

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه مهندسی استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی روش پیش تحکیم با استفاده از روش‌های عددی - مطالعه موردی: تونل انتقال آب چالوس

رحمت‌الله ظاهری

اساتید راهنما:

دکتر شکرالله زارع

دکتر سیدرحمان ترابی

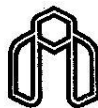
استاد مشاور:

مهندس عباس کمالی‌بندی

شهریور ۱۳۹۴

شماره: ۴۶۹۴، ۱۵۶۷-
تاریخ: ۲۰، ۹۵
ویرایش:

بسمه تعالی



دانشگاه تهران

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رحمت‌الله ظاهری رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان طراحی روش پیش تحکیم با استفاده از روش‌های عددی - مطالعه موردی: تونل انتقال آب چالوس که در تاریخ ۹۴/۰۶/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: قابل قبول امتیاز ۱۵/۵) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر شکرالله زارع	استادیار	
۲- استاد راهنما	دکتر سید رحمان ترابی	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر کیومرث سیف‌پناهی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر احمد رمضان‌زاده	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری



تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاری و سوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

برادران و خواهران عزیزم که در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می دوزیم. قلمم لبریز از عشق به شاست و خوشبختی تان منتهای آرزویم.

تشکر و قدردانی:

پاس و ستایش خداوندی را سزااست که کسوت هستی را بر اندام موزون آفرینش پوشانید و تجلیات قدرت لایزال را در مظاهر و آثار طبیعت نمایان گردانید. بار الهی! من بیا دتو، به تو تقرب می جویم و تو را به پیشگاه تو شمع میآورم و از تو خواستارم، به کرمت، مرا به خودت نزدیک گردانی و یاد خود را به من الهام کنی و بر من رحمت آوری و به آنچه بهره و نصیب من ساخته ای، خسودم قرار دهی و در همه حال به فروتنی ام واداری.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر سکراله زارع و جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی اساتید محترم که من را در به اتمام رساندن این پروژه کمک و یاری فرمودند کمال تشکر و قدردانی دارم.

و در پایان نیز از زحمات خانواده خوبم و دوستان محترم مهندس فریدون شیرینی، مهندس پریسا باقرزاده و دیگر دوستان عزیزم که در تدوین این تحقیق مرایاری نمودند تشکر و از خداوند منان سلامت و سعادت ایشان را خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب رحمت الله ظاهری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی روش پیش تحکیم با استفاده از روش های عددی - مطالعه موردی: تونل انتقال آب چالوس تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع و دکتر سید رحمان ترابی متعهد می شوم.

- 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 تاکنون 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- 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 اخلاق آسانی رعایت شده است

تاریخ ۹۴، ۷، ۲۰
امضای دانشجو احمدالله رحمتی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. 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 نمی باشد.

چکیده

بسته به شرایط زمین اطراف تونل، روش‌های مختلفی برای نگهداری و ایجاد پایداری در تونل وجود دارد. بر این اساس زمانی که تونل در نزدیک سطح زمین یا در زمین‌های با شرایط ژئومکانیکی ضعیف ساخته شود، استفاده از روش‌های پیش‌تحکیم امری ضروری است.

در این تحقیق نیز که مربوط به تونل انتقال آب چالوس می‌باشد، با توجه به شرایط ژئومکانیکی ضعیف زمین دربرگیرنده، استفاده از روش‌های پیش‌تحکیم برای ایجاد پایداری در تونل اجتناب‌ناپذیر است که با توجه به شرایط موجود، روش قوس‌چتری و بولت‌های سینه‌کار برای این منظور انتخاب شده است.

برای درک بهتر از رفتار نگهداری اعمالی و زمین اطراف تونل و همچنین تعیین پارامترهای مختلف مربوط به قوس‌چتری، لازم است به مدل‌سازی عددی پرداخته شود که برای این منظور از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است. در ادامه با توجه به نتایج مدل‌سازی، لزوم استفاده از پیش‌تحکیم و تعیین پارامترهای مختلف مربوط به روش قوس‌چتری و بولت‌های سینه‌کار مورد بررسی قرار گرفته است، که از جمله پارامترهای مورد بررسی در روش قوس‌چتری؛ طول، فاصله‌داری جانبی، شیب و همپوشانی قوس‌ها و در روش بولت‌های سینه‌کار؛ تعداد بولت به کار رفته در متر مربع سطح سینه‌کار می‌باشند.

مبنای بررسی‌های صورت‌گرفته براساس جابجایی‌های به وجود آمده در سطح زمین و تاج تونل بوده و برای بررسی سطح ایمنی و پایداری نگهداری اعمالی، از سطوح خطر ساکورایی استفاده شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که استفاده از روش قوس‌چتری و نگهدارنده‌های سینه‌کار، پایداری مورد نیاز برای تونل را تأمین می‌کند. همچنین استفاده از بولت‌های سینه‌کار با فاصله‌داری ۰/۵ متر، می‌تواند گزینه مناسبی برای نگهداری سینه‌کار باشد و اعمال قوس‌چتری به طول شش متر، فاصله‌داری ۰/۵، شیب ۵ درجه و همپوشانی یک متری در قسمت تاج تونل، می‌تواند پایداری مناسبی را ایجاد نماید. با اعمال نگهدارنده سینه‌کار و قوس‌چتری،

از جابجایی ایجادشده در قسمت تاج تونل و سطح زمین به ترتیب به میزان ۷۰٪ و ۵۰٪ نسبت به حالت اعمال نگهداری اولیه، کاسته شده و همچنین جابجایی در قسمت سینه کار تونل به میزان ۵۰٪ بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: تونل، پیش‌تحکیم قوس‌چتری و بولت سینه‌کار، مدل‌سازی عددی، FLAC3D.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

ظاهری، ر.، زارع، ش.، ترابی، س.ر.، کمالی، ع.، (۱۳۹۴)، "بررسی و طراحی روش پیش تحکیم در تونل مطالعه موردی: تونل انتقال آب چالوس"، دومین کنفرانس بین المللی ژئوتکنیک و مهندس لرزه‌ای، دانشگاه تبریز .

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱ مقدمه:	۲
۲-۱ ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱ روش تحقیق	۴
۴-۱ خلاصه پایان نامه	۴
فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ تعدادی از تحقیقات انجام شده:	۸
فصل سوم: روش‌های پیش‌تحکیم	۱۳
۱-۳ مقدمه:	۱۴
۲-۳ تزریق:	۱۴
۳-۳ روش‌های مختلف تزریق:	۱۷
۱-۳-۳ تزریق شیمیایی:	۱۷
۲-۳-۳ تزریق با فشار بالا:	۱۸

۱۹	تزریق فشرده:	۳-۳-۳
۱۹	تزریق جبرانی:	۴-۳-۳
۲۲	تقسیم‌بندی انواع دوغاب:	۴-۳
۲۳	دوغاب سوسپانسیون:	۱-۴-۳
۲۳	دوغاب شیمیایی:	۲-۴-۳
۲۴	انجماد زمین:	۵-۳
۲۵	شرایطی که می‌توان روش انجماد را به کار برد:	۱-۵-۳
۲۶	مزیت‌های انجماد زمین:	۲-۵-۳
۲۷	محدودیت‌ها انجماد زمین:	۳-۵-۳
۲۹	روش‌های انجام انجماد زمین:	۴-۵-۳
۳۳	کارهای انجام شده:	۵-۵-۳
۳۶	پیش‌تحکیم:	۶-۳
۳۶	میله‌های نگهداری سینه کار:	۱-۶-۳
۳۸	قوس‌چتری یا قرار دادن لوله‌ها در سقف:	۲-۶-۳
۴۰	لوله‌های مورد استفاده در روش قوس‌چتری:	۱-۲-۶-۳
۴۰	روش نصب لوله‌ها:	۲-۲-۶-۳

۴۰	روش پیش حفاری	۱-۲-۲-۶-۳
۴۱	روش حفاری لوله جداری	۲-۲-۲-۶-۳
۴۳	تزریق دوغاب سیمان در روش قوس چتری:	۳-۲-۶-۳
۴۴	تأثیرهای روش قوس چتری بر پایداری تونل	۴-۲-۶-۳
۴۵	عوامل مؤثر بر قوس چتری	۵-۲-۶-۳
۴۵	دوغاب سیمان	۱-۵-۲-۶-۳
۴۶	تأثیر نفوذ دوغاب سیمان در درزه‌ها و ترک‌ها	۲-۵-۲-۶-۳
۴۶	روش تزریق با فشار بالا:	۳-۶-۳
۴۸	روش پیش برش:	۴-۶-۳
۵۱	فصل چهارم: موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی محدوده تونل	
۵۲	مقدمه	۱-۴
۵۲	راه دسترسی	۲-۴
۵۳	زمین شناسی منطقه‌ای	۳-۴
۵۳	ویژگی زمین شناسی عمومی و تکتونیک منطقه	۱-۳-۴
۵۴	واحدهای زمین شناسی	۲-۳-۴
۵۴	نهمشته‌های پلیوسن	۱-۲-۳-۴

۵۷	 ۲-۲-۳-۴ نهشته‌های دلتایی
۵۷	 ۳-۳-۴ زمین شناسی ساختمانی
۵۸	 ۴-۴ زمین شناسی مسیر تونل
۵۸	 ۱-۴-۴ زمین ریخت شناسی
۵۹	 ۲-۴-۴ سنگ شناسی
۵۹	 ۱-۲-۴-۴ سنگ بستر
۶۰	 ۲-۲-۴-۴ روباره
۶۰	 ۳-۴-۴ زمین شناسی ساختمانی
۶۱	 ۴-۴-۴ هیدروژئولوژی
۶۲	 ۵-۴-۴ پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل
۶۳	 فصل پنجم: انجام مدل‌سازی‌های مورد نیاز و تحلیل نتایج بدست آمده
۶۴	 ۱-۵ مقدمه:
۶۴	 ۲-۵ ساخت مدل اولیه:
۶۴	 ۳-۵ نحوه اعمال نگهداری اولیه، قوس چتری و میل مهار فایبرگلاسی:
۶۶	 ۴-۵ بررسی ضرورت به کارگیری پیش تحکیم
۶۸	 ۱-۴-۵ حفاری بدون استفاده از هیچ نوع نگهداری:

۶۸	حفاری با اعمال نگهداری اولیه	۲-۴-۵
۷۱	حفاری با اعمال نگهداری اولیه و بولت‌های نگهدارنده سینه کار تونل	۳-۴-۵
۷۲	نگهداری با اعمال قوس چتری	۴-۴-۵
۷۶	طراحی بولت‌های سینه کار	۵-۵
۷۷	طراحی و نحوه اجرای قوس چتری	۶-۵
۷۷	تعیین طول مناسب قوس چتری	۱-۶-۵
۷۷	طول سه متری	۱-۱-۶-۵
۷۹	طول شش متری	۲-۱-۶-۵
۷۹	طول نه متری	۳-۱-۶-۵
۷۹	طول دوازده متری	۴-۱-۶-۵
۸۳	نتیجه‌گیری برای تعیین طول مناسب	۵-۱-۶-۵
۸۴	تعیین فاصله جانبی نصب لوله‌های قوس چتری	۲-۶-۵
۸۶	تعیین شیب مناسب برای نصب قوس‌های چتری	۳-۶-۵
۹۰	تعیین همپوشانی مناسب	۴-۶-۵
۹۵	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	
۹۶	نتیجه‌گیری	۱-۶

۲-۶ پیشنهادات ۹۷

منابع: ۹۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۳ مثال‌های از تزریق در طول ساخت تونل (a) از داخل خود تونل (b) از تونل مجاور (c) از سطح زمین (d) از چاه کناری یا، (e) برای پایداری ساختارهای نزدیک تونل ۱۶
- شکل ۲-۳ چیدمان لوله‌های تزریق ۱۷
- شکل ۳-۳ نمایی از روش تزریق جبرانی برای کاهش نشست در ساختارهای نزدیک تونل ۲۰
- شکل ۴-۳ تزریق جبرانی برای ساخت تونل ۲۱
- شکل ۵-۳ نحوه ایجاد انجماد در تونل ۲۶
- شکل ۶-۳ شکل نشان دهنده مراحل بزرگ شدن انجماد زمین ۲۹
- شکل ۷-۳ روش مستقیم انجماد زمین ۳۰
- شکل ۸-۳ روش انجماد در سیستم باز ۳۱
- شکل ۹-۳ مثال‌های از روش انجماد (a) استفاده از انجماد برای رهایی TBM در تونل کایرو (b) انجماد در ورودی تونل جاده‌های به قطر ۱۳ متر در دوتویتسکلوف آفریقای جنوبی (c) استخراج در ماسه یخ زده در تونل دوسلدورف ۳۳
- شکل ۱۰-۳ به کار بردن روش انجماد در تونلی در دوسلدورف آلمان ۳۵
- شکل ۱۱-۳ روش استفاده شده در تونل برای رهایی TBM به دستور توماس تلفورد در سال ۲۰۰۴ ۳۵
- شکل ۱۲-۳ کاربرد میله‌ها برای سینه کار تونل ۳۷
- شکل ۱۳-۳ وصل کردن میله‌های نگهداری سینه کار در طول ساخت تونل لاینزر LT31 در اتریش ۳۸
- شکل ۱۴-۳ مثالی از پیش نگهداری با روش چتری در تونل LT31، وینا ۳۹
- شکل ۱۵-۳ روش نصب لوله‌های پیش‌تحکیم در استفاده از روش پیش حفاری با دستگاه‌های ویژه ۴۱
- شکل ۱۶-۳ نصب لوله‌های پیش‌تحکیم در روش حفر لوله جداری با استفاده از جامبو دریل ۴۳
- شکل ۱۷-۳ نحوه اجرای بتن تزریق با فشار بالا ۴۷
- شکل ۱۸-۳ ستون‌های ایجاد شده توسط تزریق با فشار بالا در سقف و کناره‌های تونل ۴۸
- شکل ۱۹-۳ نمایی از اره زنجیری برای برش در روش پیش‌بر ۴۹

- شکل ۳-۲۰ مقاطع برش طولی و عرضی از روش پیش برش ۵۰
- شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به مسیر تونل سیسنگان (گروه زمینشناسی، ۱۳۹۰) ۵۳
- شکل ۴-۲ موقعیت پروژه در نقشه زمین شناسی منطقه (برگرفته از نقشه چهارگوش ۱:۱۰۰،۰۰۰ ۵۵
- نوشهر، سازمان زمین شناسی کشور).....
- شکل ۴-۳ نمای عمومی از شرایط زمین ریخت شناختی پروژه (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰) ۵۸
- شکل ۵-۱ نمای کلی از مدل ایجاد شده در نرم افزار FLAC3D ۶۵
- شکل ۵-۲ جابجای ایجاد شده در تونل در حالت بدون هیچ نوع نگهداری..... ۶۹
- شکل ۵-۳ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل در حالت بدون استفاده از هیچ نوع نگهداری ۶۹
- شکل ۵-۴ جابجاییها به وجود آمده در مدل حفاری که از نگهداری اولیه استفاده شده ۷۰
- شکل ۵-۵ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در حفاری با اعمال نگهداری اولیه ۷۰
- شکل ۵-۶ میزان جابجای روی داده در اطراف تونل با اعمال نگهداری اولیه و نگهدارنده سینه کار ۷۱
- شکل ۵-۷ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با نگهداری اولیه و نگهدارنده سینه کار ۷۲
- شکل ۵-۸ وضعیت جابجاییهای اطراف تونل در حالی که نگهداری قوس چتری اعمال شده ۷۳
- شکل ۵-۹ ناحیه پلاستیک اطراف تونل با اعمال قوس چتری ۷۳
- شکل ۵-۱۰ جابجای به وجود آمده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری سه متری ۷۸
- شکل ۵-۱۱ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری سه متری ۷۸
- شکل ۵-۱۲ جابجایی به وجود آمده در اطراف تونل با اعمال قوس های شش متری ۸۰
- شکل ۵-۱۳ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل در زمان استفاده از قوس های شش متری ۸۰
- شکل ۵-۱۴ جابجای ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری نه متری ۸۱
- شکل ۵-۱۵ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری نه متری ۸۱
- شکل ۵-۱۶ جابجای به وجود آمده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری دوازده متری ۸۲
- شکل ۵-۱۷ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری دوازده متری ۸۲
- شکل ۵-۱۸ جابجای ایجاد شده در مدل با اعمال قوس های چتر با شیب ۵ درجه ۸۸
- شکل ۵-۱۹ جابجای به وجود آمده در مدل با اعمال قوس های چتری با شیب ۷ درجه ۸۹

- شکل ۵-۲۰ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال قوس چتری به شیب ۹ درجه ۸۹
- شکل ۵-۲۱ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال قوس چتری به شیب ۱۲ درجه ۹۰
- شکل ۵-۲۲ جابجایی به وجود آمده در تونل با اعمال قوس‌های چتری با هم پوشانی ۱ متر ۹۲
- شکل ۵-۲۳ جابجایی به وجود آمده در مدل با قوس‌های چتری به هم پوشانی ۲ متری ۹۲
- شکل ۵-۲۴ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال قوس چتری با همپوشانی ۳ متر ۹۳

فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۵ نمودار سطح خطر ساکورایی و بررسی جابجاییهای تاج تونل نسبت به سطوح خطر در حالت-
های مختلف ۷۴
- نمودار ۲-۵ جابجایی به وجود آمده در تاج تونل در حالت‌های مختلف نگهداری ۷۵
- نمودار ۳-۵ جابجایی به وجود آمده در سطح زمین برای حالت‌های مختلف ۷۵
- نمودار ۴-۵ جابجاییهای مختلف به وجود آمده در سینه کار تونل در فاصله‌داری‌های مختلف بولت‌های
فایبرگلاسی ۷۶
- نمودار ۵-۵ جابجاییهای به وجود آمده در تاج تونل برای طول‌های مختلف قوس‌چتری در طول تونل ... ۸۳
- نمودار ۶-۵ سطوح خطر ساکورایی و موقعیت کرنش‌های روی داده برای طولهای مختلف قوس‌چتری .. ۸۴
- نمودار ۷-۵ جابجایی به وجود آمده برای تاج تونل در فواصل مختلف لوله‌ها ۸۵
- نمودار ۸-۵ کرنش ایجاد شده در حالت‌های مختلف نصب لوله‌ها و موقعیت آنها نسبت به سطوح خطر
ساکورایی ۸۶
- نمودار ۹-۵ جابجایی به وجود آمده در طول تونل با تغییر زاویه نصب لوله‌ها قوس چتری ۸۷
- نمودار ۱۰-۵ زوایه‌های نصب مختلف و موقعیت کرنش به وجود آمده در هر زاویه نسبت به سطوح خطر
ساکورایی ۸۸
- نمودار ۱۱-۵ جابجایی به وجود آمده در قسمت تاج تونل برای همپوشانی‌های مختلف ۹۱
- نمودار ۱۲-۵ کرنش‌های به وجود آمده در همپوشانی‌های مختلف و موقعیت آنها نسبت به سطوح خطر
ساکورایی ۹۱

فهرست جداول

جدول ۱-۴ پارامترهای ژئومکانیکی زمین مسیر تونل ۶۲

جدول ۱-۵ پارامترهای مربوط به شاتکریت، قاب فولادی، فایبر گلاس و قوس چتری ۶۶

فصل اول

کلیات

تونل سازی عبارت از ایجاد یک مسیر در زیر سطح زمین که می تواند کاربردهای مختلفی داشته باشد، که از جمله این کاربردها می توان به ارتباطات جاده ای، انتقال آب، انتقال انرژی و غیره اشاره کرد. با توجه به زیاد بودن هزینه های تونل سازی و خطرات ناشی از حفاری تونل، لازم است دلایل کافی برای حفر تونل وجود داشته باشد. همچنین این دلایل به اندازه ای ضرورت داشته باشند که بتوانند نیاز به حفر تونل را توجیه پذیر کنند. البته بسته به نوع زمین، نوع کاربری و موقعیت قرارگیری تونل، طراحی و حفاری آن به روش های مختلفی انجام می شود.

با توجه به اینکه هزینه های تونل سازی خیلی زیاد است، از این رو با طراحی بهتر و بررسی بیشتر در رابطه با نحوه حفر و نگهداری تونل می توان در ارتباط با به وجود آمدن هزینه های مازاد و نیز کاهش هزینه های اجرایی قدم برداشت. برای رسیدن به این اهداف نیاز است قبل از ساخت تونل مطالعات گسترده ای در این رابطه انجام داد، در نتیجه برای تکمیل مطالعات و آگاهی پیدا کردن از نحوه رفتار زمین در برگیرنده تونل در حین حفاری و بعد از آن و همچنین برای تعیین نوع و میزان نگهداری های اعمالی از روش های عددی استفاده کرد.

در شرایطی که نتوان با استفاده از خود مصالح زمین و روش های معمول که برای نگهداری تونل استفاده می شود، پایداری کافی را برای تونل فراهم کرد، لازم است که روش های خاصی برای فراهم کردن پایداری تونل به کار برده شود. بدیهی است در صورت عدم نصب و اجرا به موقع سیستم نگهدارنده مناسب، تونل ریزش کرده و یا از حالت معمول خارج می شود که می تواند باعث وارد آمدن خسارت فراوان یا تعطیل شدن کل پروژه شود.

روش پیش تحکیم روشی است، که می توان در شرایط خاص زمین از آن استفاده کرد. این روش از روش های مختلفی تشکیل می شود که در فصل سوم بیشتر این روش ها شرح داده شده است. استفاده از روش های پیش تحکیم نیازمند برداشت های صحرایی دقیق مصالح در بر گیرنده تونل در کنار انجام آزمایش های مکانیک سنگی و مکانیک خاکی بر روی نمونه بدست آمده از گمانه های حفر شده در

محدوده تونل می‌باشد. برای این که طرح پیش‌تحکیم تاثیر بهتری در پایداری تونل داشته باشد، و همچنین برای رسیدن به بهینه‌ترین طرح لازم است، با استفاده از روش‌های عددی تاثیر و نحوه اعمال پارامترهای اساسی روش پیش‌تحکیم تعیین شود.

در کشورهای پیشرفته روش پیش‌تحکیم از جمله پر کاربردترین روش در زمینه تونل‌سازی زمین‌های نرم و ریزشی می‌باشد. از جمله محققان برجسته‌ای که در زمینه روش‌های مذکور تحقیقات زیادی را انجام داده‌اند می‌توان به ولکمن و شوبرت^۱ اشاره کرد (Volkman, G.M, 2008). پیلا^۲ مطالعاتی جامعی را بر روی رفتار سینه کار تونل تقویت شده با بولت‌های افقی انجام داده است (Peila, D., 1994). همچنین هوک^۳ مدلسازی‌های عددی را برای حفاری تونل‌های کم عمق در زمین‌های دارای پارامترهای مکانیکی ضعیف انجام داده است (Hoek, E., et al, 2008). در ایران روش پیش‌تحکیم برای پایداری بعضی پروژه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، در صورتی که مدل‌سازی برای تعیین پارامترهای مربوط به این روش کمتر انجام شده است.

هدف از این تحقیق مدلسازی سه بعدی تونل حفر شده در زمینی که مصالح در برگیرنده دارای خصوصیات مکانیکی ضعیفی می‌باشد، است. با این مدلسازی می‌توان میزان تأثیر پارامترهای مختلف موثر بر تونل حفر شده را مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان به یک طرح مناسب برای اعمال پیش‌تحکیم دست پیدا کرد.

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

لزوم اجرای پیش‌تحکیم ایجاد پایداری تونل در حین حفاری و بعد از آن می‌باشد. پیش‌تحکیم در واقع قبل از حفر تونل اجرا می‌شود، به این صورت که قبل از هر گونه حفاری در تونل پیش‌تحکیم مورد نظر اعمال می‌شود، تا در حین حفاری تونل مشکلی ایجاد نشود. به همین دلیل بعد از اینکه اطلاعات ژئومکانیکی زمین در برگیرنده تونل بدست آورده شد، لازم است برای رسیدن به طرحی کلی از پیش-

¹ Volkman and Schubert

² Peila

³ Hoek

تحکیم اعمالی و تعیین پارامترهای مربوطه از مدلسازی عددی استفاده شود.

البته در صورت عدم مدلسازی ممکن است در حین اجرای پروژه با مشکلات متعددی که از جمله می‌توان به؛ ریزش تونل و نشست سطح زمین و عواقب بعدی آن، وقفه طولانی مدت در اجرای حفاری، به وجود آمدن هزینه‌های اضافی و غیره اشاره کرد، روبرو شد. اگر چه این مشکلات با مدل‌سازی حل نمی‌شود، ولی از احتمال وقوع آنها کاسته می‌شود.

۳-۱ روش تحقیق

روش پیش‌تحکیم دارای انواع مختلفی است، که هر کدام را می‌توان بسته به شرایط زمین، شرایط اقتصادی، فراهم بودن شرایط از نظر تأسیسات مورد نیاز هر روش در موقعیت‌های مختلفی قابل کاربرد هستند. در این پروژه با بررسی شرایط محیطی و دیگر شرایط وابسته تأکید بر استفاده از روش قوس چتری و بولت‌های سینه‌کار می‌باشد. از این‌رو با مدل کردن این روش‌ها و بررسی تغییرات ایجاد شده ناشی از تغییر پارامترهای مربوطه و تاثیر هر کدام از این پارامترها بر پایداری تونل حفر شده می‌توان تا حدودی به نحوه اعمال و مشخصات هر روش دست پیدا کرد.

۴-۱ خلاصه پایان‌نامه

در فصل اول مقدمه‌ای کلی از پایان‌نامه، ضرورت انجام و شیوه انجام تحقیق به صورت خلاصه آورده شده است.

در فصل دوم خلاصه از تحقیقات که توسط محققان مختلف در رابطه با موضوع این پایان‌نامه انجام شده، آورده شده است.

در فصل سوم انواع روش‌های پیش‌تحکیم آورده و هر کدام را به صورت جداگانه توضیح داده شده است.

در فصل چهارم موقعیت جغرافیایی و شرایط زمین‌شناسی محل حفر تونل آورده شده است.

در فصل پنجم مدل سازی ها و نتایج آنها ارائه شده است.

در فصل ششم نیز نتایج و پیشنهادات ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

استفاده از روش‌های پیش‌تحکیم سابقه‌ای چندین ساله دارد. این روش‌ها با توجه به شرایط زمین برای مناطق مختلفی قابل استفاده هستند، از این‌رو تحقیقاتی که در رابطه با این روش‌ها انجام شده است دارای گستره زیادی است و از آنجا که روش‌های پیش‌تحکیم دارای انواع مختلفی است، در اینجا تنها به تحقیقات که در رابطه با نگهداری قوس چتری و نگهداری سینه‌کار با استفاده از بولت‌های فایبرگلاسی پرداخته‌اند، به طور مختصر اشاره شده است.

۲-۲ تعدادی از تحقیقات انجام شده:

روو و همکاران^۱ تحلیل‌های عددی را بر پایه روش المان محدود انجام داده و برای پیش‌بینی مقادیر نشست در بالایی تونل‌های احداث شده در زمین‌های نرم، نتایج را با اندازه‌گیری میدانی انجام شده، مورد مقایسه قرار داده‌اند (Rowe, R.K., et al, 1983).

لی و همکاران^۲ تحلیل‌های المان محدود سه بعدی را به منظور محاسبه تغییر شکل‌های ایجاد شده در نتیجه حفاری تونل در رس نرم را انجام داده‌اند (Lee, K.M., et al, 1991).

لوناردی و همکاران^۳ نتایج رفتار نگاری میدانی پروژه‌های تونل‌سازی را که در آنها برای تقویت و پایداری سینه‌کار از بولت‌های فایبر گلاسی استفاده شده، ارائه داده است (Lunardi, P., et al, 1992).

ساتو و همکاران^۴ تحلیل‌های المان محدود سه بعدی تاثیر روش قوس چتری بر روی پایداری سینه‌کار را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند (Sato, J., et al, 1993).

پیلا^۵ با استفاده از مدل المان محدود سه بعدی، شرایط مختلف را مورد بررسی قرار داده و همچنین

¹ Rowe, R.K., et al

² Lee, K.M., et al

³ Lunardi, P., et al

⁴ Sato, J., et al

⁵ Peila, D.

به تاثیر بولت‌های سینه‌کار بر پایداری پرداخته است (Peila, D., 1994).

نیشیماکي و همکاران^۱ تحلیل‌های المان محدود سه بعدی را برای مدل کردن چتر لوله‌های فولادی با استفاده از محیط معادل و همگن، انجام داده‌اند (Nishimaki, A., et al, 1995).

اوتسو و همکاران^۲ با استفاده از محیط معادل و همگن رفتار زمین در نتیجه حفاری تونل را با استفاده از تحلیل‌های المان محدود سه بعدی مورد مطالعه قرار داده‌اند (Ohtsu, H., et al, 1995).

آقای پیلا و همکاران با استفاده از مدل المان محدود سه بعدی، مطالعه پارامتری را جهت بررسی تاثیر بولت‌های فایبر گلاسی بر روی پایداری سینه‌کار را انجام داده‌اند. نتیجه حاصله این بود که رفتار بولت‌های طولی را فقط می‌توان با مدل‌سازی سه‌بعدی، نشان داد (Peila, D., et al, 1996).

آقای آنگنستو^۳ به بررسی و طراحی نگهداری دو تونل مترو در یونان پرداخته است. نگهداری اولیه شامل تورهای فلزی شاتکریت و نگهداری نهایی شامل لاینینگ می‌باشد. حفاری و پیشروی تونل در زیر فورپول‌های ایجاد شده انجام می‌شود و همچنین برای پایداری سینه‌کار از میله‌های فایبر گلاس استفاده شده است (Anagnostou, G., 2001).

باریسونه و همکاران^۴ در سال ۱۹۸۲، ماتسو و همکاران^۵ در سال ۱۹۹۶، هارویاما و همکاران^۶ در سال ۲۰۰۱ و همچنین یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۱ نحوه اجرای روش‌های پیش‌تحکیم را با بررسی مطالعه موردی‌های مختلف با جزئیات شرح داده‌اند.

کاماتا و همکاران^۷ با استفاده از مدل سانتریفیوژ تاثیر بولت‌های سینه‌کار را بررسی کرده‌اند. نتایج بدست آمده به این صورت است که: نصب بولت‌های به طول نصف بزرگترین قطر تونل بهینه‌ترین حالت است و نصب بولت‌ها در نیمه پایین سینه‌کار تونل تاثیر کمتری نسبت به نصب آنها در قسمت بالایی تونل

¹ Nishimaki, A., et al

² Ohtsu, H., et al

³ Anagnostou, G.

⁴ Barisone, G. et al

⁵ Matsuo, H., et al

⁶ Haruyama, K., et al

⁷ Kamta, H., et al

دارد. پیش‌تحکیم‌های که به صورت قائم بر سطح سینه کار نصب می‌شوند تاثیر بیشتری بر پایداری سینه-کار می‌گذارند، به ویژه بولت‌های که در نزدیک انحنایی تونل نصب می‌شوند. پیش‌تحکیم از رسیدن شکست‌ها به سطح زمین جلوگیری به عمل می‌آورد (Kamta, H., et al, 2003).

آقای هفنی و همکاران^۱، به بررسی نحوه مدلسازی چترهای بتنی و زمین در برگیرنده تونل و تاثیر این روش‌های بر نتایج حاصل از مدلسازی پرداخته‌اند. برای این کار دو روش مختلف از ایجاد مدل عددی مورد مقایسه قرار داده شده، به این صورت که در یک حالت نگهداری و زمین در برگیرنده به صورت ترکیب با هم مدل شده‌اند و در حالت دیگر مواد نگهداری را به صورت جدا و زمین را به صورت جدا مدلسازی کرده‌اند. نتیجه‌ای که در نهایت حاصل شده نشان می‌دهد که در میزان جابجاییهای ایجاد شده و میزان نشست سطح زمین تفاوت‌های وجود دارد، بنابراین لازم است با توجه به شرایط مختلف نوع مدلسازی مناسب انتخاب شود (Hefny, A.M., et al, 2004).

آقای چوی و همکاران^۲ با استفاده از مدل‌های دوبعدی آزمایشگاهی به بررسی خاک‌های با چسپندگی کم در اطراف تونلی که در آن برای پیش‌تحکیم از بولت‌های فایبرگلاسی و چترهای بتنی استفاده شده، پرداخته‌اند. نتایج حاصل شده به این صورت است که با قرار گیری پیش‌تحکیم در محدوده تنش قائم پایه میزان تاثیر پذیری آنها کم می‌شود. هر چند تغییر در میزان پیش‌تحکیم با میزان فشار قائم رابطه مستقیم دارد. از این‌رو، قطعاً پیش‌تحکیم برای تونل‌کاری ایمن در سقف و جبهه کار نقشه مهمی را اجرا می‌کند. میزان تاثیر پیش‌تحکیم در نگهداری سقف و جبهه‌کار به پارامترهای طراحی (طول، تعداد و زاویه پیش‌تحکیم‌ها) بستگی دارد (Choi, Y.K., et al, 2005).

کیمورا^۳ مجموعه‌ای از تقویت‌کننده‌ها را در حفاری تونل‌های کم عمق به کار برد و به بررسی رابطه طول و تاثیر آن در میزان نشست سطح زمین پرداخته است (Kimura, H., 2005).

ولکمن و همکاران با استفاده از داده‌های برداشت شده از سرزمین و استفاده از این داده‌ها برای

¹ Hefny, A.M., et al

² Choi, Y.K., et al

³ Kimura, H.

ایجاد مدل ژئومکانیکی و مدل عددی سه بعدی به طراحی پیش تحکیم بهینه پرداخته‌اند (Volkmann, G.M., et al, 2007, 2006).

آقای ولکمن و همکاران^۱ در این تحقیق به مقایسه روش‌های مختلف نصب لوله که در روش‌های پیش تحکیم مورد استفاده قرار می‌گیرند پرداخته است. برای نصب لوله‌ها از دو روش پیش حفاری (اول حفاری و بعد از اتمام حفاری لوله‌ها درون چال قرار داده می‌شود) و روش کیسینگ (در این روش همزمان با حفاری لوله در داخل چال قرار داده می‌شود) استفاده می‌شود. نتیجه‌ی تحقیق به این صورت ارائه شده که در زمین‌های ضعیف و مناطق شهری بهتر است از روش کیسینگ استفاده شود، دلیل آن این است که در این شرایط به محض حفر چال بار گذاری اعمال می‌شود که اگر در این حالت از روش پیش حفاری استفاده شود، احتمال بسته شدن چال و مشکلات بعد از آن وجود دارد، در نتیجه بهتر است در شرایط زمین با پارامترهای کم و در مناطق شهری از روش کیسینگ استفاده شود (Volkmann, G.M., et al, 2008).

آقای هوک و همکاران^۲ به بررسی روش‌های می‌پردازند که از آنها می‌توان برای بهبود طراحی تونل از ترکیب پیش تحکیم و نگهداری اصلی استفاده کرد. استفاده از این روش‌ها در یک تونل بسیار عمیق و یک تونل سطحی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Hoek, E., et al, 2008).

