

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی عمران

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدل‌سازی عددی روش تونل‌سازی NATM مطالعه موردی

طراحی تونل‌های بزرگراه حکیم

نگارنده

مجتبی یزدپور

اساتید راهنما

دکتر رضا نادری

دکتر میثم جلالی

شهریور ۱۳۹۵

با سپاس از سه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

با سپاس فراوان از استادان راهنمای گرامی جناب آقای دکتر رضا نادری و جناب آقای دکتر میثم جلالی که نقش پررنگی در این پژوهش داشتند و قطعاً بدون کمک این عزیزان توفیقی حاصل نمی-گشت.

سپاس و تقدیر از استادان بزرگوار جناب آقای دکتر امیر بذرافشان مقدم و جناب آقای دکتر سیدمهدی توکلی که زحمت داوری پایان نامه اینجانب را عهده دار بودند.

و نیز بر خود لازم می دانم از موسسه‌ی مهندسين مشاور ساحل و همچنين گروه تونل‌های درون شهری سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران تشکر و قدردانی نمایم.

تعهدنامه

اینجانب مجتبی یزدپور دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته عمران- ژئوتکنیک دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه مدل‌سازی عددی روش تونل‌سازی NATM مطالعه‌ی موردی طراحی تونل‌های بزرگراه حکیم تحت راهنمایی جناب آقای دکتر رضا نادری و جناب آقای دکتر میثم جلالی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

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 پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه نیاز به طراحی و ساخت تونل‌های شهری به منظور حمل‌ونقل فراگیر شده‌است. یکی از انواع این تونل‌ها، تونل دوقلو (TwinTunnel) می‌باشد که برکنش تونل‌ها به ازای فواصل مختلف، یکی از چالش‌های پیش روی طراحان می‌باشد. تونل دوقلوی بزرگراه حکیم در تهران به روش NATM حفاری گردیده‌است. در این مقاله، مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم افزار Tunnel Plaxis 3D برای تونل‌های کم عمق انجام شده‌است و چهار مدل که در آنها، فاصله‌ی میان دوتونل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ برابر قطر (عرض) تونل است، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. در مدل‌سازی، کلیه‌ی مراحل اجرایی دیده‌شده و حفاری به صورت مرحله‌ای انجام شده‌است تا اثرات سه‌بعدی نیز در نتایج نمایان باشند. تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌ها و همچنین تنش‌های خاک در نقاط مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد جابه‌جایی کف دو تونل متأثر از فاصله‌ی دو تونل نمی‌باشد. با افزایش فاصله‌ی تونل‌ها از ۱/۵ برابر قطر (عرض) تونل، حفاری تونل دوم تأثیری بر جابه‌جایی‌های تاج تونل اول نداشته‌است و حفاری تونل دوم باعث اضافه تنش در نقطه‌ی وسط پیلار میانی شده‌است که حتی در فاصله‌ی ۲ برابر قطر (عرض) تونل نیز افزایش تنش رخ داده‌است.

کلیدواژه‌ها: تونل دوقلو، NATM، اندرکنش، Plaxis 3D Tunnel.

مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. تحلیل عددی سه بعدی اندرکنش تونل های دوقلو در روش حفاری NATM (مطالعه‌ی موردی تونل بزرگراه حکیم). دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران، ۱۱ تا ۱۴ آبان ماه ۱۳۹۴، هتل المپیک، تهران

۲. تحلیل عددی سه بعدی اندرکنش تونل های دوقلو در حفاری به روش NATM (مطالعه‌ی موردی تونل بزرگراه حکیم). نهمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۵، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

فهرست مطالب

فصل اول: روش‌های رایج در حفاری تونل‌ها	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- حفر تونل به روش کندوپوش	۴
۳-۱- انواع روش کندوپوش	۴
۱-۳-۱- شمع‌های کناری به عنوان دیوار حائل	۵
۲-۳-۱- شمع‌های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون سازه‌ای-ستون‌های میانی	۵
۳-۳-۱- روش کندوپوش (شمع ستون‌های کناری و میانی و سقف درجاریز)	۷
۴-۳-۱- روش کندوپوش (شمع ستون‌های کناری و میانی و سقف پیش‌ساخته)	۱۰
۴-۱- حفر تونل به روش آتشیاری	۱۲
۵-۱- حفر تونل به روش مکانیزه	۱۳
۶-۱- حفاری به کمک ماشین‌های بازویی	۱۲
۱-۶-۱- ویژگی‌های ماشین‌های بازویی	۱۴
۲-۶-۱- اجزای ماشین‌های بازویی	۱۵
۳-۶-۱- سیستم حفاری دستگاه	۱۶
۱-۳-۶-۱- بازو	۱۷

۱۷	..... ۱-۶-۳-۲- سرمته
۱۷	..... ۱-۶-۳-۲-۱- سرمته‌های محوری
۱۸	..... ۱-۶-۳-۲- سرمته‌های عرضی
۱۹	..... ۱-۶-۳-۳- ناخن‌های حفار
۲۰	..... ۱-۷- حفر تونل به وسیله‌ی ماشین‌های تمام مقطع
۲۱	..... ۱-۷-۱- انواع ماشین‌های تمام مقطع
۲۲	..... ۱-۷-۲- مشخصات ماشین‌های تمام مقطع
۲۳	..... ۱-۷-۲-۱- صفحه‌ی حفار
۲۳	..... ۱-۷-۲-۲- تیغه‌های حفاری
۲۴	..... ۱-۷-۲-۳- چنگ‌زن‌ها (کفشک‌های جانبی)
۲۴	..... ۱-۷-۲-۴- جک‌های هیدرولیکی تراست
۲۴	..... ۱-۷-۲-۵- سیستم بارگیری و تخلیه
۲۵	..... ۱-۷-۳- مشخصات عملکرد ماشین تمام مقطع
۲۷	..... فصل دوم: اصول روش NATM در تونل‌سازی
۲۸	..... ۲-۱- مقدمه
۲۸	..... ۲-۲- ویژگی‌های اساسی ناتم
۲۹	..... ۲-۳- اصول کلی ناتم
۳۳	..... ۲-۴- روش اجرای ناتم

۳۶	۵-۲- نتیجه گیری
۳۹	فصل سوم: انواع روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها با تمرکز بر روش‌های عددی
۴۰	۳-۱- مقدمه
۴۰	۳-۲- تحلیل پایداری به روش تحلیلی
۴۰	۳-۳- تحلیل پایداری به روش تجربی
۴۱	۳-۴- تحلیلی پایداری به روش مشاهده‌ای
۴۱	۳-۵- تحلیل پایداری با روش عددی
۴۳	۳-۵-۱- روش‌های اجزای مرزی
۴۴	۳-۵-۲- روش‌های محیطی یا ناحیه‌ای
۴۴	۳-۵-۲-۱- روش اجزای محدود
۴۶	۳-۵-۲-۲- روش اجزای مجزا
۴۷	۳-۵-۲-۳- روش تفاضل محدود
۴۷	۳-۵-۳- روش‌های ترکیبی
۴۸	۳-۶- تحلیل پایداری با روش تحلیل فرم بسته
۵۱	فصل چهارم: نکات کلی مدل‌سازی توسط نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL
۵۲	۴-۱- مقدمه
۵۲	۴-۲- واحدها و علائم قراردادی
۵۴	۴-۳- نکات کلی مدل‌سازی

۵۴	..... ۱-۳-۴ - نقاط
۵۴	..... ۲-۳-۴ - خطوط
۵۴	..... ۳-۳-۴ - کلاستر
۵۵	..... ۴-۳-۴ - صفحات Z
۵۵	..... ۵-۳-۴ - Slices
۵۶	..... ۶-۳-۴ - المان
۵۶	..... ۷-۳-۴ - گره
۵۶	..... ۸-۳-۴ - نقاط تنش
۵۷	..... ۴-۴ - اطلاعات ورودی
۵۸	..... ۵-۴ - وارد کردن اطلاعات
۵۸	..... ۶-۴ - برنامه‌ی ورودی
۵۹	..... ۱-۶-۴ - منوی اصلی
۵۹	..... ۲-۶-۴ - منوی ورودی
۵۹	..... ۳-۶-۴ - نوار ابزار عمومی
۶۰	..... ۴-۶-۴ - نوار ابزار هندسی
۶۰	..... ۵-۶-۴ - خط کش
۶۰	..... ۶-۶-۴ - محیط ترسیم
۶۰	..... ۷-۶-۴ - محورهای مختصات

۶۰	۷-۴- وارد کردن اطلاعات به صورت دستی
۶۵	فصل پنجم: مطالعه‌ی موردی تونل دوقلوی حکیم در محل پارک چیتگر تهران
۶۶	۱-۵- مقدمه
۶۶	۲-۵- پلان و پروفیل مسیر و مقطع هندسی تونل
۶۷	۳-۵- مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک محدوده‌ی پروژه
۶۹	۴-۵- انتخاب روش مناسب حفاری
۷۰	۵-۵- حفاری تونل بر اساس روش انتخاب شده
۷۱	۱-۵-۵- مرحله‌ی اول (Stage 1)
۷۲	۲-۵-۵- مرحله‌ی دوم (Stage 2)
۷۲	۳-۵-۵- مرحله‌ی سوم (Stage 3)
۷۳	۴-۵-۵- مرحله‌ی چهارم (Stage 4)
۷۳	۵-۵-۵- مرحله‌ی پنجم (Stage 5)
۷۳	۶-۵-۵- مرحله‌ی ششم (Stage 6)
۷۴	۷-۵-۵- مرحله‌ی هفتم (Stage 7)
۷۷	۶-۵- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه تونل
۷۷	۷-۵- نتیجه‌گیری سیستم نگهداری اولیه تونل حکیم
۷۹	فصل ششم: طراحی تونل با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL
۸۰	۱-۶- مقدمه

۸۰	۲-۶- قسمت اول
۸۱	۳-۶- مشخصات خاک و لاینینگ اصلی و فرعی در مدل عددی
۸۱	۴-۶- تحلیل مدل عددی ۱ تا ۴
۸۶	۵-۶- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار چهار مدل اول
۸۸	۶-۶- قسمت دوم
۸۹	۷-۶- تحلیل مدل عددی ۵ تا ۸
۹۲	۸-۶- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار در مدل‌های ۵ تا ۸
۹۳	۹-۶- قسمت سوم
۹۳	۱۰-۶- تحلیل مدل عددی ۹ تا ۱۲
۹۹	۱۱-۶- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار در مدل‌های ۹ تا ۱۲
۱۰۰	۱۲-۶- قسمت چهارم
۱۰۶	۱۳-۶- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار در مدل‌های ۱۳ تا ۱۶
۱۰۹	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۱	منابع و مراجع

فهرست اشکال

-
- شکل (۱-۱): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (ترانشه‌باز) ۵
- شکل (۲-۱): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (حالت ب) ۷
- شکل (۳-۱): برش طولی تونل در محل شمع‌های کناری در طرح اجرای تونل به روش کندوپوش (شمع-
درجاریز) ۸
- شکل (۴-۱): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (شمع-ستون‌های کناری و میانی و سقف
درجاریز) ۹
- شکل (۵-۱): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (حالت ت) ۱۱
- شکل (۶-۱): نمونه‌ای از ماشین حفار با سرمته‌ی محوری ۱۸
- شکل (۷-۱): نمونه‌ای از ماشین حفار با سرمته‌ی عرضی ۱۹
- شکل (۸-۱): دستگاه حفار بازویی مجهز به سیستم جت آب ۲۰
- شکل (۹-۱): حفاری بدون سپر، حفاری با سپر معمولی، حفاری با سپر تلسکوپی ۲۱
- شکل (۱-۲): اجرای قاب فولادی و نصب مش به همراه بتن‌پاشی ۳۳
- شکل (۲-۲): لتیس یا قاب‌های فولادی سیستم نگهدارنده ۳۵
- شکل (۳-۲): نصب میل مهار جهت پایدارسازی مقطع تونل (فورپولینگ) ۳۶
- شکل (۱-۴): نمایش سیستم مختصات و جهت اجزای مثبت تنش‌ها ۵۳

- شکل (۲-۴): گره‌ها و نقاط تنش در المان‌های گوه‌ای ۱۵ گره‌ای ۵۷
- شکل (۳-۴): ایجاد مدل سه‌بعدی و مش‌بندی اجزای محدود ۵۸
- شکل (۴-۴): پنجره‌ی اصلی برنامه‌ی ورودی (مد ساخت هندسه‌ی مدل) ۵۹
- شکل (۴-۵): نوارهای ابزار برنامه‌ی PLAXIS 3D TUNNEL ۶۱
- شکل (۴-۶): پنجره Tunnel designer ۶۳
- شکل (۱-۵): پلان تونل دوقلوی حکیم ۶۶
- شکل (۲-۵): پروفیل تونل شمالی ۶۷
- شکل (۳-۵): مقطع هندسی تونل بر مبنای گزارش انتخاب مقطع عرضی تونل ۶۷
- شکل (۴-۵): مقطع عرضی مسیر تونل ۶۸
- شکل (۵-۵): روش‌های مختلف حفاری براساس مقاومت زمین و ابعاد دهانه‌ی تونل ۶۹
- شکل (۶-۵): نمونه‌ی اجرا شده از این مقطع در تونل صدر- نیایش ۶۹
- شکل (۷-۵): نمونه‌ی اجرایی از روش گالری‌های کناری ۷۰
- شکل (۸-۵): مراحل اجرای تونل ۷۰
- شکل (۹-۵): مرحله اول حفاری و تحکیم ۷۱
- شکل (۱۰-۵): مرحله دوم حفاری و تحکیم ۷۲
- شکل (۱۱-۵): مرحله سوم حفاری و تحکیم ۷۲
- شکل (۱۲-۵): مرحله چهارم حفاری و تحکیم ۷۳
- شکل (۱۳-۵): مرحله پنجم حفاری و تحکیم ۷۳

- شکل (۵-۱۴) : مرحله ششم حفاری ۷۴
- شکل (۵-۱۵) : مرحله هفتم حفاری و تحکیم کامل تونل ۷۴
- شکل (۵-۱۶) : مراحل حفاری (نمای پلان) ۷۴
- شکل (۵-۱۷) : حفاری مرحله به مرحله و اجرای فورپولینگ با همپوشانی مناسب لوله ها ۷۵
- شکل (۵-۱۸) : شماتیک اجرای فورپولینگ در مقطع دهانه (سمت راست) و در طول مسیر (سمت چپ) ۷۵
- شکل (۵-۱۹) : شماتیک اجرای فورپولینگ در طول مسیر (پروفیل طولی) ۷۶
- شکل (۵-۲۰) : حفاری و نصب فورپولینگ با جامبو دریل ۷۶
- شکل (۵-۲۱) : نمایی از اجرای S-Pile از بین لتیس گریدرها در هر گام حفاری ۷۷
- شکل (۵-۲۲) : مقطع سیستم نگهداری اولیه دیواره های دائم (سمت چپ) و دیواره های موقت (سمت راست) ۷۸
- شکل (۶-۱) : ابعاد مدل های عددی ۱ تا ۴ ۸۰
- شکل (۶-۲) : کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2 ۸۲
- شکل (۶-۳) : کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی - واحد میلی‌متر ۸۲
- شکل (۶-۴) : نقاط انتخابی برای پایش مقادیر جابه‌جایی ۸۳
- شکل (۶-۵) : نقاط انتخابی برای پایش مقادیر تنش ۸۳
- شکل (۶-۶) : جابه‌جایی نقطه‌ی B برحسب گام‌های محاسباتی (step) در چهار مدل ۸۴
- شکل (۶-۷) : جابه‌جایی نقطه‌ی C در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۸۴

- شکل (۶-۸): جابه‌جایی نقطه‌ی E در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۸۵
- شکل (۶-۹): تنش افقی نقطه‌ی K بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۸۵
- شکل (۶-۱۰): تنش قائم پشت لاینینگ نقطه‌ی G در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل .. ۸۶
- شکل (۶-۱۱): تنش قائم پشت لاینینگ نقطه‌ی L در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۸۶
- شکل (۶-۱۲): ابعاد مدل‌های عددی ۵ تا ۸ ۸۸
- شکل (۶-۱۳): کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2 ۸۹
- شکل (۶-۱۴): کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی - واحد میلی‌متر ۸۹
- شکل (۶-۱۵): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی A بر حسب گام‌های محاسباتی (step) در چهار مدل ۹۰
- شکل (۶-۱۶): جابه‌جایی نقطه‌ی B بر حسب گام‌های محاسباتی (step) در چهار مدل ۹۰
- شکل (۶-۱۷): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۱
- شکل (۶-۱۸): جابه‌جایی نقطه‌ی E در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۱
- شکل (۶-۱۹): تنش قائم نقطه‌ی K بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۲
- شکل (۶-۲۰): ابعاد مدل‌های عددی ۹ تا ۱۲ ۹۳
- شکل (۶-۲۱): کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2 ۹۴
- شکل (۶-۲۲): کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی - واحد میلی‌متر ۹۴
- شکل (۶-۲۳): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی A بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۵
- شکل (۶-۲۴): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی B بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۵
- شکل (۶-۲۵): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۶

- شکل (۶-۲۶): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی E برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۶
- شکل (۶-۲۷): تنش قائم نقطه‌ی G برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۷
- شکل (۶-۲۸): تنش افقی نقطه‌ی I برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۷
- شکل (۶-۲۹): تنش افقی نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۸
- شکل (۶-۳۰): تنش قائم نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۸
- شکل (۶-۳۱): تنش قائم نقطه‌ی L برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۹۹
- شکل (۶-۳۲): ابعاد مدل‌های عددی ۱۳ تا ۱۶ ۱۰۱
- شکل (۶-۳۳): کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2 ۱۰۱
- شکل (۶-۳۴): کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی - واحد میلی‌متر ۱۰۲
- شکل (۶-۳۵): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی A برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۲
- شکل (۶-۳۶): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی B برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۳
- شکل (۶-۳۷): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۳
- شکل (۶-۳۸): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی E برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۴
- شکل (۶-۳۹): تنش قائم نقطه‌ی G برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۴
- شکل (۶-۴۰): تنش افقی نقطه‌ی I برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۵
- شکل (۶-۴۱): تنش افقی نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۵
- شکل (۶-۴۲): تنش قائم نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۶
- شکل (۶-۴۳): تنش قائم نقطه‌ی L برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل ۱۰۶

فهرست جداول

-
- جدول (۱-۱): قابلیت حفاری دستگاه‌های بازویی در سنگ‌های مختلف ۱۵
- جدول (۲-۱): رده‌بندی سنگ‌ها براساس قابلیت حفاری به وسیله‌ی ماشین‌های حفار تمام مقطع ۲۳
- جدول (۱-۳): روش‌های پیشنهادی مناسب برای تحلیل تنش در سنگ در وضعیت‌های مختلف ۴۳
- جدول (۱-۴): واحدهای مورد استفاده در نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel ۵۳
- جدول (۱-۵): مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی ۶۸
- جدول (۲-۵): سیستم نگهداری اولیه تونل چیتگر ۷۸
- جدول (۱-۶): مشخصات خاک در مدل عددی ۸۱
- جدول (۲-۶): مشخصات لاینینگ اصلی و فرعی تونل در مدل هندسی ۸۱

فصل اول

روش‌های رایج در حفاری تونل‌ها

۱-۱- مقدمه

استفاده از فضاهای زیر زمینی از دیرباز مرسوم بوده است و بر همین اساس تونل‌ها جهت استفاده‌های نظامی، معدنکاری، آبرسانی، جاده‌سازی و راه‌آهن ساخته شده‌اند. حفر تونل و دیگر فضاهای زیرزمینی همگی در اصول مشابهت دارند و عمده تفاوت آنها در شکل و اندازه‌ی دهانه-ی آنها و تنش متناظر در سنگ‌های اطراف می‌باشد. از جمله نکات بسیار حائز اهمیت موضوع تکیه‌گاه فضاهای زیرزمینی است که می‌بایستی به آن توجه گردد. به طور کلی دو وضعیت اساسی در زمین وجود دارد، زمین نرم که تکیه‌گاه پیوسته لازم دارد و زمین سخت که در آن سنگ می‌تواند تا استقرار تکیه‌گاه کمکی بار را تحمل کند. به طور کلی روش‌های حفاری را می‌توان به دو نوع اصلی تقسیم‌بندی نمود. یکی از روش‌های سنتی که شامل مته‌کاری و آتشباری جهت شکافتن سنگ می‌باشد، دیگر روش‌های حفاری و گودبرداری پیوسته که در آن سنگ را با ماشین گودبرداری می‌کنند. روش اخیر خود به دو نوع تقسیم می‌شود، یکی روش‌های سپری که در آن سپری را به طرف سینه‌کار می‌رانند و یک تکیه‌گاه پیوسته برای سقف ایجاد می‌کنند و دیگری روش‌های حفاری که در آن ماشین حفاری سینه‌کار را می‌شکافد. به هر صورت انتخاب روش تونل‌زنی به مقاومت و ویژگی‌های توده‌سنگ بستگی دارد. به طور خلاصه روش‌های حفاری به یکی از اشکال ذیل می‌باشد:

۱. حفر تونل به روش کند و پوش^۱

۲. حفر تونل به روش آتشباری

۳. حفر تونل توسط ماشین‌های بازویی^۲

۴. حفر تونل توسط ماشین‌های تمام مقطع^۱

^۱ Cut and Cover

^۲ Road Header

هریک از روش‌های مذکور بسته به شرایط مورفولوژیکی، زمین‌شناختی، مقاومت و سختی سنگ‌ها، طول تونل، بودجه‌ی در نظر گرفته شده برای پروژه، نیروی انسانی متخصص و زمان-بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به اندازه‌ی سطح مقطع فضای زیرزمینی حفاری به صورت چند مقطعی یا تمام مقطع انجام می‌گردد. به طور کلی دلایل اجرای حفاری به صورت چند مقطعی به عوامل ذیل ارتباط دارد.

۱. بزرگ بودن سطح مقطع فضای زیرزمینی (گالری، نیروگاه‌ها، تونل‌های بزرگ مقطع)

۲. کنترل انرژی حاصل از انفجار (در صورتی که روش حفاری آتشیاری باشد)

۳. شرایط ناپایدار زمین‌شناسی (لیتولوژی، آبداری، هوازدگی)

در اکثر پروژه‌هایی که به صورت چند مقطعی حفاری می‌گردند، اجرای فضا به صورت سکوی بالایی-پایینی انجام می‌گردد. بدین صورت که در ابتدا قسمت بالایی مقطع و در نهایت سکوی پایینی حفاری می‌شود، همچنین ممکن است مقطع مورد نظر به چند مقطع کوچک‌تر تقسیم و حفاری شده و در نهایت با یکی کردن آنها به سطح مقطع مورد نظر دست پیدا کرد. به هر حال در عملیات زیرزمینی موضوع مقاومت سنگ و ویژگی توده‌ی سنگ قابل توجه است. عامل کنترل کننده روش‌های ساخت تونل موضوع زمین‌شناسی مهندسی و زمین‌شناسی محل اجرای پروژه است. در بسیاری از موارد وضعیت زمین‌شناسی در طول مسیر تونل تغییر می‌کند و استفاده از چندین روش لازم است. نهایتاً آنچه در این مقدمه لازم به ذکر می‌باشد این است که، کلیه فضاهای زیرزمینی به نوعی پروژه‌های مهندسی هستند و اهداف کاربردی ویژه‌ای دارند و موضوع اقتصاد هم در طراحی آن باید لحاظ شود. بدین منظور لازم است حفاری طوری انجام شود که فقط سنگ واقع در مقطع در نظر گرفته شده برداشته گردد و از آسیب رسیدن به نقاط اطراف، حتی المقدور جلوگیری شود. البته در جاهایی به علت تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی

¹ Tunnel Boring Machine (TBM)

نظیر گسل‌ها، لایه‌بندی‌ها و گسستگی‌ها از چنین اتفاقاتی گریزی نیست. اگر حفاری به روش سنتی انجام شود، موضوع برداشت زیادتر از مقطع مطرح می‌باشد، ولی چنانچه ماشین حفاری (TBM) بکار برده شود کنترل بیشتری بر مقطع مورد نظر اعمال می‌شود و مشکلات فوق‌الذکر کمتر پیش می‌آید.

۱-۲- حفار تونل به روش کندوپوش

به منظور احداث تونل‌های کم عمق، می‌توان ترانشه‌ای با ابعاد مناسب حفاری کرد، به گونه‌ای که تراز کف ترانشه در تراز کف تونل باشد و پس از نصب تاسیسات مناسب و دیوارسازی روی آن را تا سطح اولیه، خاک‌ریزی نمود. اجرای حفاری به این صورت بیشتر برای تونل‌های مترو، تونل‌های زیر سطح ایستایی و دهانه‌های تونل‌های مناطق کوهستانی مرسوم می‌باشد. لازم به ذکر است در مناطق شهری اجرای تونل به روش کندوپوش در صورت نیاز به جابه‌جایی شبکه‌های آب، فاضلاب، برق، گاز و تلفن مشکلاتی را به همراه خواهد داشت، این گونه محدودیت‌ها باعث افزایش هزینه و کاهش روند پیشروی می‌باشد. بر همین اساس در پاره‌ای از موارد حفاری تونل به صورت زیرزمینی، با صرفه‌تر از روش فوق است. به عنوان مثال در پروژه‌ی متروی اصفهان، حفاری قطعه‌ی شمالی به دلیل عدم تراکم بافت شهری و فاصله‌داری از مرکز شهر به روش کندوپوش، حفاری قطعه‌ی میانی توسط ماشین تمام مقطع (TBM) و حفاری قطعه‌ی جنوبی توسط ماشین‌های بازویی انجام گردد.

۱-۳- انواع روش کندوپوش :

۱-۳-۱- شمع‌های کناری به عنوان دیوار حائل خاک

۱-۳-۲- شمع‌های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون سازه‌ای-ستون‌های میانی

۱-۳-۳- روش کندوپوش (شمع ستون‌های کناری و میانی و سقف درجاریز)

۱-۳-۴- روش کندوپوش (شمع ستون‌های کناری و میانی و سقف پیش‌ساخته)

۱-۳-۵- روش کندوپوش (شمع‌های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون سازه‌ای-شمع-

های درجاریز بتنی)

۱-۳-۱- شمع‌های کناری به عنوان دیوار حائل خاک:

مراحل اجرا:

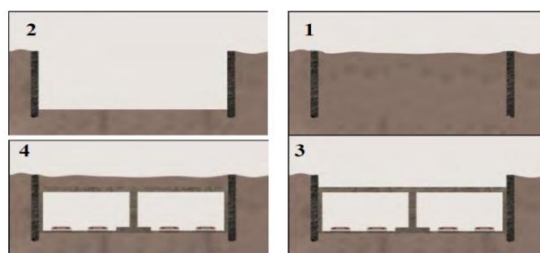
۱. اجرای شمع‌های کناری درجاریز دو طرف تونل به عنوان دیوار حائل خاک در مقابل فشار

جانبی محرک

۲. خاکبرداری تا تراز کف تونل

۳. اجرای باکس تونل متشکل از دال کف، ستون میانی، دیوارهای کناری و سقف تونل

۴. خاکریزی روی سطح تونل تا رسیدن به تراز خیابان



شکل (۱-۱): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (ترانشه‌باز)

۱-۳-۲- شمع‌های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون سازه‌ای-ستون‌های

میانی:

در این طرح برای تأمین باربری مورد نیاز شمع‌ها و کاهش عمق مدفون، مقطع شمع در انتهای آن بزرگتر و به صورت پافیلی فرض شده و ابعاد آن براساس مشخصات مقاومتی خاک نوک شمع طراحی می‌گردد.

اجرای پافیلی شمع با وجود دشواری، باعث کاهش طول شمع و توجیه فنی و اقتصادی است. مراحل اجرا در این حالت و داشتن تیرهای پیش‌ساخته سقف به شرح زیر می‌باشد:

۱. خاکبرداری سطح زمین تا تراز سر شمع

۲. اجرای شمع‌ها و سر شمع‌های کناری

۳. خاکبرداری جلوی شمع‌های کناری به صورت پله‌ای تا رسیدن به تراز زیر پی ستون میانی

۴. اجرای پی و ستون میانی

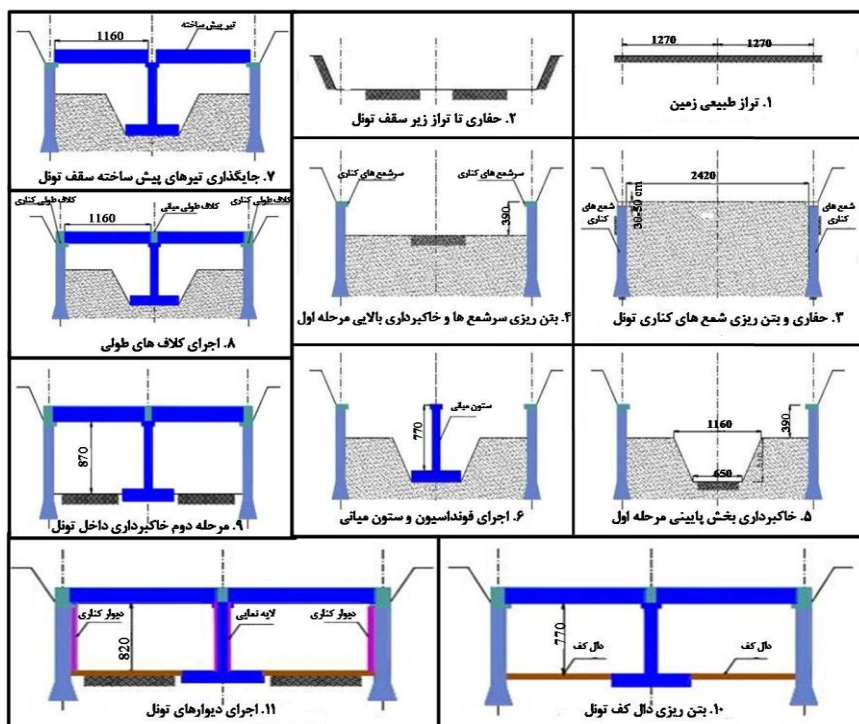
۵. نصب تیرهای پیش‌ساخته

۶. اجرای دال سقف و کلاف‌های کناری و میانی

۷. تکمیل خاکبرداری داخل تونل

۸. اجرای دال کف تونل

۹. اجرای دیوار نمایی



شکل (۱-۲): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (حالت ب)

مزایا:

سهولت خاکبرداری و حفاری در فضای باز، امکان استفاده از تهویه و نور طبیعی، دقت در اجرای ستون میانی که باعث نمای نهایی مطلوب‌تر می‌شود.

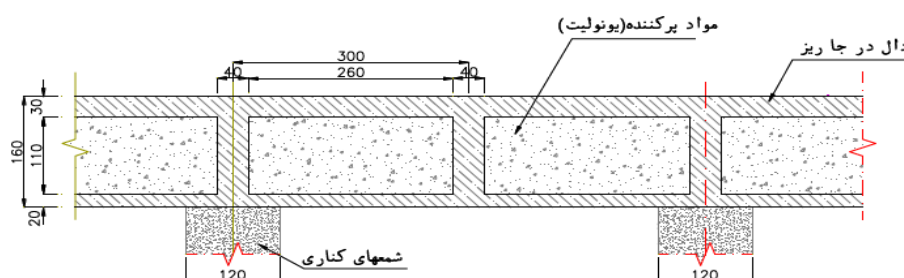
معایب:

اجرای آن در محیط‌های شهری عملاً غیراقتصادی و غیرممکن است، با خاکبرداری جلوی شمع‌ها قبل از تکمیل قاب‌های سازه‌ای تونل، احتمال تغییر شکل در بالای گود و شمع‌های کناری وجود دارد.

۱-۳-۳- روش کندوپوش (شمع ستون‌های کناری و میانی و سقف درجاریز)

در این روش بعد از اجرای شمع‌های کناری و میانی به صورت درجا سقف تونل اجرا و سپس خاکبرداری صورت می‌گیرد. سازه‌ی دال سقف عملاً باکس‌های بتنی مجاور هم است که ضخامت دال تحتانی ۲۰ و فوقانی ۳۰ سانتی‌متر بوده که معیار تعیین‌کننده برای دال فوقانی

ملاحظات سازه‌ای و ضخامت دال تحتانی عملاً ملاحظات اجرایی و معماری بوده ضخامت جان بتنی ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع نهایی سقف سازه‌ای معادل ۱۶۰ سانتی‌متر برای روباره‌ی زیر ۳ متر و ۱۸۰ سانتی‌متر برای روباره‌ی بین ۳ تا ۴ متر می‌باشد. بخش تحتانی روی بستری که با بتن مگر تسطیح شده، اجرا می‌گردد و پس از آن فضای بین تیرهای عرضی با ماده‌ی پرکننده یونولیت که به عنوان قالب بتن بخش فوقانی پر می‌گردد. سپس بخش فوقانی و تیرهای عرضی سقف تونل اجرا می‌گردد.

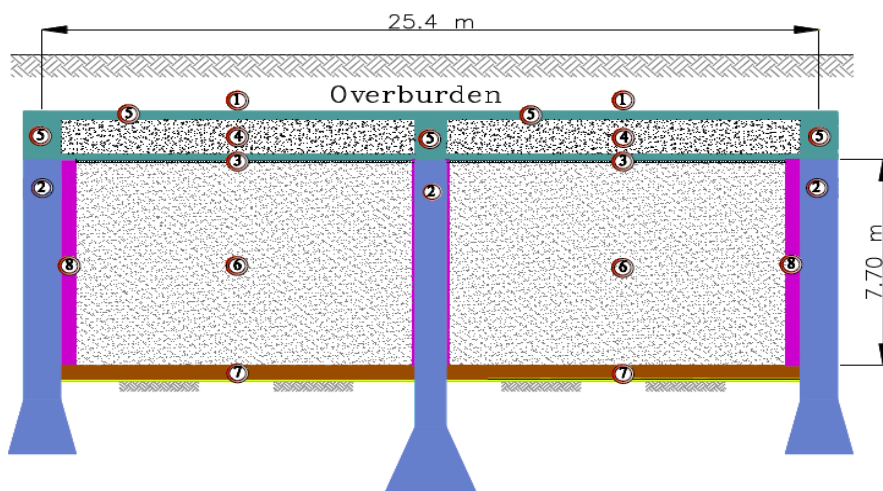


شکل (۱-۳): برش طولی تونل در محل شمع‌های کناری در طرح اجرای تونل به روش کندوپوش (شمع-ستون‌های کناری و میانی و سقف درجاریز)

روش اجرا به ترتیب :

۱. خاکبرداری سطح زمین تا تراز سر شمع
۲. اجرای شمع‌های کناری میانی
۳. اجرای دال تحتانی سقف
۴. اجرای پرکننده (یونولیت گذاری) فضای خالی سقف
۵. اجرای دال ۳۰ سانتی‌متری بخش فوقانی به همراه کلاف‌های طولی و عرضی بتنی
۶. خاکبرداری داخل تونل
۷. اجرای دال کف

۸. اجرای دیوار نمای کناری



شکل (۱-۴): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (شمع-ستون‌های کناری و میانی و سقف درجاریز)

مزایا :

- تسریع در انحراف معارضین مدفون و ترافیکی از روی سقف احداث شده در تقاطع‌ها و تداخل کمتر در جریان ترافیک تقاطع‌ها با توجه به فضای محدود تقاطع‌ها اشاره کرد.

