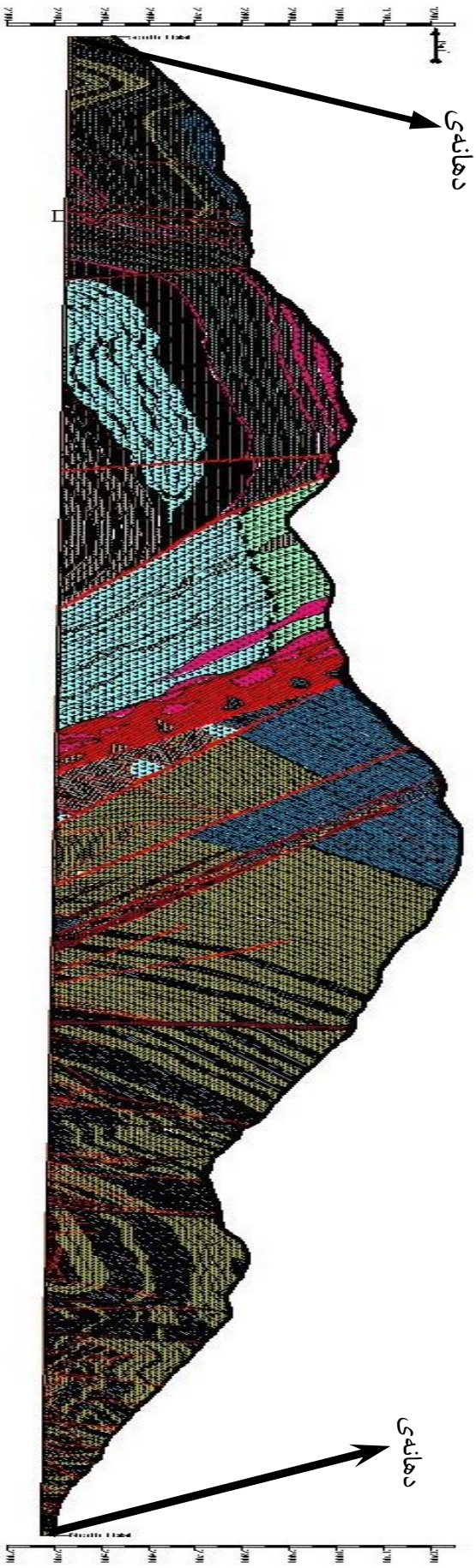
شکل ۴-۱ (الف)- محل قرارگیری تونل البرز در مسیر آزادراه تهران-شمال

۴-۲-۱ وضعیت زمین‌شناسی منطقه

تونل البرز از لحاظ زمین‌شناسی در سازند شمشک قرار دارد. تونل اکتشافی تونل البرز به وسیله‌ی TBM به قطر ۵,۵ متر و به طولی معادل با طول تونل حفاری شده است. شایان ذکر است که تراز تونل اکتشافی حفر شده ۳ متر پایین‌تر از تونل اصلی بوده که خود در گذر سال وضعیت آب موجود در منطقه را بهبود بخشیده و طبق گزارشات گاهی فشار هیدرواستاتیکی وارد بر تونل را به حد صفر رسانیده است. به علت طولانی بودن تونل، حفاری تونل از دو طرف در حال اجراست، به این صورت که در تونل شرقی شرکت جنرال مکانیک از دهانه‌ی جنوبی حفاری را شروع کرده و در حدود سه کیلومتر از حفاری را تا به حال به انجام رسانده است. از دهانه‌ی دیگر تونل نیز شرکت خاک و سنگ حفاری دهانه‌ی شمالی را بر عهده دارد که تاکنون در حدود ۷۰۰ متر از مسیر را حفاری کرده است. برداشت اطلاعات زمین‌شناسی و مکانیک سنگی موجود در مورد دهانه‌ی شمالی پروفیل توسط زمین‌شناسان و مهندسين ایرانی و روسی انجام شده است. اطلاعات تعیین و ثبت شده از مسیر شامل: لیتولوژی سنگ‌ها،

نوع اتصالات موجود بین واحدهای مختلف سنگی، آبدهی و دبی آب زیرزمینی، درجه هوازدگی سنگ‌ها، وجود چین‌خوردگی‌ها و تخریب‌های تکتونیکی، مشخصات چینه‌بندی سنگ‌ها، موارد نشت گاز، درجه درزه‌داری و پارامترهای مربوط و سایر موارد است.

لازم به ذکر که حفاری تونل اکتشافی البرز در بیشتر نواحی محدوده‌ی مورد بررسی پس از حفاری چال و گمانه‌ی پیشگام صورت گرفته است. اغلب چال‌های پیشگام افقی (بدون مغزه‌گیری) به عمق ۲۵ تا ۳۵ متر و گاهی گمانه‌های پیشگام (همراه با مغزه‌گیری) حفاری گردیده است. لیتولوژی مسیر تونل در دهانه‌ی شمالی عمدتاً از توفها (سیاه، سبز، خاکستری)، آندزیت (سبز و خاکستری)، انیدریت، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، آرژیلیت و گابرو تشکیل شده است. مقاومت فشاری تک محوره تخمین زده شده برای این سنگ‌ها از ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال متغیر است. طولانی‌ترین گسل در محدوده ۳۲۴۰ تا ۳۴۳۶ قرار دارد. به دلیل احداث تونل‌های اکتشافی در تراز پایین‌تر، در گذر زمان زه‌کشی آب انجام شده و در این محدوده شرایط آب‌های زیر زمینی از بعد ورود به تونل و فشار وارد بر جبهه کار و کل تونل بحرانی نیست. مقطع طولی تونل در شکل (۴-۲) قابل مشاهده است (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳).



LEGEND																	
	Li-schists		Gypsifer		Sandstone		Grey Tuff		Basalt Tuff		Dipic Dyke		Folden zone/Fault		Alv and Fura Mafica		Banding Trasa
	Amphib		Amphib/Gypsifer Transition		Agb		Green Tuff		Andesitic Basalt		Andesitic S		Banding in Gypsifer/Amphib		Fault zone Fing		Andesitic Tuff

شکل ۴-۲- مقطع طولی مسیر حفاری تونل با توجه به اطلاعات بدست آمده از تونل اکتشافی

۴-۲-۲ ساختار زمین‌شناسی منطقه محل مورد بررسی

محدوده مورد بررسی که برای انجام مطالعات انتخاب شده است از نظر زمین‌شناسی بسیار ناهمگون است. در ابتدای محدوده (در حدفاصل محدوده‌ی ۳۴۰۰ تا ۳۴۳۰) توده سنگ دارای ساختار بسیار پیچیده‌ای است، درحالی‌که در ادامه (در حدفاصل محدوده ۳۴۳۰ تا ۳۵۰۰) از این پیچیدگی کاسته می‌شود.

شرح کامل توده از لحاظ زمین‌شناسی مهندسی به شرح زیر می‌باشد.

در محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۴۰۷ وجود گابرو مشاهده می‌شود. گابرو سنگ آذرین، کریستالیزه و با دانه‌بندی متوسط است. رنگ این سنگ سبز تیره تا سیاه می‌باشد. در مناطق محفوظ مانده، گابرو سنگ محکم و خیلی محکم، و پایدار می‌باشد. تغییرات ثانویه در این محدوده به شکل کلریت، کلسیت و گاهی پیریت بروز می‌کنند. در محدوده ۳۴۰۷ تا ۳۴۱۲ توف با نوارهای نازک مشاهده می‌شود. تناوب نوارهای توفی به رنگ خاکستری و سبز به ضخامت ۳ تا ۷ میلی‌متر دیده می‌شود. توف در قطعه محکم و خیلی محکم است. تغییرات ثانویه در این محدوده به شکل کلریت و پیریت بروز می‌کنند. در محدوده ۳۴۱۲ تا ۳۴۲۸ پهنه گسلی حاوی مواد پرکننده (شامل گابروی برشی، میلونیتی و کلریتی) قرار دارد. در کل طول این محدوده تعداد بسیار زیاد آینه‌های گسلی مشاهده می‌شوند. در پهنه گسلی، از محدوده ۳۴۲۰ به بعد لنزهای ژئوپس درشت‌بلور دیده می‌شوند. در محیط کاملاً آب‌دار و در نتیجه واکنش هیدراتاسیون، آنیدریت تبدیل به ژئوپس شده است (گینیوسکی، ۱۳۸۶). بخشی از ژئوپس توسط آب به فضاهای خالی موجود در گسل منتقل و منجر به ایجاد لنزهایی با ابعاد ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر تا حدود ۱ تا ۱/۵ متر شده است. درون فضاهای خالی کریستال‌های شفاف با ابعاد تا ۱۲ تا ۱۵ سانتی‌متر مشاهده می‌شوند. در این پهنه گسلی به دفعات ریزش سنگ و گیرکردن سپر و کله حفار دستگاه TBM در زمان حفاری تونل اکتشافی اتفاق افتاده است. بیشتر این ریزش‌ها در مجاورت مرزهای شمالی و جنوبی گسل (یعنی جایی

که بیشترین آبدهی وجود داشت) اتفاق می افتاد. شرایط دشوار زمین شناسی مهندسی این ناحیه باعث تاخیر بیش از ۳ ماهه در پیشروی تونل اکتشافی شده است.

بعد از پهنه گسلی، در محدوده ۳۴۲۸ تا ۳۴۳۲ ژئوپس درشت بلور قرار دارد. درون ژئوپس لندهای گل نرم به ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتی متر مشاهده می شوند. این مساله نشان دهنده این است که در محیط آبدار آنیدریت به ژئوپس بوجود آمده است. در حال حاضر، توده ژئوپسی نقش صفحه محافظتی در قبال نفوذ آب به توده آنیدریت و تبدیل آن به ژئوپس را ایفا می کند. بعد از ژئوپس، در محدوده ۳۴۳۲ تا ۳۵۰۰ آنیدریت قرار دارد. آنیدریت سنگ متراکم، ریزدانه و با لایه بندی متوسط است. آنیدریت در قطعه سنگ نسبتاً نرم (۲۰ تا ۳۵ مگاپاسکال) است، لیکن در توده الاستیک، مقاوم، کم درزه و پایدار می باشد. درجه درزه داری آن خیلی کم است (RQD = 95-100%). رنگ آنیدریت از خاکستری روشن (تقریباً سفید) تا خاکستری و خاکستری تیره (تقریباً سیاه) تغییر می کند. تیرگی رنگ آنیدریت احتمالاً بخاطر وجود ماده آلی است. نشت گاز در محیط آنیدریتی شاید بخاطر وجود ماده آلی در آن باشد. در زمان شکستن مغزه های آنیدریت تیره رنگ، بوی گاز H_2S متصاعد می شود. این گاز درون روزنه های بسیار ریز محبوس است. در زمان تخریب سنگ، گاز آزاد می شود. چنین فرآیندی هنگام حفاری با دستگاه TBM نیز صورت می گیرد. هنگام حفاری تونل، غلظت نشت گاز H_2S در مجاورت سینه کار به ۳۰-۵۰ PPM می رسد، لیکن ۱۰ تا ۱۵ دقیقه پس از اتمام حفاری غلظت گاز صفر می شود (گینیوسکی، ۱۳۸۶).

مقاومت فشاری تک محوره انواع سنگ‌های موجود در محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ (بر حسب

مگاپاسکال) به شرح ذیل می‌باشد (گینیوسکی، ۱۳۸۶):

۶۰ تا ۷۳	گابرو در مناطق محفوظ مانده
۲ تا ۲۰	گابرو در پهنه گسلی
۶۷ تا ۱۰۵	توف راه‌راه
۷ تا ۱۱	ژیپس
۷ تا ۱۳	آنیدریت در نزدیکی پهنه گسلی
۲۴ تا ۴۷	آنیدریت در مناطق محفوظ مانده

۳-۲-۴ درجه درزه‌داری توده سنگ

در حد فاصل محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ بر روی شبکه‌ی استریونت ۴ دسته درزه تعیین شده

است. مشخصات دسته درزه‌ها در جدول (۴-۱) ارایه شده است.

جدول ۴-۱ مشخصات سامانه‌های دسته درزه (گینیوسکی، ۱۳۸۶)

زاویه بین خط امتداد درزه‌ها و محور تونل (زاویه تلاقی)	مشخصات سیستم درزه‌ها			سیستم درزه‌ها
	زاویه شیب	جهت شیب	امتداد	
۰ - ۳۵°	۳۵ - ۵۰°	۱۵۵ - ۱۹۰°	۲۴۵ - ۲۸۰°	Ia
۶۵ - ۹۰°	۲۰ - ۴۰°	۲۶۵ - ۳۰۵°	۱۷۵ - ۲۱۵°	Ib
۶۰ - ۹۰°	۴۵ - ۸۰°	۲۵۰ - ۳۱۰°	۱۶۰ - ۲۲۰°	II
۷۰ - ۹۰°	۰ - ۱۵°	۲۶۰ - ۲۹۰°	۱۷۰ - ۲۰۰°	III
۶۰ - ۹۰°	۴۵ - ۸۵°	۷۰ - ۱۲۰°	۳۴۰ - ۰۳۰°	IV

درجه مناسب بودن سمت‌گیری سیستم‌های درزه‌ها نسبت به محور تونل براساس طبقه‌بندی بنیاوسکی

در جدول (۴-۲) ارایه شده است:

جدول ۴-۲ موقعیت سامانه درزه‌ها نسبت به محور تونل (گینیوسکی، ۱۳۸۶)

درجه مناسب بودن امتداد سیستم درزه‌ها	موقعیت سیستم دسته درزه‌ها نسبت به محور تونل			سیستم دسته درزه‌ها (آزیموت و زاویه شیب)	
	موازی بر محور تونل (زاویه تلاقی 0-45°)	عمود بر محور تونل (زاویه تلاقی 45-90°)			
	زاویه شیب	آزیموت شیب با جهت حفاری تطابق ندارد، زاویه شیب	آزیموت شیب با جهت حفاری تطابق دارد، زاویه شیب		
مناسب	35-50°	—	—	Ia	Az245-280°/35-50°
مناسب	—	—	20-40°	Ib	Az175-215°/20-40°
خیلی مناسب	—	—	45-80°	II	Az160-220°/45-80°
مناسب	—	—	0-15°	III	Az170-200°/0-15°
مناسب	—	45-85°	—	IV	Az340-030°/45-85°

در جدول (۲-۳) مشخص است که سیستم دسته درزه‌ای موجود در محدوده مورد بررسی دارای موقعیت مناسب و خیلی مناسب نسبت به محور تونل می‌باشند. از لحاظ عرض بازشدگی درزه‌های تمامی سیستم‌ها به درزه‌های گروه یک (بیشتر از ۱۰۰ میلی‌متر)، گروه دو (۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر) و گروه سه (کمتر از ۵ میلی‌متر) تقسیم‌بندی می‌شوند (گینیوسکی، ۱۳۸۶).

در حدفاصل محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ تعداد ۶۶ درزه برداشت شده است. از این تعداد درزه‌ها نسبت درصدی زیر را می‌توان در نظر گرفت:

دسته درزه‌های گروه ۱	۴/۵ درصد
دسته درزه‌های گروه ۲	۱۶/۷ درصد
دسته درزه‌های گروه ۳	۷۸/۸ درصد

تقسیم‌بندی درزه‌ها براساس عرض بازشدگی در هر سیستم در جدول (۳-۴) ارائه گردیده است:

جدول ۴-۳ تقسیم‌بندی درزه‌ها براساس عرض بازشدگی (گینوسکی، ۱۳۸۶)

عرض بازشدگی (میلیمتر)	گروه درزه‌ها از لحاظ عرض بازشدگی	سیستم دسته درزه‌ها
5-100	II	Ia Az350-035°/30-60°
< 5	III	
< 5	III	Ib Az345-030°/70-90°
5-100	II	II Az240-290°/20-45°
< 5	III	
< 5	III	III Az155-190°/35-70°
< 100	I	IV Az80-110°/45-65°
5-100	II	
< 5	III	
5-100	II	درزه‌های بدون سیستم
< 5	III	

درزه‌های بدون سیستم دسته درزه و اتفاقی که در هیچ یک از سیستم‌ها گنجانیده نشده ۱۳/۶ درصد از کل درزه‌های برداشت شده را تشکیل می‌دهند.

درجه درزه‌داری توده‌سنگ‌ها در محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ بر اساس استانداردهای روسی (СНиП 2.02.02-85 و II-655-77) به شرح زیر می‌باشد:

خیلی کم	۶۶ متر (۶۶ درصد)
کم در بعضی جاها متوسط	۶ متر (۶ درصد)
زیاد در بعضی جاها متوسط	۱۰ متر (۱۰ درصد)
خیلی زیاد	۱۸ متر (۱۸ درصد)

بر اساس درجه قابل قبول بودن امتداد درزه‌ها نسبت به محور تونل تمامی سیستم‌های دسته درزه‌ها بر اساس تناسب درصدی به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

خیلی مناسب	۲۹/۹ درصد
مناسب	۷۰/۱ درصد

بر اساس درجه درزه‌داری در حد فاصل محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ پنج منطقه با مقادیر متفاوت RQD تعیین گردیده است. مشخصات این مناطق در جدول (۴-۴) ارائه شده است.