آقای فناتسو و همکاران^۳ در مقاله‌ای با استفاده از روش عددی المان مجزا به بهتر فهمیدن مکانیسم تاثیر نگهدارنده‌ها و پیش تحکیم‌ها بر پایداری تونل پرداخته‌اند. نتایج حاصله به این صورت است که می‌توان از روش المان مجزا برای شبیه‌سازی ناحیه سست شده اطراف تونل و عکس‌العمل قوس‌ها استفاده شده در تونل‌های سطحی، در حالتی که نتوان شبیه‌سازی‌های پیوسته را به کار برد، استفاده کرد. نگهداری‌ها باعث کاهش تنش‌های اصلی مینیمم اطراف تونل شده، از این رو تنش‌های زمین اطراف تونل پایدارتر می‌مانند. با نگهداری موثر، زمین ناپیوسته می‌تواند مثل حالت پیوسته رفتار کند. از مقایسه بین نگهداری پیش-

¹ Volkmann, G.M., et al

² Hoek, E., et al

³ Funatsu, T. et al

تحکیم و نگهداری سینه کار تونل مشخص شده که استفاده از نگهداری سینه کار موثرتر است (Funatsu, T., et al, 2008).

آکسوی و همکاران^۱ تاثیر روش چتری را بر میزان نشست را با استفاده از داده‌های برجا و مدل سازی عددی مورد بررسی قرار داده است. نتیجه که حاصل می‌شود این است که روش چتری ریسک به وجود آمدن نشست را و همچنین میزان نشست را تا ۶۹٪ و همگرایی را تا ۵۹٪ کاهش می‌دهد (Aksoy, C.O., et al, 2010).

آقای شینجی و همکاران^۲ و همکاران با وارد کردن پارامترهای زمین در نرم افزار PFC2D به بررسی تاثیر فاصله و شیب لوله‌های نسبت به همدیگر پرداخته‌اند. نتایج حاصله به این صورت است که با افزایش میزان فاصله بین لوله‌ها ارتفاع قوس ریزشی مابین دو تا لوله افزایش پیدا می‌کند، همچنین با داشتن طراح کلی و میزان چسپندگی زمین می‌توان به فاصله بهینه رسید (Shinji, M., et al, 2010).

آقای پرونتزوپولوس^۳ به مقایسه دو روش پیش تحکیم یعنی، روش استفاده از بولت‌های فایبر گلاس در سینه کار تونل و روش استفاده از قوس بتنی در تاج تونل می‌پردازد. که در نهایت نتایجی که حاصل می‌شود حاکی از این است که استفاده از بولت‌های فایبر گلاس در سینه کار تونل تاثیر بیشتری بر نگهداری سینه کار تونل دارد. زمانی که شرایط زمین در بر گیرنده تونل نامطلوب باشد می‌توان ترکیبی از بولت‌های فایبر گلاس با قوس بتنی استفاده کرد، تا میزان تاثیر پذیری آنها بیشتر شود (Prountzopoulos, G., 2011).

¹ Aksoy, C.O., et al

² Shinji, M., Et al

³ Prountzopoulos, G.

فصل سوم

روش‌های پیش‌تحکیم

افزایش نیاز به حفر تونل باعث حفر تونل در شرایط مختلف شده است، از این رو روش‌های مختلفی برای حفاری و نگهداری تونل به وجود آمده است. حفاری و نگهداری تونل در شرایط مختلف با توجه به وضعیت زمین و نیاز پروژه به روش‌های مختلفی قابل اجرا است. برای مثال در زمین‌های پایدار و مقاوم می‌توان تونل را هم به صورت مکانیزه و هم با استفاده از روش‌های سنتی، با توجه شرایط موجود، حفاری و نگهداری کرد. اما در شرایطی که زمین پایداری لازم را ندارد یا نیاز به حفر تونل در نزدیک سطح زمین و همچنین زمانی که لازم است میزان جابجای‌ها دارای کمترین مقدار باشد، ضروری است که روش‌های خاصی برای حفاری و نگهداری استفاده کرد. در این شرایط می‌توان از ماشین‌های تمام اتوماتیک^۱ TBM یا دیگر روش‌های مکانیزه استفاده کرد، این در حالی است که شرایط استفاده از این ماشین آلات فراهم باشد. در صورتی که شرایط استفاده از ماشین آلات مکانیزه وجود نداشته باشد یا نتوان با استفاده از آنها به پایداری لازم رسید، نیاز است از روشی دیگر برای رسیدن به پایداری در حین حفر و بعد از آن در طول عمر تونل استفاده کرد. روش پیش‌تحکیم روشی است که می‌توان از آن برای پایداری تونل استفاده کرد. این روش به این صورت است که قبل از حفر کردن تونل اعمال می‌شود، از این‌رو پایداری تونل را در حین حفاری و طول عمر تونل فراهم می‌کند. در ادامه تعدادی از روش‌های پیش‌تحکیم به صورت کامل توضیح داده شده است.

۲-۳ تزریق:

تزریق مراحلی که در آن مواد مشخصی در زمین تزریق می‌شود را تشکیل می‌دهد. که دو هدف اصلی را دنبال می‌کند:

- برای کاهش نفوذپذیری زمین در مقابل آب
- برای مقاوم کردن و پایدار کردن زمین

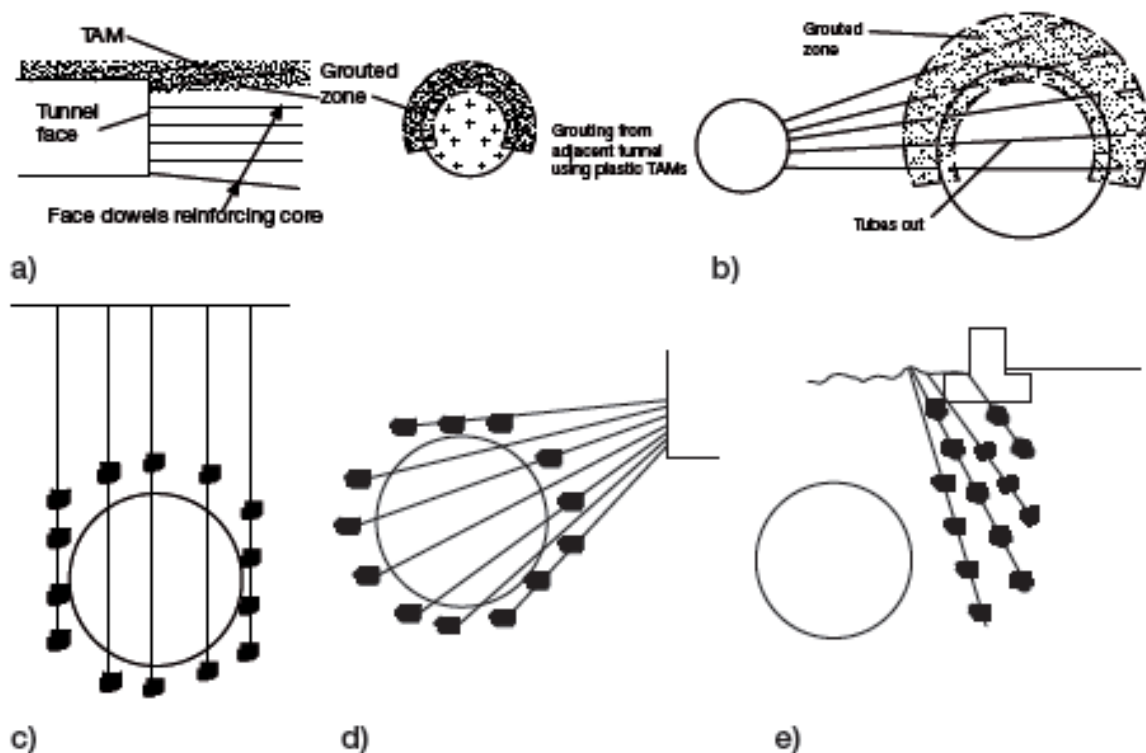
^۱ Tunnel Boring Machines

در زمین‌های نرم هدف از تزریق افزایش مقاومت و در ساختارهای سنگی درزه‌دار هدف افزایش سختی سنگ در قسمت‌های دارای درزه می‌باشد.

عملیات تزریق را می‌توان به دو صورت یعنی یا از سطح زمین (یا از چاهی که در مجاورت تونل قرار دارد) و یا از داخل خود تونل انجام داد. از این روش‌ها می‌توان برای پایدارسازی ساختارهای که در روی مسیر تونل قرار دارند استفاده کرد، یعنی از نشست احتمالی آنها جلوگیری به عمل آورد (Chapaman, D.N., et al, 2010).

برای تزریق در تونل، چال‌ها در قسمت بالایی سینه‌کار تونل طوری زده می‌شود که نسبت به محور افقی تونل شیبی به طرف بالا داشته باشند و همچنین این چال‌ها را در امتداد قوس تونل ادامه داده تا یک قوسی مخروطی شکل در بالای تونل به وجود بیاید. حال این کار را در مراحل بعد ادامه داده تا با قوس قبلی هم پوشانی داشته باشند. در حفاری تونل با استفاده از آتشیاری می‌توان در سینه‌کار تونل نیز این کار را انجام داد (Muir Wood, 2000). زمانی که در تونل‌سازی از TBM استفاده می‌شود، برای جلوگیری از تاثیر سربرنده چال‌های تزریق از داخل خود TBM، در قسمت پشت سربرنده حفر می‌شود، اما عملیات تزریق از میان سر برنده نیز قابل اجرا است. هنگامی که از سپر باز برای حفر تونل استفاده می‌شود، می‌توان تزریق را از میان سپر انجام داد، البته می‌توان هم روی سینه‌کار و هم به صورت شعاعی بتن‌پاشی کرد. اگرچه، برای تزریق از داخل ماشین حفاری لازم به مراقبت زیادی است و نیز احتمال به وجود آمدن خطر زیاد است. علاوه براین، می‌توان تزریق را از میان لاینینگ‌ها به صورت شعاعی برای پر کردن حفرات و شکستگی‌های موجود و به وجود آمده انجام داد شکل ۳۳-۱ تعدادی از روش‌های تزریق در تونل‌سازی را نشان می‌دهد.

از حفاری ضربه‌ای-چرخشی برای وصل کردن لوله‌های تزریق به داخل زمین استفاده می‌شود. لوله-های تزریق ممکن است به صورت یک لوله باشد که دو انتهای آن باز است و فقط از نوک آنها می‌توان دوغاب را در داخل زمین تزریق کرد و یا اینکه این لوله‌ها به صورتی هستند که می‌توان در کل طول لوله عمل تزریق را انجام داد (Chapaman, D.N., et al, 2010).



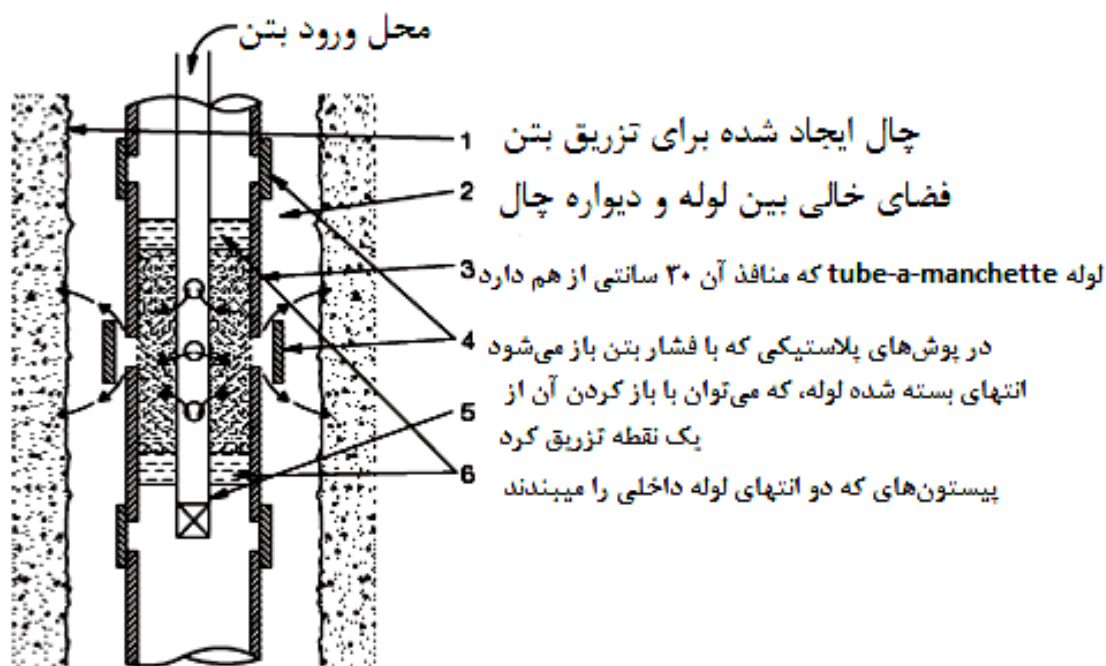
شکل ۱-۳۳ مثال‌های از تزریق در طول ساخت تونل (a) از داخل خود تونل (b) از تونل مجاور (c) از سطح زمین (d) از چاه کناری یا، (e) برای پایداری ساختارهای نزدیک تونل (Woodward, J., 2005)

برای تزریق دوغاب از لوله‌های تزریق^۱ TAM یا لوله‌های غلاف‌دار طوری استفاده می‌شود که تزریق در محلی که مورد نظر است به صورت پی‌درپی انجام شود. طرح کلی این لوله‌ها به این صورت است که در طول آنها منافذ متعددی وجود دارد و این منافذ توسط لوله‌ای پلاستیکی که خود دارای منفذ است و در داخل لوله اصلی تزریق قرار دارد بسته می‌شوند. عملکرد آنها به این صورت است که با فشار بتن منافذ لوله پلاستیکی، که انعطاف‌پذیر هستند، باز شده و با باز شدن این منافذ دوغاب از میان منافذ عبور کرده و بدین صورت عمل تزریق در طول چال انجام می‌شود (Chapaman, D.N., et al, 2010).

برای تزریق دوغاب به صورت نقطه‌ای از لوله‌ای محرک داخلی، که دوغاب در داخل آن در جریان است استفاده می‌شود، یعنی می‌توان با باز کردن انتهای این لوله تزریق را به صورت نقطه‌ای انجام داد.

^۱ Tube-A-Manchette

برای تزریق در طول چال، انتهای لوله اصلی تزریق مسدود می‌شود و به این ترتیب تزریق از جداره‌های لوله انجام می‌شود. شکل ۲-۳۳ روش TAM را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۳ چیدمان لوله‌های تزریق (Megaw and Bartlett, 1981)

۳-۳ روش‌های مختلف تزریق:

۱-۳-۳ تزریق شیمیایی^۱:

در این تکنیک حفرات موجود در خاک طوری از دوغاب‌های رزینی یا شیمیایی پر می‌شود که شگستگی-های اولیه و فرم اولیه آنها بدون تغییر باقی بمانند. محدوده اندازه ذراتی که می‌توان از این تکنیک استفاده کرد از ماسه‌ها (۰/۰۶ میلی‌متر) تا شن‌های دانه ریز (۶۰ میلی‌متر) است.

¹ Chemical Grouting

۲-۳-۳ تزریق با فشار بالا^۱:

در این روش از جت‌های با فشار بالا استفاده می‌شود به طوری که خاک اصلی موجود را از بین برده و یک مخلوطی از سیمان و خاک جایگزین می‌شود. این روش محدوده گسترده‌تری از روش تزریق شیمیایی دارد، این محدوده از رس ($0.02 <$ میلی متر) تا شن ریزه (۱۰ میلی متر) گسترده شده است. تزریق با فشار بالا یا در چال‌های از پیش حفاری شده استفاده می‌شود و یا جت تزریق خود توانایی حفاری دارد و می‌تواند هم حفر کند و هم تزریق را انجام دهد. وقتی که موقعیت جت به عمق مورد نظر رسید، جت شروع به چرخش کرده و جریان بتن که داخل جت قرار دارد به قسمت انتهایی جت پمپ شده و از آنجا به داخل چال تزریق می‌شود، این کار تا زمانی ادامه دارد که دوغاب ریخته شده به فرم چال شکل بگیرند، و این کار تا وقتی که یک ستون در جا از بتن باقی بماند ادامه داده می‌شود (Woodward, J., 2005).

سه روش اساسی جت کردن وجود دارد؛ سیستم تک جت یعنی تنها بتن پمپ می‌شود، سیستم دو جت شامل بتن و هوای فشرده و سیستم سه جت که بتن از میان یکی تزریق می‌شود و تنها مزیتی که نسبت به دیگر روش‌ها دارد این است که آب و هوا به صورت مخلوط تزریق می‌شوند. باید به این نکته توجه کرد که وقتی که چال توسط خرده ریزه حفاری پر می‌شود، فشار ناگهانی جت می‌تواند باعث ایجاد تمرکز فشار و در نتیجه آن انفجار شود، که ممکن است باعث آسیب دیدن تأسیسات یا خالی شدن چال از بتن شود. این واقعاً ریسک زیادی می‌خواهد و ناظر باید به دقت فشار و جریان برگشتی بتن را کنترل کند تا از روی دادن چنین اتفاقی جلوگیری شود. نوع سیستم مورد استفاده برای عملیات بتن‌ریز با استفاده از جت به زمین محل اجرا بستگی دارد، سیستم تک جت برای ماسه‌های با $N_{SPT} < 15$ و دیگر سیستم‌ها (دو جت و سه جت) برای خاک‌های دانه متوسط استفاده می‌شود (Woodward, J., 2005). اگر چرخش جت تمام شد می‌تواند نشان دهنده این باشد که ستون مورد نظر در داخل زمین تشکیل شده است.

¹ Jet Grouting

۳-۳-۳ تزریق فشرده^۱:

این روش متفاوت از هر دو روش یعنی تزریق شیمیایی و تزریق با فشار بالا است، در این روش تکنیک بهبود زمین بر بهسازی زمین ترجیح داده می‌شود. به طور ویژه در تزریق فشرده بتن با روانی کمی به داخل زمین تزریق می‌شود (با ابعاد دانه‌بندی ۲۵-۱۰۰ میلی‌متر)، برای مثال بتن سفت، طوری که شکل برآمدگی به وجود بیاید. این انبساط باعث تغییر شکل و متراکم سازی در اطراف محل تزریق می‌شود که در نهایت این رویداد باعث بهبود زمین می‌شود. این روش با هر دو روش تزریق یعنی در ادامه حفاری یا راندن لوله باریک (به قطر معمول ۸۹-۱۱۴ میلی‌متر) در چالی که قبلاً حفر شده برای عمقی که تزریق باید در آنجا صورت گیرد قابل اجرا است، در روشی که در ادامه حفاری تزریق صورت می‌گیرد در عمق مورد نظر حفاری قطع می‌شود و بتن به ته چال حفر شده پمپ می‌شود ولی در دیگر روش لوله‌ها حفاری را بالا آورده سپس بتن تزریق می‌شود. محدوده خاک‌های که می‌توان این روش را به کار برد مانند روش بتن‌کاری تزریقی از ماسه‌ها (۰/۰۶ میلی‌متر) تا شن متوسط (۳۰ میلی‌متر) است (Chapaman, D.N., et al, 2010).

باید به این نکته توجه کرد بتن‌ریزی در سنگ متفاوت با روش‌های بالا است زیرا در سنگ‌ها درزه و شکاف وجود ندارد تا بتوان مانند روش تزریق بتن عمل کرد و یا آنقدر ناپایدار نیست تا بتوان از روش تزریق با فشار یا بتن‌ریزی فشرده استفاده کرد، یعنی مواد سخت هستند و خرد کردن آنها با بتن امکان پذیر نیست، اما برای تزریق در سنگ به این صورت عمل می‌شود که ترک و شکستگی‌ها را در سنگ به وجود آورده سپس با استفاده از بتن این شکستگی‌ها پر می‌شود تا ناحیه مورد نظر پایدار شود (Chapaman, D.N., et al, 2010).

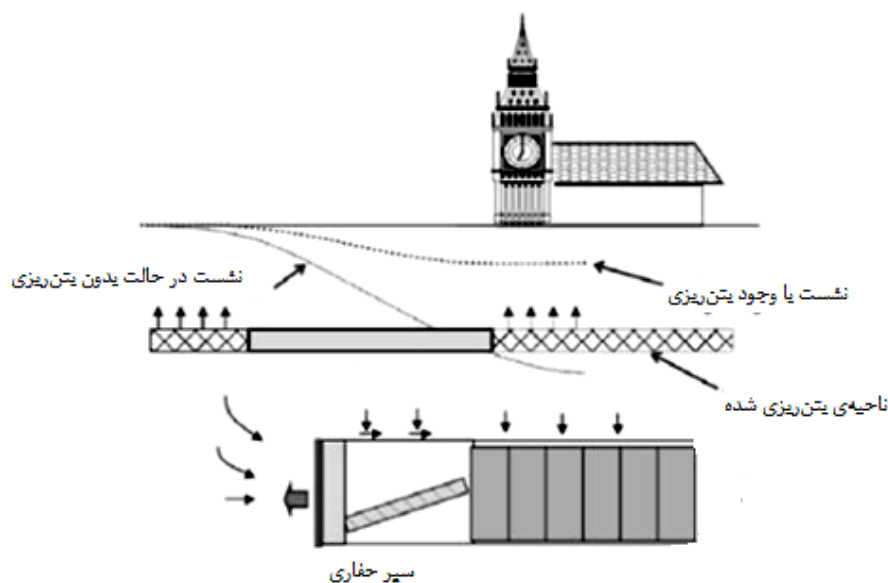
۳-۳-۴ تزریق جبرانی^۲:

تزریق جبرانی تکنیکی است که برای کنترل نشست در ساختارهای نزدیک محل حفر تونل که در

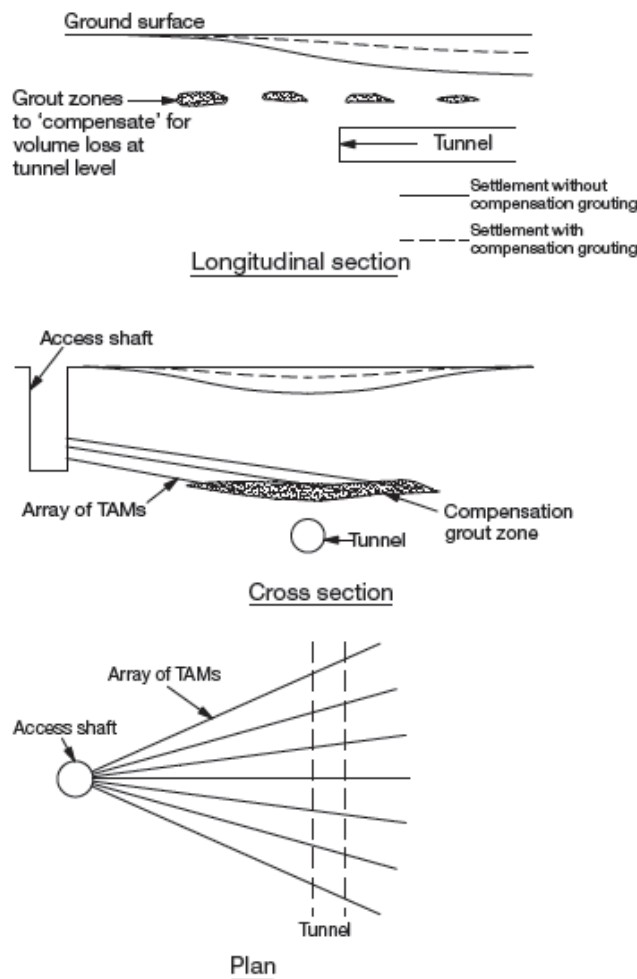
¹ Compaction Grouting

² Compensation Grouting

خاک نرم حفر می‌شوند استفاده می‌شود، که می‌تواند شکل ویژه‌ای از روش‌های بهسازی زمین باشد. نشست می‌تواند در اطراف محل اجرای پروژه به دلیل تغییر تنش در حین ساخت تونل به وجود بیاید. اگرچه این روش برای تثبیت کردن تونل نیست بلکه روشی برای جلوگیری از تاثیر حفر تونل بر ساختارهای مجاور تونل می‌باشد. از این روش به عنوان یک روش برای نگهداری از ساختارهای نزدیک به عملیات تونل‌کاری یا باز مسطح کردن ساختارها دچار نشست شده و یا تحت کنترل در آوردن زمین برای جلوگیری از پیشروی نشست استفاده می‌شود (شکل ۳-۳ و شکل ۴-۳). معمولاً، تزریق جبران‌کننده به تنهایی نمی‌تواند از جابجایی زمین جلوگیری به عمل آورد. برای رسیدن به کمترین میزان احتمالی نشست افزایش میزان نگهداری قبل از حفاری تونل مورد نیاز است (Chapaman, D.N., et al, 2010).



شکل ۳-۳ نمایی از روش تزریق جبرانی برای کاهش نشست در ساختارهای نزدیک تونل (Woodward, J., 2005)



شکل ۳-۴ تزریق جبرانی برای ساخت تونل (Woodward, J., 2005)

این روش شامل تزریق دوغاب در حد فاصل بین تونل و ساختاری که پایداری آن برای ما مهم است می‌باشد (شکل ۳-۴). این روش عموماً به این صورت است که از چاهی که در مجاورت تونل حفر شده چال‌ها را به صورت شعاعی به شکلی حفاری کرده که در قسمت بالای تونل قرار گیرند و پس از حفاری در این چال‌ها دوغاب تزریق می‌شود. روش TAM، که قبلاً شرح آن داده شده، یا هر روشی دیگر مشابه به آن که برای تزریق دوغاب به صورت کنترل شده بعد از بهسازی‌های اولیه که در زمین مورد نظر انجام شده استفاده می‌شود. بهسازی زمین یعنی بتن به صورتی استفاده می‌شود که خاک را فشرده می‌کند، ممکن است در زمین ایجاد شکست کند، بنابراین تزریق‌های بعدی که انجام می‌شود ممکن است باعث تاثیر بدی بر زمین شود. کنترل حجم بتن تزریق شده در حالتی که هدف جبران جابجایی ایجاد شده در سطح زمین

باشد، انجام می‌شود. حجم‌های مورد بحث معمولاً کم است، برای مثال ۲۰ تا ۱۰۰ لیتر، برای اطمینان حاصل کردن که دوغاب به بیرون از زون تزریق جبران کننده انتقال پیدا نمی‌کند. میزان دوغاب مورد نیاز برای تزریق بسته به راندمان زمین محیط دارد، یعنی نسبت میزان حجمی که دوغاب تزریق می‌شود به میزان حجمی که زمین تغییر شکل می‌دهد. اساساً، بازدهی زمین در رس‌های نرم ۱۰ تا ۱۵٪ و در ماسه ۲۰ تا ۳۰٪ است (Chapaman, D.N., et al, 2010).

۴-۳ تقسیم‌بندی انواع دوغاب:

در واقع دوغاب را به دو دسته تقسیم می‌کنند، دوغاب‌های سوسپانسیون^۱ (معلق) و دوغاب‌های محلول شیمیایی^۲. هر کدام از این بتن‌ها ملزومات متعددی می‌خواهند، یک دوغاب مراحل مختلفی طی می‌کند و دارای مشخصه‌های است که در زیر آورده شده (Woodward, J., 2005):

- پایداری: دوغاب باید در طول مرحله مخلوط کردن و تزریق پایدار باشد و در سیمان سوسپانسیون جدایش ناگهانی نداشته باشد، یا اگر دوغاب مایع وجود دارد ناگهانی کلوخه نشود.
- اندازه ذرات: برای دوغاب سوسپانسیون این ویژگی کمتر محدود می‌شود و می‌توان در خاک با اندازه دانه‌بندی شده نیز نفوذ داد.
- گران‌روی: این خاصیت به طور اساسی میزان توانایی نفوذ یک دوغاب در خاک را نشان می‌دهد. دیگر خصوصیات جریان و زمان ژله شدن تعیین کننده بیشترین شعاع تزریق می‌باشند.
- مقاومت وقتی تثبیت شود یا مقاومت ژله شده: بستگی به این دارد که از دوغاب برای چه منظوری استفاده می‌شود، یعنی اینکه از دوغاب برای مقاوم کردن زمین یا اینکه برای کاهش نفوذپذیری استفاده می‌شود.
- دوام (پایداری): دوغاب وقتی که به مقاومت نهایی می‌رسد باید در مقابل فعالیت‌های شیمیایی

¹ Suspension Grouts

² Chemical Solution Grouts

و فرسایشی که در اثر آب زیرزمینی به وجود می‌آید مقاومت کافی داشته باشد.

۳-۴-۱ دوغاب سوسپانسیون:

دوغاب‌های سوسپانسیون به طور اساسی ترکیبی از دوغاب سیمان با نسبت تقریبی سیمان به آب ۰/۱ تا ۰/۴ ، و مقدار انتخابی از رس می‌باشند. هدف از رس کاهش میزان مصرف سیمان و بهبود دادن پایداری و ویسکوزیته سوسپانسیون می‌باشد. وقتی که درزه‌هایی بزرگ داریم می‌توان برای پر کردن این درزه‌ها و کاهش میزان سیمان مصرفی ماسه نیز به این مخلوط اضافه کرد. افزودنی‌هایی مانند نرم کننده‌ها (شامل نمک‌های فلزات، مانند لیتیم، سدیم و نمک پتاسیم) در سوسپانسیون برای جلوگیری از کلوخه شدن ذرات رس (یعنی به هم چسپیدن ذرات رس) استفاده می‌شود و به این صورت می‌توان خاصیت-های مختلفی برای دوغاب به وجود آورد. دوغاب سوسپانسیون بهترین انتخاب برای تزریق در محیط‌های سنگی درزه‌دار و محیط دانه‌ای با حفره‌های بزرگ و متخلخل است (اندازه ذرات تا تقریباً ۰/۲ میلی متر کاهش داد). دوغاب سوسپانسیون شامل ماسه از ریز دانه تا درشت دانه ، سیمان و یک نرم کننده است، که این یک حالت معمول فنی برای ملات است، که می‌توان برای ترک‌های بزرگ و حفره‌های بزرگ استفاده کرد (Woodward, J., 2005).

۳-۴-۲ دوغاب شیمیایی:

دوغاب شیمیایی معمولاً ترکیبی از محلول و رزین است که فرم ژله‌ای دارد. این دوغاب با پر کردن حفرات زمین و مقاوم کردن زمین میزان نفوذپذیری زمین را کاهش می‌دهند. این دوغاب‌ها مزیت‌های زیادتری از دوغاب سوسپانسیون دارند چون که این دوغاب‌ها به صورت مایع هستند در نتیجه می‌توان آنها را در خاک‌های دانه‌ریز تزریق کرد، مانند نوع رزینی، که دارای گرانروی در حد آب است (اندازه ذرات را می‌توان تا اندازه ۰/۲ میلی متر کاهش داد). معمولاً مقاومت ایجاد شده از دوغاب شیمیایی در مقایسه با دوغاب سیمانی دارای اندازه کمتری است.

اساس بیشتر انواع دوغاب‌های سوسپانسیونی، سیمان بنتونیتی و برای دوغاب‌های شیمیایی اساس

بیشتر دوغاب سیلیکاته است. برای پر کردن حفرهای بزرگ، می‌توان از موادی مانند خاکستر سوخته^۱ می‌توان استفاده کرد (Chapaman, D.N., et al, 2010).

۵-۳ انجماد زمین^۲:

زمانی که کنترل جریان آب زیرزمینی مدنظر باشد انتخاب روش انجماد زمین بر روش تزریق پیشی می‌گیرد. به این مفهوم که در اطراف تونل که انجماد در آن انجام شده تقریباً از ورود آب به محیط تونل تا زمانی که سگمنت‌ها نهایی نصب می‌شوند جلوگیری به عمل می‌آید. زمانی که آب در اطراف تونل یخ می‌زند، پایدارسازی زمین و نگهداری ساختار بسته به شرایط زمین ممکن است به صورت همزمان به وجود بیایند. (Chng, Y., et al, 2005).

عملیات انجماد زمین زودگذر است، همچنین بر کیفیت آب زیر زمین هیچ تاثیری نمی‌گذارد و دارای کمترین تاثیر محیطی است. سابقه ایمن بودن این روش معمولاً بسیار زیاد است. هزینه اولیه ممکن است زیاد نشان دهد، اگرچه، وقتی که میزان ریسک و هزینه نهایی شامل شود این روش دارای هزینه‌هایی هستند که دارای اثری مفید بوده‌اند (Harris, J.S., 1995).

با وجود این که روش با هزینه بالا اجرا می‌شود، زمانی که کارها به درستی پیش نمی‌رود، و راه حل دیگری برای حل مشکل در دسترس نباشد، روش انجماد می‌تواند روش قابل اعتمادی باشد. این روش را در صورتی که بتوان در اطراف کل قطعه زمینی که تونل در آن حفر می‌شود اجرا کرد (که اجرا کردن آن بسته به میزان آب و نوع زمین دارد) می‌تواند روش قوی باشد. در حقیقت، در تونل کاری نزدیک سطح زمین، جایی که دسترسی از سطح زمین سودمند باشد، این روش نسبتاً به صورت پی در پی استفاده می‌شود. این در حالی است برای تونل‌های عمیق بسته به شرایط موجود می‌توان با انتقال دادن تاسیسات انجماد به سطحی که تونل در آن قرار است ایجاد شود، روش انجماد را به راحتی اجرا کرد (Chapaman, D.N., et al, 2010).

^۱ باطله تولیدی از سوختن ذغال در نیروگاه‌های (PFA)

^۲ Ground Freezing

۳-۵-۱ شرایطی که می‌توان روش انجماد را به کار برد:

- تنها در حالتی می‌توان روش انجماد زمین را به کار برد که زمین آبدار باشد، یا اینکه به توان با استفاده از روش‌های مصنوعی مرطوب کرد.

- آب موجود در زمین دارای سکونی ایده‌آلی باشد.

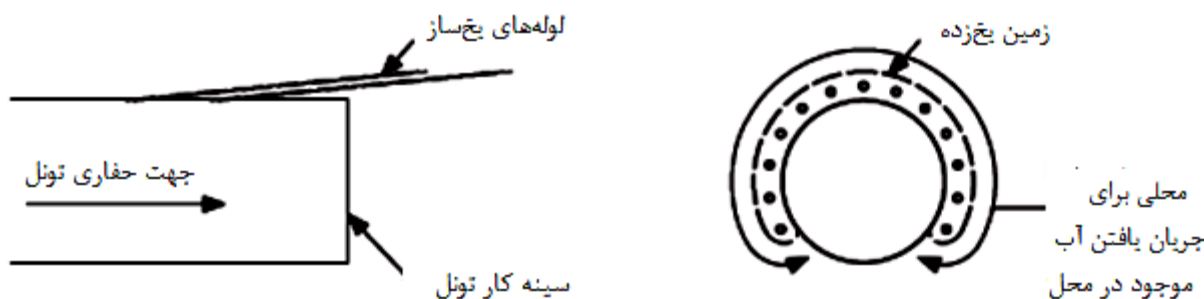
- آبی که در محیط می‌باشد حاوی موادی نباشد که از یخ زدن آن جلوگیری کنند.

