





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه مهندسی استخراج و مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل چیتگر (حکیم)

مصطفی صالحی شیخی

استاد راهنما:

پروفسور سید رحمان ترابی

شهریور ۱۳۹۴

شماره: ۳۶۹۴/۱۵۷۳  
تاریخ: ۹۴/۷/۲۷  
ویرایش:

بسمه تعالی



وزارت آموزش عالی  
مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۴)

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مصطفی صالحی شیخی رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل چیتگر (حکیم) که در تاریخ ۹۴/۰۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خوب) امتیاز: ۱۷/۸۵  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰-۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹-۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹-۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹-۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر سید رحمان ترابی	استاد	
۲- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۳- استاد ممتحن	دکتر شکرالله زارع	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری



تقدیم بہ پدرم

کوہی استوار و حامی من در طول تمام زندگی

تقدیم بہ مادرم

سنگ صبری کہ الفبای زندگی بہ من آموخت

تقدیم بہ دلبندم

امید بخش جانم کہ آسایش او آرامش من است



## تقدیر و تشکر

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی به عنوان

استاد راهنما که همواره بخارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

در ادامه از خانم مهندس صاحبی کمال تشکر را داشته که با راهنمایی و حمایت های بی دریغ و دلسوزانه خود اینجانب را در انجام این تحقیق یاری کرده اند. همچنین از

پرنسپل محترم موسسه حرا (قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا)، مخصوصاً آقای مهندس سلیم پور شکر کرده و برای ایشان آرزوی سلامتی و موفقیت می کنم.

در انتها برای دوستانی که مرا مورد لطف خود قرار داده اند، آرزوی موفقیت، سعادت و بهروزی دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **مصطفی صالحی شیخی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل دوقلوی چیتگر (حکیم) تحت راهنمایی آقای دکتر سید رحمان ترابی** متعهد می‌شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

در بسیاری از کشورها، تونل‌ها در خاک و سنگ با استفاده از روش تونل‌زنی جدید اتریشی (NATM) ساخته می‌شوند. تونل دوقلوی بزرگراهی حکیم با طولی در حدود ۱۰۰۰ متر، به روش سنتی اجرا شده است. عرض مفید راه ۱۴/۵ متر و شیب طولی مجاز تونل ۵٪ در نظر گرفته شده است. این تونل با ارتفاع تقریبی ۱۳/۹ و عرض ۱۷/۹ متر به روش NATM در هفت مرحله به روش گالری‌های کناری اجرا شده است.

هدف از این پایان‌نامه، تحلیل پایداری تونل‌های بزرگراهی، طراحی نگهداری موقت و کنترل جابجایی این سازه‌ها می‌باشد. در این پژوهش، تحلیل پایداری تونل‌ها با استفاده از سطح تراز خطر ساکورایی، روش عددی و نتایج ابزار دقیق صورت گرفت. در نهایت سیستم نگهداری ترکیبی با استفاده از روش مقطع معادل برای تونل مورد مطالعه پیشنهاد گردید.

جابه‌جایی‌های القایی از روی تجربه و مشاهده با تنظیم سرعت حفاری، فاصله بین جبهه کار تونل و نگهداری، حفاری جزئی جبهه کار و بستن کف کنترل می‌شود. در این پایان‌نامه با استفاده از روش تفاضل محدود تأثیر طول گام، توالی حفاری بهینه، الگوهای حفاری و اثر متقابل دو تونل بر هم بررسی شد. با توجه به نتایج، هر چه اختلاف بین دو طول گام قسمت سقف و پله در هر گالری کمتر باشد، اختلاف بین جابجایی‌ها و روند تغییرات کمتر می‌شود. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که بسته شدن سریع حلقه نگهداری و مرحله حفاری مرکزی (گالری وسط) از عوامل مهم در کنترل تغییر شکل تونل و نشست سطح در تونل زمین نرم می‌باشد. بسته شدن سریع حلقه با اتخاذ حجم حفاری بزرگ‌تر مؤثرتر از اتخاذ حجم حفاری کوچک‌تر برای محدود کردن تغییر شکل تاج تونل و نشست سطحی در تونل زمین نرم در عمق کم است اگر پایداری جبهه کار

به اندازه کافی حفظ شده باشد. چهار الگوی مختلف با توالی‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج کاهش فاصله دهانه آزاد حداکثر جابجایی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در این حالت باقی ماندن پله جابجایی نهایی را بیش از ۷۰٪ کاهش می‌دهد. نزدیک‌تر شدن فاصله نگهداری کامل جابه‌جایی نهایی را بیش از ۵۰٪ درصد کاهش می‌دهد. اگر دو تونل مجاور دور از هم به طوری که مناطق تأثیر آن‌ها روی هم نیفتد ساخته شد، سپس تونل‌ها را به صورت انفرادی می‌توان به طور جداگانه به عنوان تونل تکی در نظر گرفت و همین‌طور تحلیل کرد. توجه ویژه به اثر فاصله پس فازها بین جبهه کار تونل دوقلوی حفاری شده (LT) و مکانیسم انتقال بار بین دو تونل پرداخت شده است. همچنین اثر متقابل بین دو تونل برای مقادیر نسبت عرض ستون به قطر تونل از  $1 = W/D$  و یا بیشتر ناچیز است. در نهایت برای کنترل و مهار جابجایی‌های اطراف تونل نیز با در نظر گرفتن المان‌های مختلف موجود در نرم‌افزار **FLAC<sup>3D</sup>** و مدل کردن آن‌ها در شرایط منطقه، سیستم نگهداری مناسب برای تونل تعیین شد، و ضرایب اطمینان سیستم نگهداری توسط نرم‌افزار **PCACOL** به دست آمد.

کلمات کلیدی: **FLAC<sup>3D</sup>**، روش حفاری **NATM**، سطح تراز خطر ساکورایی، تونل حکیم، روش مقطع معادل





## فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۲-۱- اهمیت استفاده از تونل‌های بزرگراهی..... ۳
- ۳-۱- مشخصات عمومی طرح..... ۳
- ۴-۱- مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده..... ۴
- ۵-۱- ضرورت انجام تحقیق..... ۴
- ۶-۱- روش انجام تحقیق..... ۶
- ۷-۱- ساختار پایان‌نامه..... ۸

## فصل دوم: مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی

- ۱-۲- مقدمه..... ۱۲
- ۲-۲- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه..... ۱۳
- ۳-۲- جایگاه زمین‌شناسی تونل..... ۱۳
- ۴-۲- مشخصات ایالت ساختاری البرز..... ۱۴
- ۵-۲- زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه..... ۱۵
- ۱-۵-۲- سازند آبرفتی A..... ۱۵

۱۷	.....B-۲-۵-۲-سازند آبرفتی
۱۷	.....C-۳-۵-۲-سازند آبرفتی
۱۸	.....۶-۲- زمین‌شناسی مسیر تونل
۱۹	.....۷-۲- گسل‌های محدوده تونل
۱۹	.....۸-۲- وضعیت آب زیرزمینی در محدوده تونل
۲۰	.....۹-۲- زمین‌شناسی مهندسی تونل
۲۰	.....۱۰-۲- لایه‌بندی رسوبات در محدوده تونل
۲۱	.....۱۱-۲- دانه‌بندی سازندهای موجود در مسیر تونل

### فصل سوم: مطالعات و آزمایش‌های ژئوتکنیکی

۲۴	.....۱-۳- مقدمه
۲۴	.....۲-۳- نتایج آزمایش‌های صحرایی
۲۴	.....۱-۲-۳- نتایج آزمایش‌های دانسیته صحرایی (دانسیته برجا)
۲۵	.....۲-۲-۳- نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای
۲۶	.....۳-۲-۳- نتایج آزمایش‌های برش برجا
۲۷	.....۳-۳- نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی



۲۷	۱-۳-۳- نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی
۲۸	۲-۳-۳- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم
۲۹	۳-۳-۳- نتایج آزمایش‌های سه محوری
۳۰	۴-۳- پیشنهاد پارامترهای ژئوتکنیکی

### فصل چهارم: مطالعات رفتارسنجی و نصب ابزار دقیق

۳۲	۱-۴- مقدمه
۳۲	۲-۴- اجرای پروژه
۳۲	۳-۴- نقاط مهم برای رفتار سنجی
۳۳	۴-۴- روش‌های رفتارسنجی
۳۳	۵-۴- اهداف رفتارسنجی پروژه
۳۳	۶-۴- سیستم ابزار دقیق بخش‌های مختلف پروژه
۳۴	۱-۶-۴- رفتارسنجی تغییر شکل‌های سطح زمین (نشست سنجی)
۳۵	۲-۶-۴- کشیدگی سنج‌های چند نقطه‌ای در گمانه‌ها
۳۷	۳-۶-۴- پین ژئودتیک
۳۸	۷-۴- نصب، قرائت، پردازش و گزارش نتایج ابزار دقیق

۳۸.....	۴-۷-۱-نصب.....
۴۰.....	۴-۷-۲-قرائت.....
۴۱.....	۴-۷-۳-پردازش.....
۴۳.....	۴-۷-۴-گزارش ها.....
۴۳.....	۴-۷-۴-۱-گزارش روزانه.....
۴۳.....	۴-۷-۴-۲-گزارش هفتگی.....
۴۳.....	۴-۷-۴-۳-گزارش ماهانه.....
۴۴.....	۴-۷-۴-۴-گزارش موردی.....
۴۴.....	۴-۸-بررسی ایستگاه های ابزار دقیق (ژئودتیک).....
۴۸.....	۴-۹-تحلیل پایداری تونل با استفاده از داده های ژئودتیک.....

### فصل پنجم: آشنایی و مراحل حل مسئله در نرم افزار $FLAC^{3D}$

۵۰.....	۵-۱-مقدمه.....
۵۰.....	۵-۲-مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ .....
۵۰.....	۵-۲-۱-آشنایی با نرم افزار $FLAC^{3D}$ .....
۵۰.....	۵-۲-۲-مراحل حل مسئله در نرم افزار $FLAC^{3D}$ .....

عنوان	شماره صفحه
۳-۵- گام اول: هندسه سازی.....	۵۲
۴-۵- گام دوم: انتخاب مدل ساختاری و تعیین خصوصیات ماده.....	۵۵
۵-۵- گام سوم: شرایط مرزی و اولیه.....	۵۵
۶-۵- گام چهارم: بررسی تعادل مدل.....	۵۵
۷-۵- گام پنجم: اعمال عملیات اجرایی.....	۵۸
۱-۷-۵- نحوه خاک برداری و پایدارسازی تونل.....	۵۸
۲-۷-۵- مراحل ساخت.....	۵۸
۳-۷-۵- انتخاب روش مناسب حفاری تونل.....	۶۰
۸-۵- گام ششم: نصب سیستم نگهداری.....	۶۳
۱-۸-۵- سیستم‌های نگه‌دارنده اولیه استفاده‌شده در تونل.....	۶۳
۱-۱-۸-۵- بتن پاشی.....	۶۳
۲-۱-۸-۵- شبکه توری فولادی.....	۶۵
۳-۱-۸-۵- قاب مشبک فولادی.....	۶۶

### فصل ششم: کنترل جابجایی تونل های حفر شده به روش NATM

۱-۶- مقدمه.....	۷۶
-----------------	----

۷۷.....	۲-۶- تحلیل‌های مقدماتی و اولیه.....
۸۰.....	۳-۶- اثر سه‌بعدی حفاری قبل از نصب سیستم نگهداری.....
۹۱.....	۴-۶- تحلیل پایداری تا قبل از نصب سیستم نگهداری.....
۹۲.....	۴-۶-۱- کرنش بحرانی.....
۹۳.....	۴-۶-۲- تراز هشدار خطر.....
۹۵.....	۴-۶-۳- بررسی پایداری تونل با استفاده از مفهوم کرنش بحرانی.....
۱۰۰.....	۴-۶-۴- بررسی پایداری تونل با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی.....
۱۰۴.....	۵-۶- نصب سیستم نگهداری.....
۱۰۴.....	۵-۶-۱- استفاده از روش "مقطع معادل" در طراحی نگهداری موقت تونل‌ها.....
۱۰۷.....	۵-۶-۲- معادلات حاکم بر رویکرد مقطع معادل.....
۱۱۰.....	۵-۶-۳- توالی حفاری بهینه.....
۱۱۳.....	۵-۶-۴- تعیین طول بهینه گام حفاری.....
۱۱۶.....	۵-۶-۵- برخی احتمالات توالی‌های پیشروی با (NATM).....
۱۲۹.....	۶-۶- اثر متقابل دو تونل بر هم.....
۱۳۶.....	۷-۶- تحلیل پایداری بعد از نصب سیستم نگهداری.....

۶-۸- تجزیه و تحلیل نتایج بعد از نصب سیستم نگهداری اولیه تونل..... ۱۳۹

۶-۸-۱- ارزیابی نتایج لاینینگ تونل با روباره ۱۳، ۸ و ۴ متری..... ۱۳۹

۶-۸-۲- اعتبار سنجی روش عددی تفاضل محدود توسط داده‌های ابزار دقیق..... ۱۵۰

### فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۷-۱- نتیجه گیری..... ۱۵۴

۷-۲- پیشنهادها..... ۱۵۶

منابع فارسی..... ۱۵۷

منابع خارجی..... ۱۵۹



## فهرست علائم و نشانه ها

عنوان	علامت اختصاری
سیستم طبقه بندی خاک متحد	USCS
اشباع متراکم	CU
گراول خوب دانه بندی شده	GW
گراول ضعیف دانه بندی شده	GP
روش گالری کناری	SD
روش دیافراگم میانی	CD
روش دیافراگم متقاطع	CRD
روش برش حلقه ای	RC
پوشش سقف	CR
پوشش گالری های چپ و راست	CRD ,CLD
پوشش کف	CI
خاک سقف	SR
خاک پله چپ و راست	SRB ,SLB
خاک گالری های چپ و راست	CRD ,CLD
خاک کف	SI

<b>W</b>	عرض بین دو تونل
<b>L<sub>U</sub></b>	طول دهانه نگهداری نشده
<b>Stable L<sub>U</sub></b>	طول دهانه نگهداری نشده پایدار (طول دهانه ای بدون اضافه حفاری)
<b>Max L<sub>U</sub></b>	طول دهانه نگهداری نشده حداکثر (حداکثر طول همراه با اضافه حفاری قبل از ریزش)
<b>Collapse L<sub>U</sub></b>	طول دهانه نگهداری نشده ریزشی (طول دهانه ای که منجر به ریزش می شود)
<b>L<sub>1</sub></b>	دهانه آزاد (فاصله آزاد بین جبهه کار حفاری و نگهداری سقف) (برابر با $\frac{1}{4}$ بخش طولی است)
<b>L<sub>2</sub></b>	فاصله نگهداری کامل (فاصله بین جبهه کار حفاری و اولین بخش سراسر پوشش شده)
<b>L<sub>3</sub></b>	فاصله بین جبهه کار سقف و پله
<b>L<sub>D</sub></b>	فاصله بین گالری ها از هم در یک تونل
<b>L<sub>T</sub></b>	فاصله بین گالری ها از هم در تونل دوقلو
<b>D<sub>eq</sub></b>	ضریب تراکم پذیری معادل
<b>K<sub>eq</sub></b>	ضریب انعطاف پذیری معادل
<b>t<sub>eq</sub></b>	ضخامت معادل
<b>E<sub>eq</sub></b>	مدول الاستیسیته معادل
<b>GST1</b>	قرائت سقف گالری سمت چپ



## فهرست جدول ها

شماره صفحه

عنوان

۴	جدول ۱-۱- مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده
۲۶	جدول ۱-۳- نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای
۲۷	جدول ۲-۳- نتایج آزمایش برش برجا
۲۸	جدول ۳-۳- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های محدوده تونل
۲۹	جدول ۴-۳- نتایج آزمایش‌های سه محوری
۳۰	جدول ۵-۳- پیشنهاد پارامترهای ژئوتکنیکی در محدوده تونل
۴۴	جدول ۱-۴- مشخصات ایستگاه‌های نصب‌شده در تونل‌ها
۴۶	جدول ۲-۴- حداکثر جابجایی ثبت‌شده در ایستگاه NST1570
۴۷	جدول ۳-۴- حداکثر جابجایی ثبت‌شده در ایستگاه SST1490
۴۷	جدول ۴-۴- حداکثر جابجایی ثبت‌شده در ایستگاه NST2010
۵۵	جدول ۱-۵- پارامترهای معیار شکست موهر-کلمب در مدل سازی
۶۱	جدول ۲-۵- مقایسه و کنترل روش‌های مختلف حفاری
۸۳	جدول ۱-۶- نتایج حفر گالری سمت چپ از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۱۳ متر
۸۴	جدول ۲-۶- نتایج حفر گالری سمت چپ از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۸ متر
۸۴	جدول ۳-۶- نتایج حفر گالری سمت چپ از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۴ متر
۸۵	جدول ۴-۶- نتایج حفر گالری سمت راست از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۱۳ متر
۸۵	جدول ۵-۶- نتایج حفر گالری سمت راست از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۸ متر
۸۶	جدول ۶-۶- نتایج حفر گالری سمت راست از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۴ متر
۸۶	جدول ۷-۶- نتایج حفاری تمام مقطع بدون نگهداری با روباره ۱۳ متر
۸۶	جدول ۸-۶- نتایج حفاری تمام مقطع بدون نگهداری با روباره ۸ متر
۸۶	جدول ۹-۶- نتایج حفاری تمام مقطع بدون نگهداری با روباره ۴ متر

جدول ۶-۱۰- مقایسه نتایج حفاری تمام مقطع با تراز هشدار خطر ۲	۸۷
جدول ۶-۱۱- مقایسه نتایج حفاری گالری راست با تراز هشدار خطر ۲	۸۷
جدول ۶-۱۲- جابجایی مجاز برای روباره‌های ۸ و ۱۳ متر	۸۷
جدول ۶-۱۳- جابجایی مجاز برای روباره ۴ متر	۸۷
جدول ۶-۱۴- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۱۳ متر بدون نگهداری	۹۹
جدول ۶-۱۵- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۸ متر بدون نگهداری	۱۰۰
جدول ۶-۱۶- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۴ متر بدون نگهداری	۱۰۰
جدول ۶-۱۷- نتایج حاصل از تحلیل پایداری برای حفر گالری چپ	۱۰۱
جدول ۶-۱۸- نتایج حاصل از تحلیل پایداری برای حفر گالری راست	۱۰۱
جدول ۶-۱۹- نتایج حاصل از تحلیل پایداری برای حفاری تمام مقطع تونل	۱۰۲
جدول ۶-۲۰- مشخصات لتیس با سطح مقطع مثلثی باضخامت شاتکریت ۳۵ سانتی متری برای دیواره اصلی	۱۰۵
جدول ۶-۲۱- مشخصات لتیس با سطح مقطع مثلثی باضخامت شاتکریت ۲۵ سانتی متری برای دیواره موقت	۱۰۶
جدول ۶-۲۲- خصوصیات شاتکریت باضخامت ۳۵ سانتی متری	۱۰۶
جدول ۶-۲۳- خصوصیات شاتکریت باضخامت ۲۵ سانتی متری	۱۰۶
جدول ۶-۲۴- حداقل و حداکثر جابجایی در سقف تونل برای طرح‌های حفاری (A) تا (F)	۱۱۳
جدول ۶-۲۵- مقادیر جابجایی حداکثر به ازای مقادیر مختلف طول گام حفاری در روباره ۱۳ متر	۱۱۵
جدول ۶-۲۶- مقادیر جابجایی حداکثر به ازای مقادیر مختلف طول گام حفاری در روباره ۸ متر	۱۱۵
جدول ۶-۲۷- مقادیر جابجایی حداکثر به ازای مقادیر مختلف طول گام حفاری در روباره ۴ متر	۱۱۶
جدول ۶-۲۸- نتایج الگوی حفاری ۱ برای روباره ۱۳ متر در حالت $(L1=L2=0.25D)$	۱۱۹
جدول ۶-۲۹- نتایج الگوی حفاری ۲ برای روباره ۱۳ متر در حالت $(L1=L2=0.5D)$	۱۲۰
جدول ۶-۳۰- نتایج الگوی حفاری ۳ برای روباره ۱۳ متر در حالت $(L1=0.25D, L2=0.75D, L3=0.5D)$	۱۲۰

## فهرست جدول ها

شماره صفحه

عنوان

- جدول ۳۱-۶- نتایج الگوی حفاری ۴ برای روباره ۱۳ متر در حالت  $(L1=0.25D, L2=1D, L3=0.75D)$  ..... ۱۲۱
- جدول ۳۲-۶- نتایج الگوی حفاری ۱ برای روباره ۴ متر در حالت  $(L1=L2=0.25D)$  ..... ۱۲۱
- جدول ۳۳-۶- نتایج الگوی حفاری ۲ برای روباره ۴ متر در حالت  $(L1=L2=0.5D)$  ..... ۱۲۲
- جدول ۳۴-۶- نتایج الگوی حفاری ۳ برای روباره ۴ متر در حالت  $(L1=0.25D, L2=0.75D, L3=0.5D)$  ..... ۱۲۲
- جدول ۳۵-۶- نتایج الگوی حفاری ۴ برای روباره ۴ متر در حالت  $(L1=0.25D, L2=1D, L3=0.75D)$  ..... ۱۲۳
- جدول ۳۶-۶- نتایج الگوی حفاری ۱ برای روباره ۸ متر در حالت  $(L1=L2=0.25D)$  ..... ۱۲۳
- جدول ۳۷-۶- نتایج الگوی حفاری ۲ برای روباره ۸ متر در حالت  $(L1=L2=0.5D)$  ..... ۱۲۴
- جدول ۳۸-۶- نتایج الگوی حفاری ۳ برای روباره ۸ متر در حالت  $(L1=0.25D, L2=0.75D, L3=0.5D)$  ..... ۱۲۴
- جدول ۳۹-۶- نتایج الگوی حفاری ۴ برای روباره ۸ متر در حالت  $(L1=0.25D, L2=1D, L3=0.75D)$  ..... ۱۲۵
- جدول ۴۰-۶- نتایج حفاری تمام مقطع با روباره ۱۳ متر ..... ۱۲۵
- جدول ۴۱-۶- نتایج حفاری تمام مقطع با روباره ۴ متر ..... ۱۲۵
- جدول ۴۲-۶- نتایج حفاری تمام مقطع با روباره ۸ متر ..... ۱۲۶
- جدول ۴۳-۶- مقایسه مقادیر حداکثر جابجایی عمودی در مرحله چهارم برای الگوهای ۱، ۲، ۳ و ۴ با سه روباره.. ۱۲۸
- جدول ۴۴-۶- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۴ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(0.5D=LT)$  ..... ۱۳۲
- جدول ۴۵-۶- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۸ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(0.5D=LT)$  ..... ۱۳۲
- جدول ۴۶-۶- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۱۳ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(0.5D=LT)$  ..... ۱۳۳
- جدول ۴۷-۶- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۴ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(1D=LT)$  ..... ۱۳۳
- جدول ۴۸-۶- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۸ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(1D=LT)$  ..... ۱۳۴
- جدول ۴۹-۶- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۱۳ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(1D=LT)$  ..... ۱۳۴
- جدول ۵۰-۶- مقایسه جابجایی تونل تکی با تونل دوقلو در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  ..... ۱۳۵
- جدول ۵۱-۶- مقادیر کرنشها و همگراییهای بحرانی با روباره ۱۳ متر بعد از نصب نگهداری ..... ۱۳۷

## فهرست جدول ها

شماره صفحه

عنوان

- 
- جدول ۵۲-۶- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۸ متر بعد از نصب نگهداری..... ۱۳۸
- جدول ۵۳-۶- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۴ متر بعد از نصب نگهداری..... ۱۳۸
- جدول ۵۴-۶- ماکزیمم نیروهای محوری و لنگرهای خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳)..... ۱۴۵
- جدول ۵۵-۶- ماکزیمم نیروهای محوری و لنگرهای خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۸)..... ۱۴۵
- جدول ۵۶-۶- ماکزیمم نیروهای محوری و لنگرهای خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۴)..... ۱۴۵
- جدول ۵۷-۶- مقادیر حداکثر نیروهای برشی نگهداری ترکیبی برای سه روباره..... ۱۴۸
- جدول ۵۸-۶- مقایسه جابجایی‌های مدل عددی و ابزار دقیق در حالت (L1=0, 25D, L2=1D, L3=0.75D)..... ۱۵۰

## فهرست شکل ها

عنوان

شماره صفحه

- شکل ۱-۱- فلوجارت سازمان دهی پایان نامه..... ۱۰
- شکل ۱-۲- موقعیت تونل حکیم بر روی نقشه تهران..... ۱۲
- شکل ۲-۲- موقعیت تونل حکیم بر روی تصویر ماهواره‌ای..... ۱۲
- شکل ۳-۲- تقسیم بندی نبوی..... ۱۴
- شکل ۴-۲- پهنه‌های ساختاری ایران از نگاه علوی..... ۱۴
- شکل ۵-۲- تصویری از رسوبات سیمانته سازند A در نزدیکی تونل..... ۱۶
- شکل ۶-۲- تصویری از نهشته‌های سازند C در نزدیکی محدوده طرح..... ۱۸
- شکل ۷-۲- مسیر تونل‌ها بر روی عکس هوایی سال ۱۹۵۶ میلادی..... ۱۹
- شکل ۸-۲- تصویری از لایه‌های خاک ریزدانه متعلق به سازند C در کانال حفر شده جهت جایگذاری لوله زهکشی... ۲۱
- شکل ۹-۲- تصویری از لایه‌های شن و ماسه تمیز و لایه‌های ریزدانه در نزدیکی محدوده طرح..... ۲۲
- شکل ۱-۳- تغییرات وزن مخصوص خشک و مرطوب (طبیعی) خاک نسبت به عمق در محدوده تونل..... ۲۵
- شکل ۱-۴- پلان کلی پروژه تونل حکیم..... ۳۲
- شکل ۲-۴- اجزای مختلف کشیدگی سنج میله ای چنگکی (الف) و میله ای انگری (ب)..... ۳۶
- شکل ۳-۴- نمونه پین های ژئودتیک و ملحقات آن..... ۳۷
- شکل ۴-۴- قرائت پین های ژئودتیک با دوربین توتال استیشن - مقطع عرضی..... ۳۸
- شکل ۵-۴- قرائت پین های ژئودتیک با دوربین توتال استیشن - مقطع طولی..... ۳۸
- شکل ۶-۴- تغییرات جابجایی بر حسب زمان در ایستگاه (SST1490)..... ۴۵
- شکل ۷-۴- تغییرات جابجایی بر حسب زمان در ایستگاه (NST1570)..... ۴۵
- شکل ۸-۴- تغییرات جابجایی بر حسب زمان در ایستگاه (NST2010)..... ۴۶
- شکل ۱-۵- الگوریتم حل مسئله در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>..... ۵۱

## فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

- شکل ۲-۵- نمونه‌ای از یک مدل به همراه اصطلاحات مورد استفاده در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> ..... ۵۲
- شکل ۳-۵- هندسه مدل با روباره ۱۳ متر ..... ۵۳
- شکل ۴-۵- هندسه مدل با روباره ۸ متر ..... ۵۳
- شکل ۵-۵- هندسه مدل با روباره ۴ متر ..... ۵۳
- شکل ۶-۵- ساخت هندسه با روباره ۱۳ متر به کمک ابزار Extrusion ..... ۵۴
- شکل ۷-۵- ساخت هندسه با روباره ۸ متر به کمک ابزار Extrusion ..... ۵۴
- شکل ۸-۵- ساخت هندسه با روباره ۴ متر به کمک ابزار Extrusion ..... ۵۴
- شکل ۹-۵- ایجاد تعادل در مدل با کنترل نیروهای نامتعادل کننده گرهی با روباره ۱۳ متر ..... ۵۶
- شکل ۱۰-۵- تاریخچه زمانی سرعت گرهی در سقف تونل با روباره ۱۳ متر ..... ۵۶
- شکل ۱۱-۵- ایجاد تعادل در مدل با کنترل نیروهای نامتعادل کننده گرهی با روباره ۸ متر ..... ۵۷
- شکل ۱۲-۵- تاریخچه زمانی سرعت گرهی در سقف تونل با روباره ۸ متر ..... ۵۷
- شکل ۱۳-۵- ایجاد تعادل در مدل با کنترل نیروهای نامتعادل کننده گرهی با روباره ۴ متر ..... ۵۷
- شکل ۱۴-۵- تاریخچه زمانی سرعت گرهی در سقف تونل با روباره ۴ متر ..... ۵۸
- شکل ۱۵-۵- مقطع هندسی پوشش موقت سه خطه تونل ..... ۵۹
- شکل ۱۶-۵- نمودار بهینه‌شده برای انتخاب روش حفاری مناسب بر طبق دهانه تونل و نسبت مقاومت به تنش ..... ۶۱
- شکل ۱۷-۵- دستگاه شاتکریت پاش ..... ۶۵
- شکل ۱۸-۵- استفاده از شبکه توری فولادی به‌عنوان نگهداری در منطقه‌ای ناپایدار ..... ۶۶
- شکل ۱۹-۵- حفاری تونل با لیس گیردر ..... ۶۷
- شکل ۲۰-۵- قاب مشبک سه میله و چهار میله ..... ۶۸
- شکل ۲۱-۵- لق گیری بلوک سنگ‌های شل و شکسته شده ..... ۶۹
- شکل ۲۲-۵- لایه اول شاتکریت ..... ۷۰

## فهرست شکل ها

عنوان

شماره صفحه

- شکل ۵-۲۳- نصب لتیس گیردر ..... ۷۰
- شکل ۵-۲۴- نیمی از لتیس گیردر در شاتکریت تعبیه شده ..... ۷۱
- شکل ۵-۲۵- قاب مشبک کاملاً تقویت شده با شاتکریت ..... ۷۲
- شکل ۵-۲۶- سطح مقطع لتیس گیردر با صفحه عمودی شاتکریت ..... ۷۳
- شکل ۶-۱- (الف) ارتباط بین زون ها در مقطع عرضی و (ب) بخش طولی ..... ۷۸
- شکل ۶-۲- نمایش بخش طولی برای کل تونل ..... ۷۹
- شکل ۶-۳- نمایش بخش طولی برای گالری وسط ..... ۷۹
- شکل ۶-۴- نمایش بخش طولی برای گالری های کناری ..... ۸۰
- شکل ۶-۵- تعریف گالری های تونل در مدلسازی ..... ۸۲
- شکل ۶-۶- جابجایی در راستای X در مرحله اول حفاری و تعریف  $L_U$  در مدلسازی ..... ۸۳
- شکل ۶-۷- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در سقف تونل ( $L_U=8.5$ ) با روباره ۱۳ متر ..... ۸۸
- شکل ۶-۸- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در سقف تونل ( $L_U=8.5$ ) با روباره ۸ متر ..... ۸۸
- شکل ۶-۹- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در سقف تونل ( $L_U=4$ ) با روباره ۴ متر ..... ۸۸
- شکل ۶-۱۰- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در وسط مش با روباره ۱۳ متر ..... ۸۹
- شکل ۶-۱۱- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در وسط مش با روباره ۸ متر ..... ۸۹
- شکل ۶-۱۲- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در وسط مش با روباره ۴ متر ..... ۸۹
- شکل ۶-۱۳- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در حفاری گالری راست ( $L_U=17$ ) با روباره ۱۳ متر ..... ۹۰
- شکل ۶-۱۴- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در حفاری گالری راست ( $L_U=18.5$ ) با روباره ۸ متر ..... ۹۰
- شکل ۶-۱۵- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در حفاری گالری راست ( $L_U=5$ ) با روباره ۴ متر ..... ۹۱
- شکل ۶-۱۶- نمودار تعیین  $R_f$  با استفاده از مقاومت فشاری تک محوره ..... ۹۳
- شکل ۶-۱۷- رابطه بین کرنش بحرانی ( $\epsilon_{CF}$ ) و کرنش شکست ( $\epsilon_f$ ) ..... ۹۳

## فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

- شکل ۶-۱۸- تراف همدار خطر برای ارزیابی پایداری تونل‌ها..... ۹۴
- شکل ۶-۱۹- رابطه پیشنهادی ساکورایی بین کرنش بحرانی و مدول الاستیسیته..... ۹۴
- شکل ۶-۲۰- کنتورهای جابجایی حفاری ۴۰ متر از گالری چپ با روباره ۱۳ متر..... ۹۶
- شکل ۶-۲۱- کنتورهای جابجایی حفاری ۴۰ متر از گالری چپ با روباره ۸ متر..... ۹۶
- شکل ۶-۲۲- کنتورهای جابجایی حفاری ۴۰ متر از گالری چپ با روباره ۴ متر..... ۹۶
- شکل ۶-۲۳- کنتورهای جابجایی حفاری ۱۷ متر از گالری راست با روباره ۱۳ متر..... ۹۷
- شکل ۶-۲۴- کنتورهای جابجایی حفاری ۱۸/۵ متر از گالری راست با روباره ۸ متر..... ۹۷
- شکل ۶-۲۵- کنتورهای جابجایی حفاری ۵ متر از گالری راست با روباره ۴ متر..... ۹۷
- شکل ۶-۲۶- کنتورهای جابجایی ۹ متر از حفاری تمام مقطع با روباره ۱۳ متر..... ۹۸
- شکل ۶-۲۷- کنتورهای جابجایی ۹ متر از حفاری تمام مقطع با روباره ۸ متر..... ۹۸
- شکل ۶-۲۸- کنتورهای جابجایی ۹ متر از حفاری تمام مقطع با روباره ۴ متر..... ۹۸
- شکل ۶-۲۹- حداکثر کرنش برشی برای حفاری گالری چپ با روباره ۱۳..... ۱۰۲
- شکل ۶-۳۰- حداکثر کرنش برشی برای حفاری گالری راست با روباره ۴..... ۱۰۳
- شکل ۶-۳۱- حداکثر کرنش برشی برای حفاری تمام مقطع با روباره ۸..... ۱۰۳
- شکل ۶-۳۲- مقطع هندسی لاینینگ اولیه شامل سیستم ترکیبی (لتیس، شاتکریت)..... ۱۰۵
- شکل ۶-۳۳- مقطع لتیس پوشش موقت ۳۵ سانتی متری و ۲۵ سانتی متری..... ۱۰۵
- شکل ۶-۳۴- (a) نمایش یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲ (b) مقطع معادل برای لایه مرکب..... ۱۰۸
- شکل ۶-۳۵- پیشنهاد توالی حفاری تونل در روش گالری های کناری..... ۱۱۱
- شکل ۶-۳۶- جابجایی عمودی برای طرح حفاری A..... ۱۱۲
- شکل ۶-۳۷- جابجایی عمودی برای حفاری تمام مقطع..... ۱۱۲
- شکل ۶-۳۸- معرفی طول گام حفاری..... ۱۱۴



## فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

- شکل ۳۹-۶- الگوهای حفاری برای پیشروی فرایند تونل‌زنی ..... ۱۱۸
- شکل ۴۰-۶- تعریف پارامترهای حفاری الگوی ۳ در گالری چپ ..... ۱۱۹
- شکل ۴۱-۶- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۱ با روباره ۱۳ متر ..... ۱۲۶
- شکل ۴۲-۶- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۲ با روباره ۱۳ متر ..... ۱۲۷
- شکل ۴۳-۶- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۳ با روباره ۱۳ متر ..... ۱۲۷
- شکل ۴۴-۶- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۴ با روباره ۱۳ متر ..... ۱۲۷
- شکل ۴۵-۶- مقطع عرضی تونل دوقلو (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲) ..... ۱۳۰
- شکل ۴۶-۶- مقطع طولی تونل دوقلو ..... ۱۳۰
- شکل ۴۷-۶- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، گالری چپ (روباره ۱۳) ..... ۱۳۹
- شکل ۴۸-۶- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، گالری راست و چپ (روباره ۱۳) ..... ۱۳۹
- شکل ۴۹-۶- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۱۳) ..... ۱۴۰
- شکل ۵۰-۶- نیروی برشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۱۳) ..... ۱۴۰
- شکل ۵۱-۶- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه بعد از اتمام حفاری (روباره ۱۳) ..... ۱۴۰
- شکل ۵۲-۶- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، گالری چپ (روباره ۸) ..... ۱۴۱
- شکل ۵۳-۶- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، گالری راست و چپ (روباره ۸) ..... ۱۴۱
- شکل ۵۴-۶- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۸) ..... ۱۴۱
- شکل ۵۵-۶- نیروی برشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۸) ..... ۱۴۲
- شکل ۵۶-۶- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه بعد از اتمام حفاری (روباره ۸) ..... ۱۴۲
- شکل ۵۷-۶- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، گالری چپ (روباره ۴) ..... ۱۴۲
- شکل ۵۸-۶- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، گالری راست و چپ (روباره ۴) ..... ۱۴۳
- شکل ۵۹-۶- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۴) ..... ۱۴۳

## فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

- شکل ۶-۶۰- نیروی برشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۴)..... ۱۴۳
- شکل ۶-۶۱- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه بعد از اتمام حفاری (روباره ۴)..... ۱۴۴
- شکل ۶-۶۲- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه در تونل دوقلو..... ۱۴۴
- شکل ۶-۶۳- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه در تونل دوقلو..... ۱۴۴
- شکل ۶-۶۴- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳ متر)..... ۱۴۶
- شکل ۶-۶۵- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳ متر)..... ۱۴۶
- شکل ۶-۶۶- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳ متر)..... ۱۴۶
- شکل ۶-۶۷- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۸ متر)..... ۱۴۶
- شکل ۶-۶۸- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۸ متر)..... ۱۴۷
- شکل ۶-۶۹- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۸ متر)..... ۱۴۷
- شکل ۶-۷۰- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۴ متر)..... ۱۴۷
- شکل ۶-۷۱- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۴ متر)..... ۱۴۷
- شکل ۶-۷۲- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۴ متر)..... ۱۴۸



## فصل اول

### کلیات

---



## ۱-۱- مقدمه

با گسترش روزافزون محیط‌های شهری و افزایش نیاز شهروندان به حمل‌ونقل، ایجاد و توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل درون‌شهری نظیر بزرگراه و مترو امری ضروری است. محدودیت‌های فضایی موجود در سطح زمین، صرفه‌جویی در زمان و انرژی با سفرهای درون‌شهری کوتاه‌تر، افزایش میزان ایمنی و کاهش اثرات زیست‌محیطی از جمله فاکتورهای مؤثری است که به‌کارگیری فضاهای زیرزمینی را در این زمینه توجیه می‌سازد. از سویی نیز به دلیل وجود فضاهای زیرزمینی متعدد در محیط شهری (نظیر تونل‌های تأسیسات شهری، بزرگراه و مترو و ...)، اجرای تونل‌های جدید در مجاورت فضاهای زیرزمینی موجود امری اجتناب‌ناپذیر است. در برخی مواقع نیز این زیرساخت‌ها به صورت چندین فضای زیرزمینی مجاور هم احداث می‌شوند. به‌عنوان نمونه بسیاری از تونل‌های بزرگراهی و یا مترو به صورت تونل‌های دوقلوی مجزا با مسیر یک‌طرفه احداث می‌شوند (معادیکخواه ع، ۱۳۹۳).

به دلیل پیچیده بودن مسائل و مشکلاتی که در حفاریات زیرزمینی وجود دارد، روش‌های تجربی به‌تنهایی نمی‌توانند مسائل به وجود آمده را، حل‌وفصل نمایند؛ بنابراین اکثر کارشناسان بر این باورند که همزمان با روش‌های تجربی، برای رسیدن به نتایج مطلوب می‌توان از روش‌های عددی نیز استفاده نمود. برای انجام یک تحلیل عددی با دقت کافی به پارامترهای ژئومکانیکی دقیق و اصلاح‌شده‌ای از محیط دربرگیرنده تونل نیاز است. از آنجایی که شناخت رفتاری خواص تونل برای تحلیل پایداری ضروری است می‌توان از روش کارآمد ابزار دقیق بهره گرفت. هدف از این روش مهار جابجایی‌ها برای ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی و تعیین خصوصیات محیط است (دهقان ع ن، ۱۳۹۲).

به‌طور کلی روش‌های تحلیل پایداری به چهار روش تحلیلی، مشاهده‌ای، تجربی و عددی تقسیم می‌شود. روش‌های عددی که در نرم‌افزارهای مختلف تحلیل پایداری به کار می‌روند به دلیل عدم تأثیر خطاهای انسانی بر نتایج تحلیل، نسبت به سایر روش‌ها بسیار رایج است. همچنین به منظور

بررسی صحت تحلیل‌ها توسط نرم‌افزار، نتایج حاصل با معیار ساکورایی بررسی می‌شود (Dehghan, A. N., 2012).

### ۲-۱- اهمیت استفاده از تونل‌های بزرگراهی

از جمله اهداف مهم در اجرای تونل در شهرها به حداقل رساندن مقادیر جابجایی‌ها و مهار آن‌ها در طول زمان اجرا است. در سال‌های اخیر با پیشرفت استفاده از کامپیوتر و همچنین نرم‌افزارهای عددی برای تحلیل‌هایی با سرعت و دقت بالا، پیش‌بینی تغییر مکان‌ها، تنش در خاک یا سنگ دربرگیرنده و همچنین بررسی و تغییر نتایج حاصل از آن‌ها برای طراحان تونل به راحتی امکان‌پذیر شده است. برای مثال نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> قابلیت مدل کردن انواع تونل‌ها و بارگذاری‌ها را دارد (دهقان ع ن، ۱۳۹۲).

### ۳-۱- مشخصات عمومی طرح

در این تحقیق تونل دوقلوی چیتگر (حکیم) در ادامه بزرگراه حکیم به طول یک کیلومتر و در زیر پارک جنگلی چیتگر مورد مطالعه قرار گرفته است. علت انتخاب این مسیر در این نقطه آن است که هم شرایط ساخت ادامه بزرگراه شهید حکیم در غرب پایتخت فراهم شود و هم پارک جنگلی چیتگر از هرگونه دخل و تصرف در پهنه‌های طبیعی در امان بماند. در واقع از میان گزینه‌های متعددی همچون تقاطع و عبور هم‌سطح، ساخت پل و ساخت زیرگذر، ایجاد تونل تنها گزینه‌ای است که می‌تواند اهداف مذکور را تأمین کند. عرض لب‌به‌لب تونل‌ها ۱۸ متر و ارتفاع آن‌ها ۱۳/۸ متر است. نگهداری موقت تونل با استفاده از مش و لتیس و شاتکریت و نگهداری دائم با بتن‌ریزی برجا به شکل مسلح انجام می‌شود (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).

حفاری در زیرزمین، تنش‌های موجود در زمین را آزاد نموده و توده خاک اطراف تونل به سمت داخل حرکت می‌کند و به وسایل نگه‌دارنده فشار وارد می‌کند. حفر تونل در محیط‌های شهری بیشتر در محیط‌های خاکی انجام می‌شود. تونل‌هایی که به خصوص در زمین‌های نرم حفاری می‌شوند،

با مشکلات خاصی روبرو هستند. مفهوم زمین نرم در این پروژه به معنای زمینی است که به منظور تأمین پایداری آن در هنگام حفاری نیاز است تا از یک سری نگهداری‌های موقت یا دائم استفاده شود. اکثر تونل‌های شهری در این نوع زمین‌ها حفر می‌شوند. از موارد مهمی که جهت طراحی و اجرای موفق یک تونل در خاک‌های نرم لازم است، می‌توان به نگهداری، پایداری و جابجایی زمین اشاره داشت (Karakus and Fowell., 2003).

#### ۴-۱- مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام‌شده

طی سال‌های متمادی محققان زیادی در نقاط مختلف دنیا مطالعاتی را به منظور تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری در نقاط مختلف انجام دادند. به دلیل گستردگی بحث خلاصه‌ای از این مطالعات در جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول ۱-۱- مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام‌شده

ردیف	موضوع	ارائه‌دهنده
۱	کنترل جابجایی زمین در حفاری تونل به روش NATM	اسدی، م، ۱۳۸۸
۲	تحلیل پایداری مترو خط ۲ قطار شهری کرج با استفاده از نتایج رفتار سنجی	قدیری، ذ، ۱۳۸۹
۳	تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل شماره دو گردنه رخ با استفاده از روش‌های تجربی و عددی	نجات دهکردی، ف، ۱۳۹۱
۴	تحلیل پایداری تونل راه‌آهن اصفهان-شیراز با استفاده از داده‌های همگرایی سنجی و مدل‌سازی عددی	علی، ن، ۱۳۹۲
۵	انتخاب طرح مناسب سامانه نگهداری اولیه تونل متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی	دهقان ع، ن، ۱۳۹۲
۶	بررسی اندرکنش و تعیین فاصله بهینه تونل‌های دوقلوی بزرگراه حکیم تهران (تونل چیتگر) با استفاده از تحلیل عددی	معادیخواه، ع، ۱۳۹۳

#### ۵-۱- ضرورت انجام تحقیق

یک سیستم نگهداری قبل از هر چیز بایستی اهداف زیر را تأمین کند:



- مانع از ریزش سقف گردد

- نشست سقف و آماس کف را کنترل کند

- تماس طبقات با یکدیگر را حفظ کند

علاوه بر ایجاد شرایط ایمن کار، یک محیط نگهداری باید به گونه‌ای طراحی شود که با کمترین هزینه و حداقل زمان ممکن در کل سیستم تونل‌زنی با سایر واحدهای عملیاتی نظیر تهویه و ترابری به خوبی تلفیق گردد. در واقع در طراحی سیستم نگهداری نباید لزوم هماهنگی این سیستم با عملیات دیگر تونل را فراموش کرد. اجزاء نگهدارنده به منظور کنترل حرکت خاک ناشی از توزیع مجدد تنش‌ها حین حفر تونل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نواحی حفر شده تاج، دیوار جانبی و خصوصاً در جبهه کار تونل، از اجزاء نگهدارنده ویژه‌ای استفاده می‌شود. این اجزاء عبارت‌اند از: پیچ سنگ، بتن پاشی مسلح، قاب‌های فولادی با آرماتور و غیره. خاک سست و سنگ‌های ضعیف در این محدوده‌ها را نیز می‌توان با استفاده از روش‌های پیش تثبیت مانند، pipe umbrella، fore poling، گوه خاک و غیره مهار نمود. انتخاب روش‌های کارآمد نگهدارنده برای تونل‌ها، به منظور کاهش مشکلات حین ساخت و کنترل هزینه پروژه در محدوده بودجه در نظر گرفته شده برای پروژه و برنامه زمان‌بندی پیش‌بینی شده، بسیار ضروری است. برای طراحی و حفر یک سازه زیرزمینی در ابتدا باید پارامترهای مهمی از جمله میدان‌های تنش در اطراف سازه، مقاومت و خواص سنگ و خاک دربرگیرنده، شرایط آب زیرزمینی، اندرکنش حفاریات مجاور هم روش حفاری (گام حفاری بهینه، توالی بهینه حفاری، فاصله بهینه بین جبهه کارها) و در نهایت سیستم نگهداری موردنیاز در نظر گرفته شود. (مدنی ح، ۱۳۷۹).

منظور از تحلیل پایداری بررسی وضعیت تنش، کرنش و تغییر شکل در اطراف سازه و ایمن‌سازی آن به وسیله طراحی و نصب سیستم نگهداری مناسب که پایداری سازه را فراهم می‌آورد

می‌باشد. تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی به علت تغییر در نوع سنگ و خاک، تغییر در ساختار زمین‌شناسی، شرایط تنش‌های منطقه، مراحل حفاری و ایجاد فضای زیرزمینی، از محلی به محل دیگر امری مشکل و پیچیده است. لذا لازم است با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری، مقایسه بین نتایج حاصل از آن‌ها و با قضاوت مهندسی مناسب، وضعیت پایداری در سازه موردنظر بررسی شود (نجات دهکردی ف، ۱۳۹۱).

در مناطقی که زمین سست و عمق تونل زیاد نیست طرح و محاسبه تونل از اهمیت زیاد، برخوردار است. عدم دقت در این خصوص ممکن است باعث خرابی‌هایی چه در محیط تحت حفاری و چه در ساختمان‌های مجاور گردد. روش جدید اتریشی در بسیاری از کشورها برای ساخت تونل در انواع خاک‌ها و سنگ‌ها به کار برده می‌شود. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها دارای امتیازاتی است که در زیر قابل خلاصه کردن است: -انعطاف‌پذیری و وفق یافتن در شرایط و خاک‌های متفاوت - استفاده از وسایل ساده در روند حفاری تونل (اسدی م، ۱۳۸۸)

### ۱-۶- روش انجام تحقیق

ارتباط با مسئولان و بازدید اولیه از تونل:

ابتدا با تلاش و هماهنگی‌های لازم با مشاورین تونل موردنظر جلسه‌ای را با مسئولان و مهندسین طرح نگهداری گذاشته و در مورد کارهایی که قرار است در آن تونل انجام شود با آن‌ها بحث و گفتگوهای لازم را انجام داده و از نظرها و پیشنهادهای مهندسین طرح استفاده لازم را می‌بریم. با یک بازدید اولیه از نحوه حفاری و نحوه نگهداری از دیواره‌ها، سقف و کف و نحوه نگهداری موقت تونل اقدامات و کارهای مهندسین را بررسی کرده تا در صورت استفاده در تحقیق بهره لازم برده شود. سؤالات اولیه مربوط به کار خود را از آن‌ها پرسیده تا از نظرات و پیشنهادهای آن‌ها جهت بهبود و پیشرفت سریع تحقیق استفاده شود.

بررسی نقاط ضعف و قوت طرح:

بعد از دیدار با مسئولان و مهندسين طرح نگهداری تونل با هماهنگی استاد راهنما در مورد نقاط ضعف و قوت طرح بحث می شود و در مرحله بعد با جستجو و خواندن مقالات داخلی و خارجی و مطالعه موردهای مشابه باعث می شود تا کار پیشرفت بهتری داشته باشد.

مطالعه و کار با نرم افزارها:

ابتدا با مطالعه در مورد کار و ظرفیت هر نرم افزار و کاربرد هر نرم افزار در جای خود آشنا می شویم، اساس روش های عددی تبدیل یک محیط با بینهایت درجه آزادی به ناحیه های با تعداد درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است. با بررسی اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط و تعیین میزان تغییر شکل آنها، با استفاده از درون یابی می توان تغییر شکل های سایر نقاط را نیز به دست آورد. موقعیت، تعداد و ارتباط نقاط فوق الذکر توسط المان بندی محیط مشخص می شود. تحلیل عددی مقاطع تونل در حالت کرنش مسطح با استفاده از کد محاسباتی FLAC انجام می شود. این نرم افزار از روش تفاضل محدود صریح جهت تحلیل سازه های ژئوتکنیکی استفاده می کند و با اعمال سیستم نگهداری موقت (شاتکریت + لیس + مش) ضخامت معادل را محاسبه می کند. بسته به شرایط در صورت لزوم و با توجه به محیط خاکی می توان از نرم افزار PLAXIS با مدل رفتاری ارتجاعی خمیری استفاده کرد.

اخذ اطلاعات و داده ها:

اخذ اطلاعات و گرفتن داده ها یکی از موارد مهم از یک کار پژوهشی به شمار می رود که اگر این اطلاعات نقص داشته باشد کار تحقیقاتی با مشکل برخورد می کند.

مقایسه مدل سازی ها با کار مشاوران و مهندسان تونل:

در انتها با مدل‌سازی‌های انجام‌شده و تحلیل داده‌ها به مقایسه طراحی نگهداری تونل موردنظر و مدل‌های ارائه‌شده توسط مشاوران طرح می‌پردازیم.

## ۱-۷- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر ۶ فصل است که در زیر شرح داده می‌شود:

فصل اول که شامل کلیات طرح اعم از مشخصات عمومی طرح و منطقه مورد حفاری، اهداف و ضرورت انجام تحقیق و سوابق مطالعات انجام‌شده است.

فصل دوم تحت عنوان مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی منطقه مورد حفاری می‌باشد که در آن بررسی شرایط زیرسطحی محدوده تونل، وضعیت آب زیرزمینی، موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، جایگاه زمین‌شناسی تونل موردنظر، رسوبات آبرفتی، زمین‌شناسی مسیر تونل، لایه‌بندی رسوبات، دانه‌بندی سازندهای موجود در مسیر تونل، مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل سوم تحت عنوان مطالعات و آزمایش‌های ژئوتکنیکی منطقه مورد حفاری است که در آن نتایج آزمایش‌های صحرایی، نتایج آزمایش‌های دانسیته صحرایی (دانسیته برجا)، نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای، نتایج آزمایش‌های برش برجا، نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی، نتایج آزمایش‌های برش مستقیم، نتایج آزمایش‌های سه محوری و پیشنهاد پارامترهای ژئوتکنیکی در محدوده تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل چهارم مطالعات رفتارسنجی و نصب ابزار دقیق را تحلیل می‌کند. در این فصل پلان کلی پروژه، نقاط مهم برای رفتارسنجی، روش‌های رفتارسنجی، اهداف رفتارسنجی، سیستم ابزار دقیق بخش‌های مختلف پروژه، نصب، قرائت، پردازش و گزارش نتایج ابزار دقیق، بررسی ایستگاه‌های ابزار دقیق و تحلیل پایداری تونل با داده‌های ابزار دقیق (ژئودتیک) را مورد تحلیل قرار می‌دهد.

فصل پنجم آشنایی و مراحل حل مسئله در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این فصل آشنایی با نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$ ، مراحل حل مسئله در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$ ، نحوه خاک‌برداری و پایداری تونل، انتخاب روش مناسب حفاری تونل و سیستم‌های نگهدارنده اولیه استفاده‌شده در تونل را بررسی می‌کند.

فصل ششم کنترل جابجایی تونل‌های حفرشده به روش NATM را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این فصل تحلیل‌های مقدماتی و اولیه، اثر سه‌بعدی حفاری، تحلیل پایداری تا قبل از نصب سیستم نگهداری، استفاده از روش مقطع معادل در طراحی سیستم نگهداری موقت تونل‌ها، الگوهای حفاری برای پیشروی فرایند تونل‌زنی، توالی حفاری بهینه، گام حفاری بهینه، اثر متقابل دو تونل بر هم و ارزیابی نتایج با نرم‌افزار PCACOL و ابزار دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل هفتم نیز مربوط به نتیجه‌گیری و پیشنهادها می‌باشد. فلوچارتی از نحوه سازمان‌دهی پایان‌نامه، در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- فلوچارت سازمان دهی پایان نامه



## فصل دوم

مطالعات زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی

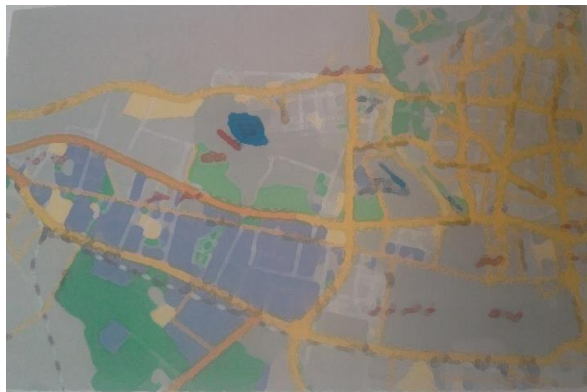
---





## ۱-۲- مقدمه

تونل بزرگراهی حکیم به صورت دوقلو (تونل رفت و تونل برگشت) در یک امتداد کلی شرقی- غربی می‌باشد. طول هرکدام از این تونل‌ها حدود یک کیلومتر است. شکل (۱-۲) مسیر تونل را بر روی نقشه تهران و شکل (۲-۲) تصویر ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).



شکل ۱-۲- موقعیت تونل حکیم بر روی نقشه تهران (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)



شکل ۲-۲- موقعیت تونل حکیم بر روی تصویر ماهواره‌ای (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)

بر اساس طراحی‌های انجام‌شده در طول مسیر تونل حداقل روباره ۴ متر و حداکثر آن ۱۳ متر خواهد بود.

## ۲-۲- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

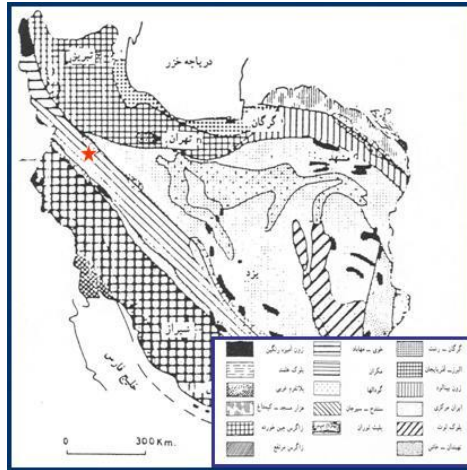
تونل بزرگراهی حکیم در دامنه جنوبی رشته کوه البرز ساخته می‌شود. ساخت گاه این تونل بین ۵۱.۲۰۹' تا ۵۱.۱۹۵' طول شرقی و ۳۵.۷۴۱' تا ۳۵.۷۴۴' عرض شمالی قرار دارد. محل این تونل‌ها در زیر تپه‌های آبرفتی منطقه شمال غرب تهران قرار دارد، این تپه‌ها از رسوبات آبرفتی دوران چهارم زمین‌شناسی تشکیل شده است. با توجه به پوشش جنگلی ایجاد شده در محدوده طرح و نبود رخنمون در محدوده مورد مطالعه امکان بهره‌گیری بیشتر از مطالعات صحرایی و تصاویر ماهواره‌ای برای بررسی زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی طرح وجود ندارد. لذا بخش مهمی از مطالعات بر پایه عکس‌های هوایی قدیمی (از زمانی که جنگلداری نشده بود) صورت گرفته است (شرکت مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۹۲).

## ۲-۳- جایگاه زمین‌شناسی تونل

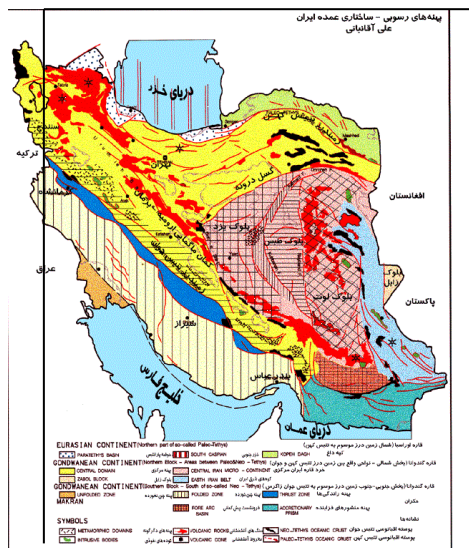
صفحه ایران بر اساس فعالیت‌های تکتونیکی، تحولات حوضه‌های رسوبی، سن واحدهای مختلف و نیز فعالیت‌های ماگمایی و دگرگونی، به پهنه‌های متفاوتی تقسیم‌بندی شده است. از مهم‌ترین تقسیم‌بندی‌های انجام شده می‌توان به تقسیم‌بندی نبوی و علوی اشاره کرد، نبوی محدوده مورد مطالعه را بخشی از زون البرز- آذربایجان می‌داند (این تقسیم‌بندی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است) در حالی که علوی آن را بخشی از زون البرز و در حاشیه شمالی زون ایران مرکزی می‌داند (شکل ۲-۴). تقسیم‌بندی مهم دیگری که در این رابطه انجام شده است مربوط به نوگل سادات می‌باشد که در سال (۱۹۹۳) انجام شده است. طبق طبقه‌بندی نوگل سادات محدوده مورد مطالعه بخشی از فرو چاله‌های مربوط به زون ماگماتیسم مرکزی ایران است. اینکه کدام یک از این طبقه‌بندی‌ها مورد استفاده قرار گیرد به نظر در ظاهر از چندان اهمیتی برخوردار نمی‌باشد، اما با توجه به شرایط زمین‌شناسی هر کدام از این زون‌ها، اهمیت زیادی پیدا می‌کند؛ اما با توجه به نظر اکثر محققین، محدوده مورد مطالعه به زون البرز تعلق دارد. این زون حوادث زیادی را پشت سر گذاشته

که آثار آن از پرکامبرین تا به امروز قابل مشاهده است (شرکت مهندسی مشاور ساحل،

۱۳۹۲).



شکل ۲-۳- تقسیم‌بندی نبوی (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)



شکل ۲-۴- پهنه‌های ساختاری ایران از نگاه علوی (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)

## ۲-۴- مشخصات ایالت ساختاری البرز

به‌طور کلی کوه‌های البرز به رشته‌کوه‌های شمالی ایران در جنوب دریای خزر گفته می‌شود. روند

کلی این ساختار خاوری-باختری بوده که در طول مسیر خود به دور دریاچه خزر پیش‌بزرگی را

متحمل شده است. این رشته‌کوه بخشی از کوهزایی آلپ-همیالیا است که از شمال به بلوک فرورفته

خزر و از جنوب به فلات ایران مرکزی محدود می‌شود. حد خاوری این ساختار تا کپه داغ و حد باختری آن تا دره سفیدرود

ادامه دارد (شرکت مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۲).

## ۲-۵- زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه بر روی نهشته‌های آبرفتی جوان بنا شده است. این نهشته‌ها که حاصل فرسایش رشته‌کوه البرز هستند، به وسیله رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی جریان یافته از البرز به این گستره انتقال داده شده‌اند و از کوهپایه البرز تا حاشیه شمالی کویر جنوبی تهران و فرونشست قم نهشته شده‌اند.

نخستین بار ریبن این رسوبات آبرفتی را مورد مطالعه قرارداد و اولین تقسیم‌بندی این نهشته‌ها توسط وی انجام گرفت. او در رسوبات آبرفتی نهشته شده در این گستره چهار سازند آبرفتی را شناسایی کرد؛ که برای آن‌ها نام‌های اختصاری A، B و C را انتخاب کرد (چشمی ا، ۱۳۸۵).