جدول ۴-۴ وضعیت شاخص کیفیت توده سنگ (گینیوسکی، ۱۳۸۶)

فاصله‌داری درزه‌ها (سانتی‌متر)	RQD	حداصل (محدوده)
10-30 (20)	45-55	3+400 ~ 3+410
3-10 (6.5)	10-15	3+410 ~ 3+428
30-40 (35)	75-80	3+428 ~ 3+434
50-130 (90)	95-100	3+434 ~ 3+500

کلیه پارامترهای اصلی درزه‌داری توده در حدفاصل محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ در جدول (۳-۵) ارائه می‌شوند.

۴-۲-۴ پایداری توده سنگ‌ها

پایداری توده سنگ‌ها بر اساس طبقه‌بندی بین‌المللی بنیواسکی (RMR) و استاندارد روسی - BCH 49-86 ارزیابی شده است. در ابتدای محدوده (در پهنه گسلی و در ناحیه تاثیر گسلی) نتایج کسب شده توسط دو روش مذکور تقریباً یکسان هستند. درحالی که در ژئوپس و آنیدریت نتایج پایداری دو روش فوق تفاوت‌های زیادی با هم دارند.

• بر اساس طبقه‌بندی بنیواسکی (RMR):

۶۶ متر (۶۶ درصد)	توده سنگ خوب (کلاس ۲ توده سنگ)
۶ متر (۶ درصد)	توده سنگ خوب - متوسط (کلاس ۲-۳ توده سنگ)
۱۰ متر (۱۰ درصد)	توده سنگ متوسط - ضعیف (کلاس ۳-۴ توده سنگ)
۱۸ متر (۱۸ درصد)	توده سنگ ضعیف - خیلی ضعیف (کلاس ۴-۵ توده سنگ)

در حدفاصل محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ رده‌های تحکیم موقت زیر طراحی شده است:

۱ - محدوده ۳۴۰۰ تا ۳۴۲۷/۱ - رده VI_b - مش، میل مهار، شاتکریت (به ضخامت ۱۴ سانتی متر و شعاع ۳۶۰ درجه)، قاب فلزی با فواصل ۷۵ سانتی متر و همچنین تحکیم تکمیلی توده بوسیله تزریق ملات سیمان و فوم

۲ - محدوده ۳۴۲۷/۱ تا ۳۴۳۰/۵ - رده V_b - مش، میل مهار، شاتکریت (به ضخامت ۱۰ سانتی متر و شعاع ۳۶۰ درجه) و قاب‌های فولادی با فواصل ۷۵ سانتی متر

۳ - محدوده ۳۴۳۰/۵ تا ۳۴۴۲/۴ - رده II_a - مش، میل مهار، شاتکریت (به ضخامت ۵ سانتی متر و شعاع ۳۶۰ درجه)

۴ - محدوده ۳۴۴۲/۴ تا ۳۵۰۰ - رده II_b - مش و شاتکریت (به ضخامت ۵ سانتی متر و شعاع ۳۶۰ درجه) (گینیوسکی، ۱۳۸۶).

۴-۲-۵ تعیین امتیاز رده بندی RMR و کلاس توده سنگ بر اساس طبقه بندی بنیادوسکی (RMR)

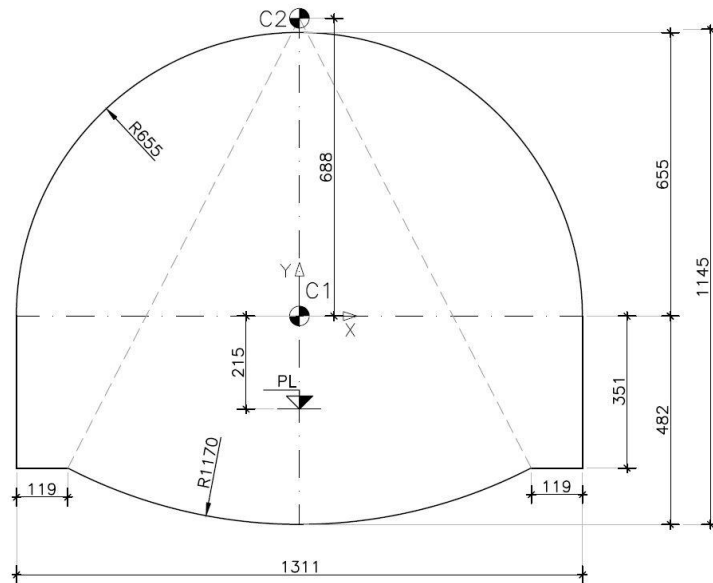
با توجه به بحث‌های انجام گرفته و بررسی‌های انجام شده، در جدول (۴-۵) به تعیین امتیاز RMR و کلاس توده سنگ پرداخته شده است.

جدول ۴-۵ تعیین مشخصات توده سنگ اساس طبقه‌بندی بنیادوسکی (گینیوسکی، ۱۳۸۶)

پارامترها	حدفاصل (محدوده)			
	3400~3410	3410~3428	3428~3434	3434~3500
مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	51-74	15-30	25-37	29-35
امتیاز	13-17	2-4	3-5	3-4
RQD	45-55	10-15	75-80	95-100
امتیاز	11-13	3	17-18	20
فاصله‌داری درزه‌ها (cm)	10-30 (20)	3-10 (6.5)	30-40 (35)	50-130 (90)
امتیاز	8	6	10	15
وجود آب زیرزمینی	چکه شدید و جریانی	چکه شدید و جریانی	فاقد آبدهی	فاقد آبدهی
امتیاز	0	0	10	10
امتداد درزه‌ها	مناسب	100 %	60 %	64 %
	خیلی مناسب	—	40 %	36 %
امتیاز	—	—	100 %	—
امتیاز	-2	-1	0	-1
طول متوسط درزه‌ها (m)	3.2	3.7	3.2	5.1
امتیاز	2	2	2	2
عرض متوسط بازشدگی (mm)	9	15.8	2.7	1.5
امتیاز	0	0	1	1
مشخصات دیواره درزه‌ها	صیقلی	46 %	—	17 %
	زبر	—	—	15 %
	موج دار	—	83 %	68 %
	با آینه گسلی	54 %	17 %	—
امتیاز	1	4	3	4
مواد پرکننده درزه‌ها	e - 45% a,b - 31% c,b,a - 24%	a - 17% a,b - 83%	e - 100%	e - 97% b - 3%
امتیاز	3	1	6	6
درجه هوازدگی	ضعیف	ضعیف	فاقد هوازدگی	فاقد هوازدگی
امتیاز	3	3	6	6
RMR	39-45	20-22	58-61	66-67
کلاس توده سنگ	III-IV	IV-V	II-III	II
تعداد سیستم درزه‌ها	4	4	4	4
پارامتر J _v	18-21	30-32	10-12	7-9

۳-۴ حفاری و سامانه نگهداری

حفاری تونل به روش آتشیاری کنترل شده انجام می‌گیرد. شکل مقطع تونل نعل اسبی بوده و در دو مقطع، حفاری انجام می‌شود. ابتدا قسمت نیم‌دایره‌ی بالایی حفر می‌شود و پس از نصب سامانه‌های نگهداری اولیه و در صورت نیاز نگهداری اصلی و پایدارسازی مقطع حفاری شده، قسمت پایین حفر می‌شود. به طور کلی برای پایدارسازی تونل در طول مسیر از ۴ نوع^{۶۱} سامانه نگهداری استفاده می‌شود که متناسب با وضعیت توده سنگ مسیر تونل، یکی از انواع نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی مشاور طرح سامانه‌های نگهداری شامل میل مهار^{۶۲}های ۴/۵ متری، لوله گذاری^{۶۳} و میله گذاری^{۶۴}، شاتکریت^{۶۵} و مش فولادی^{۶۶} و لتیس گیردر^{۶۷} طراحی کرده است. ضخامت پوشش بتی متغیر بوده و گاهی به ۶۰ سانتی‌متر هم می‌رسد. عملیات پیش‌تحکیم چتری و تزریق و تحکیم در نواحی گسلی و توده سنگ ضعیف در طراحی دیده شده است.



شکل ۳-۴ مقطع عرضی تونل (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳)

^{۶۱} Type

^{۶۲} Rock bolt

^{۶۳} Forepoling

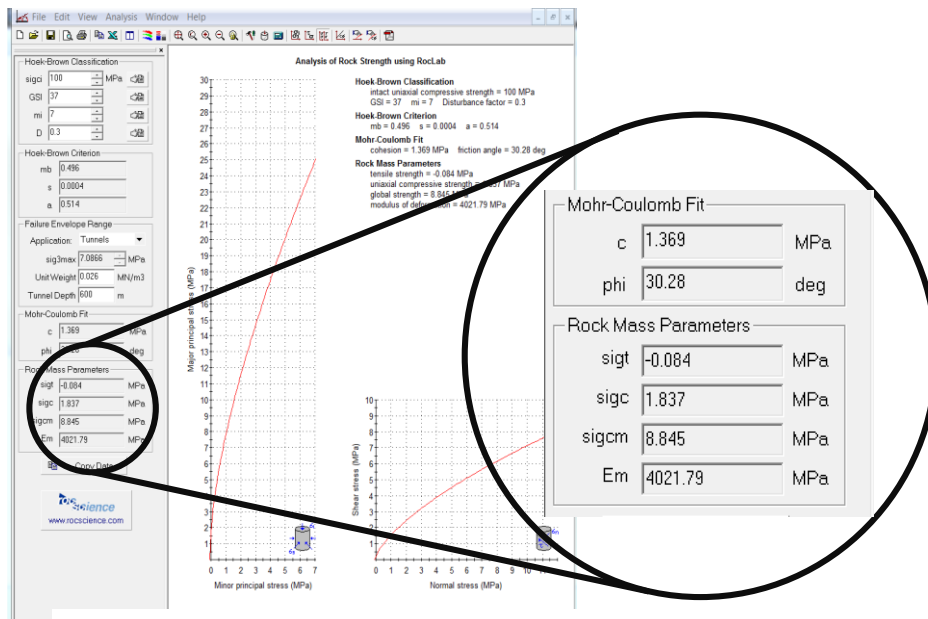
^{۶۴} Spilling

^{۶۵} Shotcrete

^{۶۶} Steel Wire Mesh

^{۶۷} Lattice Girder

همچنین در محل‌هایی که آب وجود دارد عملیات زهکشی انجام می‌شود (البته همانطور که قبل‌تر بیان شد اطلاعات مربوط به تونل اکتشافی است که ۳ متر پایین‌تر از تراز تونل اصلی است و در گذر زمان آب زهکشی شده و شرایط آب زیرزمینی بهبود یافته‌است). در شکل (۴-۳) جزییات مقطع تونل آورده شده است (جنرال مکانیک، ۱۳۹۳). پارامترهای ژئومکانیکی منطقه‌ی مورد بررسی در جدول (۴-۶) با توجه به مقادیر بدست آمده از نرم‌افزار RocLab (شکل (۴-۴)) آورده شده است.



شکل ۴-۴ پارامترهای بدست آمده از نرم‌افزار RocLab

جدول ۴-۶ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ محل مورد بررسی

مقدار	پارامتر
۲۶۰۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱,۳۷	چسبندگی (مگاپاسکال)
۳۰,۲۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۴	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)
۰,۲۵	ضریب پواسون

در رابطه با بدست آوردن نسبت تنش افقی به قائم (K) روابطی وجود دارد که در جدول (۴-۷) سه تا از پر کاربردترین این روابط آورده شده است. با استفاده از رابطه ترازقی، عدد بدست آمده برای نسب تنش افقی به قائم، ۰,۳۳۴ بوده در حالیکه رابطه شئوری مقدار ۰,۴۳۱ و رابطه هوک و براون مقدار ۰,۴۶۶ تا ۳ را برای نسبت تنش افقی به قائم برآورد کرده است. دو رابطه ترازقی و شئوری از جمله روابطی هستند که برای تعیین نسب تنش افقی به قائم، کاربرد دارد.

جدول ۴-۷ برآورد نسبت تنش‌های افقی به قائم

مقدار ضریب K	فرمول	رابطه
۰,۳۳۴	$K = \frac{\nu}{1 - \nu}$	ترازقی
۰,۴۳۱	$K = 0.33 + 9/5 E_h \left(0.001 + \frac{1}{Z} \right)$	شئوری
۰,۴۶۶ - ۳	$\frac{100}{Z} + 0.3 < K < \frac{1500}{Z} + 0.5$	هوک و براون
$E=4\text{GPa}, \nu=0.25, Z=600\text{m}$		

بنابراین برای یافتن مقدار نسبت تنش افقی به قائم، میانگین مقادیر حاصل از روابط ترازقی، شئوری و حداقل هوک و براون بدست آمده و از آن به عنوان مقدار نسبت تنش افقی به قائم در مدل‌سازی استفاده گردیده است. این مقدار برابر با ۰,۴۱۰ می‌باشد و در پارامترهای مربوط به شرایط زمین در فرآیند مدل‌سازی قرار گرفته است.

فصل پنجم : مدل سازی عددی و تحلیل نتایج

۵-۱ مقدمه

تونلسازی در مصالح ضعیف معمولاً موجب به وجود آمدن گسیختگی‌های موضعی در محدوده‌ی فاقد سامانه نگهدارنده و همچنین ایجاد شرایط ناپایدار در سینه کار تونل می‌شود. از آنجا که شرایط زمین و شرایط پشت سینه کار تونل بسیار پیچیده و غیر قابل رویت است، مدل عددی سه بعدی یکی از راه‌حل‌هایی است که توسط آن می‌توان با اندازه‌ی مناسب این مشکلات را نشان داده و بررسی با جزییات کامل را روی سامانه‌های نگهدارنده و پیش‌تحکیم انجام داد. مدل‌سازی عددی می‌تواند دیدگاه مناسب و موثری را در مورد عملکرد تاثیر تقویت کننده‌ها و نگهدارنده‌ها بر روی پایداری تونل فراهم کند.

محدوده‌ی مورد مطالعه با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبلی در توده‌سنگ ضعیف و سست واقع شده است. با توجه به جنس مصالح دربرگیرنده‌ی تونل و شرایط موجود، یکی از مناسب‌ترین روش‌های مدل‌سازی برای تحلیل چنین تونلی، با در نظر گرفتن رفتار پیوسته محیط، استفاده از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار سه بعدی FLAC است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای این تحلیل موهر - کلمب است.

۵-۲ چگونگی مدل‌سازی سامانه‌ی چتری

با توجه به خصوصیات و شرایط زمین‌شناسی منطقه که در فصل ۴ این مطالعه بیان گردید، مصالح دربرگیرنده‌ی تونل سست، ضعیف و کاملاً خرد شده است که با توجه به مباحث بیان شده در فصل دوم، سامانه‌ی میله‌گذاری پیشنهاد شده است. با توجه به شرایط بیان شده، روش تفاضل محدود برای انجام تحلیل‌ها برگزیده شده است. نرم‌افزار FLAC 3D یک برنامه تفاضل محدود صریح سه بعدی برای محاسبات مکانیکی است (Itasca, 2005). این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی سه بعدی رفتار سازه‌های خاکی، شبه خاکی، سنگی و غیره را دارد و برای تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل در مطالعه‌ی حاضر برای مدل‌سازی عددی روش چتری، مولفه‌ی پایل^{۶۸} انتخاب گردیده است. علت انتخاب این مولفه، توانایی شبیه‌سازی رفتار برشی لوله‌ها، نیروی محوری و لنگر خمشی وارد بر آنها می‌باشد. در این مطالعه تاثیر مخلوط دوغاب در اطراف لوله‌ها در یک حالت در نظر گرفته شده و با توجه به آن تحلیل حساسیت در مورد پارامترهای دیگر انجام گرفته است.

با توجه به اینکه در این مطالعه سامانه پیش تحکیم پیشنهادی استفاده از میل مهارهای تزریقی است، و چون در نرم افزار 3D FLAC استفاده از مولفه‌ی کابل برای شبیه‌سازی میل مهارها مرسوم است، لذا تبدیل خواص مکانیکی میل مهارهای تزریقی سامانه چتری به پارامترهای مورد نیاز مولفه‌ی شمع ضروری است. با توجه به توضیحات داده شده در قسمت‌های قبل، مولفه‌ی کابل قادر به تحمل گشتاورهای خمشی نبوده و تنها قادر به تحمل نیروهای محوری و کششی است. بنابراین لازم است برای شبیه‌سازی میله‌ها از مولفه‌ی شمع استفاده گردد. سایر میل‌مهارهای شعاعی بر طبق دستورالعمل نرم-افزار با استفاده از مولفه‌ی کابل شبیه‌سازی شده است.