- ایجاد دسترسی محلی برای ورود ماشین‌آلات کارگاهی برای حمل و نصب تیرهای پیش-ساخته

- ایجاد چند جبهه‌ی کاری برای کارگاه به موازات اجرای دال درجا روی تیرهای پیش-ساخته

- عدم نیاز به قالب‌بندی شمع-ستون‌های میانی با توجه به درجاریز بودن

- تغییر شکل‌های کمتر در زمین‌های مجاور

معایب :

هزینه‌ی بالا، دقت کم در اجرای شمع‌های میانی، سرعت کم، خاکبرداری و اجرای دال کف و دیوار در فضای بسته‌ی تونل می‌باشد.

۱-۳-۴- روش کندوپوش (شمع ستون‌های کناری و میانی و سقف پیش‌ساخته)

این طرح مطابق روش قبلی بوده تنها تفاوت در این است که تیرهای عرضی به صورت پیش-ساخته (I شکل) با عرض بال‌های ۵۵ سانتی‌متر طراحی شده که در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها به دلیل افزایش برش ضخامت جان افزایش می‌یابد.

روش اجرا به ترتیب :

۱. خاکبرداری سطح زمین تا تراز سر شمع

۲. اجرای شمع‌های کناری و میانی

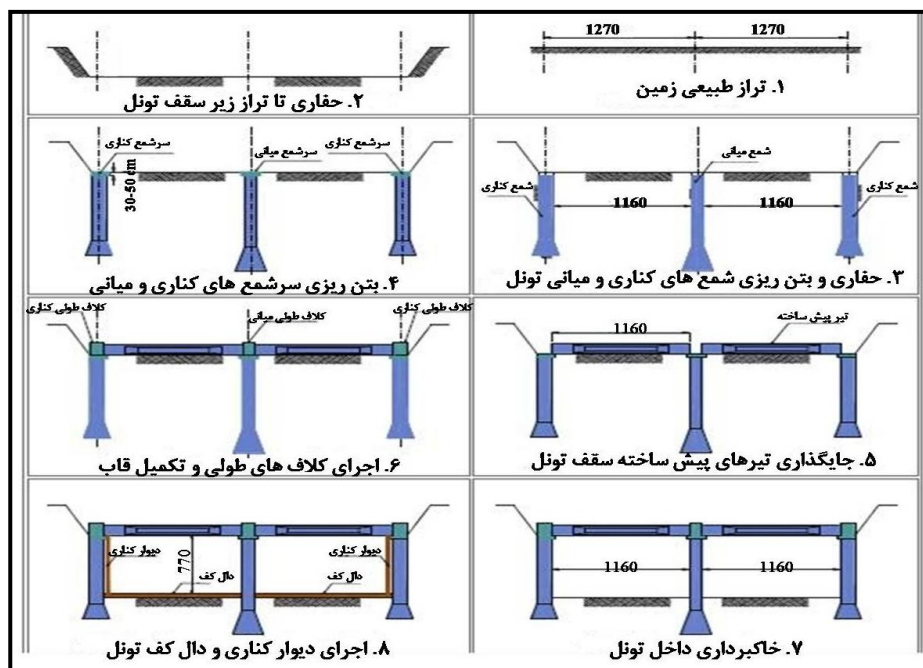
۳. اجرای سر شمع‌های کناری و میانی

۴. نصب تیرهای پیش‌ساخته

۵. اجرای کلاف‌های طولی کناری و میانی سقف

۶. نصب ورق‌های فولادی کنگره‌ای به عنوان قالب در جای سقف

۷. بتن‌ریزی نهایی سقف و دیگر عملیات تونل‌سازی



شکل (۱-۵): شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کندوپوش (حالت ت)

مزایا:

امکان خاکبرداری داخل تونل با نور و تهویه طبیعی با در نظر گرفتن بازشوهای سراسری موقت کناری (کامل نپوشاندن سقف) و استفاده از آن جهت عملیات اجرایی داخل تونل، سرعت اجرای بالا، هزینه‌ی پایین، سهولت اجرا، سازگاری مناسب با معارضین، عملکرد مناسب سازه‌ای

معایب:

تنها نکته‌ی این روش دقت پائین در اجرای شمع‌های میانی است که به صورت درجاریز اجرا می‌شود و دقت خاصی با توجه به نمایان شدن آن می‌طلبد. تونل‌های کندوپوش عموماً در اعماق کمی از خاک احداث می‌شوند، جایی که تغییر شکل‌های لرزه‌ای زمین و شدت لرزش به دلیل صلبیت کمتر خاک و اثر تقویتی ساختگاه، بزرگ‌تر از مکان‌های عمیق‌تر است. اطلاعات مربوط به کارائی تونل‌های قدیمی نشان می‌دهند که، تونل‌هایی که در محیطی با روبراه‌ی کم ضخامت ساخته شده‌اند، نسبت به سازه‌هایی که در عمق بیشتری ساخته شده‌اند، آسیب‌پذیرتر هستند. از سوی دیگر، با توجه به قرارگیری کشور ایران بر روی کمربند زلزله‌خیز آلپ- هیمالیا

و سابقه‌ی لرزه‌خیزی فلات ایران، بی‌تردید احداث چنین سازه‌هایی نیازمند تدابیر خاص طراحی است.

۱-۴- حفر تونل به روش آتشیاری

براساس نوع پروژه و کاربری آن، تونل‌ها به دسته‌های مختلفی از جمله ارتباطی، خدماتی، معادن، انتقال آب و غیره تقسیم‌بندی می‌شوند. اصولاً زمان پابرجایی^۱ تونل‌ها در سازندهای سخت و پایدار زمین‌شناسی نسبت به سازندهای ضعیف بالاتر می‌باشد. به هر حال براساس شرایط مورفولوژیکی محل احداث پروژه، ناگزیر به حفر تونل در توده‌سنگ‌هایی با مقاومت و پایداری متفاوتی می‌باشیم. در بسیاری از پروژه‌های زیرزمینی به منظور بالا بردن ضریب ایمنی و افزایش راندمان و همچنین صرفه‌جویی در هزینه و زمان، از عملیات آتشیاری استفاده می‌گردد. در این شرایط حفاری به روش آتشیاری بایستی به نحوی اجرا شود که، کمترین میزان تغییر شکل ناشی از حفاری در توده‌سنگ‌های دربرگیرنده پدید آید. با توجه به اینکه شرایط زمین‌شناسی می‌تواند عامل تأثیرگذار در پایداری و حفاری فضای زیرزمینی باشد، لذا لازم است بررسی‌های زمین‌شناسی به گونه‌ای باشد که براساس آنها بتوان برش قائم مناسب و صحیحی را ترسیم نمود، به گونه‌ای که تغییر لایه‌های زیرسطحی به بهترین نحوی نمایش داده شود. براساس نیمرخ تهیه شده می‌توان لایه‌های زیرسطحی را به دقت شناسایی و مناطق مختلف را از یکدیگر تفکیک نمود.

به طور کلی چنانچه آتشیاری با طراحی مناسب انجام نگیرد و شرایط زمین‌شناسی عادی نباشد، ممکن است نتیجه‌ی آن قطعات بزرگ سنگی و یا درصد زیادی خرده‌های بسیار ریز سنگی باشد، که هر دو حالت نامناسب است. در مقابل اگر آتشیاری با طراحی مناسب انجام شود، قطعات حاصله دارای اندازه و شکل مناسب بوده که به لحاظ بارگیری و حمل، آسان بوده

^۱ Stand up time

و نیاز به سنگ شکن در کارگاه نمی‌باشد. بدین لحاظ لازم است که متناسب با شرایط زمین-شناسی و ابعاد تونل، طرح آتشیاری مناسب ارائه گردد. حال به طور کلی می‌توان مراحل حفر (چرخه‌ی حفاری) تونل به روش آتشیاری را به صورت ذیل تقسیم‌بندی نمود.

۱. آرایش، حفر، خرج‌گذاری و عملیات انفجار چال‌ها

۲. تهویه و تخلیه‌ی خرده‌سنگ‌های ناشی از عملیات آتشیاری

۳. لق‌گیری قطعات ناپایدار از دیواره‌ها و سقف

۴. نصب سیستم نگهدارنده‌ی موقت

۵. نصب سیستم نگهدارنده‌ی دائمی و اجرای تاسیسات مورد نیاز

۱-۵- حفر تونل به روش مکانیزه

امروزه اغلب حفاری‌های سازه‌های زیرزمینی توسط وسایل مکانیکی و به روش مکانیزه انجام می‌شود. استفاده از روش مکانیزه به جای روش سنتی علاوه بر شرایط اقتصادی بهتر، باعث افزایش سرعت پیشروی، کاهش میزان پیش‌شکستگی^۱ در توده‌سنگ‌های دربرگیرنده، کاهش نیروی انسانی و کاهش زمان اجرای پروژه می‌گردد. بر همین اساس ماشین‌های حفار بازویی و انواع ماشین‌های تمام مقطع به صورت گسترده‌ای توسعه یافته‌اند، که ذیلاً به توضیحاتی اجمالی در مورد هر یک از آنها پرداخته می‌گردد.

۱-۶- حفاری به کمک ماشین‌های بازویی

ماشین‌های بازویی به صورت یک یا چند بازویی، در اشکال و اندازه‌های مختلف، جهت اجرای حفاری تونل‌های کوچک و بزرگ، گالری‌ها، چاه‌ها، شفت‌ها، ادیت‌ها و دیگر فضاها، زیرزمینی

¹ Over break

به صورت تمام مقطع یا نیم مقطع مورد استفاده قرار می‌گیرد. سطح مقطع این ماشین‌ها کوچک‌تر از سطح مقطع فضای زیرزمینی می‌باشد و با جابه‌جا کردن آن در نقاط مختلف مقطع حفاری امکان‌پذیر می‌شود.

این دستگاه‌ها از سال ۱۹۴۰ میلادی جهت حفاری مورد استفاده قرار گرفت. ماشین‌های اولیه دارای وزنی کمتر از ۲۵ تن بوده و حتی در سنگ‌هایی با مقاومت متوسط نیز کارایی چندانی نداشت، اما به دلیل قابلیت بالای آنها برای حفر تونل با اشکال مختلف، به سرعت توسط شرکت‌های مرتبط در این زمینه توسعه یافت. در حال حاضر توسط این دستگاه می‌توان تونل‌هایی با سطح مقطع بیش از ۶۰ مترمربع را نیز حفاری نمود. حفاری توسط دستگاه‌های بازویی در توده‌سنگ‌ها به وسیله ناپیوستگی‌های ساختاری نظیر لایه‌بندی، درزه، گسل، شیبستویته و غیره کنترل می‌گردد، این در حالی است که اگر توده‌ی سنگ دارای ناپیوستگی بسیار کم و در اصطلاح حالت توده‌ای داشته باشد، این خواص ماده‌ی سنگ است که نقش مهم‌تری را در کنترل عملکرد ماشین ایفا خواهد نمود. در هر پروژه بسته به شرایط لیتولوژیکی و ساختارهای زمین‌شناسی و بر پایه‌ی نتایج آزمایشات مقاومتی توده‌سنگ دستگاه حفاری طراحی می‌گردد. به طور کلی می‌توان چرخه‌ی حفاری تونل توسط ماشین‌های بازویی را به صورت ذیل تقسیم‌بندی نمود:

۱. حفاری

۲. تخلیه‌ی نخاله‌های حاصل از حفاری

۳. اجرای سیستم نگهدارنده

۱-۶-۱- ویژگی‌های ماشین‌های بازویی

ماشین‌های بازویی توانایی حفاری در سنگ‌هایی با مقاومت تراکمی تک محوری ۶۰-۱۰۰ مگاپاسکال را دارند، ولیکن در بعضی از انواع بسیار قوی آن، توانایی حفاری در سنگ‌هایی با مقاومت ۱۵۰-۲۰۰ مگاپاسکال نیز وجود دارد. این ویژگی‌ها به اندازه‌ی سرمته‌ها، قدرت دستگاه و نیروی وارده از طرف بازوی سرمته بستگی دارد. از دستگاه‌های بازویی می‌توان برای حفاری سنگ‌هایی با مقاومت تراکمی تک محوری مختلف استفاده نمود (جدول شماره‌ی ۱-۱). با توجه به قابلیت دستگاه‌های بازویی می‌توان بیان نمود که حفاری توسط این دستگاه در زمین‌های نرم و نیمه‌سخت با سرعت پیشروی زیاد امکان‌پذیر می‌باشد، همچنین به دلیل کوچک بودن دستگاه نسبت به ماشین‌های تمام مقطع، حفاری تونل به صورت پله‌ای امکان‌پذیر است.

جدول شماره‌ی (۱-۱): قابلیت حفاری دستگاه‌های بازویی در سنگ‌های مختلف [۱]

نوع دستگاه	قابلیت حفاری
دستگاه‌های سبک	توانایی حفاری در سنگ‌های با مقاومت تک محوری حداکثر ۸۰ مگاپاسکال را دارا می‌باشد و در صورت حفاری در سنگ‌هایی با مقاومت بیشتر، امکان بروز مشکلات وجود دارد.
دستگاه‌های سنگین	به آسانی در سنگ‌هایی با مقاومت تراکمی تک محوری ۱۰۰ مگاپاسکال حفاری می‌نماید. نوعی از دستگاه مدل (RH-90) توانسته است ماسه‌سنگ متراکم با مقاومت تراکمی تک محوری ۲۰۰ مگاپاسکال را حفر کند.

از جمله عوامل تعیین‌کننده در قدرت دستگاه، وزن آن می‌باشد، به گونه‌ای که دستگاه‌های کوچک و متوسط با وزن ۸۰-۲۰ تن، قدرت سرمته آنها معادل ۱۰۰-۳۰ کیلووات و توان نهایی و کلی ۶۵۰-۸۰ و دستگاه‌های بزرگ با وزن بیش از ۹۰ تن، قدرت سرمته آنها بیش از ۲۲۵ کیلووات می‌باشد. [۲]

۱-۶-۲- اجزای ماشین‌های بازویی

در ادامه مهم‌ترین اجزای ماشین‌های بازویی تشریح گردیده است:

۱. بدنه‌ی دستگاه

که شامل سیستم حرکتی چرخ زنجیری^۱ و اجزای زیرین^۲ می‌باشد.

۲. اتاق اپراتور^۳

این اتاقک در انتهای بازوی دستگاه به گونه‌ای قرار گرفته است که، ایمنی اپراتور تأمین شود و در حین حفاری، قطعات و خرده‌سنگ‌ها به اپراتور برخورد نکنند.

۳. موتور دستگاه

موتور بازویی از قطعات الکتریکی و هیدرولیکی تشکیل شده است. براساس نوع دستگاه، قدرت و توان دستگاه بین ۸۰ تا ۶۲۵ کیلووات متغیر می‌باشد.

۴. سیستم بارگیری^۴ و تخلیه^۵

یکی از مهمترین مزایای دستگاه‌های بازویی، دارا بودن سیستم بارگیری، تخلیه‌ی مواد و نخاله‌های حاصل از حفاری می‌باشد. این سیستم از یک سینی که اصولاً در زیر سرمته قرار گرفته به همراه نوار نقاله، جهت تخلیه‌ی نخاله‌ها تشکیل شده است. در بعضی از ماشین‌های بازویی به منظور بارگیری مواد حاصل از حفاری توسط سینی، از دو بازوی گاز انبری، یا یک صفحه‌ی پرده‌دار دوار و یا دو صفحه‌ی ستاره‌وار، که در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند، استفاده می‌گردد.

۱-۶-۳- سیستم حفاری دستگاه

سیستم حفاری دستگاه شامل بازو، سرمته^۶ و ناخن‌های حفار^۱ می‌باشد.

¹ Crawler Track Assembly

² Base frame

³ Operator's Cab

⁴ Loading device

⁵ Chain Conveyor

⁶ Cutter Head

۱-۳-۶-۱- بازو

از مهمترین قسمت‌های دستگاه، بازوی حفاری می‌باشد، که معمولاً به صورت تکی است. ولی در بعضی از ماشین‌ها، به صورت دو یا چندتایی نیز طراحی گردیده‌است. حرکت این بازو، در امتداد افقی و عمودی می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که، در بعضی از انواع بازویی‌ها، این بازوها حالت تلسکوپی نیز از خود نشان می‌دهند.

۱-۳-۶-۲- سرمته

سرمته‌ها بسته به وضعیت زمین‌شناسی و لیتولوژیکی پروژه، در سایزهای مختلف طراحی می‌گردند و از لحاظ محور دوران و چرخش به دو گروه تقسیم می‌شوند.

۱-۳-۶-۱-۲-۱- سرمته‌های محوری^۲

در بعضی از ماشین‌های بازویی، سرمته دارای حرکتی محوری به موازات محور بازوی دستگاه می‌باشد. در این حالت سرمته، مخروطی شکل بوده و براساس نوع دستگاه، قطری بین ۵۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر دارد (شکل شماره ۱-۶). به منظور جلوگیری از سرخوردن و واژگونی دستگاه در اثر نیروی عکس‌العمل ناشی از دوران سرمته و حفاری، می‌بایستی ماشین، دارای وزنی متناسب با نیروی ایجاد شده، داشته باشد. همچنین در جهت عرضی نیز توسط جک‌های مخصوصی مهار گردد. نسبت وزن به توان اعمالی در این نوع از ماشین‌های بازویی، بین ۰/۱۵ تا ۰/۱۳ کیلووات بر تن می‌باشد. روش حفاری توسط سرمته‌های محوری، به دلیل موازی بودن محور دوران سرمته با امتداد محور بازو و مخروطی شکل بودن آنها، بدین گونه است که، به صورت تدریجی سرمته‌ی دستگاه وارد سنگ شده و با ایجاد مخروطی حفاری در آن محل، ادامه می‌یابد. در ادامه با انجام این عمل در نقاط مختلف مقطع حفاری انجام می‌گردد. به این

^۱ Cutter picks

^۲ Axial Cutter head

شیوه‌ی حفاری اصطلاحاً پودر کردن^۱ می‌گویند. این روش نسبت به روش حفاری با سرمته‌های عرضی، نیاز به زمان کمتری جهت حفر تونل در سنگ‌های سخت دارد.



شکل شماره‌ی (۱-۶): نمونه‌ای از ماشین حفار با سرمته‌ی محوری

۱-۶-۳-۲- سرمته‌های عرضی

در دستگاه‌هایی که دارای سرمته‌های عرضی می‌باشند، سرمته‌ها استوانه‌ای شکل بوده و محور حرکت آنها، عمود بر محور امتداد بازوی دستگاه است (شکل شماره‌ی ۱-۷). در این حالت نیروی واکنش تولید شده ناشی از حفاری، توسط وزن دستگاه خنثی می‌گردد و نیاز به مهار کردن جانبی نمی‌باشد. لازم به ذکر است که نسبت وزن به توان اعمالی این نوع بازویی‌ها، بین ۰/۳ تا ۰/۶ کیلووات بر تن می‌باشد. روش حفاری توسط این نوع از سرمته‌ها به نام تراشه کردن^۲ گفته می‌شود و به دلیل استوانه‌ای بودن سرمته‌های این نوع بازویی، شیوه‌ی حفاری به صورت پیوسته بوده و عمدتاً برای حفاری سنگ‌های نرم و سست استفاده می‌شود. همچنین از این دستگاه برای حفر ترانشه‌ها و گودال نیز می‌توان استفاده نمود.

¹ Milling
² Ripping



شکل شماره‌ی (۱-۷): نمونه‌ای از ماشین حفار با سرمته‌ی عرضی

۱-۶-۳-۳- ناخن‌های حفار^۱

از مهمترین قسمت سیستم حفاری، ناخن‌های حفاری (بیت‌ها) می‌باشد. از نظر شکل، بیت‌ها به ۳ گروه با تماس نقطه‌ای^۲، شعاعی وسیع^۳ و خمیده^۴ تقسیم‌بندی می‌شوند. در مقایسه‌ی انواع بیت‌های مذکور لازم به ذکر است که، بیت‌های با تماس نقطه‌ای دارای استحکام و مقاومت بالاتر، بیت‌های شعاعی وسیع باعث بالا بودن راندمان حفاری، پایین بودن میزان گردوغبار و همچنین جهت حفاری سنگ‌های سخت و بیت‌های خمیده نیروی رانش محوری بیشتری را به سنگ مقطع حفاری وارد می‌نماید. به منظور جلوگیری از سایش بیت‌ها و جلوگیری از گردوغبار در بعضی از انواع ماشین‌های بازویی، از جت آب^۵ استفاده می‌شود، که این فرآیند باعث افزایش راندمان حفاری و کاهش انرژی مصرفی می‌گردد (شکل شماره‌ی ۱-۸)

¹ Cutter Picks

² Point Attack Picks

³ Large Radial Picks

⁴ Forward attack Picks

⁵ High Pressure water jet



شکل شماره ۱ (۸-۱): دستگاه حفار بازویی مجهز به سیستم جت آب

۱-۷- حفار تونل به وسیله‌ی ماشین‌های تمام مقطع

گسترش روزافزون پروژه‌های زیرزمینی (از قبیل تونل‌های انتقال آب و نیروگاه‌های برق آبی) و اجرای سریع آنها، بیش از پیش توجه به حفاری توسط ماشین‌های تمام مقطع را به خود جلب نموده است. این روش در مقایسه با روش‌های ارائه شده‌ی قبلی، اغلب سریع‌تر و کارآمدتر می‌باشد. تونل بیامونت^۱ اولین تونلی است که به روش مکانیزه و به کمک دستگاه تمام مقطع، در سال‌های ۱۸۸۱ تا ۱۸۸۲ میلادی در لایه‌های مارن گچی حفاری گردید. [۱] اجرای این تونل با قطر ۲/۱۳ متر و سرعت پیشروی ۳۰ تا ۶۰ متر در هفته انقلاب بزرگی در حفاری سازه‌های زیرزمینی ایجاد کرد و پس از آن تا زمان حاضر، تعداد زیادی از پروژه‌ها به کمک ماشین‌های تمام مقطع حفاری گردیده‌اند. در طول این زمان، ماشین‌های تمام مقطع به سرعت پیشرفت نمود. به گونه‌ای که امروزه، این واقعیت وجود دارد که به کمک این ماشین می‌توان بیش از ۱۵۰ متر در روز، ۵۰۰ متر در هفته، ۲ کیلومتر در ماه و حتی ۱۵ کیلومتر در سال پیشروی نمود. [۳] به طور کلی مهم‌ترین مزایای حفاری توسط ماشین تمام مقطع نسبت به سایر روش‌های حفاری را، می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱. بیشترین نرخ پیشرفت و حفاری بدون توقف

¹ Beaumont

۲. کاهش صدمات و آسیب به سنگ و کاهش سیستم نگهدارنده‌ی مورد نیاز

۳. بالا بودن ضریب ایمنی

۴. توانایی کنترل از راه دور و اتوماتیک

۱-۷-۱- انواع ماشین‌های تمام مقطع

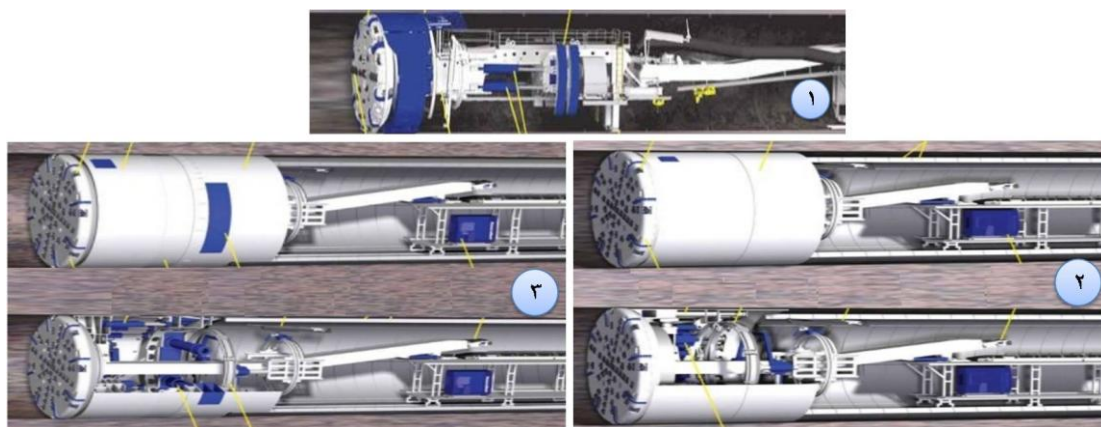
به طور کلی می‌توان انواع ماشین‌های تمام مقطع را به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

۱. ماشین‌های حفار بدون سپر^۱ (مناسب جهت حفاری در سنگ‌های سالم و بدون درز و شکاف)

۲. ماشین‌های حفار سپری (مناسب جهت حفاری در سنگ‌های ضعیف و درزه‌دار و یا خاک)

۱-۲. ماشین‌های حفار با سپر معمولی^۲

۲-۲. ماشین‌های حفار با سپر تلسکوپی^۳



شکل شماره‌ی (۹-۱): تصاویر به ترتیب شماره؛ حفاری بدون سپر، حفاری با سپر معمولی، حفاری با سپر تلسکوپی

^۱ Open TBM

^۲ Single Shield

^۳ Telescopic or Double Shield TBM

می‌توان بیان نمود که در سنگ‌های سخت و مقاوم، که دارای مقاومتی بیش از ۵۰ مگاپاسکال می‌باشند، از ماشین‌های حفار بدون سپر استفاده می‌گردد. در این نوع از ماشین‌های تمام مقطع، به دلیل نصب سیستم نگهدارنده در حین حفاری، امکان دستیابی به سرعت‌های بالا وجود خواهد داشت. لازم به ذکر است که، در این نوع از ماشین‌ها حرکت رو به جلوی دستگاه، از طریق اعمال نیرو توسط چنگ‌زن‌ها (کفشک‌های جانبی)^۱ به توده‌سنگ‌های دربرگیرنده‌ی تونل حاصل می‌گردد. اگر توده‌سنگ‌های دربرگیرنده‌ی تونل دارای مقاومتی کمتر از ۵۰ مگاپاسکال بوده و یا تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی و عوامل هوازدگی بالا نرم و سست شده باشند، می‌بایستی از ماشین‌های حفار با سپر معمولی استفاده نمود. در این ماشین‌ها نیروی لازم جهت حرکت رو به جلوی ماشین، از طریق اعمال نیرو توسط جک‌های هیدرولیکی (تراست)^۲ به قطعات بتنی^۳ نصب شده در انتهای سپر، تأمین می‌شود. سرعت حفاری در این نوع ماشین به دلیل پایین بودن مقاومت، به آسانی و با سرعت بالایی انجام می‌گیرد. ولیکن مراحل نصب قطعات بتنی باعث کاهش راندمان کار می‌گردد. ماشین‌های حفار با سپر تلسکوپی، به دلیل تأمین نیروی رانش، به دو روش مورد استفاده در ماشین‌های بدون سپر و ماشین‌هایی با سپر معمولی، توانایی حفاری در هر شرایطی را دارند. در این ماشین، چنگ‌زن‌های جانبی و جک‌ها، هیدرولیکی‌تر است و توانایی حفاری در زمین‌های سست و ریزشی و زمین‌های سخت را دارا خواهد بود. لازم به ذکر است در صورتی که، توده‌سنگ‌های دربرگیرنده دارای مقاومت مناسبی باشند، عمل حفاری و نصب سیستم نگهدارنده (قطعات بتنی)، همزمان انجام شده و سرعت حفاری افزایش خواهد یافت.

۱-۷-۲- مشخصات ماشین‌های تمام مقطع

¹ Gripper

² Thrust Jack

³ Segment

اجزا و قسمت‌های مختلف ماشین بدون در نظر گرفتن نوع آن به شرح ذیل می‌باشد. البته لازم به ذکر است بر حسب قطر ماشین، سیستم پشتیبان^۱ تا چند صد متر به دنبال آن قرار می‌گیرد.

۱-۲-۷-۱- صفحه‌ی حفار^۲

صفحه‌ای دایره‌ای یا مخروطی شکل است، که بر روی آن تیغه‌های حفاری^۳ قرار می‌گیرد و حول محوری به موازات محور تونل می‌چرخد. این صفحه بر حسب شرایط زمین‌شناسی پروژه از جمله لیتولوژی، استحکام و درزه‌داری به اشکال مسطح، مخروطی، ستاره‌ی مرکب از بازوهای فلزی و یا ترکیبی از چند صفحه‌ی دایره‌ای کوچک‌تر طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۲-۷-۲- تیغه‌های حفاری

تیغه‌های حفاری که وظیفه‌ی خرد کردن و حفر کردن را بر عهده دارند، بر روی صفحه‌ی حفار نصب می‌گردند. براساس مطالعات به عمل آمده، این ابزار را براساس مقاومت تراکمی تک محوری سنگ‌ها، می‌بایستی طراحی نمود (جدول شماره‌ی ۱-۲).

جدول شماره‌ی (۱-۲): رده‌بندی سنگ‌ها براساس قابلیت حفاری به وسیله‌ی ماشین‌های حفار تمام مقطع [۱]

رده‌بندی	مقاومت فشاری تک محوری (بار)	نوع سنگ (لیتولوژی)
زمین نرم	-	رس، سیلت و شن سیمانی نشده، مارن
سنگ نرم	کوچکتر از ۵۵۰	شیل، توف، سنگ رس، ماسه‌سنگ
سنگ نیمه‌سخت	۵۵۰-۱۷۰۰	بعضی از انواع بازالت، گرانیت و آندزی، انواع متوسط ماسه-سنگ، آهک، دولومیت، چاک، ریولیت، گنیس، شیست

¹ Back up

² Cutter head

³ Cutting tools

بعضی از انواع بازالت، گرانیت و آندزیت، ماسه‌سنگ و آهکی که به خوبی سیمانی شده‌اند، مرمر، چرت، دیوریت، کوارتزیت و آرژیلیت	بیش از ۱۷۰۰	سنگ سخت
---	-------------	---------

۱-۷-۲-۳- چنگ‌زن‌ها (کفشک‌های جانبی)

نقش اصلی این جک‌ها، ایجاد تکیه‌گاهی جهت حرکت دستگاه به سمت جلو می‌باشد. اصولاً چنگ‌زن‌ها بر حسب نوع سیستم نگهدارنده‌ی تونل‌ها، به دو دسته تقسیم می‌گردند.

چنگ‌زن‌های طولی

اگر سیستم نگهدارنده‌ی تونل به صورت قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی بوده و دارای استحکام و مقاومت بالایی باشد، از این جک‌ها به گونه‌ای که به موازات محور دستگاه باشند، استفاده می‌شود.

چنگ‌زن‌های عرضی

در صورتی که سیستم نگهدارنده‌ی تونل به صورت موقت و دارای مقاومت کم باشد، می‌بایستی زوج جک‌های عمود بر محور دستگاه، شرایط مناسب جهت حرکت ماشین را فراهم آورد.

۱-۷-۲-۴- جک‌های هیدرولیکی تراست

جک‌های تراست به موازات محور دستگاه، بین صفحه‌ی حفار و چنگ‌زن‌ها قرار می‌گیرند. حداکثر کورس باز شدن این جک‌ها، تعیین کننده‌ی طول پیشروی در هر گام می‌باشد.

۱-۷-۲-۵- سیستم بارگیری و تخلیه^۱

¹ Mucking system

به دنبال حرکت تیغه‌های حفاری بر روی سینه‌کار، تراشه‌هایی از توده‌سنگ جدا شده و در جلوی صفحه‌ی حفار ریخته می‌شود. به منظور تخلیه‌ی نخاله‌های حاصله، توسط سیستمی متشکل از پاکت‌ها (سطل‌های) تعبیه شده در پیرامون سرمته و نوار نقاله، نخاله‌های حاصل از حفاری به پشت دستگاه منتقل می‌گردد. لازم به ذکر است تعیین اندازه، شکل و سایر پارامترهای مؤثر در طراحی سطل‌ها و نوار نقاله می‌بایستی، براساس شرایط زمین‌شناسی و مشورت با مهندس زمین‌شناس انجام پذیرد.

۱-۷-۳- مشخصات عملکرد ماشین تمام مقطع^۱

به منظور تعیین عملکرد ماشین می‌بایستی با دقت و حساسیت بالایی پارامترهای مربوط در این زمینه را برآورد نمود. این پارامترها عبارتند از:

۱. زمان شیفت^۲
۲. نرخ نفوذ^۳
۳. بهره‌دهی^۴
۴. نرخ پیشروی^۵
۵. نرخ برش^۶

^۱ TBM Performance Parameters

^۲ Shift Time

^۳ Penetration Rate (PR)

^۴ Utilization

^۵ Advance Rate (AR)

^۶ Cutting Rate (CR)

فصل دوم

اصول روش NATM در تونل سازی

۲-۱- مقدمه

روش تونل‌سازی اتریشی (NATM)، در فاصله‌ی سالهای ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۵ در اتریش ابداع گردید. [۴] نام این روش در سال ۱۹۶۲ در سالزبورگ و جهت تمیز دادن از روش قدیمی تونل‌سازی اتریشی اعطا گردید. نخستین ارائه دهندگان این روش Franz و Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller و Pacher بودند. ایده‌ی نخستین این روش استفاده از فشارهای زمین شناسی در برگیرنده‌ی توده سنگ، جهت مقاوم سازی و نگهداری تونل بوده است. [۵]

باید گفت که امروزه مطالعات گسترده‌ای از سوی متخصصین علم مکانیک سنگ در ارائه طرحی مطمئن برای نگهداری فضاهای زیرزمینی صورت می‌گیرد که بتواند سیستم نگهداری را به گونه‌ای طراحی کند که علاوه بر ایمن بودن، از نظر اقتصادی نیز معقول باشد. نتایج این مطالعات بر ضرورت بکارگیری روش‌های مشاهده‌ای همچون NATM در تونل‌سازی تاکید دارد.

۲-۲- ویژگی‌های اساسی ناتم

ناتم روشی مبتنی بر تابع نگاری رفتار توده‌های سنگ، تحت بار و مونیتورینگ عملیات ساختمان زیرزمینی سنگ است. واقعیت این است که ناتم به عنوان یک مرحله از حفاری و نیز تکنیک‌های نگهداری مطرح نیست.

ناتم بر هفت ویژگی استوار است:

۱- بسیج مقاومت توده سنگ: این روش بر مقاومت ذاتی توده‌ی سنگ پیرامون به عنوان یک جز اصلی نگهداری شده در تونل، تکیه می‌کند. تکیه‌گاه اولیه طوری هدایت می‌شود که سنگ را قادر سازد تا بر خودش تکیه کند.

۲-حمایت شاتکریت: سست کردن و نیز تغییر شکل بی‌اندازه سنگ می‌بایست به حداقل برسد. این امر با مهیا کردن لایه های نازک شاتکریت، بلافاصله پس از پیشروی جبهه‌ی کار حاصل می‌شود.

۳-اندازه گیری: هرگونه تغییر شکل ناشی از حفاری باید اندازه گرفته شود. ناتم به نصب تجهیزات اندازه گیری در سطح بالایی نیاز دارد. این تجهیزات در آستر، زمین و گمانه‌ها جاسازی می‌شود.

۴-تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر: آسترگیری اولیه نازک است و شرایط لایه‌بندی اخیر را بازتاب می‌دهد. این مدل به کارگیری، نسبت به تکیه‌گاه مجهول، سریع‌تر به کار می‌آید و موثر واقع می‌شود. مقاوم سازی با یک آستر بتنی ضخیم به دست نمی‌آید بلکه با یک ترکیب منعطف از پیچ سنگ، سیم تنیده و شیارهای فولادی حاصل می‌گردد.