### ۲-۵-۱- سازند آبرفتی A

سازند آبرفتی A یا سازند هزار دره قدیمی‌ترین سازند آبرفتی گستره تهران است که در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز از حوالی شاهرود-سمنان تا قزوین رخنمون دارد، مقطع نمونه این سازند در دهکده هزار دره (تپه‌های باختری دره جاجرود) واقع در خاور تهران است (چشمی ا، ۱۳۸۵). فرسایش و جریان آب در این سازند، دره‌ها و شیارهای متعددی ایجاد کرده و علت اصلی نام‌گذاری این سازند به هزار دره وجود دره‌ها، شیارهای فرسایشی فراوان موجود در این سازند است.

ویژگی‌های عمومی این سازند به شرح زیر است:

- کنگلومرای همگن با ضخامت زیاد حدود ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ متر می‌باشد.

- لایه‌بندی منظم، ضخامت لایه‌ها بین ۱۲ تا ۲۵ سانتی‌متر است.
- شیب لایه‌ها زیاد و بین ۵۰ تا ۷۰ درجه و حتی در مواردی به ۹۰ درجه نیز می‌رسد.
- دارای قلوه‌های یکنواخت با اندازه بین ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر است.
- یکنواختی در جنس قلوه‌ها، بیش از ۸۵ درصد قلوه‌ها از جنس سنگ‌های سبز سازند کرج می‌باشند.
- رنگ کلی سازند خاکستری روشن و در مواردی عدسی‌ها یا میان لایه‌های قرمز در آن مشاهده می‌شود.
- رنگ این رسوبات ارتباط مستقیمی با سنگ‌های منطقه سرچشمه یا منشأ رسوبی آن‌ها دارد.
- رخنمون سازند هزار دره در گستره مورد مطالعه عمدتاً در جنوب ساخت گاه دیده می‌شود (که در شکل ۲-۵- تصویر از سازند A نشان داده شده است)؛ و در واقع محدوده پارک چیتگر را در برمی‌گیرد (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).



شکل ۲-۵- تصویر از رسوبات سیمانته سازند A در نزدیکی تونل (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)

**۲-۵-۲- سازند آبرفتی B**

دومین سازند آبرفتی سازند کهریزک یا B نامیده می‌شود (چشمی ا، ۱۳۸۵)؛ که به صورت دگر شیب بر روی سازند هزار دره قرار گرفته است. مقطع تیپ این سازند در جنوب تهران در منطقه کهریزک شناسایی و در جنوب تهران متشکل از رس و ماسه به رنگ قهوه‌ای روشن و موادی شبیه رس با کنکرسیون و قلوه‌های متعدد است اما در قسمت شمالی شهر (میان شهر و کوهپایه البرز) سازند کهریزک با یک کنگلومرای قاعده‌ای شروع می‌شود و با شن و واریزه‌های زاویه‌دار ادامه پیدا می‌کند.

مشخصات عمومی آن به شرح زیر است:

- رسوبات سخت نشده، جور نشده و ناهمگن دارد.
- شیب لایه‌ها کم و حداکثر به ۱۵ درجه می‌رسد.
- رنگ آن‌ها متنوع و عموماً تیره‌تر از آبرفت‌های زیرین خود یعنی سازند هزار دره می‌باشد.
- ضخامت این سازند بسیار متنوع اما به‌طور میانگین ضخامت ۶۰ متر را برای آن در نظر گرفته‌اند.

از نظر جایگاه رسوب‌گذاری سازند B بیشتر در یال جنوبی تپه‌ها و چین‌خوردگی‌ها دیده می‌شود و همین امر باعث شده که شیب لایه‌بندی این سازند در تمام مقاطع به سمت جنوب باشد.

**۳-۵-۲- سازند آبرفتی C**

سومین سازند آبرفتی گستره تهران بر روی نهشته‌های سازند A یا B تهران نهشته شده است، سازند C یا سازند آبرفتی تهران می‌باشد (چشمی ا، ۱۳۸۵). رخنمون این سازند را در تمامی کوهپایه البرز و در شعاع ۱۰ کیلومتری منطقه مورد مطالعه می‌توان مشاهده کرد؛ که هر سطحی از دشت

آبرفتی تهران به طور کل توسط این آبرفت پوشیده شده است.

سازند C به طور کلی شامل آبرفت‌های جوان مخروطه ای است که از دامنه جنوبی البرز به سمت جنوب ادامه داشته و بخشی از دشت را در بر گرفته است. ضخامت این سازند به طور دقیق مشخص نیست و ضخامتی حدود ۶۰ متر را برای این سازند تخمین می‌زنند. شکل (۲-۶) تصویری از رخنمون این سازند را در نزدیکی محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد.

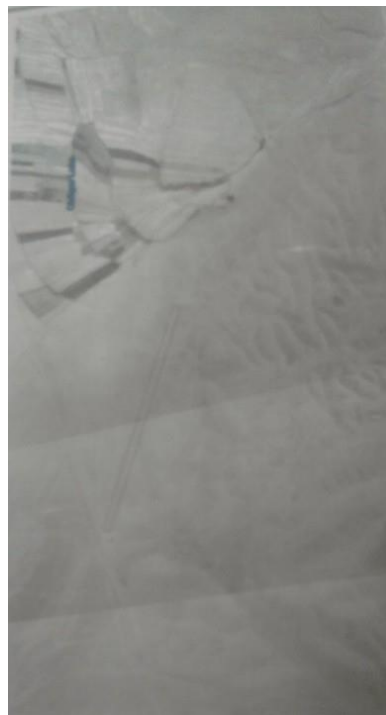


شکل ۲-۶- تصویری از نهشته‌های سازند C در نزدیکی محدوده طرح (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)

## ۲-۶- زمین‌شناسی مسیر تونل

در بررسی‌ها و بازدیدهای صحرایی صورت گرفته، مشخص گردید که رسوبات موجود در مسیر تونل به نهشته‌های سازند C (به مقدار کم و در حوضچه تسکین سیلاب مسیر رمپ‌ها و قسمت‌های ابتدایی تونل) و سازند A (به مقدار زیادتر و در قسمت اعظم مسیر تونل) تعلق دارند. شکل (۲-۷) تصویر تونل را بر روی عکس‌های هوایی تهران نشان می‌دهد. مطالعه این عکس‌های هوایی نشان می‌دهد که مسیر تونل‌ها در یال یک طاق‌دیس با چین‌خوردگی کم قرار دارد. روند کلی این طاق‌دیس شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد. این طاق‌دیس نامتقارن بوده و شیب یال جنوبی آن کمتر از شیب یال شمالی آن است. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته آزیموت محور چین اصلی ۸۰ درجه است (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).





شکل ۷-۲- مسیر تونل‌ها بر روی عکس هوایی سال ۱۹۵۶ میلادی (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)

## ۷-۲- گسل‌های محدوده تونل

بر اساس مطالعات انجام‌شده در محدوده تونل گسل شاخصی مشاهده نمی‌شود.

## ۸-۲- وضعیت آب زیرزمینی در محدوده تونل

بر اساس نتایج گمانه‌های حفاری‌شده در مسیر تونل و پروژه‌های نزدیک به آن، عمق آب زیرزمینی در قسمت‌های شرقی مسیر تونل حدود ۹۰ متر و در قسمت‌های غربی آن بیش از ۱۰۰ متر است. جهت جریان آب نیز از سمت شمال-شمال شرق به سمت جنوب-جنوب غرب می‌باشد. همچنین در مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده به تعدادی چاه در اطراف محدوده مورد مطالعه برخورد گردید. عمق برخورد به آب زیرزمینی در این چاه‌ها از ۹۰ تا ۱۲۸ متر می‌باشد. ضمناً کیفیت آب این چاه‌ها مطلوب است (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).

با توجه به موارد فوق حفاری تونل در محیطی غیراشباع صورت خواهد گرفت تنها ممکن است آب ناشی از آبیاری فضای سبز بالای تونل و یا بارندگی و یا قنوات متروکه نشانه‌هایی را در داخل تونل ایجاد نماید. توصیه می‌شود که برای جلوگیری از ریزش احتمالی تونل در دوره ساخت، به‌ویژه در قسمت‌هایی که روباره کم است از آبیاری غرقابی جلوگیری گردد.

## ۲-۹- زمین‌شناسی مهندسی تونل

در این بخش خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد همان‌گونه که در سطور قبلی هم بیان شد، مسیر تونل به‌جز در بخش‌های ابتدایی و رمپ‌های دسترسی در داخل نهشته‌های سازند A قرار دارند، در قسمت‌های یادشده هم نهشته‌های سازند C برون‌زد دارند (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).

## ۲-۱۰- لایه‌بندی رسوبات در محدوده تونل

لایه‌های شیب‌دار سازند A به‌خوبی در مسیر تونل قابل مشاهده است بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته شیب لایه‌ها از ۱۰ تا ۲۰ درجه به سمت شمال غرب اندازه‌گیری شده است اما به نظر می‌رسد شیب ۲۰ درجه شیب اصلی لایه‌های سازند A در مسیر مورد مطالعه است.

ضخامت این لایه‌ها از ۳۰ سانتی‌متر تا بیش از ۱ متر تغییر می‌کند. رنگ لایه‌ها نیز بسته به نوع مواد ریزدانه موجود در لایه تغییر می‌کند و از خاکستری روشن (لایه‌های سیلت دار) تا قهوه‌ای و قهوه‌ای تیره (لایه‌های رس دار) متغیر است؛ اما نهشته‌های سازند C در محدوده مورد مطالعه افقی هستند. در دیواره‌های رمپ‌های دسترسی نیز شیب لایه‌های سازند C کم، و بیش تر افقی هستند. شایان ذکر است که هم رسوبات سازند A و هم نهشته‌های سازند C دارای لایه‌بندی نسبتاً منظم هستند. تشخیص مرز فوقانی سازند C با استفاده از وجود یک لایه ریزدانه حاوی دانه‌های ۱ کائولینیتی صورت می‌گیرد (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).

<sup>1</sup> Nodule

## ۱۱-۲- دانه‌بندی سازندهای موجود در مسیر تونل

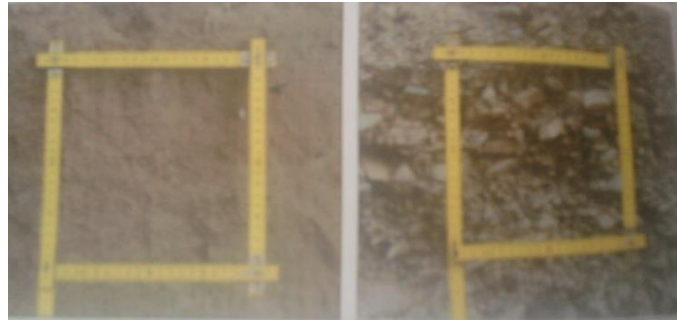
به‌طور کلی نهشته‌های موجود در مسیر تونل موردنظر از نوع نهشته‌های درشت‌دانه هستند. البته این نهشته‌های درشت‌دانه در برخی از افق‌ها با مواد ریزدانه سیلتی و رسی همراه است که گاهی درصد آن‌ها نیز بالا است.

با توجه به مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی انجام‌شده توسط موسسه مهندسی مشاور ساحل در مسیر تونل موردنظر خاک‌هایی با طبقه‌بندی GW، GW-GM و GP بیش از ۵۰ درصد نهشته‌های مسیر تونل را به خود اختصاص می‌دهند. البته در حفاری‌های انجام‌شده به نظر می‌رسد این مقادیر کمتر است و خاک‌هایی با درصد ریزدانه بیشتر (عمدتاً رسی) نیز فراوانی مناسبی در طول تونل دارند. شکل (۸-۲) تصویری از این لایه‌های ریزدانه را در فاصله کمتر از ۵۰ متری رمپ شرقی نشان می‌دهد. شکل (۹-۲) تصویری از رسوبات ریزدانه و شن و ماسه تمیز را در نزدیکی محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).



شکل ۸-۲- تصویری از لایه‌های خاک ریزدانه متعلق به سازند C در کانال حفرشده جهت جایگذاری لوله

زهکشی (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)



شکل ۲-۹- تصویری از لایه‌های شن و ماسه تمیز و لایه‌های ریزدانه در نزدیکی محدوده طرح (شرکت

مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)



## فصل سوم

### مطالعات و آزمایش‌های ژئوتکنیکی

---



**۱-۳- مقدمه**

برای بررسی شرایط زیرسطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاک موجود در مسیر تونل، آزمایش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲).

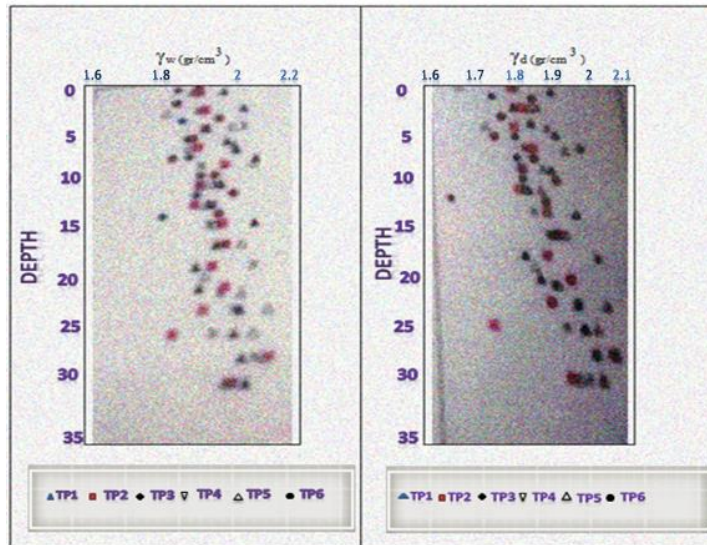
**۲-۳- نتایج آزمایش های صحرایی**

در گمانه ها و چاهک های حفاری شده برخی آزمایش های برجا انجام شده است که از جمله آن ها آزمایش های بارگذاری صفحه ای، برش برجا و تعیین دانسیته برجا صورت گرفته است.

**۱-۲-۳- نتایج آزمایش های دانسیته صحرایی (دانسیته برجا)**

در چاهک های حفاری شده در مسیر تونل موردنظر تعدادی آزمایش دانسیته برجا انجام شده است که نمودار تغییرات آن ها نسبت به عمق در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده در این شکل، وزن مخصوص خشک خاک ها بین ۱/۶۴ تا ۱/۹۹ گرم بر سانتی مترمکعب و وزن مخصوص مرطوب در حدود ۱/۸۱ تا ۲/۱۷ گرم بر سانتی مترمکعب اندازه گیری شده است.





شکل ۳-۱- تغییرات وزن مخصوص خشک و وزن مخصوص مرطوب (طبیعی) خاک نسبت به عمق در محدوده

تونل (شرکت مهندسیین مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

### ۳-۲-۲- نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه ای

با انجام آزمایش بارگذاری صفحه ای، ویژگی های تغییر شکل پذیری لایه های زمین در حالت برجا اندازه گیری می شود که به وسیله آن می توان مقاومت و تغییر شکل پذیری لایه ها را برآورد کرد.

نتایج آزمایش بارگذاری صفحه ای، جهت تعیین مدول عکس العمل ( $K_s$ )، مدول تغییر شکل ( $E_s$ ) و تعیین ظرفیت باربری استفاده می شود.

در مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی تونل تعداد ۶ آزمایش بارگذاری صفحه ای انجام شده است. نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه ای انجام شده در مسیر تونل در جدول (۳-۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است که تمام آزمایش ها با استفاده از صفحه ای به قطر ۲۵ سانتی متر انجام شده اند (شرکت مهندسیین مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲).

جدول ۳-۱- نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه ای (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

پروژه	چاهک	عمق (m)	$k_s$ (kg/cm <sup>3</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )
مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی تونل	TP1	۹	۲۱	۶۶۵
	TP2	۱۰	۳۱	۹۸۲
		۲۰	۳۱	۹۸۲
	TP3	۱۰	۱۲	۳۸۰
		۲۰	۲۰	۶۳۴
	TP4	۱۰	۲۷	۸۵۵
		۲۰	۴۰	۱۲۶۷
	TP5	۱۰	۳۱	۹۴۲
		۲۰	۲۱	۶۶۵
	TP6	۹	۲۰	۶۳۴

مقادیر مدول عکس العمل بستر خاک ها در محدوده تونل ۱۲ تا ۴۰ کیلوگرم بر سانتی مترمکعب به دست آمده است. مقادیر مدول الاستیسیته هم در مسیر تونل از ۳۸۰ تا ۱۲۶۷ کیلوگرم بر سانتی مترمربع تغییر می کند.

### ۳-۲-۳- نتایج آزمایش های برش برجا

آزمایش برش برجا یک آزمایش مفید به منظور برآورد پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت برجا است. این آزمایش مشابه آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی می باشد و در آن به خاطر استفاده از نمونه با ابعاد بزرگ تر و در حالت دست نخورده می توان تخمین بسیار دقیق تری را از پارامترهای خاک به دست آورد. جدول (۲-۳) نتایج آزمایش برش برجا در مسیر تونل را نشان می دهد که در این پروژه به منظور انجام آزمایش، گالری با ابعاد مناسب در اعماق موردنظر در داخل چاهک ها حفر شده و سپس آزمایش در داخل آن ها انجام شده است. در مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی انجام شده در مسیر تونل حکیم توسط موسسه مهندسين مشاور ساحل تعداد ۶ آزمایش برش برجا صورت گرفته است (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲).

جدول ۳-۲- نتایج آزمایش برش برجا (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

چاهک	عمق (m)	$\phi$	C (kg/cm <sup>2</sup> )
TP1	۹	۲۴	۰/۷۵
TP2	۱۰	۲۳	۰/۸۶
	۲۰	۲۴	۰/۵۹
TP3	۱۰	۲۴	۰/۸۷
	۲۰	۳۳	۰/۱۴
TP4	۱۰	۲۷	۰/۸۱
	۲۰	۳۱	۰/۵۷
TP5	۱۰	۳۷	۰/۲۱
	۲۰	۳۳	۰/۳۷
TP6	۹	۲۳	۰/۴

در آزمایش های انجام شده در مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی مسیر تونل میزان چسبندگی از ۰/۱۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تا ۰/۸۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به دست آمده است میزان زاویه اصطکاک داخلی هم در محدوده ۲۳ تا ۳۷ درجه اندازه گیری شده است.

### ۳-۳- نتایج آزمایش های آزمایشگاهی

بر روی نمونه های اخذ شده از گمانه ها و چاهک ها، آزمایش هایی جهت تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک ها در آزمایشگاه صورت گرفته است. این آزمون ها شامل آزمایش های دانه بندی، برش مستقیم و سه محوری می باشند. در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش های آزمایشگاهی جمع بندی شده اند (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲).

#### ۳-۳-۱- نتایج آزمایش های دانه بندی

در هر کدام از پروژه های یاد شده در نزدیکی محدوده تونل تعداد بسیار زیادی آزمایش شناسایی خاک انجام شده است. در مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی بیش از ۲۵۰ آزمایش دانه بندی صورت گرفته

است. در چاهک ها و گمانه های حفاری شده در مسیر تونل، خاک های محدوده تونل در زمره خاک های شنی و ماسه ای رس دار و قلوه سنگ دار با طبقه بندی ها و فراوانی ها نشان داده می شود.

### ۳-۳-۲- نتایج آزمایش های برش مستقیم

آزمایش های برش مستقیم در شرایط اشباع (مطابق با استاندارد ASTM D3080) انجام شده است. در مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی و گزارش ادامه تونل تعدادی آزمایش برش مستقیم انجام شده که نتایج آن در جدول (۳-۳) ارائه شده است.

در این آزمایش ها میزان چسبندگی از صفر تا ۰/۴۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و میزان زاویه اصطکاک داخلی از ۳۲ تا ۴۱ درجه به دست آمده است.

جدول ۳-۳ نتایج آزمایش های برش مستقیم بر روی نمونه های محدوده تونل (شرکت مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

گمانه چاهک	عمق (m)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (deg)	گمانه چاهک	عمق (m)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (deg)
TBH-1	۳/۵-۴	۰/۱	۳۷/۲	TP2	۲۶/۵-۳۰	۰/۰۸	۳۸/۸
	۱۲/۴-۱۴	۰/۰۹	۴۱/۳	TP3	۶/۵-۷/۵	۰/۰۲	۳۵/۹
	۲۴/۴-۲۶/۷	۰/۱۵	۴۱	TP3	۱۴/۵-۱۶/۵	۰/۰۴	۴۱/۴
TBH-2	۶/۵-۸	۰/۰۶	۴۰/۶	TP3	۲۲/۵-۲۴/۵	۰	۴۱/۴
	۱۴/۲-۱۶	۰/۰۸	۴۱/۲	TP3	۲۸/۵-۳۰	۰/۰۳	۳۹/۱
TBH-3	۴/۳-۵	۰/۱۲	۳۸/۳	TP4	۶/۵-۸/۵	۰/۴۵	۳۱/۴
	۲۴/۱-۲۵	۰/۱۵	۳۹/۲	TP4	۱۴/۵-۱۶/۵	۰/۰۱	۳۹/۷
TBH-4	۱۰/۵-۱۱	۰/۱۴	۳۸	TP4	۲۲/۵-۲۴/۵	۰/۰۲	۴۰/۷
	۲۱-۲۴	۰/۱۲	۴۱	TP4	۲۸/۵-۳۰	۰	۴۰/۷
TBH-5	۱۰/۳-۱۱	۰/۱۴	۳۹	TP5	۶/۵-۸/۵	۰/۰۶	۴۰/۱
TP1	۵/۵-۷/۵	۰/۱۶	۳۸/۷	TP5	۱۴/۵-۱۶/۵	۰	۴۰/۲
TP1	۱۲/۸-۱۳/۵	۰/۱۴	۳۲/۴	TP5	۲۰/۵-۲۲/۵	۰/۰۳	۴۰
TP2	۶/۵-۸/۵	۰/۰۷	۴۰/۴	TP5	۲۶/۵-۲۸/۵	۰/۰۲	۳۴/۸
TP2	۱۴/۵-۱۶/۵	۰/۰۴	۴۰/۴	TP6	۵/۵-۷/۵	۰/۱۴	۳۹
TP	۲۲/۵-۲۴/۵	۰/۰۴	۴۰/۲	TP6	۱۳/۵-۱۵/۵	۰/۰۵	۴۱/۴

## ۳-۳-۳- نتایج آزمایش های سه محوری

در هیچ یک از مطالعات ژئوتکنیک انجام شده در مسیر تونل، آزمایش های سه محوری انجام نشده است. در مطالعات پروژه شهرک امام رضا (ع) چند آزمایش سه محوری به روش CU انجام شده است. در این آزمایش ها مقدار چسبندگی بین ۰/۰۹ تا ۰/۲۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و مقدار زاویه اصطکاک در محدوده ۲۶ تا ۳۴ درجه به دست آمده است. نتایج این آزمایش ها در جدول (۳-۴) ارائه شده است (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲).

جدول ۳-۴- نتایج آزمایش های سه محوری (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

نوع آزمایش	$\phi$ (deg)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	USCS	عمق (m)	گمانه
CU	۲۶/۲	۰/۱۷	۱/۸۵	SM	۱۲-۱۲/۵	A-1
CU	۳۲	۰/۱۲	۱/۸۱	GW-GC	۱۲/۵-۱۳	A-5
CU	۳۴/۵	۰/۱۸	۱/۸	SC	۱۳-۱۳/۵	A-15
CU	۳۳/۸	۰/۱۴	۱/۷۷	OC	۱۳/۵-۱۴	A-17
CU	۳۲/۵	۰/۱۷	۱/۸۲	GC	۲۰-۲۰/۵	A-19
CU	۲۹	۰/۱۹	۱/۸۴	SM	۱۶/۵-۱۷	A-20
CU	۳۴	۰/۱۱	۱/۸۲	GM	۱۵-۱۵/۵	B-1
CU	۳۱/۲	۰/۱۱	۱/۸۲	GM	۱۳/۵-۱۴	B-3
CU	۳۰/۵	۰/۱۷	۱/۸۱	SC-SM	۱۰-۱۰/۵	B-5
CU	۳۲/۲	۰/۱۲	۱/۸۲	GM	۱۷-۱۷/۵	B-9
CU	۳۳/۵	۰/۰۹	۱/۷۹	GC-GM	۴/۵-۵	B-11
CU	۲۹	۰/۱۴	۱/۷۶	SC-SM	۴/۵-۵	B-13
CU	۳۴/۴	۰/۱۵	۱/۸۷	GC-GM	۱۷/۵-۱۸	
CU	۲۶	۰/۱۸	۱/۸۶	SM	۳۱/۵-۳۲	B-14
CU	۲۶/۴	۰/۲۲	۱/۹۲	SC	۵۵-۵۶	

## ۴-۳- پیشنهاد پارامترهای ژئوتکنیکی

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده در مسیر تونل و همچنین گمانه های حفاری شده در پروژه های نزدیک به ساخت گاه تونل، پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای رسوبی مختلف در طول مسیر تونل محاسبه گردید که در جدول (۳-۵) خلاصه شده است (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲).

جدول ۳-۵- پیشنهاد پارامترهای ژئوتکنیکی در محدوده تونل (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

نام سازند یا رسوبات	ریزدانه سطحی	رسوبات سازند C	رسوبات سازند A
جنس غالب	خاک های ریزدانه سطحی	شن و ماسه سیلت دار	شن و ماسه رس دار همراه با قلوه سنگ
چسبندگی $\text{kg/cm}^2$	۰/۱۵	۰/۳	۰/۴۵
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۹	۳۲	۳۳
وزن مخصوص مرطوب ( $\text{gr/cm}^3$ )	۱/۸۵	۱/۹	۲
وزن مخصوص اشباع ( $\text{gr/cm}^3$ )	۲	۲/۲	۲/۲
نسبت پواسون	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۵
مدول تغییر شکل ( $\text{kg/cm}^2$ ) E	۵۵۰	۷۰۰	۹۰۰
مدول تغییر شکل باربرداری-بارگذاری مجدد ( $\text{kg/cm}^2$ ) E	۱۶۵۰	۲۱۰۰	۲۷۰۰

## فصل چہارم

مطالعات رفتارسنجی و نصب ابزار دقیق

---

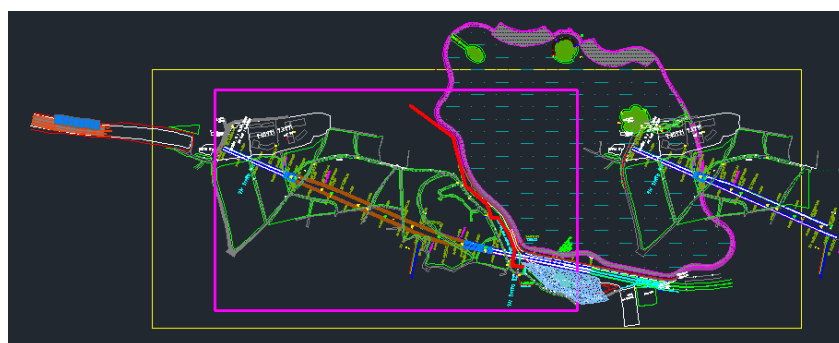
## ۴-۱- مقدمه

در این گزارش به ترتیب، کلیاتی از اصول و ضوابط طراحی شبکه ابزاربندی و رفتارسنجی پروژه، توضیحاتی در زمینه انواع ابزار دقیق توصیه شده در طرح، ویژگی‌ها و مشخصات فنی هر یک از ابزار و نیز روش‌های پیشنهادی برای رفتارسنجی کلیه مواضع متأثر از عملیات حفاری، ارائه شده است (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

مباحث مربوط به نصب، قرائت و ارائه نتایج بطور جداگانه مورد توجه قرار گرفته و در این گزارش به آن پرداخته شده است.

## ۴-۲- اجرای پروژه

پروژه تونل حکیم شامل دو تونل موازی به فاصله ۲۰ متر از هم و به طول یک کیلومتر می‌باشد که در امتداد شرقی-غربی از زیر دریاچه شهدای خلیج فارس شروع شده و پس از گذر از زیر محدوده پارک جنگلی به شبکه بزرگراهی متصل می‌گردد. شکل (۴-۱) پلان کلی تونل را نشان می‌دهد (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲).



شکل ۴-۱- پلان کلی پروژه تونل حکیم (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۲)

## ۴-۳- نقاط مهم برای رفتارسنجی

محدوده ای که انتظار می‌رود از نظر شرایط ژئوتکنیکی ضعیف باشد

محدوده ای که ارتفاع روباره کم است



مناطقى كه در معرض نفوذ آب هاى سطحى قرار دارد (آبراهه ها و گودى هاى اصلى)

محدوده تقاطع تونل ها، سه راهى ها (T شكل)

محدوده دهانه هاى ورودى و خروجى تونل ها

#### ۴-۴-۴- روش هاى رفتارسنجى

برداشت زمين شناسى

رفتارسنجى تغيير شكل تونل

رفتارسنجى تغيير شكل در ترانسه ها و دهانه هاى ورودى و خروجى

رفتارسنجى نشست سطح در نقاط مبدا

چاه هاى مشاهده اى آب زيرزمينى

#### ۴-۵-۵- اهداف رفتارسنجى پروژه

جلوگيرى از وقوع شرايط بحرانى و غير منتظره براى تونل ها و عوارض و تاسيسات سطحى و

زيرسطحى و تامين ايمنى آن ها

كنترل پارامترهاى طراحى بر اساس نتايج رفتارسنجى و اصلاح روش ساخت در صورت نياز

#### ۴-۶-۶- سيستم ابزار دقيق بخش هاى مختلف پروژه

سيستم ابزار دقيق در نظر گرفته شده براى رفتارسنجى تونل شامل موارد زير است.

نشست سنجى سطح زمين

كشيدگى سنجى از سطح زمين تا سقف تونل (در سه تراز)

بین های ژئودتیک داخل تونل

بین های ژئودتیک دهانه شرقی و غربی

#### ۴-۶-۱- رفتارسنجی تغییر شکل های سطح زمین (نشست سنجی)<sup>۱</sup>

نقاط نشست سنجی سطحی در سطح زمین در محدوده تاثیر تونل نصب می شوند. اندازه گیری نشست سطحی با تراز سنجی ارتفاع انجام می شود. دقت قرائت مورد نیاز ۰/۱ میلیمتر و محدوده خطا نیز حداکثر ۱ میلیمتر است. نقاط اندازه گیری در ایستگاه های عمود بر محور تونل مرتب شده و ایستگاه های نشست سنجی در تقاطع تونل و جاده ها و مقاطع عبوری نصب می شوند. مختصات نقاط نشست سنجی در مرحله نصب تدقیق می شود. به منظور نصب بین های نشست سنجی بایستی محل مورد نظر از سطح زمین طبیعی تا رسیدن به خاک بستر حفاری شود. به گونه ای که شاخص مورد نظر کاملاً با خاک در گیر شود.