لازم به ذکر است که در این قسمت از تحقیق حاضر، در کنار هدف اصلی تحقیق که تحلیل عددی سامانه‌ی پیش‌تحکیم تونل آزادراه تهران - شمال بوده است، به مقایسه‌ی روش میله گذاری پیشنهادی توسط مهندسين مشاور با روش پیشنهادی سامانه‌ی لوله گذاری ارائه شده در این تحقیق پرداخته شده است، لذا لازم است تا از بین نمونه‌های تحقیق انجام گرفته‌ی این سامانه در داخل کشور، خواص مکانیکی لوله‌های مورد نیاز پیدا شده و در این تحقیق با جزییات استفاده گردد. برای شبیه‌سازی سامانه لوله گذاری که یکی از زیرگروه‌های سامانه چتری است، لوله‌ی مورد استفاده، لوله‌ی

^{۶۸} Pile Element

شرکت مانسیون^{۶۹} بدون درز با قطر ۹۰ و ضخامت جداره‌ی ۷/۲ میلی متر با پارامترهای مقاومتی فولاد در نظر گرفته شده است.

پارامترهای هندسی و مقاومتی مولفه‌ی پایل به صورت ترکیبی (دوغاب، لوله و مخلوط دوغاب و سنگ در برگیرنده ((سویلکریت)) توسط نرم افزار Section Builder محاسبه شده است (CSI, 2002).

۵-۳ مدل سازی مراحل مختلف حفاری و نصب سامانه‌های نگهداری

حفاری تونل به صورت دو مرحله ای بوده که در آن ابتدا قسمت بالای مقطع و سپس قسمت پایین مقطع حفاری می شود. فاصله ی مقطع بالایی از مقطع پایینی در حال حاضر طبق نظر طراح و اساس شرایط اجرایی پروژه در این مرحله از حفاری در حدود ۱/۵ کیلومتر است. به منظور تامین نگهداری از روش پیش تحکیمی میله گذاری، که زیر گروهی از سامانه های چتری است، سامانه نگهداری اولیه میل مهارهای شعاعی، شاتکریت و لتیس گیردر استفاده شده است. در این تحقیق میل مهارها توسط مولفه‌ی کابل و سامانه نگهداری اولیه توسط مولفه‌ی پوسته شبیه سازی شده‌اند.

در مدل اولیه که طرح ارایه شده از طرف مهندس مشاور است، خصوصیات روش میله گذاری به شرح زیر است:

- قطر میل مهارها: ۲۵ میلیمتر
- طول میل مهارها: ۶ متر
- طول همپوشانی: ۳ متر
- زاویه ی قرار گیری نسبت به افق در ردیف اول: یکی درمیان ۱۵ و ۳۰ درجه
- زاویه ی قرار گیری نسبت به افق در ردیف دوم: ۱۵ درجه

^{۶۹} Mansion Pipe

- فاصله ی دو ردیف از هم: ۵۰ سانتی متر

- فاصله ی بین میل مهار ها: ۸۰ سانتی متر

نسبت آب به سیمان ($\frac{W}{C}$) در دوغاب بین ۰/۴۵ و ۰/۵۵ متغیر است که بر اساس گزارش طراح

برای مدل سازی ۰/۵ در نظر گرفته شده است

جدول ۵-۱ خصوصیات اجزای سامانه نگهداری و پیش تحکیم (GeoData, 2015)

مقدار	مشخصات	اجزای سامانه نگهداری
۲۰	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	شاتکریت
۲۱	مدول یانگ E (گیگاپاسکال)	
۳۲۰	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	لتیس گیردر
۲۰۰	مدول یانگ E (گیگاپاسکال)	
۱۹۰	مقاومت کششی (کیلونیتون)	میل مهار ها
۲۰۰	مدول یانگ E (گیگاپاسکال)	

میل مهار های بکار رفته در دیواره به صورت شعاعی دارای قطر ۲۵ میلیمتر با طول ۴/۵ متر

می باشند که با فاصله داری ۱/۲۵ متر از هم به محض اتمام حفاری و پس از اجرای شاتکریت در جای

خود قرار می گیرند. میل مهار ها در هر مرحله با جانمایی متفاوت (شکل (۵-۳)) برای پایدارتر شدن

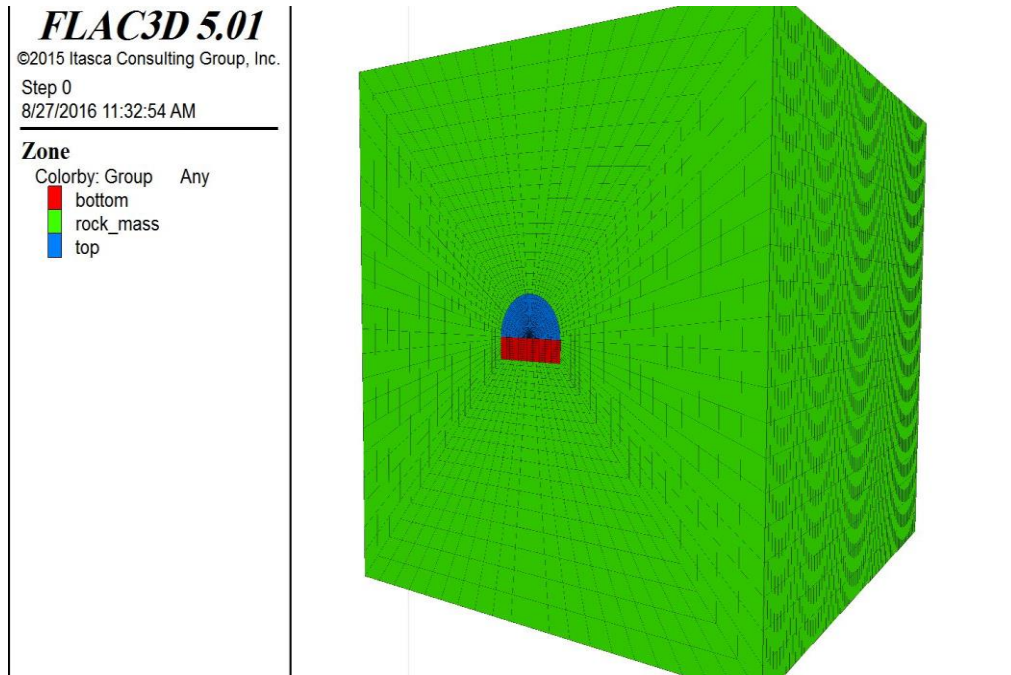
مقطع نصب می شوند. شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتی متر به صورت توام با نصب لتیس گیردرها پاشیده

می شود. مشخصات اجزای سامانه نگهدارنده ی اولیه و میل مهار ها در جدول (۵-۱) قابل مشاهده

هستند.

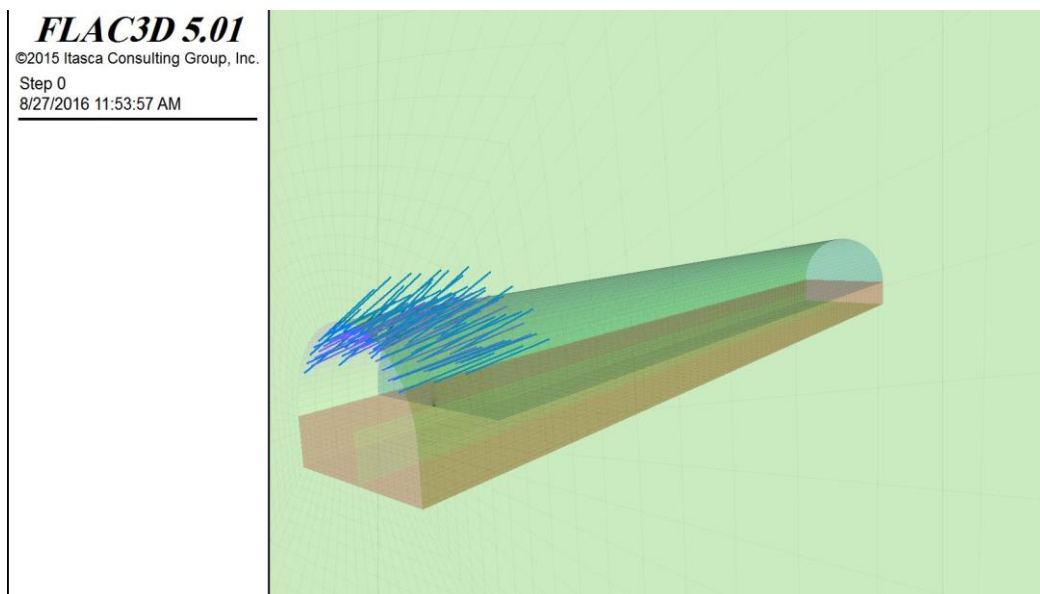
روند کلی مدل سازی به شرح زیر است:

ابتدا مدلی در محیط نرم افزار FLAC به ابعاد $90 * 45 * 45$ (ارتفاع، عرض و طول) متر ساخته شد. تونل مذکور به شکل نعل اسبی با دهانه ی $13/6$ متر و ارتفاع $10/3$ متر و روباره ی 600 متر شبیه سازی شده است. نمایی از مدل سازی و مش بندی مدل در شکل (۵-۱) قابل مشاهده است.



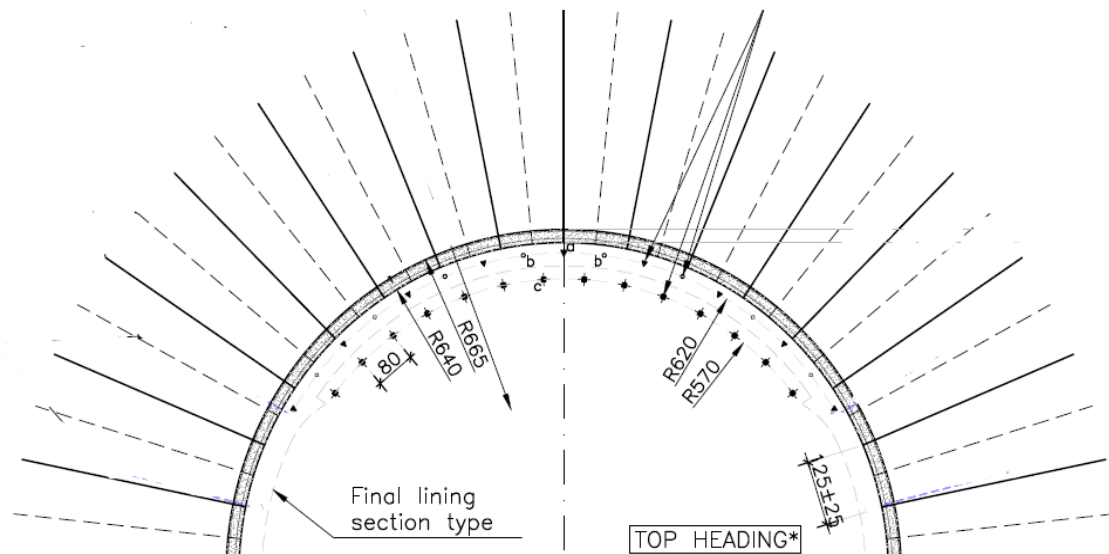
شکل ۵-۱ شمایی از بلوک مدل سازی شده

پس از حفاری دو سیکل مجددا عملیات میله گذاری برای بوجود آمدن هم پوشانی به طول 3 متر انجام می شود. نمایی از نصب پیش تحکیم در تاج تونل در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.



شکل ۵-۲ نمای قرارگیری میله ها در سقف تونل

روش عملکرد در اجرا به این صورت است که ابتدا چالهایی به قطر ۵۱ میلی‌متر روی سطح کار حفر می‌شود. پس از حفر چالها، اقدام به قرار دادن میله‌های ۶ متری با قطر ۲۵ میلی‌متر درون آن می‌شود و پس از آن عملیات تزریق انجام می‌گیرد. این مراحل در مدل‌سازی اعمال شده‌اند. چالها در دو ردیف مطابق شکل (۳-۵) حفاری می‌شوند.



شکل ۳-۵ شکل جانمایی سامانه میله گذاری و میل مهارهای شعاعی (GeoData, 2015)

همانطور که مشاهده شد، در ردیف اول حفاری چالها، یکی در میان دارای زاویه‌های متفاوت هستند، چالهای مشخص شده با حرف (a) دارای زاویه ۳۰ درجه و چالهای مشخص شده با (b) با زاویه ۱۵ درجه حفاری می‌شوند. ردیف دوم ۵۰ سانتی‌متر پایین‌تر از ردیف اول حفاری می‌شود و بر خلاف ردیف اول با زاویه‌ی یکسان حفر می‌شوند. پس از حفر چالهای ردیف دوم با زاویه ۱۵ درجه، میل مهارها در آن جاگذاری شده و تزریق می‌شود. پس از انجام این مراحل اقدام به حفاری مقطع بالایی تونل می‌شود. طول گام‌های حفاری ۱/۲۵ متر بوده و بعد از اتمام حفاری هر سیکل میل مهارها به صورت شعاعی نصب می‌شوند.

میل مهارها در وسط هر سیکل نصب می‌شوند، به این صورت که پس از حفر ۱/۲۵ متر، میل مهارها در فاصله ۰/۶۲۵ متری از جبهه کار به صورت شعاعی نصب می‌شوند. مطابق شکل (۳-۵) فاصله‌ی میل مهارها باهم ۱/۲۵ متر می‌باشد. آرایش میل مهارها همانطور که در شکل (۳-۵) قابل

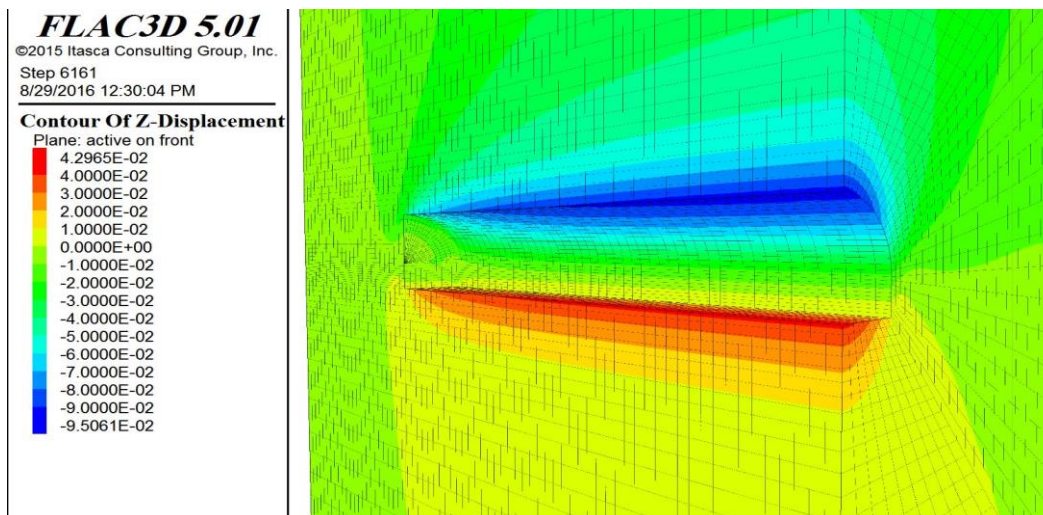
مشاهده است، به صورت سیکل تکراری نبوده و به اندازه ی نصف فاصله داری شعاعی میل مهارها، تغییر محل می دهند (خط های پر رنگ اطراف تونل میل مهارهای یک سیکل و خط چین ها میل مهارهای سیکل بعدی هستند) که در نتیجه آن، شرایط بهتری برای پایداری برقرار می شود. لازم به ذکر است که جنس میل مهارها و میله ها یکسان بوده اما از لحاظ طولی باهم تفاوت دارند، میله ها ۶ متر و میل مهارها ۴/۵ متر هستند.

۴-۵ بررسی لزوم استفاده از سامانه پیش تحکیم

استفاده از سامانه های پیش تحکیم هزینه بر و زمان بر بوده و باید مطابق با نیازهای پروژه توسط مهندس مشاور تشخیص داده شود. پس برای استفاده از ابتدا لازم است بررسی های مربوطه انجام شود و در لزوم استفاده از آنها تعیین گردد. در اینجا بررسی ها بر اساس مقادیر جابجایی رخ داده و سطوح خطر ساکورایی انجام شده است.

۴-۵-۱ مدل سازی بدون سامانه پیش تحکیمی

در این حالت عملیات حفاری مدل بدون استفاده از سامانه های پیش تحکیمی و پیش-نگهداری، برای مشخص شدن وضعیت تعادل و جابجایی های رخ داده در اثر عملیات حفاری، انجام گرفته است. در شکل (۴-۵) جابجایی مربوط به ناحیه ی حفاری شده نشان داده شده است. مشاهده می شود که مقادیر جابجایی تا سطح مدل گسترده شده است. بیشترین جابجایی در تاج تونل در طی ۶۰ متر حفاری از تاج تونل برابر با ۹,۵ سانتی متر می باشد و مشخص است که جابجایی در این نقطه بیشترین مقدار را داراست.