۵-بستن وارونگی: بستن سریع وارونگی و ایجاد حلقه حامل بار دارای اهمیت است. این امر در تونل‌های حفر شده در زمین‌های نرم، بسیار وخیم است، جایی که هیچ مقطعی از تونل نباید بطور موقت رها شود.

۶-ترتیب قراردادی: دانش ناتم بر اساس اندازه گیری مونی‌تورینگ پایه‌ریزی شده‌است. تغییر در تکیه‌گاه و ساختمان آن امکان‌پذیر است. این موضوع تنها در شرایطی ممکن است که سیستم قراردادی قادر به تغییرات باشد.

۷-اندازه‌گیری پشتیبانی رده بندی توده سنگ: رده‌های اصلی سنگ برای تونل و پشتیبانی متناظر آن موجود است. این‌ها برای هدایت در زمینه‌ی تقویت تونل بکار می‌روند. [۵] [۶]

۳-۲- اصول کلی ناتم

تونل‌زنی به روش جدید اتریشی در خاکهای سست تا سنگ‌های سخت و مقاوم و در اعماق کم (در جهت به حداقل رساندن نشست سطح) تا اعماق زیاد و بیش از ۱۰۰۰ متر تحت میدان‌های تنش ناشی از عملیات معدنکاری انجام گرفته است.

اصول زیر به طور کلی قابل اعمال می‌باشند. این اصول در مقاله‌ی آقای دکتر فکر به ترتیب زیر آورده شده است:

- ۱- عنصر اصلی باربری یک تونل، توده‌ی سنگ پیرامونی آن می‌باشد.
 - ۲- حفظ مقاومت اولیه سنگ تا جایی که امکان داشته باشد.
 - ۳- اتساع یا جابجایی‌ها باید به حداقل رسانده شود زیرا موجب پایین آوردن مقاومت می‌گردد.
 - ۴- وضعیت تنش تک‌محوری یا دو‌محوری، شرایط نامناسب برای تونل بوده و باید از آن اجتناب گردد.
 - ۵- دگرشکلی‌ها باید به نوعی تحت کنترل درآید که توده‌ی سنگ پیرامون، تشکیل یک حلقه‌ی باربر را حول تونل بدهد، به گونه‌ای که از دست رفتن مقاومت به وسیله‌ی اتساع در سطحی قابل قبول نگه‌داشته شود. با اجرای خوب این کنترل، ایمنی و اقتصاد افزایش می‌یابد.
 - ۶- برای رسیدن به این هدف، تکیه‌گاه اولیه می‌بایست در زمان مناسب نصب گردد.
 - ۷- عامل زمان ویژه سیستم ترکیبی سنگ به اضافه تکیه‌گاه اولیه، باید به دقت کافی تخمین زده شود.
 - ۸- تخمین عامل زمان بستگی به آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمون‌های برجا و رده‌بندی توده‌ی سنگ دارد
- از این سه نرخ، دگرشکلی و زمان پابرجایی استنتاج شده و با رفتار واقعی تونل در حین ساختمان تطبیق و کنترل می‌گردد.

۹- هر جا که دگرشکلی‌ها زیاد بود و یا سست شدن توده‌ی سنگ انتظار می‌رود، می‌بایست از تماس کامل تکیه‌گاه اولیه با جداره‌ی تونل در محل برخورد، اطمینان حاصل آید. این امر با بکار گرفتن شاکریت به بهترین نحو حاصل می‌گردد.

۱۰- تکیه‌گاه اولیه باید نازک و دارای صلبیت خمشی پایین باشد، از این رو گشتاورهای خمشی، پایین آمده و وقوع شکستگی‌ها در اثر خمش به حداقل می‌رسد.

۱۱- افزایش نگهداری با آسترگیری ضخیم‌تر حاصل نمی‌شود بلکه با شبکه‌ی توری اضافی، قاب‌های فولادی، سیم‌های فولادی، میل‌مهارها به وجود می‌آید.

۱۲- نوع و مقدار تکیه‌گاه و زمان نصب، از نتایج اندازه‌گیری دگرشکلی‌ها تعیین می‌گردد.

۱۳- از نظر استاتیکی تونل را می‌توان لوله‌ی ضخم (یا حلقه‌ی دوپدی) که از توده‌ی سنگ و آسترگیری تشکیل یافته در نظر گرفت.

۱۴- از آنجا که یک لوله‌ی مساعدترین ویژگی پایداری را بدون آنکه درز داشته باشد داراست، بستن هم-زمان کف تونل در هنگامیکه سنگ دارای مقاومت کافی نباشد، دارای اهمیت است.

۱۵- رفتار توده‌ی سنگ با بستن به موقع کف تونل تعیین می‌گردد. پیشروی‌های زیاد در طاق منجر به دیر بسته شدن کف تونل و آن هم منجر به تشکیل لوله‌ی نیمه آسترگیری اولیه می‌گردد. نتیجه‌ی آن بروز گشتاورهای بزرگ خمشی در جهت محور تونل می‌باشد که منجر به ایجاد تمرکز تنش زیاد در سنگ و در پای دیواره‌های جانبی گردد.

۱۶- حفاری پیشانی کامل، بهترین روش برای دستیابی به یک توزیع یکنواخت تنش است. هر چند که در سنگ‌های سست، حفاری مرحله‌ای برای پایداری در حین ساختمان ممکن است لزوم پیدا کند.

۱۷- روند حفاری و نگهداری برای پایداری مهم می‌باشد. زیرا آنها عامل زمان در توده‌ی سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

۱۸- تغییر در طول دوره‌ی حفاری، زمان بستن کف، طول پیشروی طاق، مقاومت و زمان نصب تکیه-گاه تماماً به طور سیستماتیک برای کنترل فرایند توزیع مجدد تنش و پایداری به کار گرفته می-شوند.

۱۹- در موارد آستر بندی مضاعف، آستر بندی نهایی باید همچنان نازک باشد. تنش عمود باید بر روی تمام سطح تماس بین آستر بندی‌ها منتقل گردیده و تنش برشی در سطح برخورد باید پایین باشد.

۲۰- کل سیستم توده‌ی سنگ به اضافه‌ی پوشش می‌بایست با نگهداری اولیه پایدار گردند.

در صورت خورنده بودن آب‌های زیرزمینی آستر بندی نهایی می‌بایست قادر به پایداری توده‌ی سنگ به تنهایی باشد. میل مهارها تنها می‌توانند به عنوان یک نگهدارنده‌ی دائمی تلقی گردند، البته در صورتی که از گزند خوردگی در محیط‌های خاص در امان باشند.

۲۱- برای کنترل ایمنی سازه‌ی تونل، اندازه گیری تنش بتن و تنش برخورد در مرز بین سنگ و آستر بندی ضرورت دارد. اندازه گیری دگرشکلی‌ها همچنان ادامه پیدا می‌کند.

۲۲- فشار ایستایی آب بر روی پوشش تونل و فشار جریان در توده‌ی سنگ با زهکشی مناسب پایین آورده می‌شود. [۵]

به طوری که از این اصول دریافت می‌شود، ناتم روند و دستور کاری نیست که با دنبال کردن آن به نتیجه‌ی مورد نظر رسید بلکه عبارت است از: مجموعه‌ای از ایده‌ها که به ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه توجه ویژه‌ای دارد. این روش در نتیجه‌ی تجربیات متعدد در کار تونل‌زنی به دست آمده است و برای به دست آوردن هر یک از این ایده‌ها و نیز جمع‌بندی آنها به عنوان یک روش سال‌های زیادی

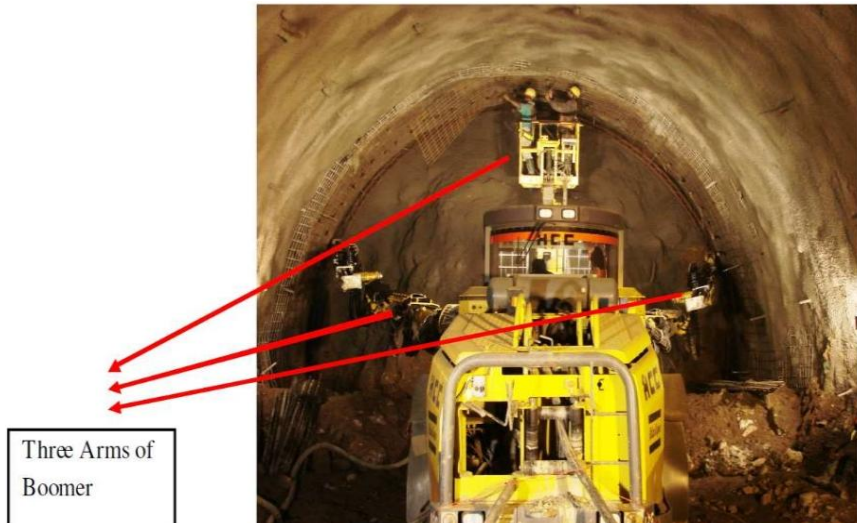
وقت صرف شده است. نوآوری اساسی این ایده، یک فن ساختمانی یا یک روش خاص محاسباتی نمی باشد، اما برای ساختمان تونل در توده سنگ و چگونگی برخورد با آن راهکار ارائه می‌دهد.

یکی از اصول موفقیت آمیز این روش گردآوری موضوعات متعدد از مهندسی عمران و مکانیک سنگ می‌باشد که شامل موضوعات نظری و عملی است.

۲-۴- روش اجرای ناتم

با اینکه هنوز هیچ پشتوانه‌ی نظری برای ناتم وجود ندارد اما عواملی وجود دارند که منجر به موفقیت این روش می‌گردند که عبارتند از:

۱- بتن پاشی به عنوان سازنده‌ی سازه‌ی ترکیبی قوس سنگ، که به حلقه‌ی حمال سنگ موسوم بوده و حفره را احاطه می‌کند.



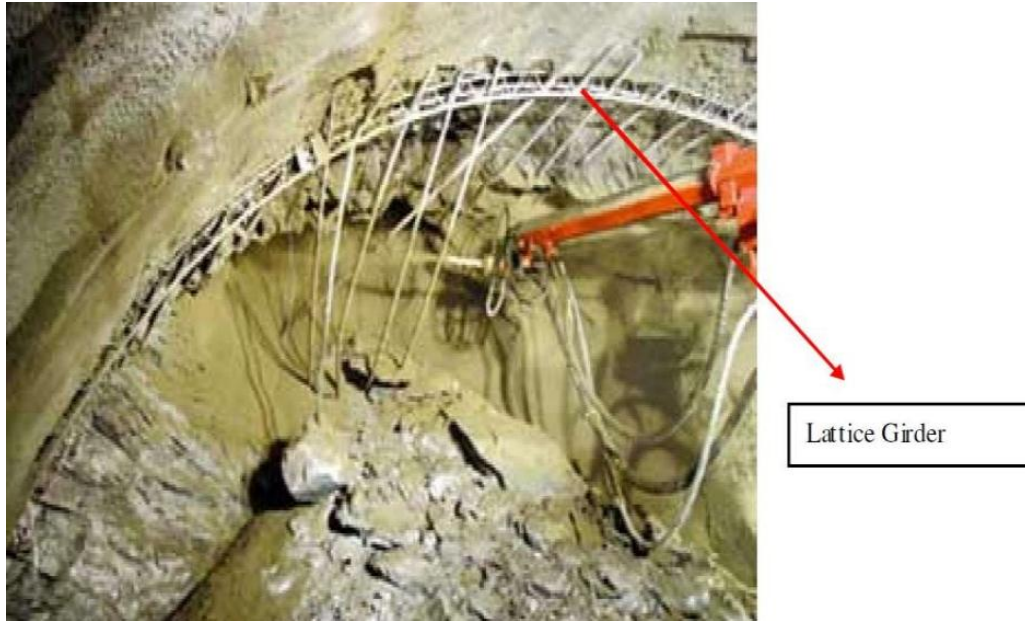
شکل (۲-۱): اجرای قاب فولادی و نصب مش به همراه بتن پاشی

بتن پاشی به مراتب قدیمی‌تر از ناتم می‌باشد اما ویژگی‌های عالی آن از نظر مقاومت و لغزش، این روش را به عنوان یکی از ابزارهای غالب نگهداری در تونل‌سازی به روش ناتم گردانیده است. بیشترین اهمیت آن اجرای سریع برای پوشانیدن سطح تازه حفاری شده سنگ می‌باشد. مزیت دیگر آن

دستیابی به یک مقاومت نسبی بالا در مدت زمان کوتاه، حدود ۵ نیوتن بر میلی مترمربع (مگاپاسکال) در ۶ ساعت می‌باشد.

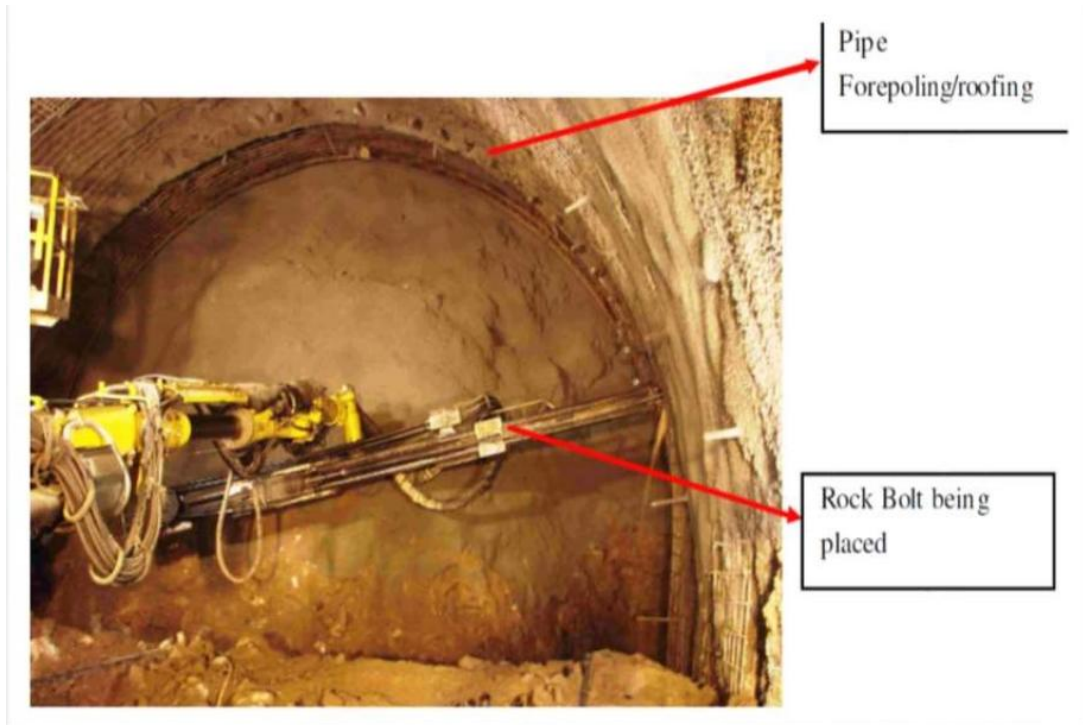
شاتکریت در تونل‌سازی دارای اثر مضاعف است. محافظت سنگ در اثر هوازدگی و فرسایش و نیز با بستن ترک‌ها، تمرکز تنش در اطراف تونل را کاهش می‌دهد، همچنین ضخامت زیاد شاتکریت به عنوان یک قوس نگهدارنده عمل می‌کند. در تمام موارد اتصال تنگاتنگ با سنگ مهم می‌باشد. این عمل موجب می‌گردد سنگ بارها را مشترک حمل نموده و ساختاری مرکب با سنگ تشکیل دهد. شاتکریت مناسب، نیاز به یک تکیه‌گاه نیمه صلب را برآورده می‌سازد، زیرا دگرشکلی شعاعی زیادی را بدون شکستگی امکان‌پذیر می‌سازد. با دگرشکلی‌های بزرگ تونل، شاتکریت می‌شکند. اما در صورت مسلح شدن به توری سیمی یا رشته‌های فولادی، قطعات برش‌یافته شاتکریت خطری آنی برای خدمه ایجاد نخواهند کرد.

۲- وسیله‌ی دیگر برای ساختن طاق بیرونی، قاب‌های فولادی می‌باشد. این قاب‌ها در توده‌های سنگ فشرده‌شده و بسیار خردشونده به کار گرفته‌شده‌است و تکیه‌گاهی سریع و موثر برای سنگ به شمار می‌رود. در چند سال اخیر کاربرد قوس‌های پروفیلی به میزان زیادی افزایش یافته‌است. این قوس‌ها نسبت به قاب‌های فولادی مزایای بیشتری دارند و نیز به دلیل سبک وزن بودن، نصب آنها آسان‌تر می‌باشد.



شکل (۲-۲): لتیس یا قاب‌های فولادی سیستم نگهدارنده

۳- در تونل‌سازی همراه با مفاهیم ناتم، نصب میل مهارها جایگاه ویژه‌ای دارد و اهمیت آنها به اندازه-ی شاتکریت می‌باشد. این میل‌ها نیز مثل شاتکریت در صورت نصب، موجب تشکیل حلقه‌ی حمال در اطراف توده‌ی سنگ می‌گردند. میل‌مهارها در برابر دگرشکلی شعاعی مقاومت می‌کند از اینرو ایجاد دگرشکلی، کنترل شده و شکل ژئومتریکی تونل حفظ می‌شود. میل‌مهارها از آن جهت که تاثیر ناهمسانی و ناهمگونی را کاهش می‌دهند، تشکیل صفحات برشی و لغزشی را مشکل‌تر ساخته و سبب ایجاد مقاومت ماندگار بالا حتی در توده‌های سنگ به شدت دست‌خورده می‌گردد. این نیز به نوبه‌ی خود سبب بهسازی کیفیت سنگ می‌گردد. تنش مماسی در حلقه‌ی سنگ حمال موجب افزایش چسبندگی مهارها می‌گردد. طاق‌های ثانویه‌ی ایجاد شده بین تکیه‌گاه‌ها، در برابر تمایل توده سنگ نسبت به جابه‌جایی به داخل تونل، مقاومت ایجاد می‌نماید که این مقاومت به نزدیکی مهارها بستگی دارد. در صورتیکه طاق تونل تحت تنش زیاد قرار گیرد، و یا سیستم سنگ در معرض شکستگی قرار داشته باشد، تونل نیاز به بهسازی با بتن‌پاشی به سطح خواهد داشت.



شکل (۲-۳): نصب میل مهار جهت پایدارسازی مقطع تونل (فورپولینگ)

بنابراین به طور خلاصه مواد پایدار کننده در ناتم عبارت‌اند از: شاتکریت، میل مهارها، قوس‌های فولادی یا پروفیلی، صفحات فولادی و...

۲-۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی ناتم ایجاد یک قوس نیمه صلب خارجی بلافاصله پس از حفاری با وسایل نگهداری از قبیل شاتکریت، پیچ سنگ و غیره می‌باشد. این امر موجب تنظیم تنش در محدوده‌ی اطراف تونل می‌شود و از سست شدگی مخرب جلوگیری به عمل می‌آورد. این همان چیزی است که ناتم را از روش‌های تونل‌زنی محافظه‌کارانه تمیز می‌دهد. اصولاً در شیوه‌های سنتی تونل‌سازی، بارسنگ می‌بایست تماماً بوسیله تجهیزات نگهداری تحمل شود که این کار نیز مستلزم صرف هزینه‌های زیاد می‌باشد.

روش ناتم در نتیجه‌ی تجربه‌ی عملی بوجود آمده‌است و مانند دیگر روش‌هایی که در حال تکمیل می‌باشند، دستخوش تغییر و تحولات و مشکلات متعددی گردیده تا به شکل کنونی درآمده است. این روش از انعطاف‌پذیری قابل توجهی در شرایط مواجهه با وضعیت‌های متفاوت توده‌ی سنگی برخوردار است.

بطور کلی ضروری است که مطالعات و بررسی دقیقی به منظور بررسی شرایط زمین‌ساختاری، به‌ویژه در زمین‌های نامناسب انجام شود تا بین هزینه‌های مطالعات و اجرای عملیات، رابطه‌ای منطقی ایجاد گردد.

تهیه مواد و مصالح مورد نیاز ناتم و طریقه‌ی ریختن بتن در فضاها، حتی در طرح‌های کوچک تونل-سازی با ناتم، نیاز به ساماندهی مناسب و کارآمد دارد که خود ناشی از تجربه و مهارت بالای اجراکننده‌گان آن دارد. اهمیت نصب شعاعی میل مهارها به طور سیستماتیک در سنگ‌های سست، به منظور تأمین توزیع مناسب تنش‌های بوجود آمده در قوس‌های دایره‌ای شکل سنگی، بسیار مناسب تشخیص داده شده است.

موفقیت در روش ناتم نیاز به آموزش‌های تئوریک و عملی هم‌زمان در محل عملیات دارد زیرا تنها در ارتباط بودن نزدیک و دقیق مهندسان با مسائل و مشکلات در محل کار می‌تواند آنها را به اعمال راهنمایی‌های خاص و دقیق قادر سازد.

یک بخش مهم و جدایی‌ناپذیر در این روش مشاهده‌ی رفتار تنش کرنش سنگ با فنون اندازه‌گیری می‌باشد.

فصل سوم

انواع روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها

با تمرکز بر روش‌های عددی

۳-۱- مقدمه

روش‌های متعددی برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی وجود دارد. هر کدام از این روش‌ها مشکلات مخصوص به خود را دارا می‌باشد، به طوریکه محدودیتی برای انتخاب روش نهایی ایجاد می‌کنند. بنابراین مهندس طراح باید بسته به شرایط کار و دقت مورد نظر، روش مناسبی را انتخاب نماید و در طراحی مورد استفاده قرار دهد، مهمترین این روش‌ها عبارتند از:

- روش‌های تحلیلی

- روش‌های تجربی

- روش‌های مشاهده‌ای

- روش‌های عددی

۳-۲- تحلیل پایداری به روش تحلیلی

روش‌های تحلیلی روش‌های سریع و اقتصادی برای طراحی تونل می‌باشند. در این روش‌ها فرضیات بسیار ساده‌کننده‌ای بر مسأله حاکم می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر بارگذاری خارجی و روش همگرایی-همجواری اشاره کرد. در روش‌های مبتنی بر بارگذاری خارجی، جدار سیستم نگهدارنده به صورت یک سازه‌ای که تحت تأثیر بارهای خارجی قرار می‌گیرد، بررسی می‌شود. در این روش‌ها بار وارده بر سازه با استفاده از نظریه‌های مختلف تجربی و نیمه‌تجربی، نظیر تئوری بار سنگ ترازقی، سیستم‌های طبقه‌بندی Q و RMR، با در نظر گرفتن پدیده‌ی قوس فشار به دست می‌آید.

۳-۳- تحلیل پایداری به روش تجربی

در روش‌های تجربی، طراحی تونل‌ها براساس تجارب عملی که در حین احداث تونل‌های مختلف، تحت شرایط گوناگون به دست آمده است، انجام می‌شود. گرچه این روش، یک روش مؤثر در تحلیل تونل‌ها بوده، ولی از این روش نمی‌توان در تحلیل تونل‌هایی با اشکال پیچیده و متعدد استفاده نمود.

۳-۴- تحلیلی پایداری به روش مشاهده‌ای

در روش‌های مشاهده‌ای، طراحی سیستم‌های نگهداری براساس ثبت و تفسیر اطلاعاتی انجام می‌گیرد که از اندازه‌گیری در حین احداث تونل‌ها حاصل شده است. به عبارت دیگر در هر لحظه همزمان با پیشروی تونل، به کمک ابزارهای مخصوص و دقیق، واکنش توده‌ی سنگ در برابر حفاری اندازه‌گیری می‌گردد و پس از تجزیه و تحلیل مبتنی بر شرایط موجود، طرح مناسبی برای نگهداری ارائه می‌شود. روش ناتم، که به عنوان یک روش مشاهده‌ای از سال ۱۹۶۴ در صنعت تونل‌سازی پدید آمد، ایده‌ای است که، براساس تعدادی از اصول نظری در راستای افزایش مقاومت برشی خاک یا سنگ بنا شده است.

۳-۵- تحلیل پایداری با روش عددی

قبل از حفر هر فضای زیرزمینی لازم است که نوع روش حفاری و سیستم نگهداری مناسب پیش‌بینی شود. در این خصوص مدل مکانیکی باید قابلیت چنین پیش‌بینی‌هایی را داشته باشد. لازم به ذکر است اگر ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی سازه‌ی مورد نظر، به پیچیدگی توده‌ی سنگ پیرامون یک تونل بوده و رفتار غیر خطی داشته باشد، در این صورت فقط به کمک روش‌های عددی می‌توان مسأله را حل کرده و پایداری سیستم نگهدارنده‌ی مناسب آن را تخمین زد. در شرایط واقعی تعداد متغیرها و پارامترهای توده‌ی سنگ بسیار زیاد می‌باشد که هنوز امکان به کارگیری تمام آنها در مدل‌های مکانیکی وجود ندارد. بنابراین لازم است تا همانند روش‌های طراحی یک ساختمان یا یک دیوار حایل، پارامترهای مدل به تعدادی پارامتر محدود و قابل دسترسی ساده شود [۷].

اساس روش‌های عددی تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط می‌باشد. از جمله دلایل افزایش استفاده از روش‌های عددی عبارتند از:

- با روش عددی می‌توان هر تونلی و با هر شکل و سطح مقطعی را تحلیل کرد.
- با روش عددی می‌توان روند حفاری و سایر عملیات تونل‌سازی را در نظر گرفت.
- با روش عددی می‌توان تنش و جابه‌جایی را به راحتی در تمام نقاط سیستم و در هر زمان به دست آورد.

به طور کلی روش‌های عددی برای حل معادلات از دو روش صریح^۱ و ضمنی^۲ استفاده می‌کنند. در روش ضمنی، مقادیر مجهول در یک زمان حل می‌شوند. به عبارت دیگر دستگاه معادلاتی به وجود می‌آید که مجهولات و معلومات را به هم مربوط می‌کند، مثلاً در اجزای محدود، ماتریس سختی کلی به وجود می‌آید، که نسبت جابه‌جایی و نیروها می‌باشد. با حل این دستگاه معادلات تمام مجهولات (مثلاً جابه‌جایی) در گره‌ها به یکباره به دست می‌آید، بنابراین برای حل آن نیاز به کامپیوتری با قدرت بالا می‌باشد. ولی در روش صریح فرض می‌شود که هر گره متأثر از گره‌های مجاور خود باشد. به این ترتیب با گام‌های زمانی مختلف، مقادیر مجهول در هر گره با توجه به مقادیر گره‌های مجاور به دست می‌آید. تکرار این عمل آن قدر انجام می‌گیرد تا تمام نیروها به جابه‌جایی تبدیل شوند و مقدار جابه‌جایی در هر گره به دست آید. چون در این روش ماتریسی به وجود نمی‌آید، حافظه‌ی مورد نیاز برای حل معادلات کمتر می‌باشد، همچنین برای مواد ژئوتکنیکی که دارای خاصیت غیر خطی می‌باشند، این روش بسیار سودمند است. از طرف دیگر از مشکلات این روش می‌توان به زمان‌بر بودن آن اشاره نمود، که برای مسائل استاتیک نسبت به روش‌های ضمنی، مقرون به صرفه نمی‌باشد. این روش‌ها به

^۱ Explicit

^۲ Implicit

سبک‌های مختلفی ارائه شده‌اند، ولی متداول‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های عددی شامل موارد زیر می‌باشند:

۳-۵-۱- روش‌های اجزای مرزی^۱

۳-۵-۲- روش‌های محیطی یا ناحیه‌ای^۲

۳-۵-۳- روش‌های ترکیبی

در جدول شماره‌ی (۳-۱) بسته به شرایط توده‌ی سنگ دربرگیرنده‌ی فضای حفاری شده، می‌توان روش عددی مناسب جهت تحلیل تنش را انتخاب نمود.

جدول (۳-۱): روش‌های پیشنهادی مناسب برای تحلیل تنش در سنگ در وضعیت‌های مختلف [۸]

رفتار توده‌سنگ		وضعیت توده‌سنگ
الاستیک خمیری	الاستیک	
اجزای محدود تفاضل محدود	اجزای مرزی	سنگ‌های توده‌ای
اجزای محدود تفاضل محدود	اجزای مرزی اجزای محدود	سنگ با درزه‌های فاصله‌دار
اجزای مجزا	اجزای مجزا	سنگ با درزه‌های نزدیک به هم
اجزای محدود تفاضل محدود	-	سنگ به شدت درزه‌دار

۳-۵-۱- روش‌های اجزای مرزی

در این روش‌ها فقط مرز خارجی حفاری به اجزای کوچک و مجزایی تقسیم‌بندی شده و درون توده-سنگ به صورت یک محیط نامحدود، مدنظر قرار می‌گیرد. به بیان دیگر سطوح حفاری، لایه‌بندی، ناپیوستگی‌های ساختاری و غیره به اجزای کوچک تقسیم‌بندی می‌شود. استفاده از این روش به منظور تحلیل پایداری فضا‌های زیرزمینی از جمله تونل‌ها به دلیل محدود بودن تعداد اجزای مرزی ساده می‌-

¹ Boundary element methods (BEM)

² Domain Methods

باشد و بر همین اساس به حافظه‌ی کامپیوتری کمتری احتیاج می‌باشد. در روش‌های مرزی تنها سطح داخلی فضای زیرزمینی، برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توده‌ی سنگ درون تونل نقشی در حل مسأله ندارد، بر همین اساس این روش‌ها برای محیط‌های نامحدود تا نیمه‌محدود بسیار مناسب می‌باشد [۸]. از جمله نرم‌افزارهایی که بر مبنای روش اجزای مرزی سه‌بعدی طراحی و عرضه شده‌اند می‌توان به EX AMINE^{3D} و MAP3D و همچنین VISAGE اشاره نمود.

۳-۵-۲- روش‌های محیطی یا ناحیه‌ای

این روش‌ها شامل روش اجزای محدود^۱، روش تفاضل محدود^۲ و روش اجزای مجزا^۳ می‌باشد.

۳-۵-۲-۱- روش اجزای محدود

این روش که از سال ۱۹۵۶ وارد عرصه‌ی علم شده‌است، در اغلب کارهای مهندسی از قبیل مکانیک جامدات، سیالات، مهندسی ساختمان و مهندسی معدن به‌کار گرفته می‌شود و هر پدیده‌ی طبیعی که با یک معادله‌ی دیفرانسیل بیان شود را می‌توان با بکارگیری این روش حل کرد. در دهه‌ی ۷۰ روش اجزای محدود برای تحلیل سازه‌های غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گرفت. در روش اجزای محدود، محیط پیوسته واقعی به صورت مجموعه‌ای مرکب از تقسیمات کوچک‌تر به نام المان (اجزا) نمایش داده می‌شوند. هر المان توسط گره‌های اطراف خود تعریف می‌شود. ارتباط المان‌های مجاور از طریق گره‌های مشترک می‌باشد. از آنجا که تغییرات واقعی متغیر (مانند جابه‌جایی و تنش و ...) در داخل این محیط پیوسته، مجهول می‌باشد، فرض می‌کنیم که تغییرات متغیر در داخل یک المان محدود را می‌توان به وسیله‌ی یک تابع ساده تقریب نمود. این توابع تقریبی که به عنوان توابع تقریب و یا درونیاب نامیده می‌شوند، بر حسب مقادیر متغیرهای میدان در گره‌ها تعریف می‌شوند. گره، نقاط مشترک المان‌ها که همان مختصات هندسی یک نقطه را گویند. آنالیز در اجزای

¹ Finite element method (FEM)

² Finite difference method (FDM)

³ Distinct element method (DEM)

محدود شامل ۷ مرحله است که باید به ترتیب انجام شود. در اکثر نرم‌افزارها ترتیب عملیات تحلیل به ترتیب زیر است.

مرحله‌ی اول شامل گسسته‌سازی و تقسیم سازه یا ناحیه به بخش‌های کوچکتر به نام المان می‌باشد. در مسائل دو بعدی سطح مورد نظر به المان‌هایی تقسیم می‌گردد که ممکن است مثلثی، مستطیلی یا چهارضلعی با اضلاع منحنی یا مستقیم باشد. بنابراین برای محاسبه‌ی تغییر مکان‌ها از یک قاعده‌ی درون‌یابی پارابولیک در هر نقطه‌ی داخل یک المان استفاده می‌شود. المان‌های خطی برای مدل‌سازی راک بولت‌ها، اتصالات و ستون‌ها استفاده می‌شود. استفاده از این المان‌ها با شبکه‌سازی و مش‌بندی صورت می‌گیرد. انتخاب شبکه اختیاری است و تعداد المان‌ها و گره‌ها برای حل یک مسأله بستگی به دقت مورد نظر، هزینه و میزان اهمیت پروژه دارد. در جایی که تغییرات ناگهانی در تنش انتظار می‌رود از المان‌های کوچک‌تری استفاده می‌شود. مثلاً اگر یک حفره‌ی زیرزمینی را مدل می‌کنیم، نقاط بیشتری مورد نیاز ما است لذا باید چگالی شبکه را در اینجا بالا ببریم یعنی به المان‌های کوچک‌تری تقسیم کنیم. البته این کار باعث بالا رفتن میزان محاسبات و زمان تحلیل می‌شود.

مرحله‌ی دوم در تحلیل پروژه‌ها انتخاب یک مدل درون‌یاب یا مدل جابه‌جایی مناسب می‌باشد. از آنجا که حل مربوط به جابه‌جایی یک سازه‌ی مرکب تحت هر شرایط بارگذاری مشخص را نمی‌توان به طور دقیق پیش‌بینی نمود، بنابراین یک راه‌حل مناسب جهت به دست آوردن جواب تقریبی مجهولات در المان، لازم است. عموماً مدل درون‌یاب را به شکل چند جمله‌ای فرض می‌کنند.

مرحله‌ی سوم در آنالیز به‌وسیله‌ی المان محدود، بدست آوردن ماتریسی سختی است. سپس بدست آوردن بردارهای نیروی المان که پایه‌ی تحلیل اولیه را تشکیل می‌دهد. برای بدست آوردن بردار نیروها باید ماتریس سختی را در بردار جابه‌جایی گره‌ها ضرب کرد. لذا باید ابتدا این ماتریس سختی مشخص و تعیین شود.

در مرحله‌ی چهارم معادلات المان‌ها را برای بدست آوردن معادلات کلی تعادل باید جمع بزنیم. از آنجا که سازه از چندین المان محدود تشکیل شده است، ماتریس سختی و بردارهای نیروی المان‌های منفرد را باید با یک روش مناسب با یکدیگر جمع نمود و معادلات کلی تعادل را بدست آورد. اگر $[K]$ را ماتریس سختی در نظر بگیریم و U بردار جابه‌جایی‌های گره‌ها باشد، F بردار نیروهای گره برای کل سازه برابر است با:

$$F = [K] U$$

مرحله‌ی پنجم شامل شرایط مرزی در مدل و حل معادلات تعادل می‌باشد. در این حالت مرزهای مدل را می‌بندیم و بسته به نوع مسأله از مرزها با شرایط مناسب استفاده می‌کنیم.