قرائت اولیه پیش از آغاز عملیات حفاری و یا پیش از زمانی که جبهه کار تونل به فاصله ۴d متری (۴ برابر قطر تونل) ایستگاه برسد، انجام خواهد شد.

فرمت خروجی قرائت ها به صورت نمودار نشست-زمان نشان داده می شود. اطلاعات مربوط به پیشروی مراحل مختلف حفاری نیز در نمودارها درج می شوند. مقادیر نشست مجاز در بخش های مختلف پروژه بر اساس محاسبات طراحی تعیین شده و به دستگاه نظارت اعلام خواهد شد. نقاط نشست سنجی باید در مقابل رفت و آمد های ضروری و خرابی های احتمالی محافظت شده و در صورت خراب شدن یک نقطه، تعویض آن به سرعت انجام شود. در محدوده تقاطع تونل ها و سه راهی ها با توجه به وجود حفاری متقاطع و بزرگی مقطع تونل، شبکه نشست سنجی گسترده تری نصب می شود. تعداد نقاط نشست سنجی در هر مقطع در محدوده تونل های اصلی به طور معمول ۱۲ پین، در محدوده تونل های دسترسی ۳ پین خواهد بود. فواصل متقاطع نشست سنجی از ۵ متر (در محدوده

<sup>1</sup> Settlement Meter

های بحرانی) تا ۲۰ متر (در شرایط بسیار خوب) متغیر است (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

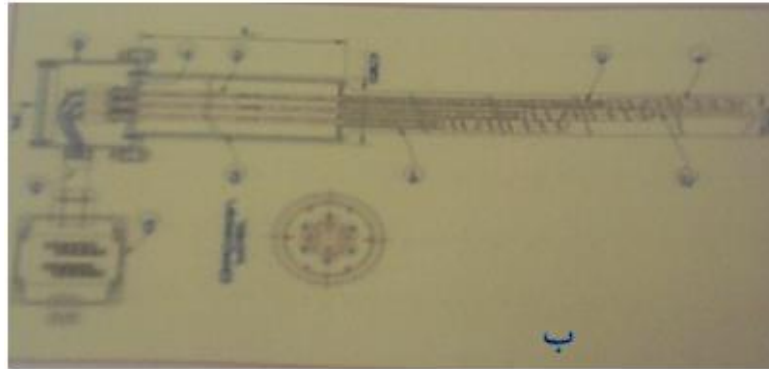
#### ۴-۶-۲- کشیدگی سنج های<sup>۱</sup> چند نقطه ای در گمانه ها

کشیدگی سنج ها غالبا درون گمانه ای در خاک یا سنگ نصب می شود. تا تغییر فاصله نسبی دو یا چند نقطه را در طول محور گمانه، بدون استفاده از کاوشگر لغزنده اندازه بگیرد. هر گاه موقعیت یکی از نقاط اندازه گیری نسبت به یک نقطه مبنا معین باشد می توان تغییر مکان مطلق را نیز با این ابزار بدست آورد. در فضاهای زیرزمینی این ابزار را می توان از روی سطح زمین (اگر روباره فضای زیرزمینی کم باشد) از تونل های دسترسی، فضاهای زیرزمینی مجاور، و یا از داخل خود فضاهای زیرزمینی نصب کرد. این ابزار عموما در بین دو سازه زیرزمینی نصب شده و جابجایی نسبی را در اثر حفاری سازه دوم بر سازه اول نشان می دهد. اگر ابزار قبل از حفر فضای زیرزمینی نصب شود، می توان کل جابجایی حاصل از حفر فضای زیرزمینی را اندازه گیری کرد. کشیدگی سنج های گمانه ای برای اندازه گیری نشست زمین در اعماق مختلف مورد استفاده قرار می گیرند، که باید در گمانه های قائم حفاری شده از سطح قرار گیرند. این ابزار دارای انواع مختلفی نظیر انکری- تزریقی و چنگکی هستند، میله هایی در داخل یک لوله محافظ و یک سطح مرجع قرار دارد که جابجایی ها در راستای محور کشیدگی سنج از آن قابل اندازه گیری است. اندازه گیری ها در سطح مرجع با یک میکرومتر انجام خواهد شد. که فاصله بین انتهای فوقانی میله و سطح مرجع را اندازه می گیرد شکل (۴-۲). (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

<sup>1</sup> Extensometer



الف



ب

شکل ۴-۲- اجزای مختلف کشیدگی سنج میله ای چنگکی (الف) و میله ای انکری (ب) (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)

در پروژه تونل حکیم بنا به درخواست مشاور طرح، ۱۸ کشیدگی سنج تقریباً در فواصل ۱۰۰ متری نسبت به یکدیگر در نظر گرفته شده است. کشیدگی ها از نوع سه نقطه ای در اعماق ۲ و ۵ و عمیق ترین نقطه گیرداری یک متر قبل از تماس با سازه نگهدارنده تونل (lattice girder) نصب می گردند.

قرائت اولیه قبل از آغاز عملیات حفاری یا پیش از رسیدن جبهه کار تونل به فاصله ۱۰۰ متری انجام می شود. قرائت های بعدی باید در فواصل ۶۰، ۴۰ و ۲۰ متری از جبهه کار تونل سپس هفته ای یک قرائت و زمانی که جبهه کار تونل به گمانه بعدی رسید، دو قرائت در هفته صورت می گیرد و تا ثابت شدن آهنگ تغییر شکل ها ادامه خواهد داشت. دوره های قرائت برای هر حفاری تکرار خواهد شد. فرمت خروجی تغییر شکل عمودی در زمان برای تمامی انکرها و سطوح خواهد بود. گمانه ها باید در مقابل رفت و آمد و خرابی احتمالی محافظت شوند. ابزار باید حین اندازه گیری، تا زمان برداشتن آن ها از محل مورد نظر نگهداری شوند (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

## ۴-۶-۳- پین ژئودتیک

در طی سال های اخیر توسعه ابزارهای نقشه برداری الکترونیکی و نرم افزارهای کامپیوتری موجب استفاده روز افزون از روش های ژئودتیک شده است. هم اکنون امکان اندازه گیری جابجایی مطلق سه بعدی دیواره های تونل به وسیله دوربین های الکترونیکی توتال استیشن<sup>۱</sup> و پین های ژئودتیک فراهم شده است.

در روش ژئودتیک، رفتارسنجی با استفاده از یک ایستگاه نقشه برداری با دقت بسیار بالا و به وسیله دوربین های نوری سه بعدی انجام می شود. به منظور ثبت جابجایی های مطلق دیواره شاکریتی مجموعه ای از نقاط نشانه (رفلکتور<sup>۲</sup>) در یک مقطع نصب و در دوره های زمانی مختلف توسط دوربین نقشه برداری قرائت می شوند. پین های ژئودتیک در دو دسته کلی پین های انعکاسی (منشوری) و پین های غیر انعکاسی تقسیم بندی می شوند. پین های ژئودتیک مورد استفاده در تونل از نوع پین های غیر انعکاسی هستند که هزینه ساخت و نصب آن ها حدود یک دهم انواع انعکاسی است (شکل ۴-۳) (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

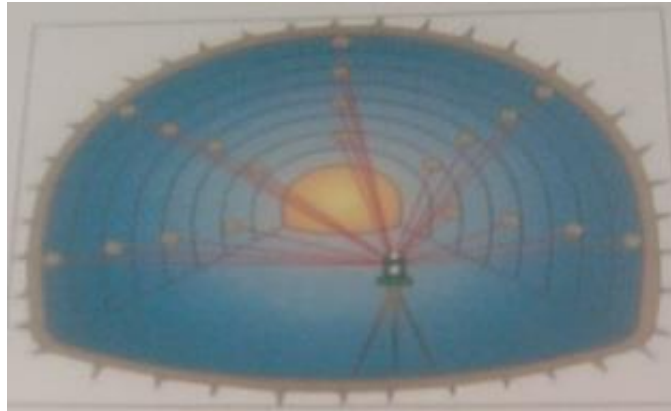


شکل ۴-۳- نمونه پین های ژئودتیک و ملحقات آن (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)

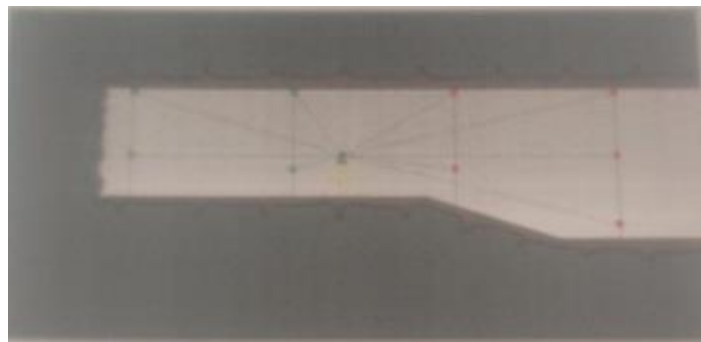
در شکل های (۴-۴) و (۵-۴) تصاویری از مقاطع عرضی و طولی قرائت نقاط ژئودتیک نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Total Station

<sup>2</sup> Reflector



شکل ۴-۴- قرائت پین های ژئودتیک با دوربین توتال استیشن - مقطع عرضی (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)



شکل ۴-۵- قرائت پین های ژئودتیک با دوربین توتال استیشن - مقطع طولی (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)

#### ۴-۷- نصب، قرائت، پردازش و گزارش نتایج ابزار دقیق

##### ۴-۷-۱- نصب

عملیات نصب ابزارهای دقیق بر اساس دستورالعمل کارخانه سازنده ابزار و مطابق جزئیات نصب ابزار انجام می شود. خدمات اجرایی نصب توسط پیمانکار و با نظارت دستگاه نظارت انجام خواهد شد. برای هر یک از ابزارهای نصب شده یک گزارش نصب تهیه شده و مجموعه اطلاعاتی که به نحوی در پردازش داده های ابزار دقیق مفید باشد، مکتوب خواهد شد. از این رو تهیه گزارش نصب از موارد بسیار مهمی است که دو هدف را دنبال می کند: (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

در موقع نصب پرسنل نصاب ملزم به پیروی از دستورالعمل ها و استانداردهای دقیقی خواهند بود که این مهم با ورود داده ها و اطلاعات در یک فرم میسر می گردد.

اطلاعات هنگام نصب برای ثبت تصمیم ها و اتفاقات و همچنین ارزیابی داده های اندازه گیری شده در آینده استفاده می شود.

-فرم های نصب ابزار شامل قسمت های زیر می باشد:

-نام پروژه

-نام عوامل پروژه (کارفرما، مشاور، پیمانکار)

-محل و موقعیت نصب ابزار

-تاریخ و زمان شروع و خاتمه عملیات نصب

-شرایط محیطی محل نصب ابزار

-وضعیت پیشرفت مراحل مختلف حفاری در زمان نصب ابزار

-تشریح مشخصه های ابزار

-روش و تجهیزات حفاری

-جزئیات روش نصب و کالیبراسیون و اندازه گیری

-کروکی از محل نصب ابزار در محل

-نام نصب کننده و ناظر ابزار

## ۴-۷-۲-قرائت

پس از کالیبره کردن و نصب و تدوین برنامه قرائتی ابزار، باید نسبت به جمع آوری داده ها اقدام نمود و به دنبال آن نسبت به نمایش، پردازش و تفسیر آن ها اقدام کرد.

خدمات قرائت ابزار دقیق های نصب شده توسط پیمانکار و با نظارت دستگاه نظارت انجام می شود. در هر مرحله از پیشرفت جبهه های کاری و با توجه به نرخ تغییرات نتایج ابزار، اهمیت پایداری و اندازه گیری رفتار، برنامه قرائت تعیین می شود. قرائت ابتدایی ابزار بلافاصله پس از نصب ابزار در محل نصب انجام می شود. بعد از قرائت اولیه، طبق برنامه زمان بندی ابلاغی به پیمانکاران، قرائت ابزارها انجام می شوند. برای هر یک از ابزار با توجه به نوع ابزار یک برنامه زمان بندی قرائت تهیه می شود. نتایج قرائت ابزار دقیق در فرم های مخصوص ثبت شده و در اسرع وقت به واحدهای مربوطه ارسال می شوند. با توجه به روند تغییرات و تفسیرهای انجام شده برنامه قرائت اصلاح شده و مجدداً به پیمانکار ارسال خواهد شد. به عبارت دیگر در صورت افزایش نرخ تغییرات، بازه قرائت روزانه تا ۳ بار در روز نیز افزایش خواهد یافت. از زمان جمع آوری داده تا زمان انجام محاسبات و ترسیم و ارائه نمودار مربوطه نباید بیش از ۲۴ ساعت فاصله باشد (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

در یک تقسیم بندی عملیات قرائت یا جمع آوری داده های ابزار دقیق به دو گروه تقسیم می

شود

-قرائت غیر خودکار

-قرائت خودکار

یک فرم ثبت نتایج ابزار شامل قسمت های زیر می باشد:

-نام پروژه



-نام عوامل پروژه ( کارفرما، مشاور، پیمانکار)

-محل و موقعیت قرائت ابزار

-تاریخ و زمان قرائت

-شرایط محیطی محل قرائت ابزار ( مانند دما، وضعیت تحکیمات و رطوبت)

-وضعیت پیشرفت مراحل مختلف حفاری در محدوده قرائت ابزار

-تشریح مشخصه های ابزار قرائت کننده

-کالیبراسیون ابزار

-شمایی از محل قرائت ابزار در محل

-نام قرائت کننده و ناظر ابزار

-ستون درج توضیحات ( مشاهدات عینی و سایر اطلاعاتی که در زمان ثبت داده ها بر آن تاثیر

گذار بوده است).

#### ۴-۷-۳-پردازش

تفسیر اطلاعات جابجایی، یکی از بخش های ضروری عملیات رفتارنگاری برای تعیین نرخ

تغییرات جابجایی ها است که حالت های پایداری، خطر ناپایداری و بحرانی را نشان می دهد. نتایج

قرائت بایستی در اسرع وقت به نمودارهای جابجایی تبدیل شود. در صورت عدم به روز رسانی به موقع

نمودارها، علی رغم ثبت دقیق اندازه گیری های رفتارنگاری، روند تغییرات جابجایی که عامل گسترش

شکست و ریزش است تشخیص داده نمی شود. در رسم نمودارهای مربوط به نتایج ابزاردقیق

ژئوتکنیکی، توجه به نکات زیر ضروری است: (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

## -مقیاس

-محورهای نمودار باید به گونه ای انتخاب شود که مشاهده کننده واقعیت را به خوبی درک کند و پیش بینی ادامه روند ممکن باشد. اشتباه در این مهم موجب بزرگ نمایی و یا پنهان شدن تغییرات واقعی در نمودار می شود.

-منحنی نمودار کمی پر رنگ تر از شبکه منطبق بر دستگاه مختصات باشد و نقاط مربوط به داده ها روی نمودار وجود داشته باشد.

-از محور عمودی برای پارامتر تراز، عمق و یا جابجایی استفاده شود.

-هر نمودار به تنهایی باید اطلاعات نام پروژه، نام ابزار، مقیاس، واحد استفاده شده و زمان اندازه گیری را نشان دهد.

-از یک نمای شماتیک برای نشان دادن موقعیت ابزار در سازه اصلی استفاده شود.

-نموداری تهیه شود که مراحل پیشرفت عملیات اجرایی را بر حسب زمان نشان دهند.

-از مقیاس واحدی برای داده های ابزارهای همسان استفاده شود تا مقایسه ممکن شود.

-مقدار پیش بینی شده و محدوده ایمن (مجاز) در نموداری منعکس شود که در آن از محورهایی همانند محورهای قرائت های میدانی استفاده می شود.

از پیش نیازهای ارائه نموداری مناسب، شناخت کامل از برنامه ابزاربندی، تصویرسازی، آگاهی و تجربه بررسی کننده، زمان کافی و استفاده از آزمون و خطا است. این گونه نمودارها را می توان در مرحله نخست به صورت دستی رسم کرد و موقعیت قرارگرفتن ابزار نسبت به سازه، شرایط زمین شناسی، علائم نمایش داده ها، ترسیم محدوده ایمن و غیر ایمن، ذکر مشخصات پروژه و ابزار دقیق و زمان قرائت را ترسیم کرد.

#### ۴-۷-۴- گزارش ها

با توجه به پیشروی حفاری در جبهه های مختلف در کارگاه ها و لزوم اندازه گیری تغییر شکل ها به صورت مداوم، گروه ابزار دقیق اقدام به ارائه گزارش هایی به صورت روزانه، هفتگی و ماهانه می کند. این گزارش ها بر حسب نوع گزارش شامل مواردی همچون ابزار نصب شده، قرائت های انجام شده و جلسات انجام شده و مواردی از این دست می شوند (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

#### ۴-۷-۴-۱- گزارش روزانه

گزارش های روزانه مخصوصا در مورد ارسال اطلاعات و نمودارهای حاصل از اندازه گیری ابزاردقیق از سوی پیمانکار و همچنین شامل ارجاع اطلاعات کلی، مشکلات موجود و یادآوری در مورد نقاط حساس می باشد (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

#### ۴-۷-۴-۲- گزارش هفتگی

گزارش های هفتگی مربوط به گزارش های نصب ابزار، قرائت ابزار، مشکلات موجود، جلسات انجام شده، جداول مربوط به تعداد قرائت های انجام شده، تعداد ابزار نصب شده و تعداد ابزار مورد نیاز می باشد.

#### ۴-۷-۴-۳- گزارش ماهانه

گزارش های ماهانه مربوط به خلاصه فعالیت های انجام شده در زمینه ابزار دقیق می باشد که شامل مواردی از قبیل قرائت ابزار، مشکلات موجود، جلسات انجام شده، جداول مربوط به تعداد قرائت های انجام شده، تعداد ابزار نصب شده و تعداد ابزار مورد نیاز و توافقات انجام شده می باشد (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا ۱۳۹۲).

## ۴-۴-۷-۴- گزارش موردی

برای محل های بحرانی و حساس پروژه که نیاز به بررسی دقیق تری دارند، گزارش های موردی تهیه خواهد شد، در این گزارش عوامل حساس، رفتارنگاری و بررسی می شود (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

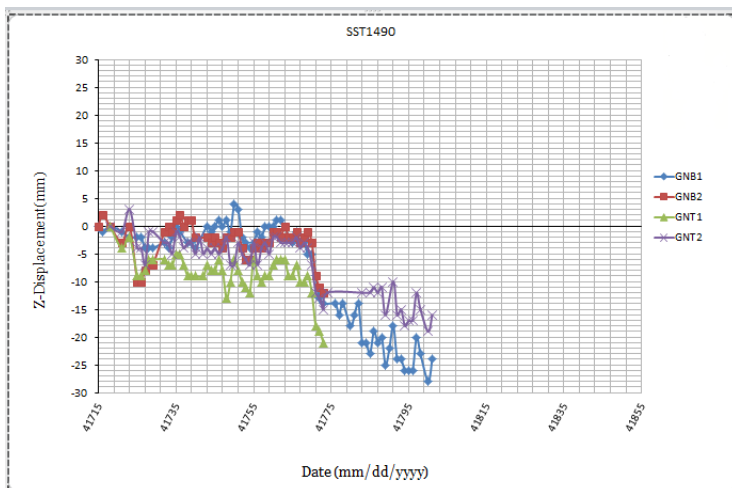
## ۴-۸- بررسی ایستگاه های ابزار دقیق (ژئودتیک)

نام گذاری ابزار نصب شده در هر ایستگاه بدین صورت می باشد که ابزار نصب شده در سقف (Top) گالری های چپ و راست با علامت اختصاری ( $T_1$  و  $T_2$ ) و پله (Bench) گالری های چپ و راست با علامت اختصاری ( $B_1$  و  $B_2$ ) نام گذاری شده است. به عنوان مثال قرائت سقف گالری سمت چپ با علامت (GST1) مشخص شده است. در جدول (۴-۱) مشخصات ایستگاه های نصب شده در تونل مذکور ارائه گردیده است.

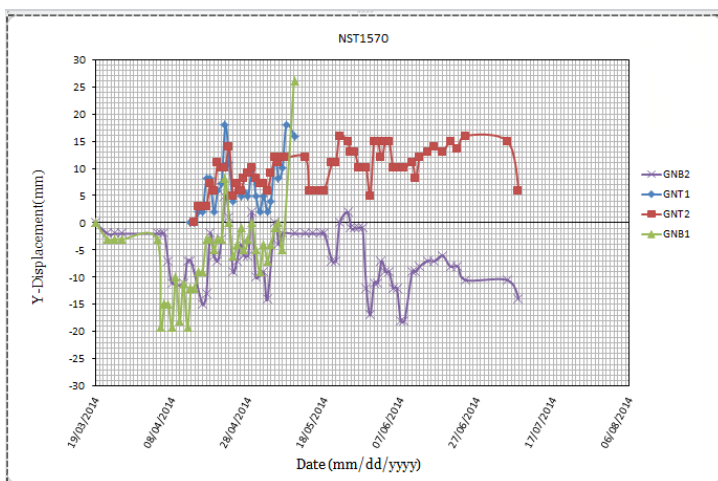
جدول ۴-۱- مشخصات ایستگاه های نصب شده در تونل ها (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲).

نام ایستگاه	عمق روباره (m)	کیلو متر از
SST	۱۳	۱۴۹۰
NST	۴	۱۵۷۰
NST	۸	۲۰۱۰

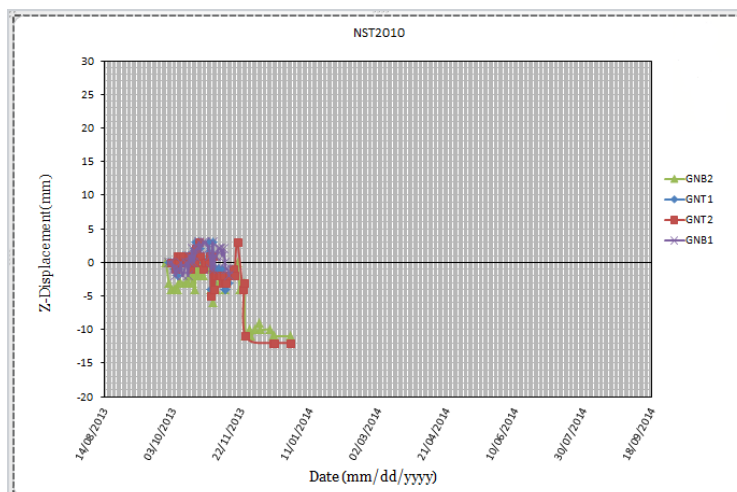
در شکل های (۴-۶) تا (۴-۸) تغییرات جابجایی ثبت شده بر حسب میلی متر برای سه ایستگاه به عنوان نمونه ارائه شده است.



شکل ۴-۶- تغییرات جابجایی بر حسب زمان در ایستگاه (SST1490) پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حراء، (۱۳۹۲)



شکل ۴-۷- تغییرات جابجایی بر حسب زمان در ایستگاه (NST1570) پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حراء، (۱۳۹۲)



شکل ۴-۸- تغییرات جابجایی بر حسب زمان در ایستگاه (NST2010) پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)

در جدول شماره (۴-۲) تا (۴-۴) حداکثر جابجایی ثبت شده در جهت (Z,Y,X) در کلیه ایستگاه‌ها ارائه گردیده است.

جدول ۴-۲- حداکثر جابجایی ثبت شده در ایستگاه NST1570 (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)

جابجایی در راستای Z (mm)	جابجایی در راستای Y (mm)	جابجایی در راستای X (mm)	حداکثر جابجایی	
			نام ایستگاه	
۱۲	۹	۱۹	GST1	
۱۲	۱۲	۱۸	GST2	
۱۸	۱۱	۸	GSB1	
۱۶	۱۹	۱۳	GSB2	
۲۳	۱۸	۱۴	GNT1	
۱۶	۱۶	۲۹	GNT2	
۱۵	۲۷	۱۶	GNB1	
۱۳	۱۸	۱۶	GNB2	
۱۷	۱۵	۱۵	GM	

جدول ۳-۴- حداکثر جابجایی ثبت شده در ایستگاه SST1490 (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)

جابجایی در راستای Z (mm)	جابجایی در راستای Y (mm)	جابجایی در راستای X (mm)	نام ایستگاه
۱۲	۱۳	۶	GST1
۱۶	۱۹	۱۰	GST2
۱۴	۱۳	۶	GSB1
۱۳	۲۸	۱۷	GSB2
۲۲	۱۳	۸	GNT1
۱۹	۱۶	۷	GNT2
۲۸	۲۲	۱۲	GNB1
۱۳	۱۱	۸	GNB2
۱۶	۱۲	۵	GM

جدول ۴-۴- حداکثر جابجایی ثبت شده در ایستگاه NST2010 (پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، ۱۳۹۲)

جابجایی در راستای Z (mm)	جابجایی در راستای Y (mm)	جابجایی در راستای X (mm)	نام ایستگاه
-	۱۴	-	GST1
-	۸	-	GST2
۳	۱۰	۶	GSB1
۱۱	۷	۱۳	GSB2
۴	۵	۴	GNT1
۱۳	۶	۴	GNT2
۴	۹	۴	GNB1
۱۱	۷	۴	GNB2
۷	۳	۳	GM

#### ۹-۴- تحلیل پایداری تونل با استفاده از داده‌های ژئودتیک

تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی در داخل سنگ و خاک با داده‌های صحرائی نسبتاً کمی صورت می‌گیرد که این امر در بسیاری از موارد منجر به عدم شناخت مناسب از خصوصیات رفتاری و مقاومتی مواد می‌شود؛ و نیز علیرغم گسترش و توسعه قابل توجه در تحلیل پایداری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی با استفاده از روش‌های عددی در دهه‌های اخیر، همچنان به دلیل عدم قطعیت و غیرقابل اعتماد بودن داده‌های ورودی، کارایی این روش‌ها در پیش‌بینی رفتار ژئومکانیکی سنگ و خاک همواره مورد تردید بوده است. به عبارت دیگر اعتبار پیش‌بینی‌ها و ارزشیابی‌های انجام‌شده به کمک روش‌های عددی به دقت پارامترهای ژئومکانیکی برجای خاک و اینکه این پارامترها تا چه حد بیانگر رفتار واقعی توده خاک می‌باشد، بستگی دارد. ولیکن اندازه‌گیری دقیق پارامترهای ژئومکانیکی برجای توده خاک بسیار دشوار و گاهی غیرعملی می‌باشد. برای غلبه بر این مشکلات، رفتار سنجی فضاهای زیرزمینی در حین و بعد از اجرا انجام می‌شود. داده‌های پردازش‌شده ابزار دقیق می‌تواند اطلاعات بارزشی را در ارتباط با وضعیت تنش و محدوده توده خاک، در اطراف فضای زیرزمینی و پایداری آن به دست دهد.

استفاده از روش‌های مشاهده‌ای به منظور ایجاد حالت مقایسه بین روش‌های دیگر و اعتبار سنجی آن روش‌ها است. البته این فرض منوط به اطمینان از دقت قابل اعتماد دستگاه و ابزارها، روش به کارگیری صحیح از ابزار و همچنین پارامتر زمان و مسائل دیگر است. با توجه به گذشت زمان و نصب سیستم‌های نگهدارنده در این تونل و همینطور با توجه به داده‌های ثبت شده، شرایط تقریباً پایدار را برای این تونل می‌توان در نظر گرفت. در مرحله بعد می‌توان نتایج تحلیل‌های عددی را با نتایج ابزار دقیق سنجید.



## فصل پنجم

آشنایی و مراحل حل مسئله در نرم افزار  $FLAC^{3D}$

---

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل گام‌های مدل‌سازی تعریف و نحوه خاک‌برداری، پایدارسازی و مراحل ساخت در تونل‌های بزرگراهی بررسی می‌شود و سپس سیستم‌های نگهداری اولیه استفاده‌شده در مدل‌سازی تعریف خواهد شد. با توجه به تنوع روباره از ۴ تا ۱۳ متر، جهت به دست آوردن حالت بحرانی تونل از بین روباره‌های ۴، ۸ و ۱۳ متر، مدل‌سازی را با این سه روباره انجام می‌دهیم.

۵-۲- مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>۵-۲-۱- آشنایی با نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>

نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC<sup>3D</sup><sup>۱</sup> یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم‌افزارهای Itasca می‌باشد که برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. FLAC<sup>3D</sup> بر اساس آنالیز محاسباتی لاگرانژی استوار است که برای مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ نیز مناسب می‌باشد، با این نرم‌افزار می‌توان مدل رفتاری سازه‌های خاکی، سنگی و یا سایر مواد که دارای جریان پلاستیک در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند را مدل‌سازی کرد.

۵-۲-۲- مراحل حل مسئله در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>

در این مرحله با توجه به ترتیب مراحل مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> و شرایط موجود در منطقه، تونل موردنظر مدل‌سازی شده و کلیه محاسبات در سه مرحله قبل از حفر سازه، بلافاصله بعد از حفر سازه و در نهایت پس از نصب سیستم نگهداری انجام‌شده و در هر مرحله کلیه تنش‌ها و جابجایی‌ها در اطراف سازه محاسبه‌شده است. به‌طور کلی با توجه به اصول مدل‌سازی عددی و همچنین ترتیب اجرایی، مراحل مدل‌سازی با برنامه FLAC<sup>3D</sup> به ترتیب زیر صورت گرفته است (کریمی م، ۱۳۹۱).