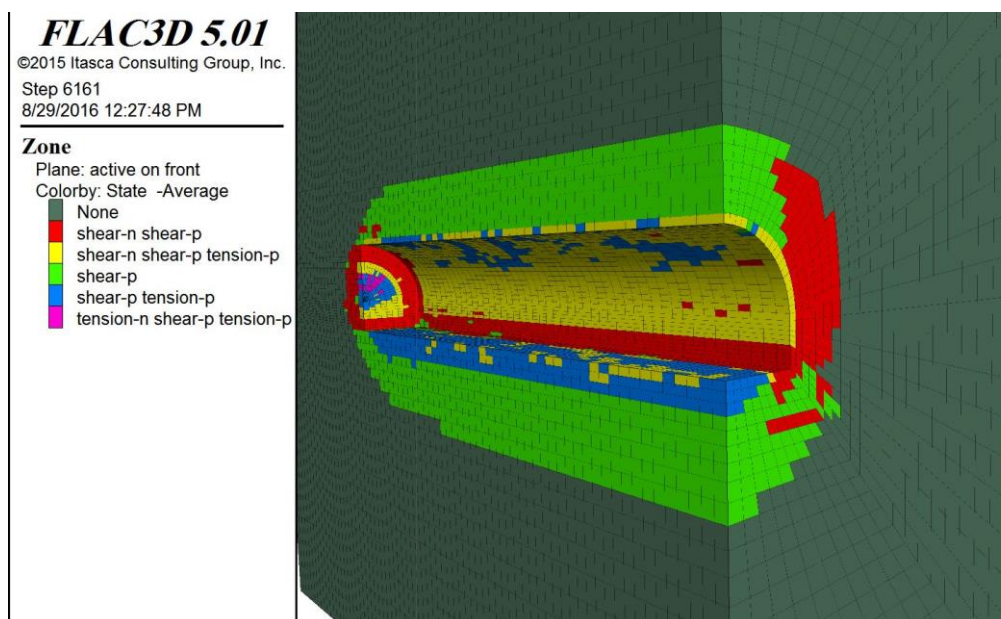
شکل ۴-۵ جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (بدون استفاده از سامانه پیش‌تحکیم)

شکل (۵-۵) ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در پیرامون تونل را نشان می‌دهد. همانطور که

دیده می‌شود وسعت ناحیه‌ی پلاستیک پیرامون تونل منجر به افزایش بار مرده بر روی سامانه

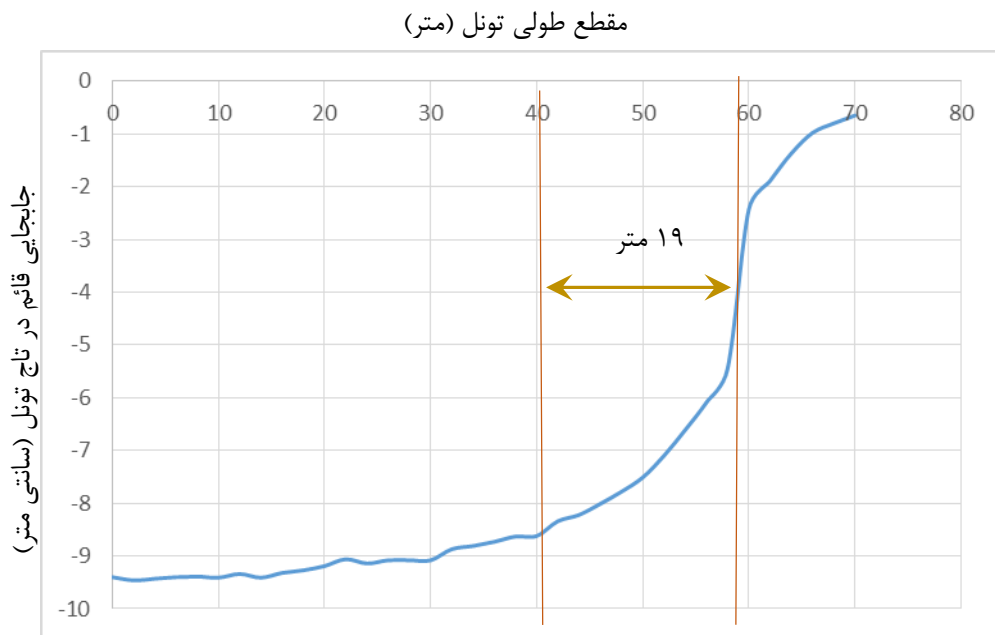
نگهداری تونل می‌شود. این افزایش بار ممکن است باعث بوجود آمدن ناپایداری در جبهه‌کار تونل، با

توجه به شرایط زمین‌شناسی محدوده‌ی مورد نظر گردد (Elyasi et al., 2015).



شکل ۵-۵ نواحی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (بدون سامانه پیش‌تحکیمی)

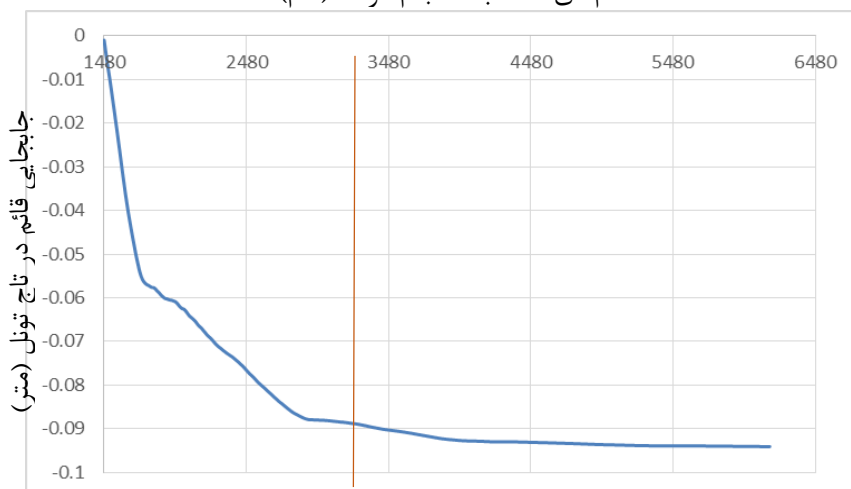
با رسم مقطع طولی جابجایی‌های تونل در مدل فاقد سامانه پیش‌تحکیمی شکل (۵-۶) مشاهده می‌شود که جابجایی‌ها در فاصله ۱۹ تا ۲۰ متری از مرکز تونل به مقدار ثابتی می‌رسند و بنابراین برای بدست آوردن جابجایی‌ها نیاز است تا حدوداً دو برابر این طول (در اینجا ۴۰ متر) حفاری شود.



شکل ۵-۶ جابجایی در مقطع طولی تونل مدل فاقد سامانه پیش‌تحکیمی

مقادیر جابجایی قائم بیان شده در بالا مربوط به تاج تونل در قسمت ورودی بود که بیشترین جابجایی در آن اتفاق افتاده است اما با توجه به پروفیل جابجایی می‌توان مشاهده کرد که جابجایی تاج تونل در ۱۹ متری جبهه کار تونل $8/4$ سانتی‌متر است و قبل آن جابجایی‌ها در راستای قائم یکنواخت شده‌اند. با در نظر گرفتن یک نقطه‌ی نشانه در تاج تونل در دهانه‌ی ورودی، امکان مشاهده‌ی تغییرات جابجایی در تاج تونل در گام‌های مختلف فرآیند تحلیل عددی در شکل (۵-۷) فراهم شده است. در این قسمت مشاهده می‌شود که نقطه‌ی مورد نظر در مراحل ابتدایی جابجایی زیادی داشته و به تدریج به تعادل رسیده است.

گام‌های محاسبات انجام گرفته (گام)



شکل ۵-۷ جابجایی قائم تاج تونل در طول گامهای حفاری در مدل فاقد سامانه پیش‌تحکیمی

۵-۴-۲ مدل‌سازی با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی

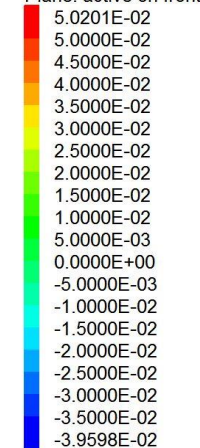
در این حالت ابتدا سامانه پیش‌تحکیم میله گذاری نصب شده و سپس حفاری صورت گرفته است. آرایش میله‌ها در بخش (۵-۴) بیان شد و مطابق با آن مدل ساخته شده است. با بررسی جابجایی‌های قائم روی تاج تونل در شکل (۵-۸) مشاهده می‌شود که تاج به مقدار $3/95$ سانتی‌متر در راستای قائم جابجایی داشته است که این همان مقدار بیشینه است. شکل (۵-۹) نشان دهنده ناحیه‌ی

FLAC3D 5.01

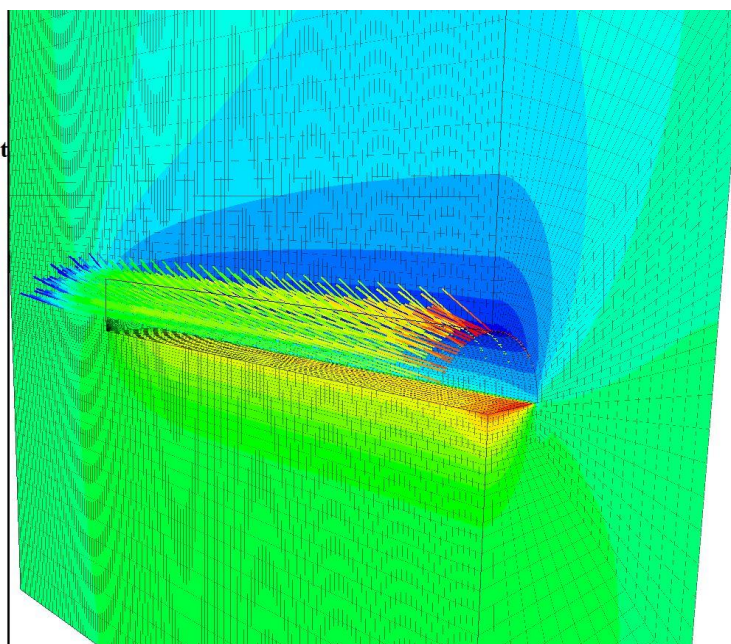
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 78366
8/29/2016 1:26:02 PM

Contour Of Z-Displacement

Plane: active on front

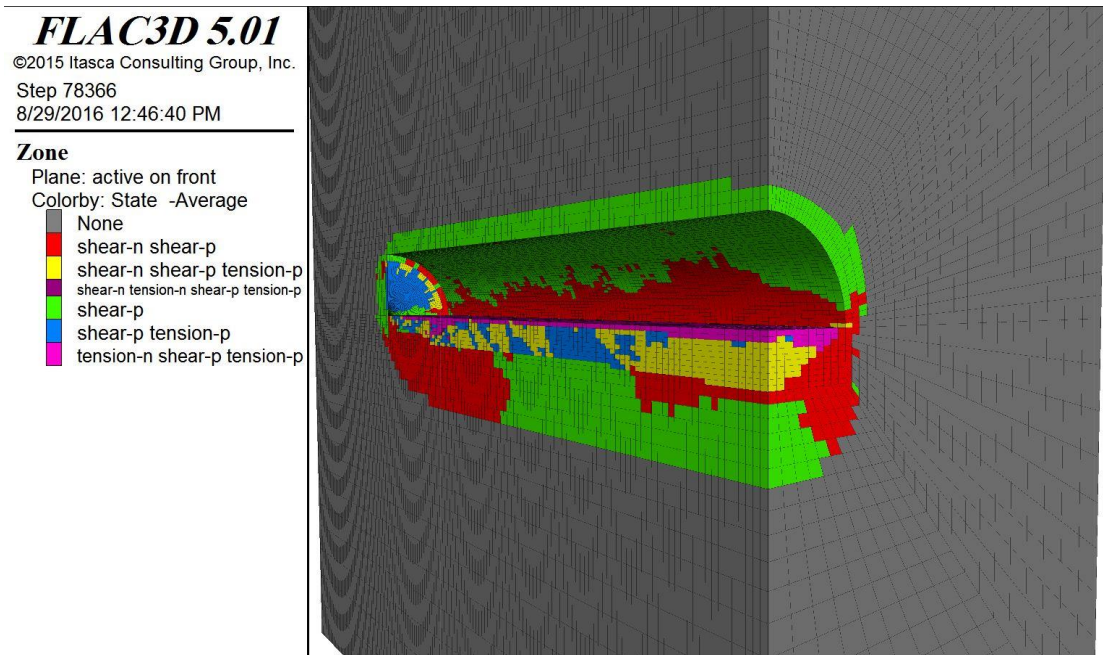


Pile Displacement



شکل ۵-۸ جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیم)

پلاستیک به وجود آمده در اطراف تونل با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی است. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی جابجایی به مقدار زیادی کنترل شده و بار مرده‌ی روی تونل تا حد زیادی کاهش یافته است. با توجه به شکل (۵-۸) اثرات این کنترل جابجایی قائم نه تنها در تاج تونل، بلکه در تمامی نقاط موجود در مدل قابل مشاهده است.



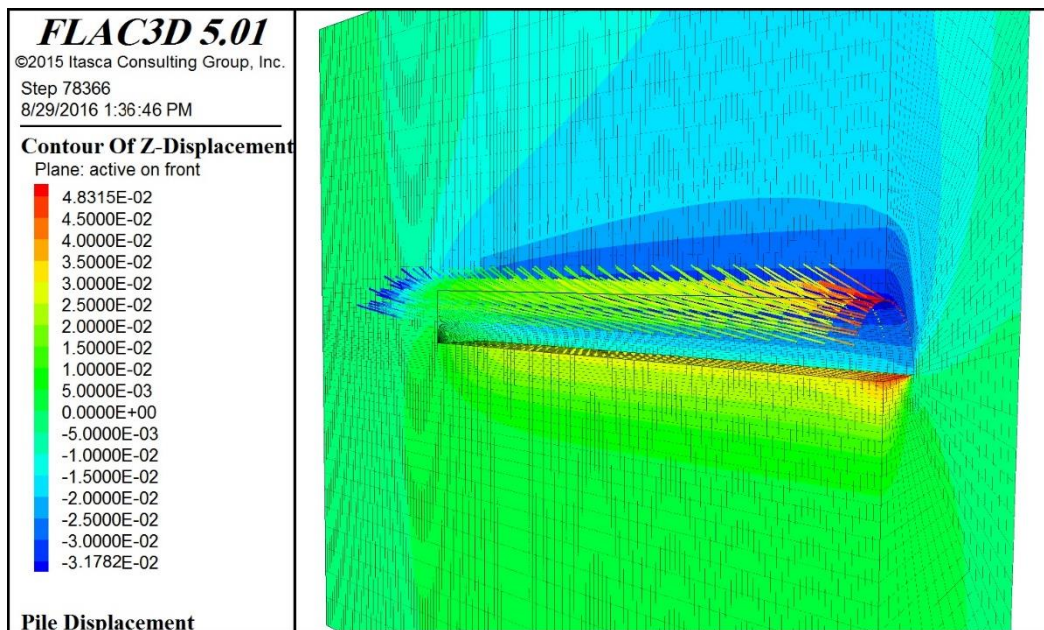
شکل ۵-۹ ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی)

۵-۴-۳ مدل‌سازی با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی و میل مهارهای شعاعی

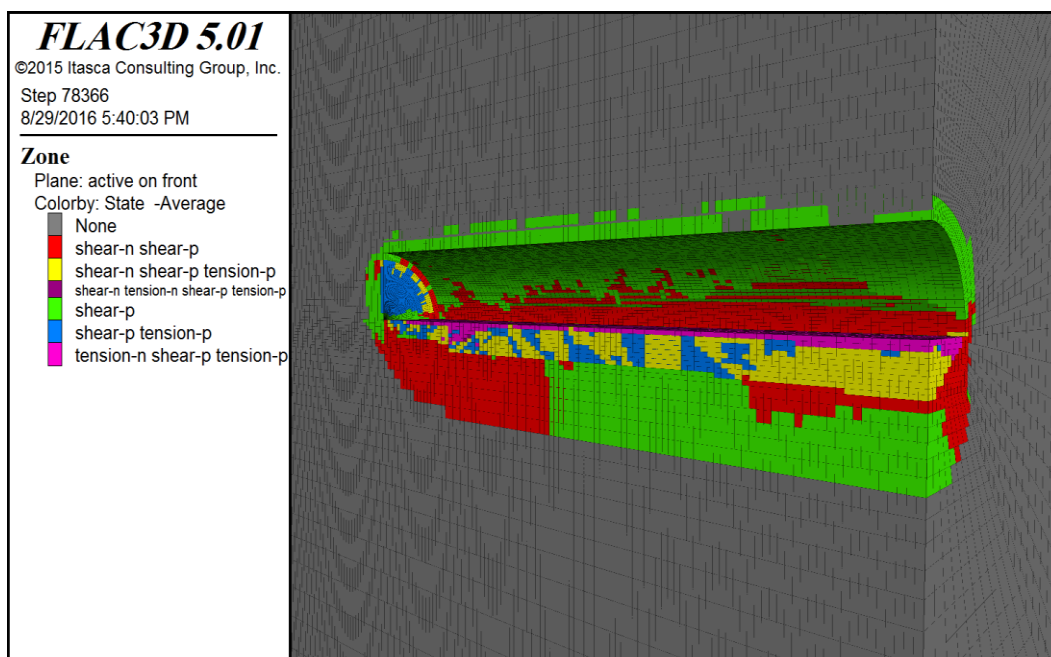
در این حالت ابتدا سامانه پیش‌تحکیم شامل میله‌ها، نصب شده و پس از آن عملیات حفاری شروع می‌شود. با این تفاوت که پس از حفاری هر گام، میل مهارها که سامانه نگهداری اولیه هستند نیز نصب می‌گردند. با توجه شرایط پایداری زمین که در این منطقه به دلیل وجود روبره‌ی زیاد و سنگ‌های خرد شده، ناپایدار است، نصب میل مهارهای ۴/۵ متری برای تامین امنیت کارگران در حین عملیات اجرا در این منطقه ضرورت دارد. آرایش میل مهارها و سامانه میله گذاری مطابق آنچه قبل‌تر بیان شد، به صورت دو ردیف زیر هم است. شکل (۵-۱۰) جابجایی قائم تاج را نشان می‌دهد که در نقطه‌ی روی

تاج تونل ۳/۱ سانتی متر جابجایی داشته است. شکل (۵-۱۱) ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل را نمایش

می‌دهد.