و مرحله‌ی ششم شامل محاسبه‌ی تنش و کرنش‌های المان می‌باشد. که با استفاده از روابط حاکم بر الاستیسیته و پلاستیسیته‌ی تنش و کرنش محاسبه می‌شود. و میزان تغییر شکل هر نقطه و تنش وارده بر آن را با همان معادلاتی که قبلاً پیدا کرده‌ایم، بدست می‌آوریم. در مرحله‌ی هفت و نهمی نیز باید نتایج به‌دست‌آمده را به صورت خروجی بگیریم و آنها را تحلیل کنیم تا بتوانیم به راحتی نتیجه‌گیری کنیم. بسته به نوع مسأله و نیاز ما و نرم‌افزار مورد استفاده‌ی ما خروجی‌های متعددی می‌توانیم داشته باشیم. که یکی از آنها فاکتور ایمنی می‌باشد. که در پروژه‌های معدنی براساس معیار هوک و براون می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$SF = \frac{\sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_c - S\sigma_c^2}}{\sigma_1} \quad 1-3$$

منظور از SF در اینجا نسبت تنش القایی به مقاومت سنگ است که در اینجا اگر تنش القایی بیشتر از مقاومت سنگ باشد در این صورت ضریب ایمنی کمتر از یک بوده و شکست اتفاق می‌افتد.

۳-۵-۲-۲- روش اجزای مجزا

این روش در سال‌های اخیر و با توجه به ماهیت ناپیوسته‌ی محیط‌های سنگی برای ارزیابی و بررسی تغییر شکل و شکست توده‌ی سنگ اطراف تونل و فضاهای زیرزمینی و روباز به کار برده می‌شود. این روش از نظر تقسیم‌بندی محیط مسأله به سیستمی از بلوک‌ها، شبیه روش اجزای محدود است. ولی تفاوت عمده‌ی آن با سایر روش‌های عددی در این است که در این مورد ما کل هندسه‌ی مدل و هندسه‌ی المان‌ها را توسط فاصله و جهت ناپیوستگی‌های توده‌سنگ تعیین می‌کنیم. در روش اجزای مجزا، توده‌ی سنگ به صورت اجتماعی از بلوک‌های مجزا معرفی می‌شود. درزه‌ها به عنوان سطوح تلاقی میان بلوک‌های مجزا دیده می‌شود که به جای شرایط خاص در المان‌های مخصوص به عنوان شرایط مرزی مسأله منظور می‌شود. نیروهای تماس و جابه‌جایی در محل تماس‌ها ناشی از انباشته شدن تنش بلوک‌ها، از محاسبه‌ی اثرات حرکت بلوک‌ها بدست می‌آید. نرم‌افزار UDEC که توسط شرکت ایتاسکا^۱ ارائه شده، یک برنامه‌ی عددی دو بعدی و بر مبنای روش اجزای مجزا استوار می‌باشد و در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای موجود در مسائل مرتبط به سنگ، مدل‌سازی به وسیله‌ی آن انطباق بیشتری با شرایط واقعی دارد [۹].

۳-۵-۲-۳- روش تفاضل محدود

این روش قدیمی‌ترین تکنیک عددی برای حل معادلات دیفرانسیل است که مقادیر اولیه و شرایط مرزی آنها مشخص است. برای حل معادلات در این روش به ازای هر مشتقی که در معادلات وجود دارد، عبارتی جبری بر حسب متغیرهای مسأله مثل تنش، جابه‌جایی و ... جایگزین می‌شود. در این روش هیچ ماتریسی تشکیل نمی‌شود لذا محدودیت‌های کمتری دارد و همچنین اجازه‌ی آنالیز جابه‌جایی بزرگ را می‌دهد. نرم‌افزاری که براساس روش تفاضل محدود کار می‌کند، Flac 2D & 3D می‌باشد. که براساس یک طرح محاسباتی لاگرانژی استوار است.

۳-۵-۳- روش‌های ترکیبی

هیچ یک از روش‌های ناحیه‌ای و مرزی، مزیت مطلقی نسبت به یکدیگر ندارند، ولی می‌توان با استفاده از روش ترکیبی، معایب و زیان‌های هر کدام را حذف نمود. لوریک و بردی در سال ۱۹۸۴ از مدل ترکیبی اجزای مجزای جداگانه (برای حوزه‌ی اغتشاش تنش اطراف تونل) و مدل اجزای مرزی (برای مرز خارج از حوزه‌ی تأثیر تنش) در توده‌ی سنگ دربرگیرنده‌ی تونل دایره‌ای استفاده کردند [۱۰]. نرم‌افزار $Phase^2$ نیز براساس روش ترکیبی استوار می‌باشد.

۳-۶- تحلیل پایداری با روش تحلیل فرم بسته^۱

روش‌های تحلیل فرم بسته، جزو اولین روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها محسوب می‌شوند و نقش مهم و اساسی در درک مفاهیم ریشه‌ای رفتار توده‌های سنگی، ایفا می‌نمایند. با این وجود امروزه این مدل‌ها، به علت استفاده از معادلات پیچیده و فرضیات محدودکننده، از کاربرد کمتری برخوردار می‌باشند و می‌توان نتایج بدست آمده از آن را (به صورت تقریبی) جهت آزمایش و مقایسه با نتایج حاصل از مدل‌های عددی استفاده کرد. در این روش براساس خصوصیات مقاومتی توده‌ی سنگ دربرگیرنده‌ی فضای زیرزمینی و همچنین شرایط تنش موجود، پایداری و مقاومت دیواره‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است، که توده‌سنگ‌های مختلف از لحاظ ناپیوستگی‌های ساختاری در شرایط تنش متفاوت، رفتارهای گوناگونی از خود نشان می‌دهند. منحنی اندرکنش سنگ-نگهداری، ابزار ساده‌ای است که بسیاری از مهندسان تونل در طراحی فضای زیرزمینی از آن استفاده می‌کنند. این منحنی برای تحلیل و درک بهتر اندرکنش میان سنگ و حائل، مناسب می‌باشد. به کمک روش-های تحلیل می‌توان این منحنی را ترسیم نمود، اما این روش برای تمامی فضاهای زیرزمینی مناسب نیست. برای ساده شدن تحلیل اندرکنش سنگ-سیستم نگهدارنده بعضی از فرضیاتی را که در نظر می‌گیرند، عبارتند از:

¹ Closed From Solution

۱. هندسه‌ی تونل: در این تحلیل، تونلی با مقطع دایره و به شعاع اولیه r_i در نظر می‌گیرند و طول تونل نیز به گونه‌ای است که، مسأله را بتوان به صورت دو بعدی در نظر گرفت.
۲. میدان تنش درجا: فرض می‌شود که تنش افقی و قائم درجا با یکدیگر برابر باشند، به عبارت دیگر تونل باید در حوضه‌ی تنش لیتوستاتیک قرار داشته باشد.

فصل چهارم

نکات کلی مدل سازی توسط نرم افزار

PLAXIS 3D TUNNEL

۴-۱- مقدمه

نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL یک برنامه‌ی کامپیوتری سه‌بعدی اجزاء محدود است که برای تحلیل تغییر شکل‌ها و بررسی پایداری انواع تونل در خاک و سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ساده‌ی ورود اطلاعات که به صورت گرافیکی است؛ کاربران را به تولید سریع مدل‌های پیچیده‌ی اجزای محدود قادر می‌سازد و خروجی نرم‌افزار امکان نمایش جزئیات نتایج محاسباتی را فراهم می‌کند. این برنامه، محاسبات را به صورت کاملاً خودکار انجام داده و براساس روش‌های قدرتمند عددی پایه‌گذاری شده است. [۱۱]

این برنامه گزینه‌هایی مخصوص روش‌های تونل‌سازی سپری و ^۱NATM دارد، اما توانایی مدل کردن انواع تونل‌ها و موضوعات ژئوتکنیکی را نیز دارا می‌باشد. برای کار با این نرم‌افزار کاربران باید اطلاعات مقدماتی از مکانیک خاک و آشنایی کامل با محیط ویندوز را داشته باشند. همچنین آشنایی با برنامه‌ی استاندارد (2D) PLAXIS نیز مفید خواهد بود. این برنامه شامل چهار زیرمجموعه‌ی برنامه‌ی ورودی، برنامه‌محاسبات، برنامه‌ی خروجی و برنامه‌ی رسم منحنی می‌باشد.

۴-۲- واحدها و علائم قراردادی

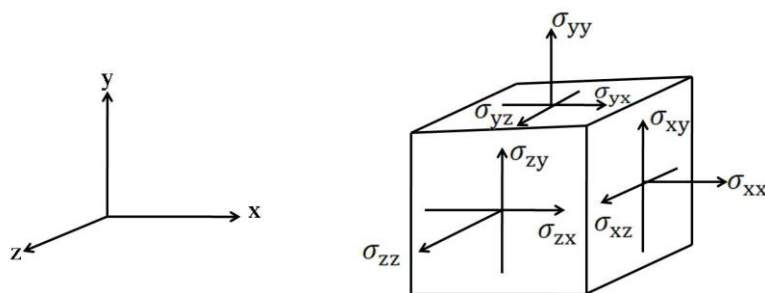
در هر تحلیل، انتخاب یک سیستم واحد ثابت ضروری است. در آغاز ورود اطلاعات هندسی، یک سیستم واحد مناسب باید انتخاب شود. این سیستم واحدهای پایه شامل طول، واحد نیرو و واحد زمان می‌باشد. لیست واحدهایی که به صورت عمومی در این نرم‌افزار استفاده می‌شوند در جدول ۴-۱ نشان داده شده است.

¹ New Austrian Tunnelling Method

جدول (۴-۱): واحدهای مورد استفاده در نرم افزار Plaxis 3D Tunnel [۱۱]

سیستم انگلیسی	سیستم متریک	نوع واحد	نام واحد
In	M	پایه	طول
Lb	kN	پایه	نیرو
Sec	Day	پایه	زمان
In	M	هندسی	مختصات
In	M	هندسی	جابه جایی
Psi = lb/in ²	kPA = kN/m ²	خصوصیات مواد و مصالح	مدول یانگ
Psi	kPa	خصوصیات مواد و مصالح	چسبندگی
deg.	deg.	خصوصیات مواد و مصالح	زاویه اصطکاک داخلی
deg.	deg.	خصوصیات مواد و مصالح	زاویه اتساع
lb/in ³	kN/m ³	خصوصیات مواد و مصالح	وزن حجمی
Lb	kN	نیرو و تنش	بارگذاری نقطه‌ای
lb/in	kN/m	نیرو و تنش	بارگذاری خطی
Psi	kPa	نیرو و تنش	توزیع بار
Psi	kPa	نیرو و تنش	تنش

برای ایجاد یک مدل سه بعدی اجزای محدود در نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL در ابتدا باید یک مدل مقطع عمودی ایجاد کرد که این مدل دوبعدی در صفحه‌ی x-y ساخته می‌شود. برای ساخت مدل سه بعدی، مدل دوبعدی در بعد سوم (جهت z) توسعه داده می‌شود. در طی ساخت مدل مقطع عمودی، جهت مثبت z به سمت کاربر می‌باشد. تنش‌هایی که در مدل سه بعدی PLAXIS 3D TUNNEL محاسبه می‌شوند، بر مبنای سیستم مختصات کارتیزین که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، می‌باشند.



شکل (۴-۱): نمایش سیستم مختصات و جهت اجزای مثبت تنش‌ها

در تمامی اطلاعات خروجی، نیروها و تنش‌های فشاری شامل فشار منفذی آب، منفی فرض می‌شوند. در صورتی که نیروها و تنش‌های کششی مثبت فرض می‌شوند.

۳-۴- نکات کلی مدل‌سازی

برای آنالیز سه‌بعدی یک پروژه‌ی جدید، در ابتدا باید یک مدل دوبعدی از مقطع عرضی آن ساخته شود. مدل مقطع عرضی یک ارائه‌ی دوبعدی از مسائل واقعی سه‌بعدی است و شامل نقاط، خطوط و کلاسترها می‌باشد. مدل مقطع عرضی باید تقسیم‌بندی لایه‌های متمایز خاک در زیر سطح، موارد ساختمانی، مراحل ساخت، بارگذاری‌ها و تمامی موضوعات تأثیرگذار را شامل شود. مدل باید به قدر کافی بزرگ انتخاب شود تا تأثیر مرزها بر نتایج مسأله کاهش یابد. سه نوع از اجزای تشکیل دهنده‌ی یک مدل مقطع عرضی در ذیل شرح داده شده است [۱۱].

۳-۴-۱- نقاط

نقاط شکل، ابتدا و انتهای خطوط هستند که می‌توانند برای نشان دادن موقعیت بولت‌ها، نقاط تأثیر نیرو، نقاط پایداری و به منظور جداسازی مش‌های اجزای محدود مورد استفاده قرار گیرند.

۳-۴-۲- خطوط

خطوط برای متمایز کردن فیزیکی مرزهای هندسی، مرزهای مدل، ناپیوستگی‌های هندسی مانند دیوارها و پوشش‌ها، جدایی لایه‌های متمایز خاک و مراحل ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک خط می‌تواند شامل چندین کارکرد یا خاصیت باشد.

۳-۴-۳- کلاستر^۱

¹ Cluster

کلاسترها مناطقی هستند که کاملاً توسط خطوط محصور شده‌اند. برنامه‌ی PLAXIS 3D TUNNEL به صورت خودکار این نواحی را براساس خطوط هندسی ورودی می‌شناسد. در داخل یک کلاستر، خصوصیات خاک به صورت همگن است. بنابراین کلاسترها می‌توانند به قسمت‌هایی از لایه‌های خاک نسبت داده شوند. رفتارهای مربوط به یک کلاستر برای تمام المان‌ها در آن کلاستر به کار برده می‌شوند. بعد از ایجاد یک مدل مقطع عرضی، مش‌بندی دوبعدی انجام می‌شود. یک مش دوبعدی اجزای محدود از ۶ گره ساخته می‌شود. مثلث‌ها به صورت خودکار و براساس ترکیب کلاسترها و خطوط در مدل هندسی به وجود می‌آیند. اگر مش‌بندی دوبعدی رضایت‌بخش باشد، بعد سوم به وسیله‌ی تعیین مختصات Z در صفحه‌ی عمودی توسعه می‌یابد که برای ساخت مدل سه‌بعدی مورد نیاز می‌باشد. برای ساخت یک مدل سه‌بعدی، دو مؤلفه‌ی دیگر نیز مورد نیاز است که در ذیل شرح داده شده‌اند.

۴-۳-۴ صفحات Z

صفحات Z، صفحات مقطع عرضی عمودی با مختصات Z متفاوت می‌باشند که برای ساخت مدل سه‌بعدی اجزای محدود از مدل دوبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمامی صفحات Z یکسان هستند، اما فاصله‌ی آنها ممکن است توسط تعریف مختصات Zهای ورودی متغیر باشد. چنانچه فاصله‌ی بین دو صفحه‌ی Z متوالی بسیار زیاد باشد، در جریان مراحل ایجاد مش‌بندی سه‌بعدی متوسط فاصله‌ی بین صفحات Z به طور خودکار به عنوان صفحات فرعی در نظر گرفته می‌شود. از صفحات Z برای فعال کردن یا بی اثر کردن بارهای نقطه‌ای، بارهای خطی و صفحه‌ای و یا بولت‌ها استفاده می‌شود و می‌توان از آنها برای مدل‌سازی همگرایی در لاینینگ تونل‌ها بهره جست.

۴-۳-۵ Slices

Slice حجم بین دو صفحه‌ی مجاور است که می‌توان از آن برای فعال کردن یا بی اثر کردن حجم خاک، صفحات، بارگذاری خطی، بارهای توزیع شده، کرنش حجمی یا فشار آب استفاده کرد. در یک مش سه‌بعدی اجزای محدود سه جزء وجود دارد که در ذیل توضیح داده شده است.

۴-۳-۶- المان^۱

در هنگام تولید مش‌ها، Slice‌ها به المان‌های گوه‌ای ۱۵ گره‌ای تقسیم می‌شوند. این المان‌ها از رویه‌های مثلثی ۶ گره‌ای مانند مش‌های دوبعدی و رویه‌های چهار ضلعی ۸ گره‌ای در جهت z تشکیل شده‌اند. در مجموع المان‌های حجمی که به طور کلی در مدل کردن خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند، همساز المان‌های صفحه‌ای ۸ گره‌ای و المان‌های مشترک ۱۶ گره‌ای هستند که قادرند اثر متقابل رفتار سازه و خاک را مدل کنند.

۴-۳-۷- گره^۲

المان‌های گوه‌ای که در برنامه‌ی PLAXIS 3D TUNNEL استفاده شده‌اند، شامل ۱۵ گره هستند. المان‌های همجوار به وسیله‌ی گره‌های مشترک به یکدیگر متصل هستند. در مدت محاسبات اجزای محدود، جابه‌جایی‌های U_x ، U_y و U_z در گره‌ها محاسبه می‌شوند. همچنین می‌توان برای ایجاد نمودار نیرو-جابه‌جایی، گره‌ها را از قبل انتخاب کرد.

۴-۳-۸- نقاط تنش^۳

در مقایسه‌ی بین جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها در نقاط انتگرال‌گیری گوس، نقاط تنش نسبت به گره‌ها سریع‌تر محاسبه می‌شوند و اولویت دارند. یک المان گوه‌ای ۱۵ گره‌ای شامل شش نقطه تنش

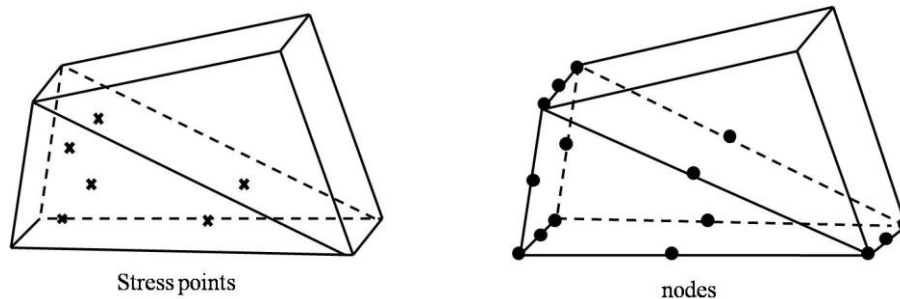
¹ Element

² Node

³ Stress Point

می باشد که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. می توان نقاط تنش را برای تعیین مسیر تنش ها یا

ترسیم نمودار تنش- کرنش از قبل انتخاب نمود. [۱۱]

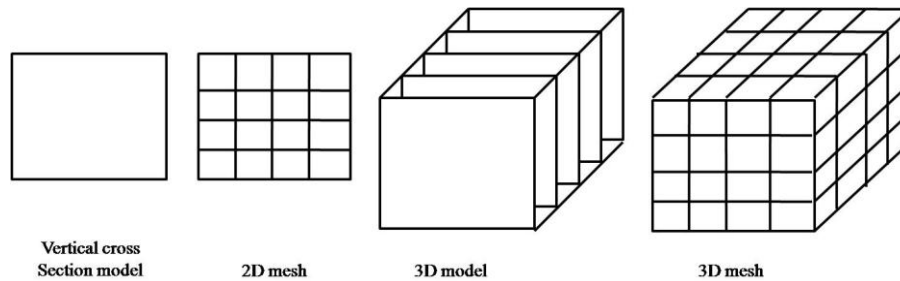


شکل (۴-۲): گره ها و نقاط تنش در المان های گوه ای ۱۵ گره ای [۱۱]

۴-۴- اطلاعات ورودی

به منظور انجام یک آنالیز سه بعدی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL باید یک مدل سه بعدی ایجاد کرده و خواص مواد و مصالح و شرایط مرزی را در آن لحاظ کرد. برای ایجاد یک مدل سه بعدی در ابتدا باید یک مدل از مقطع عرضی در صفحه $x-y$ ساخته شود که این مدل، ترکیبی از نقاط، خطوط و سایر اجزاء می باشد. بعد از ساخت مدل مقطع عرضی یا مدل دوبعدی، مش بندی دوبعدی اجزای محدود برای این مدل انجام می شود. سپس مدل سه بعدی توسط مشخص نمودن مختصات مربوط به جهت z در جهت عمود بر مدل دوبعدی ساخته می شود. مدل سه بعدی از صفحات مساوی و موازی z و Slice ها تشکیل می شود. یک Slice به عنوان حجم بین دو صفحه متوالی z تعریف می شود. مدل سه بعدی توسط مش بندی دوبعدی در جهت z به وجود خواهد آمد. پس از مش بندی سه بعدی، نرم افزار اجازه ی تغییر هندسی در جهت z را نخواهد داد. به هر حال در هنگام تعریف مراحل محاسبات می توان بارگذاری ها و هندسه ی مدل را در صفحات z و Slice ها فعال و یا غیرفعال کرد. در شکل (۴-۳) ایجاد مدل سه بعدی و مش بندی اجزای محدود نشان داده شده است. به منظور سهولت در ایجاد مدل پیشنهاد می شود در برنامه ی ورودی برای ترسیم مدل مقطع عرضی دوبعدی و ایجاد مدل سه بعدی، آیتم های ورود اطلاعات به ترتیب از سمت چپ به راست نوار

ابزار هندسی انتخاب شوند. برای ساخت مدل بهتر است به ترتیب محیط مقطع عرضی، لایه‌های خاک، موارد ساختمانی، ساختار لایه‌ها، شرایط مرزی و در نهایت بارگذاری‌ها ایجاد شوند.



شکل (۴-۳): ایجاد مدل سه‌بعدی و مش‌بندی اجزای محدود [۱۱]

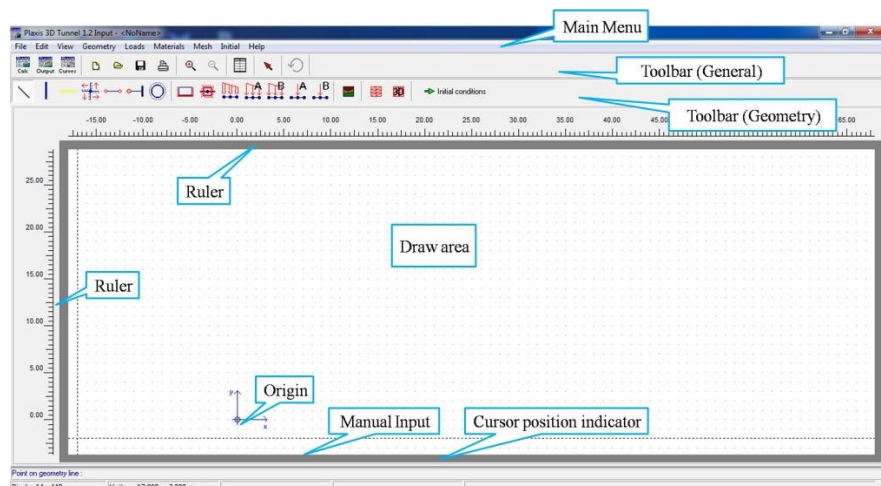
۴-۵- وارد کردن اطلاعات

در این برنامه ورود اطلاعات توسط ماوس و صفحه کلید انجام می‌شود. به طور کلی چهار نوع از اطلاعات در این برنامه وارد می‌شوند:

- اطلاعات هندسی پروژه (مانند کشیدن یک لایه خاک)
- اطلاعات نوشتاری (مانند وارد کردن نام پروژه)
- اطلاعات مربوط به مقادیر (مانند وارد کردن وزن حجمی خاک)
- اطلاعات مربوط به انتخاب گزینه‌ها (مانند انتخاب یک مدل خاک)

۴-۶- برنامه‌ی ورودی

برنامه‌ورودی شامل امکانات برای ساخت و ویرایش مدل مقطع عرضی، مش‌بندی دوبعدی و سه‌بعدی اجزای محدود و محاسبه‌ی شرایط ابتدایی می‌باشد. ایجاد و محاسبه‌ی شرایط ابتدایی در یک مدل جداگانه از برنامه‌ی ورودی انجام می‌شود. در شکل (۴-۴) پنجره‌ی اصلی برنامه‌ی ورودی نشان داده شده است.



شکل (۴-۴): پنجره اصلی برنامه‌ی ورودی (مد ساخت هندسه‌ی مدل)

۴-۶-۱- منوی اصلی^۱

منوی اصلی تمامی گزینه‌هایی که از نوار ابزار در دسترس هستند و همچنین گزینه‌هایی که خیلی مورد استفاده نیستند را شامل می‌شود.

۴-۶-۲- منوی ورودی^۲

منوی ورودی تمامی آیتم‌های ورودی و تسهیلات کاربردی از برنامه‌ی ورودی را شامل می‌شود. بیشتر آیتم‌ها از کلیدهای نوار ابزار در دسترس هستند.

۴-۶-۳- نوار ابزار عمومی^۳

این نوار ابزار شامل کلیدهایی برای فعالیت‌های عمومی همانند پرینت، بزرگ و کوچک کردن تصویر و انتخاب موضوعات هندسی می‌باشد. این نوار ابزار همچنین شامل کلیدهایی برای آغاز سایر برنامه‌های بسته‌ی نرم‌افزاری PLAXIS 3D TUNNEL یعنی برنامه‌های Calculations، Output و Curves می‌باشد.

¹ Main Menu

² Input Menu

³ General Toolbar

۴-۶-۴- نوار ابزار هندسی^۱

این نوار ابزار شامل کلیدهایی ایجاد مدل مقطع عرضی و سایر موضوعات هندسی می‌باشد. این کلیدها به صورتی طراحی شده‌اند که استفاده از آنها از سمت چپ به سمت راست باعث تعریف یک مدل کامل می‌شود.

۴-۶-۵- خط‌کش

در قسمت‌های چپ و بالای صفحه‌ی ترسیم، خط‌کش‌ها مختصات فیزیکی X و Y را نشان می‌دهند که این خط‌کش‌ها را می‌توان از منوی View فعال یا غیرفعال کرد.

۴-۶-۶- محیط ترسیم^۲

در صفحه‌ی ترسیم می‌توان یک مدل مقطع عرضی را ایجاد و ویرایش کرد. صفحه‌ی ترسیم این نرم‌افزار همانند برنامه‌های معمولی ترسیم ویندوز می‌باشد.

۴-۶-۷- محورهای مختصات

اگر ابعاد فیزیکی مدل در داخل محدوده‌ی اندازه‌های تعریف شده، داده شده باشند، محورها توسط یک دایره‌ی کوچک و دو محور عمود بر هم X و Y نشان داده می‌شوند

۴-۷- وارد کردن اطلاعات به صورت دستی^۳

در ترسیم دقیق به وسیله‌ی ماوس امکان‌پذیر نباشد، می‌توان از این قسمت برای وارد کردن مقادیر مورد نظر استفاده کرد. این امر به وسیله‌ی تایپ کردن مقادیر X و Y مورد نظر و استفاده از کلید

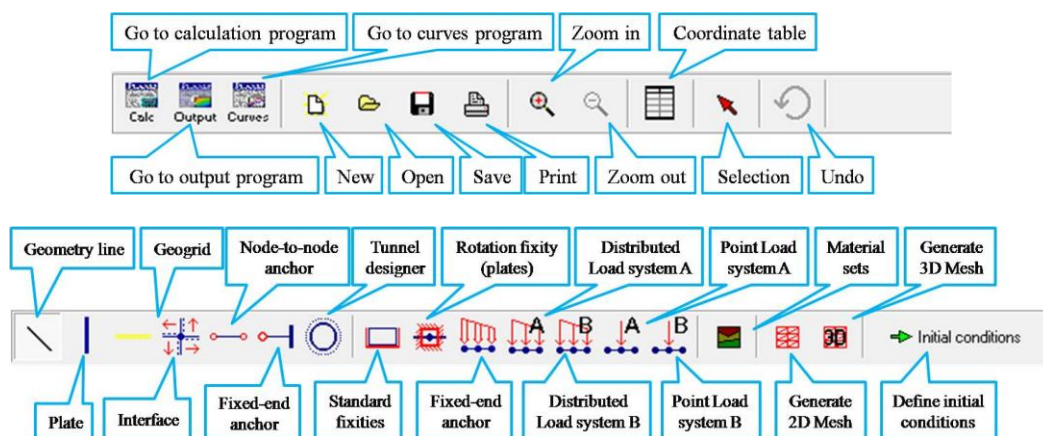
¹ Geometry Toolbar

² Draw Area

³ Manual Input

space صفحه کلید انجام می شود (x-value <space> y-value). مختصات تمامی موضوعات هندسی غیر از Rotation fixities را می توان بدین صورت وارد نمود.

در شکل (۴-۵) نوارهای ابزار برنامه ی PLAXIS 3D TUNNEL نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): نوارهای ابزار برنامه ی PLAXIS 3D TUNNEL

موضوعات هندسی شامل موارد زیر می باشد: صفحات، ژئوگریدها، صفحات مشترک و تونل می باشد که در زیر به طور خلاصه به آن پرداخته می شود.

صفحات^۱


صفحات، موضوعات سازه ای هستند که برای مدل سازی سازه های شبه دوبعدی نازک با یک سختی پیچشی معین (یا مقاومت خمشی) و با یک صلیبیت نرمال در یک مدل سه بعدی استفاده می شوند. در این نرم افزار صفحات برای شبیه سازی تأثیر دیواره ها، صفحات، نگهداری یا لاینینگ هایی که در جهت Z توسعه یافته اند، استفاده می شوند.

ژئوگریدها^۲

¹ Plates

² Geogrids

ژئوگریدها سازه‌های شبه دوبعدی نازک با یک سختی نرمال هستند که سختی خمشی ندارند. ژئوگریدها فقط می‌توانند نیروهای کششی را تحمل کنند و تحمل نیروهای فشاری را ندارند. در این نرم‌افزار از ژئوگریدها غالباً برای مدل‌سازی تقویت خاک استفاده می‌شود.

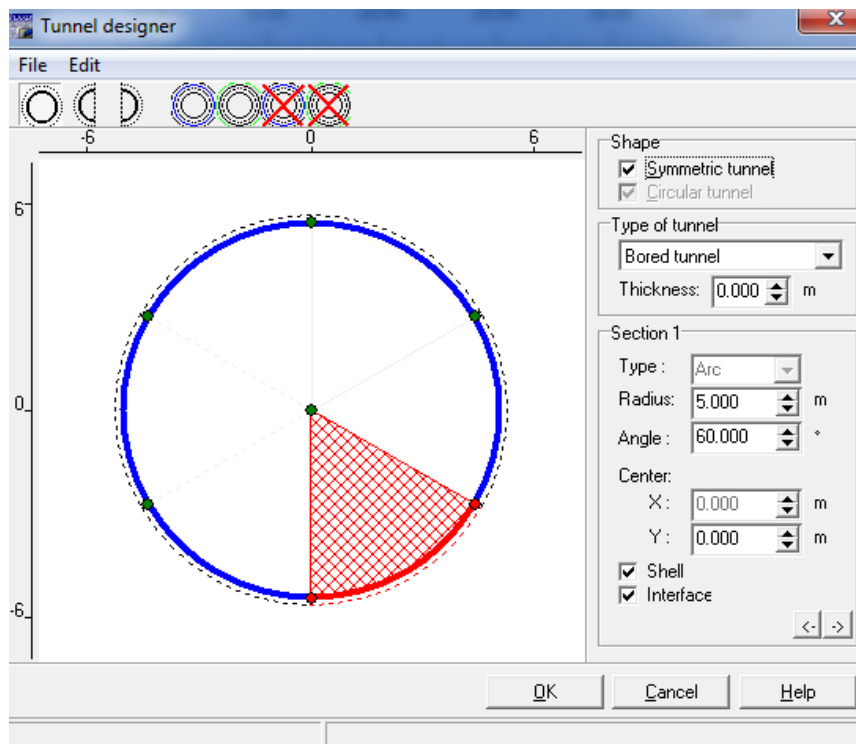
صفحات مشترک^۱ 

صفحات مشترک برای مدل‌سازی عکس‌العمل بین سازه و خاک موسوم به عکس‌العمل سازه-خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین می‌توان صفحات مشترک را همراه خطوط هندسی و تونل‌ها برای شبیه‌سازی صفحات ناتراوا استفاده کرد. یک مورد مشخص از کاربرد صفحات مشترک را می‌توان در مدل‌سازی عکس‌العمل بین پوشش تونل و خاک اطراف آن دانست که این صفحه‌ی مشترک واسط بین یک جسم نرم و یک جسم بسیار سخت است. عکس‌العمل بین این دو به وسیله‌ی انتخاب مقادیر مناسب برای فاکتور کاهش نیرو در صفحات مشترک که با نام R_{inter} نشان داده می‌شود، صورت می‌گیرد. این فاکتور نسبت مقاومت سطح مشترک (اصطکاک دیواره و چسبندگی) به مقاومت خاک (زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی) می‌باشد.

تونل‌ها 

این گزینه را می‌توان برای ایجاد مدل مقطع عرضی تونل‌های دایره‌ای و غیردایره‌ای در مدل مقطع اصلی به کار برد. مقطع عرضی یک تونل ترکیبی از خطوط و قوس‌ها می‌باشد که می‌توان به صورت دلخواه صفحات مشترک و پوششی (لاینینگ و سایر ابزار نگهداری تونل) را برای آن انتخاب کرد. مقطع عرضی یک تونل را می‌توان بر روی حافظه‌ی کامپیوتر ذخیره کرد و در سایر پروژه‌ها از آن استفاده کرد. [۱۱]

¹ Interfaces



شکل ۴-۶: پنجره Tunnel designer

فصل پنجم

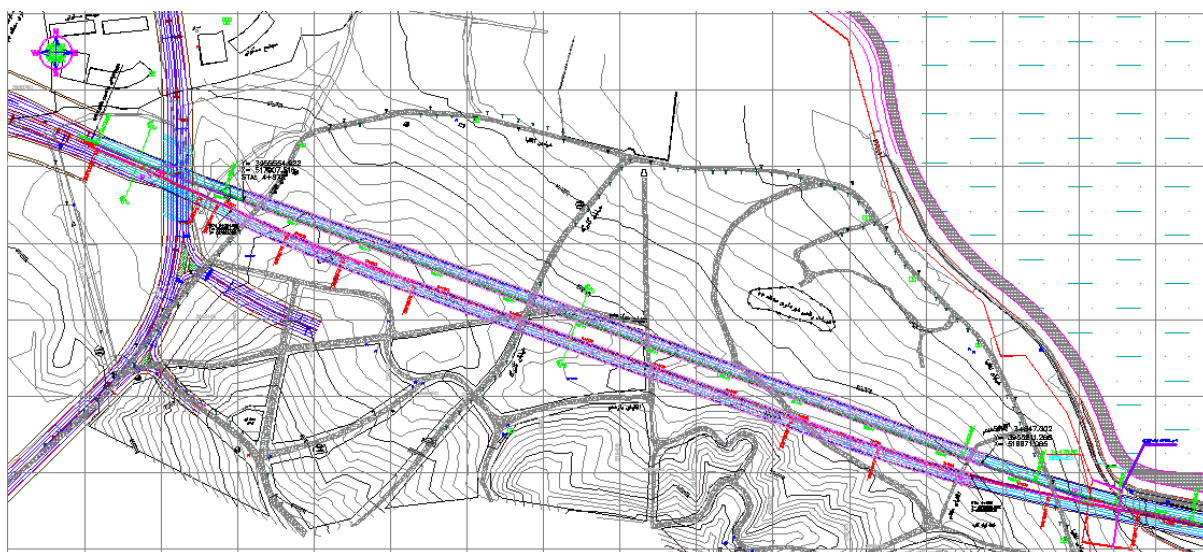
مطالعه‌ی موردی تونل دوقلوی حکیم در محل
پارک چیتگر تهران

۵-۱- مقدمه

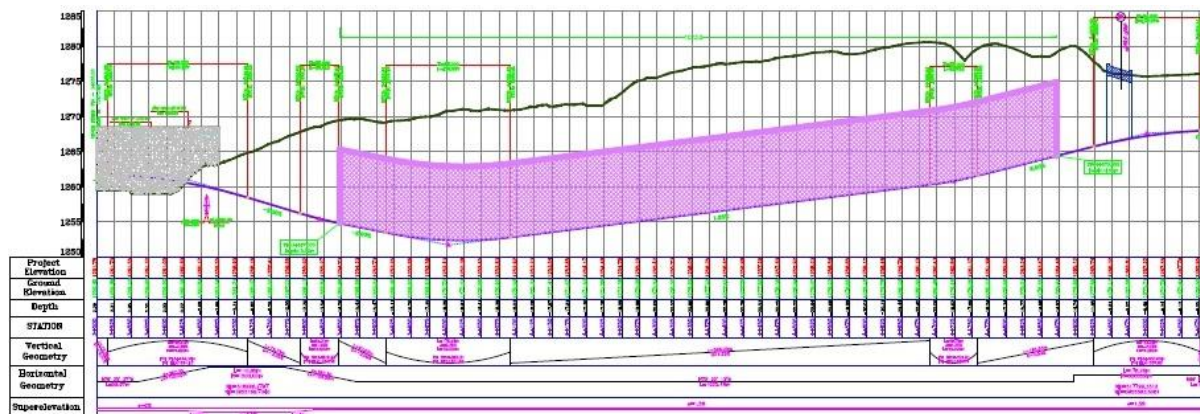
در سال‌های اخیر نیاز به طراحی و ساخت تونل‌های شهری، به‌ویژه به‌منظور حمل‌ونقل، افزایش قابل توجهی یافته‌است. اجرای تونل‌های بزرگراهی به شکل‌های مختلفی صورت می‌گیرد که یکی از رایج‌ترین آن حالت دوقلو (Twin tunnels) می‌باشد. تونل دو قلوی حکیم در واقع ادامه‌ی بزرگراه حکیم است که در محل پارک جنگلی چیتگر به صورت تونل در نظر گرفته شده‌است. طول این تونل حدود ۱۰۰۰ متر با عرض دهانه‌ی داخلی ۱۵/۹ متر و ارتفاع خالص ۱۱/۹ متر می‌باشد.