<sup>1</sup> Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensional

※ ساخت مدل اولیه

- ساخت هندسه مدل

- انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده

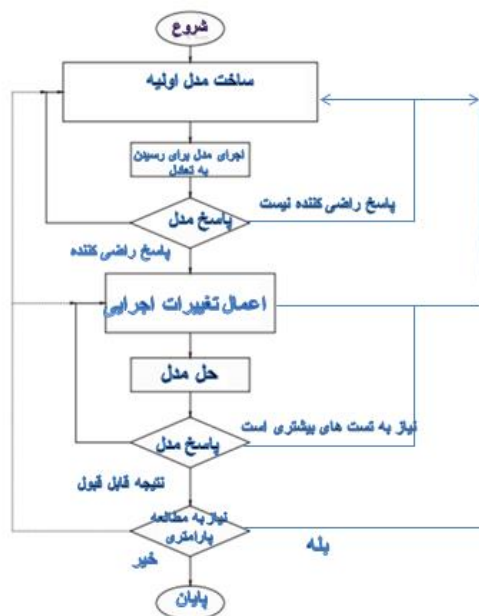
- اعمال شرایط مرزی و اولیه

※ حل و بررسی مدل ساخته شده و اصلاح آن در صورت نیاز

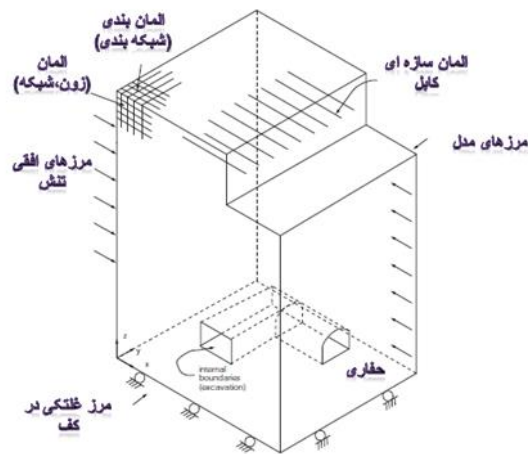
※ تفسیر نتایج

در شکل (۵-۱) الگوریتم حل مسئله و در شکل (۵-۲) نمونه‌ای از یک مدل در نرم‌افزار

FLAC<sup>3D</sup> به همراه اصطلاحات مورد استفاده در آن، نشان داده شده است. (کرمی م، ۱۳۹۱)



شکل ۵-۱- الگوریتم حل مسئله در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> (Itasca, 2011)

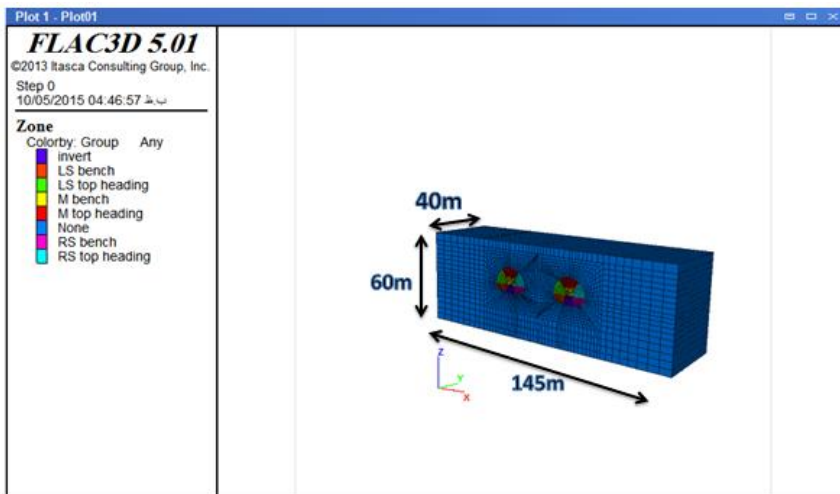


شکل ۵-۲- نمونه‌ای از یک مدل به همراه اصطلاحات مورد استفاده در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> (Itasca, 2011)

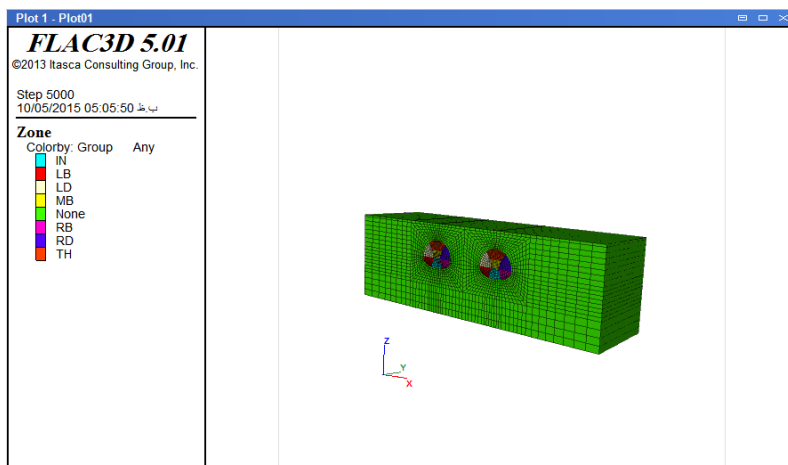
### ۵-۳- گام اول: هندسه سازی

اولین قدم در تحلیل عددی، داشتن یک مدل اولیه مناسب است که در شکل (۵-۳) تا (۵-۵) نشان داده شده است بنابراین مدل ساخته شده باید طوری باشد که عوامل تأثیرگذار و نامطلوب در آن حداقل باشد.

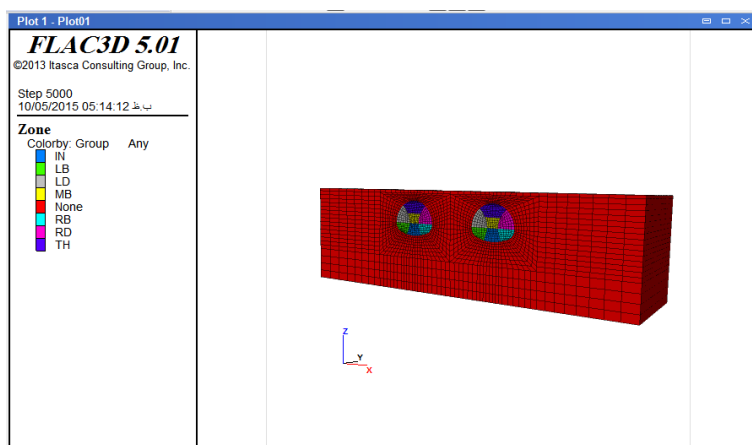
برای ساخت هندسه مدل مورد نظر در این پروژه از ابزار Extrusion که در شکل (۵-۶) تا (۵-۸) نشان داده شده استفاده می شود. با استفاده از این ابزار می توان هندسه‌هایی که ساخت آنها به صورت سه بعدی مشکل است را ابتدا به شکل دوبعدی ساخت و سپس هندسه دوبعدی را به صورت طولی یا چرخشی گسترش داد تا هندسه سه بعدی مورد نظر حاصل شود. هندسه مدل ۱۴۵ متر عرض، ۶۰ متر ارتفاع و ۴۰ متر طول دارد. اندازه تونل حدود ۱۳/۸ متر ارتفاع و ۱۷/۸ متر عرض انتخاب شده است (کرمی م، ۱۳۹۱).



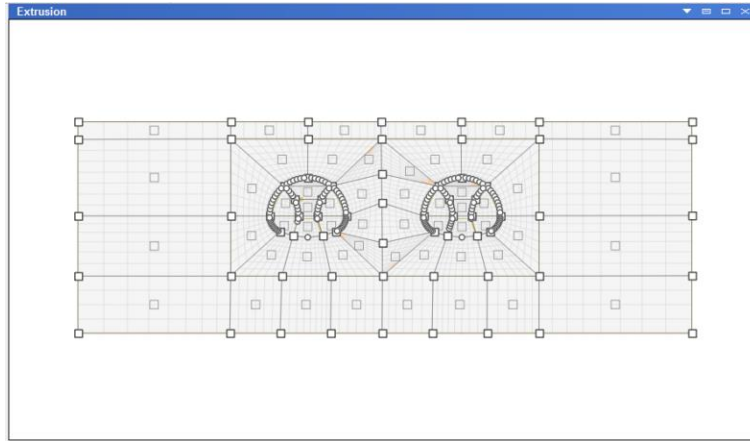
شکل ۵-۳- هندسه مدل با روباره ۱۳ متر



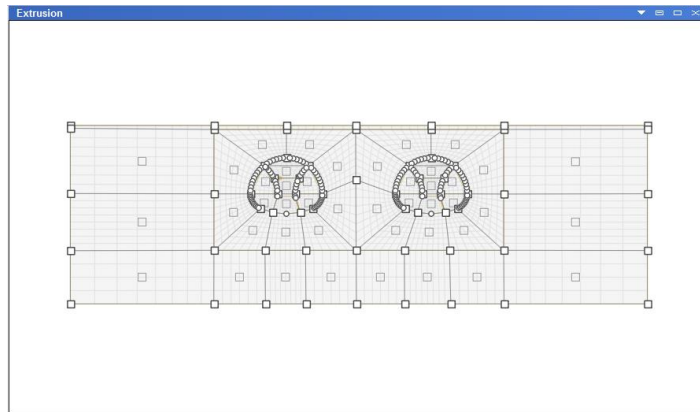
شکل ۵-۴- هندسه مدل با روباره ۸ متر



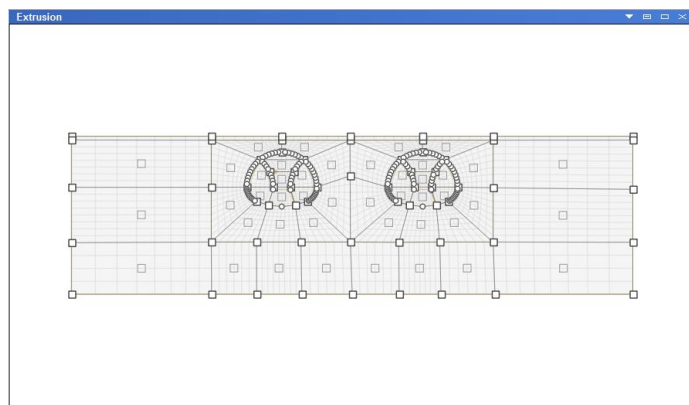
شکل ۵-۵- هندسه مدل با روباره ۴ متر



شکل ۵-۶- ساخت هندسه با روباره ۱۳ متر به کمک ابزار Extrusion



شکل ۵-۷- ساخت هندسه با روباره ۸ متر به کمک ابزار Extrusion



شکل ۵-۸- ساخت هندسه با روباره ۴ متر به کمک ابزار Extrusion

#### ۴-۵- گام دوم: انتخاب مدل ساختاری و تعیین خصوصیات ماده

پس از ساخت هندسه، باید یک مدل رفتاری مناسب به ماده آن اختصاص یابد. مدل رفتاری اعمال شده به مدل، موهر-کولمب در نظر گرفته شد و پارامترهای موردنیاز این مدل نیز با توجه به داده‌های موجود در جدول (۵-۱) به مدل اعمال گردید. مقدار شتاب گرانش نیز ۱۰ در نظر گرفته شد؛ و با استفاده از دستور PROPERTY خصوصیات مرتبط با مدل رفتاری از قبیل مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و ... به زون‌های مدل اعمال می‌شود (کرمی م، ۱۳۹۱).

جدول ۵-۱- پارامترهای معیار شکست موهر-کولمب در مدل سازی (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	روپاره (m)
۲۰۰۰	۳۳/۳۳۳	۱۰۰	۰/۰۴۵	۳۳	۱۳
۲۰۰۰	۳۳/۳۳۳	۱۰۰	۰/۰۴۵	۳۳	۸
۱۹۰۰	۲۵/۳۶۲	۹۷/۲۲۲	۰/۰۳	۳۲	۴

#### ۵-۵- گام سوم: شرایط مرزی و اولیه

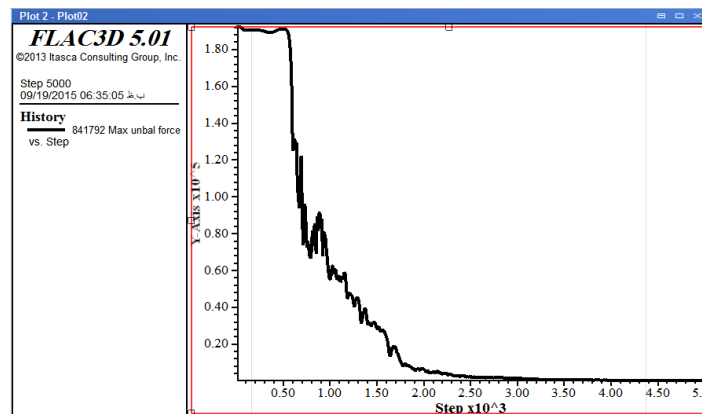
در این مرحله شرایط مرزی و اولیه در مدل اعمال شده و مدل برای رسیدن به تعادل اجرا می‌شود. ابعاد مدل در طرفین، سقف و کف مدل بر اساس رفتار الاستیک یا پلاستیک سنگ یا خاک، از ۵ تا ۱۰ برابر شعاع تونل متغیر است. همچنین وزن روباره را می‌توان با دستور APPLY به سقف مدل اعمال نمود تا شرایط نسبتاً واقعی و طبیعی ایجاد شود.

#### ۶-۵- گام چهارم: بررسی تعادل مدل

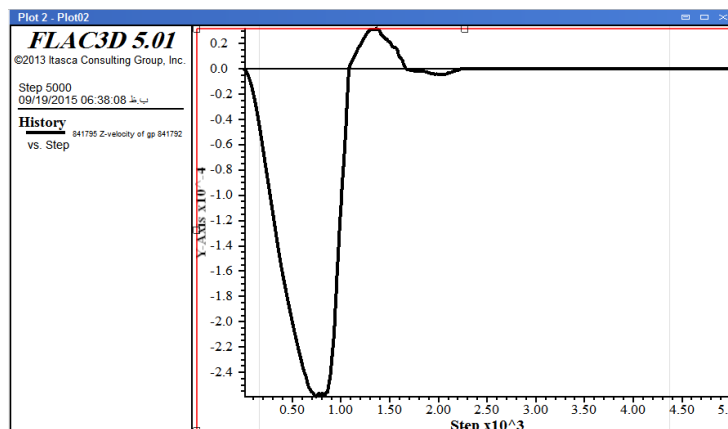
پس از تعریف هندسه، اعمال خصوصیات ماده و اعمال شرایط مرزی و اولیه به مدل، نوبت به حل مدل خواهد رسید. به منظور بررسی وضعیت تعادل مدل عددی می‌توان از شاخص‌هایی مانند

نیروهای نامتعادل و سرعت در گره‌ها و همچنین جابجایی مدل استفاده کرد. حالت تعادل زمانی به دست می‌آید که نیروی نامتعادل کننده به سمت صفر میل کند. چنانچه مدل به درستی به تعادل رسیده باشد می‌توان وارد مرحله بعدی (حفاری) شد، در غیر این صورت باید به تصحیح مدل پرداخته شود. پس از به تعادل رسیدن مدل اولیه و صفر کردن جابجایی و سرعت گره‌ها در سه راستای مختصاتی، مدل‌سازی مربوط به حفر تونل آغاز می‌شود.

جهت اطمینان از تعادل مدل، تاریخچه نقاط کنترلی در سقف تونل بر اساس کنترل نیروهای نامتعادل کننده گرهی و سرعت گرهی در حالت قبل از حفاری در نظر گرفته شد. در این راستا نمودارهای مربوطه مطابق اشکال (۵-۹ تا ۵-۱۴) به دست آمد.

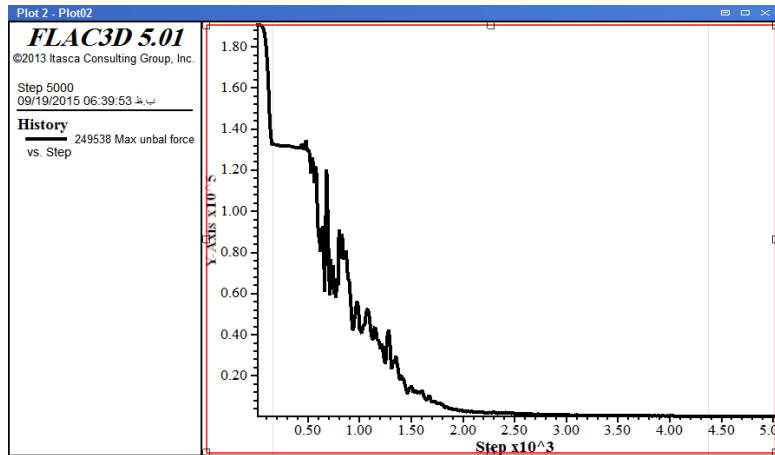


شکل ۵-۹- ایجاد تعادل در مدل با کنترل نیروهای نامتعادل کننده گرهی با روباره ۱۳ متر

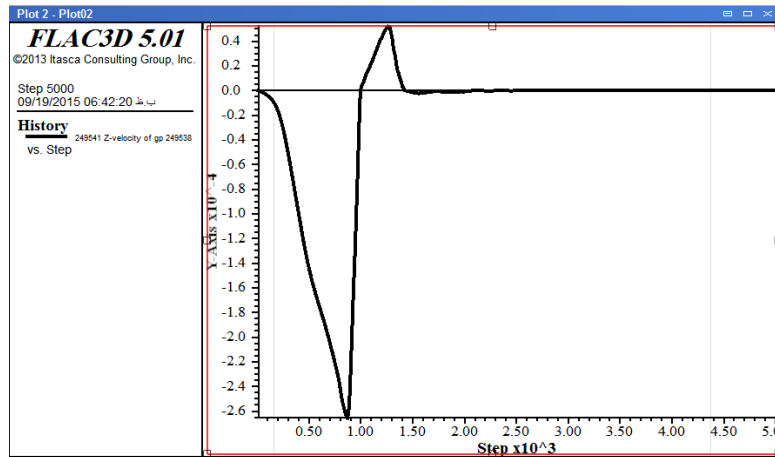


شکل ۵-۱۰- تاریخچه زمانی سرعت گرهی در سقف تونل با روباره ۱۳ متر

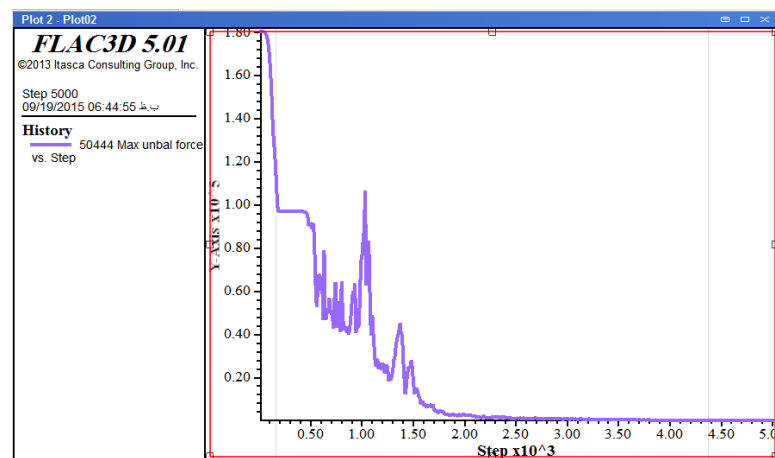




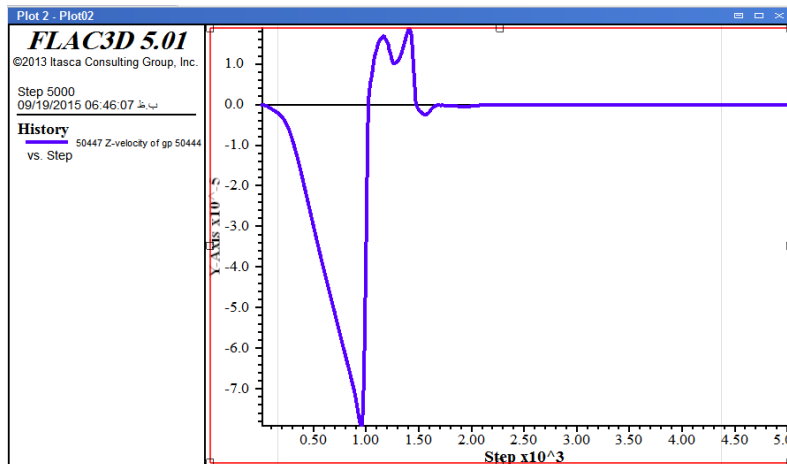
شکل ۵-۱۱- ایجاد تعادل در مدل با کنترل نیروهای نامتعادل کننده گرهی با روباره ۸ متر



شکل ۵-۱۲- تاریخچه زمانی سرعت گرهی در سقف تونل با روباره ۸ متر



شکل ۵-۱۳- ایجاد تعادل در مدل با کنترل نیروهای نامتعادل کننده گرهی با روباره ۴ متر



شکل ۵-۱۴- تاریخچه زمانی سرعت گرهی در سقف تونل با روباره ۴ متر پلات‌های فوق نشانگر ایجاد تعادل پس از ایجاد تنش‌های اولیه در مدل است.

### ۵-۷- گام پنجم: اعمال عملیات اجرایی

در این مرحله با توجه به نحوه حفاری به روش اتریشی و نوع مدل ساخته‌شده، تغییرات لازم به مدل اعمال می‌شود. حفر مدل با اختصاص مدل تهی (null) به محدوده موردنظر امکان‌پذیر است. برای حفر مدل ابتدا جابجایی‌ها و سرعت‌هایی که در اثر رسیدن مدل به تعادل به گره‌ها تحمیل شده است را صفر کرده، سپس مدل حفر می‌گردد (کرمی م، ۱۳۹۱).

### ۵-۷-۱- نحوه خاک‌برداری و پایدارسازی تونل

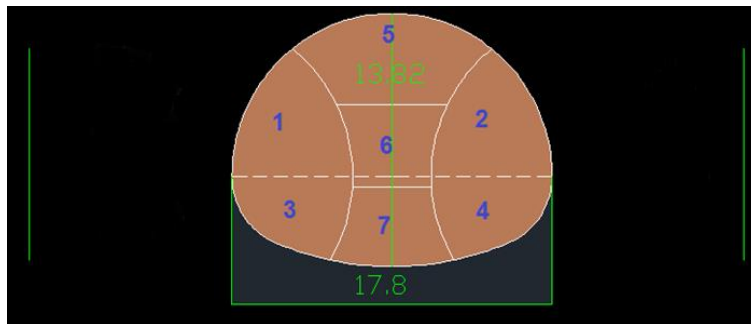
خاک‌برداری و پایدارسازی با استفاده از روش (NATM) که ترکیبی از عملیات مرحله‌ای افقی و قائم است، انجام می‌گیرد (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲).

### ۵-۷-۲- مراحل ساخت

جهت حفر تونل در زمین‌های سست به روش کلاسیک، به‌خصوص در مورد تونل‌های بزرگ مقطع، ممکن است حفاری کل مقطع تونل در یک مرحله (Full Face Excavation) به دلایلی از قبیل امکان رخداد ریزش، مسائل مربوط به نشست‌های غیرمجاز در سطح زمین و غیراقتصادی بودن

عملیات، مقدور نباشد. تقسیم‌بندی جبهه کار حفاری به چند مقطع کوچک‌تر و پیشروی جبهه کار تونل طی چند مرحله از جمله راهکارهای مورد استفاده در این زمینه می‌باشد. نحوه تقسیم‌بندی مقطع و تعداد مراحل حفاری تابع عواملی از قبیل سطح مقطع تونل و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک است. با انتخاب روشی مناسب، ضمن تأمین پایداری بخش‌های حفاری شده و جلوگیری از رخدادهای نامطلوب، مانند نشست سطح زمین، همگرایی دیواره‌های تونل، در زمان و هزینه اجرای پروژه صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای حاصل خواهد شد (معادیخواه ع، ۱۳۹۲).

مهم‌ترین چالش پیش رو در طراحی تونل به روش کلاسیک انتخاب مقطع مناسب برای تونل، روش اجرای متناسب با آن و تعیین سیستم نگهداری متناسب با آن است؛ که در پروژه حاضر به آن پرداخته شده است. مقطع حفاری تونل به روش کلاسیک (غیرمکانیزه) مطابق با شکل (۵-۱۵) می‌باشد.



شکل ۵-۱۵- مقطع هندسی پوشش موقت سه خطه تونل (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

مراحل ساخت شامل حفاری و نصب پوشش موقت تونل به شرح زیر است:

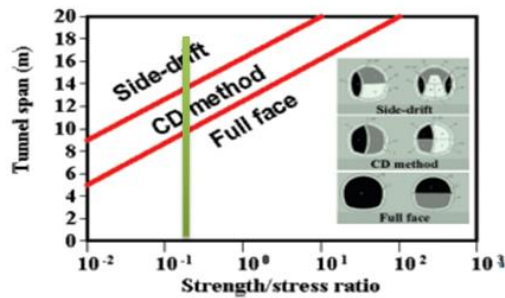
- (۱) LEFT SIDE DRIFT TOP HEADING
- (۲) RIGHT SIDE DRIFT TOP HEADING
- (۳) LEFT SIDE BENCH
- (۴) RIGHT SIDE BENCH
- (۵) MIDDLE TOP
- (۶) MIDDLE BENCH
- (۷) MIDDLE INVERT

### ۵-۷-۳- انتخاب روش مناسب حفاری تونل

انتخاب روش حفاری مناسب برای پروژه تونل‌های شهری دهانه بزرگ در زمین نرم یک عامل کلیدی برای تکمیل موفقیت‌آمیز پروژه است. هزینه و زمان ساخت تونل به شدت توسط روش حفاری تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در انتخاب روش حفاری، نیاز به بیان ملاحظات بسیاری از جمله مسائل عملیاتی، اقتصادی و زیست‌محیطی در زمینه تونل زنی است. نشست سطح زمین ناشی از تغییرات تونل زنی با توجه به روش‌های مختلف ساخت، برای مقاطع عرضی مختلف تونل می‌باشد. حتی در مقاطع عرضی یکسان، روش‌های ساخت مختلف منجر به نشست‌های مختلف می‌شود. این نشان می‌دهد که روش‌های ساخت اثر قابل توجهی در نشست سطح زمین دارد (Sharifzadeh M., 2013).

انتخاب روش مناسب حفاری بر اساس هندسه تونل و شرایط ژئوتکنیکی دربرگیرنده تونل مانند مقاومت زمین و ابعاد دهانه حفاری، توسط تونل سازان و محققین متعددی مورد بررسی قرار گرفته است و بر اساس تجربیات کسب شده جداول و نمودارهایی ارائه شده است. Yu و Chern در سال (۲۰۰۷) نموداری برای انتخاب روش حفاری تونل بر اساس اندازه دهانه و نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره زمین محصورکننده به تنش قائم تونل مطابق شکل (۵-۱۶) پیشنهاد کرده‌اند (Sharifzadeh M, 2012).

در پروژه حاضر نیز از این نمودار در ترکیب با قضاوت مهندسی و جداول پیشنهادی برای تعیین روش حفاری مناسب استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۵-۱۶) مشاهده می‌شود محدوده مطابق با شرایط تونل در این شکل مشخص شده است. پس از رسم اطلاعات تونل حکیم در نمودار ارائه شده در شکل (۵-۱۶)، روش گالری جانبی (SD) به‌عنوان مناسب‌ترین روش حفاری انتخاب شد.



شکل ۵-۱۶- نمودار بهینه‌شده برای انتخاب روش حفاری مناسب بر طبق دهانه تونل و نسبت مقاومت به تنش (Yu and Chern, 2007)

علاوه بر این در جدول (۵-۲) روش‌های مختلف حفاری بر اساس شرایط زمین و ابعاد حفاری ارائه‌شده و روش‌های مختلف بر اساس میزان نشست، زمان ساخت، هزینه‌های پروژه و ... مورد مقایسه قرار گرفته است (معادیخواه ع، ۱۳۹۲).

جدول ۵-۲- مقایسه و کنترل روش‌های مختلف حفاری (Xiang Ch., 2008)

روش ساخت	روش قابل اجرا	نشست	مدت ساخت	اثر آببندی	حذف پوشش موقت	هزینه پروژه
روش تمام مقطع	شرایط زمین خوب دهانه >= ۸	متوسط	کوتاه	خوب	-	کم
روش طاق و پله	شرایط زمین بد دهانه >= ۱۲	متوسط	کوتاه	خوب	-	کم
روش طاق و پله و برش حلقه‌ای	شرایط زمین بد دهانه >= ۱۲	متوسط	کوتاه	خوب	-	کم
روش گالری یک‌طرفه و طاق و پله	شرایط زمین بد دهانه >= ۱۴	نسبتاً بزرگ	نسبتاً کوتاه	خوب	کوچک	کم
روش دیافراگم میانی	شرایط زمین بد دهانه >= ۱۸	نسبتاً بزرگ	نسبتاً کوتاه	خوب	کوچک	نسبتاً زیاد
روش دیافراگم متقاطع	شرایط زمین بد دهانه >= ۲۰	نسبتاً کوچک	بلند	نسبتاً بد	بزرگ	زیاد
روش گالری دوجانبه	دهانه کوچک احتمال توسعه به دهانه بزرگ	بزرگ	بلند	بد	بزرگ	زیاد

از نقطه نظر مطلوب بودن هزینه پروژه و پیشرفت ساخت، دنباله انتخاب روش ساخت به شرح

زیر است:

روش تمام مقطع ← روش "طاق و پله" ← روش "پله و کف موقت"<sup>۱</sup> ← روش CD ← روش CRD ← روش گالری دوجانبه

از نقطه نظر مطلوب بودن برای ایمنی ساخت، دنباله انتخاب فوق باید معکوس شود.

در روش های حفاری مرحله ای، مقطع حفاری به چند مقطع کوچک تر تقسیم شده و پیشروی جبهه کار تونل طی چند مرحله صورت می گیرد. تقسیم بندی مقطع بر اساس ابعاد مقطع تونل و شرایط ژئوتکنیکی زمین، به روش های مختلفی می تواند انجام شود. روش طاق و پطاق<sup>۲</sup>، روش گالری یک طرفه<sup>۳</sup>، روش دیافراگم میانی<sup>۴</sup>، روش دیافراگم متقاطع<sup>۵</sup>، روش گالری های کناری<sup>۶</sup>، روش برش حلقه ای (RC)<sup>۷</sup>، برخی از روش های حفاری مرحله ای می باشند ( Xiang Ch., 2008 ).

با توجه به موارد مذکور و با توجه به جداول و نمودارهای موجود و همچنین ابعاد مقطع و مشخصات خاک دربرگیرنده تونل، دو روش گالری های کناری و روش دیافراگم میانی برای حفاری تونل در نظر گرفته می شود. به دلیل مزایایی مانند سهولت عملیات اجرایی و راندمان بالاتر و همچنین کنترل بهتر رفتار زمین و همچنین بر اساس ابعاد و ویژگی های ژئوتکنیکی خاک مسیر تونل، روش های مختلف تقسیم بندی مقطع مورد مقایسه قرار گرفته و بر اساس جداول و نمودارهای به دست آمده از تجربیات تونل سازان، روش مناسب که استفاده از روش گالری های جانبی می باشد، انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفته و در نهایت پیشنهاد و اجرا شده است.

<sup>1</sup> Bench and Temporary Invert Method

<sup>2</sup> Top Heading And Benching

<sup>3</sup> Single Side Drift Method

<sup>4</sup> Central Diaphragm Method

<sup>5</sup> Cross-Diaphragm Method

<sup>6</sup> Side Drifts Method

<sup>7</sup> Ring Cut Method

## ۸-۵- گام ششم: نصب سیستم نگهداری

### ۸-۵-۱- سیستم‌های نگهدارنده اولیه استفاده شده در تونل

نگهداری اولیه نقش عمده‌ای در پایداری اطراف توده خاک و سنگ ایفا می‌کند، درحالی‌که پوشش بتن‌ریزی برجا (پوشش ثانویه) تنها حامل یک بخش کوچکی از بار است.

سیستم نگهداری اولیه پیشنهادی که در تونل حکیم به کار گرفته شده شامل اجزاء زیر است.

۱- بتن پاشی<sup>۱</sup>

۲- شبکه توری فولادی<sup>۲</sup>

۳- قاب مشبک فولادی<sup>۳</sup>

### ۸-۵-۱-۱- بتن پاشی

مخلوط بتنی به صورت پاششی توسط پمپ است که دارای دو نوع خشک و تر می‌باشد. در ایران به دلایل اقتصادی از شاتکریت خشک استفاده می‌شود و از سر نازل خروجی مصالح به همراه آب پاشیده می‌شود. در مکان‌هایی که امکان قالب‌بندی نیست از شاتکریت استفاده می‌شود.