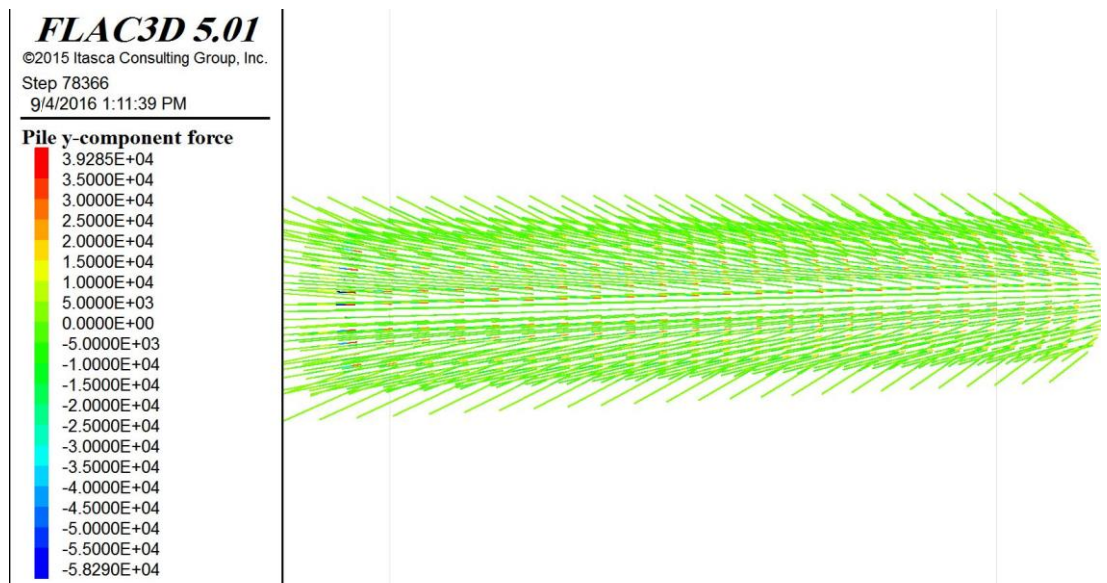


شکل ۵-۱۰ جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیم و میل‌مهارهای شعاعی)

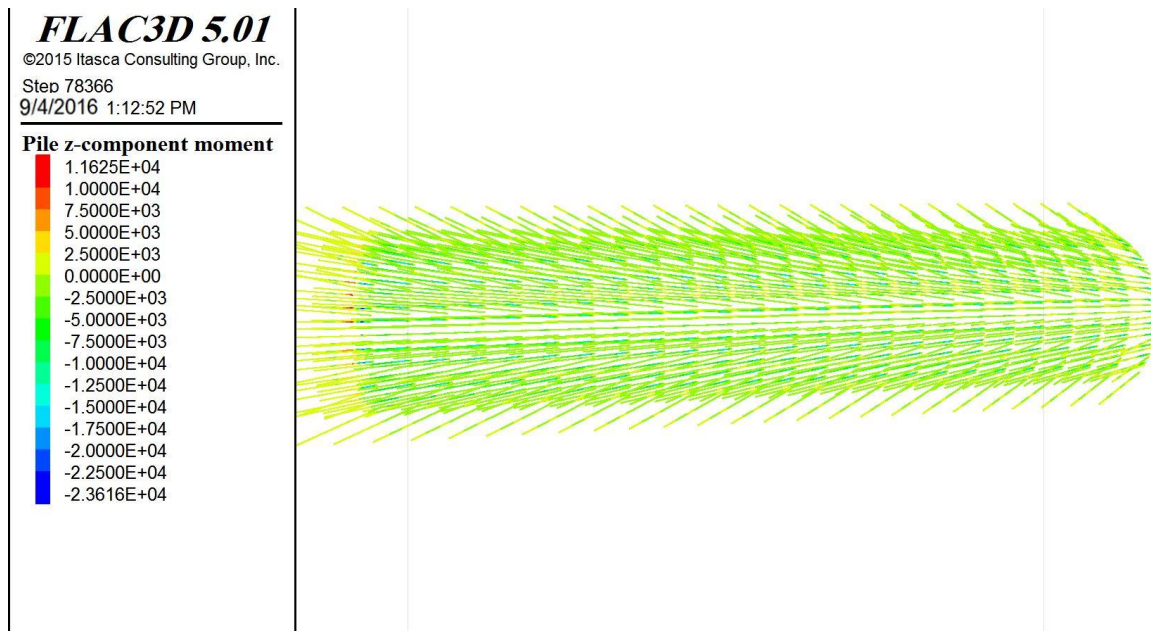


شکل ۵-۱۱ نواحی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی و میل‌مهارهای شعاعی)

در شکل (۵-۱۲) توزیع نیرو در راستای عمودی (راستای Y در مختصات محلی لوله ها با راستای Z مختصات اصلی) را نشان می دهد. شکل (۵-۱۳) نشانگر لنگر ناشی از این نیرو می باشد. با توجه به این دو نمودار می توان دریافت که میله ها درگیری لازم را با زمین داشته و فعال هستند.



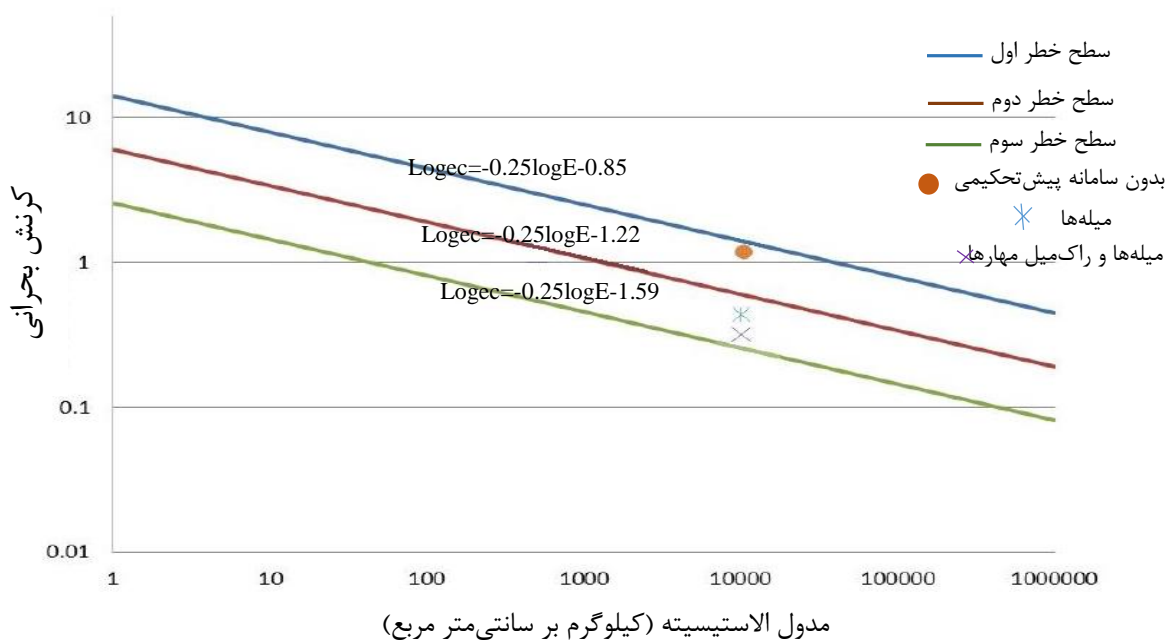
شکل ۵-۱۲ توزیع نیروی محوری در لوله های سامانه ی چتری در راستای Y



شکل ۵-۱۳ توزیع لنگر خمشی در لوله های سامانه ی چتری در راستای Z

۴-۴-۵ مقایسه‌ی حالات مختلف نگهداری و سامانه‌های پیش‌تحکیمی

پایداری تونل‌ها را می‌توان با مقایسه‌ی کرنش افتاده در توده سنگ اطراف تونل با میزان مجاز این کرنش برای تونل‌ها بررسی کرد. اگر کرنش افتاده کمتر از حد مجاز باشد، تونل پایدار است. کرنش افتاده به راحتی از اندازه‌گیری جابجایی‌ها بدست می‌آید. در این دیدگاه کلید موفقیت حد کرنش مجاز است. از آنجاکه کرنش برشی بیشینه بحرانی در آزمایش‌های آزمایشگاهی و تجربی قابل حصول است، می‌توان از آن به عنوان مقدار مجاز کرنش برای یافتن پایداری تونل بهره جست. با توجه به جابجایی‌های رخ داده و رسم سطوح خطر ساکورایی می‌توان به بررسی ضرورت استفاده از سامانه پیش‌تحکیم و نگهداری اولیه پی‌برد (Sakurai et al., 1995).

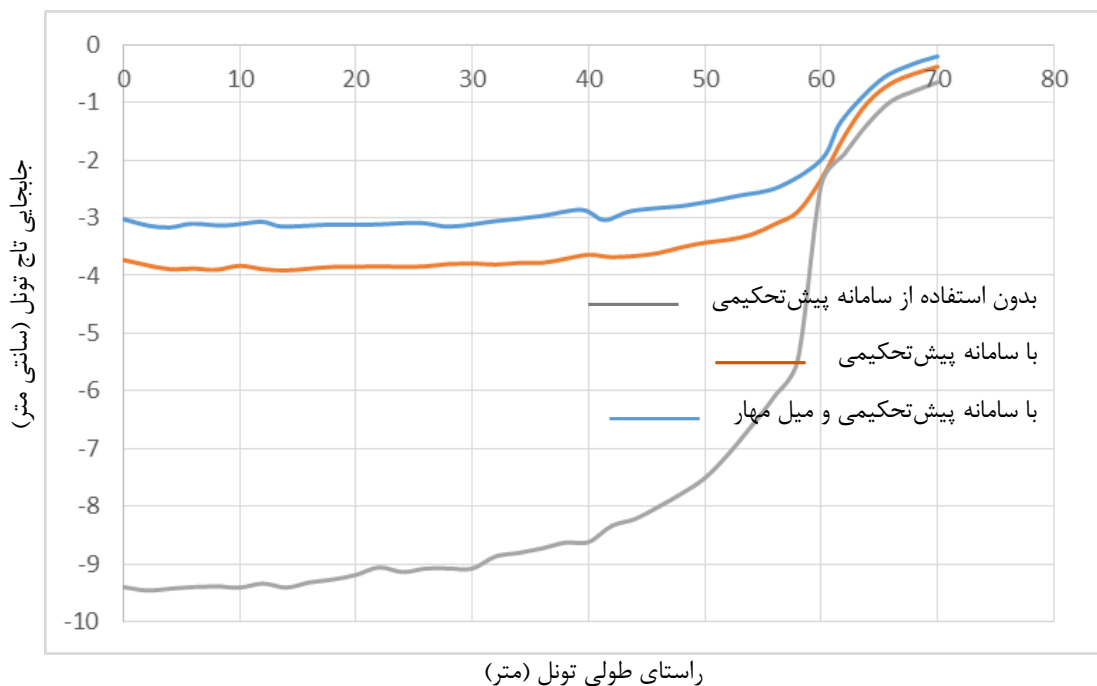


شکل ۵-۱۴ مقایسه‌ی شرایط مختلف با توجه به معیار خطر ساکورای (Sakurai et al., 1995)

شکل (۵-۱۴) که بیانگر معیار خطر ساکورایی است. جابجایی‌های رخ داده در مقطع بالایی تونل در حفاری در سه حالت بدون سامانه پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم و میل مهارهای شعاعی در شکل قابل مشاهده است. مقادیر جابجایی در حالت بدون سامانه پیش‌تحکیم در بالای سطح دوم خطر و نزدیک به سطح اول خطر می‌باشد که در محدوده‌ی مجاز برای تونل‌ها نیست

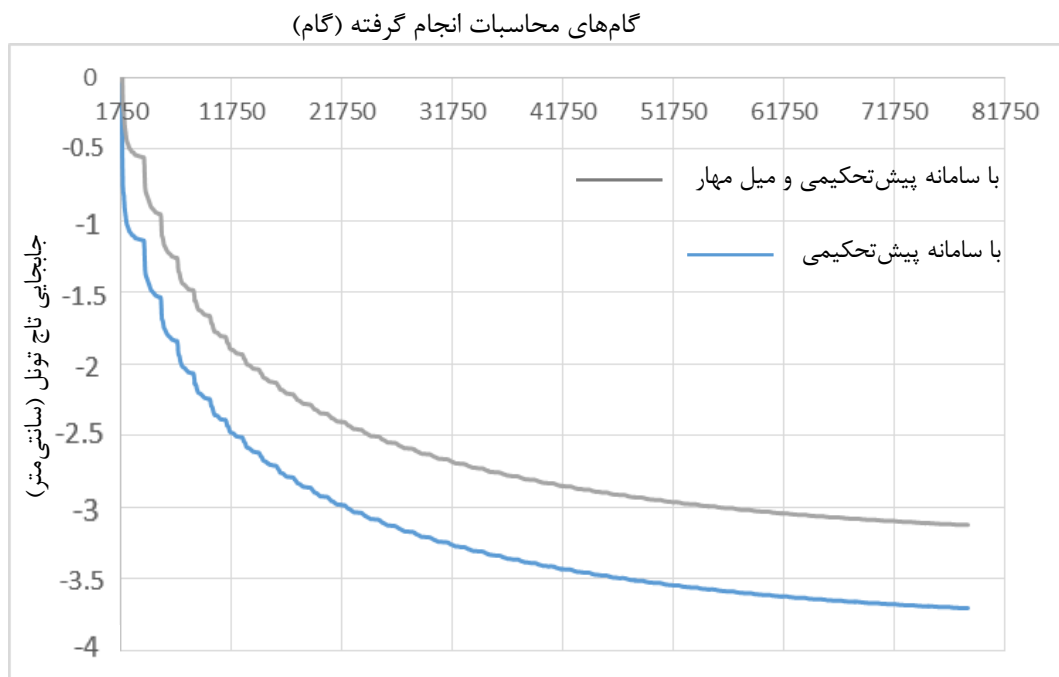
در حالی که با استفاده از سامانه پیش تحکیم و استفاده از میل مهارهای شعاعی به زیر سطح دوم بوده و در محدوده‌ی مجاز تونل‌ها قرار دارد که این خود نشان دهنده‌ی آن است که استفاده از سامانه چتری و پیش تحکیمی مناسب است.

در آخر برای مقایسه‌ی میزان جابجایی افقی رخ داده در تاج در مسیر حفاری مقطع بالایی تونل، نتایج در سه حالت در نمودار (۵-۱۵) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از سامانه پیش تحکیم میله گذاری که زیر مجموعه‌ای از سامانه چتری است به میزان ۶۰ درصد از جابجایی تاج نسبت به حالت بدون استفاده از این سامانه می‌کاهد. همچنین استفاده از میل مهارهای شعاعی به همراه سامانه میله گذاری به میزان ۶۶ درصد از جابجایی تاج نسبت به حالت بدون استفاده از این سامانه‌ها می‌کاهد.



شکل ۵-۱۵ پروفیل جابجایی قائم تاج در سه حالت (بدون سیستم پیش تحکیم، با سامانه پیش تحکیم، با سامانه پیش تحکیم و میل مهارهای شعاعی)

شکل (۵-۱۶) نشان دهنده‌ی جابجایی نقطه‌ی در نظر گرفته شده روی تاج در ابتدای دهانه در گام‌های مختلف فرآیند تحلیل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقطه‌ی روی تاج در قسمت ورودی در هر چرخه از فرآیند حفاری تونل در راستای قائم جابجا شده و به تعادل رسیده است.