عرض مفید راه ۱۴/۵ متر و شیب طولی مجاز تونل ۰/۵٪ در نظر گرفته شده‌است. با توجه به سطح مقطع نسبتاً بزرگ تونل‌های این پروژه و ویژگی‌های ژئوتکنیکی محدوده، انتخاب روشی مناسب جهت حفاری به طوری که ضمن اجرایی بودن و تأمین ایمنی لازم حین اجرا، الزامات پروژه از قبیل زمان‌بندی و غیره را برآورده سازد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این امر تا حدود زیادی می‌تواند موفقیت اجرای پروژه را تحت تأثیر قرار دهد. [۱۲]

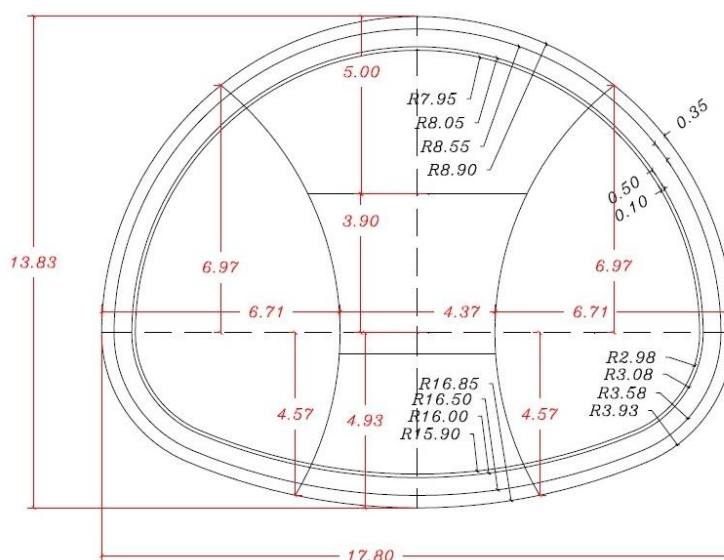
۵-۲- پلان و پروفیل مسیر و مقطع هندسی تونل



شکل (۵-۱): پلان تونل دوقلوی حکیم [۱۲]



شکل (۵-۲): پروفیل تونل شمالی [۱۲]



شکل (۵-۳): مقطع هندسی تونل بر مبنای گزارش انتخاب مقطع عرضی تونل (تمام اندازه‌ها به متر می‌باشد) [۱۲]

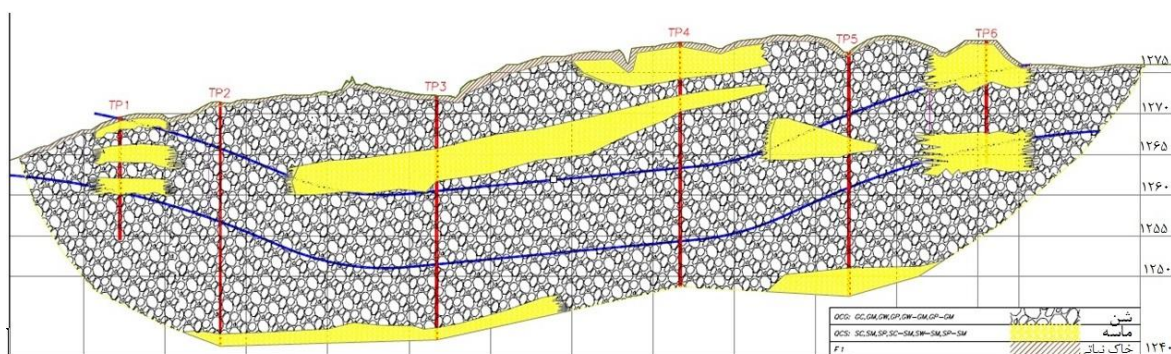
۵-۳- مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک محدوده‌ی پروژه

باتوجه به نتایج لوگ گمانه‌ها و چاهک‌ها و نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و مشاهدات صحرائی، دو واحد خاکی (Engineering soil unit) در مسیر عبور تونل تفکیک شده‌است. این دو واحد خاکی

عبارتند از:

(۱) واحد QCG: این واحد عمدتاً از ذرات در حد شن تشکیل شده و مطابق با طبقه‌بندی USCS در گروه خاک‌های GC, GM, GW, GP, GW-GM, GP-GM قرار می‌گیرد. بخش ریزدانه این واحد خاکی معمولاً کمتر از ۳۲ درصد می‌باشد.

(۲) واحد QCS: این واحد درشت‌دانه عمدتاً از ذرات در حد ماسه تشکیل شده و مطابق با طبقه‌بندی USCS در گروه خاک‌های SC, SM, SP, SC-SM, SW-SM, SP-SM قرار می‌گیرد. بخش ریزدانه این واحد خاکی معمولاً بین ۵ تا ۴۶ درصد متغیر است. در شکل ۲ برش زمین‌شناسی مسیر تونل ارائه شده‌است.



شکل (۴-۵): مقطع عرضی مسیر تونل [۱۲]

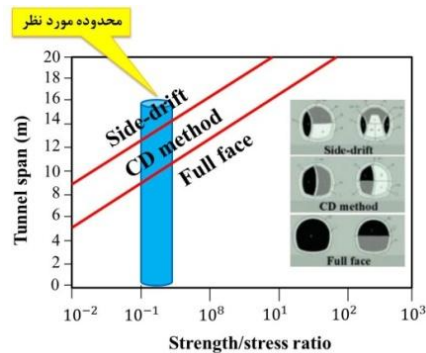
در این پروژه، سطح آب زیرزمینی در اعماق بیشتر از ۸۰ متر قرار دارد. مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی بیان شده در جدول زیر ارائه شده‌است. [۱۲]

جدول (۱-۵): مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی [۱۲]

K_0	Φ (degree)	C (kg/cm ²)	E_s (unloading) (kg/cm ²)	E_s (loading) (kg/cm ²)	γ	γ_d (KN/m ³)	ω (%)	پارامتر
۰/۴۳	۳۵	۰/۳۵	۲۵۰۰	۹۰۰	۰/۳۸	۱۹/۶	۱۸/۴	QCG
۰/۵	۳۰	۰/۴	۲۱۵۰	۸۰۰	۰/۳۸	۱۹/۷	۱۸/۳	QCS

۴-۵- انتخاب روش مناسب حفاری

انتخاب روش مناسب حفاری براساس شرایط تونل شامل مقاومت زمین و ابعاد دهانه‌ی حفاری، توسط تونل‌سازان و محققین متعددی مورد بررسی قرار گرفته و براساس تجربیات کسب شده، جداول و نمودارهایی ارائه شده‌است. این جداول و نمودارها در مرحله‌ی قبلی مطالعات مورد بررسی قرار گرفت. نمودار نشان داده شده در شکل (۵-۵) این انتخاب را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۵): روش‌های مختلف حفاری براساس مقاومت زمین و ابعاد دهانه‌ی تونل [۱۳]

بدین ترتیب بر اساس مطالعات پایه، روش گالری‌های جانبی (روش شاخ بزی) جهت حفاری تونل پیشنهاد می‌گردد. در این روش دو گالری در کناره‌های تونل حفاری می‌شود و در مراحل بعدی قسمت میانی تونل حفاری شده و اقدام به حذف نگهداری داخل مقطع می‌گردد. از ویژگی‌های این روش توزیع مناسب تنش و کنترل خوب نشست سطح زمین می‌باشد. این روش بیشتر برای تونل‌های با سطح مقطع بزرگ کاربرد دارد. مقطع شماتیک و نمونه‌های اجرایی این روش در شکل (۶-۵) نشان داده شده‌است.



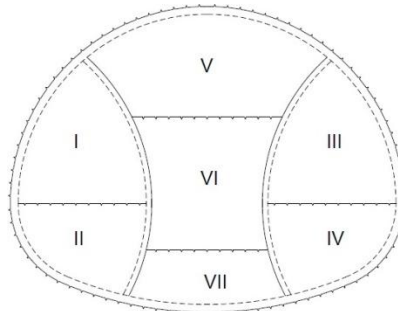
شکل (۶-۵): نمونه‌ی اجرا شده از این مقطع در تونل صدر- نیایش



شکل (۷-۵) : نمونه‌ی اجرایی از روش گالری‌های کناری

۵-۵- حفاری تونل بر اساس روش انتخاب شده

با توجه به روش اجرای پیشنهادی، مقطع تونل به هفت فاز حفاری تقسیم می‌شود که در شکل (۸-۵) بصورت مراحل یک تا هفت شماره گذاری شده‌است.



شکل (۸-۵) : مراحل اجرای تونل

پس از ایجاد سیستم نیلینگ و فورپولینگ در بالای تاج تونل، مرحله‌ی بعد شامل رگلاژ (صاف کردن) سینه کار از فاصله‌ی نیم‌متری بالای تاج تونل می‌باشد. در ادامه پس از رگلاژ جبهه کار با توجه به زاویه‌ی قرارگیری ترانشه نسبت به تونل و افزایش عرض ظاهری تونل، اجرای لتیس با فاصله‌داری نیم-متر قبل از ورود به تونل اصلی اجرا خواهد شد.

ترتیب مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری اولیه بصورت ذیل می‌باشد:

الف - حفاری مقطع با گام طراحی شده

ب- اجرای لایه اول شاتکریت

ج- اجرای لایه اول مش

د- نصب لتیس

ه- اجرای شاتکریت

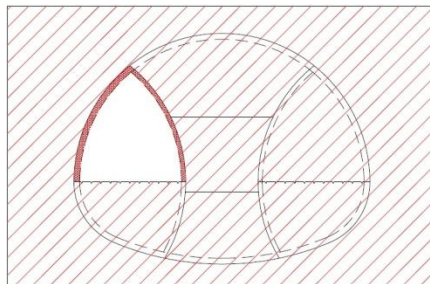
و- نصب لایه دوم مش و در نهایت اجرای شاتکریت نهایی

با توجه به گزارش "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه‌ی تونل حکیم"، گام پیشروی (و فواصل نصب لتیس) ۶۵ سانتیمتر، ضخامت شاتکریت در دیواره‌ی اصلی تونل ۳۵ سانتیمتر و در دیواره‌های موقت گالری‌های کناری ۲۵ سانتیمتر طراحی شده‌است. [۱۴]

مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری به ترتیب زیر خواهد بود:

۵-۵-۱- مرحله‌ی اول (Stage 1)

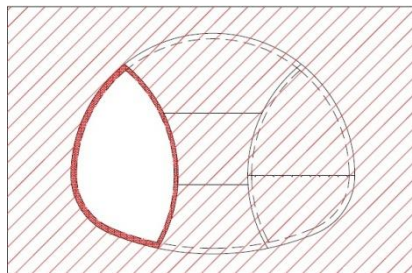
پس از حفاری ترانشه و پایین رفتن تراز کف ترانشه تا تراز درنظر گرفته‌شده برای کف Stage 1 حفاری، حفاری Stage 1، با رعایت گام حفاری طراحی شده و نصب سیستم نگهداری شامل نصب لتیس و شاتکریت به همراه دو لایه مش به ضخامت ۳۵ سانتیمتر برای سقف و دیواره‌ی اصلی تونل و شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر به همراه دو لایه مش برای دیواره موقت، آغاز خواهد شد. گام حفاری و فواصل نصب لتیس با تغییر شرایط خاک قابل تغییر خواهد بود.



شکل (۵-۹): مرحله اول حفاری و تحکیم

۵-۵-۲- مرحله‌ی دوم (Stage 2)

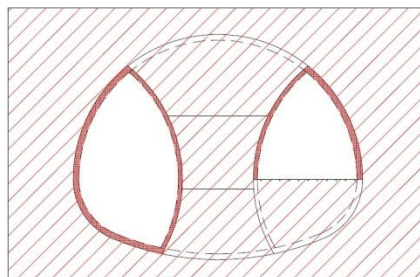
پس از پیشروی بخش فوقانی گالری کناری (Stage 1) حفاری Stage 2 با ایجاد یک رمپ با شیب مناسب جهت تردد ماشین آلات آغاز خواهد شد. بدین ترتیب به دو رمپ یکی در ابتدای تونل و دیگری در فاصله‌ی حدود ۱۰ تا ۱۵ متری جبهه کار Stage 1 نیاز خواهد بود. پیشروی این دو مرحله به دنبال هم و با حفظ فاصله‌ی مناسب ادامه خواهد یافت. حفاری Stage 2 با رعایت گام حفاری و نصب سیستم نگهداری، شامل نصب لتیس و شاتکریت به همراه دو لایه مش به ضخامت ۳۵ سانتیمتر برای دیواره‌ی اصلی تونل و کف و شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر به همراه دو لایه مش و لتیس برای دیواره‌ی موقت، انجام خواهد شد.



شکل (۵-۱۰): مرحله دوم حفاری و تحکیم

۵-۵-۳- مرحله‌ی سوم (Stage 3)

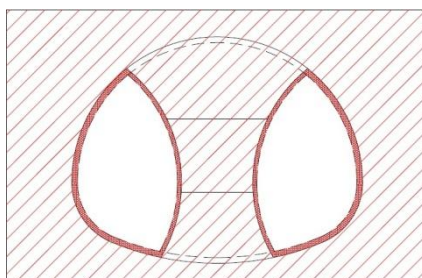
حفاری Stage 3 همانند Stage 1 با رعایت گام حفاری و نصب سیستم نگهداری شامل نصب لتیس و شاتکریت به همراه دو لایه مش به ضخامت ۳۵ سانتیمتر برای سقف و دیواره‌ی اصلی تونل و شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر به همراه دو لایه مش برای دیواره‌ی موقت، آغاز خواهد شد.



شکل (۵-۱۱): مرحله سوم حفاری و تحکیم

۵-۵-۴- مرحله‌ی چهارم (Stage 4)

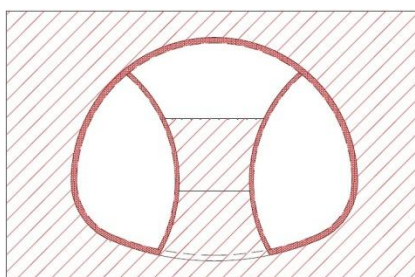
این مرحله نیز با ایجاد دو رمپ مانند Stage 2 قابل حفاری خواهد بود.



شکل (۵-۱۲): مرحله چهارم حفاری و تحکیم

۵-۵-۵- مرحله‌ی پنجم (Stage 5)

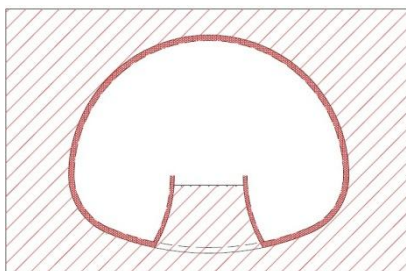
پس از حفاری گالری‌های کناری تونل، حفاری بخش میانی با شروع حفاری از بالای تونل آغاز خواهد گردید. ایجاد یک رمپ شیبدار در ابتدای تونل برای دسترسی و حفاری این بخش از تونل لازم خواهد بود. با پیشروی این بخش با گام‌های حفاری در نظر گرفته‌شده، سیستم نگهداری شامل نصب لیس و اتصال آن به سیستم نگهداری دیواره‌ی اصلی گالری‌های کناری و شاتکریت به ضخامت ۳۵ سانتیمتر برای سقف تونل به همراه دو لایه مش اجرا خواهد شد. مطابق با شرایط خاک و روباره تونل، در این بخش ممکن است نیاز به پیش تحکیم و اجرای فورپولینگ باشد.



شکل (۵-۱۳): مرحله پنجم حفاری و تحکیم

۵-۵-۶- مرحله‌ی ششم (Stage 6)

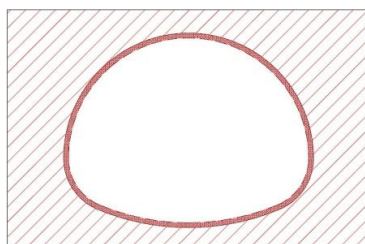
در این مرحله قسمت دوم بخش میانی حفاری شده و دیواره موقت گالری‌های میانی تخریب خواهد شد.



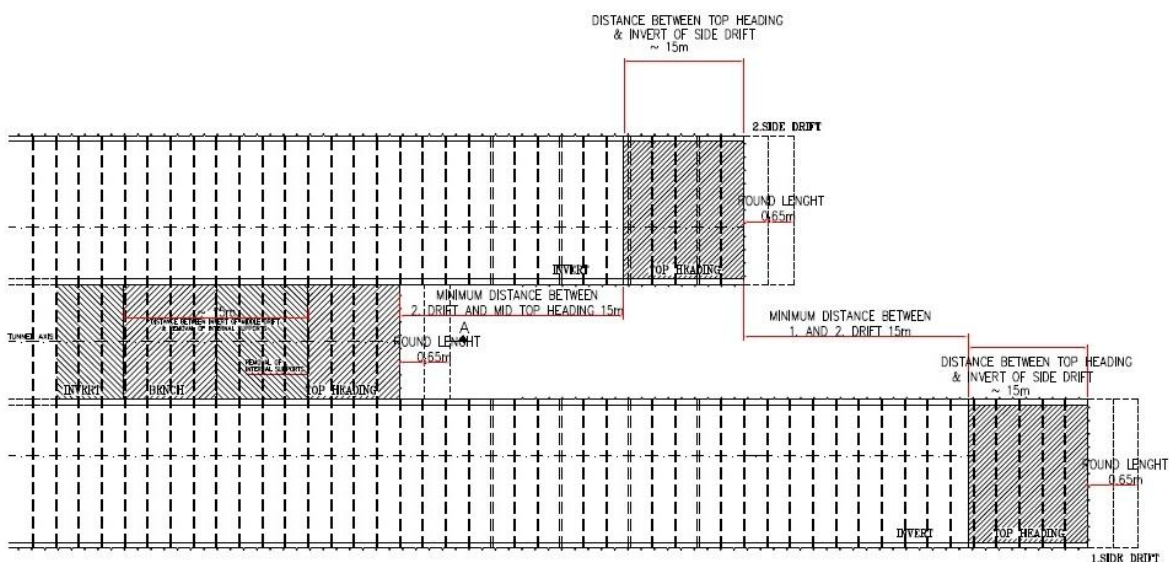
شکل (۵-۱۴): مرحله ششم حفاری

۵-۷-۵- مرحله‌ی هفتم (Stage 7)

این مرحله شامل حفاری قسمت سوم بخش میانی، تخریب دیواره موقت گالری‌های کناری و تکمیل سیستم نگهداری کف خواهد بود.



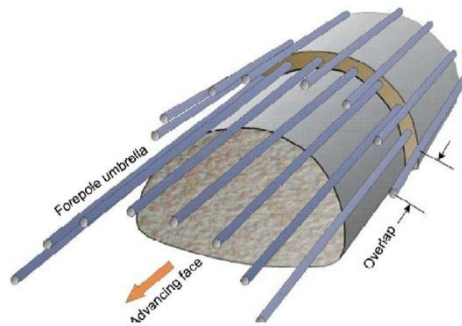
شکل (۵-۱۵): مرحله هفتم حفاری و تحکیم کامل تونل



شکل (۵-۱۶): مراحل حفاری (نمای پلان) [۱۲]

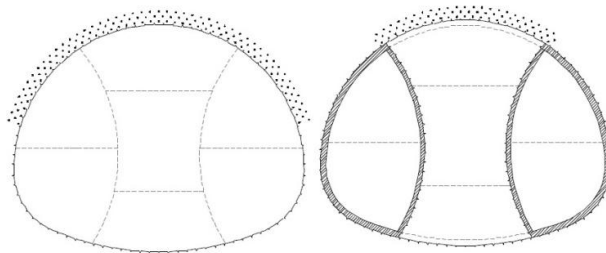
همانگونه که در شکل بالا نشان داده شده‌است، فواصل ۱۵ متر بین پیشروی گالری‌های کناری (بین Stage 2 و Stage 3) طراحی شده‌است. همچنین پیشروی بخش میانی نیز با فاصله‌ی ۱۵ متر از

پیشروی گالری کناری می‌باشد. در مقطعی که روباره کمتر از دهانه‌ی تونل باشد، طبق تجربه، احتمال ناپایداری جبهه‌ی کار وجود دارد که برای پیشگیری از ناپایداری جبهه‌ی کار، فورپولینگ در این مقاطع لازم است. یکی از روش‌های نگهداری موقت و ایجاد سیستم مناسب جهت حفاری تونل، استفاده از سیستم فورپولینگ یا لوله گذاری چتری می‌باشد. فورپولینگ شامل اجرای لوله به موازات محور تونل یا در زوایه‌ی مناسب نسبت به آن می‌باشد. این لوله‌ها و فضای اطراف آن با تزریق دوغاب پر شده و نوعی چتر نگهبان در بالای سقف تونل ایجاد می‌کند.

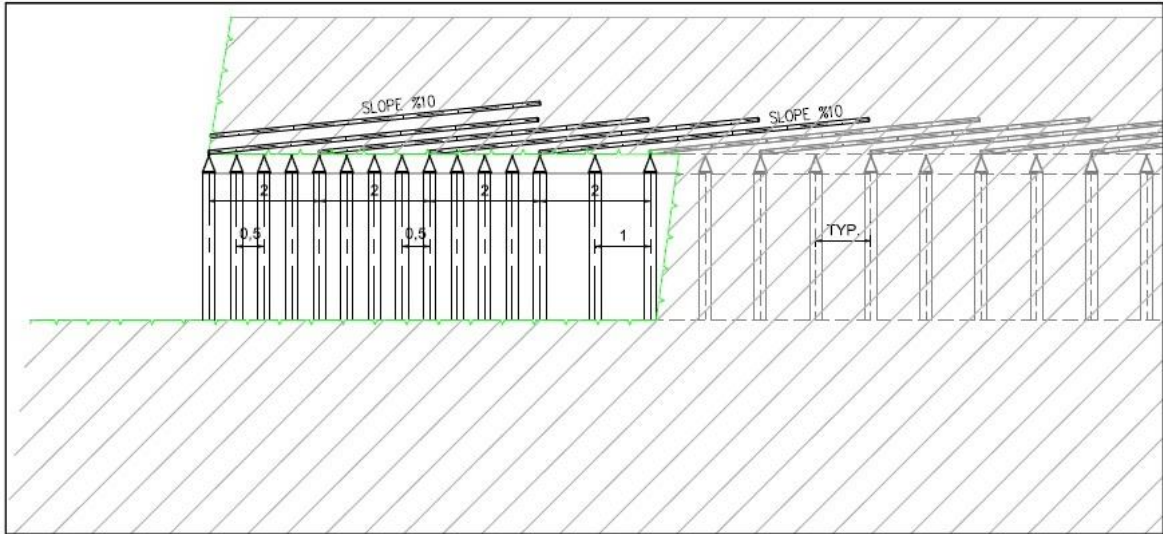


شکل (۵-۱۷): حفاری مرحله به مرحله و اجرای فورپولینگ با همپوشانی مناسب لوله‌ها

در مقطعی که روباره کلی تونل کمتر از حدود ۸ متر باشد، برای حفاری مرحله‌ی پنجم احتمال نیاز به اجرای فورپولینگ وجود دارد. مراحل این کار به طور شماتیک در شکل‌های زیر نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۸): شماتیک اجرای فورپولینگ در مقطع دهانه (سمت راست) و در طول مسیر (سمت چپ) [۱۲]



شکل (۵-۱۹): شماتیک اجرای فورپولینگ در طول مسیر (پروفیل طولی) [۱۲]



شکل (۵-۲۰): حفاری و نصب فورپولینگ با جامبو دریل

با توجه به فواصل ۶۵ سانتیمتر برای گام حفاری (و نصب لتیس) ، استفاده از روش تحلیلی برای محاسبه طرح فورپولینگ نشان می‌دهد که استفاده از لوله‌های سوراخ‌دار به طول ۶ متر، دارای قطر خارجی ۷۶ میلیمتر و ضخامت ۴ میلیمتر، با فاصله داری ۴۵ سانتیمتر که پس از هر سه گام پیشروی (فواصل حدود ۲ متری در امتداد محور تونل) نصب می‌شود، مناسب است. لازم به ذکر است که در هر مقطع، لوله‌ها با فواصل ۹۰ سانتیمتری اجرا خواهند شد که پس از هم‌پوشانی حاصل از اجرای مقاطع متوالی (در فواصل ۲ متر) فاصله داری ۴۵ سانتی‌متری تأمین خواهد شد. [۱۴]



شکل (۵-۲۱): نمایی از اجرای S-Pile از بین لتیس‌گریدرها در هر گام حفاری

۵-۶- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه‌ی تونل

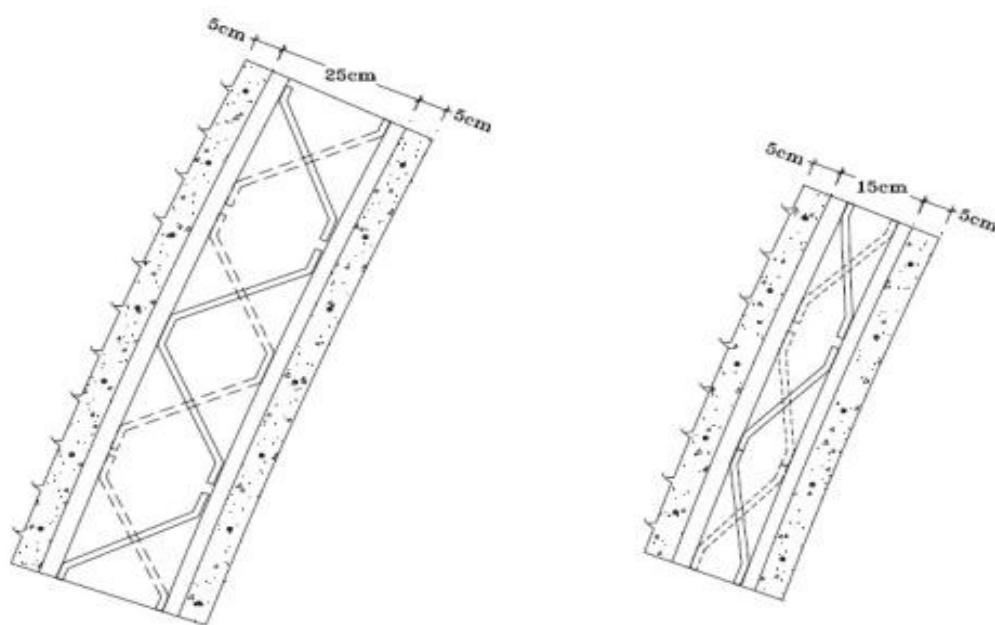
با توجه به اینکه تونل حکیم در یک محیط کاملاً خاکی قرار دارد، جهت تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری بهینه از نرم افزار محیط پیوسته و دو بعدی FLAC استفاده شده‌است. اساس محاسبات نرم افزار FLAC بر مبنای روش عددی تفاضل محدود (Finite Difference) می‌باشد. با توجه به آخرین پروفیل مسیر تونل، متوسط مقدار روباره‌ی تونل حدود ۱۰ متر در نظر گرفته شده‌است.

[۱۴]

۵-۷- نتیجه‌گیری سیستم نگهداری اولیه‌ی تونل حکیم

جهت پایداری دیواره‌های اصلی و موقت تونل حکیم ترکیب شاتکریت و لتیس سه لبه به عنوان تحکیمات اولیه‌ی تونل، در مدل‌های عددی آنالیز شده‌است. آنالیزها نشان می‌دهد که در دیواره‌های دائم ۳۵ سانتیمتر شاتکریت و لتیس سه لبه با ترکیبی از آرماتورهای $\varphi=28$ و $\varphi=32$ و همچنین در دیواره‌های موقت ۲۵ سانتیمتر به همراه لتیس‌های سه لبه با ترکیبی از آرماتورهای $\varphi=25$ و $\varphi=32$ به فواصل ۰/۶۵ متر، پایداری تونل را تأمین می‌نماید. مقطع سیستم نگهداری اولیه‌ی دیواره‌های دائم و

موقت طراحی شده تونل حکیم در شکل (۵-۲۲) نشان داده شده‌است. [۱۴]



شکل (۵-۲۲): مقطع سیستم نگهداری اولیه دیواره های دائم (سمت چپ) و دیواره های موقت (سمت راست) [۱۴]

با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی و همچنین مقادیر نیروی محوری و لنگر خمشی بدست آمده، سیستم نگهداری اولیه تونل مذکور به شرح جدول (۵-۲) پیشنهاد می‌شود.

جدول (۵-۲): سیستم نگهداری اولیه تونل چیتگر [۱۴]

سیستم نگهداری پیشنهادی	موقعیت	کلاس
۳۵ سانتیمتر شاکریت به همراه ۲ لایه مش و لتیس به فواصل ۰/۶۵ متر	دیواره های دائم	I
۳۵ سانتیمتر شاکریت به همراه ۲ لایه مش و لتیس به فواصل ۰/۶۵ متر	دیواره های موقت	II

فصل ششم

طراحی تونل با استفاده از نرم افزار

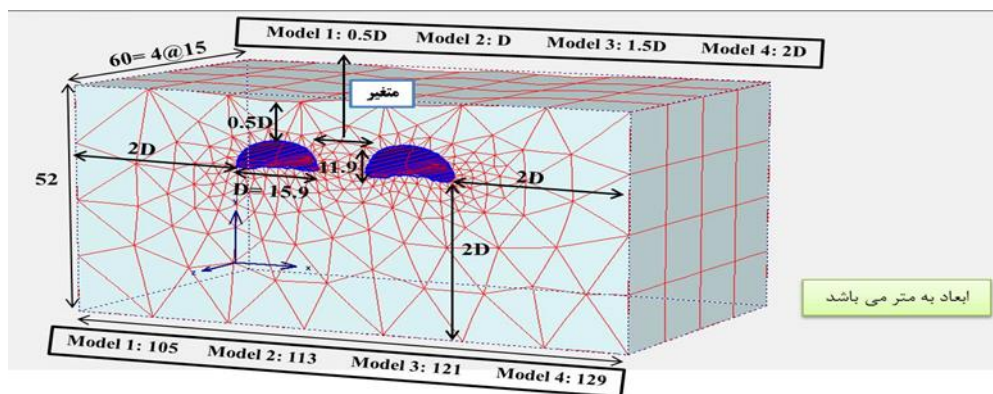
PLAXIS 3D TUNNEL

۱-۶- مقدمه

در این پژوهش ۱۶ مدل هندسی مورد مدل سازی، تحلیل و بررسی قرار گرفته است. این ۱۶ مدل به ۴ قسمت تقسیم شده که در هر قسمت به بررسی ۴ مدل پرداخته شده است. در هر یک از این قسمت ها عمق روباره‌ی تونل ثابت در نظر گرفته شده است و فاصله‌ی میان دو تونل به صورت متغیر می باشد. در قسمت نخست (مدل ۱ تا ۴) عمق روباره‌ی تونل ثابت و به مقدار $0.5D$ (نیم برابر عرض تونل) می باشد، فاصله‌ی میان دو تونل به ترتیب $0.5D$ ، D ، $1.5D$ و $2D$ در نظر گرفته شده است. در قسمت دوم (مدل ۵ تا ۸)، عمق روباره‌ی تونل ثابت و به مقدار D و فاصله‌ی میان دو تونل، متغیر و مشابه چهار مدل نخست می باشد. در قسمت سوم (مدل ۹ تا ۱۲)، عمق روباره‌ی تونل ثابت و به مقدار $1.5D$ و فاصله‌ی میان دو تونل، متغیر و مشابه چهار مدل نخست می باشد. در قسمت چهارم (مدل ۱۳ تا ۱۶)، عمق روباره‌ی تونل ثابت و به مقدار $2D$ و فاصله‌ی میان دو تونل، متغیر و مشابه چهار مدل نخست می باشد.

۲-۶- قسمت اول

مدل عددی ساخته شده به وسیله‌ی نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL در شکل زیر نمایش داده شده است. (مدل ۱ تا ۴)



شکل (۱-۶): ابعاد مدل های عددی ۱ تا ۴

۳-۶- مشخصات خاک و لاینینگ اصلی و فرعی در مدل عددی

با توجه به مشخصات مکانیکی خاک پیرامون تونل (جدول (۵-۱)) و با توجه به وضعیت غالب، مشخصات مکانیکی خاک در مدل سازی عددی مطابق جدول (۶-۱) انتخاب شده است. همچنین مشخصات لاینینگ دائم و موقت مطابق جدول (۶-۲) در مدل سازی عددی منظور شده است.