مزایای اصلی شاتکریت: (Palmstöm & Nilsen, 2000)

- در کمترین زمان آماده می‌شود
- به چوب‌بست نیاز ندارد
- قابل اجرا در مقاطع حفاری ناهموار
- به‌سادگی با روش‌های نگهداری دیگر ترکیب می‌شود
- خواص تغییر شکل انعطاف‌پذیر

معایب اصلی شاتکریت:

<sup>1</sup> Shotcrete

<sup>2</sup> Wire Mesh

<sup>3</sup> Lattice Girder

- مقاومت کششی پایین (که می توان آن را با مخلوط کردن الیافها یا تقویت کردن با بتن ریزی فولاد بهبود بخشید)

- وقتی در انواع سنگ متورم بکار رود باعث فروریختن می شود

- در انواع سنگ سخت با چسبندگی کم (برخی از انواع سنگ رسوبی) به کار می رود

- در انواع سنگ سخت با جاری شدن آب همراه است

شاتکریت خشک گرد و غبار زیادی را ایجاد می کند اما در شاتکریت تر به دلیل نداشتن گرد و

غبار زیاد و در حد بسیار کم فضای کار بسیار مناسب تری را برای کار افراد به وجود می آورد شکل

(۵-۱۷).

مخلوط شاتکریت تر<sup>۱</sup> در حال حاضر روش شاتکریت غالب در ساخت مدرن تونلها است و

تقریباً جایگزین روش قبلی، شاتکریت خشک شده است.

تفاوت بین این دو روش این است که روش شاتکریت تر با بتن کاملاً مخلوط شده و ضربات

نازل دستگاه شاتکریت با استفاده از هوای فشرده<sup>۲</sup> به کار می رود

تغییر یا تعویض اپراتور برای تنظیم میزان آب در هنگام شاتکریت کردن اتفاق می افتد. روش

شاتکریت تر برای شاتکریت کردن تونل تا زمانی که برگشت کمتر<sup>۳</sup>، ظرفیت بالاتر<sup>۴</sup> و شرایط کاری

بهتر<sup>۵</sup> فراهم شود، مناسب تر است.

<sup>1</sup> Wet Mix Shotcrete

<sup>2</sup> Compressed Air

<sup>3</sup> Less Rebound

<sup>4</sup> Higher Capacity

<sup>5</sup> Better Working





شکل ۵-۱۷-دستگاه شاتکریت پاش (Hjálmarsson, E, H, 2011)

### ۵-۱-۸-۲- شبکه توری فولادی

یک شبکه آرماتوربندی شده از میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر است.

سیم توری معمولاً با ترکیبی از پیچ سنگ و شاتکریت استفاده می‌شود. سیم توری معمولاً در ترکیب با میله‌های شاتکریت و لتیس گیردرها برای توزیع نیروهای توده سنگ برای المان‌های تحمل بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیم توری در جایی که چسبندگی کم بین شاتکریت و سطح سنگ یا خاک باعث ریزش شاتکریت می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد شکل (۵-۱۸). چنین شرایطی اغلب در حین شاتکریت بسیار تر با سطوح سنگ به شدت درزه‌دار یا رسوبی رخ می‌دهد. شکست‌های برشی محلی<sup>۱</sup> به علت وزن کششی<sup>۲</sup> شاتکریت در انواع سنگ با مقاومت چسبندگی کم رایج است و اغلب با سیم توری قبل از شاتکریت نگهداری می‌شود.

<sup>1</sup> Local Shear Failures

<sup>2</sup> Pull Weight



شکل ۵-۱۸- استفاده از شبکه توری فولادی به عنوان نگهداری در منطقه‌ای ناپایدار (Hjálmarsson, E, H, 2011)

مزایای اصلی:

- مقاومت برشی و شکل‌پذیری<sup>۱</sup> پوشش شاتکریت را افزایش می‌دهد.

- ریزش شاتکریت را در حین شاتکریت کردن کاهش می‌دهد

معایب اصلی:

- نصب آن زمان‌بر است و به همین دلیل در صورت امکان توسط الیاف فولادی<sup>۲</sup> جایگزین

می‌شود.

#### ۵-۸-۱-۳- قاب مشبک فولادی

قاب مشبک برای نگهداری تونل بعد از اواخر سال ۱۹۷۰ استفاده شده است. در دهه‌های اخیر

قوس‌های فولادی تقویت شده<sup>۳</sup> سنگین به سمت قوس‌های فولادی سبک حرکت کرد، قوس‌های

فولادی و لتیس گیردرها اساساً عملکرد مشابهی دارند؛ که می‌توان آن‌ها را به عنوان یک عامل اصلی

پوشش نگهداری موقت یا بخشی از پوشش دائم استفاده کرد.

برای مثال لتیس گیردر به عنوان بخشی از پوشش دائم در سیستم حمل‌ونقل زیرزمینی در

<sup>1</sup> Ductility

<sup>2</sup> Steel Fiber

<sup>3</sup> Rolled Steel Arches

بایرن مونیخ در آلمان با موفقیت بزرگ استفاده شد (Baumann Th. & Betzle M. 1984).

مزیت‌های اصلی قاب‌های مشبک (Komselis et al, 2005):

- نصب و راه‌اندازی ساده و سریع

- نگهداری موقت برای شاتکریت تا زمانی که از مقاومت کافی برای نگهداری خود بهره‌مند

می‌شود

- نگهداری فوری در سطح سینه کار در سراسر طول بخش حفاری شده پیشرو (شکل ۵-۱۹).



شکل ۵-۱۹- حفاری تونل با لتیس گیردر (Baumann Th. & Betzle M. 1984)

- ظرفیت گشتاور بالا

- قابلیت تطبیق‌پذیری لتیس گیردر، توانایی بسیار مفیدی از نصب و نگهداری موقت توالی

حفاری پیچیده<sup>۱</sup> را فراهم می‌کند.

- اتصال گیردارهایی دقیق برای ایستگاه‌های ابزار دقیق<sup>۲</sup> همگرایی تونل

- پایه‌ای ثابت برای میخ چوبی<sup>۳</sup> پیش از پیشرفت سینه کار تونل

<sup>1</sup> Complex Excavation Sequences

<sup>2</sup> Monitoring

<sup>3</sup> Spiling

- الگویی دقیق برای برش عمودی<sup>۱</sup> حفاری تونل

- راهنمایی دقیق برای به کار بردن ضخامت شاتکریت

معایب اصلی عبارت‌اند از:

- نیاز دارد تا به موقع در محل ساخته شود (۱-۲ هفته در ایسلند).

- اغلب منجر به افزایش استفاده از شاتکریت می‌شود

انواع لتیس گیردرها:

دو نوع سه میله<sup>۲</sup> و چهار میله<sup>۳</sup> معمولاً استفاده می‌شوند که در شکل (۵-۲۰) قابل مشاهده است. لتیس سه میله مقطع مثلثی با میله افقی بزرگ‌تر (۲۵ تا ۴۰ mm) در رأس و دو میله با قطر کوچک‌تر در گوشه پایه دارد. میله‌های سینوسی<sup>۴</sup> (۱۰-۱۲ mm) از رأس و میله اصلی جدا می‌شود. لتیس چهار میله دارای چهار میله با اندازه‌های مشابه (۲۰ تا ۴۰ mm) که میله سینوسی و میله عرضی (۱۶ mm) از میله‌های اصلی جدا می‌شوند (Komselis et al, 2005).



شکل ۵-۲۰- قاب مشبک سه میله و چهار میله (Jorimann, 2010)

روش نصب و راه‌اندازی:

<sup>1</sup> Profiling  
<sup>2</sup> Three-Chord  
<sup>3</sup> Four-Chord  
<sup>4</sup> Sinusoidal Bars

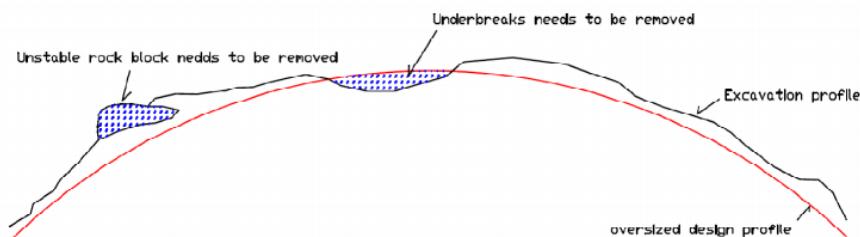
روش نصب و راه‌اندازی لتیس گیردرها به شدت به شرایط زمین‌شناسی و نحوه استقرار آنها مربوط می‌شود. لتیس گیردرها را می‌توان به‌عنوان یک نگهداری موقت سنگ و خاک برای ایمن‌سازی محیط کار امن‌تر برای کارگران در جبهه کار استفاده کرد یا به‌عنوان بخشی از پوشش نگهداری دائم سنگ در نظر گرفت.

روش نصب در هشت مرحله است و هر مرحله شرح داده خواهد شد:

مرحله ۱:

لق‌گیری<sup>۱</sup> مناسب از بلوک‌های سنگ سست که همیشه اولین قدم در هر مرحله از نصب نگهداری سنگ است؛ که خطر سقوط شاتکریت را به حداقل می‌رساند و باعث محیط کاری امن‌تر در سینه کار تونل می‌شود. چون تونل در خاک است، از این مرحله صرف نظر می‌شود.

لق‌گیری تحت شکست‌ها در برش عمودی همانطور که در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است نیز باید در این مرحله قبل از شاتکریت کردن رخ دهد.



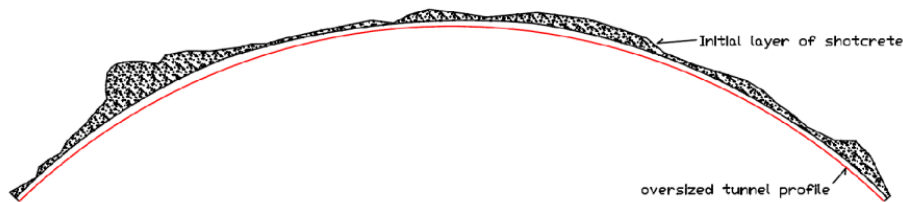
شکل ۵-۲۱-لق‌گیری بلوک سنگ‌های شل و شکسته شده (Hjálmarsson, E, H, 2011)

مرحله ۲

پس از لق‌گیری دیواره‌های تونل و سقف باید با نصب شاتکریت محکم و حفظ شود. نصب لایه اولیه شاتکریت در سنگ رسوبی می‌تواند بسیار زمان‌بر و موادی پرمصرف در سنگ ضعیف باشد شکل

<sup>1</sup> Scaling

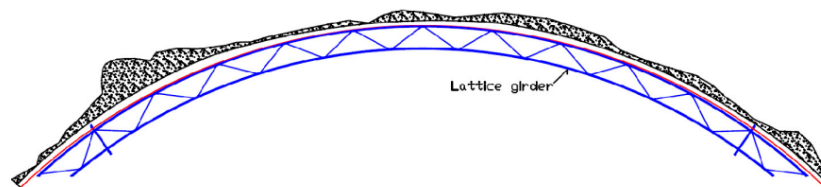
(۵-۲۲). گاهی اوقات وزن شاتکریت باعث ایجاد تنش برشی بیش از حد در سنگ می شود و باعث می شود هم شاتکریت و هم سنگ فروبریزد یا سقوط کند.



شکل ۵-۲۲- لایه اول شاتکریت (Hjálmarsson, E, H, 2011)

### مرحله ۳

در این مرحله لتیس گیردرها اولین عضو ساختاری هستند که بعد از شاتکریت که عضو ساختاری محسوب نمی شود نصب می شوند شکل (۵-۲۳). لتیس گیردرها در کف تونل نصب شده و توسط یک حفر کننده و یا توسط دستگاه مته<sup>۱</sup> بالا می روند. برای اطمینان از اینکه تیرها در موقعیتی درست هستند باید توسط یک سیستم هدایت لیزری<sup>۲</sup> و یا یک نقشه بردار بررسی شوند.



شکل ۵-۲۳- نصب لتیس گیردر (Hjálmarsson, E, H, 2011)

### مرحله ۴

وایر مش معمولاً پشت لتیس گیردر نصب شده است. این هم به مقاومت کششی شاتکریت بین تیرها می افزاید و همچنین به دستگاه های تحمل کننده اصلی انتقال بار کمک می کند که در این حالت میله تقویت کننده سازه های بتنی تیر توسط لتیس گیردر و شاتکریت ساخته می شود. میله های

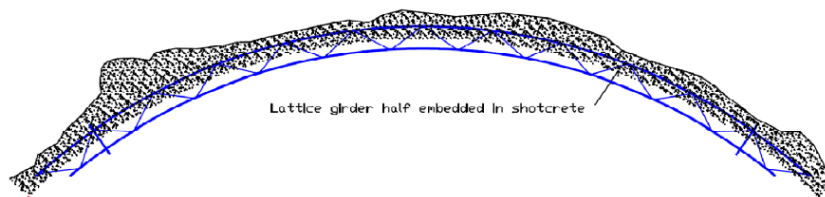
<sup>1</sup> Drill Rig

<sup>2</sup> Laser Guidance

همپوشان شده نقاط اتصال تیر باید برای متحد کردن گشتاور و ظرفیت برشی<sup>۱</sup> تیر نصب شوند.

#### مرحله ۵

در این لحظه شاتکریت برای پوشش وایر مش و لتیس گیردر استفاده می‌شود. در این مرحله تنها نصف تیر برای جلوگیری از اضافه بار تیر در شاتکریت تعبیه شده است که با شل شدن شاتکریت قادر به نگهداری از خود نیست. در شکل (۵-۲۴) نیمی از لتیس گیردر در شاتکریت تعبیه شده است.



شکل ۵-۲۴- نیمی از لتیس گیردر در شاتکریت تعبیه شده (Hjálmarsson, E, H, 2011)

#### مرحله ۶

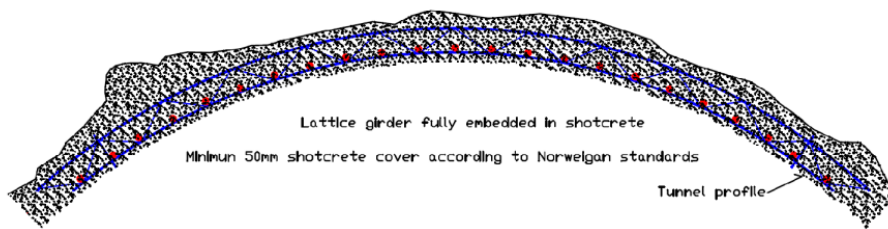
در این لحظه مرحله بعدی تونل حفاری می‌شود.

#### مرحله ۷

مرحله ۱ تا ۵ فوق تکرار می‌شود به منظور نصب لتیس گیردر قبل از تیر نصب شده به یکی از میله‌های جانبی<sup>۲</sup> جدید متصل شده و با شاتکریت پوشیده می‌شود. پوشش نگهداری پیوسته با اتصال تمام تیرها به میله‌های جانبی به دست می‌آید. شکل (۵-۲۵) قاب مشبک کاملاً تقویت شده با شاتکریت را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Shear Capacity

<sup>2</sup> Side Bars



شکل ۵-۲۵- قاب مشبک کاملاً تقویت شده با شاتکریت (Hjálmarsson, E, H, 2011)

#### مرحله ۸

نصب لتیس گیردهای قبلی در حال حاضر به پایان رسید و مرحله ۶ تا ۸ هم اکنون می تواند برای لتیس گیردر فعلی تکرار شود.

در دیگر شرایط زمین شناسی روش کار می تواند کمی متفاوت باشد و همیشه باید با شرایط محلی سازگار شود. این روش کار با موفقیت در ساخت تونل Óshlíð مورد استفاده قرار گرفت (Hjálmarsson, E, H, 2011).

علاوه بر کاربردهای تونل زنی ساده، تطبیق پذیری سیستم پوشش لتیس گیردر / شاتکریت اجازه می دهد تا دهانه های زیرزمینی پیچیده حتی در زمین نرم ایجاد شود. لتیس گیردها و شاتکریت در طاق تونل نصب می شوند. پس از آن که پله حفر شد پاهای (ساق های) لتیس گیردر<sup>۱</sup> و شاتکریت نصب می شود و لتیس گیردر به سطح کف ادامه می یابد (Komselis C, 2005).

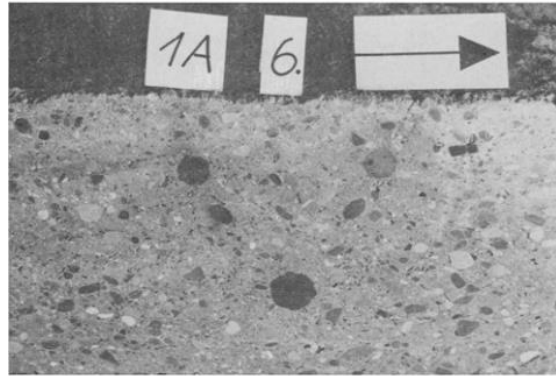
در مقابل حفاری کامل سینه کار، حفاری جزئی قاب مشبک را می توان یا به قسمت سقف تونل محدود کرد یا می توان آن ها را به منطقه ای از کف گسترش داد (Baumann Th. 1984).

شکل (۵-۲۶) ویژگی های سطح مقطع لتیس گیردر با قرار دادن صفحه عمودی شاتکریت شده را نشان می دهد (منطقه خط ارتجاعی<sup>۲</sup>).

<sup>1</sup> Lattice Girder Legs

<sup>2</sup> Springline Area





شکل ۵-۲۶- سطح مقطع لیس گیردر با صفحه عمودی شاتکریت (Baumann Th. & Betzle M. 1984)





## فصل ششم

کنترل جابجایی تونل‌های حفرشده به روش (NATM)

---



## ۶-۱- مقدمه

در بسیاری از کشورها، تونل‌ها در خاک و سنگ با استفاده از روش تونل‌زنی جدید اتریشی<sup>۱</sup> (NATM) ساخته می‌شوند. با وجود برخی انتقادات اخیر (Kovari, K., 1994) روش موجود یک سری مزیت‌هایی دارد که احتمالاً در آینده برای یک مدت طولانی استفاده می‌شود. مزیت (NATM) بیشتر به انعطاف‌پذیری آن برای وفق دادن با شرایط مختلف خاک و سادگی تجهیزات مورد استفاده برای تونل‌زنی نسبت داده می‌شود. روش تونل‌زنی جدید اتریشی (NATM) روشی صلب نیست، بلکه یک فلسفه طراحی بر اساس سه اصل اصلی است.

اصل اول این است که توده خاک یا سنگ باید به‌عنوان یک بخش فعال ساختار تونل، قادر به حفظ بخشی از بار ناشی از حفاری در نظر گرفته شود.

اصل دوم (NATM) مربوط به پوشش تونل است؛ که باید با روشی بهینه نصب شود؛ مانند وقتی که ظرفیت توده نگهداری کامل و تغییر شکل به‌شدت کنترل می‌شود. پوشش تونل باید به‌عنوان یک پوشش دیواره نازک عمل کند و با انعطاف‌پذیری کافی، اجازه یک درجه مطلوب از تغییر شکل توده خاک را فراهم کند و درعین حال به‌اندازه کافی برای جذب تنش برشی و ممان خمشی قوی باشد. پوشش شاتکریت برای اتصالات در این شرایط خیلی رایج است. همچنین باید تأکید کرد که پوشش تونل تنها زمانی که قوس نگهداری بسته است کاملاً فعال می‌شود.

اصل سوم (NATM) مربوط به ابزار دقیق<sup>۲</sup> است. طراحی اولیه بر اساس تجربیات محلی است، اما روش حفاری ممکن است در طول ساخت، با توجه به داده‌های اندازه‌گیری تغییر کند. به این روش مشاهده‌ای گفته می‌شود (Farias, M. M., 2004).

بنابراین، مهارت اصلی برای کنترل جابجایی در (NATM) عبارت‌اند از: بهبود بخشیدن شرایط

<sup>1</sup> New Austrian Tunnelling Method

<sup>2</sup> Instrumentation

خاک، اتخاذ حفاری جزئی (مرحله‌ای) جبهه کار، کنترل فاصله دهانه طولی نگهداری نشده و بسته شدن پوشش کف<sup>۱</sup> می‌باشد. استفاده از این تکنیک بر اساس دانش تجربی و تجربیات محلی و با توجه به مشاهدات تنظیم شده است. استفاده از تحلیل‌های عددی با روش‌هایی مانند روش تفاضل محدود (FDM)<sup>۲</sup>، می‌تواند از ارزش‌های بزرگ این نوع از طراحی باشد. کار تحلیل عددی به‌عنوان یک نوع از آزمون مدل که در آن بسیاری از متغیرهای طراحی را می‌توان در مطالعات پارامتریک بررسی کرد، مناسب است.

## ۶-۲- تحلیل‌های مقدماتی و اولیه<sup>۳</sup>

مقطع عرضی<sup>۴</sup> داده شده همان‌طور که در شکل (۶-۱) دیده می‌شود، به مناطق کوچک‌تر تقسیم شده است. پوشش نگهداری به پوشش طاق و یا سقف (CR)، پوشش گالری‌ها یا دیواره‌های کناری (CLD) و (CRD) پوشش کف (CI) تقسیم شده است. منطقه خاک به سقف (SR)، پله چپ (SLB) و راست (SRB)، دیواره یا گالری‌های چپ (SLD) و راست (SRD) و کف (SI) تقسیم شده است. تونل در امتداد جهت طولی به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم خواهد شد. به‌منظور نشان دادن حفاری سه‌بعدی<sup>۵</sup>، همه مناطق مقطع عرضی به‌صورت شماتیک در قرارداد نشان داده شده در شکل (۶-۱ ب) به تصویر کشیده شد. برای تحلیل‌های موجود هر بخش طولی ۴/۵ متر طول دارد، چه مربوط به ۱/۴ قطر (D۰.۲۵) تونل باشد و چه از یک یا چند بلوک طولی گرفته شود.

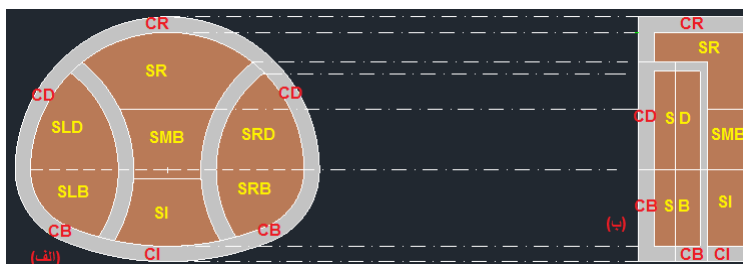
<sup>1</sup> Invert

<sup>2</sup> Finite-Difference Method

<sup>3</sup> Preliminary Analyses

<sup>4</sup> Cross-Section

<sup>5</sup> 3-D Excavation



شکل ۶-۱- (الف) ارتباط بین زون‌ها در مقطع عرضی و (ب) بخش طولی (معادل سازی شده از Farias, M. M, 2004)

روند ساخت تونل زنی در چند مرحله متوالی مدل‌سازی شده است. هر مرحله ساخت شامل حفاری خاک و / یا ساخت پوشش نگهداری، همراه با یک یا چند بخش طولی می‌باشد.

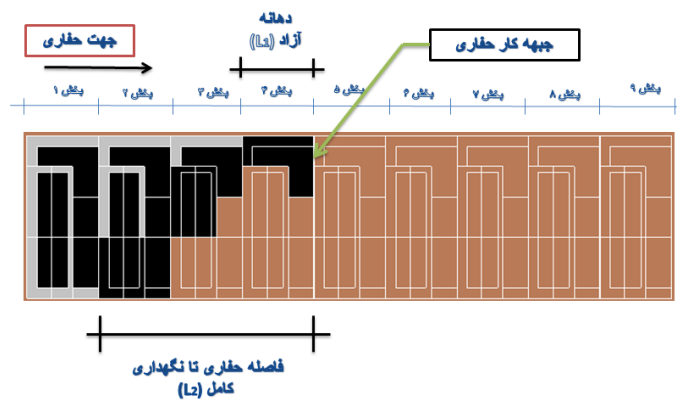
در بخش طولی معین‌شده، حفاری خاک به صورت تمام مقطع<sup>۱</sup> مدل‌سازی شده است، هنگامی که همه عناصر در یک مرحله مدل‌سازی غیرفعال می‌شود؛ و یا حفاری جزئی جبهه کار در چند مرحله متوالی غیرفعال می‌شود. به طور مشابه، ساخت نگهداری در یک بخش کامل یا جزئی می‌باشد. فاصله آزاد بین جبهه کار حفاری و نگهداری طاق به عنوان دهانه آزاد<sup>۲</sup> ( $L_1$ ) نامیده می‌شود. نگهداری تنها زمانی که تمام قوس پوشش ساخته شد، کاملاً فعال می‌شود. فاصله بین جبهه کار حفاری و اولین بخش سراسر پوشش شده به عنوان فاصله نگهداری کامل<sup>۳</sup> ( $L_2$ ) نامیده می‌شود. هر وقت جبهه کار حفاری حرکت می‌کند یک بخش روبه جلو به عنوان پیشروی تونل<sup>۴</sup> نامیده می‌شود (Farias, M. M, 2004).

ارزیابی حفاری در جهت طولی با مجموعه‌ای از بخش‌های شماتیک در شکل (۶-۲ تا ۶-۴) نشان داده شده است. منطقه قهوه‌ای به معنی منطقه دست‌نخورده، در حالی که منطقه سیاه به معنی منطقه حفاری می‌باشد. برای پوشش تونل منطقه خاکستری به معنی یک منطقه نگهداری شده، در حالی که سیاه به معنی نگهداری نشده می‌باشد. مرحله ساخت (که در شکل (۶-۲ تا ۶-۴) به تصویر

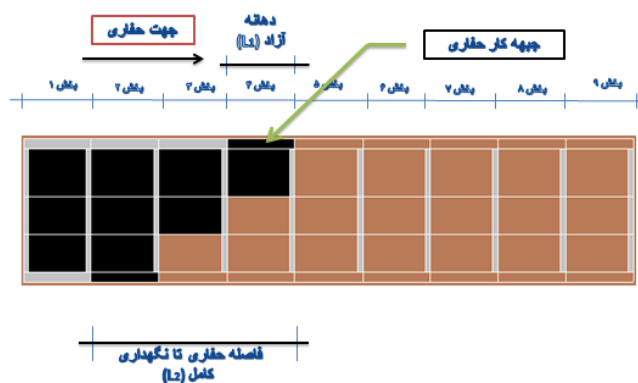
<sup>1</sup> Full-Face  
<sup>2</sup> Free Span  
<sup>3</sup> Full Support Distance  
<sup>4</sup> Tunnel Advance



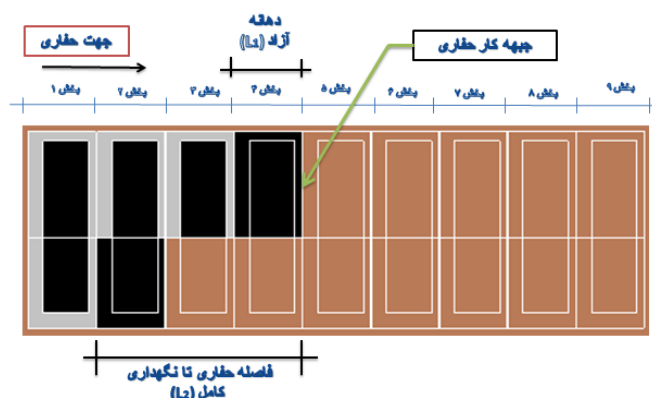
کشیده شده است)، به این ترتیب است، که جبهه کار حفاری پنجمین بخش در آغاز بخش ۵ دست‌نخورده است. در بخش ۴، طاق خاک، حفاری شده، اما هنوز نگهداری نشده است. در بخش ۳، پله و دیواره‌ها حفاری شده و طاق پوشش (نگهداری) می‌شود. کف در بخش ۲ حفاری شده و نگهداری کامل تنها زمانی که کف در بخش ۱ نگهداری شود، فعال می‌شود. در این حالت دهانه آزاد متناظر با  $1/4 (D \cdot 0.25)$  طولی است. در حالی که فعال‌سازی نگهداری کامل در سه بخش  $(D \cdot 0.75)$  پشت جبهه کار حفاری به دست می‌آید. حفاری ممکن است در یک بخش بدون پیشروی تونل تقسیم‌بندی شود. در این حالت بیش از یک مجموعه از مقاطع شماتیک طولی برای نشان دادن روند کامل سه‌بعدی لازم خواهد بود.



شکل ۶-۲- نمایش بخش طولی برای کل تونل (معادل سازی شده از Farias, M. M, 2004)



شکل ۶-۳- نمایش بخش طولی برای گالری وسط (معادل سازی شده از Farias, M. M, 2004)



شکل ۶-۴- نمایش بخش طولی برای گالری‌های کناری (معادل سازی شده از (Farias, M. M, 2004)

تحلیل‌های عددی با استفاده از روش تفاضل محدود در این پایان‌نامه برای مدل‌سازی مراحل کامل سه‌بعدی که مشخصه حفاری تونل (NATM) است، مورداستفاده قرار می‌گیرد. برخی از روش‌های مربوطه برای کنترل جابجایی‌ها قراردادی و نسبتاً مهم هستند که حالتی از نتایج عددی است. این روش‌ها شامل اثر سه‌بعدی حفاری، اهمیت نصب نگهداری (استفاده از روش مقطع معادل<sup>۱</sup>، فاصله نگهداری نشده بین جبهه کار حفاری و نصب پوشش نگهداری، بسته شدن قوس کف، فعال‌سازی کامل نگهداری و ... است.)، اهمیت حفاری جزئی جبهه کار، تعیین طول بهینه گام حفاری<sup>۲</sup>، تعیین فاصله بهینه بین جبهه کارهای مختلف حفاری و اثر متقابل<sup>۳</sup> دو تونل بر هم می‌باشد. مجموعه‌ای از مدل‌سازی‌های سه‌بعدی با استفاده از روش تفاضل محدود به منظور بررسی اثر جنبه‌های بالا انجام شد.

### ۶-۳- اثر سه‌بعدی حفاری قبل از نصب سیستم نگهداری

با توجه به موارد ذکر شده در فصل قبل و جداول و نمودارهای موجود و همچنین ابعاد مقطع و مشخصات خاک دربرگیرنده تونل، روش حفاری استفاده‌شده در این پروژه، روش گالری‌های کناری انتخاب شد.