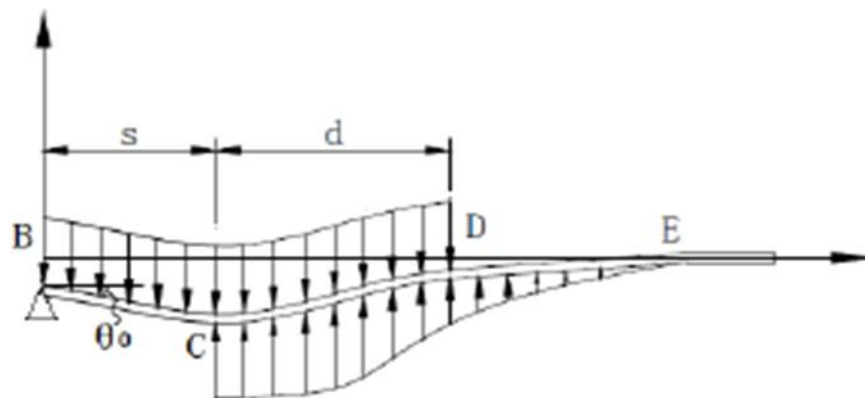


شکل ۵-۱۶ جابجایی قائم نقطه‌ی روی تاج تونل در ابتدای حفاری (با سامانه پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم و میل مهارهای شعاعی)

۵-۵ رفتار ساختاری سامانه‌ی چتری

همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز ذکر شد، برای شبیه‌سازی سامانه‌های چتری با لوله و میله، در این مطالعه از مولفه‌ی پایل استفاده شده است. از آنجاکه حفاری تا طول ۴۰ متر انجام می‌شود و طول لوله‌های هر ردیف ۱۲ متر بوده که ۳ متر همپوشانی دارد، ۴ سری لوله در سقف جهت تشکیل سامانه‌ی چتری اجرا شده است. آرایش لوله‌ها در مراحل مختلف متفاوت بوده و در بازه‌ای که مشاور طرح سامانه‌ی میله گذاری خود را ارائه کرده است، که تقریباً ۱۰۰ درجه از تاج را پوشش می‌دهد، (آرایش میله‌ها در سقف) به تحلیل حالات مختلف سامانه چتری و سامانه‌های پیشنهادی در این مطالعه پرداخته شده است.

همان‌طور که در بخش‌های قبل این مطالعه اشاره شد، در مورد نحوه‌ی عملکرد لوله‌های سامانه‌ی چتری مدل‌های تحلیلی مختلفی ارایه شده است. با توجه به مدل‌های ارائه شده از سوی محققان و مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق و بررسی تغییر شکل‌ها و بعضی از پارامترهای وابسته لوله‌ها به عنوان تیرهای با یکسر تکیه‌گاه (بر روی سامانه نگهداری اولیه) و یکسر آزاد درون خاک در نظر گرفته شدند. واقعیت امر آن است که با قرار دادن لوله‌ها در داخل زمین و تزریق درون آنها، مواد تزریق شده از انتها و جداره خارج شده و می‌تواند مانند یک تکیه‌گاه در انتهای دیگر لوله عمل کند ولی همچنان امکان جابجایی لوله به همراه خاک وجود دارد (Trinh et al., 2006). به نحوی که توزیع نیروها در مدل-سازی انجام شده مطابق شکل (۵-۱۷) است. S دهانه‌ی بدون نگهداری و B نقطه‌ی تکیه‌گاهی است که نشان دهنده‌ی سامانه نگهداری اولیه است.



شکل ۵-۱۷ چگونگی توزیع نیروها در مدل ساخته شده در تحقیق (Muraki, 1997)

شایان ذکر است که در عمل تفاوت بین زیرشاخه‌های سامانه چتری میله گذاری و لوله گذاری در طول لوله‌ها و جنس استفاده شده به عنوان سامانه‌های پیش‌نگهدارنده است. در سامانه میله گذاری از همان میل مهارها و تزریق برای ایجاد سامانه‌ی چتری استفاده شده و نحوه‌ی اجرا مانند نصب میل مهارها است. علاوه بر این شعاع تزریق در این روش بسیار ناچیز است اما در سامانه لوله گذاری در این مطالعه چالهایی با قطر ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که لوله‌های مانسیون با خواص فولاد درون آنها قرار گرفته و بعد از تزریق در ناحیه‌ای با شعاع تزریق ۴۰۰ میلی‌متر در اطراف چالها در نظر گرفته

شده است. در مدل سازی این بخش از آنجا که نیروهای وارده بر سامانه چتری، اغلب نیروهای محوری است و المان کابل توانایی تحمل این نیروها را ندارد، برای سامانه میله گذاری هم از المان پایل استفاده شد با این تفاوت که خصوصیات شعاع تزریق و قطر لوله ها به صورت واقعی مدل سازی گردید.

۵-۶ بررسی سامانه چتری لوله گذاری پیشنهادی

در این بخش از مطالعه به پیشنهاد اجرای سامانه چتری لوله گذاری پرداخته می شود. با توجه به اینکه در قسمت قبل به پیش بینی شرایط مختلف سامانه پیشنهادی طرح مهندس مشاور طرح پرداخته شد، حال با توجه به توضیحات داده شده در قسمت قبل به پیشنهاد یک سامانه لوله گذاری در همان محدوده‌ی معین شده توسط مشاور پرداخته شده و در قسمت های بعد به تحلیل شرایط مختلف این سامانه پرداخته خواهد شد.

۵-۶-۱ چگونگی مدل سازی سامانه لوله گذاری

در این قسمت برای پیشنهاد شرایط قابل قبول چند مورد از تحقیقات در زمینه‌ی سامانه های پیش تحکیم مورد مطالعه قرار گرفته و از بین آنها اطلاعات مربوط به مطالعه‌ی موردی تونل راه آهن قزوین-رشت برای مدل سازی پیشنهادی انتخاب گردیده است.

برای مدل سازی سامانه پیش تحکیم در این قسمت از لوله‌ی مانسیون با قطر ۹۰ و ضخامت جداره‌ی ۷/۲ میلی متر با پارامترهای مقاومتی فولاد استفاده گردید. برای تعیین پارامترهای کلی دوغاب با نسبت آب به سیمان ۰/۵ که اغلب در تزریق روش چتری استفاده می شود، در آزمایشگاه مکانیک سنگ تهیه شده و آزمایش های لازم روی آن انجام گرفته است. پارامترهای سویلکریت^{۷۰} نیز به صورت مشابه مورد مطالعه قرار گرفته است (باقرزاده و گشتاسبی، ۱۳۹۱). شعاع تزریق در این مطالعه ۴۰۰

^{۷۰} SoilCrete

میلی متر در نظر گرفته شده است. در جدول (۵-۲) پارامترهای سویلکریته استفاده شده برای مدل سازی قابل مشاهده است.

جدول ۵-۲ پارامترهای سویلکریته (باقرزاده و گشتاسبی، ۱۳۹۱)

نسبت طرح اختلاط	$g = 70\%$ ، $w/c = 50\%$
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۳۰۰۲/۵۱۲
مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	۱۸/۱۰

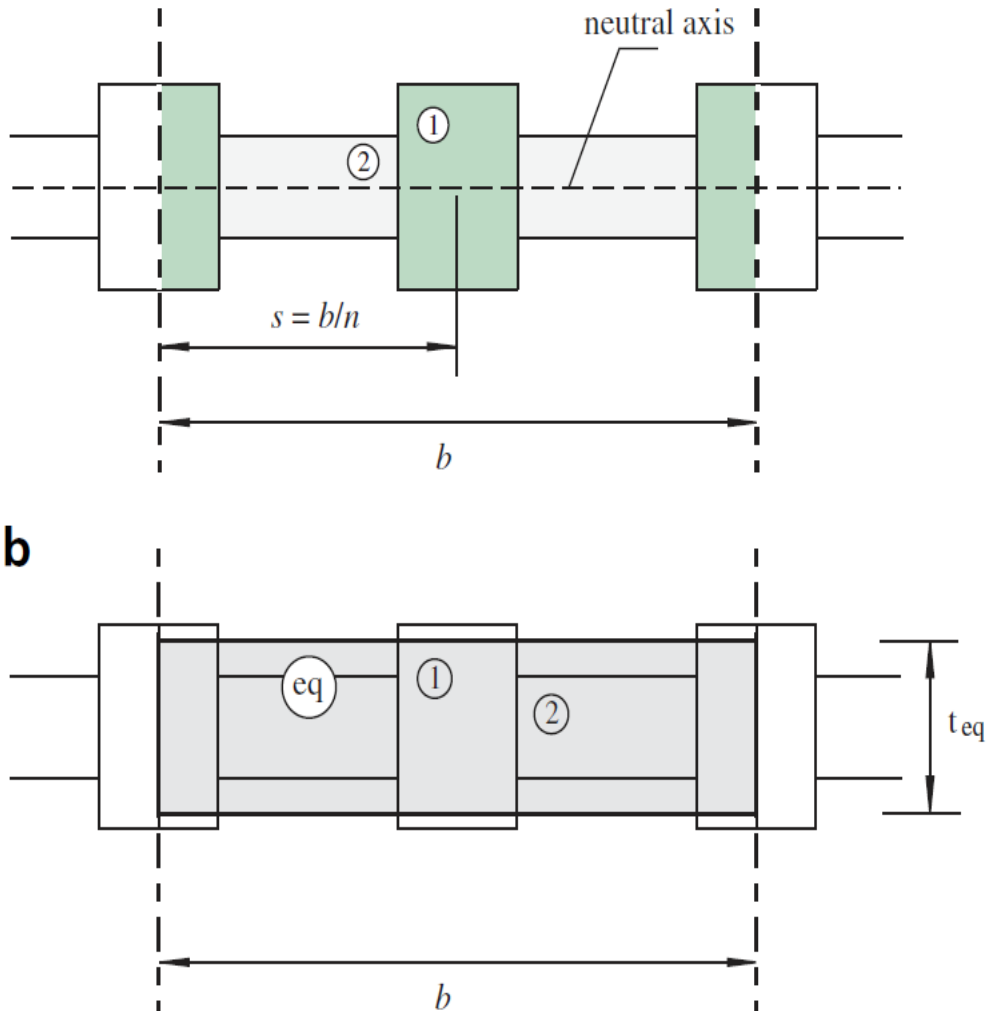
۵-۶-۲ مدل سازی سامانه نگهداری اولیه

برای معادل سازی شاتکریته و لتیس گیردر در فرآیند مدل سازی لازم است که از روش حل مقاطع مختلط استفاده شود. این روش به خوبی در تحلیل های مهندسی سازه شناخته شده است. رفتار لایه نگهدارنده ی تونل که مقطع متشکل از دو ماده ی مختلف است (به عنوان مثال شاتکریته و مجموعه پروفیل های فولادی) بر اساس تئوری ارتجاعی پوسته ها و رفتار تیرهای منحنی به شکل (۵-۱۸) خواهد بود (باسلیقه و همکاران، ۱۳۹۲).

شکل (۵-۱۸) نشان دهنده ی ترکیب دو ماده ی مختلف برای استفاده از این روش می باشد. این مقطع نشان دهنده ی لایه ی نگهدارنده به عرض b ، شامل n واحد از ماده ی "۱" (مثلا مجموعه پروفیل های فولادی) و n واحد از ماده ی "۲" (به عنوان مثال شاتکریته) است. باید توجه کرد که n واحد از هر یک از مواد در امتداد عرض b وجود دارد. این بیان به این معناست که هر یک از واحدها با فاصله ی $s = b/n$ از یکدیگر قرار گرفته اند. هر یک از واحدهای "۱" و "۲" با تعاریفی برای ضرایب فشار به ترتیب D_1 و D_2 و ضرایب انعطاف پذیری به ترتیب K_1 و K_2 نشان داده شده اند. در بدست آوردن این روابط از فرض تقارن نسبت به محور افقی مشترک (محور خنثی مقطع) استفاده گردیده است (شکل (۵-۱۸)) (Torres & Diederich, 2008).

- a هر جزء "۱" دارای ضرایب فشار و سختی D_1 و K_1 است
 هر جزء "۲" دارای ضرایب فشار و سختی D_2 و K_2 است

b تعداد اجزاء کامل در طول فاصله b n :



شکل ۵-۱۸ نمایش نمادین معادلسازی یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲ (Torres & Diederich, 2008)

پارامترهای ضرایب فشار D و انعطاف‌پذیری K به شکل زیر تعریف می‌شوند:

D برای مقطع در شرایط کرنش صفحه‌ای از رابطه‌ی (۵-۱) محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{EA}{1 - \nu^2} \quad (۵-۱)$$

رابطه‌ی (۲-۵) برای تعیین K در مقطع در حالت کرنش صفحه‌ای می‌باشد:

$$K = \frac{EI}{1 - \nu^2} \quad (۲-۵)$$

در روابط E مدول الاستیسیته، A مساحت سطح مقطع، I ممان اینرسی و ν نسبت پواسون ماده است.

ضخامت مقطع معادل (t_{eq}) از رابطه‌ی (۳-۵) قابل محاسبه است.

$$t_{eq} = \sqrt{12 \frac{K_1 + K_2}{D_1 + D_2}} \quad (۳-۵)$$

از رابطه‌ی (۴-۵) مدول الاستیسیته‌ی معادل مقطع معادل (E_{eq}) قابل حصول است:

$$E_{eq} = \frac{n(D_1 + D_2)}{bt_{eq}} \quad (۴-۵)$$

۳-۶-۵ بررسی مراحل مختلف حفاری و نصب سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری

در این قسمت به بررسی استفاده از مدل‌های مختلف سامانه چتری برای پیش‌تحکیم محدوده‌ی مورد تحقیق پرداخته شده است. همانطور که قبل‌تر بحث گردید، در محدوده‌ی نصب میله‌ها، اقدام به نصب لوله‌ها شده است. خصوصیات هندسی سامانه لوله گذاری پیشنهادی در مرحله‌ی اول به صورت زیر است که در قسمت‌های بعد به تغییر زاویه و تغییر فاصله‌ی بین لوله‌ها و بررسی اثر این تغییرها پرداخته شده است.

- قطر لوله : ۹۰ میلی‌متر

- ضخامت جداره : ۷/۲ میلی‌متر

- طول لوله‌ها : ۱۲ متر
- طول همپوشانی : ۳ متر
- زاویه‌ی قرارگیری نسبت به افق : ۷ درجه
- فاصله‌ی بین لوله‌ها ۴۰۰ میلی‌متر

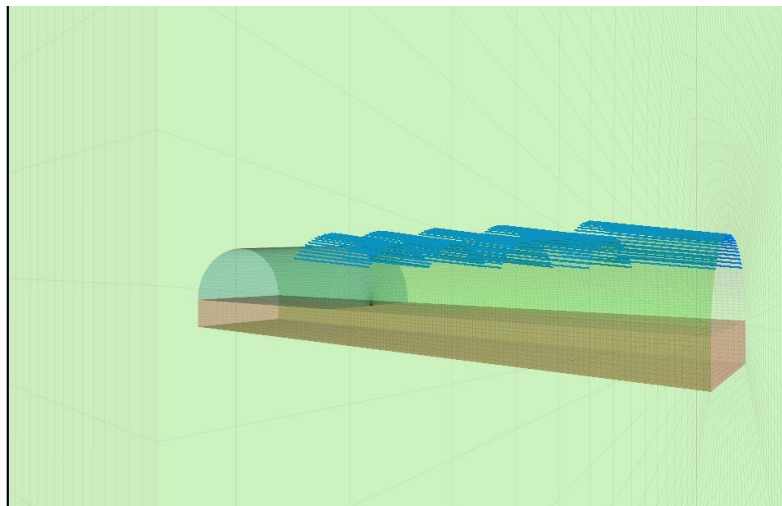
همانطور که بیان شد، دوغاب با نسبت آب به سیمان ۰,۵ در نظر گرفته شده است. همچنین پس از تزریق دوغاب با محیط اطراف مخلوط می‌گردد و سویلکریت را با ۷۰ درصد دوغاب و ۳۰ درصد خاک بوجود می‌آورد. شعاع تاثیر با فرض پر شدن کامل فضای بین لوله‌ها به مقدار فاصله‌ی مرکز به مرکز یعنی ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با این آرایش ۲۷ لوله در محدوده‌ی مورد بررسی وارد می‌شود.

شرایط و مراحل مدل‌سازی دقیقا به همان صورت بیان شده و تحلیل شده در قسمت‌های قبلی است با این تفاوت که لوله‌ها بجای میله‌ها استفاده شده است. پس از نصب لوله‌های ۱۲ متری، اقدام به حفاری تونل و نصب سامانه‌های نگهداری اولیه می‌گردد. شکل نمادین مدل‌سازی شده در شکل (۵-۱۹) قابل مشاهده است.