- زمین با رطوبت بیش از ۵ درصد به خوبی یخ می‌زند. برای افزایش رطوبت خاک می‌توان آب را با استفاده از شیلنگ آتش‌نشانی، سیستم آفشان، چال یا وسایل تزریق به زمین اضافه کرد.

قاعده اصلی انجماد زمین این است که از با سرد کردن و در نتیجه آن یخ بستن آب‌های موجود در منافذ محیط تونل بتوان خاک را به دیواره‌ای محکم و غیر قابل نفوذ در برابر آب تبدیل کرد، عمل یخبندان به این صورت است که باندهای آبی موجود در بین ذرات خاک را به یخ تبدیل می‌کند (Chapaman, D.N., et al, 2010).

معمولاً، زمانی که این روش در تونل به کار گرفته شود، لوله‌های یخ‌ساز در زمین طوری قرار داده می‌شوند که در جهت استخراج تونل باشند تا بدین صورت بتوانند قوسی یخ‌زده در بالای سقف تونل ایجاد کنند (شکل ۳-۵). لوله‌های یخ‌ساز در قسمت تاج تونل، و اگر لازم باشد، در سرچشمه به کار گرفته می‌شود. به همین ترتیب برای رسیدن به محیطی بسته از انجماد، فاصله بین لوله‌ها را کاهش داده، برای مثال تا ۱ متر، با ترکیب طول‌های مختلف از ۲۰ متر تا بیشتر استفاده می‌شود. ناحیه‌ی یخ‌زده باید دارای یک سری ویژگی‌های باشد که از جمله می‌توان به همپوشانی داشتن این ناحیه با ناحیه حفاری، نشت ناپذیر بودن این ناحیه در مقابل آب و همچنین داشتن مقاومت و پایداری کافی می‌توان اشاره کرد. مایع سردکن از منبع اصلی خارج می‌شود و به میان لوله‌های یخ‌ساز که درون زمین قرار دارند تزریق می‌شود که بسته به اینکه چه روشی استفاده شود بازایی و یا در هوا رها می‌شود. مواد مورد استفاده برای سرد کردن دو نوع هستند که یکی از آنها آب نمک (محلول نمک) و دیگری نیتروژن مایع است، این مواد هر

کدام می‌توانند تا یک دمایی سرد کنند برای مثال آب نمک می‌تواند تا دمایی ۲۰ - و ۵۰ - سرد کند در حالی که نیتروژن مایع می‌توان تا دمای ۱۹۶ درجه زیر صفر سرد کند.



شکل ۳-۵ نحوه ایجاد انجماد در تونل (Chapaman, D.N., et al, 2010)

برای یخ‌زدن زمین محیط تونل از سطح زمین، به این صورت عمل می‌شود که دیواره‌ای یخی از سیلندرهای نزدیک به هم در عرض تونل و در ناحیه‌ای که زمین ناپایدار است ایجاد می‌شود یا اینکه لایه‌ای از زمین که در بالای تونل قرار دارد یخ‌زده می‌شود. به عبارت دیگر برای مطمئن شدن از ایجاد دیواره پیوسته، لوله‌های یخ‌ساز باید دارای فاصله‌ای برابر تقریباً ۱ متری از هم داشته باشند. همچنین در حفاری چال‌های که قرار است لوله‌های یخ‌ساز از میان آنها عبور کنند باید دقت لازم را به کار برد، یعنی اینکه چال‌ها باید به صورتی حفر شوند که کمترین انحراف از طرح اولیه داشته باشند، در غیر این صورت احتمال دارد قسمتی از دیواره مورد انتظار ایجاد نشده و نتواند انتظارت را برآورد کند (Chapaman, D.N., et al, 2010).

۳-۵-۲ مزیت‌های انجماد زمین:

- می‌توان مقاومت زمین را بالا برد، یعنی اینکه در جایی که زمین نرم است و به محض حفاری در آن ریزش به وجود می‌آید و در نتیجه آن ادامه دادن به حفاری امکان‌پذیر نیست، در این حالت می‌-

توان با انجماد مقاومت محل را بالا برد و حفاری را ادامه داد.

- می‌توان یک دیواره نفوذناپذیر ایجاد کرد. این مزیت زمانی استفاده می‌شود که زمین مسیر تونل علاوه بر ریزشی بودن دارای آب بوده و این آب در طول حفاری ایجاد مشکل می‌کند. با این روش می‌توان از ورود آب به داخل تونل در حال حفاری جلوگیری کرد یا اینکه آب را به قسمت کف تونل منتقل کرد.

- غیر سمی و بی‌سر و صدا است. یعنی اینکه برای محیط کار مشکلی از نظر آلودگی زیستی به وجود نمی‌آورد.

- می‌توان به صورت کامل از حالت انجماد خارج شد (عکس بتن‌کاری)، اگرچه ممکن است در بعضی خاک‌ها بعد از پایان یافتن انجماد نتیجه برعکس می‌شود، یعنی باعث به هم خوردن پیوند بین ذرات خاک شده و باعث نشست کردن می‌شود.

- مقیاس تونل نمی‌تواند محدودیتی برای عملیات انجماد ایجاد کند.

- می‌توان برای قطرهای کوچک تا بزرگ به راحتی استفاده کرد.

- قابل کاربری در انواع زمین‌ها از دانه‌ریز تا ساختارهای سنگی درزه‌دار است.

- سودمند بودن هزینه یعنی هزینه‌های که برای انجماد زمین می‌شود دارای بازدهی خوبی می‌باشد.

۳-۵-۳ محدودیت‌ها انجماد زمین:

- زمان دستیابی به انجماد زمین بسته به شرایط زمین و آب زیر زمینی می‌تواند چندین هفته به طول انجامد.

- آب جاری باعث آب‌گذری گرم می‌شود و در نتیجه آن از یخ بستن زمین جلوگیری می‌کند.

محدوده‌ی نرخ جریان آب بسته به نوع روش انجماد مورد استفاده دارد. برای مثال، اگر از دو مرحله آب نمک برای انجماد استفاده شود، بیشترین شدت جریان آبی که می‌توان تحمل کند ۲ متر در روز است. در حالی که اگر در عملیاتی مستقیماً از محلول نیتروژن استفاده شود، بیشترین شدت جریان آبی که می‌تواند تحمل کند ۲۰ متر در روز است.

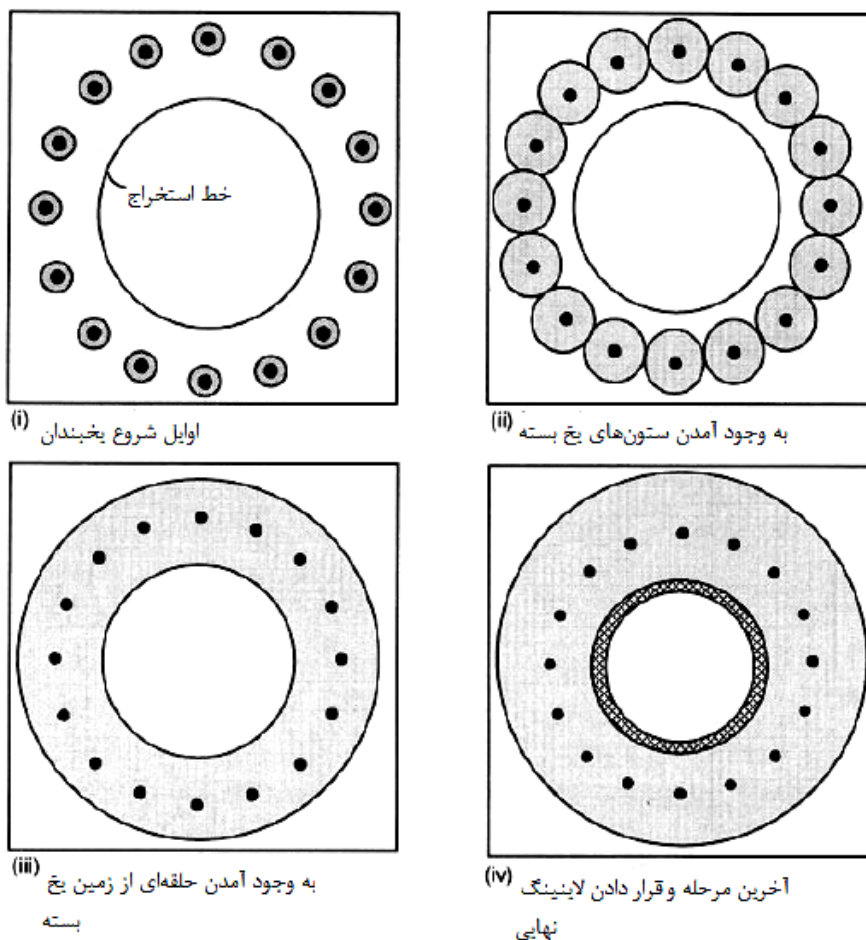
- برای به وجود آوردن زون انجماد پیوسته باید موقعیت چال‌ها کنترل شود تا به درستی انتخاب شده باشند، از این رو باید سیستم نظارتی قوی فعال باشد.

- در طول دوران انجماد بیشترین نگرانی از ویژگی ذاتی زمین و نشست سطح زمین بعد از اتمام کامل عملیات انجماد است (ITA/AITES, 2007). باد کردن سطح زمین بسته به حساسیت مواد تشکیل دهنده زمین موجود به یخ‌زدن دارد، یعنی اگر مواد تشکیل دهنده به یخ‌زدن حساس باشند احتمال باد کردن زیاد است. خاک‌های دانه درشت، دارای استعداد یخ بستن کم و نفوذپذیری بالایی هستند. به این معنی است در حالتی که خاک‌ها دانه درشت باشند بالا آمدن زمین کم است زیرا آب را می‌توان در جریان عملیات انجماد از ناحیه خارج کرد. بر عکس، در خاک‌های دانه ریز استعداد یخ بستن زیاد و نفوذپذیری کم است و به این دلیل خارج کردن آب در حین عملیات انجماد امکان‌پذیر نیست در نتیجه باد کردن سطح زمین زیاد می‌شود. بالا آمدن سطح زمین را می‌توان با کنترل سرعت پروسه انجماد و چند مرحله‌ای کردن عملیات انجماد کاهش داد.

عملیات انجماد را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد همان طور که در شکل ۳-۶ آورده شده:

- نصب تاسیسات سردکن و سیستم توزیع لوله‌های سردکن
- فعال کردن سردکن برای ایجاد زون یخ‌زده
- ادامه انجماد برای ایجاد یک زون به هم پیوسته و مقاوم از یخ در اطراف تونل که بتواند در برابر ورود آب مقاوم باشد و همچنین به وجود آمدن مقاومت لازم برای پایداری تا زمان نصب لاینینگ نهایی (Harris, J.S., 1995).

- اجازه ذوب شدن یا کنترل آب شدن یخ

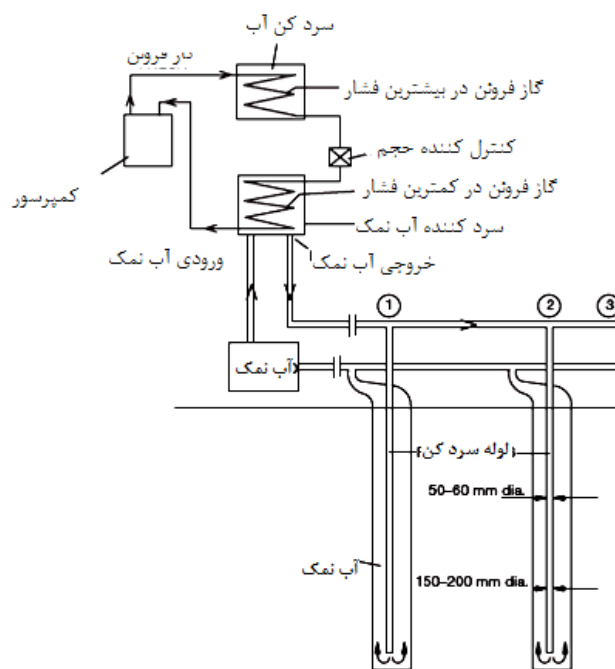


شکل ۳-۶ نشان دهنده مراحل بزرگ شدن انجماد زمین (Harris, J.S., 1995)

۳-۵-۴ روش‌های انجام انجماد زمین:

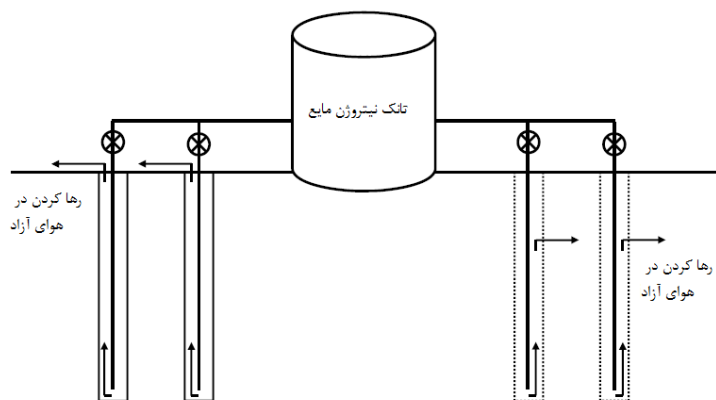
روش دو مرحله‌ای (روش بسته) . در این روش، سردکن اولیه آمونیوم یا فروئن و در مرحله دوم معمولاً آب نمک استفاده می‌شود. این روش به این صورت اجرا می‌شود که برای سرد کردن زمین در مرحله اول از فروئن یا آمونیوم استفاده می‌شود و در مرحله بعد از محلول آب نمک برای سرد کردن

استفاده می‌شود، و به این دلیل به آن روش دو مرحله‌ای گفته می‌شود. و چونکه در اینجا مواد مورد استفاده برای سرد کردن بعد از عبور از میان لوله‌های سردکن که در داخل زمین قرار دارند دوباره جمع آوری شده و به مخزن سیستم سرد کن انتقال داده می‌شوند، مواد مورد استفاده بارها در این سیکل قرار می‌گیرند تا دمایی زمین به میزانی که مورد نظر است برسد، به این روش، روش بسته گفته می‌شود. از جمله مزایایی که برای این روش می‌توان نام برد این است که؛ این روش هزینه کمتری نسبت به دیگر روش انجماد دارد و همچنین مواد مصرفی بازایی می‌شود و در محیط رها نمی‌شوند. معایبی نیز دارند؛ زمانی که طول میکشد تا بتوان انجماد را ایجاد کرد زیاد است، بنابراین در پروژه‌هایی که زمان مهم است نمی‌توان از این روش استفاده کرد، سیستم نصب و بازایی تاسیسات در این روش پیچیده و زمان‌بر است، میزان سرمایی که توسط این روش می‌توان ایجاد کرد کمتر است پس در جاهای که رطوبت کم است و زمین دارای بافت دانه ریز است نمی‌توان از این روش به این راحتی استفاده کرد و همچنین برای این روش نظارت قوی لازم است. شکل ۳-۷ مراحل روش مستقیم یا بسته را نشان می‌دهد (Chapaman, D.N., et al, 2010).



شکل ۳-۷ روش مستقیم انجماد زمین (Chapaman, D.N., et al, 2010)

روش مستقیم (روش باز، شکل ۳-۸) در پروسه روش مستقیم از نیتروژن مایع برای یخ زدن زمین استفاده می‌شود. نیتروژن را از میان لوله‌های یخ‌ساز عبور داده و بعد از عبور از داخل زمین اجازه داده می‌شود که به اتمسفر راه پیدا کند. مستقیم بودن این روش به این دلیل است که به طور مستقیم از نیتروژن مایع استفاده می‌شود. و نیز به این دلیل که مواد سرمازا بعد از تزریق در زمین در محیط رها شده و دیگر بازیابی نمی‌شود به این روش، روش باز گفته می‌شود. مزایای که دارد؛ در زمان کوتاهی می‌توان به انجمادی که مورد نظر است رسید پس در پروژه‌های که زمان خیلی مهم است می‌توان از این روش استفاده کرد، میزان تجهیزات و تاسیسات مورد نیاز در این پروژه کم است، هزینه اولیه کمی لازم دارد و همچنین می‌توان در هر محیطی که دانه‌ریز است و رطوبت کمی دارد به کار برده شود. معایبی که می‌توان برای این روش برشمرد این است که؛ دارای هزینه تمام شده بالایی است و همچنین مواد مورد استفاده که نیتروژن مایع است بازیابی نمی‌شود و در محیط رها می‌شود (Chapaman, D.N., et al, 2010).



شکل ۳-۸ روش انجماد در سیستم باز (Chapaman, D.N., et al, 2010)

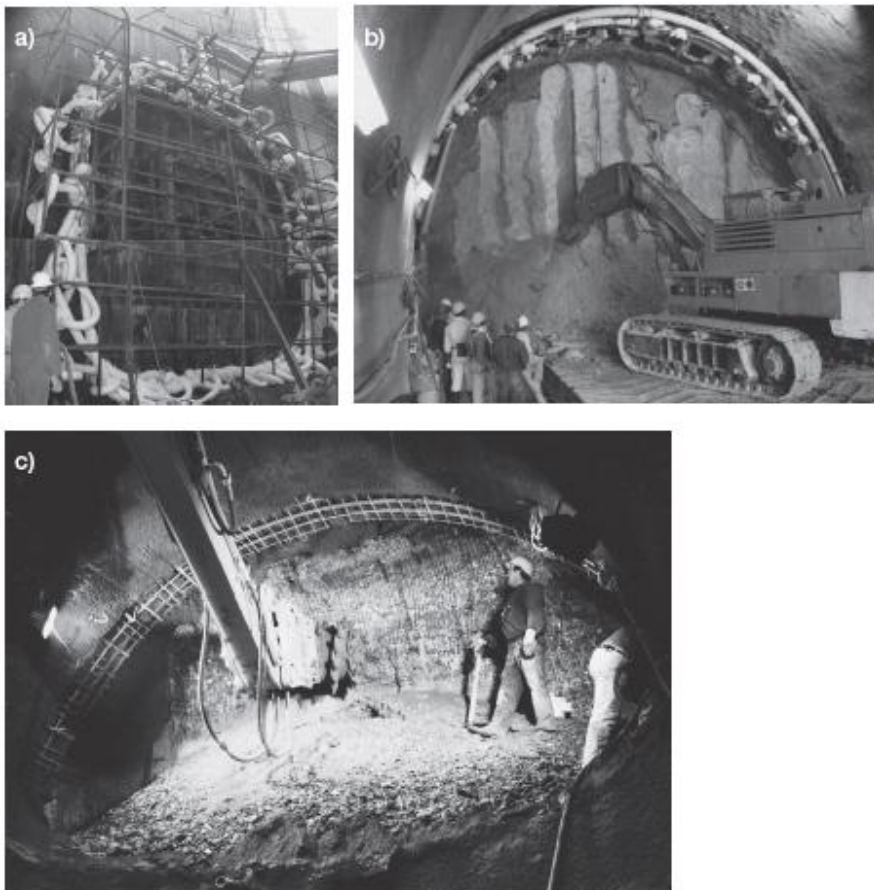
وقتی که سیستم انجماد طراحی می‌شود، مشخصات حرارتی زمینی که قرار است انجماد در آن انجام شود و نقطه انجماد آب زیرزمینی منطقه برای تصمیم گیری مهم است. این اطلاعات در طول

عملیات انجماد برای نظارت کردن بهتر به کار می‌آید. از ترموکوپل‌ها^۱ می‌توان برای نظارت بر دمای زمین بین المنت‌های یخ‌ساز و همچنین برای برداشت دمای انجماد انجام شده استفاده کرد. کینگ^۲ و کسل^۳ در سال (۱۹۹۶) روش ساده‌ای برای اطمینان پیدا کردن از کامل شدن عملیات انجماد در خاک‌های که زهکشی در آنها آسان است (خاک‌های با نفوذپذیری بالا یا دانه درشت) در این روش اطلاعات از چیدن پیزومترها به صورت متمرکز به دست می‌آید. پیزومترها برای محاسبه میزان فشار آب در زیر سطح زمین استفاده می‌شوند. در اینجا به این صورت عمل می‌کنند که وقتی آب سرد می‌شود منبسط شده و در نتیجه آن فشار آب بالا می‌رود، همین عمل نیز در جلو ناحیه‌ای انجماد باعث فشار آوردن به آب می‌شود که می‌توان با نصب پیزومترها در جلوی این ناحیه میزان انجماد ایجاد شده در زمین را پیش بینی کرد. تنها در حالتی می‌توان به فرم کامل یک رینگ رسید، که از هیچ وسیله‌ای برای خارج کردن آب از ناحیه استفاده نشود و بنابراین فشار نشان داده شده توسط پیزومتر افزایش پیدا کند. در شکل ۳-۹ نمونه‌ای از استفاده این روش آورده شده است (Chapaman, D.N., et al, 2010).

¹ Thermocouple

² King

³ Kuesel



شکل ۳-۹ مثالهای از روش انجماد (a) استفاده از انجماد برای رهایی TBM در تونل کایرو^۱ (b) انجماد در ورودی تونل جاده‌ای به قطر ۱۳ متر در دوتویتسکلوف^۲ آفریقای جنوبی (c) استخراج در ماسه یخ زده در تونل دوسلدورف^۳ (Chapaman, D.N., et al, 2010)

۵-۵-۳ کارهای انجام شده:

انجمادزمین در طول تونل کاری با استفاده از جعبه و جک در بستون ، در ایالات متحده آمریکا در پروژه بیگ‌دیگ^۴ در سال ۲۰۰۱ برای اجازه استفاده از روش جعبه و جک در زیر ریل فعال استفاده شد.

¹ Cairo

² Du Toitskloof

³ Dusseldorf

⁴ Big Dig

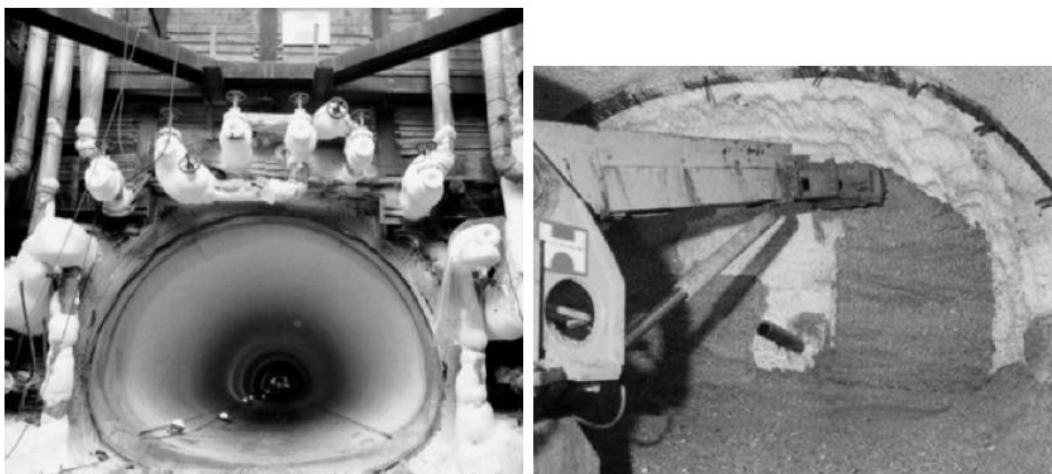
این روش برای رهایی TBM ها در هنگامی که به دلیل شرایط ناسازگار زمین گیر می کنند استفاده می شود، برای مثال در تونلی با قطر داخلی ۲/۶ متر استفاده شده است. اول از روش سینه کار باز با استفاده از بیل مکانیکی حفر تونل آغاز شد اما بعداً کار غیر ممکن شد به دلیل این که بعد از برخورد ناخن های بیل با زمین آب با فشار ۴/۵ بار از میان لایه های شن به بیرون فوران کرد. به عبارت دیگر برای بازیابی دستگاه ادامه کار را با ماشین متعادل کننده فشار زمین^۱ انجام شد، و انجماد زمین به عنوان روش اقتصادی برای فراهم کردن شرایط برای ادامه کار انتخاب شد. ماشین تقریباً در طبقه ۵۵ متری از سطح زمین قرار داشت و یک چاه به قطر ۷/۶ متر به روش رینگ گذاری همان طور که در شکل آورده شد حفر شد (شکل ۳-۱۰)، یعنی فقط در بالای لایه شنی آبدار قرار داشت. پی این چاه را با استفاده از بتن مسدود شد، و در طول اتصال دادن گمانه های سرد کن برای کنترل فشار آب موجود در منطقه احتیاطی برخورد شد. لوله های سردکن به صورت قائم از کف چاه حفر شده برای سطح ۵ متری زیر کف چاه، یعنی سطحی که از سطح زمین ۶۱/۳ متر عمق دارد، برای جلوگیری از جریان آب قائم در طول حفاری و بازیابی دستگاه حفاری شدند. در این پروژه برای پیش نگهداری از روش انجماد دو مرحله ای، به این صورت که در مرحله اول از آمونیوم و در مرحله دوم از آب نمک استفاده کردند. مرحله اول انجماد ۴/۵ هفته به طول انجامید که در طول این مرحله دمای زمین تا ۱۲- درجه سانتیگراد سرد شد. ماشین اصلی به صورت کامل بازیابی شد و ماشین جدید یعنی ماشین متعادل کننده فشار زمین پیشروی را تکمیل کرد.

یک مثال از بازیابی تونل که در آن ریزش رخ داده بود در حال^۲ انگلیس. در این پروژه که ۱۰۰ متر از طول یک تونل فاضلاب به قطر ۳/۶ متر دچار ریزش شده بود و برای پیش تحکیم از نیتروژن مایع برای ایجاد محیطی که بتوان تونل خراب شده را دوباره از نو ساخت استفاده شد.

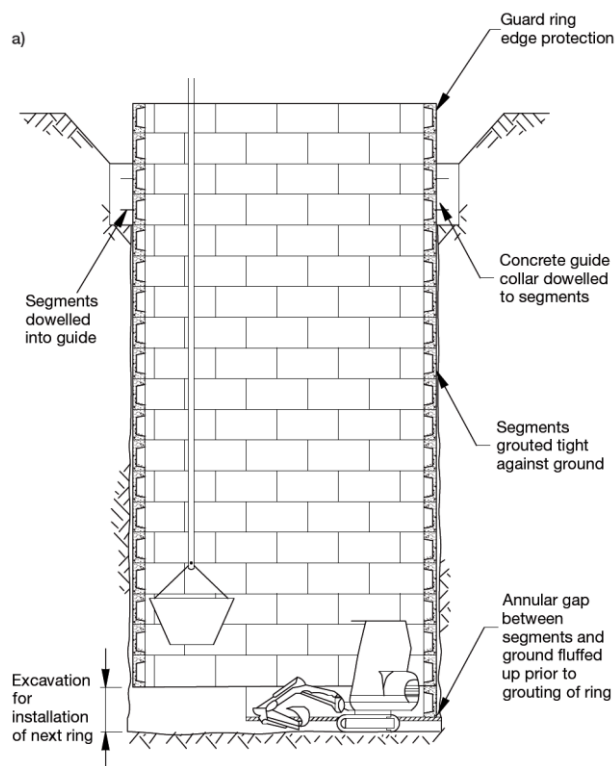
تونلسازی در این پروژه قطعاً از میان توده ای رسوبات دانه ریز که در عمق ۱۵/۵ قرار دارد عبور می کند. در این پروژه بیشترین مصرف نیتروژن مایع روی داده که میزان آن در هر دوره ۲۴ ساعته ۱۶۵۰۰۰ لیتر بوده است.

^۱ Earth Pressure Balance Machine (EPB)

^۲ Hull



شکل ۳-۱۰ به کار بردن روش انجماد در تونلی در دوسلدورف آلمان (Chapaman, D.N., et al, 2010)



شکل ۳-۱۱ روش استفاده شده در تونل برای رهایی TBM به دستور توماس تلفورد^۱ در سال ۲۰۰۴
(Chapaman, D.N., et al, 2010)

¹ Thomas Telford

۳-۶ پیش‌تحکیم^۱:

به طور کلی در مناطق شهری و یا مناطقی که دارای شرایط بد زمین باشند، برای جلوگیری از ایجاد ترافیک و مسدود شدن راه‌های ارتباطی (چون در مناطق شهری تونل‌ها نزدیک سطح هستند امکان ناپایدار زیاد است) و همچنین برای جلوگیری از نشست سطح زمین نیاز است تمهیداتی در رابطه با پایداری جبهه کار تونل در حین حفاری اندیشید. از این رو استفاده از روش‌های کمکی مثل استفاده از بولت برای پایدار نگهداشتن سینه‌کار مفید است، این روش‌ها باید دارای طراحی صحیح و مشخص بودن پارامترهای مختلف مانند طول بهینه، آرایش و الگویی قرار گیری و سفتی بولت‌ها^۲ باشد. به همین دلایل پیش‌تحکیم یکی از روش‌های خوب برای طراحی نگهداری تونل‌ها در شرایط سخت است. پیش‌تحکیم دارای روش‌های مختلفی از جمله تزریق با فشار بالا^۳، لوله گذاری در سقف^۴، مهار گذاری در سینه کار^۵ و پیش برش^۶ می‌باشد (م. رحیمی دیزجی، ی. پور رحیمیان، ۱۳۸۳).

۳-۶-۱ میله‌های نگهداری سینه کار:

از میله‌های سینه‌کار می‌توان برای پایداری سینه کار در دسترس تونل استفاده کرد. این تکنیک شامل اتصال منظمی از میله‌ها در روی برش عرضی از تونل است (شکل ۳-۱۲). میله‌ها باید از موادی ساخته شوند که به راحتی قابل استخراج باشند، یعنی در حین حفر تونل مشکلی ایجاد نکنند. برای مثال فایبرگلاس. معمولاً میله‌های فایبرگلاسی^۷ زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در حفاری تونل از TBM یا ماشین‌های کله گاوی استفاده شود تا بتوانند میله‌های نصب شده را به راحتی حفر کنند. اگرچه، میله‌های فایبرگلاس می‌توانند تیز شکسته شوند و ایجاد خطر کنند، ولی هدف در هنگام استخراج شکست فایبرگلاس به صورت ترد است. بنابراین، میله‌های فولادی در حالتی که ناحیه‌ی استخراجی به نگهداری

¹ Pre-support

² Bolt

³ Jet Grouting

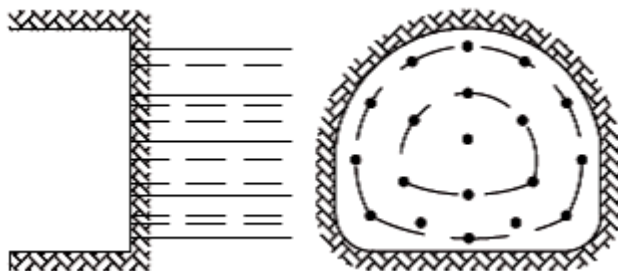
⁴ Pipe Roof

⁵ Spiling

⁶ pre cutting

⁷ Fiberglass

بیشتر نیاز داشته باشد، می‌توانند مفیدتر باشند. میله‌های فولادی را می‌توان در حالتی که زمین نرم است و حفاری با استفاده از تجهیزات دستی انجام می‌شود، به راحتی به کار برد. در حالت ایده‌آل، میله‌ها باید پایداری پیوسته‌ای در طول ناحیه‌ی استخراجی به وجود بیاورند، بنابراین حفاری تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که متراژ مشخصی از میله‌ها در قسمت سینه‌کار باقی مانده باشند، بعد از کوتاه کردن میله‌ها به اندازه کافی سری جدید از میله‌ها در سینه کار نصب می‌شود. این میله‌های جدید دارای هم‌پوشانی در حد چند متر با مراحل قبل و بعد از خود دارند.



شکل ۳-۱۲ کاربرد میله‌ها برای سینه کار تونل (ITA/AITES 2007)

شکل ۳-۱۳ مثالی از نصب میله‌ها در سینه کار موقت در طول ساخت تونل LT31 در وینا^۱ اتریش را نشان می‌دهد. در این مورد میله‌ها دارای طول ۱۲ متر و همچنین این میله‌ها دارای هم‌پوشانی در حدود ۵ تا ۶ متر بودند. به این میله‌ها معمولاً صفحه‌ای (۱۲*۱۵ سانتیمتر) به انتهای آنها اضافه می‌کنند، این صفحات باعث توزیع تنش می‌شوند و همچنین از تمرکز بیش از حد تنش در یک نقطه جلوگیری به عمل می‌آورند. ضخامت این صفحات نازک‌تر (تقریباً ۱۰ سانتیمتر) است از صفحاتی (تقریباً ۳۰ تا ۳۵ سانتیمتر) که برای میله‌های که در دیواره استفاده می‌شوند.

¹ Vienna



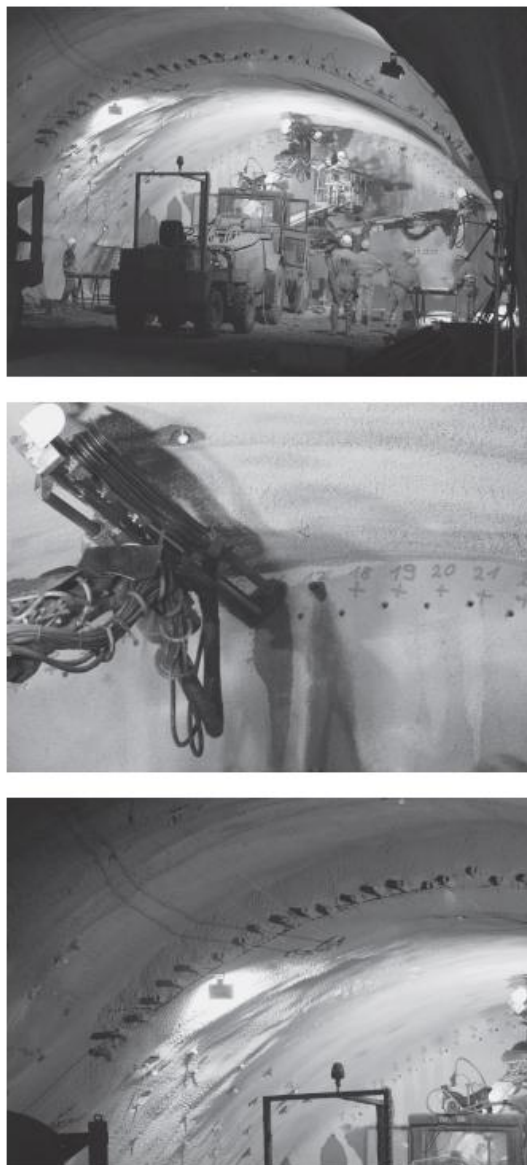
شکل ۳-۱۳ وصل کردن میله‌های نگهداری سینه کار در طول ساخت تونل لاینزر^۱ LT31 در وینا اتریش
(Chapaman, D.N., et al, 2010)

۳-۶-۲ قوس‌چتری یا قرار دادن لوله‌ها در سقف:

روش چتری به این صورت اعمال می‌شود که در سقف تونلی که نیاز به پیش نگهداری است چال‌های با شیب کمی در راستای تونل زده می‌شوند، بعد از حفر چال‌ها به اندازه مورد نظر ابتدا چال‌ها را از بتن پر کرده سپس لوله‌های فولادی درون این چال‌ها قرار داده می‌شود. با پایان یافتن مراحل نصب در بالای قسمتی که هنوز حفاری نشده سقفی قوسی شکل از لوله‌های فولادی به وجود می‌آید. البته این کار

^۱ Lainzer

را زمانی که حفاری در تونل انجام شد و تنها بخش کوتاهی (۳ تا ۴ متر) از این لوله‌ها در سقف باقی ماندند دوباره تکرار کرده تا در طول حفاری تونل سپری محافظ برای وجود داشته باشد. قطر لوله‌های مورد استفاده تقریباً ۷۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. فاصله بین لوله‌ها تقریباً ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. طول لوله‌ها نیز از ۳ متر تا بیشتر می‌توان به کار برد. همپوشانی نیز بسته به طول لوله مورد استفاده دارای اندازه‌های مختلفی است (Chapaman, D.N., et al, 2010).