<sup>1</sup> Equivalent Section  
<sup>2</sup> Round Length  
<sup>3</sup> Interactions

بنابراین، برای رسیدن به انتهای تونل در این تحلیل، لازم است ابتدا گالری سمت چپ سپس گالری سمت راست و در مرحله آخر گالری وسط را برای سه روباره بدون نگهداری حفاری کنیم شکل (۵-۶) و شکل (۶-۶). بدون ساخت نگهداری تا جایی که خاک به اندازه کافی مقاومت خود نگهداری داشته باشد، این مورد مدل‌سازی شده است. تأثیر نگهداری به‌طور جداگانه در مورد بعدی بررسی شده است. ارزیابی جابجایی‌ها برای حفاری جزئی (گالری‌های کناری) و حفاری تمام مقطع بدون نگهداری در جدول (۶-۱ تا ۶-۹) نمایش داده شده است که با جابجایی مجاز به دست‌آمده از روابط ساکورایی در جداول (۶-۱۲) و (۶-۱۳) مقایسه می‌شود. از مقایسه جابجایی‌های حفاری جزئی (حفاری گالری چپ و راست) و حفاری تمام مقطع با روابط ساکورایی نتایج جداول (۶-۱۰) و (۶-۱۱) به دست می‌آید. با توجه به این جداول طول دهانه نگهداری نشده (L<sub>U</sub>) پایدار<sup>۱</sup> (طول دهانه‌ای بدون اضافه حفاری<sup>۲</sup>)، ماکسیمم<sup>۳</sup> (حداکثر طول همراه با اضافه حفاری قبل از ریزش) و ریزشی<sup>۴</sup> (طول دهانه‌ای که منجر به ریزش می‌شود) به دست می‌آید. این جداول برای حفاری گالری چپ نشان داد که در هر سه روباره پایدار است و به جابجایی مجاز به دست‌آمده از روابط ساکورایی (تراز هشدار خطر  $\Pi$ ) نمی‌رسد. همچنین برای حفاری ۴۰ متر از این گالری با روباره‌های ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب مقادیر جابجایی کل ۵/۱۶۱۱، ۴/۲۶۰۹ و ۴/۶۵۲۵ سانتی‌متر به دست‌آمده است که روباره ۱۳ متر بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.

برای حفاری گالری راست کوچک‌ترین طول دهانه ریزشی برای روباره ۴ متر و بزرگ‌ترین طول دهانه ریزشی برای روباره ۸ متر می‌باشد؛ و با مقایسه دو روباره ۸ و ۱۳ متر، روباره ۱۳ متر زودتر از روباره ۸ متر می‌ریزد.

برای حفاری تمام مقطع کوچک‌ترین طول دهانه ریزشی برای روباره ۴ متر است و طول دهانه

<sup>1</sup> Unsupported Span Length Stable

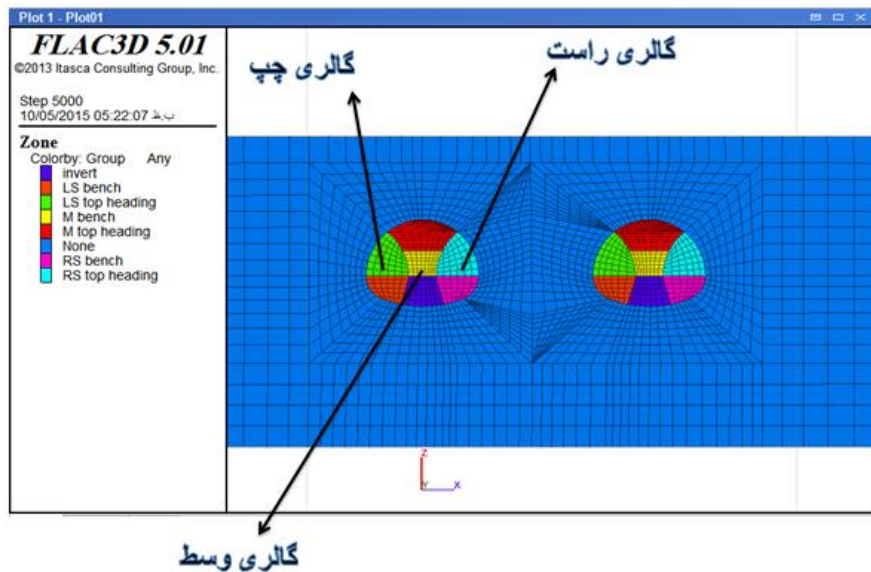
<sup>2</sup> Overbreak

<sup>3</sup> Unsupported Span Length Max

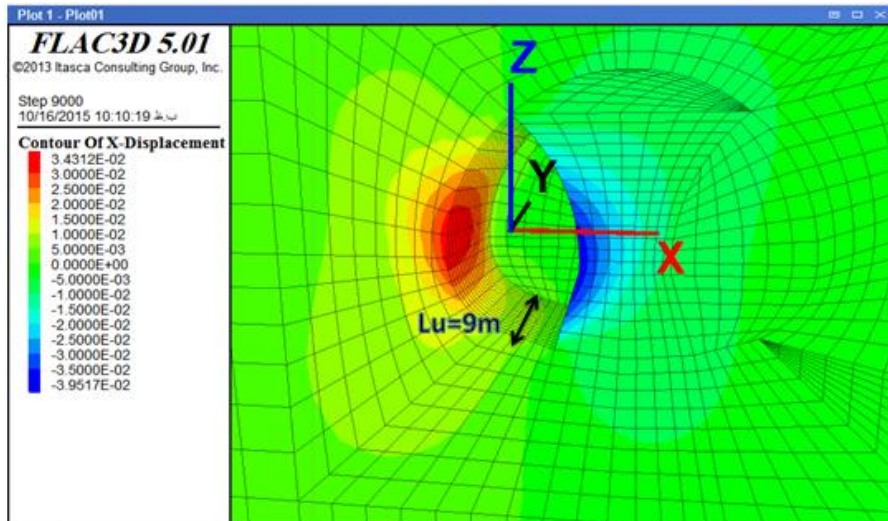
<sup>4</sup> Unsupported Span Length Collapse

ریزشی برای دو روباره دیگر برابر است. در نتیجه با مقایسه روباره ۴ و ۱۳ متر، روباره ۴ متر زودتر از روباره ۱۳ متر می‌ریزد.

نتایج جدول‌ها نشان داد که با افزایش سربار طول دهانه پایدار نیز افزایش می‌یابد. به علاوه طول دهانه ریزشی در روباره کم سریع‌تر رخ می‌دهد، با توجه به اینکه فشار محصورکننده کم است. با مقایسه روباره ۸ و ۱۳ متر برای حفاری گالری راست، با افزایش سربار طول دهانه پایدار کم می‌شود. به علاوه طول دهانه ریزشی در روباره زیاد سریع‌تر رخ می‌دهد.



شکل ۵-۶- تعریف گالری‌های تونل در مدلسازی



شکل ۶-۶- جابجایی در راستای X در مرحله اول حفاری و تعریف  $L_U$  در مدلسازی

جدول ۶-۱- نتایج حفر گالری سمت چپ از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۱۳ متر

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای $^cZ$ (cm)	جابجایی در راستای $^bY$ (cm)	جابجایی در راستای $^aX$ (cm)	حداکثر جابجایی $L_U$ (m)
۲/۲۶۶۶	۳/۴۲۹۷	۳/۱۰۸۳	۲/۶۵۷۱	۴/۵
۲/۴۱۹۸	۴/۳۵۹۲	۳/۲۴۵۱	۳/۹۵۱۷	۹
۲/۴۴۸۹	۴/۷۵۸۵	۳/۲۶۴۱	۴/۵۰۷۸	۱۳/۵
۲/۴۶۸۷	۴/۹۲۶۱	۳/۲۷۱۵	۴/۷۶۴۳	۱۸
۲/۴۹۴	۵/۰۱۲۸	۳/۲۵۳۸	۴/۸۹۲۳	۲۲/۵
۲/۴۹۸	۵/۰۴۰۴	۳/۲۵۲۵	۴/۹۶۶۲	۲۷
۲/۴۹۵	۵/۰۴۴۸	۳/۲۶۴۹	۵/۰۱۵۳	۳۱/۵
۲/۶۶۰۷	۵/۰۳۹۴	۳/۶۰۸۸	۵/۰۵۸	۳۶
۲/۴۸۱۷	۵/۰۲۹۷		۵/۱۰۹۹	۴۰

جابجایی در سقف گالری،  $^cZ$  جابجایی در جبهه کار گالری،  $^bY$  جابجایی در دیواره های گالری،  $^aX$

جدول ۶-۲- نتایج حفر گالری سمت چپ از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۸ متر

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی $L_U$ (m)
۱/۸۲۲۹	۲/۹۳۲۲	۲/۳۵۲۹	۲/۰۸۹۲	۴/۵
۱/۹۵۰۶	۳/۶۹۴۱	۲/۴۱۷۵	۲/۸۵۳۴	۹
۱/۹۷۷۹	۴/۰۱۰۵	۲/۴۳۰۵	۳/۲۴۵۳	۱۳/۵
۲/۰۳۴۷	۴/۱۵۲۲	۲/۴۳۳۵	۳/۴۱۹۷	۱۸
۲/۰۵۹۴	۴/۲۱۲۷	۲/۴۲۴۶	۳/۵۰۵۲	۲۲/۵
۲/۰۷۰۹	۴/۲۳۳۷	۲/۴۰۹۴	۳/۵۵۷۲	۲۷
۲/۰۷۴۲	۴/۲۳۶۸	۲/۴۰۳۴	۳/۵۹۶۵	۳۱/۵
۲/۰۷۴۴	۴/۲۳۱	۲/۶۰۶۵	۳/۶۲۹۶	۳۶
۲/۰۷۵۶	۴/۲۲۵۱		۳/۶۷۶	۴۰

جدول ۶-۳- نتایج حفر گالری سمت چپ از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۴ متر

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی $L_U$ (m)
۲/۱۴۸۹	۲/۸۹۴۷	۲/۶۸۳۶	۲/۳۸۲۵	۴/۵
۲/۲۹۵۱	۳/۶۹۱۷	۲/۸۴۷۲	۳/۲۷۹	۹
۲/۳۲۵۵	۴/۰۲۹۱	۲/۸۷۹۵	۳/۶۷۵۸	۱۳/۵
۳/۳۶۲۹	۴/۱۸۱۵	۲/۸۸۷۹	۳/۹۰۶۴	۱۸
۴/۸۷۶	۴/۲۴۷۴	۲/۸۷۶۸	۴/۰۶۴۷	۲۲/۵
۵/۶۷۸	۴/۲۷۲۴	۲/۸۶۰۴	۴/۱۶۷۳	۲۷
۶/۲۸۴۲	۴/۲۷۳۴	۲/۸۶۹۱	۴/۲۴۱۵	۳۱/۵
۶/۴۸۰۲	۴/۲۶۵۸	۳/۱۵۷۳	۴/۳۱۴۸	۳۶
۷/۳۲۸۴	۴/۲۵۶۱		۴/۴۵۵۷	۴۰

جدول ۴-۶- نتایج حفر گالری سمت راست از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۱۳ متر

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی L <sub>U</sub> (m)
۲/۸۱۱۶	۴/۲۷۴۴	۴/۳۰۱۴	۲/۹۹۸۴	۴/۵
۴/۶۰۵۶	۵/۴۹۰۵	۴/۵۴۰۴	۴/۴۶۸۲	۹
۵/۴۰۶۹	۶/۴۲۱۴	۴/۶۲۳۷	۵/۴۴۹۱	۱۳/۵
۵/۷۵۳۲	۷/۲۵۲	۴/۶۴۱۲	۵/۸۶۵۴	۱۵
۶/۳۹۱۸	۸/۸۲۹۵	۴/۶۷۹۸	۶/۶۸۴۹	۱۶/۵
۶/۷۷۷۶	۹/۷۹۴۹	۴/۷۰۵۹	۷/۲۲۱۴	۱۷
۸/۲۲۹۳	۱۲/۷۵۳	۴/۷۴۵۹	۸/۸۷۲۳	۱۸
۹/۲۲	۱۴/۴۶۵	۴/۷۶۶۴	۹/۸۲۹۱	۱۸/۵

جدول ۵-۶- نتایج حفر گالری سمت راست از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۸ متر

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی L <sub>U</sub> (m)
۲/۹۵۶۳	۳/۴۴۴	۲/۹۸۸۱	۲/۴۸۴۲	۴/۵
۳/۲۰۴۵	۳/۸۶۲۱	۳/۰۵۶۸	۲/۹۹۲۳	۶
۳/۳۷۶۶	۴/۰۷۷۴	۳/۰۸۵۷	۳/۲۶۷۹	۷
۳/۴۶۲۷	۴/۱۷۰۳	۳/۱۱۲۵	۳/۳۸۹۴	۷/۵
۳/۵۴۶۶	۴/۲۵۵۶	۳/۱۲۲۱	۳/۵۱۰۱	۸
۳/۷۲۳۷	۴/۴۰۳۸	۳/۱۵۰۸	۳/۷۱۱۲	۹
۴/۶۷۱۲	۵/۱۹۱۵	۳/۲۲۱۷	۴/۶۷۰۵	۱۳/۵
۵/۱۴۹۵	۶/۱۳۵۶	۳/۲۳۲۱	۵/۱۲۶۳	۱۵
۶/۶۷۰۷	۹/۲۷۵۹	۳/۲۸۰۲	۶/۷۴۰۲	۱۸
۷/۰۱۳۱	۱۰/۰۲۳	۳/۲۹۴۶	۷/۱۳۴۴	۱۸/۵

جدول ۶-۶- نتایج حفر گالری سمت راست از تونل چپ بدون نگهداری با روباره ۴ متر

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی L <sub>U</sub> (m)
۳/۰۳۱۲	۲/۷۴۵۹	۳/۰۶۹۳	۱/۹۴۷۸	۳
۳/۴۰۶	۳/۱۶۳۶	۳/۱۷۳۶	۲/۳۲۶	۳/۵
۳/۹۸۵۴	۴/۴۳۶۹	۳/۲۹	۲/۹۱۵۹	۴
۵/۱۴۳۴	۷/۰۲۸	۳/۴۳۶۷	۴/۱۵۰۳	۴/۵
۷/۸۳۴۳	۱۲/۰۱۵	۳/۴۶۸۹	۶/۵۱۴۴	۵
۳۵/۲۲۶	۶۷/۲۴۰	۶۸/۶۱۸	۳۷/۲۱۲	۱۸/۵

جدول ۶-۷- نتایج حفاری تمام مقطع بدون نگهداری با روباره ۱۳ متر

۴/۳۷۱۵	۶/۰۶۲۲	۷/۶۰۹	۲/۹۵۸۸	۴/۵	تمام مقطع
۴/۶۲۴۲	۹/۱۹۸۲	۸/۰۰۱۴	۴/۱۶۵	۸	
۴/۶۲۶۹	۱۰/۲۸۳	۸/۰۲۶۳	۴/۲۹۸۳	۸/۵	
۴/۶۵۳۹	۱۱/۸۴۸	۸/۰۵۷۶	۴/۴۲۴۷	۹	

جدول ۶-۸- نتایج حفاری تمام مقطع بدون نگهداری با روباره ۸ متر

۳/۲۷۰۵	۵/۱۵۸۸	۵/۷۰۸۲	۲/۰۸۴۳	۴/۵	تمام مقطع
۳/۴۳۷	۸/۸۰۳۴	۵/۹۵۵۷	۲/۹۲۲۵	۸	
۳/۴۶۷۲	۹/۹۴۲۸	۵/۹۸۵۶	۳/۰۲۳۵	۸/۵	
۳/۴۹۸۹	۱۱/۵۴۹	۶/۰۴۲۳	۳/۱۲۶۷	۹	

جدول ۶-۹- نتایج حفاری تمام مقطع بدون نگهداری با روباره ۴ متر

۴/۰۴۸۱	۴/۶۹۸۸	۶/۳۷۰۶	۱/۸۸۱	۳	تمام مقطع
۵/۵۹۵۱	۷/۰۵۸۳	۶/۵۶۱۴	۲/۱۱۰۴	۳/۵	
۱۴/۱۹۱	۱۷/۲۴	۶/۷۴۵۸	۲/۳۲۹	۴	
۳۱/۸۸	۴۹/۹۷۲	۶/۹۱۶	۲/۵۲۷۶	۴/۵	



جدول ۶-۱۰- مقایسه نتایج حفاری تمام مقطع با تراز هشدار خطر ۲

روباره	۱۳ متر	۸ متر	۴ متر
Stable $L_U$	۴/۵	۴/۵	۳
Max $L_U$	۸	۸	۳/۵
Collapse $L_U$	۸/۵	۸/۵	۴

جدول ۶-۱۱- مقایسه نتایج حفاری گالری راست با تراز هشدار خطر ۲

روباره	۱۳ متر	۸ متر	۴ متر
Stable $L_U$	۱۵	۱۵	۴
Max $L_U$	۱۶/۵	۱۸	۴/۵
Collapse $L_U$	۱۷	۱۸/۵	۵

جدول ۶-۱۲- جابجایی مجاز برای روباره‌های ۸ و ۱۳ متر

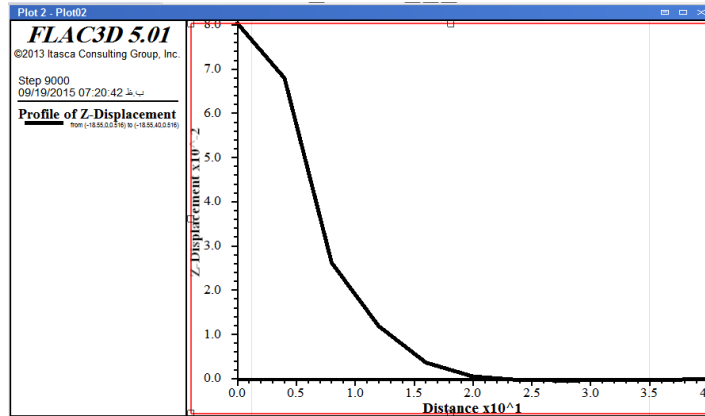
۰/۶۲۸۴	کرنش برشی مجاز	۴/۱۸۵	مشکل ناپایداری ندارد	جابجایی مجاز (cm)
۱/۴۷۲		۹/۸۱۹	مبنای طراحی	
۳/۴۵۳		۲۳/۰۲۲	پایداری کوتاه‌مدت	

جدول ۶-۱۳- جابجایی مجاز برای روباره ۴ متر

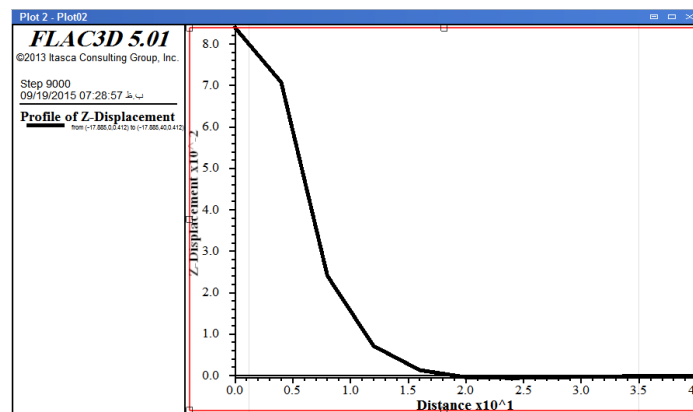
۰/۶۸۴	کرنش برشی مجاز	۴/۴۶	مشکل ناپایداری ندارد	جابجایی مجاز (cm)
۱/۶		۱۰/۴۴	مبنای طراحی	
۳/۷۵۳۶		۲۴/۴۸	پایداری کوتاه‌مدت	

ارزیابی جابجایی عمودی برای نقطه‌ای در سقف تونل در مرحله طول دهانه ریزشی برای سه

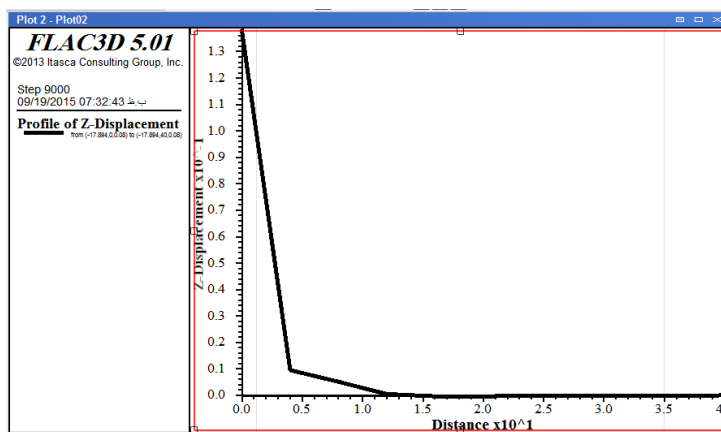
روباره در شکل‌های (۶-۷) تا (۶-۹) نشان داده شده است.



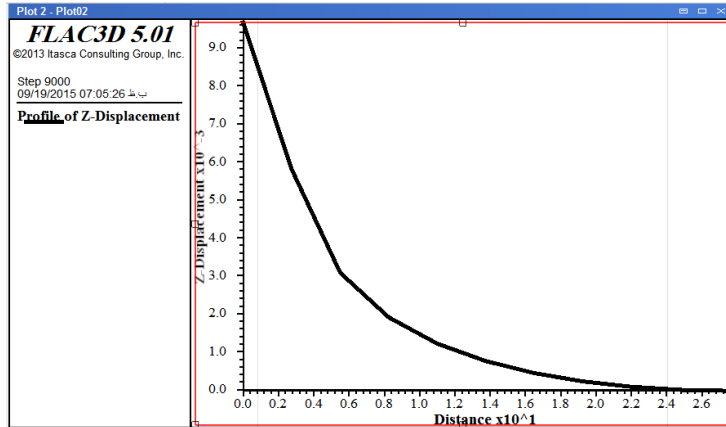
شکل ۶-۷- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در سقف تونل ( $L_U=8.5$ ) با روباره ۱۳ متر



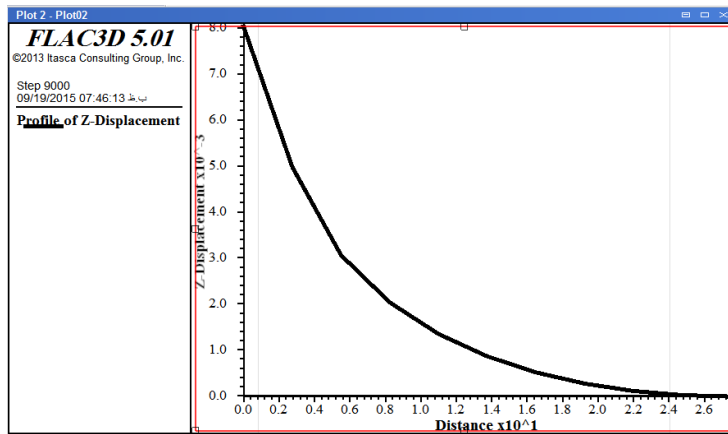
شکل ۶-۸- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در سقف تونل ( $L_U=8.5$ ) با روباره ۸ متر



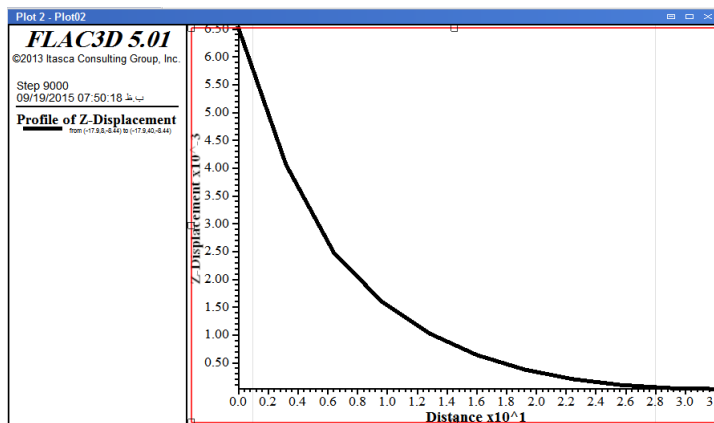
شکل ۶-۹- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در سقف تونل ( $L_U=4$ ) با روباره ۴ متر



شکل ۶-۱۰- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در وسط مش با روباره ۱۳ متر



شکل ۶-۱۱- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در وسط مش با روباره ۸ متر

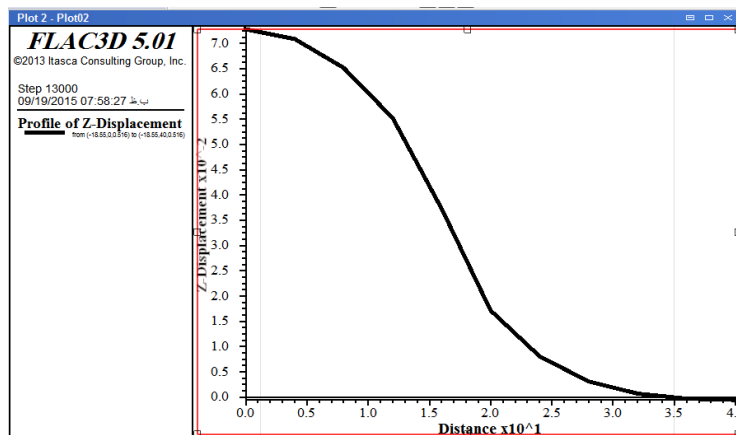


شکل ۶-۱۲- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در وسط مش با روباره ۴ متر

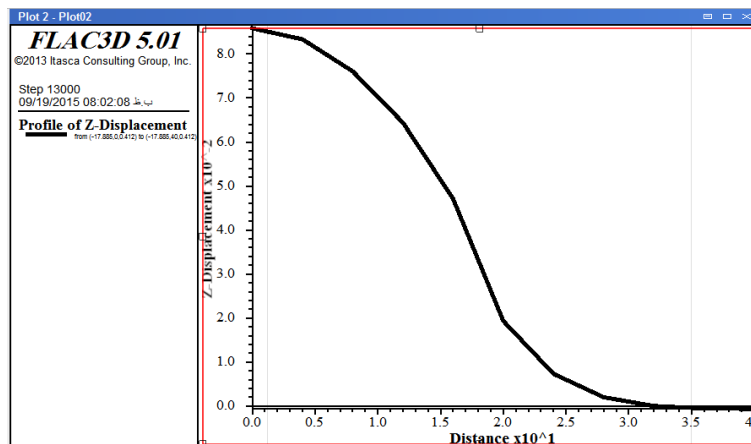
در حفاری تمام مقطع برای یک گره در سقف تونل، مقدار جابجایی عمودی برای روباره ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب ۸/۰۳۴، ۸/۳۹۶ و ۱۳/۷۸۱ سانتی متر است. اما برای نقطه‌ای در وسط جبهه کار

همانطور که در شکل‌های (۶-۱۰) تا (۶-۱۲) نشان داده شد برای روباره ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب ۰/۹۶۶، ۰/۸۰۳ و ۰/۶۵۲ سانتی‌متر به دست می‌آید.

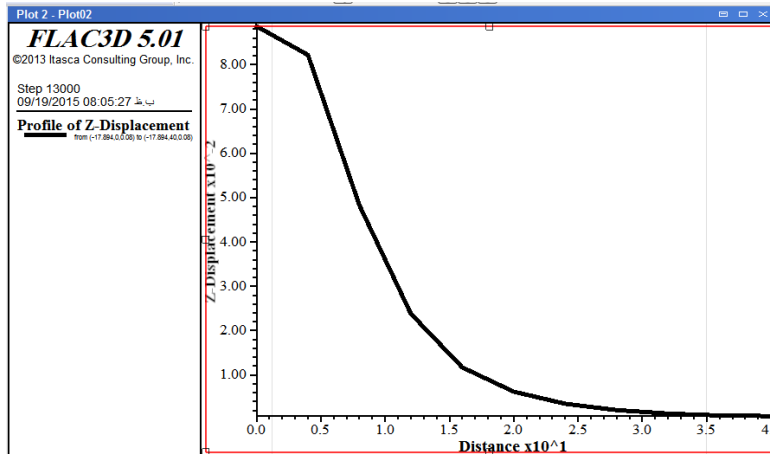
با توجه به شکل‌های (۶-۱۳) تا (۶-۱۵) در حفاری جزئی (گالری راست) برای یک گره در سقف تونل، مقدار جابجایی عمودی برای روباره ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب ۷/۴۱۲، ۸/۵۷۶ و ۸/۸۴۲ سانتی‌متر است.



شکل ۶-۱۳- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در حفاری گالری راست ( $L_U=17$ ) با روباره ۱۳ متر



شکل ۶-۱۴- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در حفاری گالری راست ( $L_U=18.5$ ) با روباره ۸ متر



شکل ۶-۱۵- جابجایی عمودی نسبت به فاصله از جبهه کار در حفاری گالری راست ( $L_U=5$ ) با روباره ۴ متر با توجه به نتایج و شکل‌های (۶-۷ تا ۶-۱۵) برای نقطه‌ای در سقف تونل حالت بحرانی برای روباره ۴ متر اما اگر نقطه را در وسط جبهه کار در نظر بگیریم حالت بحرانی برای روباره ۱۳ متر به دست می‌آید. حدود ۹۰ درصد از جابه‌جایی نهایی پس از گذشت ID از جبهه کار محاسبه شد. مقدار قابل توجهی از جابجایی نهایی قبل از رسیدن حفاری به بخش شاهد القاشده است.

این نشان می‌دهد که دهانه آزاد ( $L_U$ ) باید از یک مقدار مرجع تجاوز نکند؛ در غیر این صورت اثر آن بر ثابت شدن جابجایی‌ها حداقل خواهد بود. این مشاهدات اشاره به چگونگی فضای آماده‌سازی مقاطع عرضی در حفاری‌های (NATM) دارد و نشان می‌دهد که فاصله سه‌بعدی کافی است.

#### ۶-۴- تحلیل پایداری تا قبل از نصب سیستم نگهداری

پس از تعیین مقدار جابجایی تونل در جداول (۶-۱ تا ۶-۹) لازم است تا با توجه به نتایج به‌دست آمده، وضعیت پایداری تونل مورد بررسی قرار گیرد. میزان جابجایی در اطراف حفره زیرزمینی، پارامتر قابل استفاده در تخمین پایداری تونل می‌باشد. بر اساس مقدار جابجایی به‌دست آمده از اطراف حفره زیرزمینی، می‌توان به پایداری و عدم پایداری سازه زیرزمینی دست یافت. اگر میزان جابجایی در اطراف حفریات زیرزمینی کمتر یا مساوی مقدار بحرانی باشد، در این صورت می‌توان گفت که سازه پایدار خواهد بود. میزان جابجایی بحرانی را می‌توان با استفاده از قضاوت مهندسی و نوع استفاده‌ای که

از سازه زیرزمینی می‌شود، به دست آورد.

استفاده از روابط ساکورایی نیز برای تخمین میزان کرنش بحرانی مناسب است. این روش برای کنترل همگرایی تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساکورایی در سال ۱۹۹۷ رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و کرنش بحرانی برای مواد مختلف ارائه داد. در این حالت می‌توان میزان جابجایی‌ها را با استفاده از روش‌های عددی محاسبه و با جابجایی بحرانی به دست آمده توسط ساکورایی مقایسه نمود. در صورت تجاوز جابجایی از حد مجاز، سازه باید مورد تقویت و نگهداری قرار گیرد (قدیری ذ، ۱۳۸۹). در اینجا لازم است ابتدا مفهوم کرنش بحرانی بیان شود.