FLAC3D 5.01
 ©2015 Itasca Consulting Group, Inc.
 Step 58258
 9/18/2016 11:15:04 AM

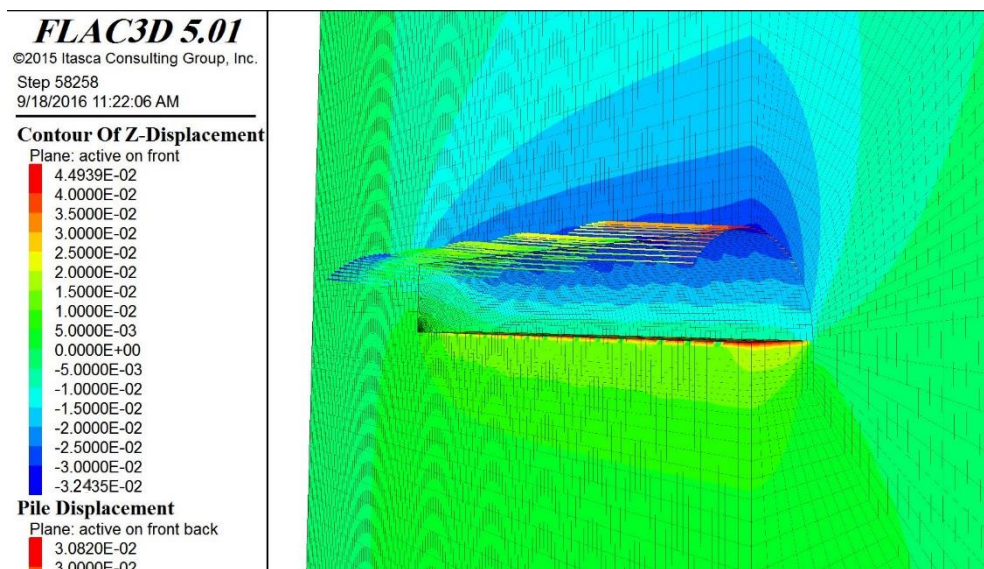
ZGroup
 Group Slot: Any
 bottom
 rock_mass
 top

Pile
 Colorby: Uniform
 Uniform



شکل ۵-۱۹ شکل نمادین قرارگیری لوله‌ها در سقف تونل

حال با حفاری مقطع به بررسی شرایط محیط و عملکرد سامانه پیش‌تحکیم پرداخته شده است. با توجه به لزوم در نظر گرفتن زنجیره‌ی حفاری، مانند بخش قبلی، ابتدا لوله‌های ۱۲ متری در محدوده‌ی مورد بحث وارد سقف تونل شده و سپس اقدام به حفر تونل می‌شود. پس از حفر ۷ سیکل برای بدست آوردن هم‌پوشانی سه متری، مجدداً لوله‌های جدید در سقف نصب می‌شوند.



شکل ۵-۲۰ جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (با استفاده از سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری)

جابجایی‌های رخ داده در اطراف ناحیه‌ی حفاری شده در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر جابجایی تا سطح مدل گسترده شده‌اند. بیشترین مقدار جابجایی قائم رخ داده در تاج تونل در مسیر حفاری حدود ۳/۲ سانتی‌متر است. شکل (۵-۲۱) ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در پیرامون تونل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی و جابجایی‌های قائم تاج تونل به مقدار ۶۶ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی کنترل شده است که مجدداً با مقایسه‌ی این مقادیر با خطوط خطر ساکورای مشاهده می‌شود که این مقدار جابجایی در حد مجاز برای تونل‌ها می‌باشد. همچنین با مقایسه‌ی سامانه چتری لوله گذاری با سامانه چتری میله گذاری پیشنهاد شده از طرف مشاور، مشاهده می‌شود که جابجایی‌ها به مقدار ۱۸ درصد کاهش یافته است.

FLAC3D 5.01

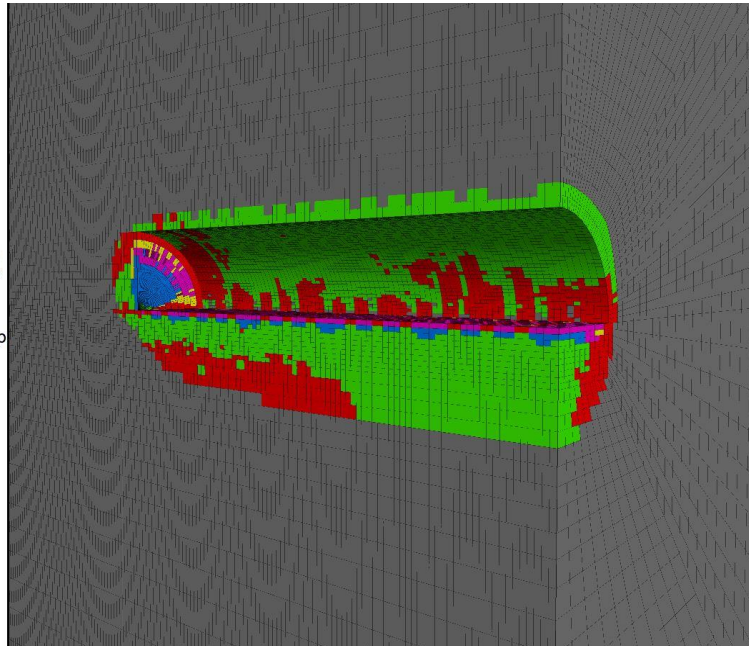
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 58258
9/18/2016 11:27:14 AM

Zone

Plane: active on front

Colorby: State -Average

- None
- shear-n shear-p
- shear-n shear-p tension-p
- shear-n tension-n shear-p tension-p
- shear-p
- shear-p tension-p
- tension-n shear-p tension-p



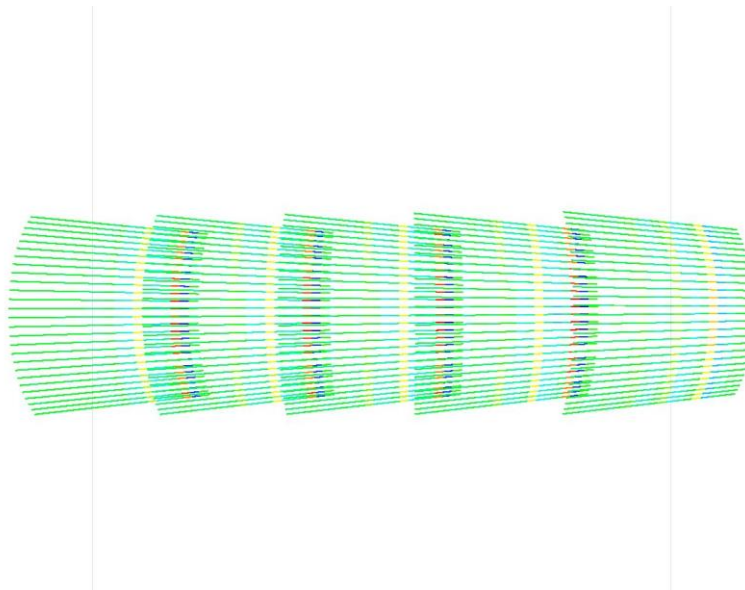
شکل ۵-۲۱ نواحی پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (با استفاده از سامانه پیش تحکیمی لوله گذاری) در شکل (۵-۲۲) توزیع نیرو در راستای عمودی (راستای Y در مختصات محلی لوله ها با راستای Z مختصات اصلی) نشان داده شده است. شکل (۵-۲۳) نشانگر لنگر ناشی از این نیرو می باشد. با توجه به این دو نمودار می توان دریافت که لوله ها درگیری لازم را با زمین داشته و فعال هستند.

FLAC3D 5.01

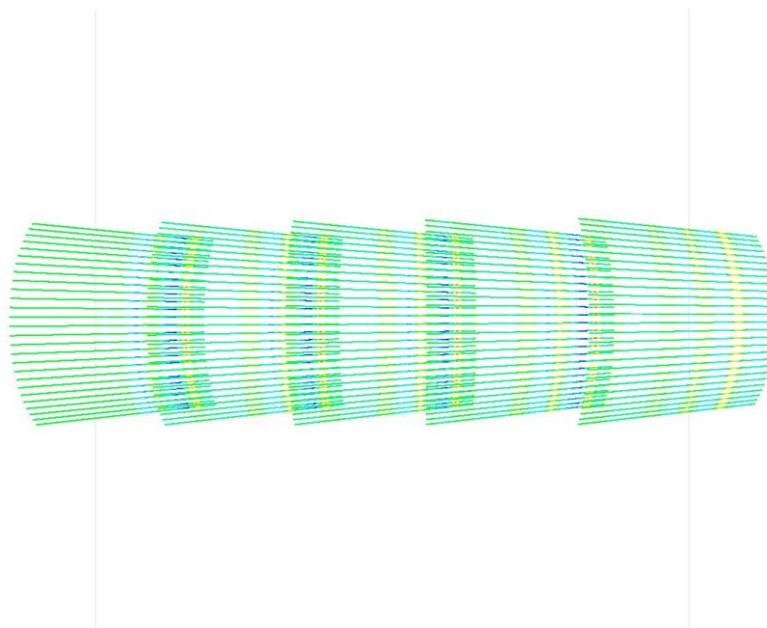
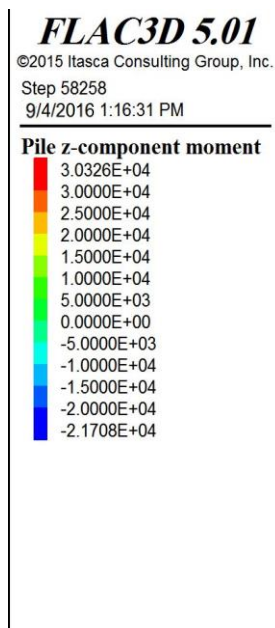
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 58258
9/4/2016 1:15:37 PM

Pile y-component force

- 8.5014E+04
- 8.0000E+04
- 7.0000E+04
- 6.0000E+04
- 5.0000E+04
- 4.0000E+04
- 3.0000E+04
- 2.0000E+04
- 1.0000E+04
- 0.0000E+00
- 1.0000E+04
- 2.0000E+04
- 3.0000E+04
- 4.0000E+04
- 5.0000E+04
- 6.0000E+04
- 6.4082E+04



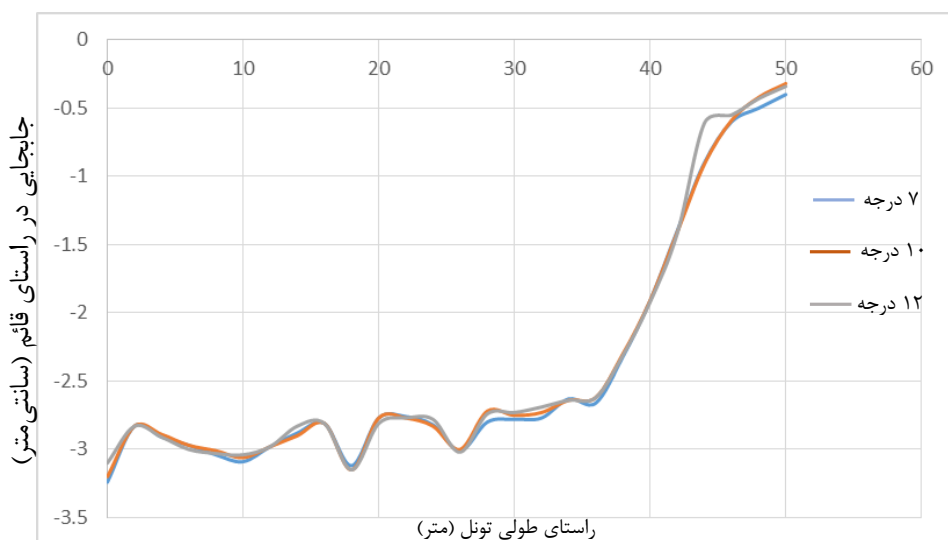
شکل ۵-۲۲ توزیع نیروی محوری در لوله های سامانه ی چتری در راستای Y



شکل ۵-۲۳ توزیع لنگر خمشی در لوله‌های سامانه‌ی چتری در راستای Z

۵-۶-۴ بررسی اثر تغییر زاویه

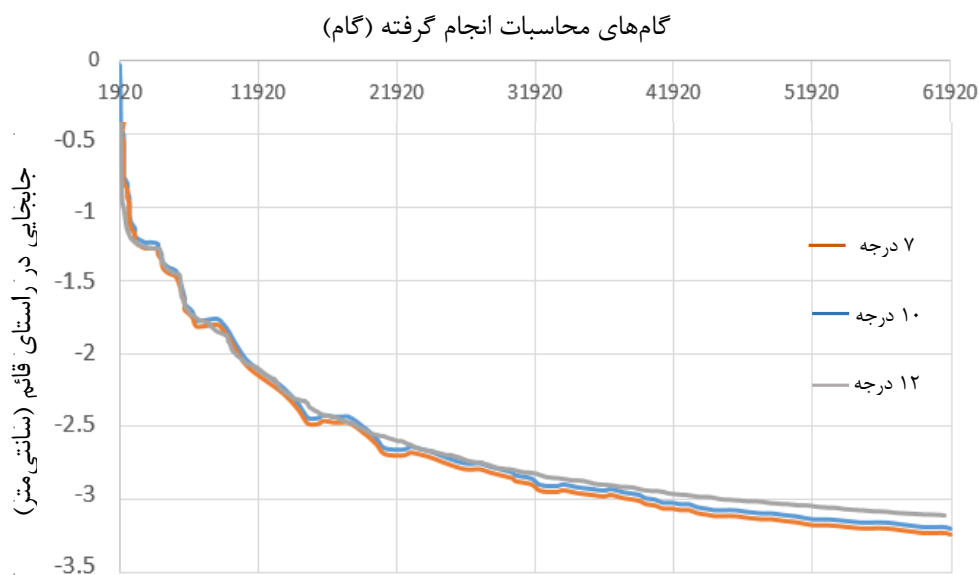
همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شد، در مدل ارائه شده زاویه لوله‌ها ۷ درجه در نظر گرفته شد. با ثابت در نظر گرفتن بقیه‌ی عوامل، به بررسی اثر تغییر زاویه در سه حالت ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه پرداخته می‌شود.



شکل ۵-۲۴ جابجایی قائم تاج تونل در ۳ زاویه‌ی ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه

افزایش زاویه منجر به کاهش ناچیز مقادیر نشست و جابجایی در حفاری مقطع بالایی شده است که احتمال دارد به علت وجود مقدار زیاد روباره باشد. همانطور که در شکل (۵-۲۴) مشاهده می‌شود، اختلاف ۰.۶۶٪ و ۶۷/۵٪ در مقادیر جابجایی تاج در کمترین و بیشترین زاویه (۷ و ۱۲ درجه) نسبت به حالت بدون استفاده از سامانه پیش‌تحکیم در مسیر حفاری مشاهده می‌شود.

شکل (۵-۲۵) نیز وضعیت نقطه‌ی ابتدایی روی تاج تونل را در مراحل مختلف حفاری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با بکارگیری لوله‌ها در زاویه‌های مختلف، فرآیند به تعادل رسیدن مدل تغییر کرده و با افزایش زاویه، تعداد گام‌های فرآیند تحلیل مدل هم کمتر می‌شود که این ممکن است علت آن شرایط بهتر پایداری باشد.

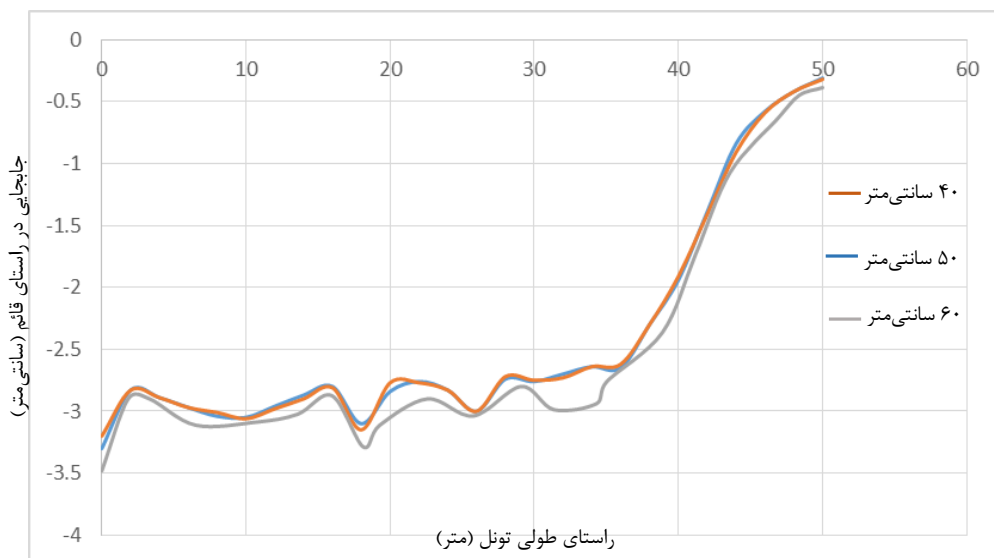


شکل ۵-۲۵ جابجایی قائم نقطه‌ی روی تاج تونل در ابتدای حفاری در ۳ زاویه‌ی ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه

۵-۶-۵ بررسی اثر تغییر فاصله داری

با توجه به این که در راستای عرضی سامانه‌ی چتری، فاصله‌ی لوله‌ها و شعاع تزریق دوغاب از پارامترهای مهم طراحی و عملکرد سامانه چتری هستند، به بررسی این عوامل پرداخته می‌شود. البته با توجه به این که شعاع تزریق در این مطالعه ۴۰۰ میلی‌متر و ثابت در نظر گرفته شده است (بدلیل در

دسترس نبودن اطلاعات واقعی) تغییرات فاصله‌داری لوله‌ها در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور فاصله‌ی لوله‌ها برای سه فاصله‌ی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر و تاثیر آن در تغییر جابجایی‌های قائم مورد بررسی قرار گرفت.