شکل ۳-۱۴ مثالی از پیش نگهداری با روش چتری در تونل LT31 ، وینا (Chapaman, D.N., et al, 2010).

۱-۲-۶-۳ لوله‌های مورد استفاده در روش قوس‌چتری:

قطر خارجی لوله‌های مورد استفاده در روش پیش‌تحکیمی قوس‌چتری معمولاً بین ۶۰ تا ۲۰۰ میلیمتر و ضخامت دیواره آنها ۴ تا ۸ میلیمتر می‌باشد. طول لوله‌های معمولاً بین ۳ متر تا ۱۵ متر بوده و در محدوده و بیرونی طاق تونل نصب می‌شوند. طول حفاری در زیر چتر ایجاد شده (طول میدان قوس‌چتری) ۲ یا ۱۲ متر (با توجه به طول لوله‌ها) می‌باشد. لوله‌های مورد استفاده دو نوع می‌باشد؛ دارای سوراخ‌هایی در جداره لوله و فاقد سوراخ‌های جداری. در اکثر موارد از لوله‌های دارای سوراخ‌های جداری به منظور تقویت بهتر توده دربرگیرنده تونل و ایجاد پایداری بیشتر، استفاده می‌شود.

۲-۲-۶-۳ روش نصب لوله‌ها

از دیدگاه ژئوتکنیکی دو روش مختلف برای نصب لوله‌ها در داخل توده دربرگیرنده محدوده تونل، وجود دارد. لوله‌ها را می‌توان با استفاده از روش پیش‌حفاری و یا روش حفاری لوله جداری در مصالح دربرگیرنده تونل، نصب کرد. با توجه به مشخصات و ویژگی‌های روش‌های نصب، هر دو روش مذکور پایداری و همچنین تغییر شکل‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. تاثیرات منفی را می‌توان با انتخاب روش نصب و یا نوع لوله مناسب، به حداقل رساند (Volkman, G.M., et al, 2008).

۱-۲-۲-۶-۳ روش پیش‌حفاری

در روش پیش‌حفاری ابتدا چال حفاری شده و سپس مته از داخل چال بیرون کشیده شده و لوله در داخل چال قرار داده می‌شود، در انتها دوغاب سیمان در داخل لوله‌ها تزریق می‌گردد. دستگاه‌های ویژه مذکور دارای یک بازوی بلند بوده که چال را در یک مرحله حفاری می‌کند (شکل ۳-۱۵). خنک کردن سرمته، شستن و خارج کردن مواد حفاری شده از داخل چال، با استفاده از آب یا هوا انجام می‌شود. مواد شوینده از داخل مته به سمت سرمته هدایت شده تا مواد حفار شده را از فضای خالی بین مته و دیواره چال به سمت بیرون منتقل کنند. در زمین‌های ضعیف و ناپایدار این امر موجب بدتر شدن وضعیت دیواره چال، افزایش قطر چال، و در نهایت منجر به جابجایی‌های فزاینده می‌شود. استفاده از هوا به جای آب

موجب جلوگیری از تأثیرات منفی آب بر روی پارامترهای مقاومتی بیشتر زمین‌ها می‌شود. پس از پایان مرحله حفاری و در صورت لزوم به منظور تمیز کردن و یک شکل کردن چال، سرمته در داخل چال به صورت متناوب به سمت جلو عقب حرکت داده می‌شود. پس از خارج کردن مته و سرمته، لوله یه تکه در داخل چال قرار داده می‌شود. معمولاً پس از حفر هر چال لوله در داخل آن چال قرار داده می‌شود، که این امر موجب پایداری بیشتر دیواره چال‌ها شده و همچنین زمان کمتری صرف خارج کردن و جایگزینی مته، می‌شود (Volkman, G.M., et al, 2008).



شکل ۳-۱۵ روش نصب لوله‌های پیش تحکیم در استفاده از روش پیش حفاری با دستگاه‌های ویژه (Volkman, G.M., et al, 2008).

۳-۲-۲-۶ روش حفاری لوله جداری

در روش حفاری لوله جداری نصب لوله‌ها بصورت کیسینگ گذاری بوده که همزمان با عملیات حفاری در داخل توده دربر گیرنده تونل، نصب می‌شوند. روش حفاری لوله جداری روشی یک مرحله‌ای

می‌باشد، به این صورت که در حین حفاری لوله همزمان به جلو رانده می‌شود و پس از اتمام حفاری لوله در جای خود باقی می‌ماند.

در این روش برای نصب لوله‌ها از جامبو دریل‌ها استفاده می‌شود (عکس ۲-۱۶). جامبو دریل‌ها معمولاً دارای دو بازو بوده که می‌توانند به صورت همزمان عملیات حفاری را انجام بدهند، از این‌رو زمان نصب لوله‌ها کاهش پیدا می‌کند.

در اغلب موارد از آب به عنوان ماده خنک کننده و همچنین جابجا کننده مواد حفاری شده، استفاده می‌شود. روش کار به این صورت است که آب از داخل مته به سرمته می‌رسد و بعد از خنک کردن سرمته مواد حفاری شده را از داخل لوله کیسینگ خارج می‌کند. زمانیکه آخرین قسمت لوله را درون چال قرار داده شد، عملیات نصب با خارج کردن مجموعه مته و سرمته، پایان می‌پذیرد.

روش حفاری لوله جداری دارای دو مزیت عمده نسبت به روش پیش حفاری می‌باشد:

- مته در داخل لوله بوده و انتقال مواد حفاری شده نیز از داخل لوله انجام می‌شود، از این‌رو آب فقط در محدوده سرمته با سنگ در ارتباط می‌باشد. این عمل باعث به حداقل رسیدن نفوذ آب در داخل توده دربرگیرنده تونل و در نتیجه آن ممانعت از سست شدن زمین و بزرگتر شدن فضای چال می‌شود.
- چال همیشه همزمان با نصب لوله، نگهداری می‌شود. این امر موجب جلوگیری از مشکلات ناپایداری چال که ممکن است منجر به عدم امکان نصب صحیح لوله در داخل چال و یا موجب افزایش جابجایی‌ها در نتیجه فضای باز بزرگتر اطراف چال گردد، می‌شود (Volkman, G.M., et al, 2008).



شکل ۳-۱۶ نصب لوله‌های پیش تحکیم در روش حفر لوله جداری با استفاده از جامبو دریل
(Volkman, G.M., et al, 2008)

تغییر شکل‌های ناشی از حفاری زمین می‌تواند موجب مقادیر نشست قابل ملاحظه در زمین‌های ضعیف شود. مسئله نشست به ویژه در مناطق شهری و مناطقی که نشست در آنها بسیار مهم است، طراحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در شرایط زمین ضعیف چال‌ها ممکن است ناپایدار بوده و حفاری آنها تغییر شکل‌های کلی ناشی از حفاری را افزایش دهد، بنابراین انتخاب روش نصب دارای اهمیت زیادی می‌باشد. از این رو در زمین‌های با شرایط مکانیکی ضعیف، روش حفاری لوله جداری نسبت به روش پیش حفاری، مقدار نشست کمتری را ایجاد کرده و استعداد کمتری را برای ایجاد تغییر شکل‌های اضافی در حین عملیات حفاری، دارا می‌باشد (Volkman, G.M., et al, 2006).

۳-۲-۶-۳ تزریق دوغاب سیمان در روش قوس چتری:

عملیات تزریق سیمان در روش پایپ روفینگ پس از نصب لوله‌ها، شروع می‌شود. از دوغاب برای پر

کردن لوله‌ها، فضای خالی بین لوله و مصالح در بر گیرنده تونل و خلل و فرج خاک و یا درزه‌های سنگ در بر گیرنده چال، استفاده می‌شود. دوغاب متشکل از مخلوط آب و سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا ۰/۸ می‌باشد. مخلوط مذکور معمولاً با فشار حدود ۱۰ بار و در مواردی حتی تا ۲۰ بار، به داخل لوله‌ها پمپ می‌شود. به منظور کنترل کیفیت، حجم دوغاب و همچنین فشار آن عموماً در حین عملیات تزریق، کنترل می‌شود.

اثرات مثبتی که دوغاب سیمانی دارد:

- دوغاب سیمانی داخل لوله موجب افزایش مقاومت خمشی شده و باعث می‌شود که مقطع عرضی لوله‌ها و تکیه لوله‌ها در حین عملیات حفاری تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، تغییر شکل ندهند.
- دوغاب در فضای خالی باقیمانده بین لوله و زمین، انتقال بار بین زمین و سیستم نگهدارنده را در حین عملیات حفاری، افزایش می‌دهد.
- در صورت نفوذ دوغاب سیمان در زمین در برگیرنده لوله، به محض سفت شدن دوغاب پارامترهای مقاومتی زمین، افزایش می‌یابد.

۳-۶-۲-۴ تاثیرهای روش قوس‌چتری بر پایداری تونل

پایداری محدوده نگهداری نشده موضوع مهمی در کاربرد روش قوس‌چتری به عنوان روشی پیش-تحکیمی، می‌باشد. بدین منظور، نصب مناسب و درست تمامی لوله‌ها و فورپول‌ها لازم بوده زیرا قوس‌چتری در حین حفاری تونل بخصوص در زمین‌های ضعیف، از کارگران و وسایل حفاری در حین عملیات حفاری محافظت می‌کند. در هنگام عملیات نصب لوله‌ها با روش حفاری لوله‌گذاری، نیروی برشی بین زمین و لوله ایجاد شده و بنابراین دستگاهی که برای نصب انتخاب می‌شود باید قدرت کافی برای غلبه بر نیروی مذکور را داشته باشد.

وقتی که از روش پیش حفاری استفاده می‌شود، بسته شدن و جمع شدن چال در صورتیکه به موقع

تشخیص داده نشود، می‌تواند باعث ایجاد مشکلات جدی شود. تا زمانی که قطر چال از قطر لوله کوچکتر باشد، قویترین دستگاه‌ها نمی‌توانند لوله را در داخل چال قرار دهند زیرا در این صورت لوله در اثر کمانش از بین می‌رود. علاوه بر این به منظور ایمنی کارگران، در محدوده‌ای که لوله به صورت صحیح نصب نشده و از بین رفته است، باید اندازه‌گیری‌های زمانبر انجام شود. لازم است که دو لوله جدید در مجاورت لوله از بین رفته نصب شود و یا بعداً در زمان حفاری، فورپول‌های اضافی نصب گردد.

علاوه بر ایجاد پایداری لازم، از روش‌های پیش‌تحکیمی قوس‌چتری به منظور کاهش مقادیر نشست ناشی از حفاری نیز، استفاده می‌شود. در جاهایی که مقادیر نشست ناشی از حفاری تونل یک محدودیت مهندسی به حساب می‌آید، برای نصب لوله‌ها باید از روش حفاری لوله‌گذاری استفاده شود.

در زمان استفاده از روش پیش‌حفاری بدلیل اینکه سایش بر روی دیواره چال تاثیر می‌گذارد، روش حمل مواد حفاری شده ممکن است باعث افزایش مقدار نشست شود. این سایش ممکن است باعث افزایش قطر چال شده و در نتیجه تغییر شکل چال‌ها نیز افزایش یابد. روش مناسب نصب و نوع لوله‌ها باید با توجه به نیازمندی‌ها و الزامات پروژه، انتخاب گردد (Volkman, G.M., et al, 2006).

۳-۶-۲-۵ عوامل مؤثر بر قوس‌چتری

۳-۶-۲-۵-۱ دوغاب سیمان

به منظور بررسی دوغاب سیمان بر روی مقاومت خمشی لوله‌ها، آزمایش‌هایی توسط ولکمن و شوبرت انجام شده است (Volkman, G.M., et al, 2008). برای تمامی آزمایش‌ها، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته که عبارتند از: لوله خالی، لوله ۱۰۰٪ پر شده با دوغاب (با مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه)، لوله ۷۵٪ پر شده با دوغاب، لوله ۷۵٪ پر شده با دوغاب و حجم باقیمانده پر شده با ماسه. نمونه آخر بیانگر حالتی است که مواد حفاری شده در حین عملیات نصب به صورت کامل از لوله خارج نشده باشد، بنابراین انتهای لوله با مواد حاصل از حفاری پر شده در حالیکه مابقی حجم لوله با دوغاب پر شده است. نمونه مذکور نشان دهنده گروتینگ غیر کامل می‌باشد.

نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت خمشی لوله‌ها با یکدیگر تفاوت زیادی ندارد. تنها تفاوت قابل ملاحظه در لوله خالی مشاهده می‌شود که در مقادیر بارهای زیاد، شکل مقطع عرضی لوله بتدریج تغییر می‌کند. این حالت بیضی‌گون روی داده منجر به کاهش ۱۵ درصدی مقاومت خمشی لوله‌ها می‌شود. بدین منظور لوله‌های روش پایپ‌روفرینگ قبل از شروع عملیات حفاری باید بصورت کامل با دوغاب پر شوند. این امر موجب می‌شود که مقطع عرضی لوله‌ها تغییر شکل نداده و تأثیرات کمانش نتواند مقاومت لوله‌ها را کاهش دهد (Volkman, G.M., et al, 2008).

۳-۶-۲-۵-۲ تأثیر نفوذ دوغاب سیمان در درزه‌ها و ترک‌ها

در زمان عملیات نصب لوله‌ها در روش پایپ‌روفرینگ، قطر چال‌ها بزرگتر از قطر لوله حفر شده و سپس لوله‌ها نصب می‌شوند. بعد از نصب لوله‌ها در داخل چال دوغاب سیمان را در داخل و فضایی خالی بین لوله و دیواره چال تزریق می‌شود. در صورت درزه‌دار بودن دیواره چال دوغاب سیمان می‌تواند در محدوده‌ای وسیعی از چال نفوذ کرده و این درزه و شکاف‌ها را پر کند. بنابراین با پر شدن درزه‌های موجود در محیط، چسپندگی این درزه‌ها و در نتیجه آن مقاومت سنگ افزایش پیدا می‌کند. از این رو برای تأثیر هر چه بیشتر فورپولها بر پایداری تونل لازم است که دوغاب سیمان در لوله و حد فاصل بین لوله و دیواره چال تزریق شود (Volkman, G.M., et al, 2008).

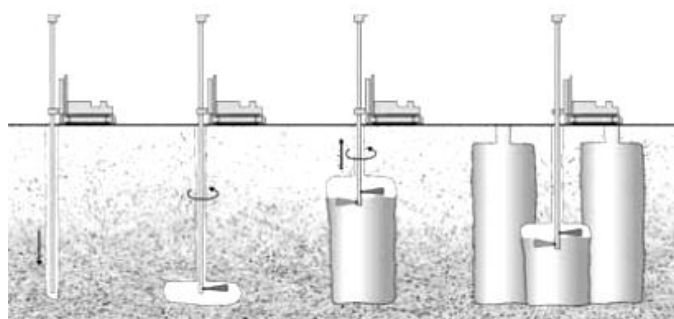
۳-۶-۳ روش تزریق با فشار بالا:

این روش در ابتدا توسط دانشمندان ژاپنی ناکانیهی^۱ و یاهیرو^۲ و در سال ۱۹۷۰ ارائه شد، در سال ۱۹۸۳ در کالیفرنیا و آرژانتین به کار برده شد، در سال ۱۹۸۷ در عراق، در سال ۱۹۹۳ در تایوان، در سال ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۸ برای ساخت تونل‌های مدرن در لیسبون^۳ پرتغال و همچنین این روش به صورت افقی برای تونل در برزیل در سال ۱۹۸۷ به کار گرفته شد (Koshima, A., et al, 2006).

¹ Nakanihi

² Yahiyo

³ Lisbon

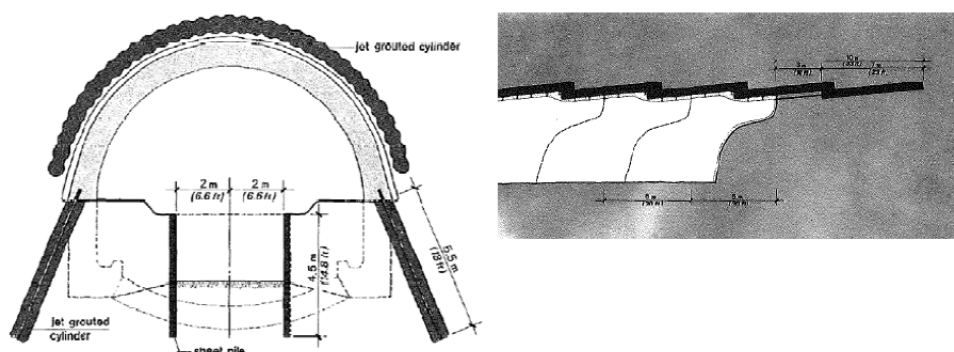


شکل ۳-۱۷ نحوه اجرای بتن تزریق با فشار بالا (Koshima, A., et al, 2006)

از این روش در خاک‌های ضعیف و ناپایدار و همچنین در تونل‌های که در نزدیک سطح زمین هستند یا در مناطق شهری در حال حفر هستند به کار می‌رود. هدف از اجرایی این روش جلوگیری از نشست در تونل‌های نزدیک سطح زمین، پایداری تونل در حین عملیات حفاری و پخش بارهای وارده بر لاینینگ نهایی است. این روش که هم به صورت قائم و هم به صورت افقی قابل اجرا است، به این صورت عمل می‌شود که، ستون‌های از بتن را در ناحیه‌ای که مورد نظر است به صورت افقی یا قائم به وجود آورده می‌شود، البته حالت قائم تنها در صورتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که تونل در نزدیک سطح زمین باشد و امکان دسترسی به عمق مورد نظر باشد (Koshima, A., et al, 2006) (شکل ۳-۱۷).

روش جایگذاری ستون‌ها به این صورت است که یا ابتدا چال‌ها حفر می‌شود و بعد در آنها تزریق صورت می‌گیرد یا اینکه میله حفاری خود توانایی تزریق بتن را دارد. روش تزریق با فشار بالا را می‌توان از

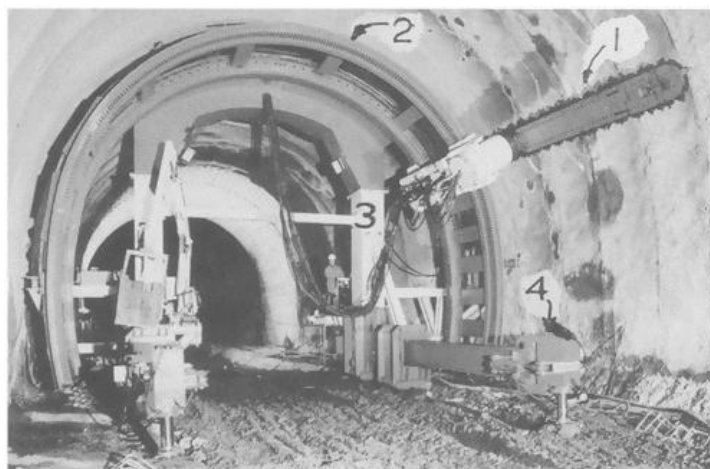
سطح زمین یا از داخل خود تونل نیز انجام داد، البته برای تزریق از سطح زمین باید تونل در نزدیک سطح زمین باشد و انجام این کار از سطح امکانپذیر باشد. زمانیکه از سطح زمین عمل تزریق انجام می‌شود باید ستون‌های از بتن را در اطراف محیطی محیط تونل ساخته شود تا پایداری لازم را به وجود بیاورد. برای حالت افقی تزریق با فشار بالا که در بیشتر تونل‌ها از این روش استفاده می‌شود، باید در امتداد تونل با یک زاویه‌ای ستون‌های بتن را ایجاد کرده تا با این عمل قوسی از ستون‌های بتنی در محیط تونل به جا بماند. پس از ایجاد دیواره‌ای از بتن عملیات حفاری تونل ادامه پیدا کرده تا جایی که ۳ یا ۵ متری از ستون‌های بتنی در محیط تونل باقی بماند، بعد از رسیدن به این مرحله دوباره ردیف دیگری از ستون‌ها را نصب کرده و این کار تا زمانی که لازم باشد تکرار می‌شود (Koshima, A., et al, 2006) (شکل ۳-۱۸).



شکل ۳-۱۸ ستون‌های ایجاد شده توسط تزریق با فشار بالا در سقف و کناره‌های تونل (Koshima, A., et al, 2006)

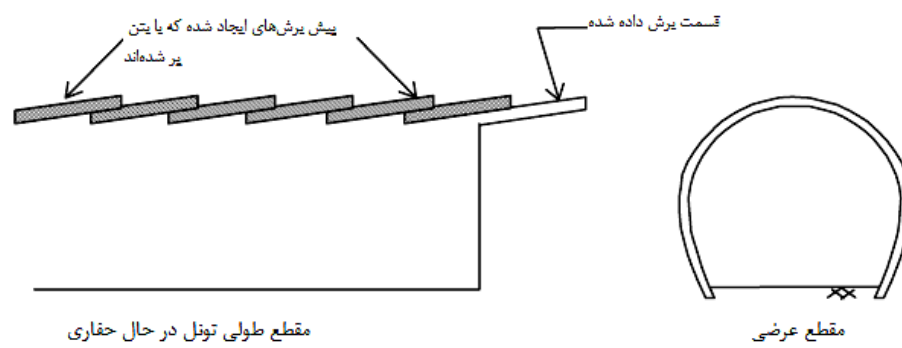
۳-۶-۴ روش پیش برش:

این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ برای حفاری تونل متروی پاریس که در زمین نرم بود به کار رفت.



شکل ۳-۱۹ نمایی از اره زنجیری برای برش در روش پیش برش (Walsum, E.V., 2005)

همانطور که در شکل ۳-۱۹ آورده شده، این روش شامل سه مرحله است به این صورت که ابتدا توسط اره زنجیری محیط تونل را با ضخامت مورد نظر حفر کرده تا یک شیاری عمق‌داری در اطراف محیط تونل به وجود بیاید، حال بعد از حفاری توسط دستگاه شیار را تمیز کرده تا برای بتن‌ریزی آماده شود و در انتها این شیار حاصله را با استفاده از بتن پر کرده تا یک قوسی از بتن در اطراف تونل به وجود بیاید. البته برای ادامه کار باید تا زمانی که بتن به مقاومت نهایی نرسیده پیشروی متوقف می‌شود (یعنی بتن به مقاومت ۲۴ ساعته که برابر با ۲۴ Mpa است رسیده باشد). برای ادامه کار در زیر این قوس بتنی تا جایی که به پایداری ایجاد شده آسیب وارد نشود پیشروی کرده و بعد از آن دوباره سیکل تکرار می‌شود (شکل ۳-۲۰) (Walsum, E.V., 2005).



شکل ۳-۲۰ مقاطع برش طولی و عرضی از روش پیش برش (Leca, E., et al, 2001)

فصل چهارم

موقعیت جغرافیایی و زمین-

شناسی محدوده تونل

۱-۴ مقدمه

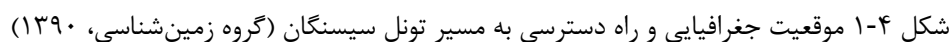
سامانه انتقال چالوس، آب رودخانه چالوس و دیگر رودخانه‌های این مسیر از جمله رودخانه کجور را به دشت هراز منتقل می‌نماید. طول این کانال ۱۰۷ کیلومتر است و به ۶ قطعه تقسیم شده است که تونل مورد بررسی در این گزارش در قطعه سوم از این سامانه قرار گرفته است. قطعه سوم کانال به درازای ۱۴ کیلومتر با ظرفیت ۲۳ متر مکعب بر ثانیه از رودخانه کجور شروع شده و پس از عبور از پارک سی‌سنگان و دریافت آب مازاد رودخانه‌های کجور با ظرفیت ۲۵/۵ متر مکعب در ثانیه منشعب از رودخانه‌های فصلی و چشمه‌های واقع در منطقه را تغذیه و پس از تأمین آب اراضی کشاورزی پایاب کانال، امکان آزادسازی آب چشمه‌های مذکور را برای تأمین آب شرب شهرها و شهرکهای پائین‌دست تا رودخانه گلندرود ادامه می‌یابد.

در این قطعه، کانال پس از عبور از روخانه کجور وارد اراضی جنگلی سیسنگان می‌شود. در طرح جانمایی اولیه برای عبور از جنگل سیسنگان گزینه کانال مدنظر قرار گرفته است. کانال جهت کاهش خسارات وارده به محیط زیست از حریم خط انتقال فشار قوی استفاده شده بود. با توجه به رقوم کانال در مقایسه با رقوم توپوگرافی احجام حفاری و گسترش سرتراشه‌ها در اراضی جنگلی بسیار چشمگیر می‌باشد. افزون بر هزینه‌های کلان اقتصادی، این گزینه به تخریب حجم قابل توجهی از اراضی جنگلی و محیط زیست منجر می‌گردد که این امر با مخالفت شدید سازمان محیط زیست مواجه شده است. بنابر این بررسی امکان عبور مجرای آب‌بر از زیر جنگل به شکل تونل ضروری تشخیص داده شد (گروه زمین‌شناسی، ۱۳۹۰).

۲-۴ راه دسترسی

مسیر تونل در نزدیکی راه اصلی نوشهر- نور قرار گرفته است. دسترسی به دهانه خروجی که در جانب خاوری پارک سیسنگان واقع شده است از طریق روستای صلاح الدین علیا امکان پذیر است. برای دسترسی به دهانه ورودی تونل که در جانب باختری پارک قرار گرفته از جاده ای که از راه اصلی منشعب

در شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به تونل سیسنگان نمایش داده شده است.



۱-۳-۴ ویژگی زمین‌شناسی عمومی و تکتونیک منطقه

۵۳

میانی البرز که تحدبی به سوی جنوب دارد جای گرفته است.

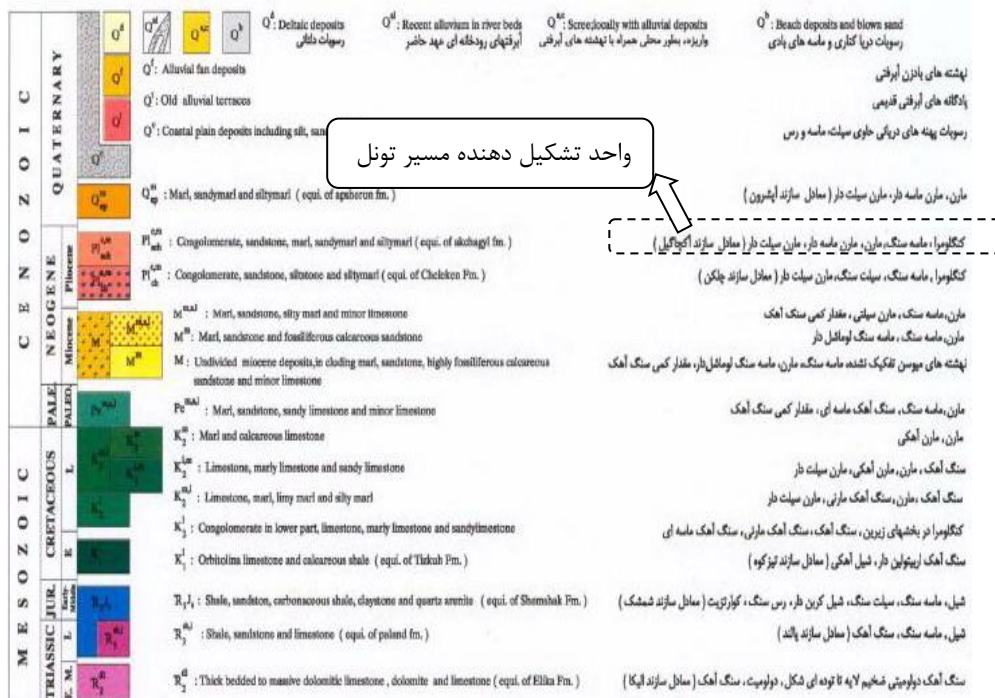
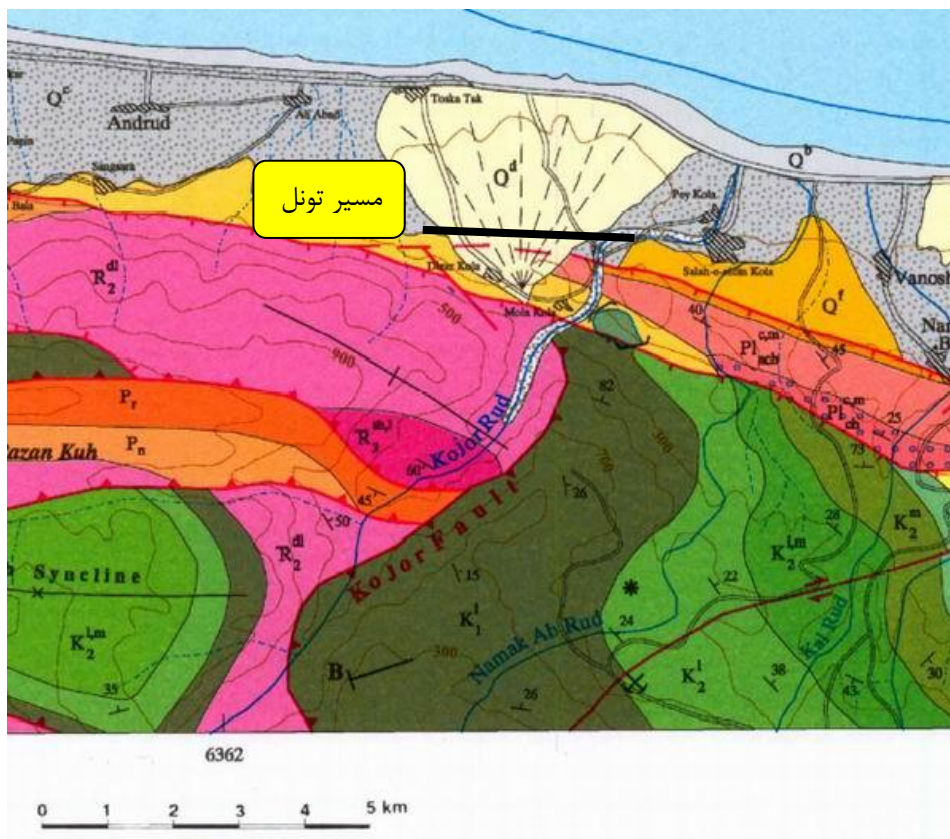
به لحاظ ساختاری نیز گستره طرح در مجاورت گسل اصلی خزر قرار گرفته است. این گسل با درازای بیش از ۶۰۰ کیلومتر گسلی معکوس و با شیب زیاد به سوی جنوب است و مرز بین زون کاسپین در شمال و نهشته های البرز در جنوب محسوب می گردد. در جنوب گسل خزر نیز گسله های دیگر با روندی کمابیش موازی گسل خزر که در اثر سازوکار آنها و نیز در اثر اختلاف جنس و مقاومت سنگهای هر بلوک الگوی کوه و دره در چند نوبت تکرار شده است و بدین ترتیب ریخت منطقه به گونه ای آشکار از ساختهای چین ها و گسلهای تقریباً خاوری - باختری پیروی می کند. در این بین روخانه هایی با مسیر تقریباً عمود بر راستای ساختمانها وجود دارد که از جنوب به سوی شمال جریان دارند. از این جمله رودخانه های کجور و شاکلک رود قابل ذکرند. مشخصه رودخانه های منطقه ایجاد مخروط افکنه های گسترده در بخش منتهی به دریا است که محدوده طرح دقیقاً بر روی یکی از این مخروط افکنه ها قرار دارد (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰). شکل شماره ۵-۲ نقشه زمین شناسی منطقه و موقعیت پروژه نسبت به آن را نشان می دهد.

۴-۳-۲ واحدهای زمین شناسی

گستره طرح مستقیماً بر روی مصالح غیر سنگی واقع شده است که حاصل انباشت مصالح حمل شده از مناطق کوهستانی توسط رودخانه است که در قالب نهشته های دلتایی مصب رودخانه رده بندی می گردد. این نهشته ها طبقات قدیمی تر سنگی که متعلق به دوره پلیوسن هستند را می پوشانند.

۴-۳-۱ نهشته های پلیوسن

این نهشته ها که جوانترین واحد سنگی در مقیاس منطقه ای (چهارگوش نوشهر) به شمار می رود در برخی مناطق از جمله دره رودخانه های گلندرود و کنس رود قابل مشاهده است. این نهشته ها در بررسیهای منطقه ای که منجر به تهیه نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ چهارگوش نوشهر گردید به دو بخش زیرین و بالایی تقسیم شده است.



شکل ۲-۴ موقعیت پروژه در نقشه زمین شناسی منطقه (برگرفته از نقشه چهارگوش ۱:۱۰۰,۰۰۰ نوشهر، سازمان زمین شناسی کشور)

بخش زیرین نهشته‌های پلیوسن شامل کنگلومرای با قطعات بسیار ریزدانه تا بسیار درشت‌دانه است که با سیمانی آهکی استحکام یافته‌اند. میانگین ابعاد قطعات سازنده این واحد ۵ سانتی قید شده است که در تناوب با مارنهای خاکستری تا سبز و لایه‌های ماسه‌ای تا ماسه سنگی است. در میان مارنهای این ردیف فسیلی به دست نیامده است اما در افق‌های ماسه سنگی این ردیف، لوماشلهای فراوانی از دوکفه‌ایها قابل مشاهده است. این مجموعه را طبقات قهوه‌ای یا سری قاره‌ای می‌نامند که در جمهوری آذربایجان نیز به نام سری مولد خوانده شده است.

با توجه به شرایط رخنمونهای این نهشته‌ها در دره گلندرود و مقایسه آن با دیگر برشهای نئوژن در البرز شمالی نتیجه گرفته شده که نهشته‌های پلیوسن با دگرشیبی بر روی نهشته‌های میوسن بالایی واقع گردیده‌است.

نهشته‌های پلیوسن بالایی که به نام آگچاگیل خوانده می‌شود ستمبرای بیش از ۱۰۰ متر دارد و شامل ماسه‌سنگهای نرم قهوه‌ای رنگ و نازک لایه همراه با مارنهای قهوه‌ای مایل به زرد و مارن آبی متمایل به خاکستری است. در این ردیف نیز مقداری نهشته‌های کنگلومرایی که با سیمان آهکی به یکدیگر متصل شده‌اند دیده شده که قطر مصالح تشکیل دهنده آن تا ۵ سانتی گزارش شده است. مسیر تونل سیسنگان از میان این واحد می‌گذرد. در رأس نهشته‌های آگچاگیل در منطقه گلندرود (۱۰ کیلومتری خاوری محدوده طرح) یک سری نهشته‌های رس با ستمبرای ۶ متر شناسایی شده است که نسبت به سطح زیرین و بالایی خود با دگرشیبی زاویه‌دار جای گرفته است و بر این پایه می‌توان آن را مرز بین نهشته‌های آگچاگیل و آپشرون در نظر گرفت.