جدول (۶-۱): مشخصات خاک در مدل عددی [۱۲]

مدل	$\gamma_{unsat}(\text{KN/m}^3)$	$\gamma_{sa}(\text{KN/m}^3)_t$	$E_{ref}(\text{KN/m}^2)$	ϑ	φ°	Ψ	$C_{ref}(\text{KN/m}^2)$
موهر-کولمب	19.6	21.6	9×10^4	0.38	35	5°	35

γ_{unsat} : وزن مخصوص غیراشباع، γ_{sat} : وزن مخصوص اشباع، E_{ref} : مدول الاستیسیته، ϑ : ضریب پواسون، φ : ضریب

اصطکاک داخلی، Ψ : ضریب اتساع، C_{ref} : ضریب چسبندگی

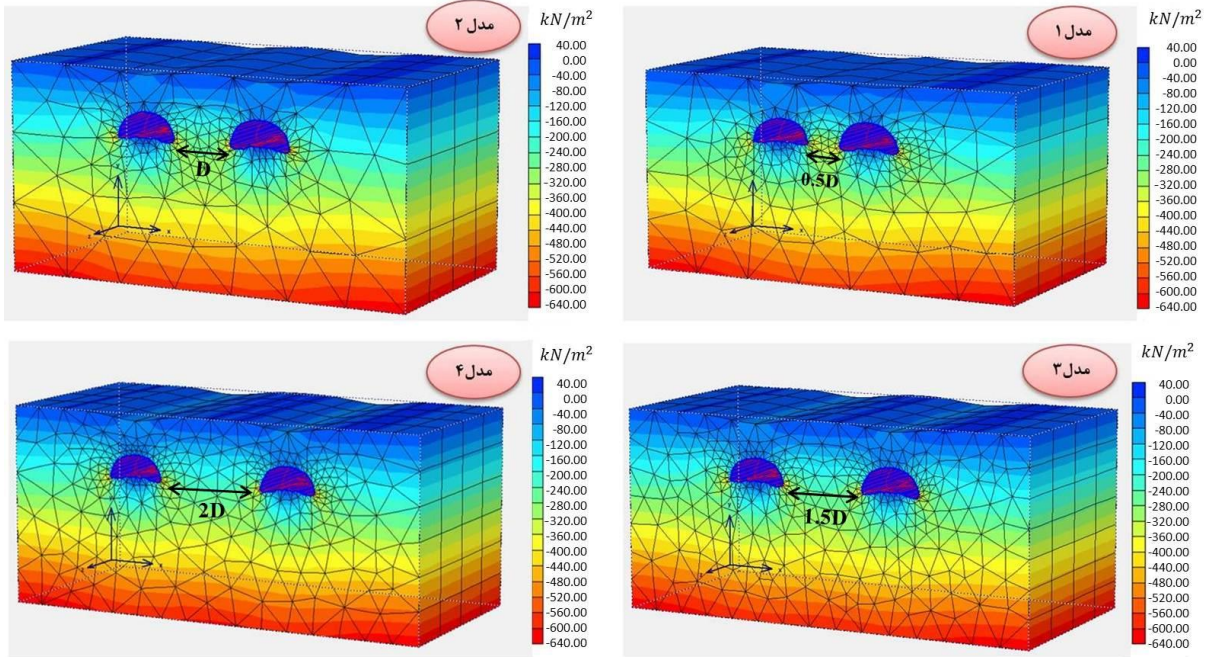
جدول (۶-۲): مشخصات لاینینگ اصلی و فرعی تونل در مدل هندسی

ϑ	w(kN/m/m)	d(m)	EI(kNm ² /m)	EA(kN/m)	Material Type	
0.15	8.4	0.35	6.82×10^4	6.68×10^6	Elastic	لاینینگ اصلی
0.15	8.4	0.25	2.48×10^4	4.77×10^6	Elastic	لاینینگ فرعی

EA: سختی نرمال، EI: سختی خمشی، d: ضخامت معادل، w: وزن، ϑ : ضریب پواسون

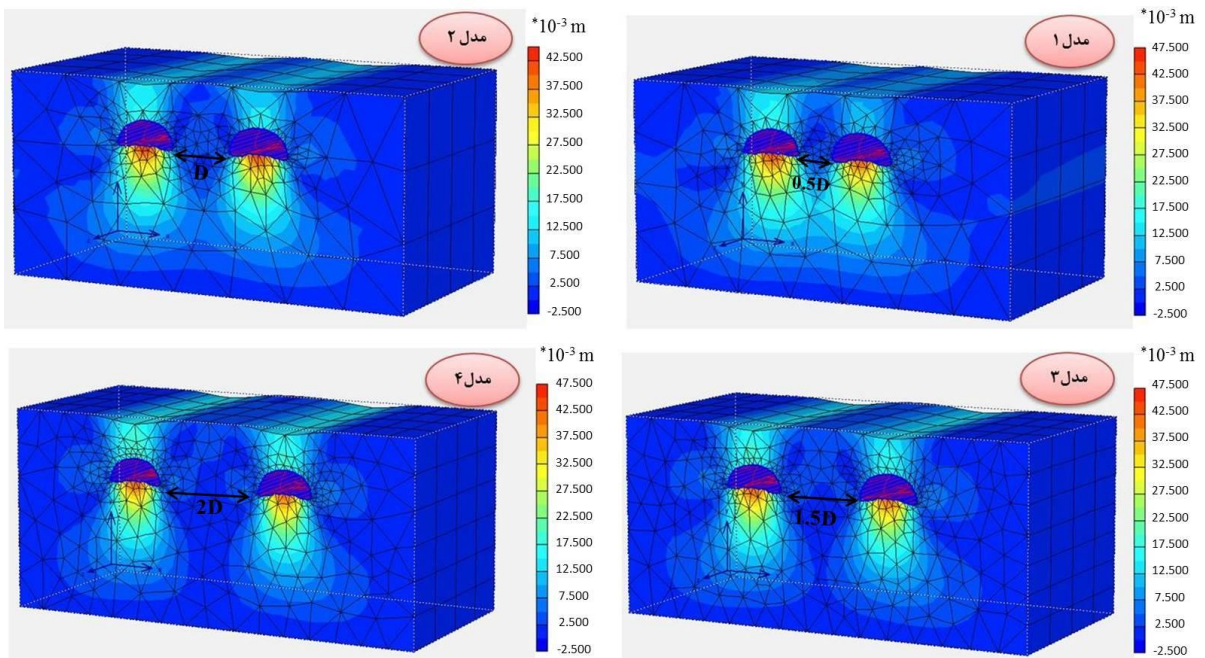
۴-۶- تحلیل مدل عددی ۱ تا ۴

کانتورهای تنش در خاک در مرحله ی نهایی تحلیل (اتمام حفاری هر دو تونل) برای چهار مدل عددی ۱ تا ۴ در شکل (۶-۲) نمایش داده شده است.



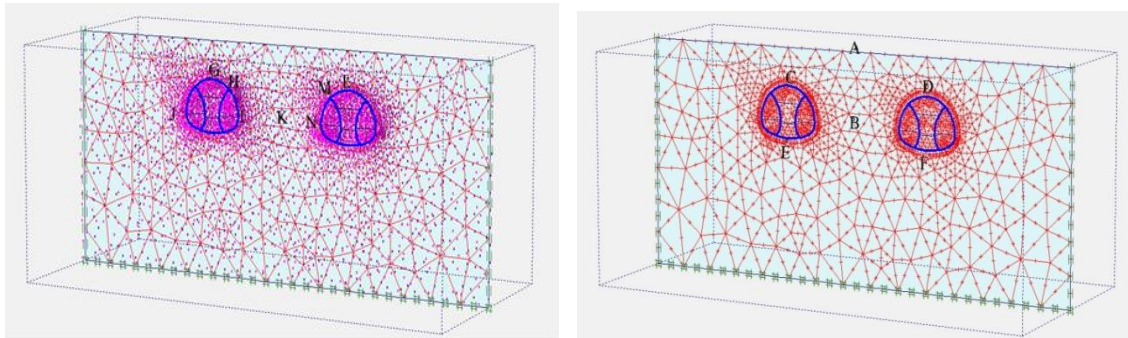
شکل (۶-۲): کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2

کانتورهای جابه‌جایی کل در خاک در مرحله‌ی نهایی تحلیل (اتمام حفاری هر دو تونل) برای چهار مدل عددی ۱ تا ۴ نیز در شکل (۶-۳) نمایش داده شده‌است.



شکل (۶-۳): کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی - واحد میلی‌متر

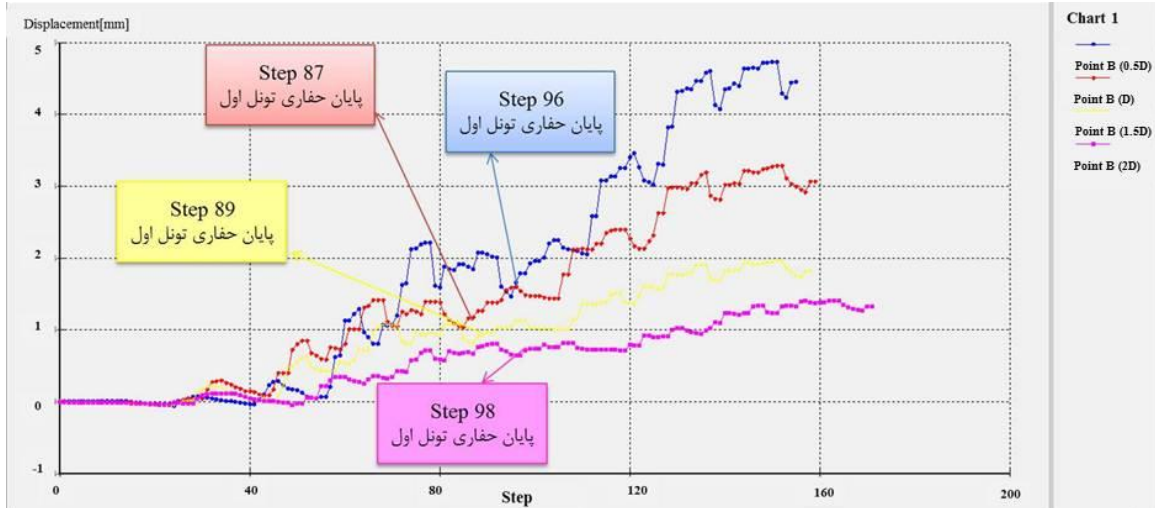
به منظور بررسی اثر حفاری تونل‌های دوقلو بر روی یکدیگر، به ازای فواصل مختلف لازم است تا پارامترهای مختلف در نقاط کلیدی و مهم مورد پایش و بررسی قرارگیرد. در این راستا نقاط مشخص شده در شکل‌های (۴-۶) و (۵-۶) در برنامه‌ی محاسبات نرم‌افزار (Calculation Program) در صفحه-ی میانی (۳۰ متری از ابتدای تونل) در نظر گرفته شده است (طول مدل در راستای تونل‌ها ۶۰ متر می-باشد) تا پس از انجام محاسبات، توسط برنامه‌ی رسم منحنی (Curve Program) بتوان خروجی‌های مربوط به جابه‌جایی و تنش، مربوط به نقطه‌ی مشخص شده را بدست آورد و مورد تحلیل و بررسی قرارداد.



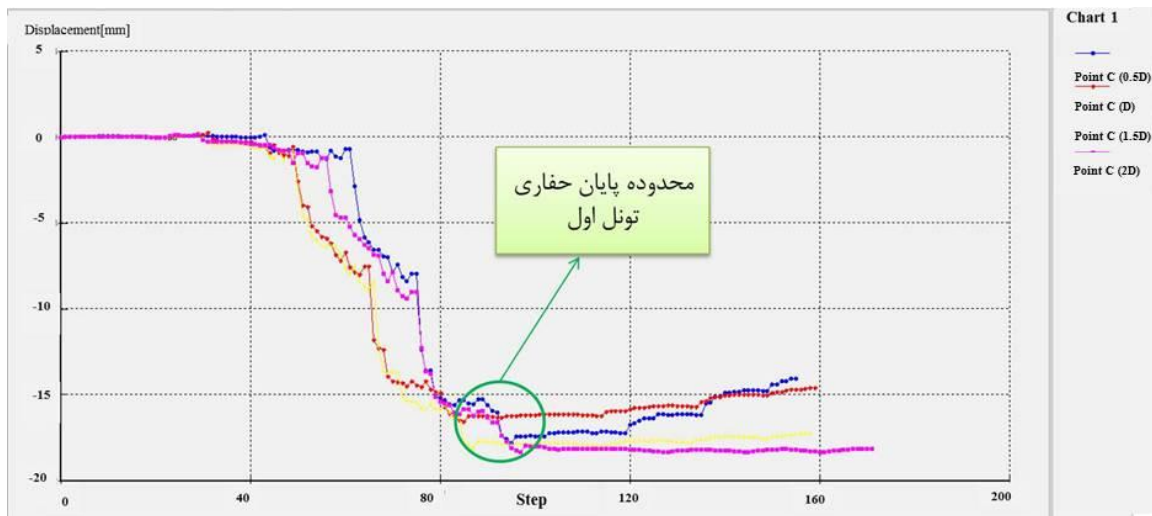
شکل (۴-۶): نقاط انتخابی برای پایش مقادیر جابه‌جایی شکل (۵-۶): نقاط انتخابی برای پایش مقادیر تنش

با توجه به کانتورهای تنش و جابه‌جایی می‌توان فهمید که تونل سمت راست که زودتر حفاری می-گردد، بحرانی‌تر بوده لذا نقاط B، C و E را که به ترتیب نقاط میان دو تونل، تاج تونل و کف تونل سمت راست می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارهای جابه‌جایی (Displacement) هر نقطه در مقابل گام‌های محاسباتی (Step) در شکل‌های (۶-۶) الی (۸-۶) نمایش داده شده است. برای مقایسه‌ی بهتر، هر نمودار، جابه‌جایی نقطه‌ی مربوطه را در هر چهار مدل نمایش می‌دهد که رنگ آبی مربوط به مدل ۱، رنگ قرمز مربوط به مدل ۲، رنگ زرد مربوط به مدل ۳ و رنگ صورتی مربوط به مدل ۴ می-باشد. به منظور بررسی پیلاژ میانی (ناحیه خاک بان دو تونل) تنش افقی در نقطه‌ی K در شکل (۹-۶) نشان داده شده است. مقادیر تنش قائم خاک در پشت لاینینگ در مقابل گام‌های حل برای نقاط G و

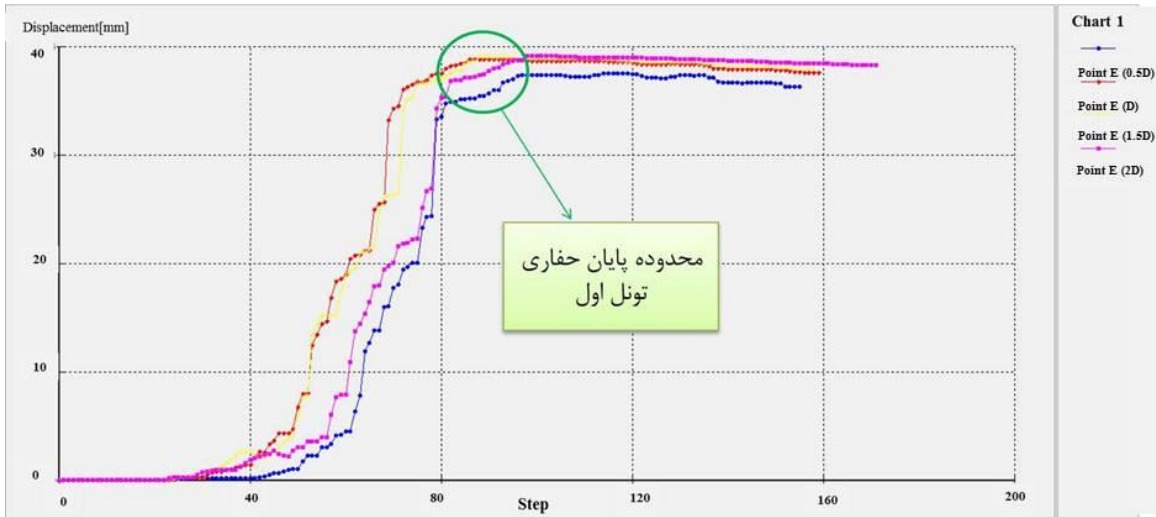
L که به ترتیب نقاط تاج تونل سمت راست و تاج تونل سمت چپ می باشد، در شکل های (۶-۱۰) و (۶-۱۱) آمده است.



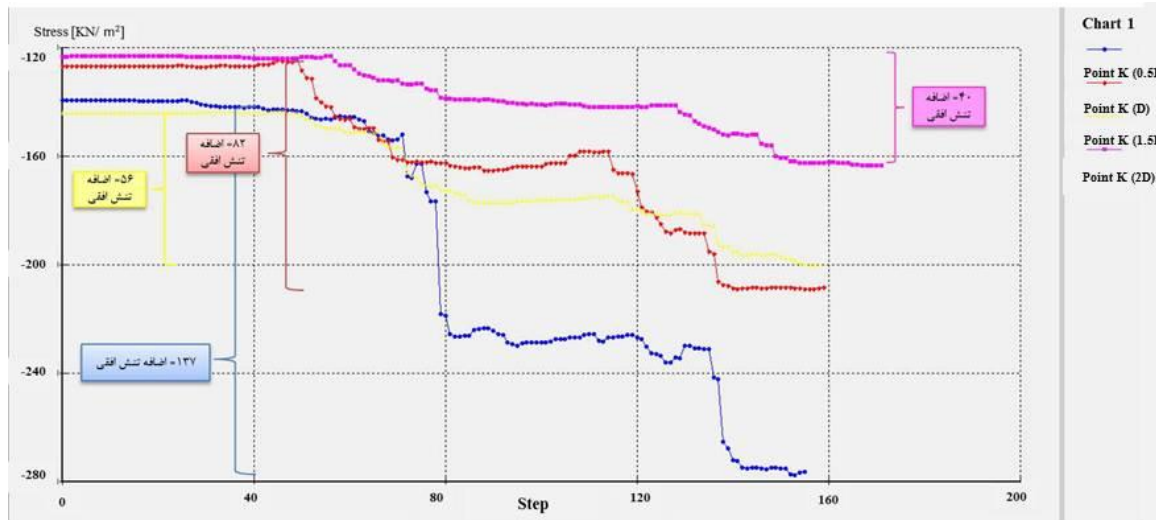
شکل (۶-۶): جابه جایی نقطه‌ی B بر حسب گام‌های محاسباتی (step) در چهار مدل



شکل (۶-۷): جابه جایی نقطه‌ی C در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



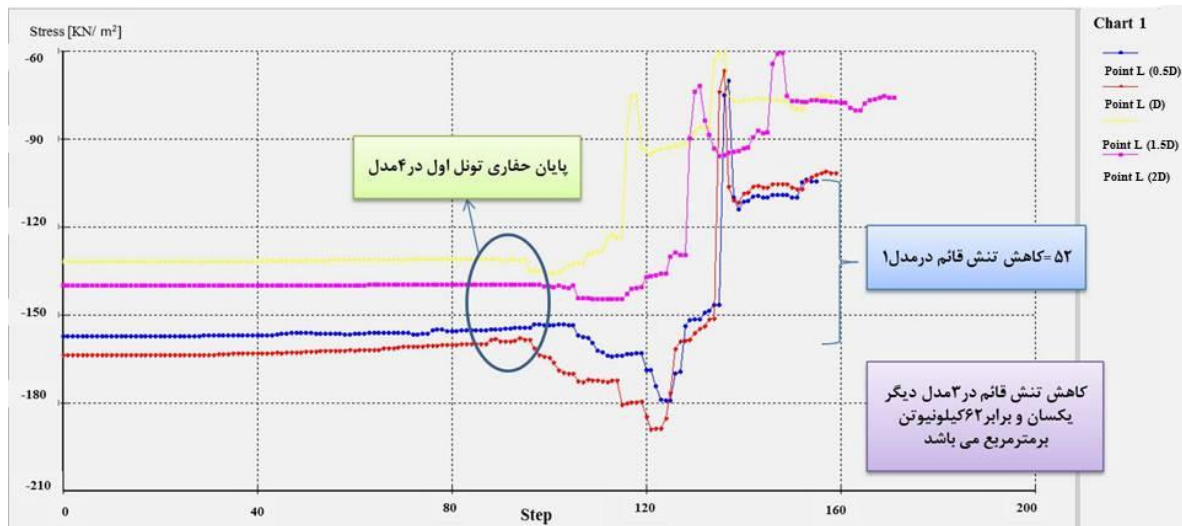
شکل (۶-۸): جابه‌جایی نقطه‌ی E در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۹): تنش افقی نقطه‌ی K بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۱۰): تنش قائم پشت لاینینگ نقطه‌ی G در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۱۱): تنش قائم پشت لاینینگ نقطه‌ی L در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل

۶-۵- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار چهار مدل اول

در کانتورهای تنش نمایش داده شده در شکل (۶-۲) مشاهده می‌شود، زمانی که فاصله‌ی دو تونل از D (قطر تونل) بیشتر شود تأثیر حفر تونل دوم بر تونل اول، از دیدگاه توزیع تنش، کاهش می‌یابد و به نوعی مستقل از هم عمل می‌کنند. در هر چهار مدل، بیشترین جابه‌جایی‌ها مربوط به کف تونل‌ها می‌-

باشد و نزدیکی و دوری دو تونل از هم تأثیری بر این مقدار ندارد (شکل (۶-۳)). با بررسی کانتورهای جابه‌جایی (شکل (۶-۳))، در مدل اول دیده می‌شود که جابه‌جایی در تاج تونل اول بیشتر از تاج تونل دوم می‌باشد. در مدل دوم جابه‌جایی در تاج دو تونل افزایش می‌یابد، در این حالت نیز جابه‌جایی تونل اول بیشتر از جابه‌جایی تونل دوم می‌باشد. در مدل سوم باز هم با افزایش جابه‌جایی در تاج دو تونل مواجه هستیم (تونل اول بیشتر). در مدل چهارم دو تونل مستقل عمل کرده و جابه‌جایی تاج دو تونل تأثیری برهم ندارند.

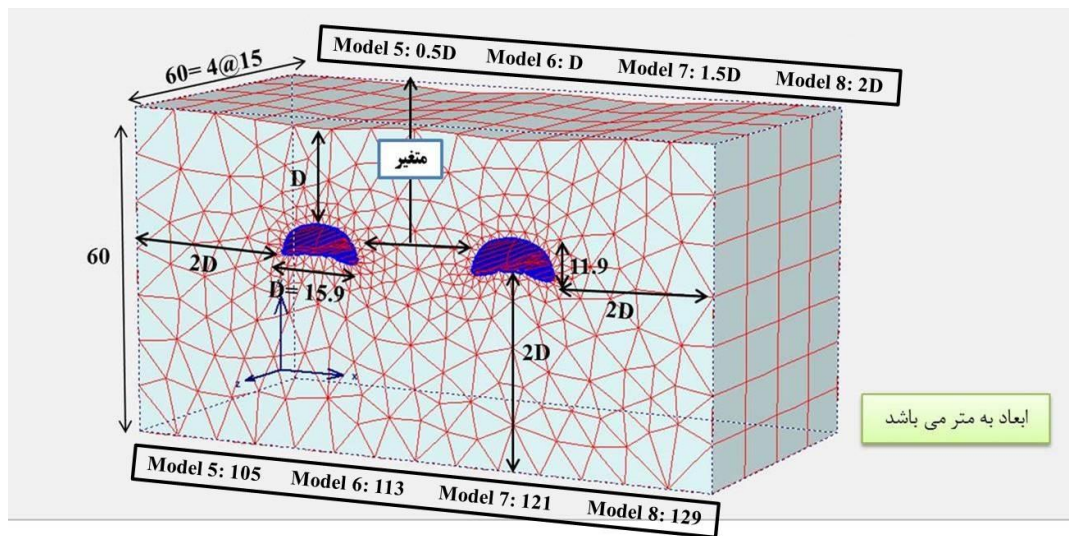
جابجایی بیشینه‌ی نقطه‌ی B در مدل ۱ (رنگ آبی) ۴/۷ میلی‌متر، در مدل ۲ (رنگ قرمز) ۳/۳ میلی‌متر، در مدل ۳ (رنگ زرد) ۲ میلی‌متر و در مدل ۴ (رنگ صورتی) ۱/۴ میلی‌متر (علامت مثبت نشان دهنده‌ی جابه‌جایی به سمت بالا است). با افزایش فاصله‌ی دو تونل از هم، مقدار جابه‌جایی نقطه‌ی C کاهش یافته‌است به طوری که با عبور فاصله‌ی دو تونل از حد ۱/۵ برابر قطر، دو تونل برکنشی بر یکدیگر نداشته‌اند. شکل (۶-۸) جابه‌جایی نقطه‌ی E (جابجایی کف تونل اول) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جابه‌جایی نهایی این نقطه در هر چهار مدل یکسان و تقریباً برابر ۳/۸ میلی‌متر می‌باشد که نشان دهنده‌ی عدم تأثیرپذیری جابه‌جایی کف از فاصله‌ی میان دو تونل می‌باشد. نمودار نقطه‌ی F نیز مشابه‌ی نقطه‌ی E می‌باشد.

در شکل (۶-۹) به بررسی تنش افقی نقطه‌ی K بر حسب گام‌های محاسبات (Step) پرداخته شده‌است. تنش افقی در نگاه اول باید یکسان باشد ولی در نمودار، اختلاف این مقدار اولیه، ناشی از اختلاف جزئی در ارتفاع نقاط K در چهار مدل می‌باشد. با مشاهده‌ی نقطه‌ی K در مدل اول (رنگ آبی) افزایش تنش افقی بین ابتدا تا انتهای محاسبات به مقدار ۱۳۷ کیلونیوتن بر مترمربع، در مدل دوم (رنگ قرمز) ۸۲ کیلونیوتن بر مترمربع، در مدل سوم (رنگ زرد) ۵۶ کیلونیوتن بر مترمربع و در مدل چهارم (رنگ صورتی) ۴۰ کیلونیوتن بر مترمربع مشاهده می‌شود (اعداد نشان‌دهنده‌ی کاهش اضافه تنش افقی، با افزایش فاصله‌ی میان تونل‌ها می‌باشد).

با بررسی نقطه‌ی G در شکل (۶-۱۰) (تاج تونل اول) در مدل اول، کمترین کاهش تنش قائم را داریم (۳۸ کیلونیوتن بر مترمربع) و در مدل‌های بعدی و با دور شدن فاصله‌ی دو تونل از هم این کاهش تنش، بیشتر ولی برای هر ۳ مدل به یک میزان و برابر ۶۰ کیلونیوتن بر مترمربع بوده که نشان‌دهنده‌ی این است؛ از مدل دوم به بعد دور شدن دو تونل تأثیری در نتایج تنش در نقطه‌ی G نداشته است. نقطه‌ی L نیز وضعیت مشابهی با نقطه‌ی G دارد، با این تفاوت که مقدار کاهش تنش‌ها در چهار مدل بهم نزدیک‌تر می‌باشد.

۶-۶- قسمت دوم

مدل عددی ساخته‌شده به وسیله‌ی نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL در شکل زیر نمایش داده‌شده- است. (مدل ۵ تا ۸)



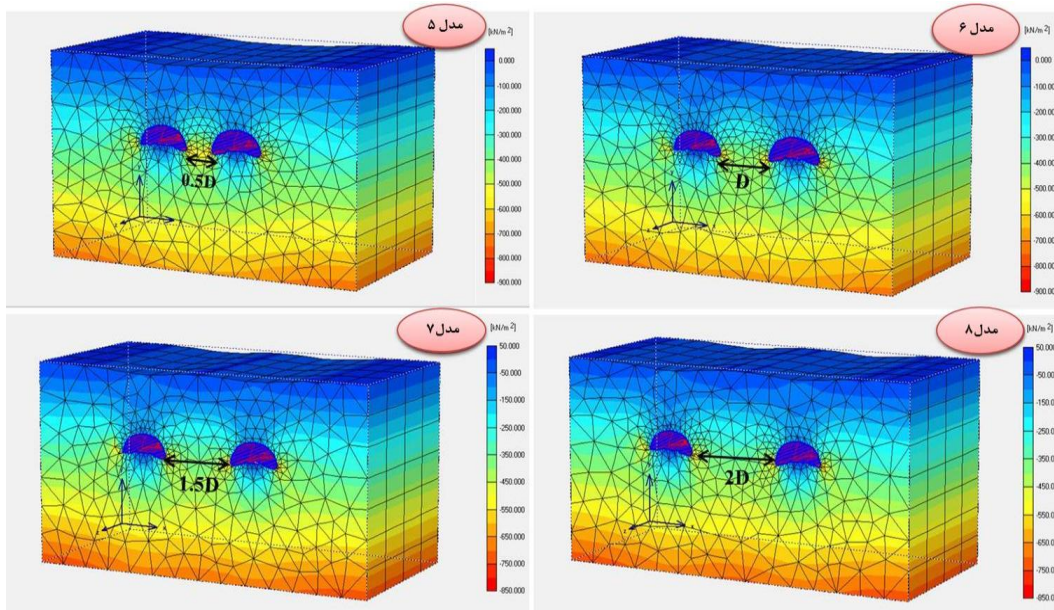
شکل (۶-۱۲): ابعاد مدل‌های عددی ۵ تا ۸

توجه

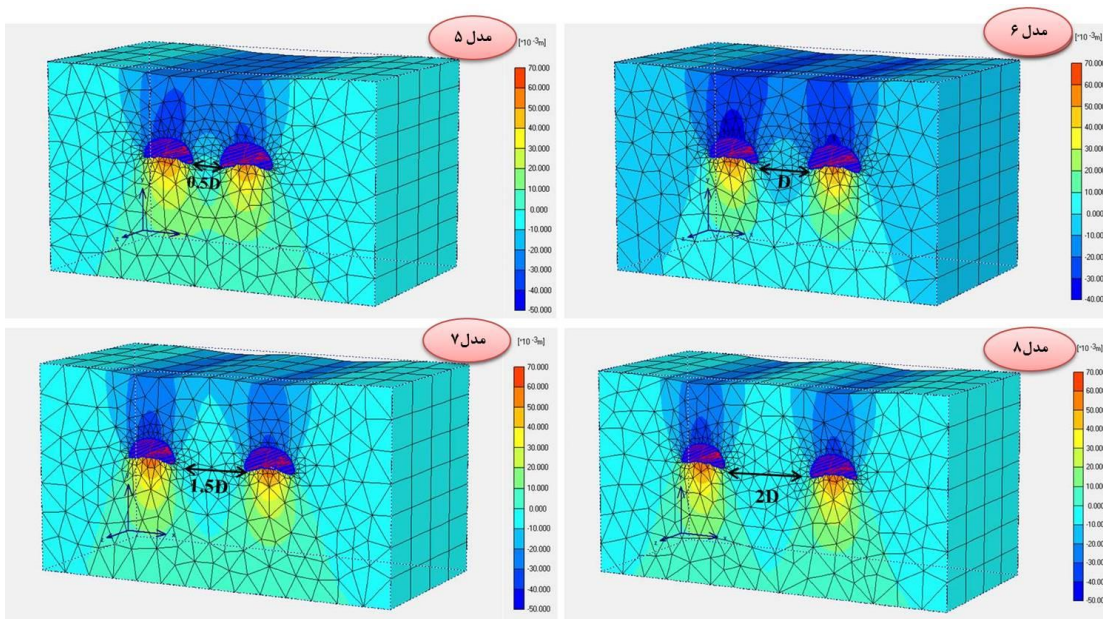
مشخصات خاک و لاینینگ اصلی و فرعی در تمامی مدل‌های عددی یکسان بوده و مطابق جدول (۶-۲) و (۶-۳) می‌باشد.

۶-۷- تحلیل مدل عددی ۵ تا ۸

در شکل‌های (۶-۱۳) و (۶-۱۴) کانتورهای تنش و جابه‌جایی مربوط به مدل‌های ۵ تا ۸ نمایش داده شده است

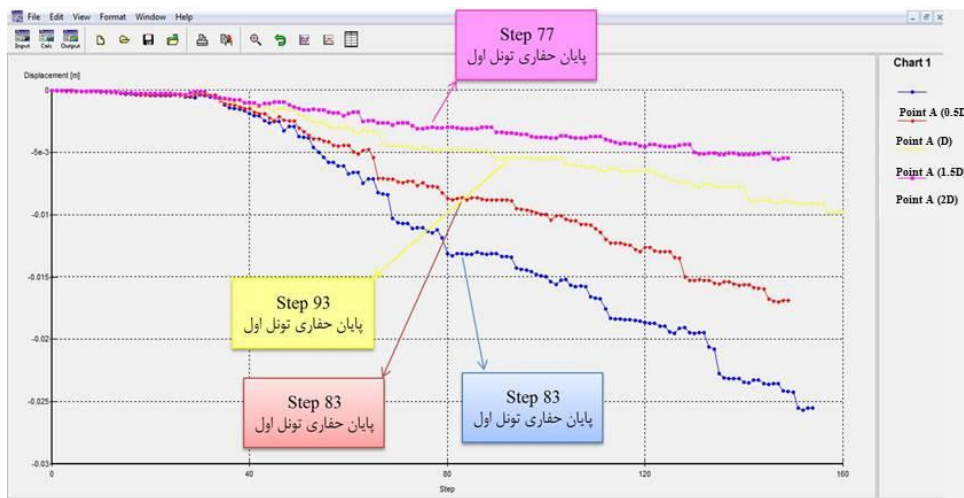


شکل (۶-۱۳): کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2



شکل (۶-۱۴): کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی - واحد میلی‌متر

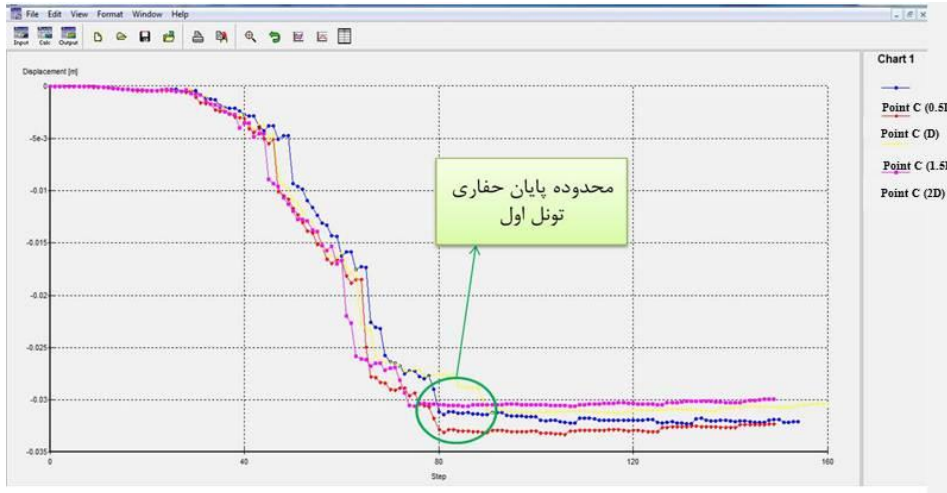
نقاط A، B، C و E که در شکل (۶-۴) مشخص شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارهای جابه‌جایی (Displacement) هر نقطه در مقابل گام‌های محاسباتی (Step) در شکل‌های (۶-۱۵) الی (۶-۱۸) نمایش داده شده است. برای مقایسه‌ی بهتر، هر نمودار، جابه‌جایی نقطه‌ی مربوطه را در هر چهار مدل نمایش می‌دهد که رنگ آبی مربوط به مدل ۵، رنگ قرمز مربوط به مدل ۶، رنگ زرد مربوط به مدل ۷ و رنگ صورتی مربوط به مدل ۸ می‌باشد



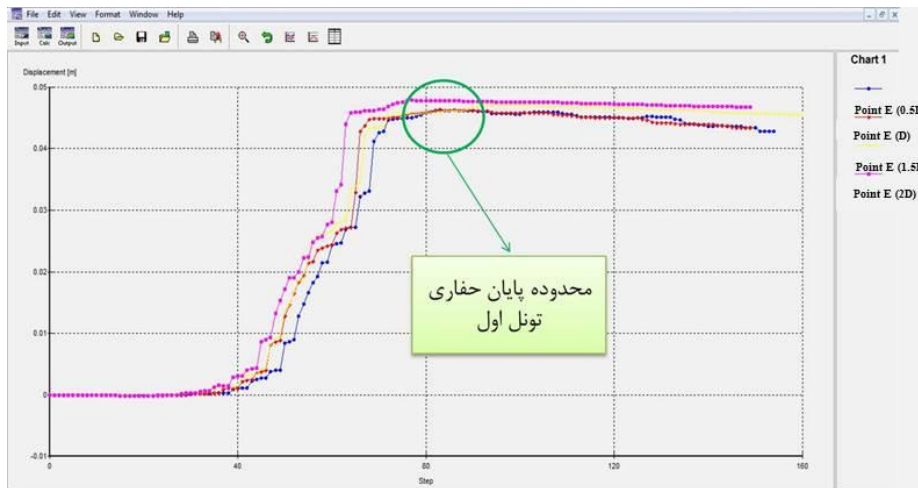
شکل (۶-۱۵): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی A بر حسب گام‌های محاسباتی (step) در چهار مدل



شکل (۶-۱۶): جابه‌جایی نقطه‌ی B بر حسب گام‌های محاسباتی (step) در چهار مدل

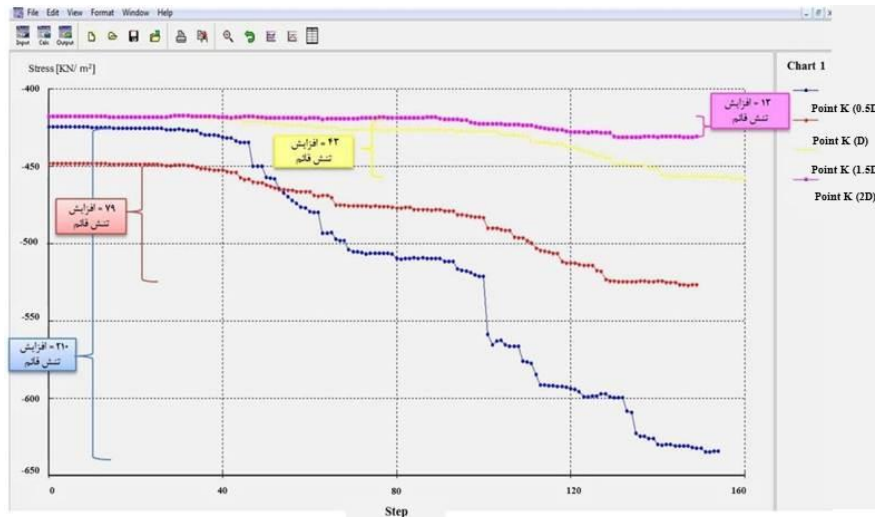


شکل (۶-۱۷): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۱۸): جابه‌جایی نقطه‌ی E در مقابل گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل

به منظور بررسی پیلار میانی (ناحیه خاک بان دو تونل)، تنش قائم در نقطه‌ی K در شکل (۶-۱۹) به نشان داده شده‌است.