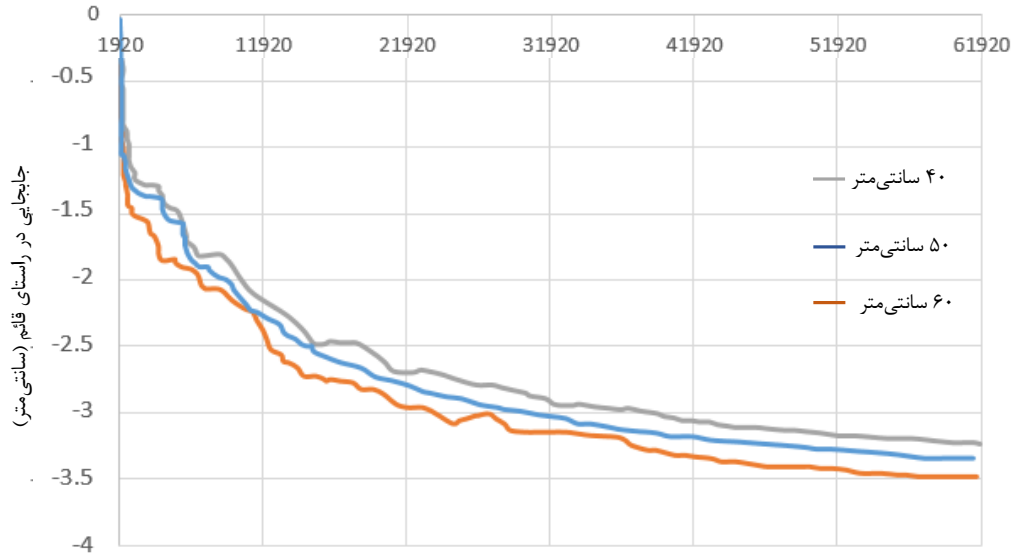


شکل ۵-۲۶ جابجایی قائم تاج تونل در فاصله‌داری متفاوت لوله‌ها در زاویه‌ی ۱۰ درجه (۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر)

مطابق انتظار افزایش فاصله‌داری لوله‌ها از ۴۰ به ۶۰ سانتی‌متر موجب افزایش نشست سطح و جابجایی قائم تاج تونل می‌شود. این میزان افزایش برابر با ۸/۵ درصد برای جابجایی قائم تاج تونل می‌باشد. شکل (۵-۲۶) بیانگر تاثیر فاصله‌داری بر روی جابجایی‌های قائم می‌باشد.

شکل (۵-۲۷) نیز وضعیت نقطه‌ی ابتدایی روی تاج تونل را در گام‌های مختلف تحلیل مدل در حالتی که فاصله‌داری لوله‌ها تغییر می‌کند را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، تغییر فاصله‌داری لوله‌ها، بر شرایط به تعادل رسیدن گام‌های مدل موثر بوده و در تعادل کلی نقطه‌ی ابتدایی روی تاج تونل تغییراتی به وجود می‌آورد.

گام‌های محاسبات انجام گرفته (گام)



شکل ۵-۲۷ جابجایی قائم نقطه‌ی روی تاج تونل در ابتدای حفاری در فاصله‌داری متفاوت لوله‌ها (۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر)

۷-۵ سامانه چتری پیشنهادی در تونل آزادراه تهران-شمال

با توجه به مطالب ذکر شده و تحلیل‌های انجام شده، از بین سامانه‌های چتری لوله‌گذاری پیشنهاد شده برای جایگزینی با سامانه‌ی چتری میله‌گذاری، سامانه چتری لوله‌گذاری با خصوصیات هندسی به شرح زیر به عنوان جایگزین برای سامانه پیشنهادی توسط مشاور می‌تواند مناسب باشد:

- قطر لوله : ۹۰ میلی‌متر
- ضخامت جداره : ۷/۲ میلی‌متر
- طول لوله‌ها : ۱۲ متر
- طول همپوشانی : ۳ متر
- زاویه قرارگیری نسبت به افق : ۱۰ تا ۱۲ درجه
- فاصله‌ی بین لوله‌ها : ۶۰۰ میلی‌متر

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ مقدمه

در این تحقیق به بررسی چگونگی عملکرد سامانه میله گذاری پیشنهاد شده توسط مشاور در تونل آزادراه تهران-شمال و پیشنهاد سامانه لوله گذاری جایگزین برای پیش‌تحکیم سازه پرداخته شد. به دلیل وجود روباره‌ی زیاد و سست بودن زمین منطقه‌ی مورد بررسی، بخش‌هایی از مسیر دارای پتانسیل ریزش می‌باشد به طوری‌که عملیات تونلسازی با روش‌های نگهداری موجود و متداول امکان‌پذیر نیست. بدین منظور تونل با سامانه پیش‌تحکیم چتری به صورت عددی در نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D مدل‌سازی شد. با در دست داشتن اطلاعات تونل مذکور، مدل پیشنهادی مشاور مورد تحلیل قرار گرفت. با اطلاعات استخراج شده از مطالعات دیگر، سامانه‌ی برای جایگزینی سامانه پیش‌تحکیم ارائه گردید و اثر تغییرات خصوصیات هندسی از جمله زاویه قرارگیری و فاصله‌داری لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۶-۲ نتیجه‌گیری

با توجه به مدل‌سازی انجام گرفته و تحلیل آنها می‌توان نتایج زیر را ارائه نمود:

- (۱) با توجه به بررسی جابجایی‌های قائم صورت گرفته در تاج تونل و با مقایسه‌ی آنها با سطوح خطر ساکورای، استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی در تامین پایداری تونل مناسب است.
- (۲) استفاده از سامانه میله گذاری توسط مشاور پیشنهاد شده است. استفاده از این سامانه جابجایی تاج را به مقدار ۶۰ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از سامانه پیش‌تحکیمی کاهش داده است. همچنین استفاده از میل مهارهای شعاعی به همراه سامانه پیش‌تحکیمی به میزان ۶۶ درصد از جابجایی قائم تاج تونل نسبت به حالتی که از سامانه پیش‌تحکیم استفاده نشده است، می‌کاهد.

۳) با توجه به مقطع طولی جابجایی تاج تونل، افزایش زاویه‌ی لوله‌ها باعث افزایش پایداری می‌شود. اما از آنجا که در این روش قرارگیری زاویه‌دار لوله‌ها تنها به منظور ایجاد فضای لازم برای نصب سری بعدی لوله‌هاست، لازم است این زاویه با توجه به نیاز پروژه و قابلیت دستگاه‌های حفاری موجود در نظر گرفته شود.

۴) افزایش فاصله‌ی بین لوله‌ها منجر به کاهش پایداری می‌شود با این حال بنا به هزینه‌های زیاد این روش، هرچه تعداد لوله‌های وارد شده به محیط کمتر باشد، مقرون به صرفه‌تر است. پس باید فاصله‌ای در نظر گرفته شود که از لحاظ اجرایی و هزینه‌ها بهینه باشد.

۵) استفاده از سامانه‌ی لوله گذاری در محدوده‌ی پیشنهادی توسط مشاور، کارایی مورد نظر را داشته و حدود ۶۶ درصد از جابجایی تاج تونل می‌کاهد.

۶) از آنجا که پوشش دادن تاج تونل به صورت کامل با لوله‌ها، تعداد لوله‌ها را از ۲۷ به ۴۶ عدد افزایش می‌دهد، و با در نظر گرفتن این مهم که سامانه پیشنهادی مشاور با توجه به سطوح خطر ساکورای در محدوده‌ی مجاز قرار دارد، از لحاظ اقتصادی استفاده از آن برای پوشش کل تاج توجیه نداشته و به کاربرد آن در محدوده‌ی زاویه‌ی پوشش پیشنهادی، تقریباً ۱۰۰ درصد، پرداخته شد.

۷) با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته در این مطالعه، سامانه میله گذاری مشاور از کارایی خوبی برخوردار است و بنا به داشتن قطر کمتر، طول کمتر و سهولت در عملیات اجرا، جایگزینی آن با سامانه مورد بررسی در این تحقیق توجیه اقتصادی ندارد.

۳-۶ پیشنهادات

با توجه به تحقیق انجام شده، موارد زیر می‌توانند موضوع‌های تحقیقات آتی باشند:

- ۱) بررسی دینامیکی سامانه پیش‌تحکیم چتری
- ۲) تهیه نمونه و اجرای آزمایشهای آزمایشگاهی برای بدست آوردن داده‌های هرچه دقیق‌تر

منابع

- باسلیقه ف. کیهانی ع. (۱۳۹۲) "مزایای استفاده از روش مقطع معادل در طراحی نگهداری موقت تونل‌ها در حالت ترکیب پروفیل‌های فولادی با شاتکریت"، هفتمین کنگره‌ی مهندسی عمران .
- باقرزاده پ. گشتاسبی ک. (۱۳۹۱) " نقش روش چتری و شعاع تزریق ایجاد شده در زمین‌های ریزشی (مطالعه‌ی موردی تونل راه‌آهن قزوین-رشت-بندر انزلی)", سی و یکمین گردهمایی علوم زمین.
- شرکت مهندسی جنرال مکانیک، مهندسین مشاور لانیز، (۱۳۹۳)، گزارش‌های زمین شناسی مهندسی و مهندسی تونل البرز، تهران، ایران.
- زارعی ح. معارف‌وند پ. احمدی م.ح. (۱۳۹۳) "اثر پارامترهای روش چتری بر حفظ پایداری سینه کار؛ مطالعه موردی تونل سبزکوه" پنجمین کنفرانس مهندسی معدن. ص. ۴۱۷
- گینیوسکی ایوان، هل عطایی فرزاد، (۱۳۸۶) گزارش زمین‌شناسی دهانه شمالی تونل البرز (دهانه‌ی شمالی)، محدوده 3+400 تا 3+500، شرکت مهندسین مشاور لانیز.
- Aksoy, C.O., Onargan, T., (2010). "The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, pp. 553-559.
- Asconroads-Company Portal (2012) DSI info. Asconroads Company. <http://www.asconroads.com/> accessed February 21.
- CSI, Inc., (2002). "Section uilder and Designer for Concrete, Steel, and Composite Sections," Users manual.
- Dywidag-Systems International (2013) DSI info 19. Dywidag-Systems International. <http://www.dywidag-systems.com/> Accessed October 11
- Elyasi A., Javadi M., Moradi T., Moharrami J., Parnian S., Amrae M. (2015) "Numerical modeling of an umbrella arch as a pre-support system in difficult geological conditions: a case study", Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- GeoDtata Engineering Group S.p.A, (2015), Tunnel section maps in Iran, Alborz Project, Temporary supports Main tunnel section type C2 / C2* .
- Hefny, A.M., Zhao j., Ranjith, P., Tan, W.L., (2000). "Numerical analysis for umbrella arc method in shallow large scale excavation in weak rock. "

- Itasca Consulting Group, Inc., (2005). "FLAC 3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions", Users manual.
- Jinga, L., Hudson, J.A., (2002). "Numerical methods in rock mechanics," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 39, pp. 409–427.
- John M, Mattle B (2002) Design of tube umbrella. *Mag Czech Tunn Comm Slovak Tunn Assoc* 3
- Kim SH, Baek SH, Moon HK. (2005) A study on the reinforcement effect of umbrella arch method and prediction of tunnel crown and surface settlement. In: Erdem Y, Solak T, editors. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*. London: Taylor & Francis; p. 245e51.
- Marinos V. (2012) “Assessing rock mass behaviour for tunneling. *Environmental and Engineering Geoscience*”, pp.245-251
- Muraki , Y. , (1997) , " The umbrella method in tunnelling " ,Ph.D. thesis , Department of Civil and Environmental Engineering , MIT.
- Ocak, Ibrahim. (2008). Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 674–681
- Oke J, Vlachopoulos N, Diederichs M.S. (2014) “Numerical analyses in the design of umbrella arch systems”. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*
- Oke J, Vlachopoulos N, Diederichs MS. (2013a) “The reduction of surface settlement by employing umbrella arch systems”. In: *GeoMontreal, Montreal: Canadian Geotechnical Society*.
- Oke J, Vlachopoulos N, Marinos V. (2014a) “The pre-support nomenclature and support selection methodology for temporary support systems within weak rock masses”. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 97-130
- Trinh Q.N. , Broch E., lu M. (2006) “Three Dimentional Modelling Of a Tunnel Cave-In and Spiling Bolt Support”. *Rock Mechanics in Underground Construction, Singapore*
- Sakurai, S., Kawashima, I., Otani, T., (1995). "A criterion for assessing the stability of tunnels," *ISRM Intern. Symp*, vol. 2, pp. 969-973.
- Schumacher, F.P., (2012) “Numerical investigation of pipe umbrella roof support systems in underground coal mining” ,M.S. thesis , Department of Mining Engineering , The university of Utah

- Song KI, Cho GC, Chang SB, Lee IM. (2013) "Beam-spring structural analysis for the design of a tunnel pre-reinforcement support system". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, pp.139-150
- Tekyontunel Corporation portal (2012) DSI info. Tekyontunel Corporation. <http://www.tekyontunel.com/> accessed june 3.
- Torres, C.C., Diederichs, M., (2008). "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, pp. 506-532.
- Tuncdemir H, Aksoy CO, Guclu E, Ozer SC (2012) "Umbrella arch and forepoling support methods: a comparison". *EUROCK*, Stockholm, pp 515–527
- Volkman, G.M., Krenn, F., (2005). "Back-Calculated Interacting Loads on Pipes of Pipe Umbrella Support Systems" ,*Tunnelling and Underground Space Technology*
- Volkman GM, Schubert W, Button EA. (2006) "A contribution to the design of tunnels supported by a pipe roof". In: *50 Years of rock mechanicsdLandmarks and future challenges, Proceedings of the 41st US symposium on rock mechanics*. Golden, Colorado.
- Volkman GM, SchubertW. (2007) "Geotechnical model for pipe roof supports in tunneling". In: *Proceeding of the 33rd ITA-AITES World tunneling congress, underground spacedthe 4th dimension of metropolises*. London: Taylor & Francis Group; pp. 755-760.
- Volkman, G.M., Schubert, W., (2008). "Tender document specifications for pipe umbrella installation methods," *the World Tunnel Congress - Underground Facilities for Better Environment and Safety, India*.
- Yoo CH. , Shin H.K. (2002), "Deformation behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes—laboratory and numerical investigation", *Tunneling and Underground Space Technology*; pp. 241-250

Abstract

Despite the development of the excavation methods for tunneling and support systems, Now a days, Finding an appropriate method for stabilization of the underground excavations is still a challenge. Utilization of pre-support systems are effective methods for ground improvement before the excavation process starts. Understanding the mechanism of the mentioned systems requires modeling and analysis. The function of the Umbrella Arch system, Utilized in Tehran-Shomal highway tunnel, Had been numerically modeled and analysed in this study. Geological studies in this area showed that some extents of the profile have high potentials of collapse and therefore the common support systems can not satisfy the safety goals. As a result, the umbrella arch pre-support system which is proper for this sort of conditions, had been numerically modeled in FLAC^{3D}. In addition, the effect of geometrical parameters such as installation angle of the pipes, spacing of the pipes and injection radius had been analysed beside the analysis of the umbrella arch system function. Analyses are based on crown displacement. Results indicates that increase in pipe installation angle and decrease in pipe spacing have positive effects on tunnel stability and utilization of the umbrella arch system, reduces the crown displacement by 60 percent.

As another result, the proposed spilling method of the consultant engineers, which is a sub-category of the umbrella arch system, performed well in the analysis and the utilization of this system has less difficulties.

Keywords: umbrella arch methods, numerical modeling, Spilling method, Forepoling method.



Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics engineering

MSc Thesis in Rock Mechanics

Numerical Modeling of the Method of Forepoling as a Pre-support in Alborz Tunnel

By: Alireza Ahmadi

Supervisors:

Dr. Seyed Mohammad Esmaeil Jalali

Dr. Majid NikKhah

Consultant:

Saeed Alikaei Taleghan

January 2017