نهشته‌های آپشرون شامل تناوبی از مارنهای آبی- سبز با مارنهای خاکستری کمی مایل به قهوه‌ای است که میان لایه‌های رسی و ماسه‌ای در آن دیده می‌شود. اظهار شده است که در بخش بالایی این نهشته‌ها گسل خزر قرار دارد که مجموعه آپشرون را از دشت مازندران جدا می‌سازد.

۲-۲-۳-۴ نهشته‌های دلتایی

این نهشته‌ها سطح تمامی مسیرهای مورد بررسی را پوشانده‌اند و تنها در محدوده دره رودخانه کجور نهشته‌های رودخانه ای جدید برجای مانده است.

۳-۳-۴ زمین‌شناسی ساختمانی

گستره طرح در حاشیه شمالی از بخش میانی رشته کوه البرز جای گرفته است. راستای عمومی ساختارهای ناحیه، شمال باختر- جنوب خاوری است و چارچوب ساختاری آن از گسلش راندگی و چین‌خوردگی پدید آمده است. یکنواختی کلی الگوی دگرریختی در واحدهای سنگی گوناگون نشان می‌دهد که یک مرحله اصلی و مهم دگرریختی در ناحیه رخ داده است که همانند بسیاری از جاهای دیگر البرز از الیگوسن آغاز شده است و تا کنون ادامه دارد.

گستره طرح در یال شمال خاوری تاقدیسی قرار دارد که رودخانه کجور را در فاصله نزدیک به ۲ کیلومتری جنوب گستره طرح قطع می‌کند و در اینجا تحت نام تاقدیس کجور نامگذاری می‌شود. محور تاقدیس یادشده در میان طبقات قدیمی‌تر متعلق به دوره تریاس قرار دارد اما طبقات جوانتر نظیر نهشته‌های میوسن و پلیوسن نیز جهت شیب همسانی با آن دارند.

شیب واحد پلیوسن در بخش خاوری مسیر مورد بررسی حدفاصل رودخانه کجور تا کنس رود به سوی شمال خاور و مقدار شیب ۲۵ تا ۴۵ درجه ذکر شده است (چهارگوش نوشهر). شایان ذکر است هیچگونه رخنمون سنگی در محدوده مسیرهای مورد بررسی برای گزینه تونل مشاهده نمی‌شود. اما اندازه‌گیری مقدار شیب طبقات سنگی در گمانه‌های اکتشافی نشان دهنده تشابه مقدار عمومی شیب طبقات سنگی در گستره طرح است.

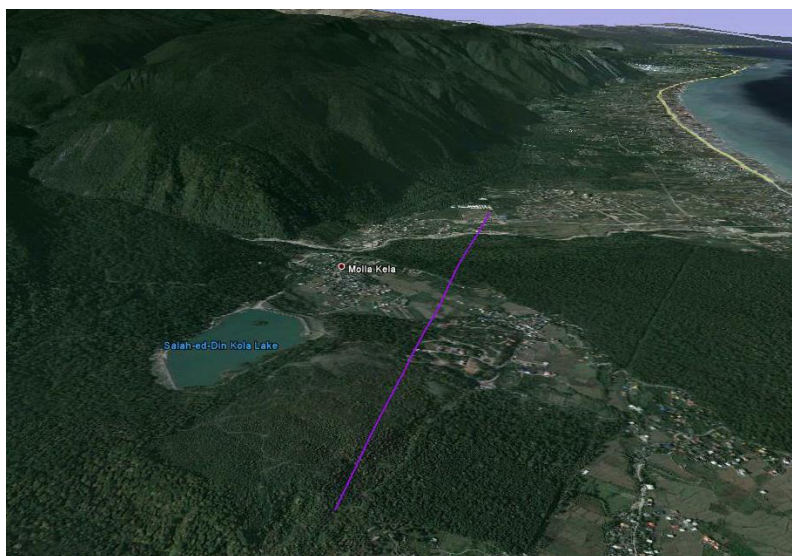
گسله‌های مهم ناحیه اکثراً سازوکار راندگی دارند. مهمترین گسل منطقه که در فاصله بسیار نزدیکی از محدوده پروژه قرار دارد گسل خزر است که به لحاظ ریخت‌شناختی نیز مرز آشکار کوه و دشت

به شمار می رود. در راستای این گسل بویژه از ملا کلا به سوی باختر اختلاف ارتفاع کوه و دشت افزایش می یابد که در این محدوده به صورت دیواره بلند دیده می شود. این گسل با سازوکار راندگی دارای شیب زیاد به سوی جنوب است . همچنین در اثر عملکرد آن، شیب لایه های سنگی تا نزدیک به ۸۰ درجه می رسد. در گمانه های اکتشافی شیب لایه های واحد پلیوسن تا بیش از ۵۰ درجه نیز دیده شده است (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰).

۴-۴ زمین شناسی مسیر تونل

۱-۴-۴ زمین ریخت شناسی

مسیر تونل انتقال سیسنگان در مرز تپه ماهورهایی که دامنه شمالی البرز را شکل داده اند با دشت ساحلی دریای مازندران قرار گرفته است. بخش میانی تونل که در قلمرو پارک جنگلی سیسنگان قرار دارد در محدوده مخروط افکنه ای واقع شده است که مصب رودخانه کجور را تشکیل می دهد. به دلیل موقعیت زمین شناسی مسیر تونل، توپوگرافی مسیر تونل ملایم و تمامی مسیر تونل را مواد پوششی تشکیل می دهد. شکل ۳-۵ نمای کلی از موقعیت پروژه نسبت به مورفولوژی کوه و دشت نشان می دهد.



شکل ۳-۴ نمای عمومی از شرایط زمین ریخت شناختی پروژه (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰)

۲-۴-۴ سنگ شناسی

مسیر تونل سی سنگان از میان واحد رسوبی موسوم به آگچاگیل می‌گذرد که در طول مسیر با مصالح روبار پوشیده شده است و در هیچ محدوده‌ای رخنمون ندارد.

۱-۲-۴-۴ سنگ بستر

توده سنگ تشکیل دهنده گمانه‌ها شامل ردیفی از تناوب مارن رسی سست قهوه‌ای رنگ ، مارن ماسه ای ، ماسه سنگ و کنگلومرا است که با ردیف عمومی نهشته های پلیوسن (آگچاگیل و ماقبل آن) مطابقت خوبی نشان می‌دهد. با این تفاوت که طبقات آهکی در برخی گمانه ها مشاهده شده است که از استحکام بالایی برخوردار است. مشخصات لیتولوژیک هر یک از تیپهای سنگی براساس بررسی مغزه‌های حفاری به قرار زیر است:

- مارن: در برخی افقها مارن به صورت مارن ماسه‌ای با ضخامت کمتر از ۱ متر در تناوب با ماسه‌سنگ مارنی مشاهده می‌شود. افزون بر آن در برخی بخشها به صورت مارن رسی که به رس سنگ نیز متمایل می‌گردد با ضخامت تا بیش از ۱۰ متر دیده می‌شود. لایه‌ای مارنی عموماً قهوه‌ای هستند و از مقاومت پایینی برخوردارند و برخلاف آنچه در معرفی عمومی سازند پلیوسن منطقه آورده شده است در افقهای فسیل دار است. به لحاظ فراونی مارن به عنوان فراوانترین لیتولوژی مسیر تونل مدنظر است.

- ماسه سنگ: عموماً ریزدانه تا دانه متوسط و به رنگ خاکستری هستند که در افقهای هوازده به رنگ قهوه‌ای تبدیل شده است. مشخصه مهم ماسه سنگها تغییر در شدت سیمان شدگی است که نتیجه آن وجود درجات مختلفی از مقاومت - از پایین تا بالا- در توده سنگ است. عموماً از تحکیم پایین تا متوسطی برخوردارند و تنها در برخی افقها استحکام بالایی نشان می‌دهند. ضخامت لایه‌های ماسه سنگی در بخشهایی که در تناوب با مارنها دیده می‌شود از حدود ۱۰ سانتیمتر تا نزدیک به ۱/۵ متر متغیر است اما در افقهایی که صرفاً از ماسه سنگ تشکیل شده تا حدود ۱۵ متر نیز می‌رسد. ماسه سنگ به لحاظ فراوانی پس از مارن مهمترین لیتولوژی مسیر تونل محسوب می‌گردد.

- کنگلومرا: دانه درشت و از نوع پلی ژنتیک که از سیمان شدگی ضعیفی برخوردار است، به گونه

ای که در برخی افقها سیمان سست موجود در مواجهه با آب حفاری شسته شده است. ضخامت لایه‌های کنگلومرای تا ۸ متر نیز مشاهده شده است. هوازگی مکانیکی به واسطه ضعف سیمان بر آن تاثیر گذارتر بوده است و از این رو به روشنی ویژگیهای سنگ بسیار ضعیف را به نمایش می‌گذارد.

- آهک: شامل طبقات آهکی خاکستری روشن با ضخامت کمتر از ۳ متر که از مقاومت بالایی

برخوردار است. هوازگی آن در حد اندک تا سالم است. این سنگ تنها در برخی گمانه‌ها مشاهده شده است و از این رو از اهمیت چندانی در مسیر تونل برخوردار نیست.

۴-۲-۲ روباره

بررسی مغزه‌های حفاری بیانگر این است که مصالح تشکیل دهنده بخش روبار که همگی از مصالح دلتایی رودخانه کجور شکل گرفته‌اند، شامل افق‌های متناوب از اجزای ریزدانه‌تر در حد سیلت رسی و رس و افق‌های درشت دانه در حد قلوه سنگ تا تخته سنگ است. اما در مجموع وجه غالب اجزای درشت دانه است که بیشتر از آهک و ماسه‌سنگ تشکیل شده است (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰).

۴-۴-۳ زمین شناسی ساختمانی

مسیر تونل به لحاظ ساختاری در یال شمال خاوری تاقدیسی واقع شده است که هسته آن در سازند آهکی دلیچای قرار گرفته است و منطقه مورد مطالعه در قلمرو سازندهای جوان قاره‌ای - مردابی پلیوسن جای گرفته است. از حد فاصل محور تاقدیس و محدوده طرح، گسل خزر می‌گذرد که مهمترین اثرش تغییر شدید شیب لایه‌بندی در طرفین سطح گسل است. به طوری که در جانب شمالی گسل شیب لایه‌ها حدود ۲۵ تا ۳۵ درجه است اما در جنوب گسل شیب لایه بندی تا ۸۰ درجه نیز ذکر شده است. شایان ذکر است که در مسیر تونل و پیرامون آن هیچگونه رخنمون سنگی وجود ندارد اما در مغزه‌های گمانه‌های اکتشافی مسیر تونل که به صورت قائم حفاری شده است در افق‌های ماسه سنگی و مارنی شیب لایه بندی قابل مشاهده است که بین ۲۵ تا ۵۰ درجه تغییر می‌کند. با توجه به جوان بودن واحد رسوبی

منطقه پرشیب بودن لایه ها دلالت بر پویایی بالای منطقه دارد که وجود گسل خزر در فاصله کمتر از ۱ کیلومتری نسبت به محور تونل گواه این امر است. ذکر این نکته نیز ضروری است که اگرچه در مغزه های حفاری اثری از زونهای خردشده خش لغزه و مانند آن دیده نمی شود اما با توجه به وسعت عملکرد گسل خزر در بعد جانبی امکان وجود شاخه های فرعی از گسل خزر وجود دارد (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰).

۴-۴-۴ هیدروژئولوژی

مسیر تونل سیسنگان از تنوع لیتولوژیک برخوردار است که این تنوع ماهیتاً به تفاوت در تراوایی و رفتار هیدروژئولوژیک توده سنگ در بخشهای مختلف از مسیر می انجامد. از سوی دیگر تغییر سریع لیتولوژی نیز باعث می گردد که در هنگام انجام آزمایشهای نفوذپذیری (لوژان) در طول مقاطع تفاوت رفتار هیدرولیکی ناشی از وجود چند نوع لیتولوژی امکان قضاوت در خصوص نتایج آزمایش را دشوارتر سازد. اما به طور کلی نتایج آزمایش لوژن بر تراوایی بیشتر کنگلومرایی و ماسه سنگی صحه گذارده است در حالی که افق های مارنی عموماً ناتراوا بوده اند. در نگرش کلی توده سنگ شامل تناوب افق های ناتراوا با افق های کم تراوا تا تراوا است و بر این اساس تشکیل یک شرایط هیدروژئولوژیک مشخص برای مسیر تونل دشوار است اما قطعاً مرز افق های تراوا و ناتراوا مناسبترین مجاری برای انتقال آب است. بر این اساس، شکستگیهای توده سنگ نقش کلیدی در انتقال آب زیرزمینی ایفا می کنند. با توجه به ماهیت پلاستیک لایه های مارنی و سیمان شدگی بسیار ضعیف افق های کنگلومرایی به نظر می رسد بیشترین گسترش سیستم های شکستگی توده سنگ در افق های ماسه سنگی باشد که مغزه های حفاری نیز این امر را نشان می دهد. تراز آب زیرزمینی در گمانه ها طی دوره حفاری اندازه گیری شده است که نتایج آن حاکی از آن است که مسیر تونل در زیر تراز آب زیرزمینی قرار گرفته است که با توجه به مطالب گفته شده در بالا این به معنای غرقاب بودن واقعی مسیر تونل نیست. ضمن اینکه تراز آب زیرزمینی در گمانه هایی که از مسیر سنگهای ناتراوای مارنی حفاری شده اند مربوط به آب حفاری است. هیچگونه چشمه ای در محدوده طرح شناسایی نشده است (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰).

۵-۴-۴ پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل

با توجه به قرارگیری پروژه در محدوده نهشته های مخروط افکنه و ضخامت قابل توجه روبار، هیچگونه رخنمون سنگی در مسیر تونل دیده نمی شود و از این رو برای بدست آوردن پارامترهای ژئومکانیکی نیاز به حفر گمانه های اکتشافی در طول مسیر تونل ضرورت پیدا می کند. برای این کار چندین گمانه اکتشافی در طول مسیر تونل حفر شد که تنها تعداد ۱۱ عدد از این گمانه ها در مسیر اصلی تونل قرار دارد، با بررسی و انجام آزمایش های ژئوتکنیکی بر روی مغزه های حفاری، پارامترهای ژئومکانیکی به صورت آنچه که در جدول ۴-۱ نشان داده شده، حاصل می شود (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰).

جدول ۴-۱ پارامترهای ژئومکانیکی زمین مسیر تونل (گروه زمین شناسی، ۱۳۹۰)

چگالی اشباع (Kgr/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)	مدول تغییر شکل پذیری (MPa)	ضریب پواسون	چسپندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۲/۴	۰/۰۱۵	۵۰	۰/۲۵	۷۵	۲۵

فصل پنجم

انجام مدل سازی های مورد

نیاز و تحلیل نتایج بدست آمده

۱-۵ مقدمه:

همانطور که در فصل‌های قبل آورده شده روش پیش‌تحکیم به انواع مختلفی تقسیم می‌شود و هر کدام از این روش‌ها برای شرایطی قابل استفاده هستند. اما در این تحقیق با توجه به نیاز پروژه از ترکیب نگهداری اولیه، نگهداری بولت‌های سینه‌کار و نگهداری قوس‌چتری برای پایدار کردن تونل استفاده شده است. از این‌رو با مدل سازی تونل به همراه اعمال این نگهدارنده‌ها، به بررسی سطح پایداری به وجود آمده و طراحی هر چه بهتر این نگهدارنده‌ها در تونل مورد نظر پرداخته شده است.

۲-۵ ساخت مدل اولیه:

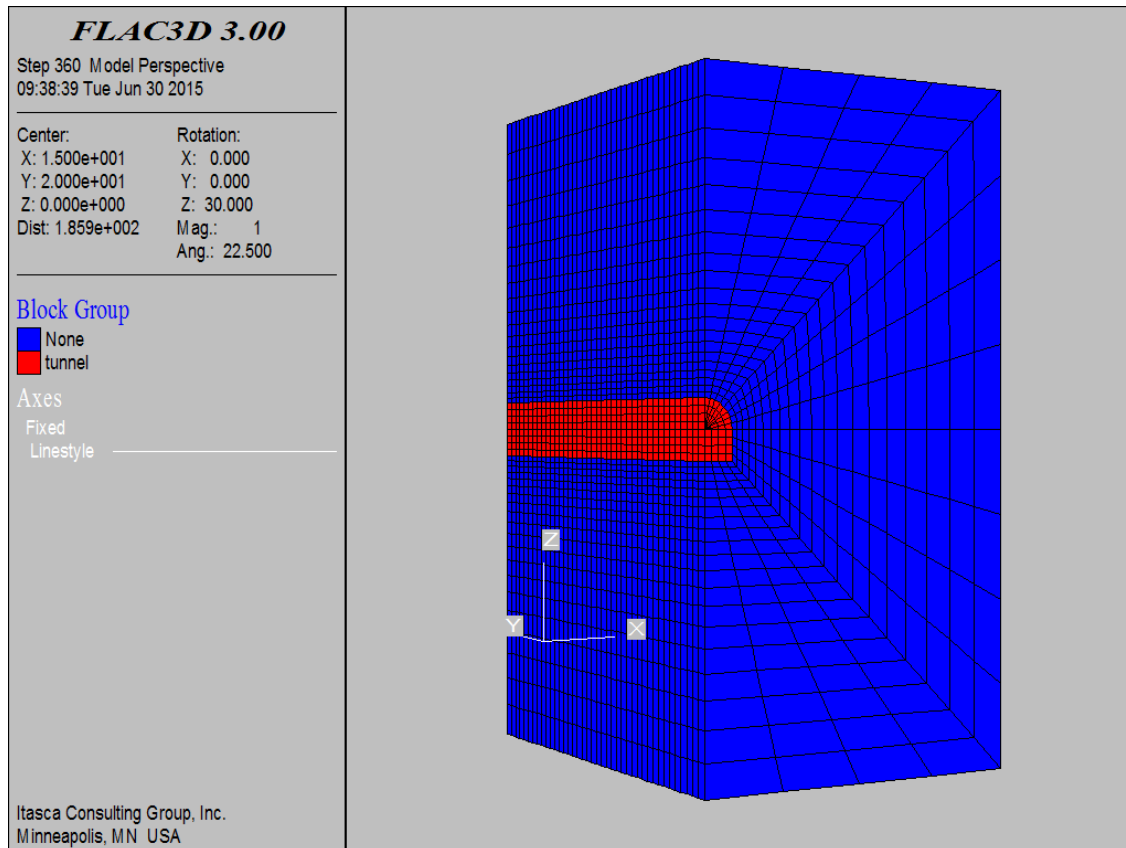
برای انجام تحلیل و بررسی‌های بیشتر نیاز است که یک مدل از تونل و زمین در برگیرنده را در نرم‌افزار ایجاد کرد. با توجه به این که مدل کردن تونل و اطراف آن به صورت کامل باعث زیاد شدن زمان محاسبات می‌شود، از این رو تنها بخشی از کل طرح به طوری که تاثیر چندانی در روند صحیح محاسبات نداشته باشد، مدل شده است. همچنین با توجه تقارن محوری نصف تونل مدل سازی شده است.

مدل ایجاد شده دارای ابعادی $30 \times 40 \times 60$ (به ترتیب ارتفاع، طول و عرض) متر است و میزان روباره ۲۸ متر می‌باشد. همچنین تونل مورد مطالعه که به صورت تونلی نعل اسبی با دیواره قائم است که ارتفاع دیواره آن $2/6$ متر و شعاع قوس بالای آن نیز $2/6$ متر می‌باشد در مدل مورد نظر ایجاد شده است. پارامترهای ژئومکانیکی زمین با استفاده از داده‌های که از قبل بدست آمده در مدل مورد نظر اعمال شده است. همچنین مرزهای مدل با اعمال شرایط مرزی مناسبی که تاثیری در جواب مدل نداشته باشند، تعریف می‌شوند. شکل ۱-۵ نمایی کلی از مدل ایجاد شده در نرم‌افزار FLAC3D را نشان می‌دهد.

۳-۵ نحوه اعمال نگهداری اولیه، قوس‌چتری و میل‌مه‌ار فایبرگلاسی:

نگهداری اولیه شامل ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت در سطح کل دیواره تونل و قاب‌های فولادی IPE16 که فاصله‌ی آنها از هم یک متر است، می‌باشد. برای اعمال نگهداری اولیه ترکیبی از شاتکریت و قاب

فولادی با استفاده از المان پوششی پوسته در مدل اولیه وارد شده است.



شکل ۱-۵ نمای کلی از مدل ایجاد شده در نرم افزار FLAC3D

برای نگهداری سینه کار از بولت های فایبرگلاسی با قطر ۴۴ میلی متر ، طول ۱۵ متر ، همپوشانی ۵ متر و فاصله داری ۰/۵ متر با استفاده از دستور کابل در مدل اعمال شده است. قوس چتری نیز با استفاده از دستور پایل و با لوله های فولادی به قطر ۹۰ میلی متر، ضخامت ۸ میلی متری، شیب ۷ درجه و همچنین فاصله داری ۰/۵ متر در مدل مورد نظر اعمال شده است. در جدول ۱-۶ پارامترهای مکانیکی مربوط به هر کدام از نگهداری های استفاده شده در مدل، آورده شده است.

جدول ۵-۱ پارامترهای مربوط به شاتکریت، قاب فولادی، فایبر گلاس و قوس چتری (Aashto, 1996)

مقدار	مشخصات	اجزا
۳۰۰	مقاومت فشاری f'_c (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	شاتکریت
۲۶×۱۰^۴	مدول یانگ E (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	
۲۴۰۰	تنش تسلیم f_y (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	قاب فولادی ST37
۲۱×۱۰^۵	مدول یانگ E (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	
۲۵۰	مقاومت کششی (KPa)	میل مهار فایبر گلاس
۲۵۰۰	چگالی γ (کیلوگرم بر متر مکعب)	
۴۵	مدول یانگ E (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	
۲۰۰۰	چگالی γ (کیلوگرم بر متر مکعب)	قوس چتری
۲۱×۱۰^۵	مدول یانگ E (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	

۴-۵ بررسی ضرورت به کارگیری پیش تحکیم

برای نشان دادن ضرورت استفاده از پیش تحکیم و میزان نگهداری مورد نیاز لازم است، جابجای‌ها و کرنش حاصله در قسمت تاج تونل و سطح زمین را با اجرا کردن مدل در شرایط مختلف بدست آورد شوند و در مقایسه با سطوح خطر ساکورایی قرار داده شوند. که لازمه ایمن و پایدار بودن سازه قرار گیری این مقادیر در زیر سطح خطر دوم می‌باشد، در غیر این صورت سازه پایدار نبوده و نیاز به نگهداری بیشتر دارد.

بنابراین، مدل مورد نظر را در حالت‌های بدون نگهداری اولیه، با نگهداری اولیه، با نگهداری سینه‌کار و با نگهداری پیش‌تحکیم ایجاد کرده و نتایج حاصله از هر کدام با هم می‌شوند.

ساکورایی پیشنهاد کرد که می‌توان پایداری تونل‌ها را براساس کرنش به وجود آمده در زمین دربرگیرنده آن‌ها ارزیابی کرد. در این روش، جهت بررسی پایداری سیستم نگهداری، مقدار تراز خطر تعیین و پارامتر کرنش مجاز با آن مقایسه می‌شود. چنان چه مقدار محاسبه شده از کرنش بحرانی کمتر باشد، تونل پایدار است. کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر است. کرنش بحرانی با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود (Sakurai, S., et al, 1995).

$$\varepsilon_c = \frac{m\sigma_c}{nE} \quad (1)$$

که ε_c کرنش بحرانی، E مدول یانگ، σ_c مقاومت فشاری تک محوری و همچنین m و n پارامترهای مربوط به ساختار سنگ می‌باشند، که در محیط‌های خاکی این پارامترها یک در نظر گرفته می‌شود. برای حالتی که محیط خاکی باشد، یک در نظر گرفته می‌شود. آقای ساکورایی با ارتباط دادن نتایج آزمایشگاهی و داده‌های صحرایی، رابطه بین کرنش بحرانی (مجاز) و مدول یانگ بدست آورد و سه نوع سطح خطر را بیان کرد که عبارتند از:

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (2)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (3)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (4)$$

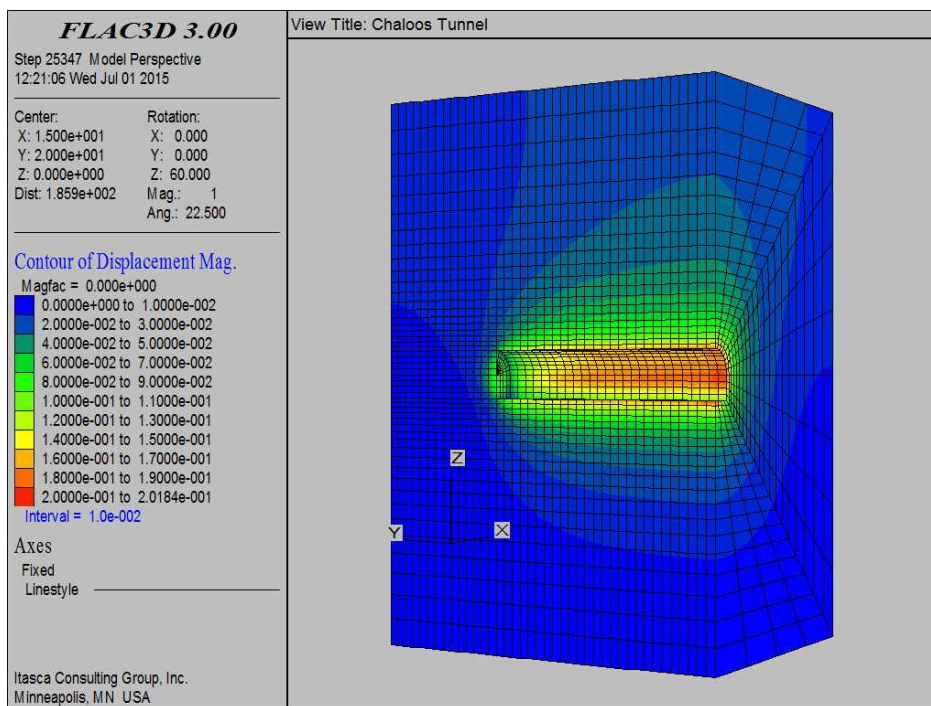
که معادله (۲)، (۳) و (۴) به ترتیب سطوح خطر سوم، دوم و اول را نشان می‌دهند. در روابط فوق E مدول یانگ بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌مترمربع و ε_c کرنش بحرانی بر حسب درصد می‌باشند. سطح خطر اول پایداری بلند مدت را نشان می‌دهد. سطح خطر دوم به عنوان مبنای طراحی سیستم نگهداری مهندسی پیشنهاد شده است. و سطح خطر سوم پایداری کوتاه مدت را نشان می‌دهد. پس هدف از طراحی رسیدن میزان کرنش به وجود آمده در تاج تونل به زیر سطح خطر دوم می‌باشد

۱-۴-۵ حفاری بدون استفاده از هیچ نوع نگهداری:

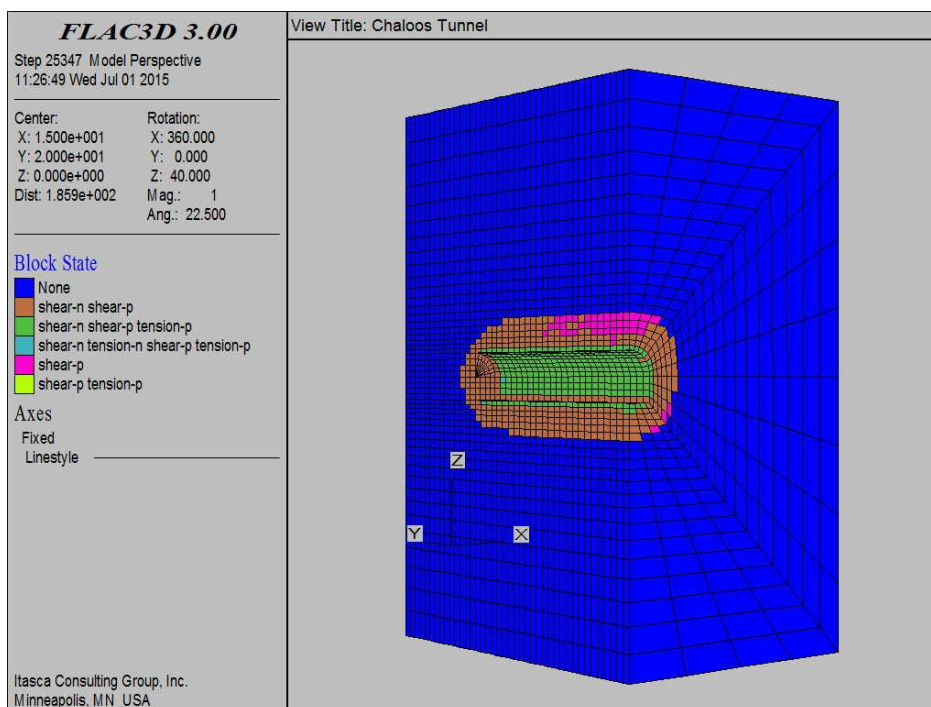
برای مدل سازی در این حالت ۲۶ متر از طول کل تونل را بدون هیچ گونه نگهداری حفاری کرده و میزان جابجایی به وجود آمده محاسبه می شود. برای بررسی نشست در تاج تونل و سطح زمین لازم است که جابجایی ها در طولی از تونل مورد بررسی قرار گیرد که از ابتدای تونل فاصله داشته باشد، از این رو میزان نشست را در طولی از تونل که حداقل چند برابر شعاع تونل از دهانه تونل فاصله داشته باشد پرداخته می شود. با توجه به مدل اجرا شده میزان جابجایی در تاج و سطح زمین در این حالت به ترتیب ۱۷ و ۳ سانتیمتر می باشد. از این رو با توجه به این جابجایی های زیاد استفاده از نگهداری برای پایداری تونل کاملاً ضرورت پیدا می کند. شکل ۵-۲ و شکل ۵-۳ به ترتیب میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل که بدون نگهداری حفر شده اند را نشان می دهند.

۲-۴-۵ حفاری با اعمال نگهداری اولیه

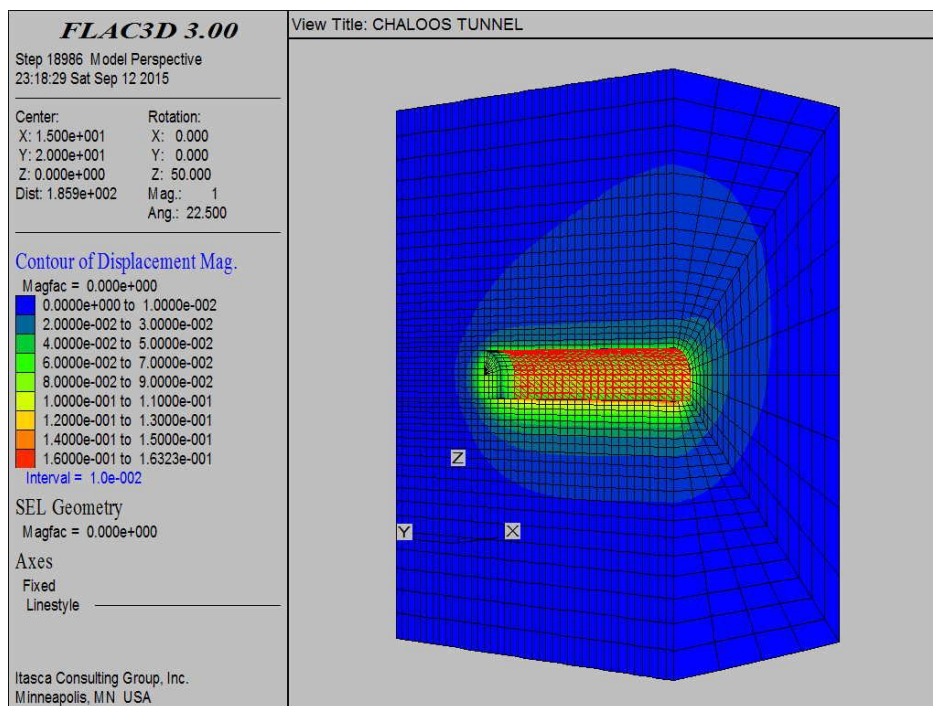
در این حالت با اعمال کردن نگهداری اولیه که شامل شاتکریتی به ضخامت ۲۰ سانتی متر و قاب فولادی به فواصل یک متر از هم می باشد، مدل اجرا و بررسی های مورد نظر انجام شده است. با اعمال نگهداری اولیه میزان جابجایی ها و نشست کاهش پیدا کرده است، که به ترتیب میزان آن در تاج و سطح زمین به ۵/۵ و ۱ سانتی متر رسیده است. که این مقادیر تقریباً یک سوم حالت بدون نگهداری می باشند. اما برای اینکه از پایدار بودن سازه اطمینان حاصل شود و با توجه به اینکه نشست به سطح زمین رسیده نیاز است که مقادیر نشست تاج را در نمودار خطر ساکورایی قرار داده شود. با قرار دادن این جابجایی در نمودار خطر ساکورای موقعیت آن مابین سطح خطر دوم و سوم قرار دارد، بنابراین پایداری تونل در حالت ایمن قرار ندارد و برای ایمن شدن نیاز است که نگهداری بیشتری اعمال شود. در شکل ۵-۴ و شکل ۵-۵ به ترتیب جابجایی های و ناحیه پلاستیک ایجاد شده در حالت با نگهداری آورده شده است.