شکل (۶-۱۹): تنش قائم نقطه‌ی K برحسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل

۶-۸- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار در مدل‌های ۵ تا ۸

با توجه به کانتورهای تنش در شکل (۶-۱۳) مشاهده می‌شود، زمانی که فاصله‌ی دو تونل از D بیشتر شود تأثیر حفر تونل دوم بر تونل اول، از دیدگاه توزیع تنش، کاهش می‌یابد و به نوعی مستقل از هم عمل می‌کنند. در هر چهار مدل، بیشترین جابه‌جایی‌ها مربوط به کف تونل‌ها می‌باشد و نزدیکی و دوری دو تونل از هم تأثیری بر این مقدار ندارد (شکل (۶-۱۴)). با بررسی کانتورهای جابه‌جایی قائم، در مدل اول دیده می‌شود که جابه‌جایی در تاج تونل اول بیشتر از تاج تونل دوم می‌باشد و دو تونل به صورت پیوسته فضای سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مدل دوم، تقریباً تأثیر دو تونل روی هم کاسته شده ولی هنوز بر روی هم تأثیرگذاراند. در مدل سوم، دو تونل تقریباً مستقل از هم‌اند و در مدل چهارم دو تونل مستقل عمل کرده و تأثیری برهم ندارند.

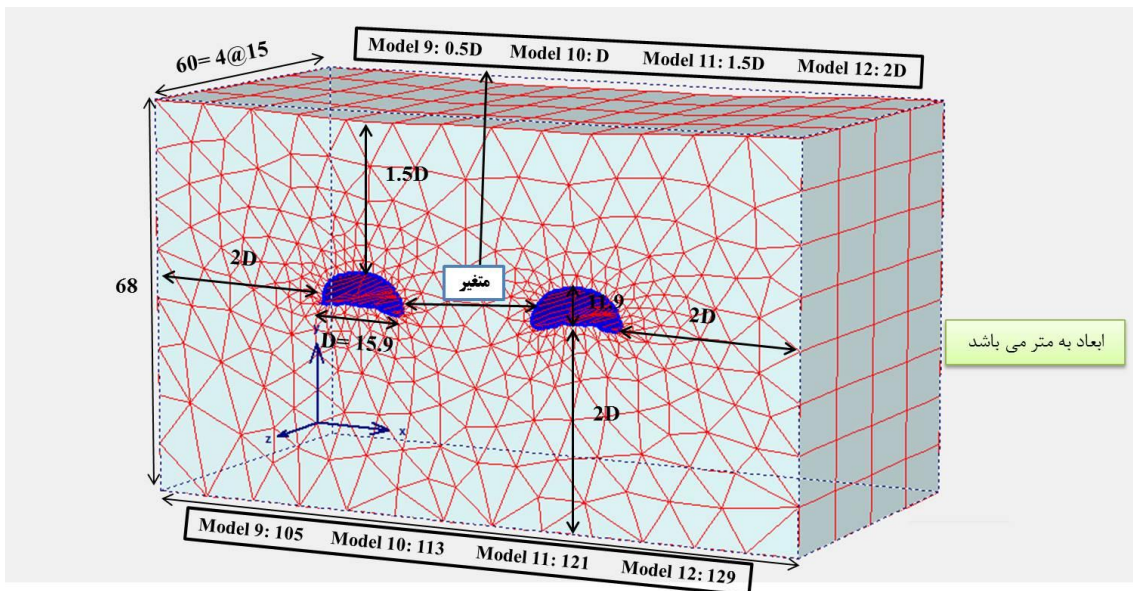
در شکل (۶-۱۵) مشاهده می‌شود نقطه‌ی A در مدل ۵ (آبی) دارای جابه‌جایی قائم ۲۶ میلی‌متر، در مدل ۶ (قرمز) ۱۷ میلی‌متر، در مدل ۷ (زرد) ۱۰ میلی‌متر و در مدل ۸ (صورتی) ۵ میلی‌متر می‌باشد.

در شکل (۶-۱۶) مشاهده می‌شود بیشینه‌ی جابه‌جایی نقطه‌ی B در مدل ۵ (آبی) ۱۲ میلی‌متر، در مدل ۶ (قرمز) ۱۰ میلی‌متر، در مدل ۷ (زرد) ۷ میلی‌متر و در مدل ۸ (صورتی) ۶ میلی‌متر می‌باشد.

شکل (۶-۱۷) جابه‌جایی در تاج تونل اول در هر ۴ مدل برابر تقریباً ۳۰ میلی‌متر بوده و فاصله‌ی میان دو تونل تأثیری بر جابه‌جایی قائم این نقطه ندارد، لازم به ذکر است در نقطه‌ی D، تاج تونل دوم وضعیتی مشابه تاج تونل اول داریم که نمودار آن به علت تشابه در پایان‌نامه آورده نشده است. در شکل (۶-۱۸) جابه‌جایی در کف تونل‌ها در تمامی مدل‌ها ۴۵ میلی‌متر می‌باشد (نقاط E و F). در شکل (۶-۱۹) مشاهده می‌شود بیشترین افزایش تنش قائم در نقطه‌ی K (وسط دو تونل) در مدل پنجم که فاصله‌ی دو تونل $0.5D$ می‌باشد، رخ داده است و با فاصله گرفتن دو تونل از هم این افزایش تنش قائم کاهش چشم‌گیری داشته که مقادیر آن در شکل (۶-۱۹) آورده شده است.

۶-۹- قسمت سوم

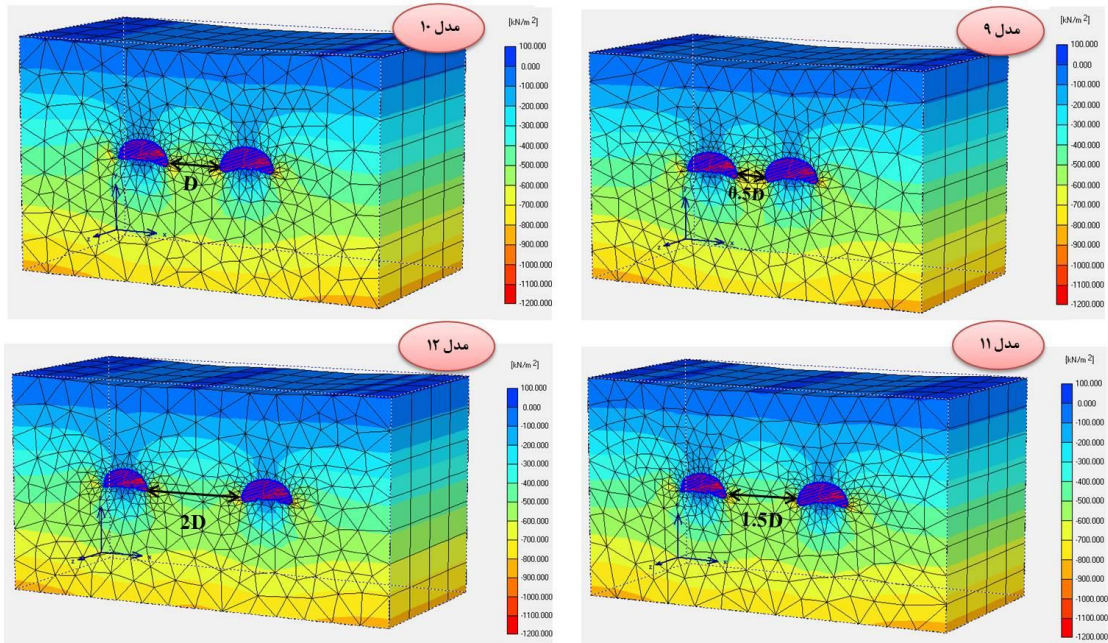
مدل عددی ساخته شده به وسیله‌ی نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL در شکل زیر نمایش داده شده است. (مدل ۹ تا ۱۲)



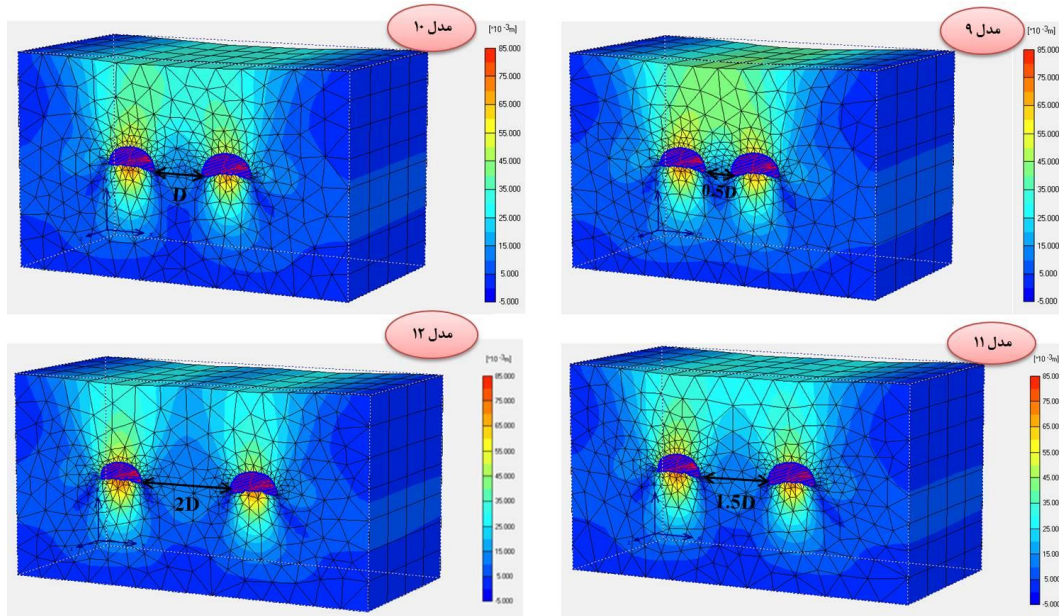
شکل (۶-۲۰): ابعاد مدل‌های عددی ۹ تا ۱۲

۶-۱۰- تحلیل مدل عددی ۹ تا ۱۲

در شکل‌های (۶-۲۱) و (۶-۲۲) کانتورهای تنش و جابه‌جایی مربوط به مدل‌های ۹ تا ۱۲ نمایش داده شده است.

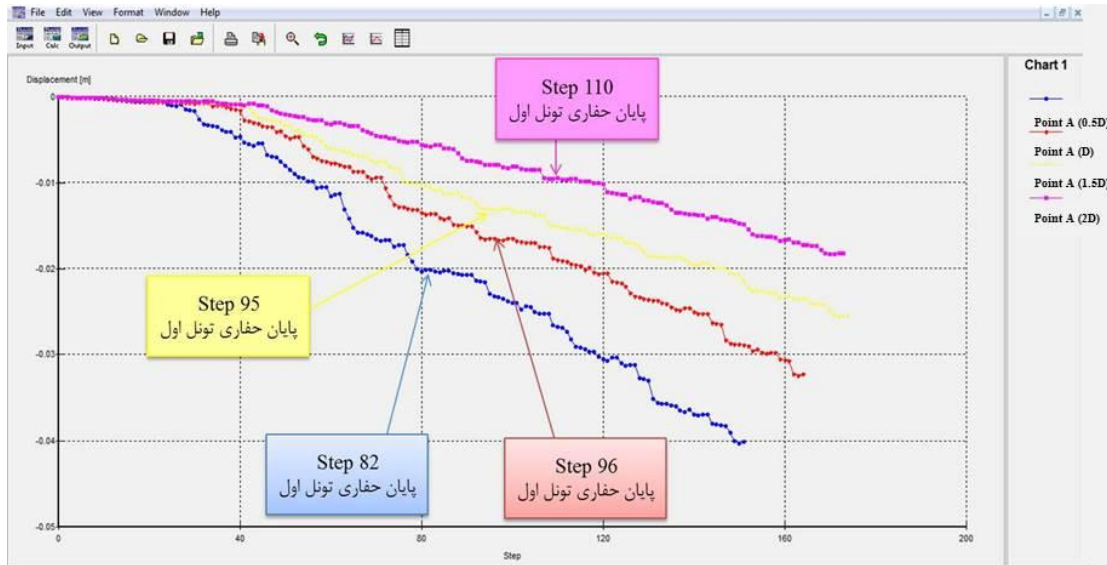


شکل (۶-۲۱): کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2

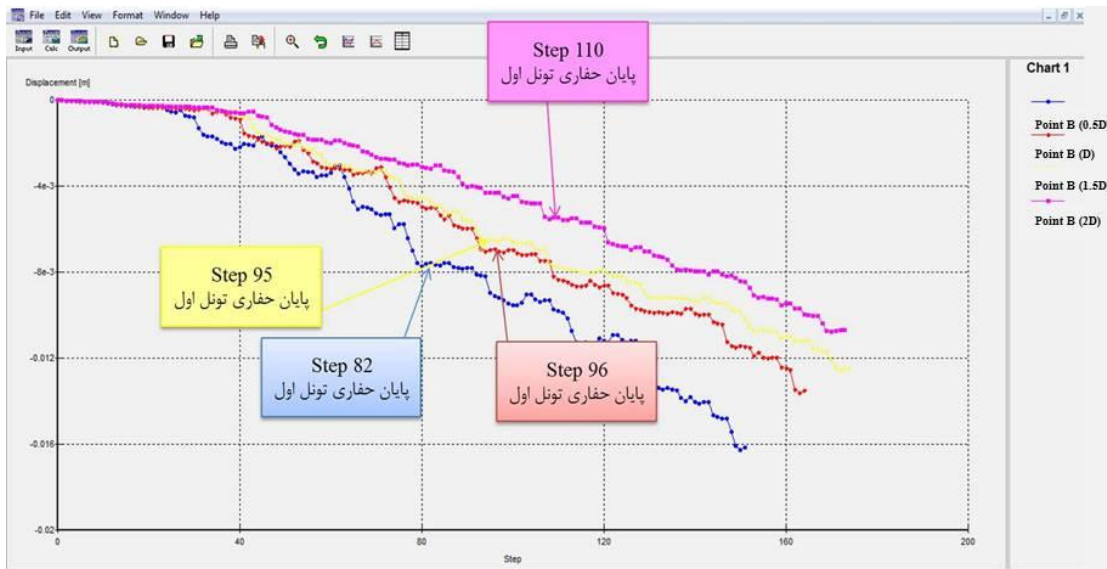


شکل (۶-۲۲): کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی - واحد میلی‌متر

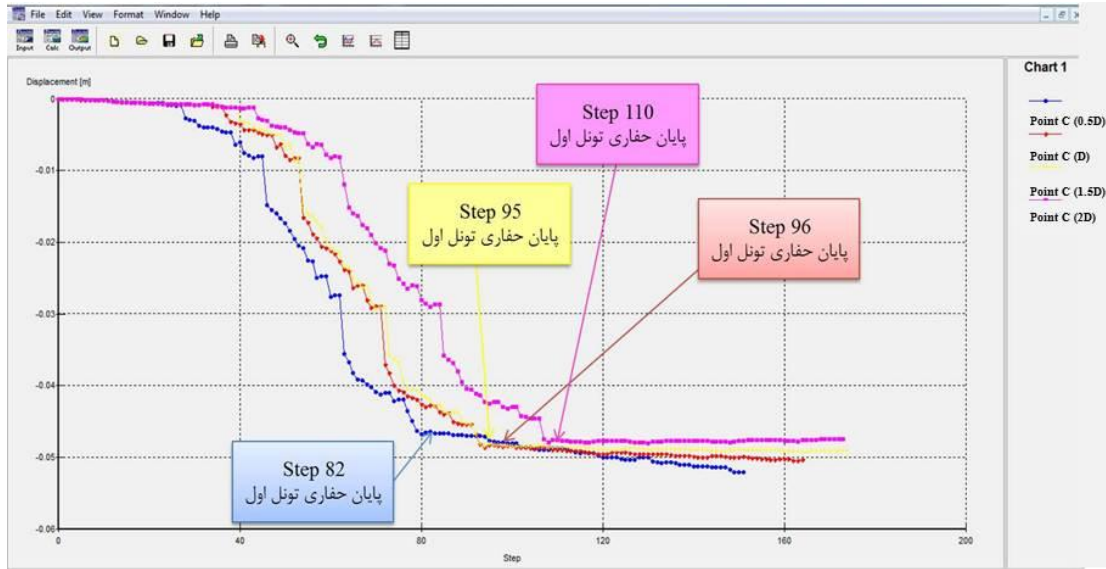
در این قسمت نقاط A، B، C و E مورد بررسی قرار می‌گیرد (از آوردن نقاط دیگر به علت تشابه در نتایج خودداری شده‌است). نمودارهای جابه‌جایی (Displacement) هر نقطه برحسب گام‌های محاسباتی (Step) در شکل‌های (۶-۲۳) الی (۶-۲۶) نمایش داده شده‌است.



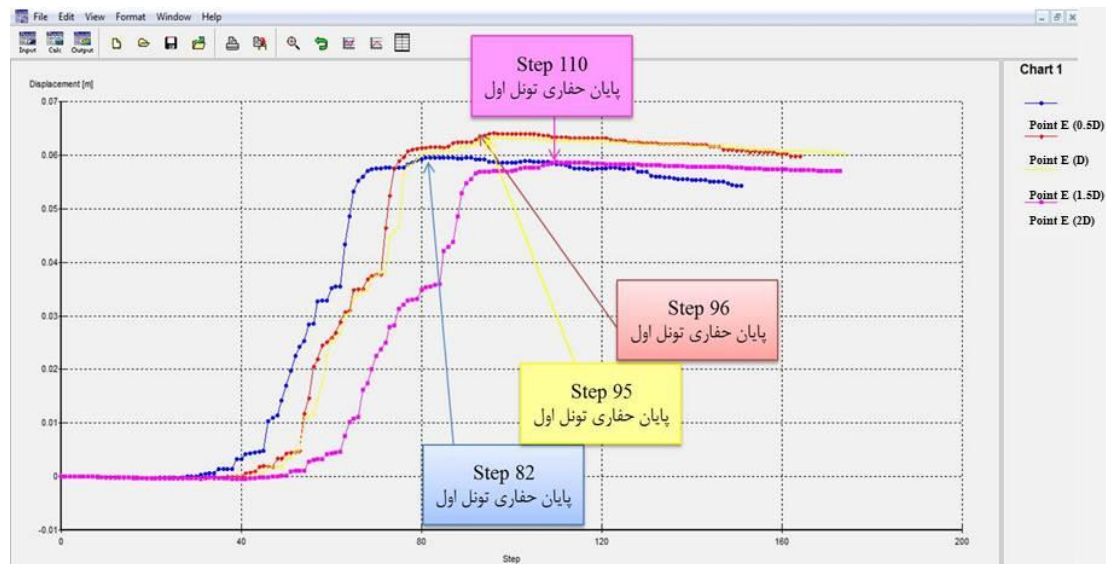
شکل (۶-۲۳): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی A برحسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۲۴): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی B برحسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



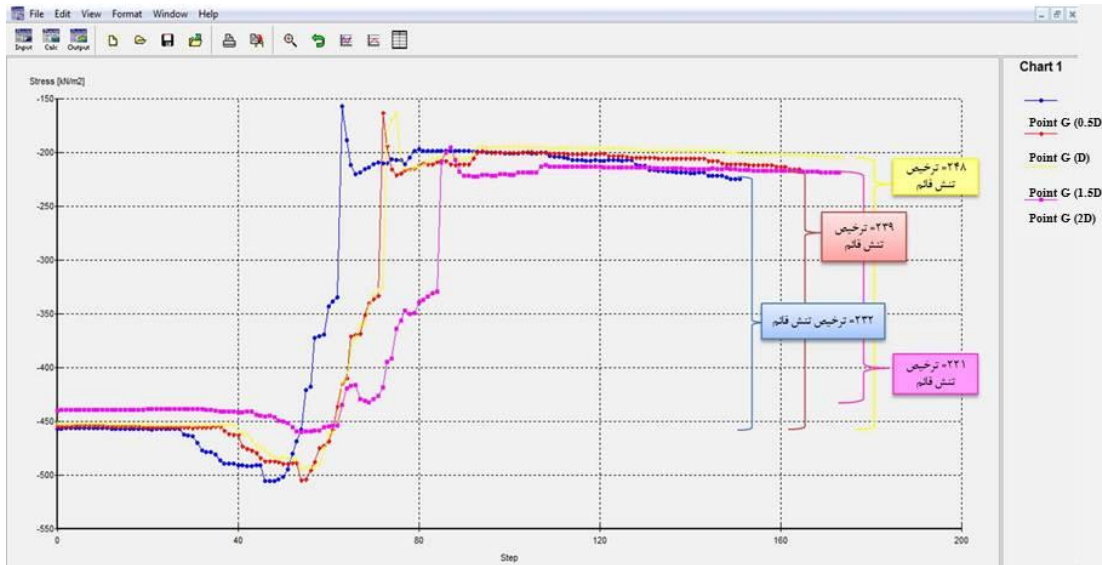
شکل (۶-۲۵): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



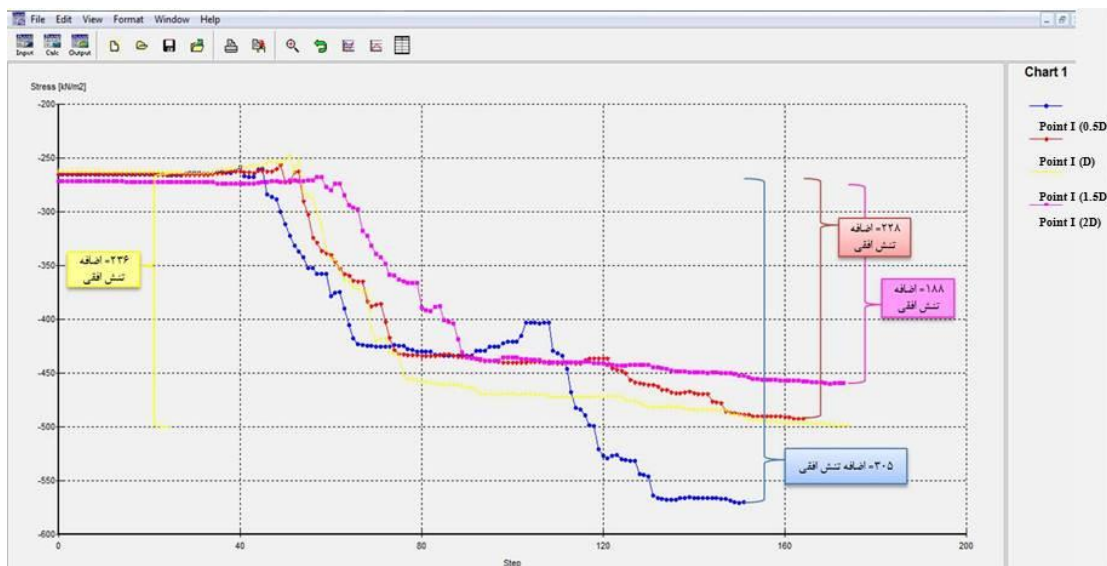
شکل (۶-۲۶): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی E بر حسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل

به منظور بررسی تنش نیز نقاط G، I، K و L انتخاب شده‌اند که مقادیر افزایش و کاهش تنش افقی

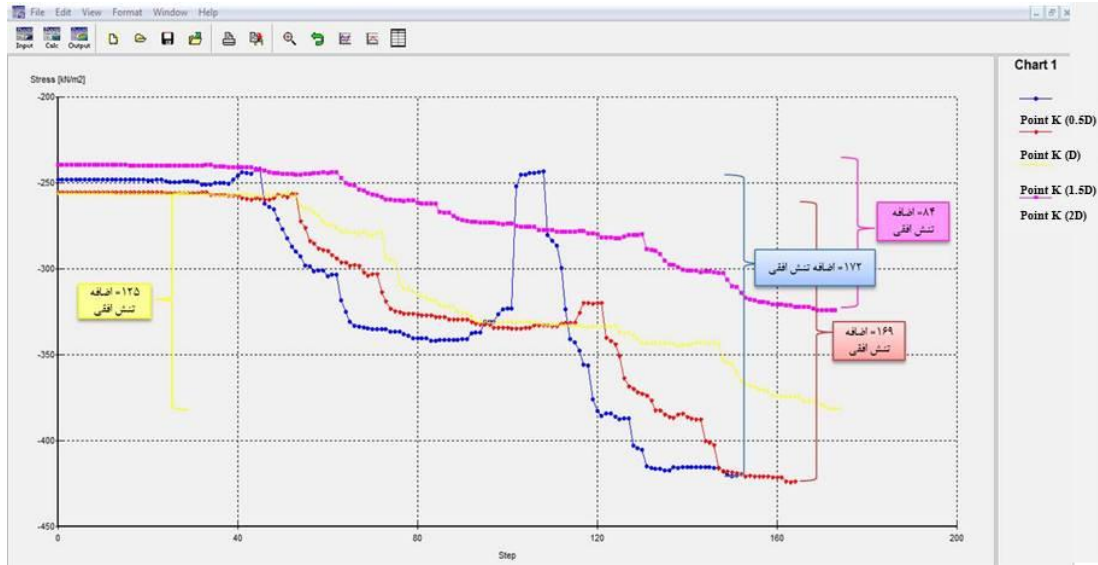
یا قائم در شکل‌های (۶-۲۷) الی (۶-۳۱) آورده شده‌است



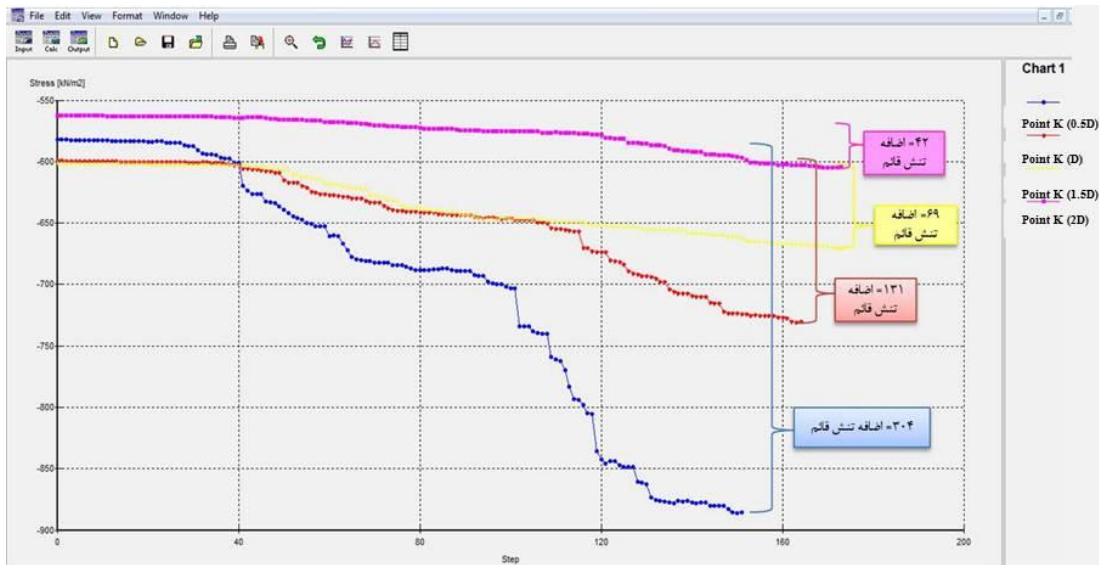
شکل (۶-۲۷): تنش قائم نقطه‌ی G برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۲۸): تنش افقی نقطه‌ی I برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۲۹): تنش افقی نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۳۰): تنش قائم نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۳۱): تنش قائم نقطه‌ی L برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل

۶-۱۱- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار در مدل‌های ۹ تا ۱۲

در کانتورهای تنش نمایش داده شده در شکل (۶-۲۱) مشاهده می‌شود، زمانی که فاصله‌ی دو تونل از D (قطر تونل) بیشتر شود تأثیر حفر تونل دوم بر تونل اول، از دیدگاه توزیع تنش، کاهش می‌یابد و به نوعی مستقل از هم عمل می‌کنند. در مدل ۹ تمرکز تنش در کناره‌های داخلی تونل‌ها مشاهده می‌شود که در مدل‌های بعدی با فاصله گرفتن تونل‌ها از هم تمرکز تنش کاهش یافته تا جایی که در مدل‌های ۱۱ و ۱۲ از نظر توزیع تنش اثری بر یکدیگر ندارند. در هر چهار مدل مانند مدل‌های ۸ تا ۱۱ بیشترین جابه‌جایی‌ها مربوط به کف تونل‌ها می‌باشد و نزدیکی و دوری دو تونل از هم تأثیری بر این مقدار ندارد. با بررسی کانتورهای جابه‌جایی مشاهده می‌شود، در مدل ۹ که فاصله میان دو تونل 0.5D است جابه‌جایی‌ها به‌طور پیوسته تا سطح زمین گسترش یافته‌است. در مدل ۱۰ کمی از این پیوستگی کاسته شده‌است. در مدل ۱۱ پیوستگی خیلی کمتر شده‌است و دو تونل عملکردی نسبتاً مستقل دارند. در مدل ۱۲ جابه‌جایی تونل‌ها داخلی باهم ندارند و به صورت مستقل عمل میکنند.

در شکل (۶-۲۳) جابجایی قائم نقطه‌ی A در مدل ۹ (رنگ آبی) ۴۰ میلی‌متر، در مدل ۱۰ (رنگ قرمز) ۳۲ میلی‌متر، در مدل ۱۱ (رنگ زرد) ۲۵ میلی‌متر و در مدل ۱۲ (رنگ صورتی) ۱۸ میلی‌متر (علامت

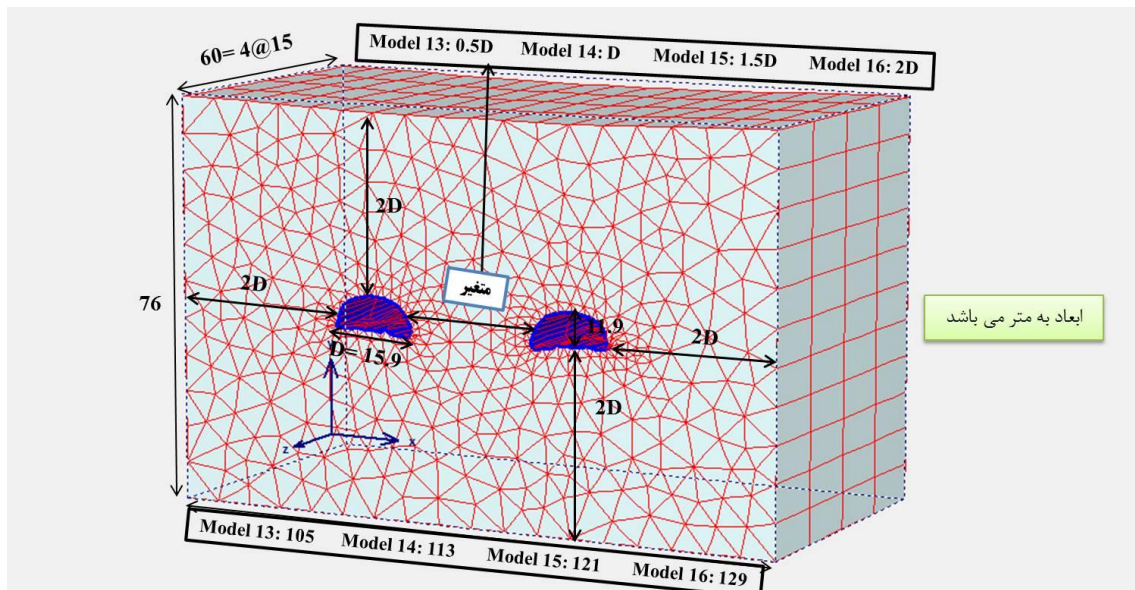
منفی در شکل نشان دهنده‌ی جابه‌جایی به سمت پایین است). در شکل (۶-۲۴) جابه‌جایی قائم نقطه-ی B در مدل ۹ (آبی) ۱۶ میلی‌متر، در مدل ۱۰ (قرمز) ۱۴ میلی‌متر، در مدل ۱۱ (زرد) ۱۳ میلی‌متر و در مدل ۱۲ (صورتی) ۱۱ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۶-۲۵) با افزایش فاصله‌ی دو تونل از هم، مقدار جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C (تاج تونل سمت راست) کاهش یافته‌است. در نقطه‌ی D (تاج تونل سمت چپ) نیز وضعیتی مشابه نقطه‌ی C مشاهده شد. شکل (۶-۲۶) جابه‌جایی نقطه‌ی E (جابجایی کف تونل سمت راست) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جابجایی نهایی این نقطه در هر چهار مدل یکسان و تقریباً برابر ۶۰ میلی‌متر می‌باشد که نشان دهنده‌ی عدم تأثیرپذیری جابجایی کف از فاصله‌ی میان دو تونل می‌باشد. نمودار نقطه‌ی F نیز مشابه‌ی نقطه‌ی E می‌باشد.

در نقطه‌ی G (تاج تونل سمت راست) پدیده‌ی ترخیص تنش را داریم که در تمامی مدل‌ها تفاوت زیادی با هم ندارند. در نقطه‌ی L (تاج تونل سمت چپ) نیز وضعیتی مشابه نقطه‌ی G داریم با این تفاوت که مقادیر ترخیص تنش کمتر می‌باشد.

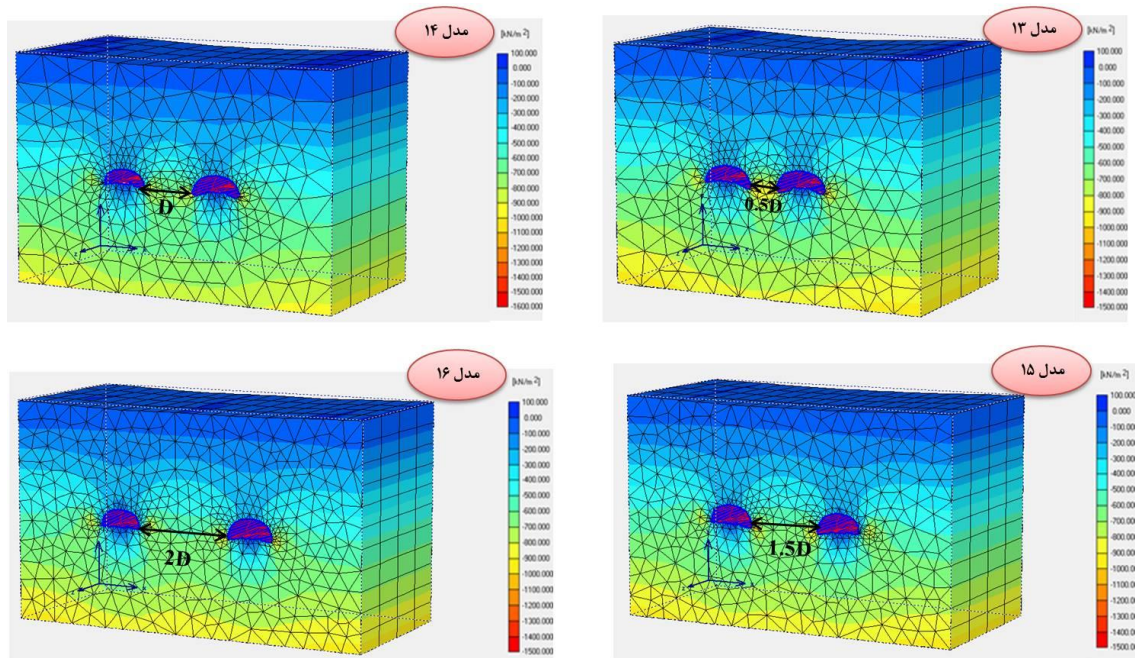
در شکل (۶-۲۸) تنش افقی نقطه‌ی I در مدل ۹ بیشترین افزایش تنش افقی (۳۰۵ کیلونیوتن بر مترمربع) را دارد و در مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ افزایش تنش افقی کمتر بوده‌است. در شکل (۶-۲۹) به بررسی تنش افقی نقطه‌ی K بر حسب گام‌های محاسبات (Step) پرداخته شده‌است. در مدل ۹ و ۱۰ افزایش تنش افقی نزدیک بهم می‌باشد ولی در مدل‌های ۱۱ و ۱۲ با دور شدن تونل‌ها از مقدار اضافه تنش افقی کاسته شده‌است. در شکل (۶-۳۰) اضافه تنش قائم نقطه‌ی K در مدل ۹ بیشترین مقدار را دارد (۳۰۴ کیلونیوتن بر مترمربع) و در مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب ۱۳۱، ۶۹ و ۴۲ کیلونیوتن بر مترمربع می‌باشد.

۶-۱۲- قسمت چهارم

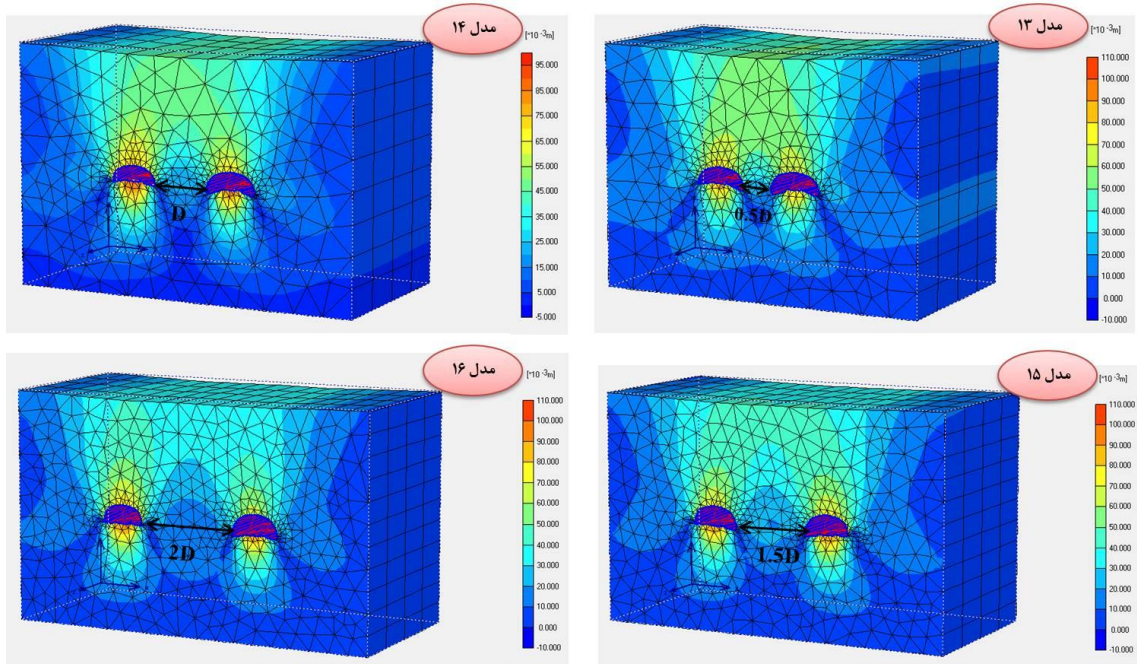
مدل عددی ساخته شده به وسیله‌ی نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL در شکل زیر نمایش داده شده- است. (مدل ۱۳ تا ۱۶)



شکل (۶-۳۲): ابعاد مدل‌های عددی ۱۳ تا ۱۶

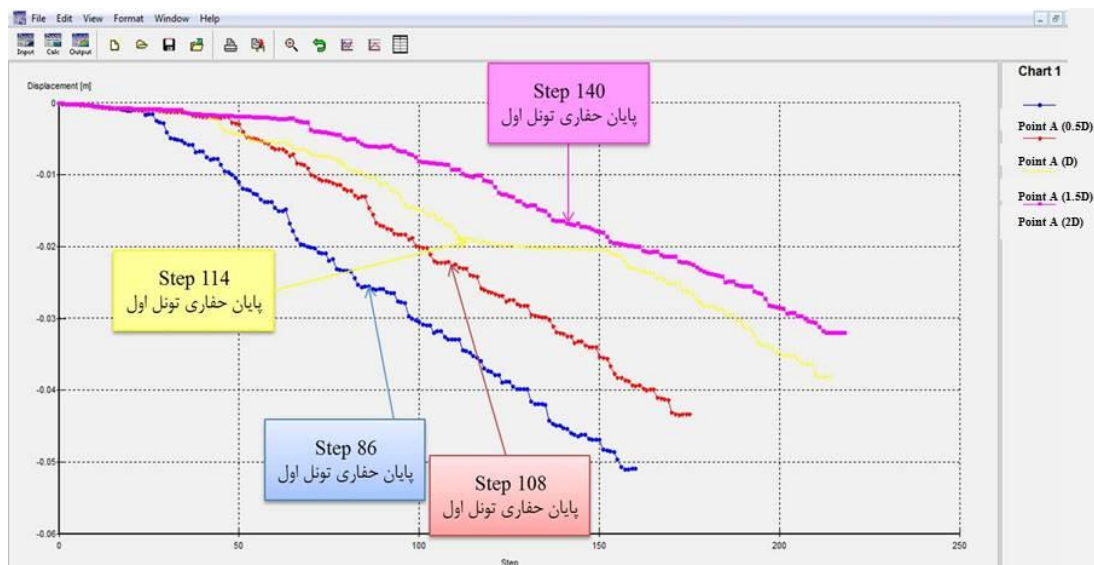


شکل (۶-۳۳): کانتورهای تنش در چهار مدل هندسی - واحد تنش kN/m^2

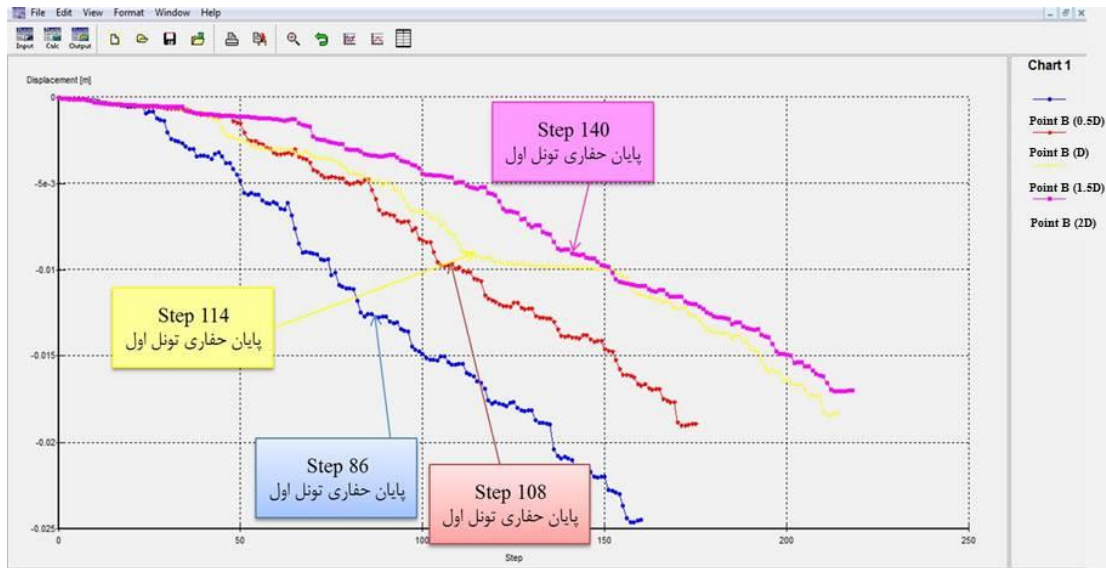


شکل (۶-۳۴): کانتورهای جابه‌جایی کل در چهار مدل هندسی-واحد میلی‌متر

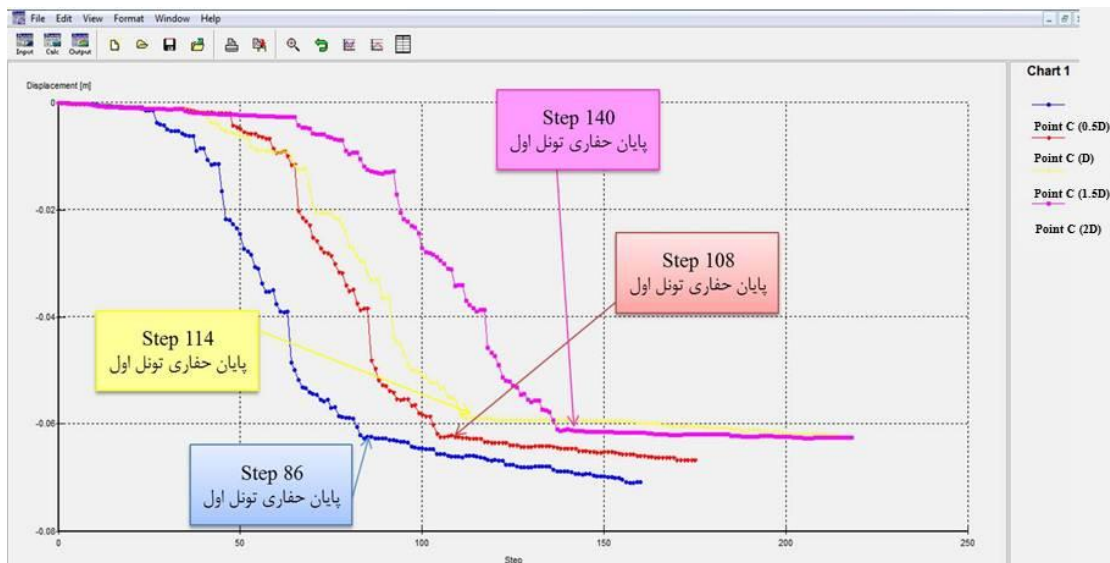
در این قسمت نیز نقاط A، B، C و E مورد بررسی قرار می‌گیرند (از آوردن نقاط دیگر به علت تشابه در نتایج خودداری شده‌است). نمودارهای جابه‌جایی (Displacement) هر نقطه برحسب گام‌های محاسباتی (Step) در شکل‌های (۶-۳۵) الی (۶-۳۸) نمایش داده شده‌است.



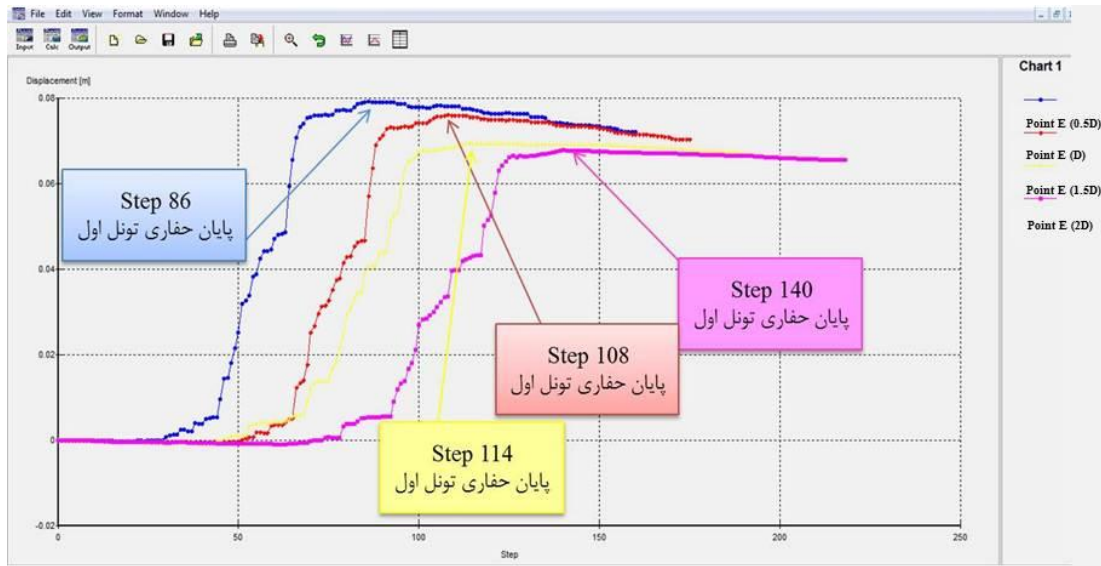
شکل (۶-۳۵): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی A برحسب گام‌های محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۳۶): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی B بر حسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۳۷): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C بر حسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل

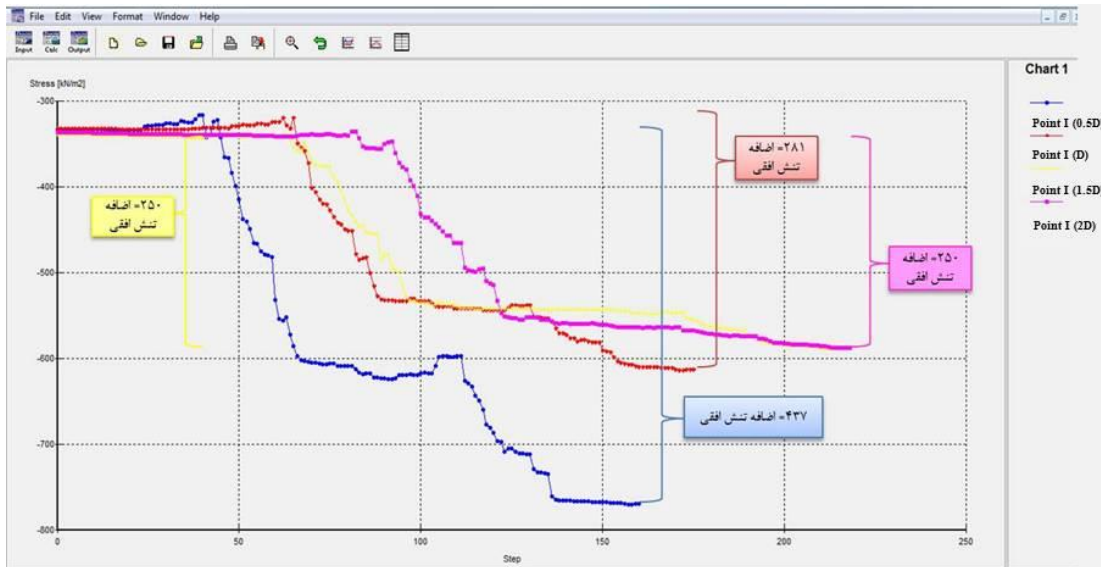


شکل (۶-۳۸): جابه‌جایی قائم نقطه‌ی E برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل

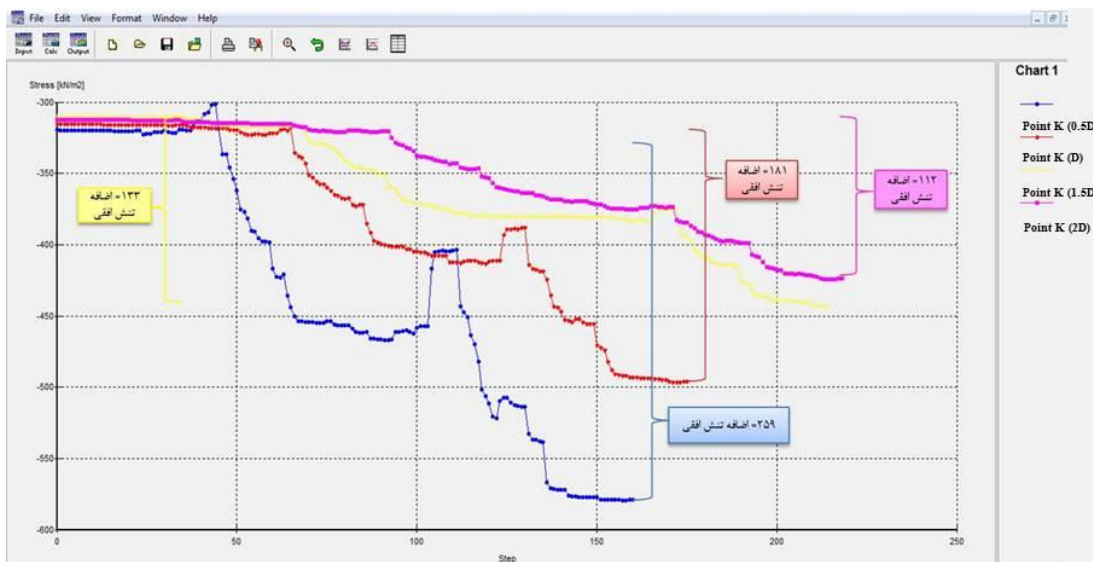
به منظور بررسی تنش نقاط G، I، K و L انتخاب شده‌اند که مقادیر افزایش و کاهش تنش افقی یا قائم در نمودارهای (۶-۳۹) الی (۶-۴۳) آورده شده‌است



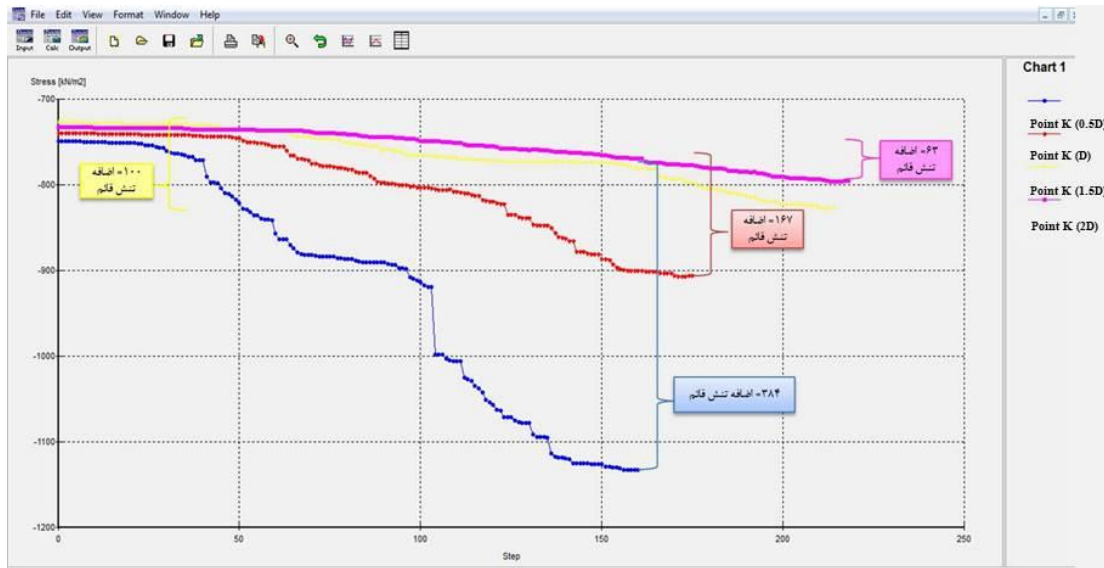
شکل (۶-۳۹): تنش قائم نقطه‌ی G برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



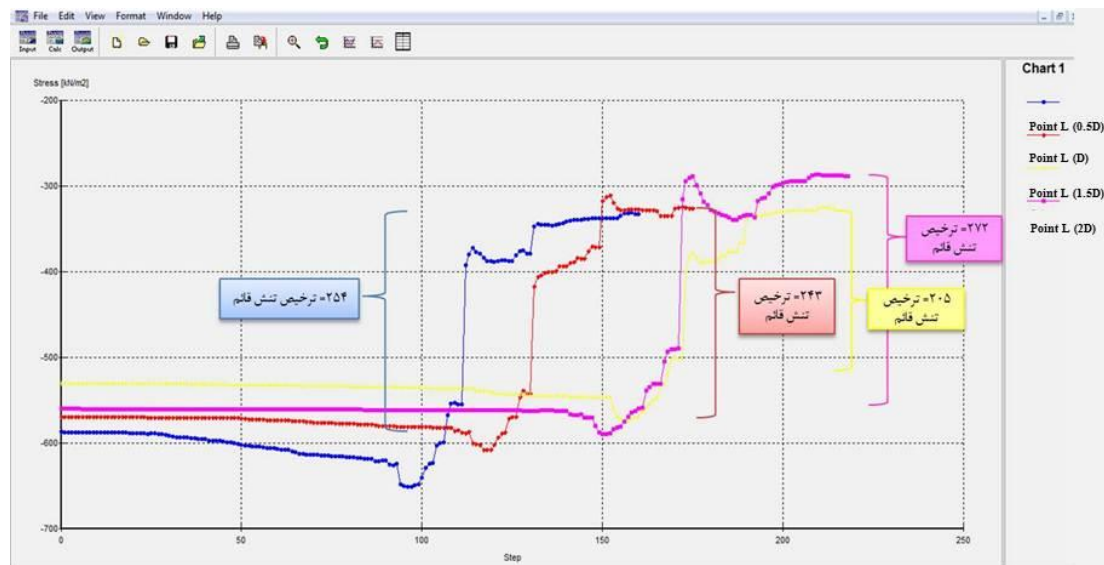
شکل (۶-۴۰): تنش افقی نقطه‌ی I برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۴۱): تنش افقی نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۴۲): تنش قائم نقطه‌ی K برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل



شکل (۶-۴۳): تنش قائم نقطه‌ی L برحسب گامهای محاسباتی (step) برای چهار مدل

۶-۱۳- تفسیر نتایج و خروجی‌های نرم‌افزار در مدل‌های ۱۳ تا ۱۶

در کانتورهای تنش نمایش داده‌شده در شکل (۶-۳۳) مشاهده می‌شود، زمانی که فاصله‌ی دو تونل از D (قطر تونل) بیشتر شود تأثیر حفر تونل دوم بر تونل اول، از دیدگاه توزیع تنش به شدت کاهش می‌یابد و به صورت مستقل از هم عمل می‌کنند. در مدل ۱۳ تمرکز تنش در کناره‌های داخلی تونل‌ها مشاهده می‌شود که در مدل‌های بعدی با فاصله گرفتن تونل‌ها از هم تمرکز تنش کاهش یافته تا

جایی که در مدل‌های ۱۵ و ۱۶ از نظر توزیع تنش اثری بر یکدیگر ندارند. در هر چهار مدل مانند مدل‌های ۱ تا ۱۲، بیشترین جابه‌جایی‌ها مربوط به کف تونل‌ها می‌باشد و نزدیکی و دوری دو تونل از هم تأثیری بر این مقدار ندارد. با بررسی کانتورهای جابه‌جایی مشاهده می‌شود، در مدل ۱۳ که فاصله میان دو تونل 0.5D است جابه‌جایی‌ها به‌طور پیوسته تا سطح زمین گسترش یافته‌است و در سطح زمین جابه‌جایی بیشتری نسبت به مدل‌های بعدی (۱۴، ۱۵ و ۱۶) به وقوع پیوسته‌است. در مدل ۱۴ کمی از این پیوستگی کاسته شده‌است و در سطح زمین هم اغتشاشات کمتری مشاهده می‌شود. در مدل ۱۵ پیوستگی خیلی کمتر شده‌است و دو تونل عملکردی نسبتاً مستقل دارند. در مدل ۱۶ جابه‌جایی تونل‌ها تداخلی باهم ندارند و به صورت مستقل عمل میکنند و در سطح زمین نیز جابه‌جایی کمتری مشاهده می‌شود.

در شکل (۶-۳۵) جابه‌جایی قائم نقطه‌ی A در مدل ۱۳ (رنگ آبی) ۵۱ میلی‌متر، در مدل ۱۴ (رنگ قرمز) ۴۳ میلی‌متر، در مدل ۱۵ (رنگ زرد) ۳۸ میلی‌متر و در مدل ۱۶ (رنگ صورتی) ۳۲ میلی‌متر (علامت منفی در شکل نشان دهنده‌ی جابه‌جایی به سمت پایین است) می‌باشد. در شکل (۶-۳۶) جابه‌جایی قائم نقطه‌ی B در مدل ۱۳ (آبی) ۲۵ میلی‌متر، در مدل ۱۴ (قرمز) ۱۹ میلی‌متر، در مدل ۱۵ (زرد) ۱۸ میلی‌متر و در مدل ۱۶ (صورتی) ۱۷ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۶-۳۷) با افزایش فاصله‌ی دو تونل از هم، مقدار جابه‌جایی قائم نقطه‌ی C (تاج تونل سمت راست) کاهش یافته‌است. در نقطه‌ی D (تاج تونل سمت چپ) نیز وضعیتی مشابه نقطه‌ی C مشاهده شد. شکل (۶-۳۸) جابه‌جایی نقطه‌ی E (جابه‌جایی کف تونل سمت راست) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جابه‌جایی جایی نهایی این نقطه در هر چهار مدل یکسان و تقریباً برابر ۷۰ میلی‌متر می‌باشد که نشان دهنده‌ی عدم تأثیرپذیری جابه‌جایی کف از فاصله‌ی میان دو تونل می‌باشد. نمودار نقطه‌ی F (کف تونل سمت چپ) نیز مشابه‌ی نقطه‌ی E می‌باشد.

در نقطه‌ی G (تاج تونل سمت راست) پدیده‌ی ترخیص تنش را داریم که در تمامی مدل‌ها تفاوت زیادی باهم ندارند. در نقطه‌ی L (تاج تونل سمت چپ) نیز وضعیتی مشابه نقطه‌ی G داریم با این تفاوت که مقادیر ترخیص تنش کمتر می‌باشد.

در شکل (۶-۴۰) تنش افقی نقطه‌ی I در مدل ۱۳ بیشترین افزایش تنش افقی (۴۳۷ کیلونیوتن بر مترمربع) را دارد و در مدل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ افزایش تنش افقی کمتری به وقوع پیوسته‌است و هر سه مدل مقادیر افزایش تنش افقی تقریباً یکسانی را دارا می‌باشند. در شکل (۶-۴۱) به بررسی تنش افقی نقطه‌ی K بر حسب گام‌های محاسبات (Step) پرداخته شده‌است. در مدل ۱۳، افزایش تنش افقی، بیشترین مقدار را دارد و در مدل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ با دور شدن تونل‌ها از هم، مقدار اضافه تنش افقی کاسته شده‌است. در شکل (۶-۴۲) اضافه تنش قائم نقطه‌ی K در مدل ۱۳ بیشترین مقدار را دارد (۳۸۴ کیلونیوتن بر مترمربع) و در مدل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب ۱۶۷، ۱۰۰ و ۶۳ کیلونیوتن بر مترمربع می‌باشد.

فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پژوهش به بررسی ۱۶ مدل برای عمق‌های روباره‌ی متفاوت و نیز فواصل متغیر میان دو تونل پرداخته شد تا جنبه‌های گوناگون برکنش تونل‌های دوقلو با مطالعه‌ی موردی تونل بزرگراه حکیم مشخص شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد جابه‌جایی کف دو تونل متأثر از فاصله‌ی دو تونل نمی‌باشد. با افزایش فاصله‌ی تونل‌ها از ۱/۵ برابر قطر تونل، حفاری تونل دوم تأثیری بر جابه‌جایی‌های تاج تونل اول نداشته‌است. حفاری تونل دوم باعث اضافه تنش افقی و قائم در نقطه‌ی وسط پیلار میانی شده‌است که حتی در فاصله‌ی ۲ برابر قطر تونل نیز افزایش تنش رخ داده‌است که مقادیر این افزایش تنش‌ها در نمودارهای فصل ۶ نمایش داده شده‌است. متناسب با پارامتر انتخابی (تغییر مکان یا تنش در مکان‌های مختلف) نتایج این تحقیق قابل استفاده می‌باشد. در زمان طراحی، متناسب با اهمیت هر کدام از پارامترها می‌توان درباره‌ی انتخاب فاصله‌ی نهایی تصمیم‌گیری کرد. با توجه به عوامل تأثیرگذار بر بهینه‌گی فاصله‌ی دو تونل، در نهایت به انتخاب یک فاصله‌ی بهینه ختم خواهد شد. در این پژوهش سعی شده‌است خروجی‌ها طوری نمایش داده شود که با توجه به تعریف مدنظر طراح از فاصله‌ی بهینه‌ی میان دو تونل برحسب اینکه عمق روباره‌ی تونل چه مقدار باشد، بتوان به این فاصله دست پیدا کرد.

از نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL خروجی‌های متنوعی می‌توان گرفت اما در این پژوهش تمرکز بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی (تنش و جابه‌جایی) بوده‌است.

می‌توان برای بررسی فاصله‌ی بهینه‌ی میان دو تونل، پارامترهای سازه‌ای لاینینگ تونل را نیز بررسی کرد که خود می‌تواند عنوان پایان‌نامه‌ای مجزا در زمینه‌ی سازه‌های ژئوتکنیکی باشد.

این پژوهش بر اساس اطلاعات و داده‌های واقعی انجام گرفته است ولی می‌توان فاصله‌ی بهینه‌ی میان دو تونل را در محیط‌های خاکی متفاوت با اعمال شرایط محیطی خاک‌های اشباع نیز بررسی کرد تا در پروژه‌های گوناگون که به صورت تونل‌های دوقلو اجرا می‌شود، مبنای طراحی قرارگیرد.

منابع و مراجع

۱. مدنی، ح. ۱۳۷۷، تونلسازی جلد اول (حفاری و اجرا)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
2. U.S. Army Corps of Engineers. 1997, Tunnels and Shafts in Rock Engineering and Design. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Manual EM 1110-2-2901.
۳. صالحزاده، ح. ۱۳۸۲، تونلسازی در سنگ‌های درزه‌دار و گسله (با به کارگیری TBM)، ترجمه، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
4. L. Mullar- Salzburg und E. Fecker, Grundgedanken und Grundsätze der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NOT), in Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe 1978, Trans Tech Publications, Claushal 1978, 247-262.
۵. مدنی، ح. تونلسازی (جلد چهارم: طراحی و اجرای سیستم نگهداری)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ویرایش اول، ۱۳۸۱، صفحات ۱۸۹ تا ۱۹۲.
6. A. Muir-Wood, Tunnelling: Management by design. Spon, London 2000 Bearing ring.
7. Hoek, E., Kalser, P.K., Bawden, W.F. 1995, Support of Underground Excavation in Hard Rocks. A.A. Balkeman/Rotterdam/Brookfield.
۸. مدنی، ح. ۱۳۷۷، تونلسازی جلد سوم (تحلیل پایداری)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
9. Jing, L., Hudson, J.A. 2002, Numerical methods in rock mechanics. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, 409-427.
۱۰. قارونی نیک، م.، همزه ابیانی، م. ۱۳۸۰، نگهداری حفاریات زیرزمینی در سنگ‌های سخت ترجمه، انتشارات نص.
11. Varmmer, P.A., Brikgreve, R.B.J. 2001. Plaxis 3D tunnel Manual.

۱۲. مهندسین مشاور ساحل ؛ گزارش کلیات روش اجرای تونل حکیم ، مجموعه مطالعات پایه و مفهومی تونل بزرگراه حکیم در محدوده پارک جنگلی چیتگر، ۱۳۹۱.

13. C.W.Yu & J.C. Chern, (2007), "Expert system for D&B tunnel construction" , Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises - Taylor & Francis Group, London.

۱۴. مهندسین مشاور ساحل ؛ تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه ی تونل حکیم، مجموعه مطالعات پایه و مفهومی تونل بزرگراه حکیم در محدوده پارک جنگلی چیتگر، ۱۳۹۱.

Abstract

The need to design and build tunnels in order to urban transport is pervasive. One of these tunnels is twin tunnel that Interactions between two tunnel for different distances, is one of the challenges facing designers. Hakim highway Twin tunnel in Tehran excavated by the NATM method. In this paper, three dimensional numerical model is done by Plaxis 3D Tunnel software for shallow tunnels. Four model have been analyzed which the distance between two tunnels are 0.5, 1, 1.5 and 2 times the diameter (width) of tunnels. In the model, all stages of the executive and the excavation is considered, so three dimensional effects are visible in the results. History of displacements and stresses in different parts has been investigated. The results show the movement of the tunnel floor is not affected by the distance between two tunnels. By increasing the distance between the tunnels of 1.5 times the diameter (width) of the tunnel, excavation in second tunnel had no effect on the movement crown of first tunnel. Also excavation in second tunnel, causing added stress on the midpoint of the central pillar that even at a distance of 2 times the diameter (width) of the tunnel occurred increasing stress.

Keywords: twin tunnel NATM Interaction Plaxis 3D Tunnel.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Numerical Modelling of NATM Tunneling Method Design of
Hakim Highway Tunnels**

By:

M. Yazdpoor

Supervisors:

Dr. R. Naderi

Dr. M. Jalali

September 2016