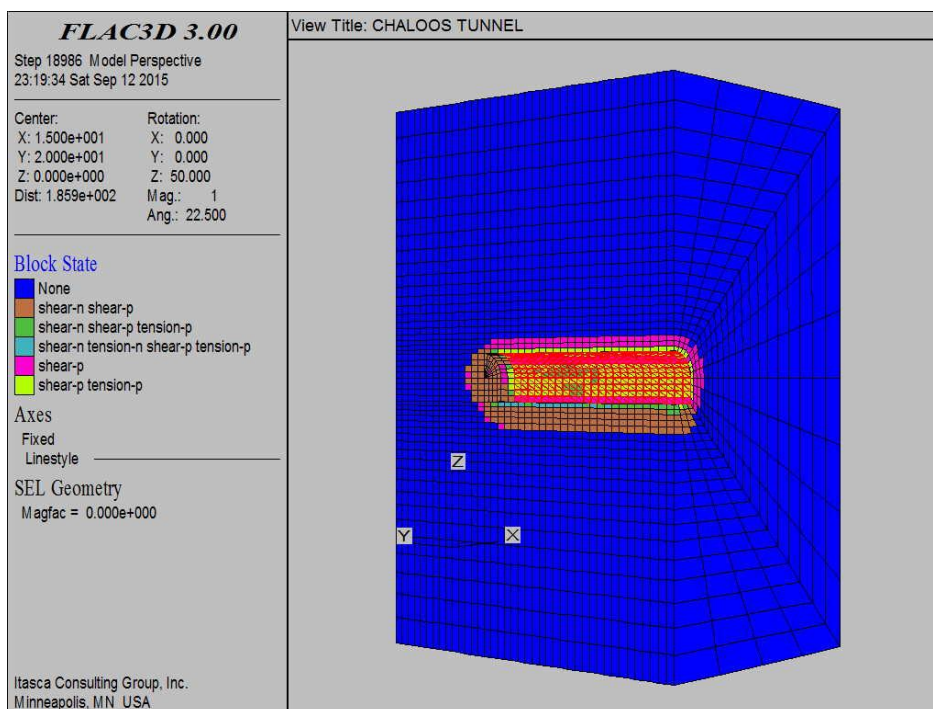
شکل ۲-۵ جابجای ایجاد شده در تونل در حالت بدون هیچ نوع نگهداری



شکل ۳-۵ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل در حالت بدون استفاده از هیچ نوع نگهداری



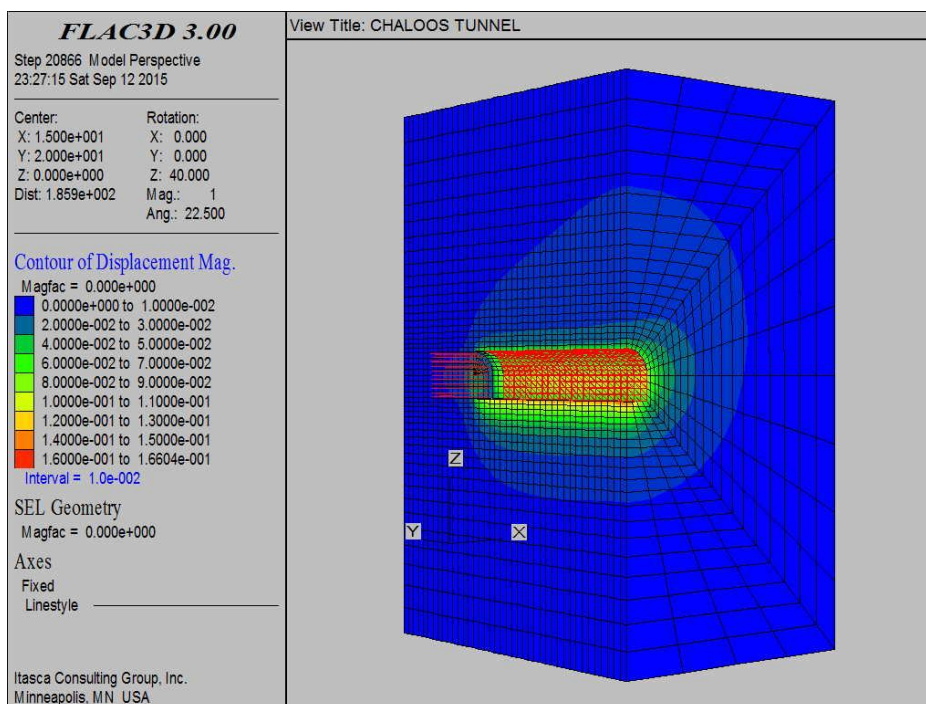
شکل ۴-۵ جابجایی‌ها به وجود آمده در مدل حفاری که از نگهداری اولیه استفاده شده



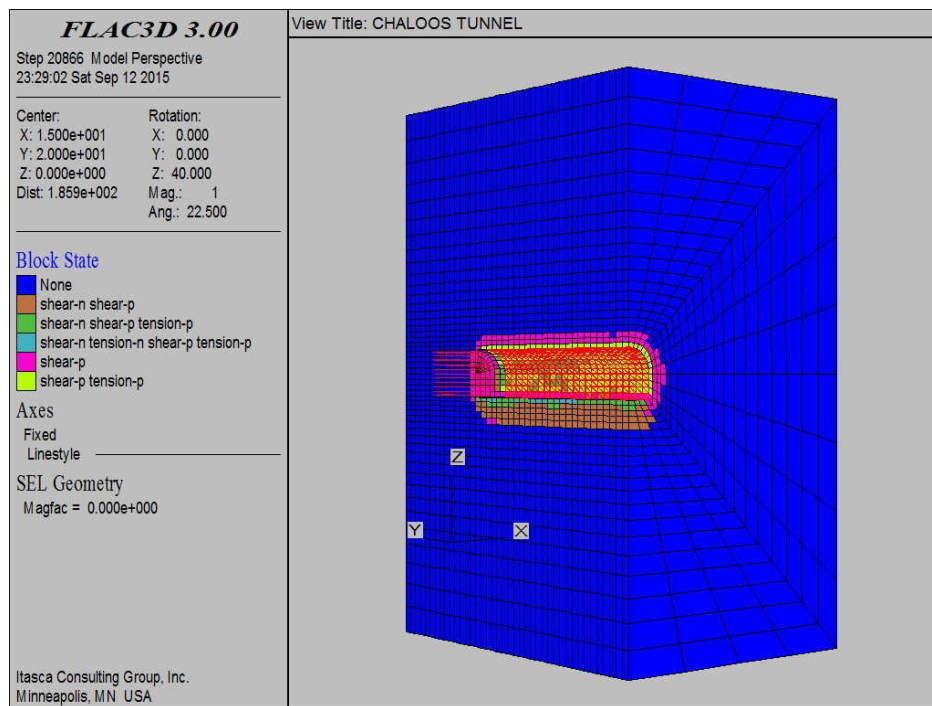
شکل ۵-۵ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در حفاری با اعمال نگهداری اولیه

۳-۴-۵ حفاری با اعمال نگهداری اولیه و بولت‌های نگهدارنده سینه کار تونل

در این حالت علاوه بر نگهداری اولیه نگهداری سینه کار تونل نیز اعمال می‌شود، با اجرای مدل میزان جابجایی‌ها در سقف و سطح زمین به ترتیب $5/3$ و $0/9$ سانتی متر ایجاد می‌شود. بیشترین تاثیر این نگهداری در پایدار قسمت سینه کار تونل می باشد، به این صورت که اعمال این نگهداری باعث می‌شود که جابجایی در سینه کار تونل به طور متوسط از ۸ سانتی‌متر به ۳ سانتی‌متر تنزل پیدا کند. با توجه به نمودار سطح خطر ساکورایی و قرارگیری سطح نگهداری در بین دو سطح دوم و سوم می‌توان نتیجه گرفت که برای پایداری ایمن نیاز است که نگهداری بیشتری اعمال شود. شکل ۵-۶ و شکل ۵-۷ جابجایی روی داده و ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل که با نگهداری اولیه و نگهدارنده سینه کار نگهداری می‌شود، نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود که بیشترین تغییرات در این حالت در قسمت سینه کار به وجود آمده و از میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک در این قسمت کاسته شده است.



شکل ۵-۶ میزان جابجایی روی داده در اطراف تونل با اعمال نگهداری اولیه و نگهدارنده سینه کار

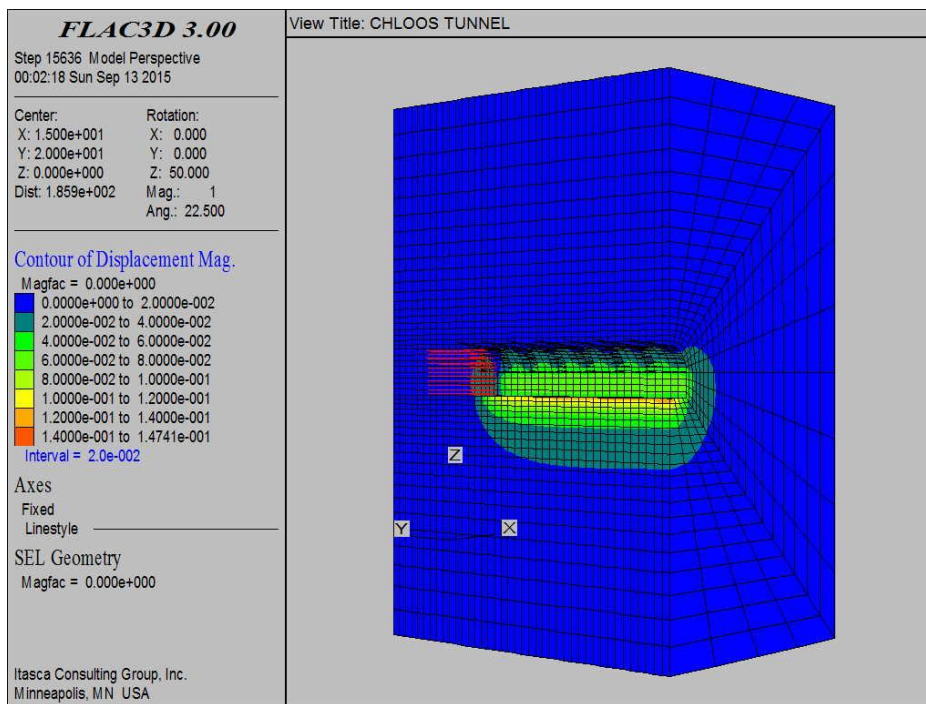


شکل ۵-۷ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با نگهداری اولیه و نگهدارنده سینه کار

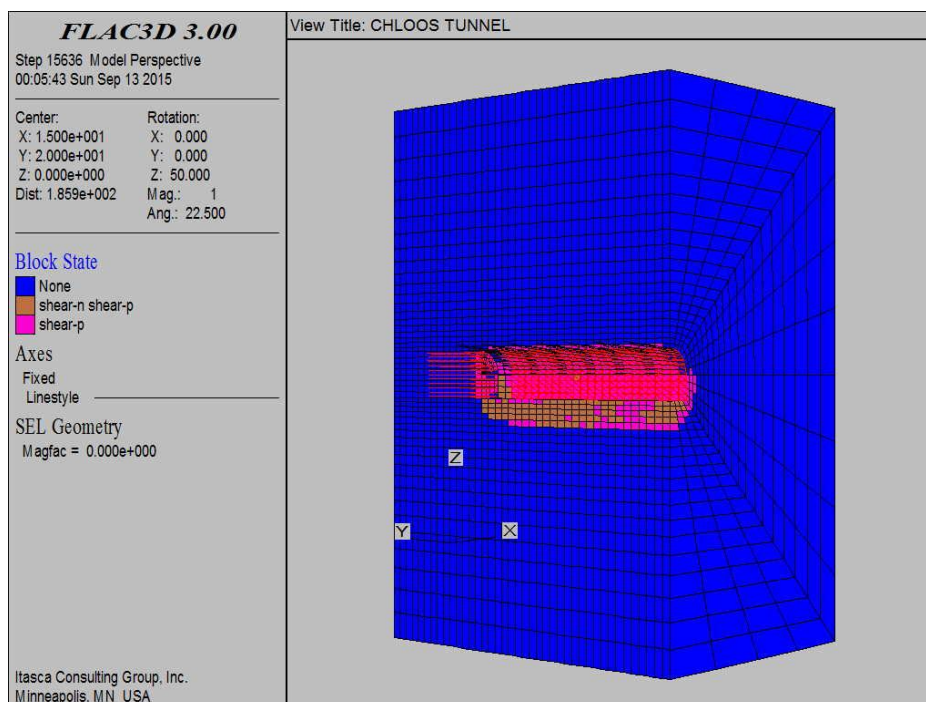
۴-۴-۵ نگهداری با اعمال قوس چتری

در این حالت علاوه بر نگهداری اولیه و نگهدارنده سینه کار از قوس‌های چتری نیز برای نگهداری استفاده شده است. با اعمال این نگهداری میزان جابجای در قسمت تاج و سطح زمین تا ۱/۷ سانتی‌متر و ۱/۵ میلی‌متر کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۵-۸ و شکل ۵-۹ جابجای‌ها و ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل در حالی که علاوه بر نگهداری اولیه و نگهدارنده سینه کار از قوس‌های چتری نیز برای نگهداری استفاده شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان جابجای‌ها و ناحیه پلاستیک در اطراف تونل کاملاً کاهش پیدا کرده است.

برای بررسی ایمن بودن پایداری در این حالت نیز باید به نمودار سطوح خطر ساکورایی رجوع شود، با قرار دادن میزان کرنش‌ها در این نمودار مشخص می‌شود که این مقدار در پایین‌تر از سطح خطر دوم قرار دارد که این نشان دهنده موثر بودن نگهداری قوس‌چتری در ایجاد پایداری ایمن برای تونل بوده است.

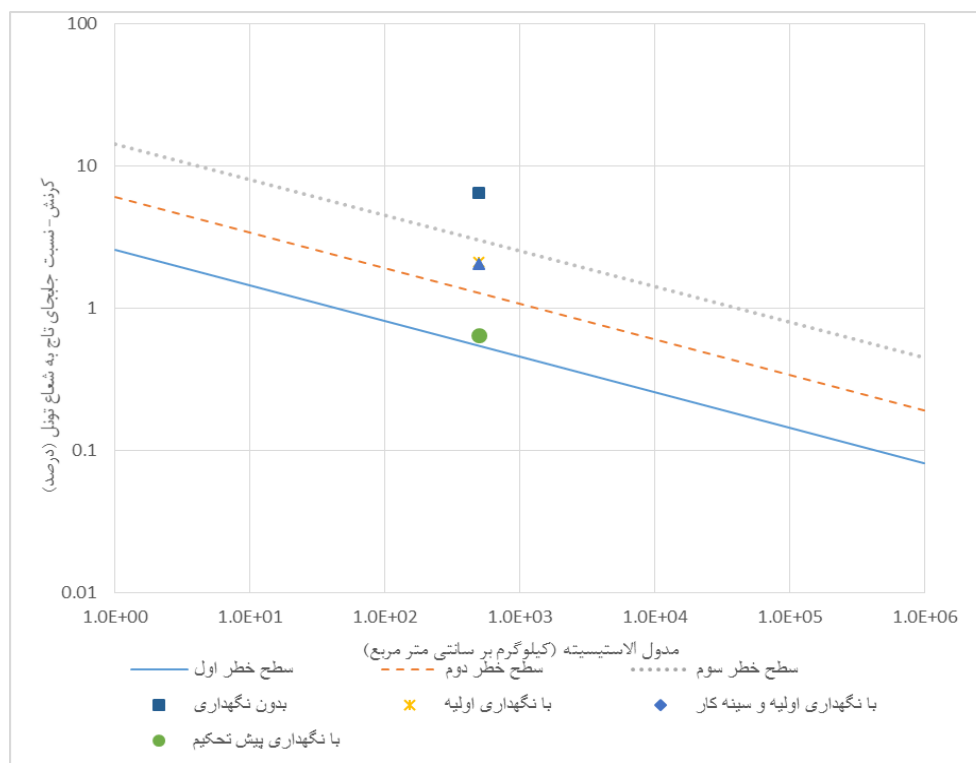


شکل ۸-۵ وضعیت جابجایی‌های اطراف تونل در حالی که نگهداری قوس‌چتری اعمال شده

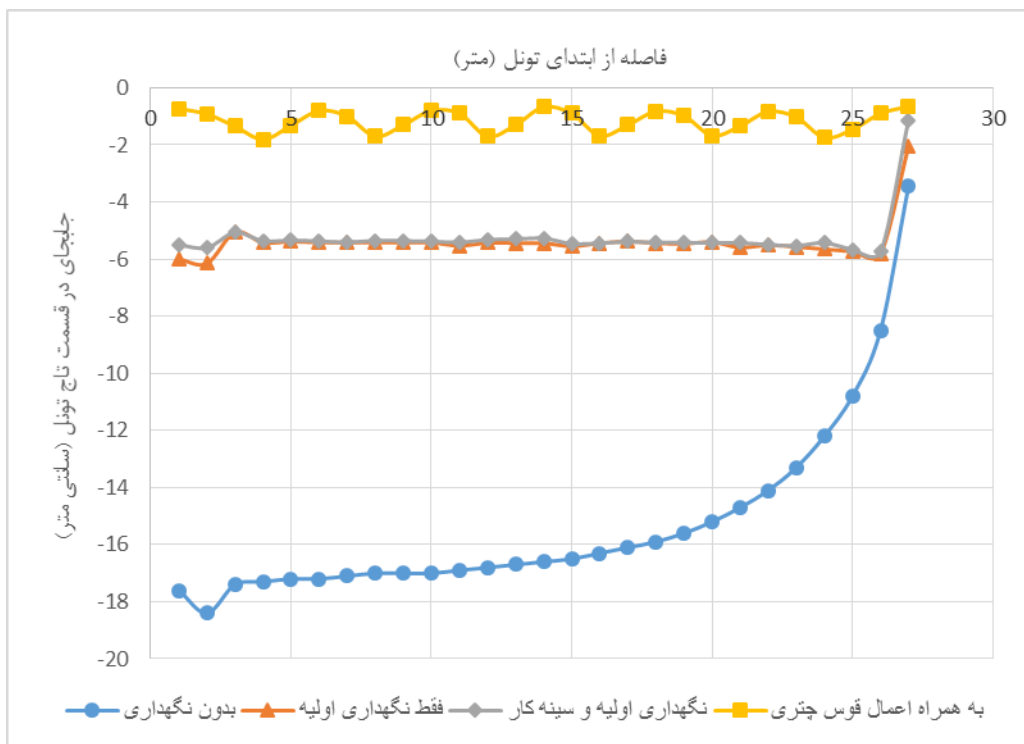


شکل ۹-۵ ناحیه پلاستیک اطراف تونل با اعمال قوس‌چتری

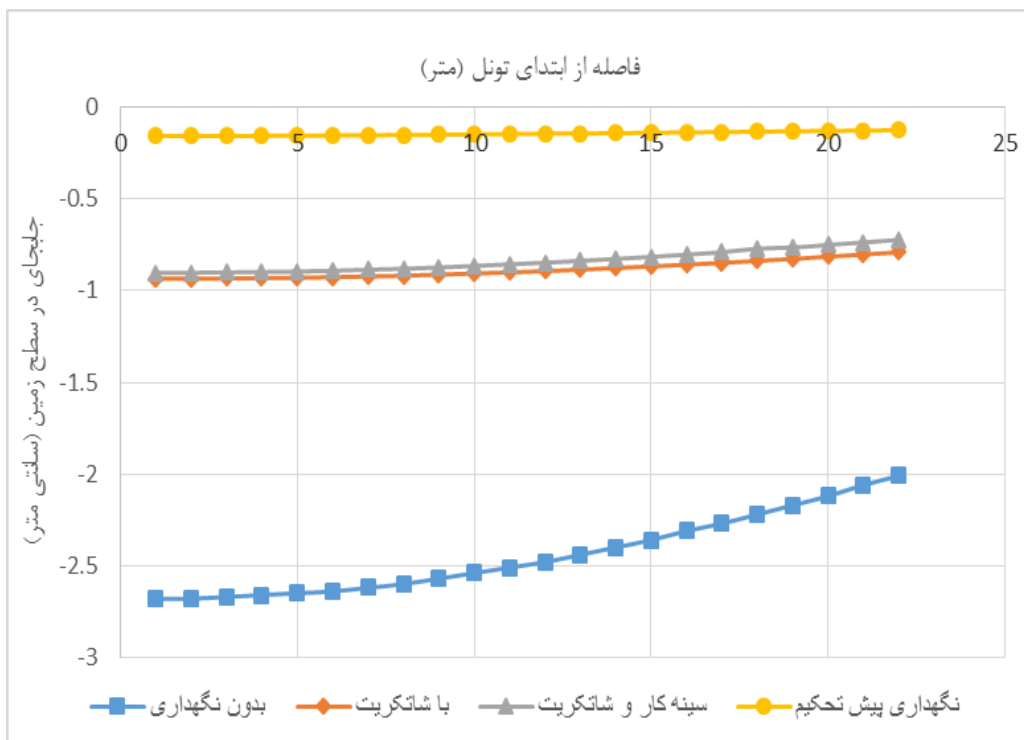
نمودار ۵-۱ نشان دهنده سطوح خطر ساکورایی و همچنین کرنش‌های به وجود آمده در تاج تونل در نگهداری‌های مختلف می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود در حالت‌های بدون نگهداری، با نگهداری اولیه و با نگهداری سینه کار تونل میزان کرنش به وجود آمده در تاج تونل بالاتر از سطح خطر دوم است، که این نشان دهنده ناپایداری تونل حفر شده در این حالت‌ها می‌باشد. از این رو لزوم استفاده از نگهداری قوس‌چتری حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که در حالتی که از پیش‌تحکیم قوس‌چتری استفاده شده کرنش به وجود آمده پایین‌تر از سطح خطر دوم می‌باشد. نمودار ۵-۲ نشان دهنده میزان جابجای‌های به وجود آمده در قسمت تاج تونل در طول قسمت حفر شده می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود جابجای‌ها با اعمال قوس‌چتری به میزان قابل توجه کاهش پیدا می‌کنند. و همچنین نمودار ۵-۳ جابجای‌های روی داده در سطح زمین برای حالت‌های مختلف نگهداری را نشان می‌دهد.



نمودار ۵-۱ نمودار سطح خطر ساکورایی و بررسی جابجای‌های تاج تونل نسبت به سطوح خطر در حالت‌های مختلف



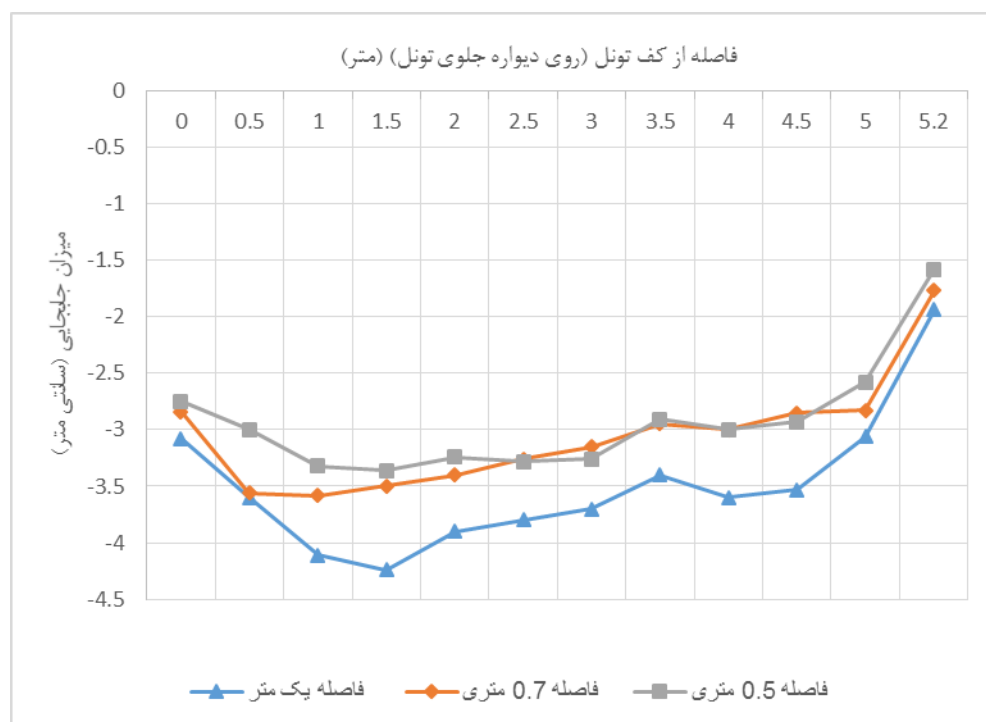
نمودار ۲-۵ جابجایی به وجود آمده در تاج تونل در حالت‌های مختلف نگهداری



نمودار ۳-۵ جابجایی به وجود آمده در سطح زمین برای حالت‌های مختلف

۵-۵ طراحی بولت‌های سینه‌کار

تنها پارامتری که برای این نوع نگهدارنده بررسی می‌شود فاصله‌داری بولت‌ها از همدیگر (تعداد در متر مربع) می‌باشد. همچنین با توجه به تاثیر کم بولت‌های فایبر گلاس در جابجای تاج و سطح زمین، نیاز است که برای طراحی این نگهدارنده‌ها به بررسی جابجای به وجود آمده در قسمت جبهه کار تونل پرداخت شود. از این‌رو در راستای عمود بر کف تونل در قسمت دیواره سینه‌کار به بررسی جابجای‌ها در فواصل مختلف بولت‌ها پرداخته می‌شود. بنابراین برای این حالت و تعیین بهترین چیدمان برای بولت‌های فایبر گلاسی این بولت‌ها را در سه آرایش مختلف ۰/۵، ۰/۷ و ۱ متری مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به نمودار ۴-۵ که میزان جابجای‌ها را در سینه کار تونل نشان می‌دهد، جابجای‌ها در حالت ۰/۵ متری کمترین میزان را دارد و از سطح خطر دوم نیز عبور نکرده، این در حالی است که در دو حالت دیگر جابجای‌های بیشتر از سطح پایداری ایمن روی داده است. بنابراین برای پایداری سینه کار تونل بهتر است بولت‌های فایبر گلاسی را در فاصله‌های ۰/۵ متری از هم نصب شوند.



نمودار ۴-۵ جابجای‌های مختلف به وجود آمده در سینه کار تونل در فاصله‌داری‌های مختلف بولت‌های فایبر گلاسی

۵-۶ طراحی و نحوه اجرای قوس چتری

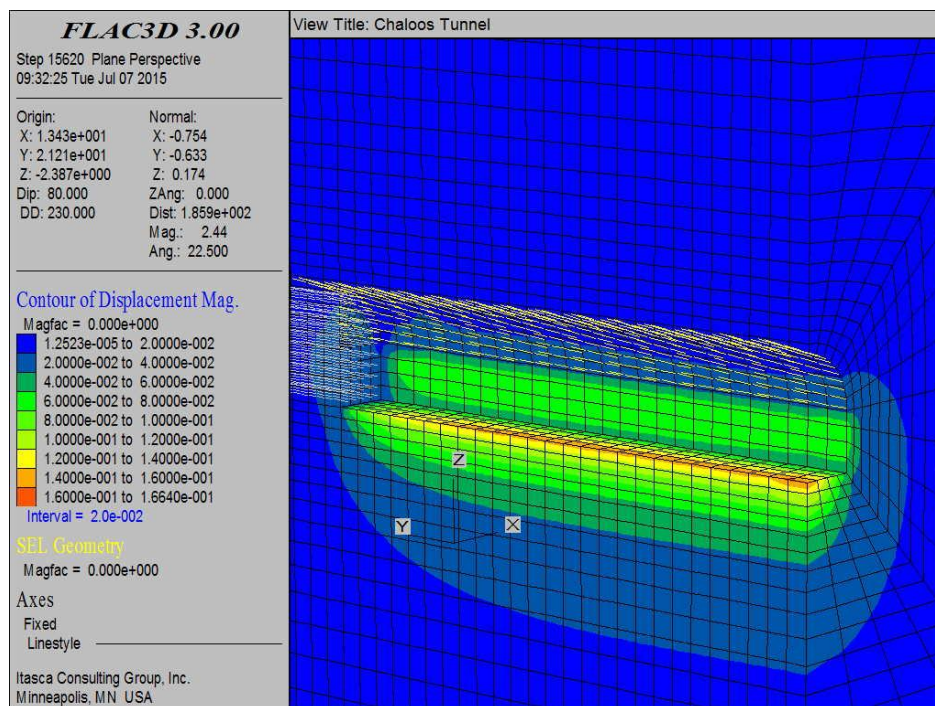
برای طراحی و اجرای قوس چتری نیاز است که پارامترهای موثر بر آن مورد بررسی و میزان آنها نیز تعیین شود. از جمله پارامترهای که باید مورد بررسی قرار گیرند عبارت‌اند از طول، فاصله قرار گیری لوله‌ها از هم، زاویه نسبت به افق و همچنین هم‌پوشانی می‌باشد که در ادامه بررسی و تعیین این پارامترها آورده شده است.

۵-۶-۱ تعیین طول مناسب قوس چتری

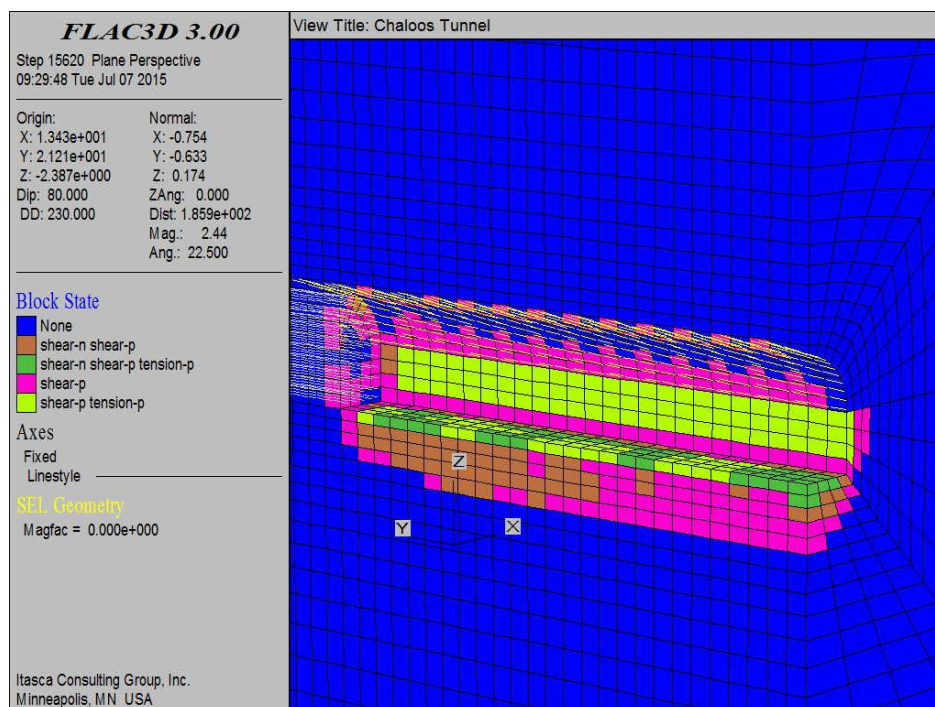
برای تعیین طول مناسب قوس‌های چتری، فوریول‌ها را با چهار طول مختلف در مدل اعمال کرده و به بررسی جابجایی‌های به وجود آمده در تاج تونل و همچنین بررسی از نظر پایداری ایمن با توجه به خطوط ساکورایی پرداخته می‌شود. برای اعمال لوله‌ها از طول‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ متری استفاده شده است.

۵-۶-۱-۱ طول سه متری

در این حالت برای طول ۲۶ متر تونل در مجموع چهارده سری قوس با همپوشانی یک متر و شیب ۷ درجه و با فاصله‌داری ۰/۴ متر اعمال شده است. که شکل ۵-۱۰ و شکل ۵-۱۱ نشان دهنده میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک اطراف تونل در این حالت می‌باشند. در این حالت بیشترین جابجایی روی داده در قسمت تاج تونل حدوداً ۹ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۵-۱۰ جابجایی به وجود آمده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری سه متری



شکل ۵-۱۱ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری سه متری

۵-۶-۱-۲ طول شش متری

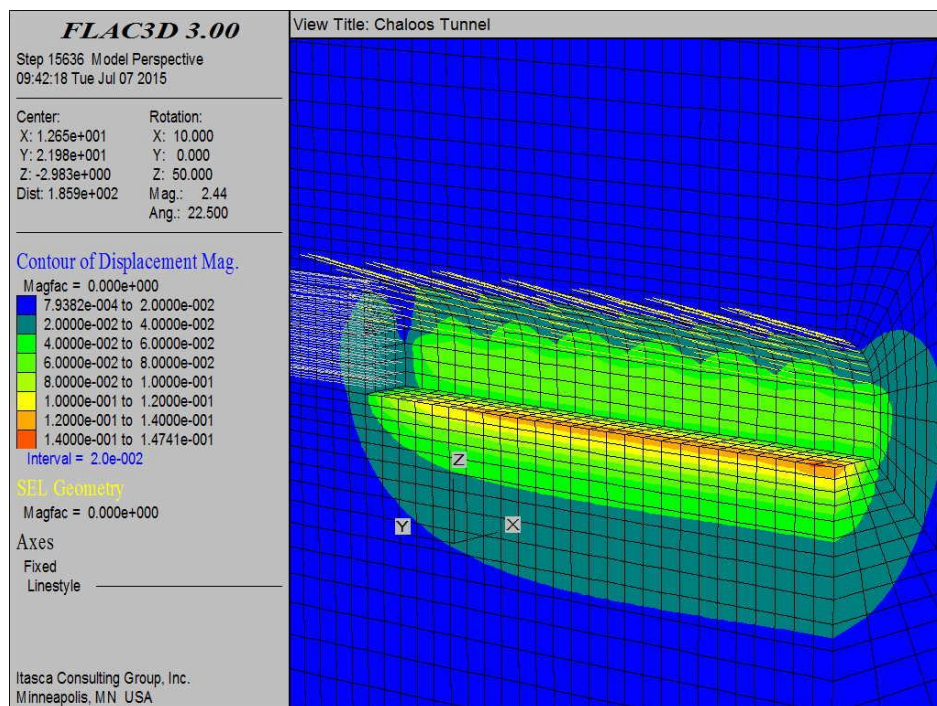
برای این حالت نیز در مجموع هفت سری قوس چتری در طول ۲۶ متر از تونل حفاری شده اعمال می‌شود. که همپوشانی، شیب و فاصله فورپول‌ها در این حالت به ترتیب ۲ متر، ۷ درجه و ۰/۴ متر می‌باشد. بیشترین میزان جابجای به وجود آمده در قسمت تاج تونل حدوداً ۱/۸ سانتی‌متر می‌باشد، که این مقدار دو برابر حالت سه متری می‌باشد. شکل ۵-۱۲ و شکل ۵-۱۳ به ترتیب میزان جابجای و ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل که با اعمال این نوع قوس چتری به وجود آمده را نشان می‌دهد.

۵-۶-۱-۳ طول نه متری

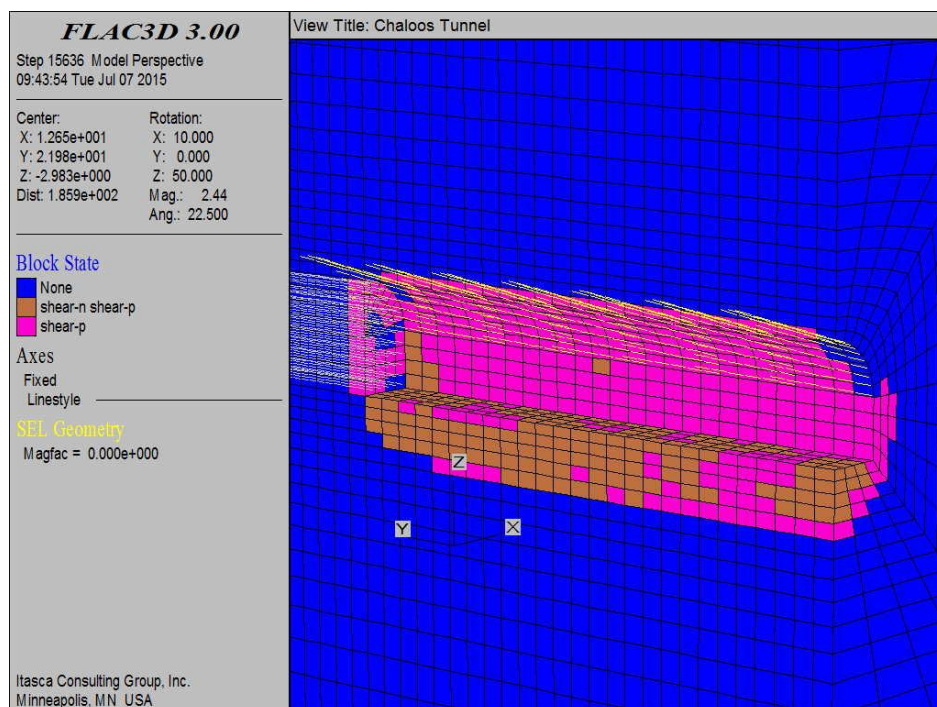
برای این حالت نیز پنج سری قوس چتری در کل ناحیه حفر شده تونل اعمال می‌شود که همپوشانی، شیب و فاصله‌داری لوله‌ها در این حالت نیز به ترتیب ۳ متر، ۷ درجه و ۰/۴ متر می‌باشد. با اعمال این قوس چتری بیشترین میزان جابجای به وجود آمده در تاج تونل ۳/۵ سانتی‌متر می‌باشد، این مقدار حدوداً چهار برابر حالت سه متری و دو برابر حالت شش متری می‌باشد. شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ نیز به ترتیب میزان جابجای و ناحیه پلاستیک به وجود آمده در این حالت را نشان می‌دهند.

۵-۶-۱-۴ طول دوازده متری

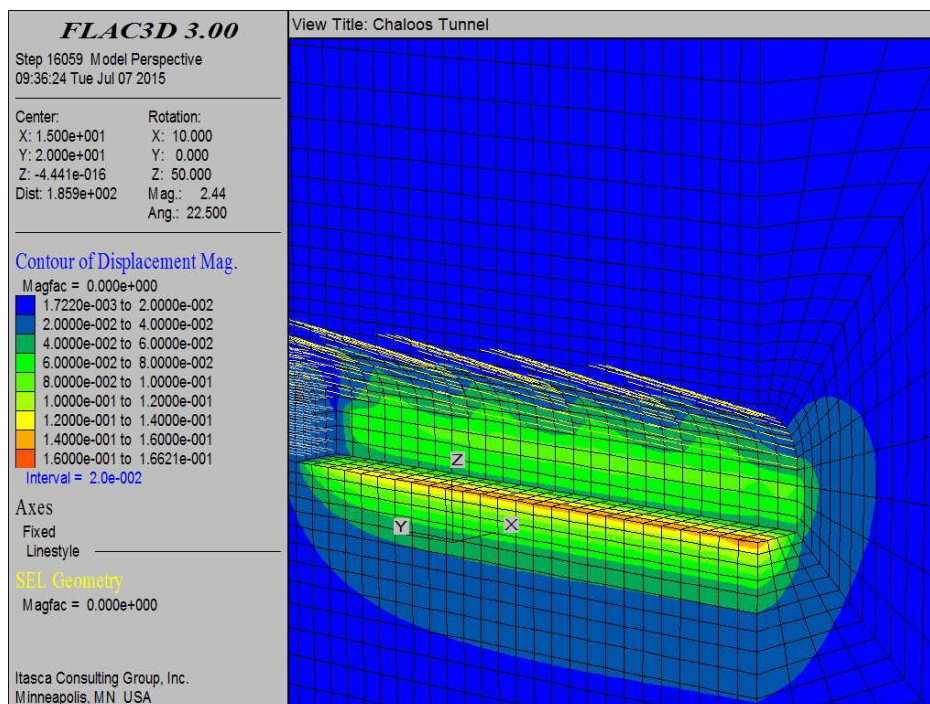
این حالت با اعمال چهار سری قوس چتری در قسمت مدل سازی شده تونل ایجاد می‌شود. همچنین همپوشانی، شیب، و فاصله داری در این حالت نیز به ترتیب ۴ متر، ۷ درجه و ۰/۴ متر می‌باشد. در این حالت نیز بیشترین میزان جابجای به وجود آمده در قسمت تاج تونل تا ۴ سانتی‌متر افزایش پیدا می‌کند. شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ نیز جابجای و ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال این نوع قوس چتری را نشان می‌دهد.



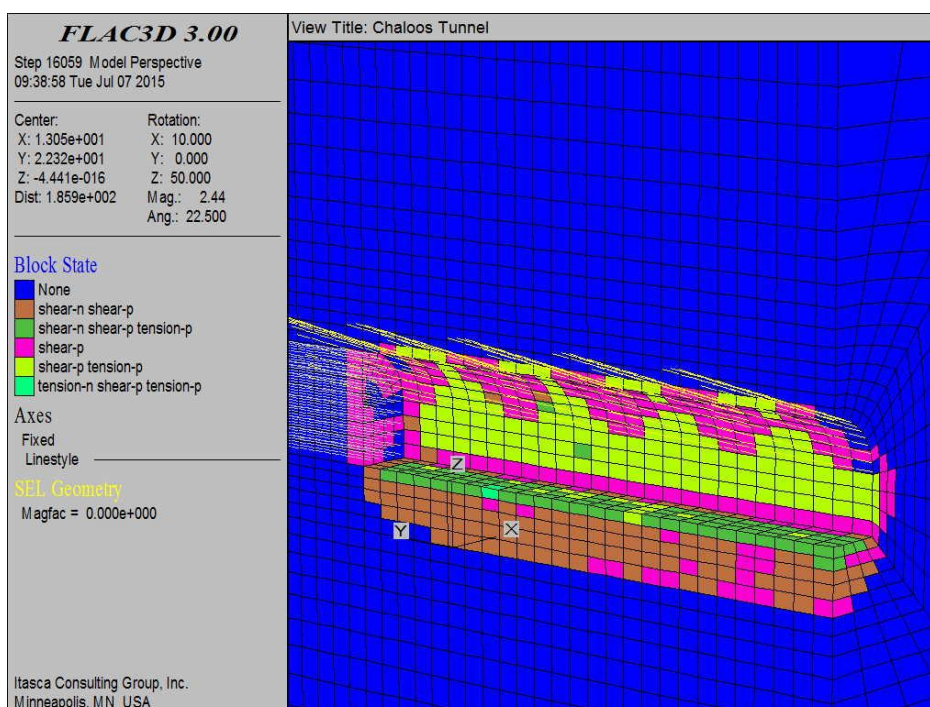
شکل ۵-۱۲ جابجایی به وجود آمده در اطراف تونل با اعمال قوس‌های شش متری



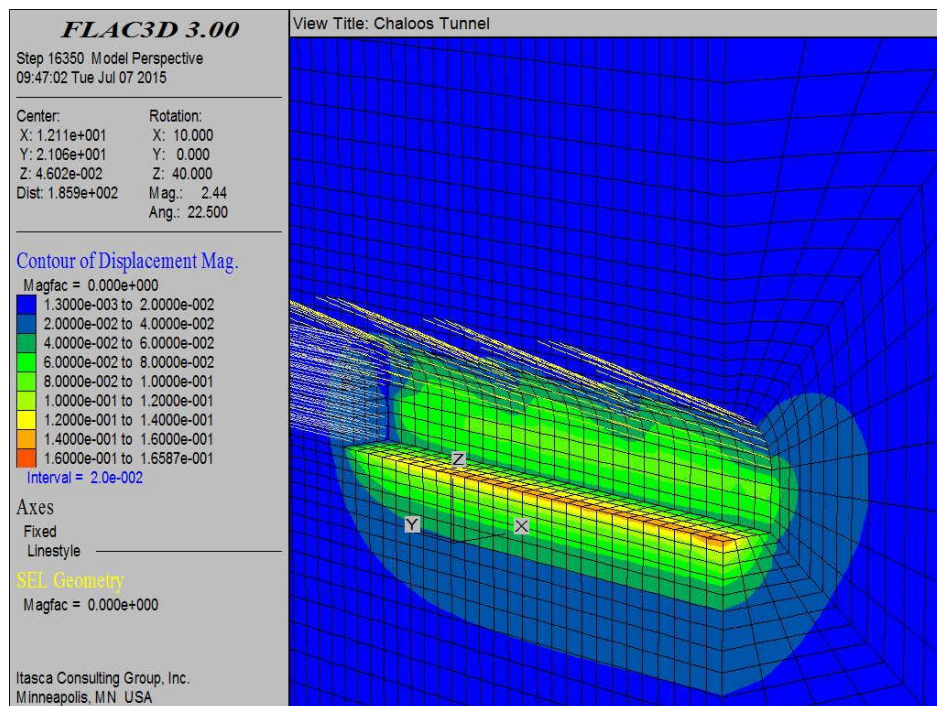
شکل ۵-۱۳ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل در زمان استفاده از قوس‌های شش متری



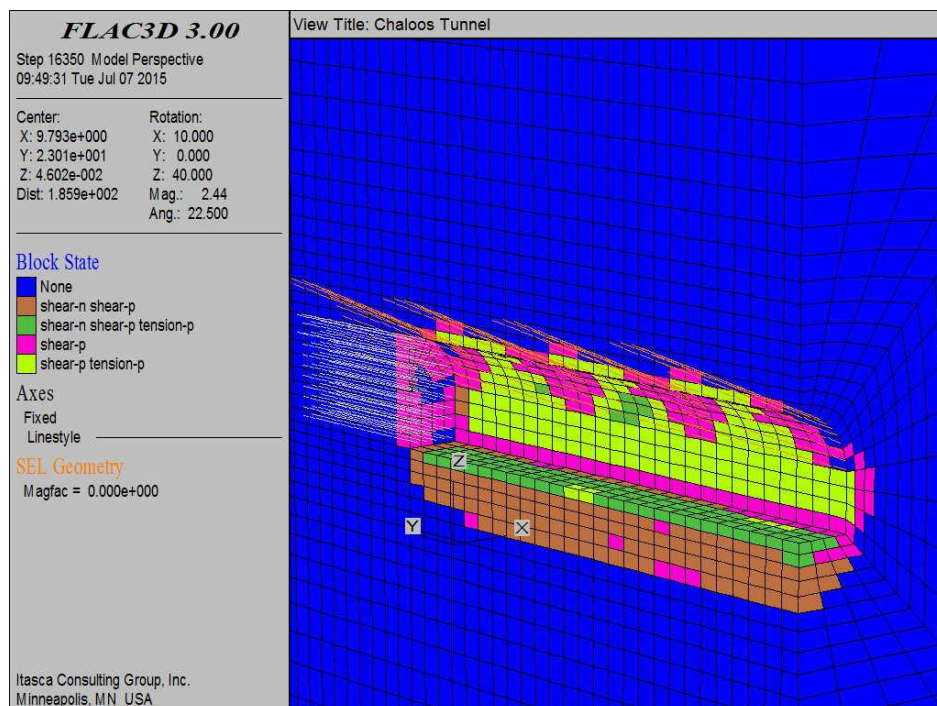
شکل ۵-۱۴ جابجایی ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری نه متری



شکل ۵-۱۵ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری نه متری



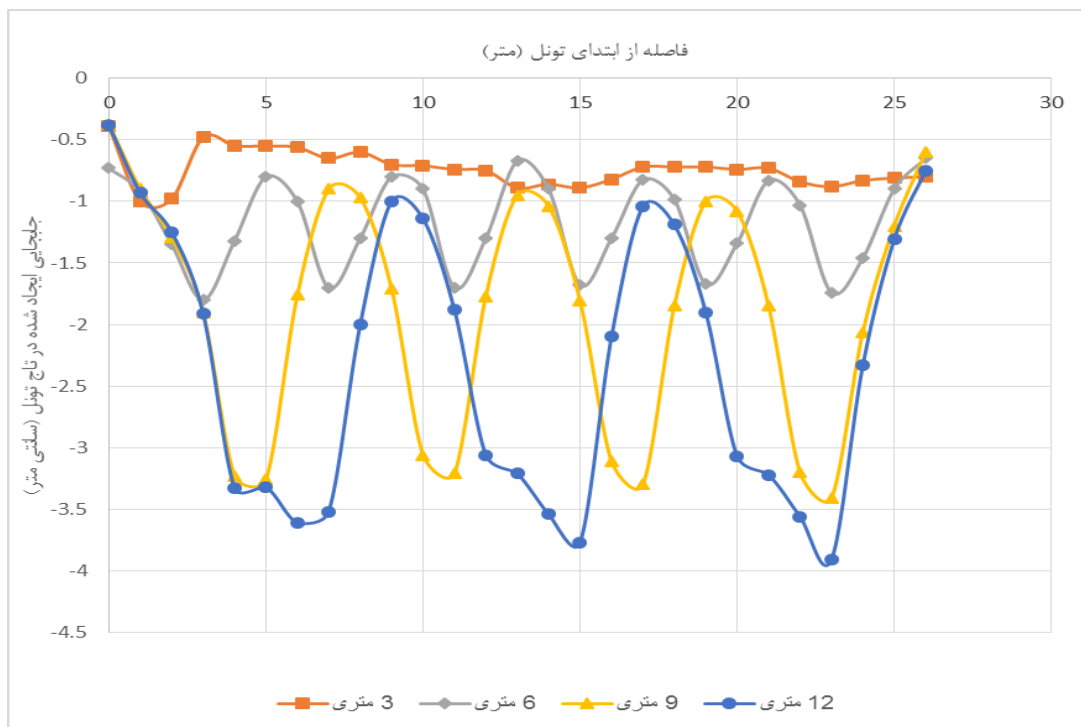
شکل ۱۶-۵ جابجایی به وجود آمده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری دوازده متری



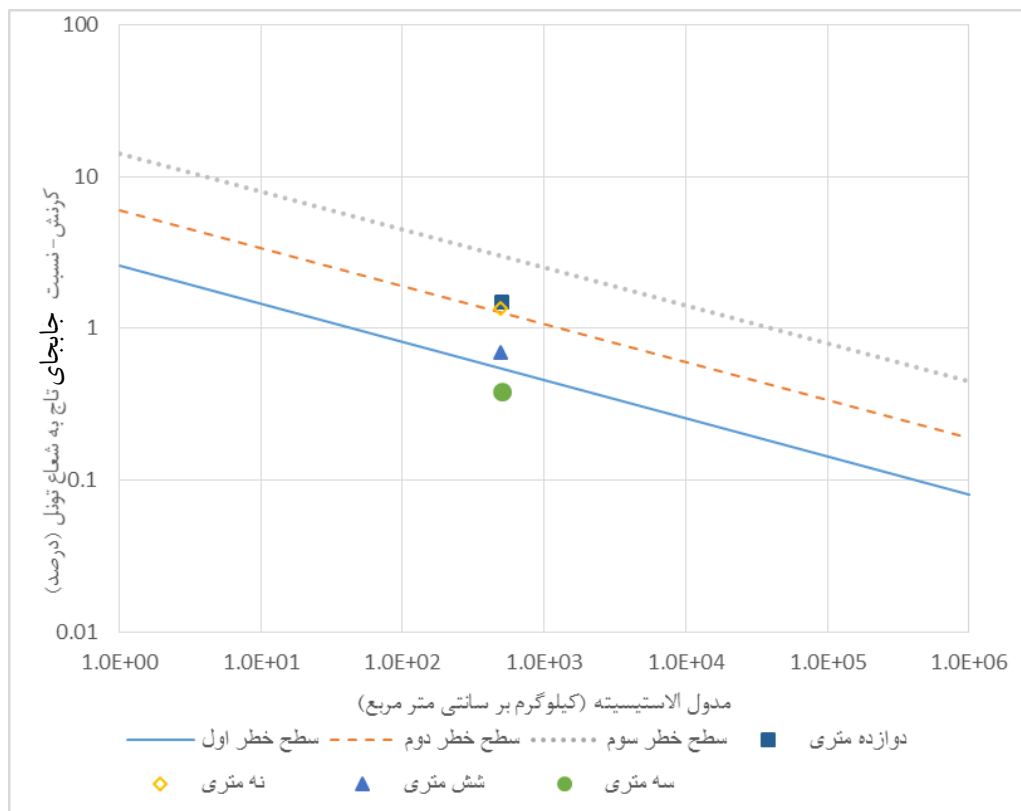
شکل ۱۷-۵ ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل با اعمال قوس چتری دوازده متری

۵-۶-۱-۵ نتیجه‌گیری برای تعیین طول مناسب

برای تعیین طول قوس‌چتری مناسب نیاز به استفاده از نمودار خطوط ساکورایی و جابجای‌های به وجود آمده در تاج تونل می‌باشد. بنابراین برای این کار لازم است که جابجای‌ها و کرنش‌های به وجود آمده در اطراف تونل را به دست آورده و با سطوح خطر ساکورایی مقایسه تا از سطح پایداری به وجود آمده اطلاع حاصل شود. با توجه به نمودار ۵-۵ میزان جابجای به وجود آمده در دو حالت نه متری و دوازده متری خیلی بیشتر از دو حالت دیگر است و همچنین با توجه به نمودار ۶-۵ دو حالت نه و دوازده متری در بالای سطح خطر دوم قرار داشته که این نشان دهنده ناایمن بودن پایداری حاصل شده در این دو حالت می‌باشد. بنابراین بهتر است برای ایجاد پایداری ایمن در تونل از دو نوع قوس‌چتری سه و شش متری استفاده شود. همچنین با توجه به اینکه نصب قوس‌های چتری کاری وقت گیر و مانعی برای پیشروی سریع تونل می‌باشد، بنابراین نیاز است از تناوب‌های نصب قوس‌چتری کاسته شود، پس بهترین گزینه قوس‌چتری شش متری می‌باشد.



نمودار ۵-۵ جابجای‌های به وجود آمده در تاج تونل برای طول‌های مختلف قوس‌چتری در طول تونل



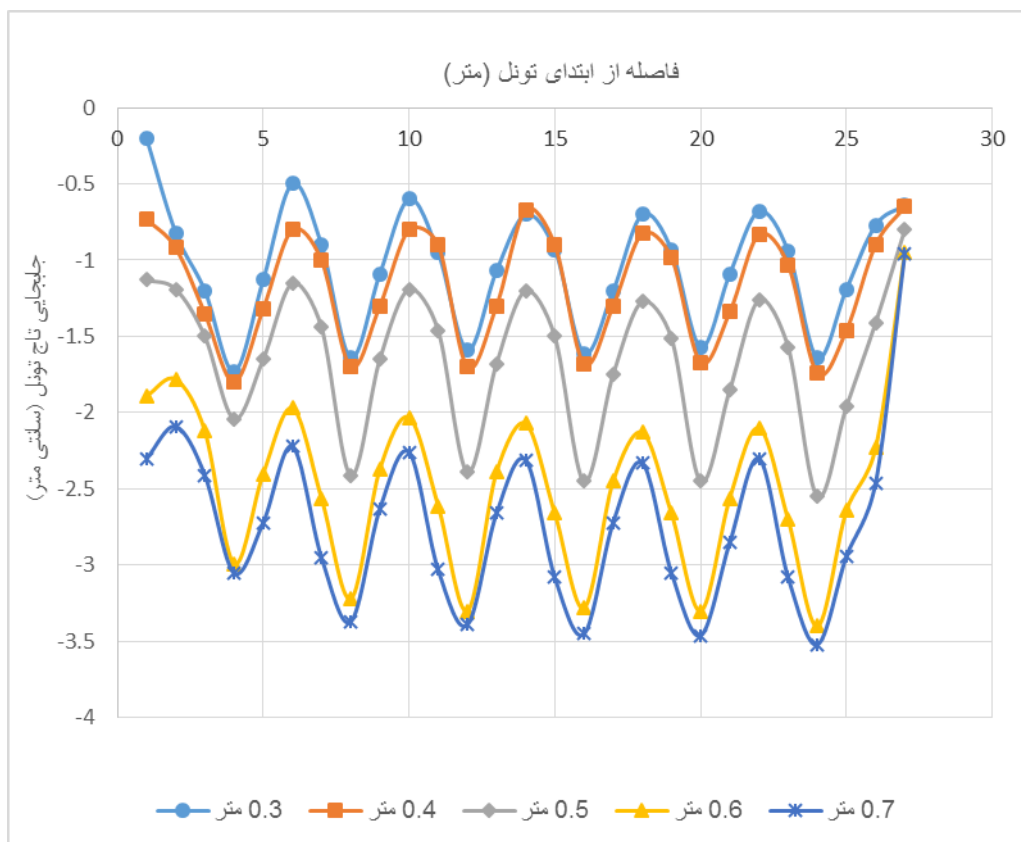
نمودار ۵-۶ سطوح خطر ساکورایی و موقعیت کرنش های روی داده برای طول های مختلف قوس چتری

۵-۶-۲ تعیین فاصله جانبی نصب لوله های قوس چتری

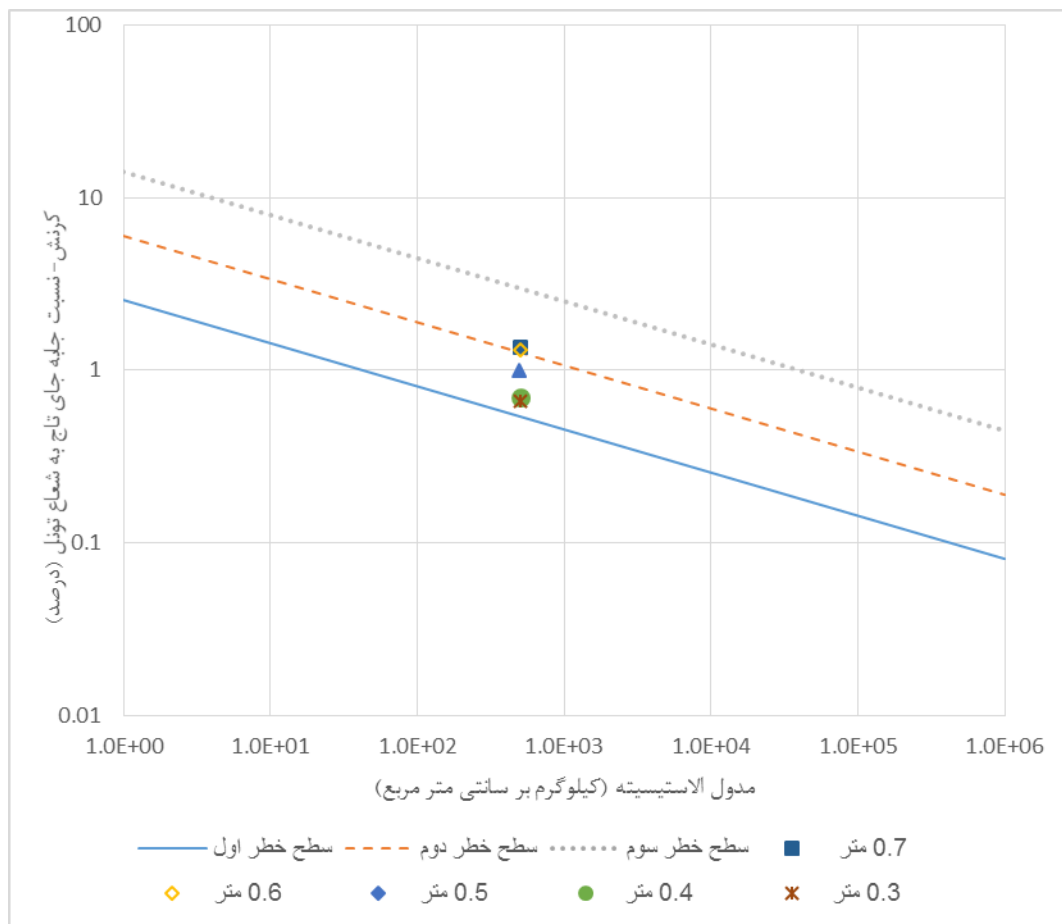
برای بررسی این حالت نیاز است که لوله ها را با فواصل مختلف نصب کرده و از روی جابجای و کرنش به وجود آمده در هر حالت فاصله مناسب برای نصب لوله ها تعیین شود. فواصل نصب که برای لوله ها در نظر گرفته شده شامل $0/3$ ، $0/4$ ، $0/5$ ، $0/6$ و $0/7$ متر می باشد، با تغییر فاصله لوله ها تعداد آنها در هر سری نیز تغییر می کند که برای این فواصل تعداد فورپول در هر سری به ترتیب برابر با ۷، ۹، ۱۱، ۱۴ و ۱۶ می باشد.

با توجه به نمودار ۵-۷ که نشان دهنده جابجای به وجود آمده در طول تاج تونل در فواصل مختلف نصب لوله های قوس چتری می باشد، می توان نتیجه گرفت که با افزایش این فاصله جابجای ها نیز افزایش پیدا کرده پس برای انتخاب فاصله ای که پایداری ایمن را ایجاد کند نیاز است به نمودار ۵-۸ که نشان

دهنده کرنش ایجاد شده در فواصل مختلف قوس چتری نسبت به خطوط ساکورایی می‌باشد، رجوع کرد. از این‌رو با توجه به نمودار ۵-۸ سه حالت ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ متری در بین سطح خطر اول و دوم قرار دارند این در حالی است که دو حالت دیگر یعنی ۰/۶ و ۰/۷ متر بالاتر از سطح خطر دوم قرار دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در دو حالت ۰/۶ و ۰/۷ پایداری ایمن ایجاد نمی‌شود، پس استفاده از این دو حالت کاملاً رد می‌شود. حال برای انتخاب از بین سه حالت ایمن باید به این نکته توجه شود درست است با کاهش فاصله فورپول‌ها پایداری بیشتری در سازه ایجاد می‌شود ولی این کاهش فاصله باعث افزایش تعداد فورپول‌ها در هر سری می‌شود، که این خود موجب افزایش زمان نصب و همچنین بالا رفتن هزینه‌های اجرایی می‌شود، بنابراین بهترین انتخاب گزینه‌ای است که علاوه بر ایجاد پایداری ایمن کمترین تعداد لوله‌های نصبی را شامل شود. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب فاصله نصب ۰/۵ متری که در هر سری از آن تعداد لوله‌ها ۹ عدد می‌باشد بهترین انتخاب است.



نمودار ۵-۷ جابجایی به وجود آمده برای تاج تونل در فواصل مختلف لوله‌ها

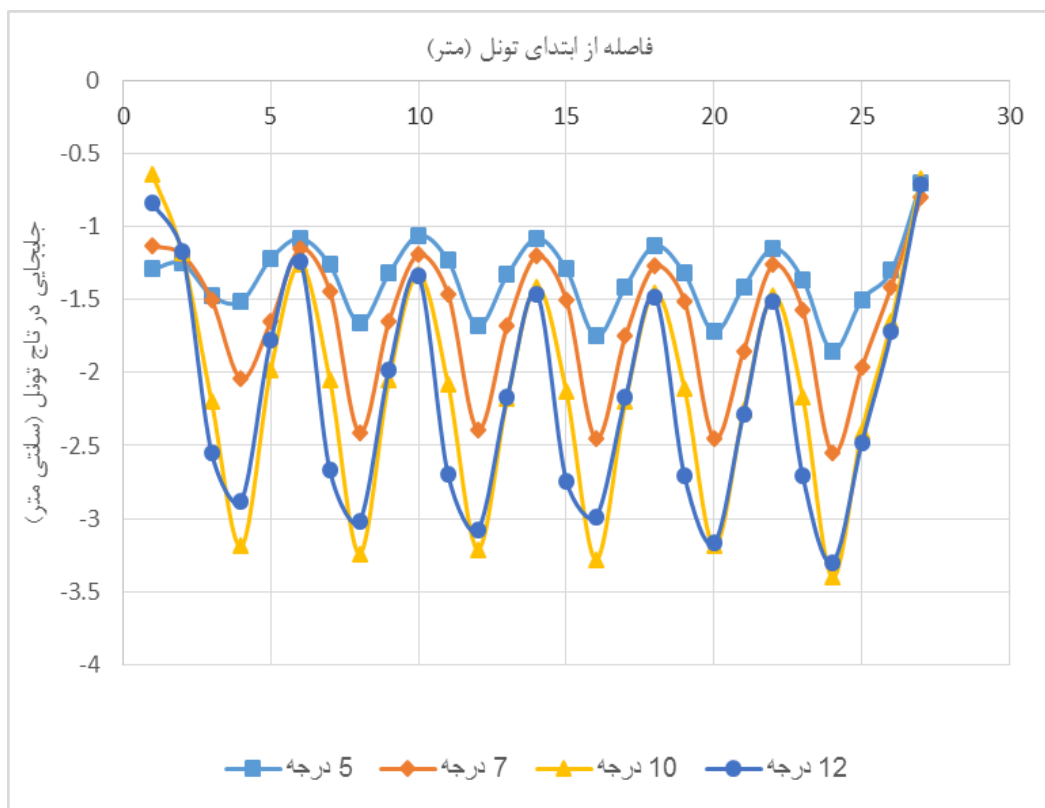


نمودار ۵-۸ گرنش ایجاد شده در حالت‌های مختلف نصب لوله‌ها و موقعیت آنها نسبت به سطوح خطر ساکورایی

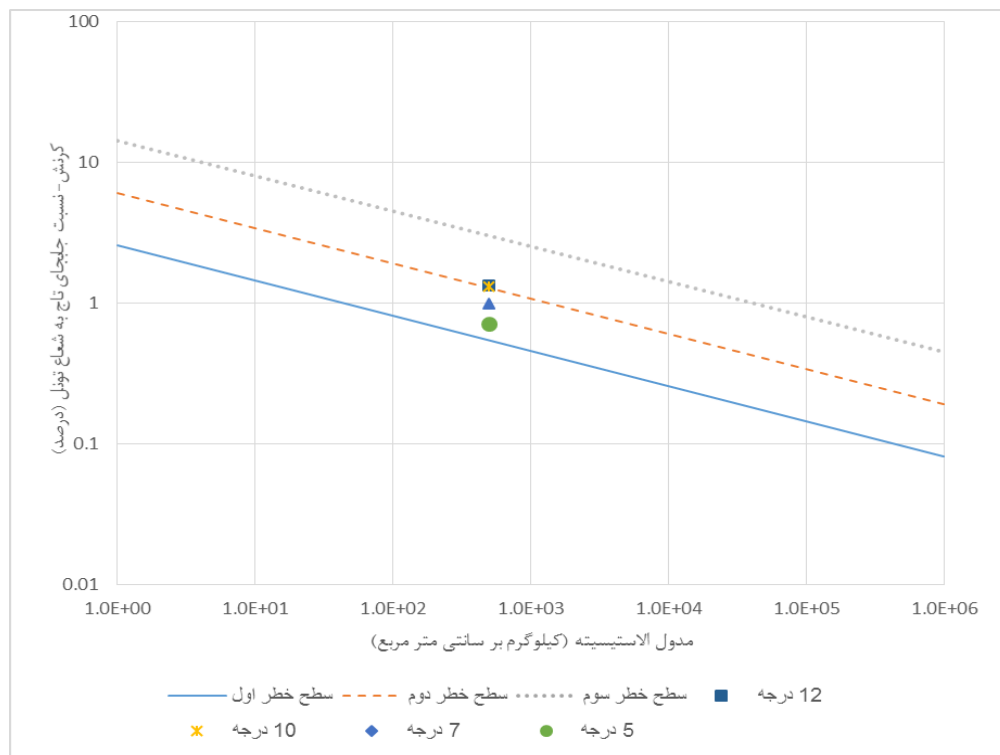
۵-۶-۳ تعیین شیب مناسب برای نصب قوس‌های چتری

برای بررسی این پارامتر نیز نیاز است که لوله‌ها را با شیب‌های مختلف در مدل ایجاد کرده و به بررسی تاثیر آنها بر پایداری تونل پرداخته شود. از این رو برای بررسی این حالت لوله‌ها را با چهار زاویه ۵، ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه در مدل اعمال و تغییرات ایجاد شده در هر حالت بررسی می‌شود. با توجه به نمودار ۵-۹، که جابجایی به وجود آمده در طول تاج تونل برای زاویه‌های مختلف نصب فورپول را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که میزان جابجایی با افزایش زاویه نصب افزایش پیدا می‌کند. همچنین برای بررسی سطح پایداری ایجاد شده در تونل به نمودار ۵-۱۰، که نشان دهنده گرنش ایجاد شده در هر حالت و

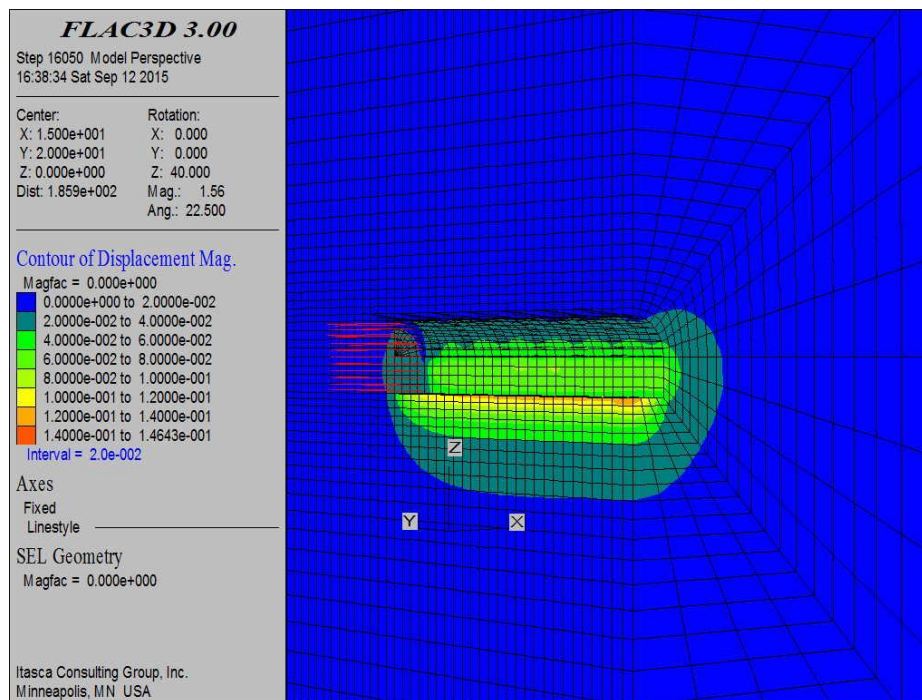
نسبت آن به خطوط ساکورایی می‌باشد، پرداخته می‌شود. بنابراین با بررسی این نمودار مشاهده می‌شود، که در دو حالت ۱۰ و ۱۲ درجه روی سطح خطر دوم قرار دارند پس بهتر است از این دو زاویه برای نصب لوله‌ها استفاده نشود. از این رو می‌توان برای نصب لوله‌ها از دو زاویه ۵ و ۷ درجه استفاده کرد. که در اینجا با توجه به پایداری بیشتر که توسط زاویه ۵ درجه ایجاد شده این زاویه برای نصب لوله‌ها استفاده شده است. شکل‌های ۵-۱۸ تا ۵-۲۱ جابجایی به وجود آمده در مدل برای شیب مختلف آورده شده است.



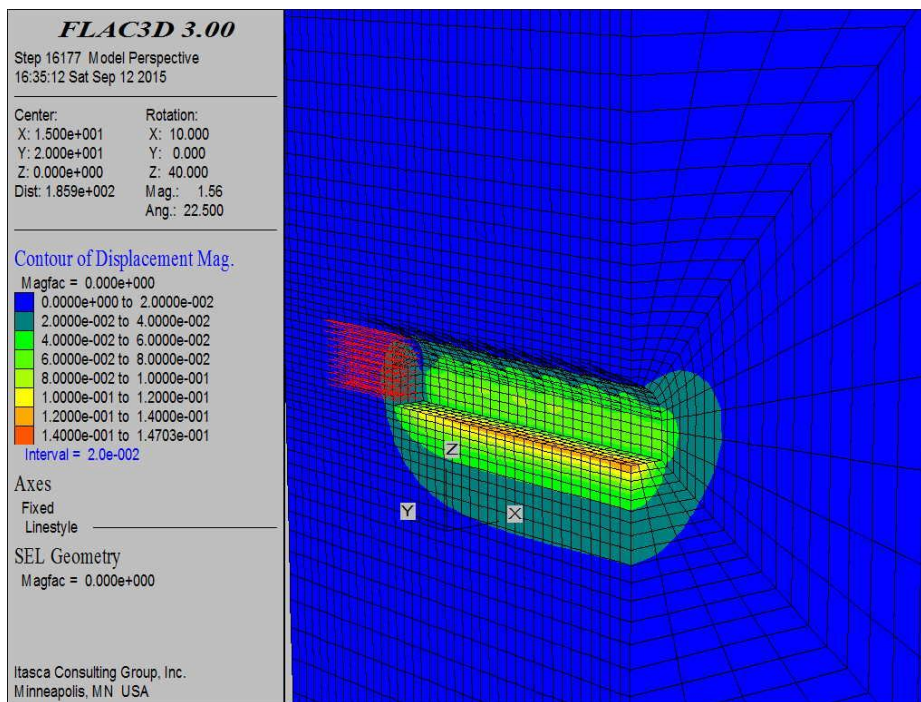
نمودار ۵-۹ جابجایی به وجود آمده در طول تونل با تغییر زاویه نصب لوله‌ها قوس چتری



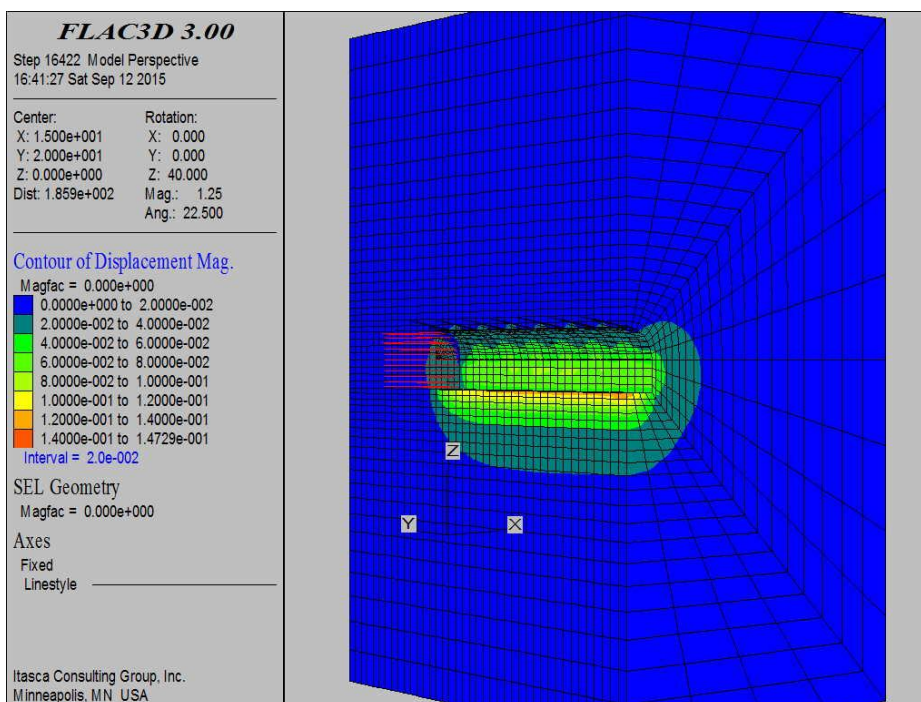
نمودار ۵-۱۰ زوایه‌های نصب مختلف و موقعیت کرنش به وجود آمده در هر زاویه نسبت به سطوح خطر ساکورایی



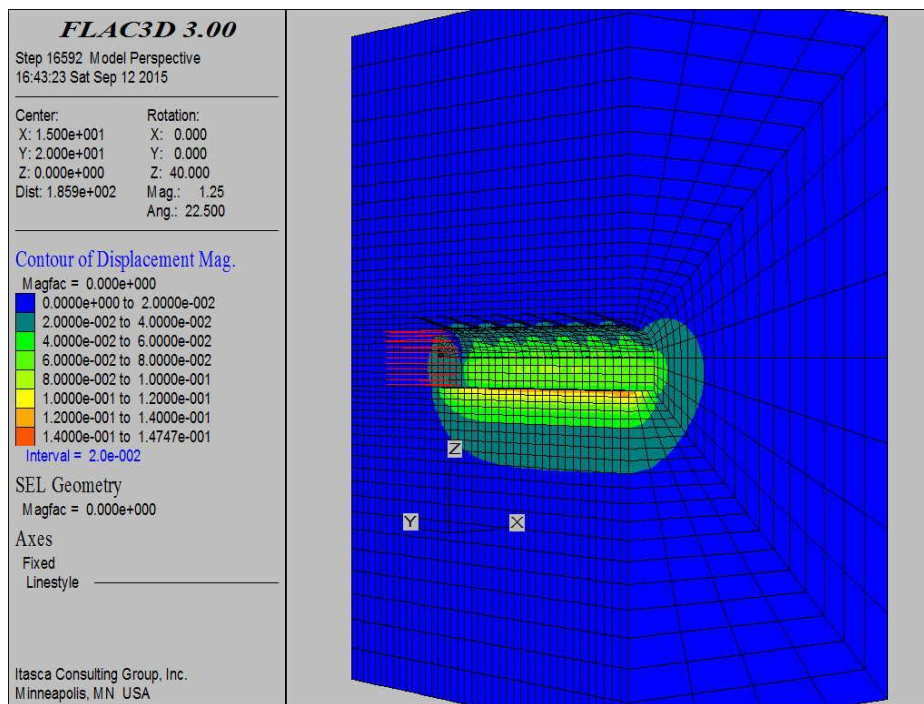
شکل ۵-۱۸ جابجایی ایجاد شده در مدل با اعمال قوس‌های چتر با شیب ۵ درجه



شکل ۵-۱۹ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال قوس‌های چتری با شیب ۷ درجه



شکل ۵-۲۰ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال قوس چتری به شیب ۹ درجه

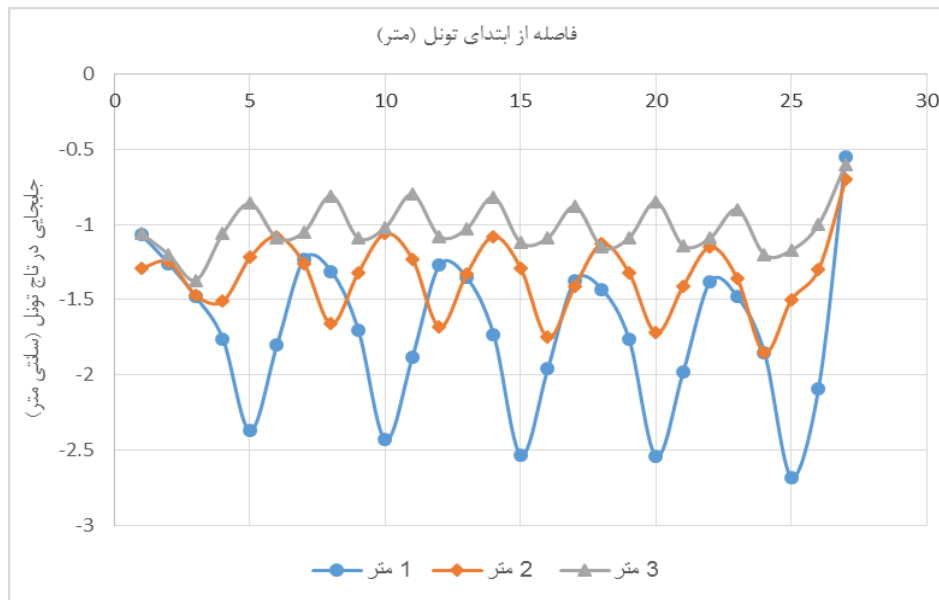


شکل ۵-۲۱ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال قوس چتری به شیب ۱۲ درجه

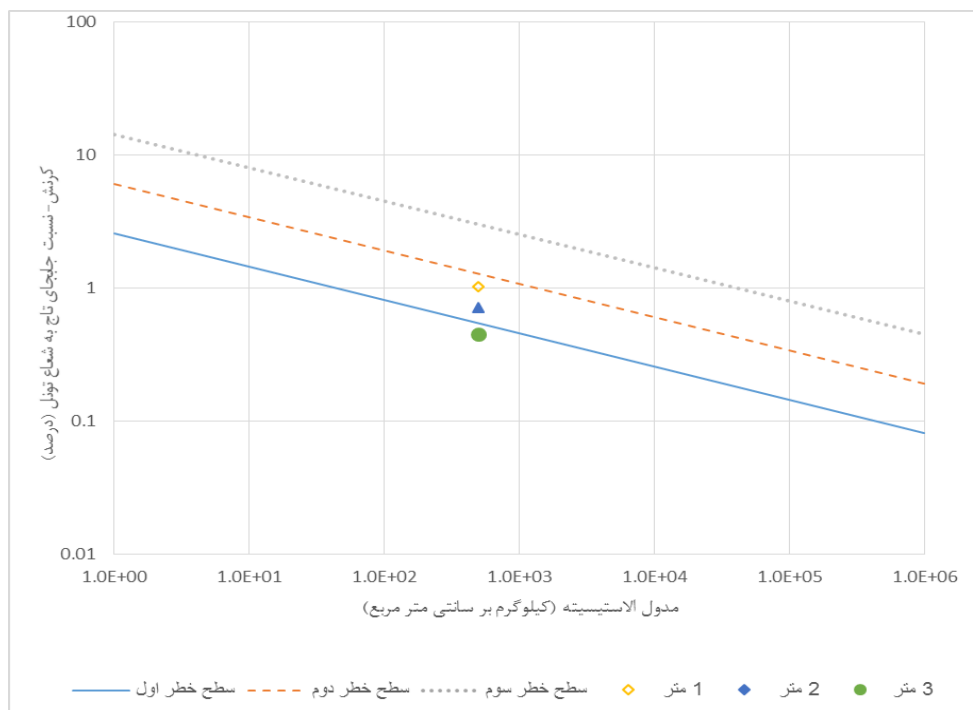
۵-۶-۴ تعیین همپوشانی مناسب

برای تعیین میزان همپوشانی نیز باید قوس‌های چتری را با همپوشانی‌های مختلف مدل سازی کرده و با اجرا کردن مدل از میزان و تاثیر هر همپوشانی بر پایداری تونل اطلاع حاصل شود. برای این کار قوس‌های چتری را با همپوشانی‌های ۱، ۲ و ۳ متری در مدل مورد نظر ایجاد کرده و با خروجی گرفتن از جابجایی‌های به وجود آمده در هر حالت به بررسی آنها پرداخته می‌شود. با توجه به نمودار ۵-۱۲ کرنش‌های به وجود آمده در همپوشانی‌های مختلف در پایین تر از سطح خطر دوم قرار ندارد، بنابراین هر سه حالت همپوشانی از نظر پایداری در سطح ایمنی قرار دارند. همچنین با توجه به این که هرچه همپوشانی زیاد باشد در یک طول مشخص از تونل سری‌های بیشتری از قوس چتری لازم است، بنابراین لازم است همپوشانی را به گونه‌ای انتخاب شود که کمترین تعداد سری قوس چتری برای طول مشخص تونل لازم شود. از این رو همپوشانی ۱ متری می‌تواند بهترین انتخاب همپوشانی باشد، چون که هم از نظر پایداری ایمن قابل قبول است و هم تعداد سری قوس چتری در طول مشخصی از تونل دارای کمترین مقدار می‌-

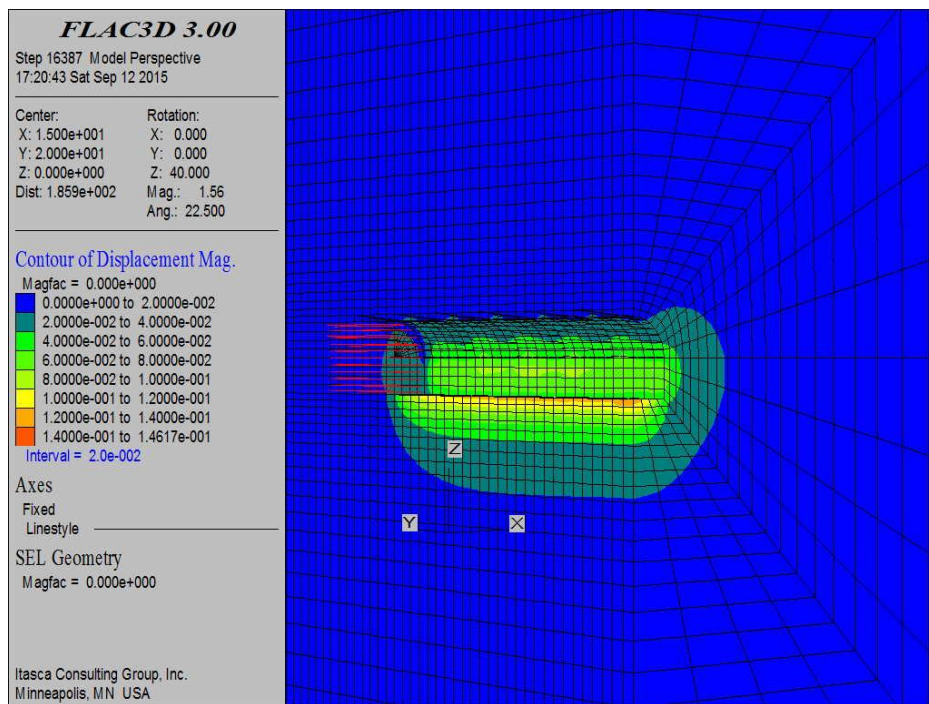
باشد. شکل‌های ۵-۲۲ تا ۵-۲۳ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال همپوشانی‌های مختلف را نشان می‌دهند.



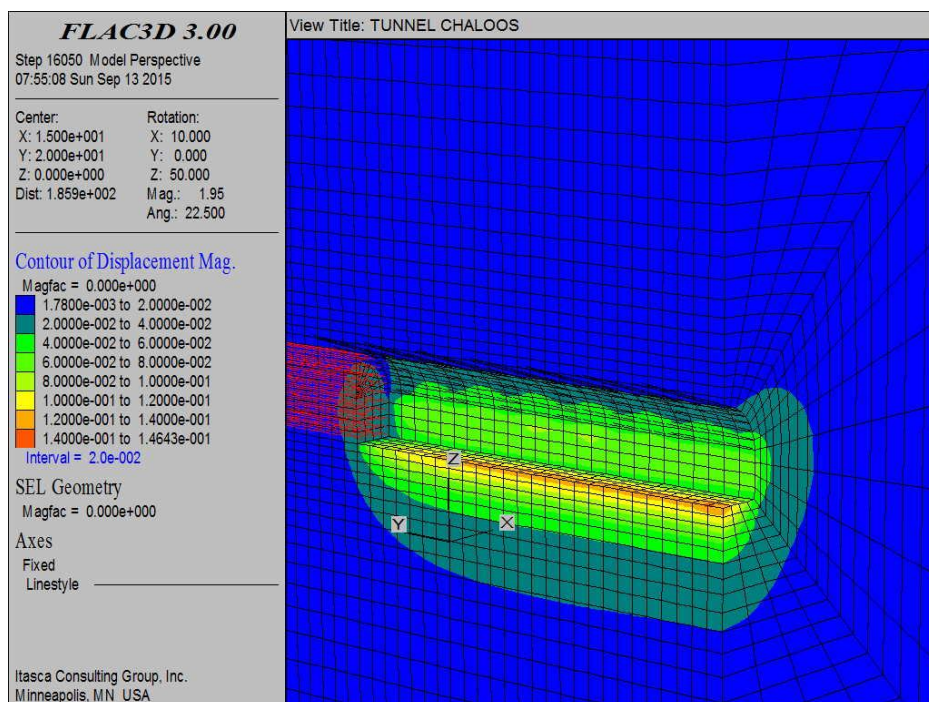
نمودار ۵-۱۱ جابجایی به وجود آمده در قسمت تاج تونل برای همپوشانی‌های مختلف



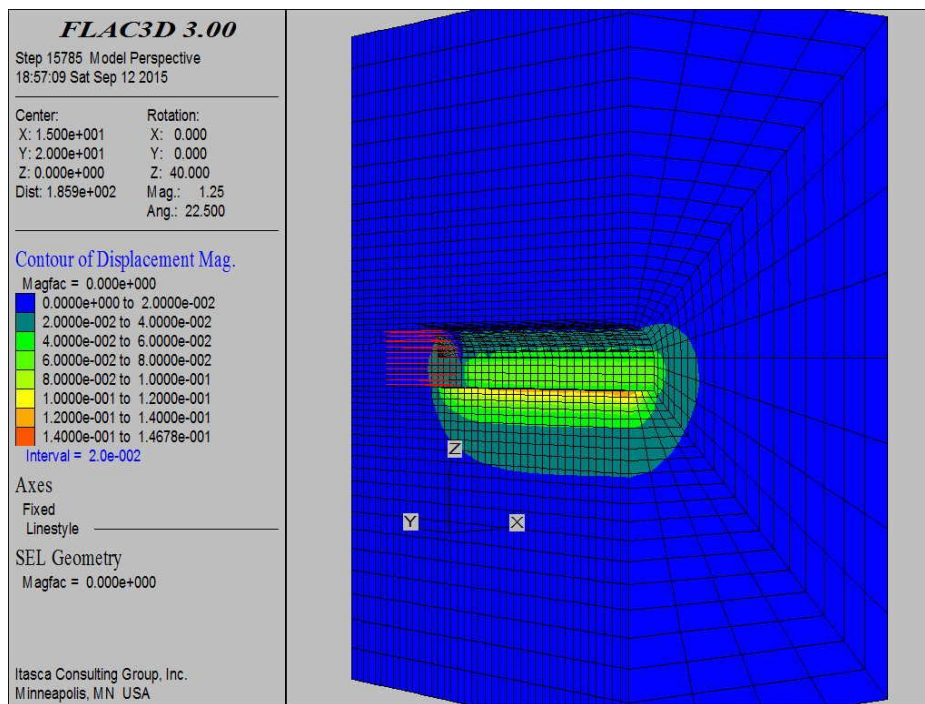
نمودار ۵-۱۲ کرنش‌های به وجود آمده در همپوشانی‌های مختلف و موقعیت آنها نسبت به سطوح خطر ساکورایی



شکل ۲۲-۵ جابجایی به وجود آمده در تونل با اعمال قوس‌های چتری با هم پوشانی ۱ متر



شکل ۲۳-۵ جابجایی به وجود آمده در مدل با قوس‌های چتری به هم پوشانی ۲ متری



شکل ۲۴-۵ جابجایی به وجود آمده در مدل با اعمال قوس چتری با همپوشانی ۳ متر

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می باشد:

- روش پیش تحکیم به تعداد زیادی روش تقسیم می شود که هر کدام از روش ها برای شرایط خاصی قابل استفاده است. با توجه به شرایط پروژه و همچنین هزینه زیاد بعضی از روش ها در این تحقیق استفاده از روش نگهداری سینه کار با استفاده از بولت های فایبرگلاس و روش قوس چتری پیشنهاد شده است.
- از آنجا که با اعمال نگهداری اولیه به همراه پیش تحکیم سینه کار تاثیر کمی در جابجای تاج تونل و سطح زمین می گذارد. برای پایداری بیشتر در قسمت تاج تونل و سطح زمین نیاز است که روش دیگر پیش تحکیم یعنی قوس چتری نیز اعمال شود.
- اعمال پیش تحکیم سینه کار باعث کاهش جابجای روی داده در قسمت سینه کار تونل از ۷ سانتی متر به ۳ سانتی متر می شود.
- با توجه به جابجای به وجود آمده برای قسمت جبهه کار در فواصل مختلف بولت های فایبرگلاسی می توان به این نتیجه رسید، که بهتر است بولت های فایبرگلاسی در فواصل ۰/۵ متری از هم نصب شوند، تا پایداری مورد نظر حاصل شود.
- برای تعیین طول فورپول ها، چهار طول مختلف ۳، ۶، ۹ و ۱۲ متری از فورپول ها با هم مقایسه شده اند، که با بررسی و تحلیل داده های خروجی در هر حالت دو طول ۳ و ۶ متری از نظر پایداری مناسب تشخیص داده شدند. همچنین با توجه به این که هر چه طول قوس چتری کمتر باشد تعداد سری های که باید در طول مشخصی از تونل ایجاد کرد، بیشتر می شود، از این رو بهتر است از طول ۶ متری برای اجرای قوس چتری استفاده شود.
- برای فاصله جانبی لوله ها نیز از چهار فاصله ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ استفاده شده، که دو حالت

۰/۴ و ۰/۵ از نظر پایداری، ایمن تشخیص داده شده‌اند. از آنجا که هر چه فاصله لوله‌ها از هم کم باشد، تعداد لوله در هر سری زیاد می‌شود، پس می‌توان به این نتیجه رسید که فاصله‌داری ۰/۵ متری برای اعمال لوله‌های مناسب‌تر است.

- برای تعیین شیب مناسب لوله‌ها به بررسی چهار زاویه ۵، ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه پرداخته شده است. که در نهایت با توجه سطوح خطر ساکورایی و جابجای به وجود آمده در هر حالت و همچنین با توجه به این که هر چه شیب نصب کمتر باشد حفاری در آن آسان‌تر است، اعمال قوس‌چتری با شیب ۵ درجه انتخاب شده است.

- برای بررسی تاثیر همپوشانی نیز از همپوشانی‌های ۱، ۲ و ۳ متری استفاده شده است. از آنجا که در هر سه حالت نگهداری ایجاد شده در سطح ایمنی قرار دارد، همپوشانی ۱ متری به دلیل این که از تناوب نصب قوس‌چتری کاسته می‌شود، انتخاب شده است.

- در نهایت نتیجه که حاصل می‌شود نشان دهنده آن است، که از قوس‌چتری شش متری با فاصله نصبی نیم متر و شیب پنج درجه که هر سری دارای همپوشانی یک متری با سری قبلی خود دارد، استفاده شود. در مجموع برای اعمال پیش‌تحکیم برای ۲۶ متر طول تونل مدل‌سازی شده، می‌توان از شش سری قوس‌چتری که در هر سری ۹ عدد لوله قرار دارد استفاده کرد.

۲-۶ پیشنهادات

پیشنهاداتی که برای ادامه کارهای این چنین می‌توان ارائه کرد در زیر آورده شده است:

- با توجه به نزدیک بودن منطقه تونل به ناحیه گسلی و وجود تنش‌های تکتونیکی در منطقه می‌توان برای جواب بهتر از مدل‌سازی دینامیکی برای بررسی پایداری استفاده کرد.
- پارامترهای بیشتری (شعاع تزریق، قطرها و ضخامت‌های مختلف لوله‌ها و ...) که موثر در تعیین و طراحی قوس‌چتری هستند، بررسی و آورده شوند.

- می‌توان با استفاده از این تحقیق و رویه آن به بررسی دیگر تونل‌ها از جمله تونل‌های شهری و تونل‌های راه و همچنین مغارها و فضاهاى زیر زمینی که شرایط ژئومکانیکی آنها نزدیک به این پروژه است، پرداخته شود.
- تاثیر پارامترهای مختلف بر هم و بر پایداری تونل را می‌توان به صورت فازی بررسی کرد.

منابع:

AASHTO., (1996). “**American Association of State Highway and Transportation Officials**”. Section 8-Reinforced Concrete.

Aksoy, C.O., Onargan, T., (2010). “**The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages**” Tunn. Undergr. Space Technol., vol. 25, pp. 553-559.

Anagnostou .G, (2001), “**Two shallow tunnels in soft ground**” AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress Progress in Tunnelling after 2000, Milano, June 10-13, 2001. B.N.Whittaker, R.C.Frith; Institution of Mining and Metallurgy (1990), “**Tunneling: Design, Stability and Construction**”, London.

Barisone, G., Pigorini, B., Pelizza, S., (1982). “**Umbrella Arch Method for Tunnelling in Difficult Conditions – Analysis of Italian Cases**”. Proceedings of the 4th Congress International Association of Engineering Geology, New Delhi, Vol. 4, pp. IV 15-IV 27.

Chang, Y., Swminell, R., Bogdanoff, L., Lindstrom, B., Termen, J., (2005), “**Study of Tunnelling Through Water-bearing fracture zones**”, WSP Sweden.

Choi, Y.K., Park, J.H., Kwon, O.Y., Woo, S.B., (2005). “**Longitudinal Arching Characteristics around Face of a Soil-tunnel with Crown and Face-reinforcement – Laboratory Investigation**”. In: Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, pp. 917–923.

Chapaman, D.N., Metje, N., Stark A., (2010), “**Introduction to tunnel construction**”, Milton Park, Abingdon, oxon, Spon Press; New York, NY.

Funatsu, T., Hoshino, T., Sawae, H., Shimizu, N., (2008) “**Numerical analysis to better understand the mechanism of effects of ground supports and reinforcements on the stability of tunnels using the distinct element method**” Tunn. Undergr. Space Technol. 23 561-573.

Harris, J.S., (1995), “**Ground freezing in practice**”, T.Telford; London Angleterre.

Haruyama, K., Teramoto, S., Harada, H., Mori, M., (2001). **“Construction of Urban Expressway Tunnel with Special Large Cross Section by NATM – Metropolitan Inter –city Highway (ken-O-Do) Ome Tunnel”**. Modern Tunnelling Science and Technology, Adachi et al. (eds.), pp. 693-698.

Hefny, A.M., Tan, W.L., Ranjith, P., Sharma, J., Zhao, J., (2004). **“Numerical Analysis for Umbrella Arch Method in Shallow Large Scale Excavation in Weak Rock”** In Proceedings of 30th ITA-AITES World Tunneling Congress, Singapore, 22 - 27 May 2004.

Hoek, E., Torres, C.C., Diederichs, M., Corkum, B., (2008). **“Integration of geotechnical and structural design in tunneling”** the 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis.

Itasca Consulting Group, Inc., (2005). **“FLAC 3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions”**, Users manual.

Kimura, H., Itoh, T., Iwata, M., Fujimoto, K., (2005). **“Application of New Urban Tunneling Method in Baikoh Tunnel Excavation”**. Tunn. Undergr. Space Technol. 20, 151–158.

Kamata, H., Mashimo, H., (2003). **“Centrifuge Model Test of Tunnel Face Reinforcement by Bolting”** Tunn. Undergr. Space Technol. 18, 205– 212.

Koshima, A. Guatteri, G., (2006), **“Experiences of Ground Improvement for Urban Tunnels in Difficult Conditions”**, Sao Paulo Brazil.

Leca, E., Leblais, Y., Kuhnhenm, K., (2001), **“Underground Works in Soils and Soft Rock Tunneling”**.

Lee, K.M., Rowe, R.K., (1991). **“An Analysis of Three-dimensional Ground Movements: the Thunder Bay tunnel”**. Can. Geotech. J. 28, 25–41.

Lunardi, P., Focaracci, A., Giorgi, P., Papacella, A., (1992). **“Tunnel Face Reinforcement in Soft Ground Design and Controls during Excavation”** Int. Congr. Towards New Worlds in Tunnelling. 2, Acapulco, 1992. p. 897–908.

Matsuo, H., Yamamura, S., Amano, M., Taira, K., (1996). **“New Construction**

Method for Urban Tunnels in Uncemented Ground under High Groundwater Pressure". North American Tunnelling '96, Ozdemir (ed.), pp. 345-352.

Megaw, T. M., Bartlett, J. V., (1981), **"Tunnels: planning, design, construction"**, Chichester; Horwood.

Nishimaki, A., Mitarashi, Y., Uematsu, S., (1995). **"Study of the Effects of the AGF Method"**. South East Asian Symposium on Tunnelling and Underground Space Development, Bangkok, pp. 125-132.

Ohtsu, H., Hakoishi, Y., Nago, M., Taki, H., (1995). **"A Prediction of Ground Behaviour Due to Tunnel Excavation under Shallow Overburden with Long Length Forepilings"** South East Asian Symposium on Tunnelling and Underground Space Development, Bangkok, pp. 157-164.

Otani, T., Shinji, M., Chijiwa, T., (2008). **"Proposal of Numerical Model and the Determination Method of Design Parameters for Pipe Roofing Method"** Doboku Gakkai Ronbunshuu F, Vol. 64, No. 4, pp. 450-462.

Peila, D., ITA/AITES-Training Course Tunnel Engineering (2007), **"Ground Reinforcing for Tunneling"**, Istanbul.

Peila, D., Oreste, P.P., Pelizza, S., Poma, A., (1996). **"Study of the Influence of Subhorizontal Fiber-glass Pipes on the Stability of a Tunnel Face"**. In: Proc. Int. Conf. on North American Tunnelling '96, Washington, DC, 1996. Vol. 1, p. 425-31.

Peila, D., (1994). **"A Theoretical Study of Reinforcement Influence on the Stability of a Tunnel Face"** Geotechnical and Geological Engineering 1994; 12:145-68.

Prountzopoulos, G., (2011). **"Tunnel face reinforcement and protection-optimization using 3D finite element analyses"** proceeding of the 21st European Young Geotechnical Engineers' Conference Rotterdam.

Rowe, R.K., Kack, G.J., (1983). **"A Theoretical Examination of the Settlements Induced by Tunnelling Four Case Histories"**. Can. Geotech. J. 20, 299-314.

Sakurai, S., Kawashima, I., Otani, T., (1995). **"A criterion for assessing the stability of tunnels"** ISRM Intern. Symp, vol. 2, pp. 969-973.

Sato, J., Ito, J., (1993). **“Numerical Analysis of the Umbrella Method for Tunnel Excavation”**. Infrastructures Souterraines de Transports, Reith (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 355-360.

Shinji, M., Sato, T., Doi, Y., Ootani, T., (2010). **“The Optimum Distance of Roof Umbrella by Using the Distinct Element Method”** ISRM international Symposium and 6th Asian Rock Mechanics Symposium 23-27 October 2010, New Delhi.

Volkman, G.M., Schubert, W., (2008). **“Tender Document Specifications for Pipe Umbrella Installation Methods”**. World Tunnel Congress 2008 – Underground Facilities for Better Environment and Safety – India.

Volkman, G.M., Schubert, W., (2007). **“Geotechnical Model for Pipe Roof Supports in Tunneling”** In Proc. of the 33rd ITA-AITES World Tunneling Congress, Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises, Vol. 1 eds. Bartak, J., Hrdina, I., Romancov, G., Zlamat, J., Prague, Czech Republic, 5-10 May 2007, Taylor & Francis Group, ISBN: 978-0-415-40802. pp. 755-760.

Volkman, G.M., Button, E.A., Schubert, W., (2006). **“A Contribution to the Design of Tunnels Supported by a Pipe Roof”** 50 Years of Rock Mechanics - Landmarks and Future Challenges (2006), S. 976 – 976 US Rock Mechanics Symposium; 41.

Walsh, E.V., (2005), **“Mechanical Pre-Cutting a Rediscovered Tunneling Technique”**, Quebec, Canada.

Wallace, Hayward, Baker (1982), **“proceeding of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering”**, New York .N.Y; ASCE.

Wood, A. M. I. M., (2000), **“Tunneling: Management by design”**, E & FN Spon; London, New York.

Woodward, J. (2005), **“An introduction to geotechnical”**, by Spon Press; USA, Canada.

Yang, T., Woo, J., Lee, S., (2001). **“Ground Reinforcement for a Tunnel in Weathered Soil Layer Beneath Han Riverbed in Korea”**. Modern Tunneling Science and Technology, Adachi et al. (eds.), pp. 493-496.

مرتضی رحیمی دیزجی ، یاشار پور رحیمیان (۱۳۸۳)، "مطالعه و شبیه سازی روش فورپولینگ در حفر تونل".

محمدی، ح.، رحمان نژاد، ر.، سعیدی، ع. (۱۳۸۷)، "بررسی امکان پذیری حذف پوشش بتنی تونل های انتقال آب، مطالعه موردی: تونل انتقال آب کرمان"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران ، دانشگاه تهران.

گروه زمین شناسی و ژئوتکنیک شرکت مهتاب قدس (۱۳۹۰)، گزارش زمین شناسی مسیر حفر تونل انتقال آب چالوس.

Abstract

Depend on the conditions of surrounding ground of tunnel, different methods of maintenance and stability of tunnel could be utilized. In this regard, in the excavated tunnels in near ground surface or grounds with weak geomechanical behavior, use of pre-support methods is inevitable.

In this research work which is accomplished in Chaloos water conveyance tunnel, considering the weak geomechanical behavior of surrounding ground, it is essential the use of pre- supporting methods instead of ensure the stability of tunnel, which based on status of the tunnel, pipe umbrella support and tunnel face reinforcement bolts have been designed.

Instead of improvement of understanding the maintenance and surrounding ground of tunnel behavior as well as determining various parameter of pipe umbrella support, it is necessary to be carried out the numerical modeling. For this purpose FLAC3D software has been used. In the following, based on numerical modeling results, the requisiteness of using the pre- supporting as well as calculation of various parameter of pipe umbrella and bolt reinforcement have been implemented. Investigated parameters are consist of length, lateral spacing, dip and overlapping for pipe umbrella method and the number of bolts per square meter of tunnel face in the bolt reinforcement method.

Current study is based on displacement in the ground surface and tunnel crown. Also, evaluation of safety and stability maintenance has been performed using Sakurai risk assessment method.

Based on obtained results of aforementioned studies, use of pipe umbrella and reinforcement bolt is reasonable planning. According to this study, spacing of reinforcement bolt should be adjust to 0.5 meter. Furthermore using of pipe umbrella with length of 6 meters, 0.5 meter spacing, dip of 5 degrees and 1 meter of overlapping in the tunnel crown has been offered.

Use of pipe umbrella and reinforcement bolt prevent the displacements in the tunnel crown and ground surface up to 70% and 50% respectively. Also displacement could be improved up to 50% in the tunnel face.

Key words: Tunnel, Pipe umbrella and reinforcement bolt support, Numerical modeling, FLAC3D.



University of Shahrood

Faculty of Mining, petrolume and geophysics engineering

**Design Of Tunnel Pre-Support Method Using Numerical Methods -
Case Study: Chaloos Water Conveyance Tunnel**

Rahmat Allah Zaheri

Supervisors:

**Dr. Shokrollah Zare
Dr. Seyed Rahman Torabi**

Advisor:

Abbas Kamali BandPai

September 2015