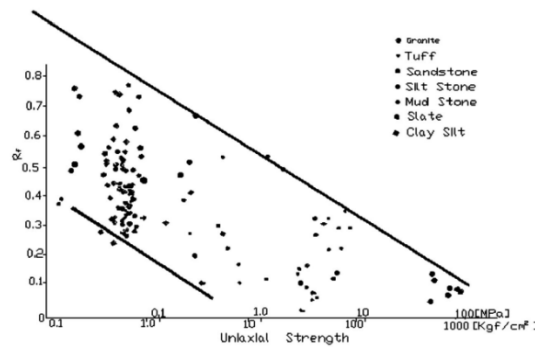
#### ۱-۴-۶- کرنش بحرانی

در ابتدا کرنش بحرانی بر اساس نسبت بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول تغییر شکل‌پذیری به صورت رابطه (۱-۶) تعریف شد (Sakurai S., 1983).

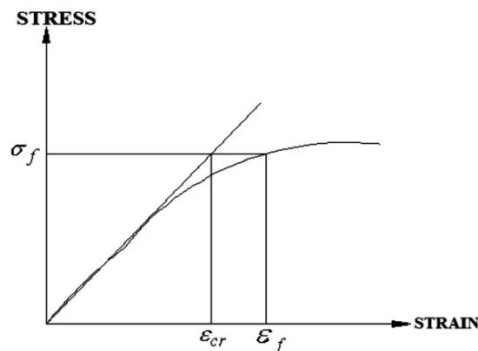
$$\epsilon_{critical} = \frac{\sigma_c}{E} \quad (1-6)$$

در روش کنترل (DSCT) ارائه شده در سال ۱۹۸۱ توسط ساکورایی، ابتدا کرنش بحرانی تعیین و سپس پارامتر  $R_f$  (پارامتر نشان‌دهنده مقاومت شکست که از شکل (۱۶-۶) مقدار آن به دست می‌آید) مشخص می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۲-۶) کرنش شکست تک‌محوری ( $\epsilon_f$ ) محاسبه می‌شود. با تعیین فاکتور ( $M$ ) که از روی آزمایش‌های سه محوره به دست می‌آید، کرنش شکست سه محوره قابل محاسبه است. نکته قابل ذکر آن است که ضریب ( $M$ ) به شکلی می‌نماید که اثر تنش محصورکننده را در افزایش کرنش شکننده بحرانی لحاظ می‌نماید (Sakurai S., 1990). در شکل (۶-۱۷) رابطه بین کرنش بحرانی و شکست نشان داده شده است.

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cr}}{1 - R_f} \quad (2-6)$$



شکل ۶-۱۶- نمودار تعیین  $R_f$  با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوره (sakurai., 1983)

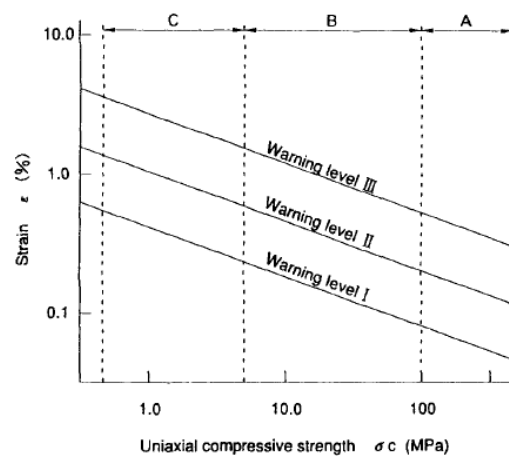


شکل ۶-۱۷- رابطه بین کرنش بحرانی ( $\varepsilon_{cr}$ ) و کرنش شکست ( $\varepsilon_f$ )

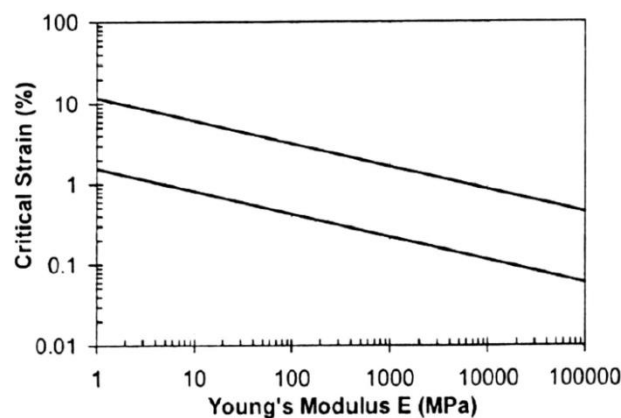
### ۶-۴-۲- تراز هشدار خطر (Sakurai S., 1997)

ساکورایی نموداری بر اساس کرنش بحرانی نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول تغییر شکل‌پذیری، که شامل سه تراز هشدار خطر و برای بررسی پایداری تونل‌ها است را پیشنهاد داد. این نمودارها در شکل (۶-۱۸) و (۶-۱۹) نشان داده شده است. بر اساس نمودار ارائه شده، ساکورایی معتقد است زمانی که کرنش‌های ایجاد شده در سازه به سمت تراز هشدار خطر I باشد، تونل هیچ‌گونه مشکلی از لحاظ پایداری ندارد و تونل زنی از هر لحاظ ایمن است. در صورتی تونل سازی با مشکل جدی مواجه می‌گردد که کرنش‌های ایجاد شده در سازه به سمت تراز هشدار III میل نماید (Sakurai S., 1997). در چنین شرایطی تونل سازی با مشکلات عدیده مواجه گردیده است که می‌توان آثار آن

را بر روی سیستم نگهداری استفاده‌شده در تونل‌ها مشاهده نمود.



شکل ۶-۱۸- تراز هشدار خطر برای ارزیابی پایداری تونل‌ها (sakurai S., 1997)



شکل ۶-۱۹- رابطه پیشنهادی ساکورایی بین کرنش بحرانی و مدول الاستیسیته (sakurai., 1990)

ساکورایی معتقد است که کرنش بحرانی تقریباً مستقل از درزه‌ها، محتوای آب و دما است

(Sigh B., 2006). ساکورایی و آدئوچی در سال ۱۹۹۸ بر اساس مطالعات تجربی انجام‌گرفته بر روی

تونل‌های مختلف ترازهای هشدار خطر را به‌صورت روابط (۳-۶) ارائه کردند (Hoek E., 2002).

$$\log \varepsilon c = -0.25 \log E - 0.85$$

$$\log \varepsilon c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (۳-۶)$$

$$\log \varepsilon c = -0.25 \log E - 1.59$$



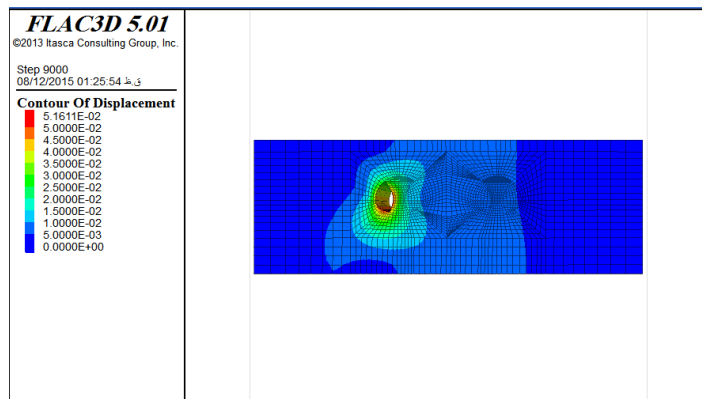
در روابط ارائه شده توسط ساکورایی و آدئوچی، E مدول تغییر شکل پذیری برحسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع ( $\text{kgf/cm}^2$ ) و کرنش بحرانی ( $\epsilon_c$ ) برحسب درصد می باشد. در تراز هشدار خطر I تونل مشکل ناپایداری ندارد. در تراز هشدار خطر III تونل پایداری کوتاه مدت نشان می دهد. تراز هشدار خطر II به عنوان مبنای طراحی نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است. هوک در سال ۱۹۹۹ مقدار کرنش بحرانی ۰.۲٪ را به عنوان مرز پایداری تونل‌هایی که نیاز به حداقل نگهداری دارند، ناپایداری تونل‌هایی که بایستی توجهی ویژه نسبت به طراحی نگهداری آن مبذول داشت، پیشنهاد نموده است (Pan X.D., 1988).

### ۳-۴-۶- بررسی پایداری تونل با استفاده از مفهوم کرنش بحرانی

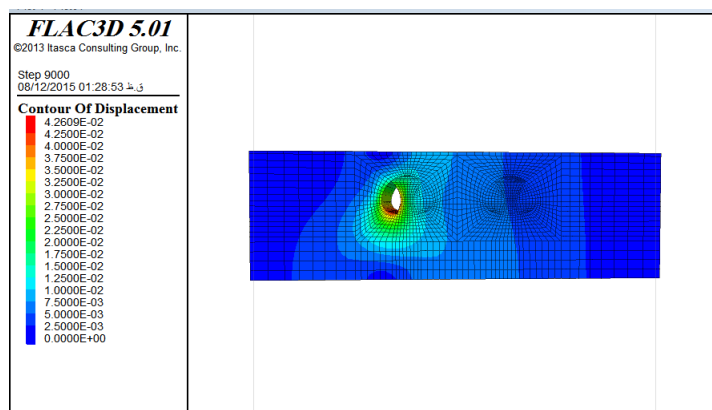
مقدار جابجایی بحرانی حاصل از ترخیص تنش در مقاطع مورد مطالعه تا قبل از نصب سیستم نگهداری در جداول (۱-۶ تا ۹-۶) نشان داده شد. با تعیین کرنش بحرانی از رابطه (۳-۶) و با استفاده از رابطه (۴-۶) جابجایی بحرانی به دست می آید.

$$\epsilon_{cr} = \frac{u_c}{r} \quad (۴-۶)$$

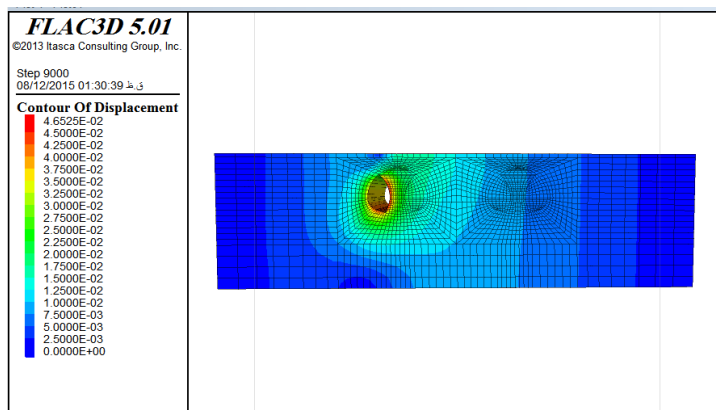
جهت تحلیل پایداری تونل، مقدار حداکثر جابجایی‌های ثبت شده در گالری‌های کناری تونل و حفاری تمام مقطع با مقادیر جابجایی‌های بحرانی مقایسه خواهند شد. مقادیر این جابجایی‌ها در جدول (۱۴-۶ تا ۱۶-۶) خلاصه شده‌اند. همانطوریکه از جدول مشاهده می گردد با حفر ۴۰ متر از گالری چپ با روباره ۱۳، ۸ و ۴ متر بدون نگهداری جابجایی به ترتیب در حدود ۵/۱۶۱۱، ۴/۲۶۰۹ و ۴/۶۵۲۵ سانتی متر می گردد. که کمتر از جابجایی مجاز در تراز هشدار خطر II می باشد شکل (۶-۲۰ تا ۶-۲۲).



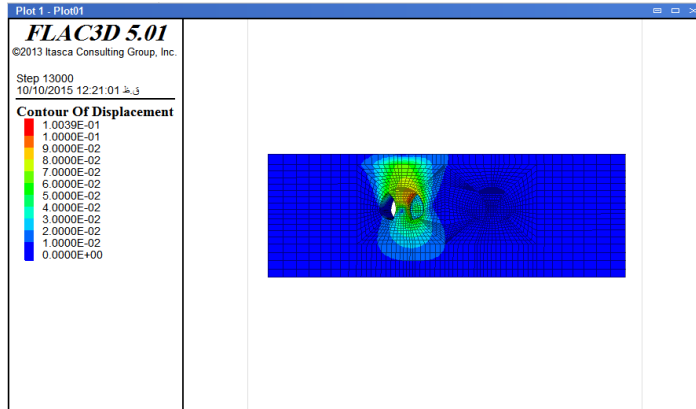
شکل ۶-۲۰- کنتورهای جابجایی حفاری ۴۰ متر از گالری چپ با روباره ۱۳ متر



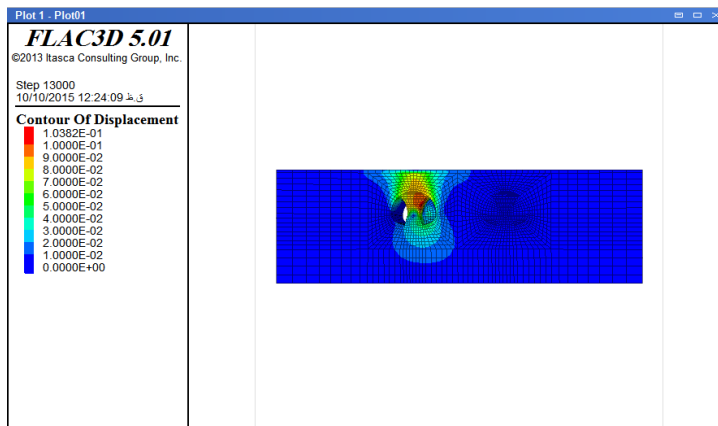
شکل ۶-۲۱- کنتورهای جابجایی حفاری ۴۰ متر از گالری چپ با روباره ۸ متر



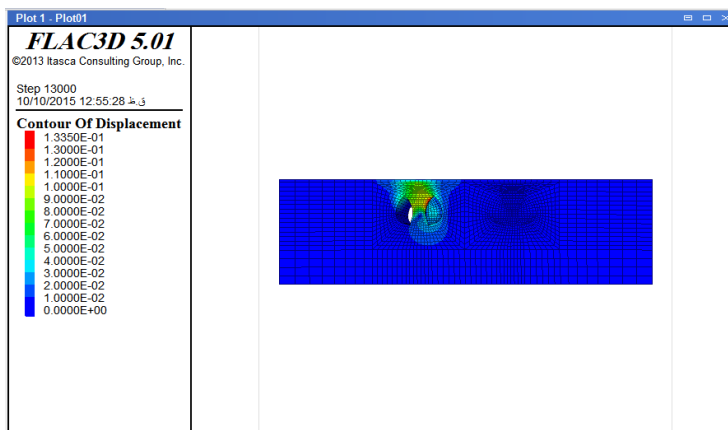
شکل ۶-۲۲- کنتورهای جابجایی حفاری ۴۰ متر از گالری چپ با روباره ۴ متر



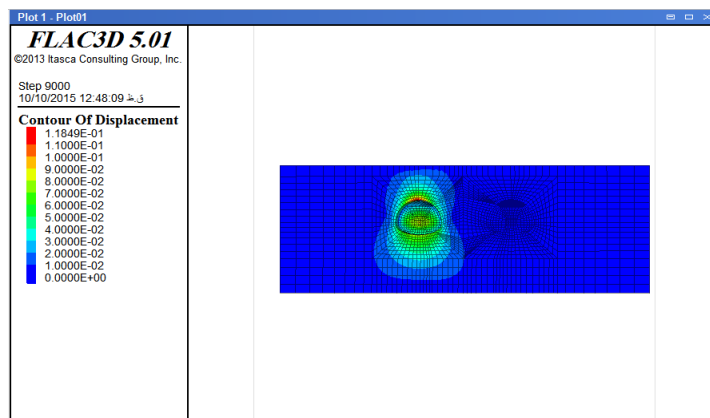
شکل ۶-۲۳- کنتورهای جابجایی حفاری ۱۷ متر از گالری راست با روباره ۱۳ متر



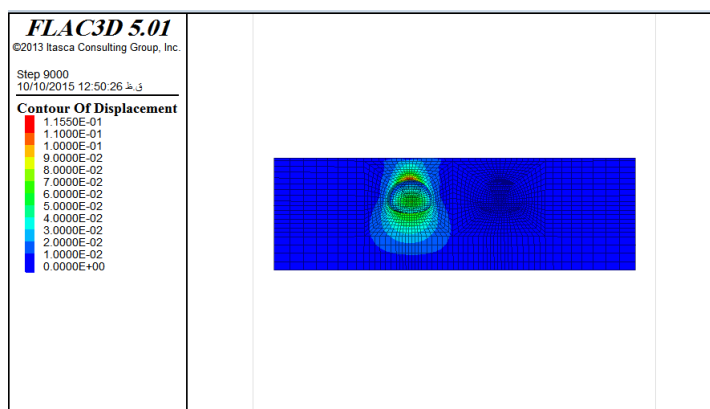
شکل ۶-۲۴- کنتورهای جابجایی حفاری ۱۸/۵ متر از گالری راست با روباره ۸ متر



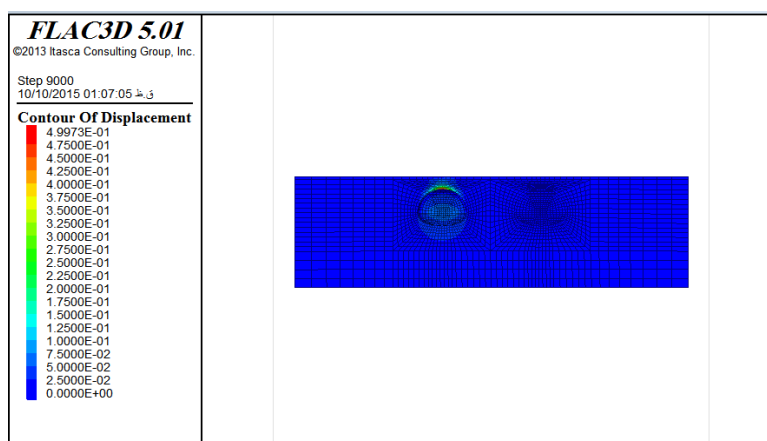
شکل ۶-۲۵- کنتورهای جابجایی حفاری ۵ متر از گالری راست با روباره ۴ متر



شکل ۶-۲۶- کنتورهای جابجایی ۹ متر از حفاری تمام مقطع با روباره ۱۳ متر



شکل ۶-۲۷- کنتورهای جابجایی ۹ متر از حفاری تمام مقطع با روباره ۸ متر



شکل ۶-۲۸- کنتورهای جابجایی ۹ متر از حفاری تمام مقطع با روباره ۴ متر

لذا بر اساس مفهوم کرنش بحرانی، گالری چپ بدون نصب سیستم نگهداری برای هر سه روباره پایدار می‌ماند. همان‌طور مشاهده شده که با حفر ۱۷ متر از گالری راست (طول دهانه ریزشی با روباره

۱۳ متر از جدول ۶-۱۱) بدون نگهداری، جابجایی در حدود ۱۰/۰۳ و با حفر ۱۸/۵ متر از گالری راست (طول دهانه ریزشی با روباره ۸ متر از جدول ۶-۱۱) جابجایی در حدود ۱۰/۳۲۸ سانتی‌متر می‌گردد، همچنین با حفر ۵ متر از گالری راست (طول دهانه ریزشی با روباره ۴ متر از جدول ۶-۱۱) بدون نگهداری، جابجایی در حدود ۱۳/۳۵ سانتی‌متر می‌گردد، که بیشتر از جابجایی مجاز در تراز هشدار خطر II می‌باشد شکل (۶-۲۳) تا (۶-۲۵). لذا بر اساس مفهوم کرنش بحرانی، گالری راست بدون نصب سیستم نگهداری برای هر سه روباره ناپایدار است. و در آخر با حفر ۹ متر از حفاری تمام مقطع (طول دهانه ریزشی با روباره ۱۳ و ۸ متر از جدول ۶-۱۰) بدون نگهداری، جابجایی به ترتیب در حدود ۱۱/۸۴۹ و ۱۱/۵۵ سانتی‌متر می‌گردد، همچنین با حفر ۴/۵ متر از حفاری تمام مقطع (طول دهانه ریزشی با روباره ۴ متر از جدول ۶-۱۰) بدون نگهداری، جابجایی در حدود ۴۹/۹۷۳ سانتی‌متر می‌گردد که بیشتر از جابجایی مجاز در تراز هشدار خطر II می‌باشد شکل (۶-۲۶) تا (۶-۲۸). لذا بر اساس مفهوم کرنش بحرانی، حفاری تمام مقطع بدون نصب سیستم نگهداری برای هر سه روباره ناپایدار است.

جدول ۶-۱۴- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۱۳ متر بدون نگهداری

کرنش بحرانی εcr (%)	جابجایی مجاز برحسب کرنش بحرانی (cm)	جابجایی گالری چپ به ازای حفر ۴۰ متر از طول تونل (cm)	جابجایی گالری راست به ازای حفر ۱۷ متر از طول تونل (cm)	جابجایی حفاری تمام مقطع از تونل چپ به ازای حفر ۹ متر (cm)	E Kgf/cm <sup>2</sup>
۲/۵۵	تراز هشدار خطر I	۵/۱۶۱۱	۱۰/۰۳	۱۱/۸۴۹	۹۲۹/۷
۱/۰۹	تراز هشدار خطر II	۵/۱۶۱۱	۱۰/۰۳	۱۱/۸۴۹	۹۲۹/۷
۰/۴۶۵	تراز هشدار خطر III	۵/۱۶۱۱	۱۰/۰۳	۱۱/۸۴۹	۹۲۹/۷

جدول ۶-۱۵- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۸ متر بدون نگهداری

جابجایی حفاری تمام مقطع از تونل چپ به ازای حفر ۹ متر (cm)	جابجایی گالری راست به ازای حفر ۱۸/۵ متر از طول تونل (cm)	جابجایی گالری چپ به ازای حفر ۴۰ متر از طول تونل (cm)	جابجایی مجاز برحسب کرنش بحرانی (cm)		کرنش بحرانی $\epsilon_{cr}$ (%)	E Kgf/cm <sup>۲</sup>
۱۱/۵۵	۱۰/۳۲۸	۴/۲۶۰۹	۲۳/۰۲۲	تراز هشدار خطر I	۲/۵۵	۹۲۹/۷
۱۱/۵۵	۱۰/۳۲۸	۴/۲۶۰۹	۹/۸۱۹	تراز هشدار خطر II	۱/۰۹	۹۲۹/۷
۱۱/۵۵	۱۰/۳۲۸	۴/۲۶۰۹	۴/۱۸۵	تراز هشدار خطر III	۰/۴۶۵	۹۲۹/۷

جدول ۶-۱۶- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۴ متر بدون نگهداری

جابجایی حفاری تمام مقطع از تونل چپ به ازای حفر ۴/۵ متر (cm)	جابجایی گالری راست به ازای حفر ۵ متر از طول تونل (cm)	جابجایی گالری چپ به ازای حفر ۴۰ متر از طول تونل (cm)	جابجایی مجاز برحسب کرنش بحرانی (cm)	کرنش بحرانی $\epsilon_{cr}$ (%)	E Kgf/cm <sup>۲</sup>	
۴۹/۹۷۳	۱۳/۳۵	۴/۶۵۲۵	۲۴/۴۸	تراز هشدار خطر I	۲/۷۲	۷۲۳/۱
۴۹/۹۷۳	۱۳/۳۵	۴/۶۵۲۵	۱۰/۴۴	تراز هشدار خطر II	۱/۱۶	۷۲۳/۱
۴۹/۹۷۳	۱۳/۳۵	۴/۶۵۲۵	۴/۴۶	تراز هشدار خطر III	۰/۴۹۵	۷۲۳/۱

#### ۶-۴-۴- بررسی پایداری تونل با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی

از آنجاکه زمین تحت تنش سه محوره قرار دارد، استفاده از ماکزیمم کرنش برشی برای ارزیابی

پایداری تونل منطقی‌تر به نظر می‌رسد. Sakurai و همکارانش در سال ۱۹۹۴ رابطه (۵-۶) را برای محاسبه کرنش بحرانی در حالت سه محوری ( $\gamma_c$ ) با استفاده از کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده و نسبت پواسون ( $\nu$ ) پیشنهاد کردند (Sakurai, 1997).

$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_c \quad (5-6)$$

مقدار حداکثر کرنش برشی حاصل از تریخیس تنش در مقطع مورد مطالعه تا قبل از نصب سیستم نگهداری در جداول (۱-۶ تا ۶-۶) نشان داده شد. برای سنجش پایداری تونل و قرار دادن آن در یکی از ترازهای هشدار، مقادیر کرنش برشی را طبق روابط (۳-۶) و (۵-۶) به دست می‌آوریم. در جداول (۱۷-۶) تا (۱۹-۶) این مقادیر آمده است.

جدول ۱۷-۶- نتایج حاصل از تحلیل پایداری برای حفر گالری چپ

روپاره (متر)	کرنش برشی مجاز (تراز هشدار خطر III)	کرنش برشی حاصل از مدل‌سازی عددی به ازای حفر ۴/۵ متر از طول تونل	وضعیت پایداری
۱۳	۱/۴۷۲	۲/۲۶۶۶	ناپایدار
۸	۱/۴۷۲	۱/۸۳۲۹	ناپایدار
۴	۱/۶	۲/۱۴۸۹	ناپایدار

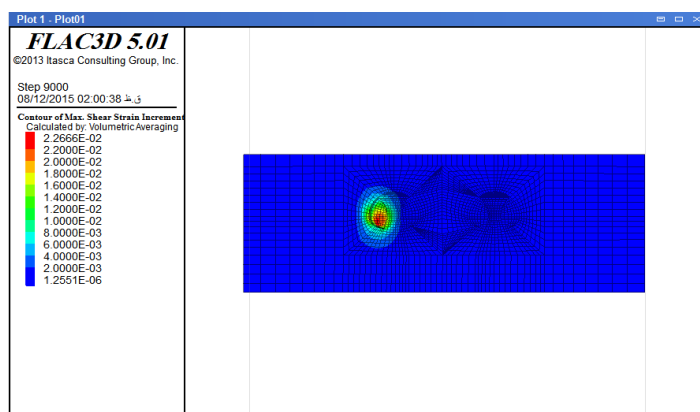
جدول ۱۸-۶- نتایج حاصل از تحلیل پایداری برای حفر گالری راست

روپاره (متر)	کرنش برشی مجاز (تراز هشدار خطر III)	کرنش برشی حاصل از مدل‌سازی عددی به ازای حفر ۴/۵ متر از طول تونل	وضعیت پایداری
۱۳	۱/۴۷۲	۳/۸۱۱۶	ناپایدار
۸	۱/۴۷۲	۲/۹۵۶۳	ناپایدار
۴	۱/۶	۵/۱۴۳۴	ناپایدار

جدول ۶-۱۹- نتایج حاصل از تحلیل پایداری برای حفاری تمام مقطع تونل

روباره (متر)	کرنش برشی مجاز (تراز هشدار خطر II)	کرنش برشی حاصل از مدل‌سازی عددی به ازای حفر ۴.۵ متر از طول تونل	وضعیت پایداری
۱۳	۱/۴۷۲	۴/۳۷۱۵	ناپایدار
۸	۱/۴۷۲	۳/۲۷۰۵	ناپایدار
۴	۱/۶	۳۱/۸۸	ناپایدار

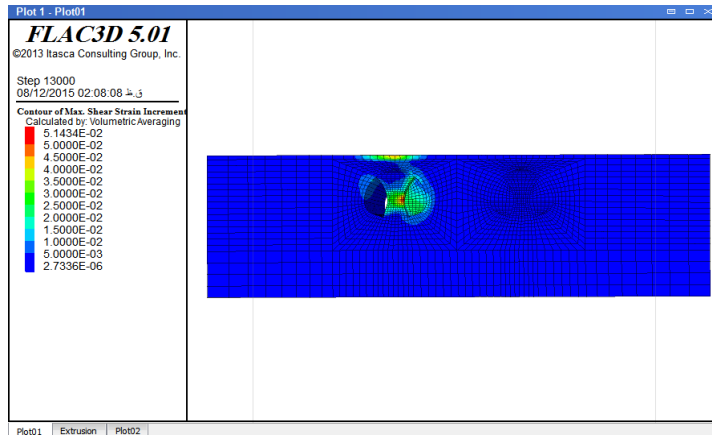
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار کرنش برشی حداکثر به وجود آمده برای حفاری گالری چپ تونل با روباره‌های ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب در حدود ۲/۲۶۶۶، ۱/۸۳۲۹ و ۲/۱۴۸۹ است که در تراز هشدار خطر III قرار می‌گیرد. به این ترتیب طبق روابط ساکورایی تونل پایدار نیست. شکل (۶-۲۹) حداکثر کرنش برشی برای حفاری گالری چپ با روباره ۱۳ متر را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۹- حداکثر کرنش برشی برای حفاری گالری چپ با روباره ۱۳

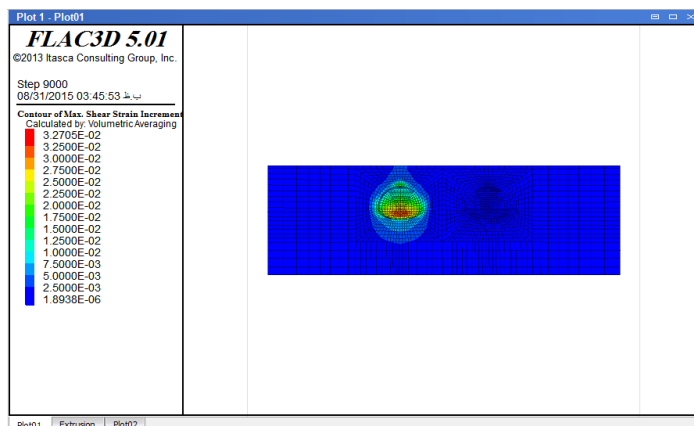
همچنین مقدار کرنش برشی حداکثر به وجود آمده برای حفاری گالری راست تونل با روباره‌های ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب در حدود ۳/۸۱۱۶، ۲/۹۵۶۳ و ۵/۱۴۳۴ است که در تراز هشدار خطر III قرار می‌گیرد. به این ترتیب طبق روابط ساکورایی تونل پایدار نیست. شکل (۶-۳۰) حداکثر کرنش برشی برای حفاری گالری راست با روباره ۴ متر را نشان می‌دهد.





شکل ۶-۳۰- حداکثر کرنش برشی برای حفاری گالری راست با روباره ۴

و در آخر مقدار کرنش برشی حداکثر به وجود آمده برای حفاری تمام مقطع تونل با روباره‌های ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب در حدود ۴/۳۷۱۵، ۳/۲۷۰۵ و ۳۱/۸۸ است که در تراز هشدار خطر III قرار می‌گیرد. به این ترتیب طبق روابط ساکورایی تونل پایدار نیست. شکل (۶-۳۱) حداکثر کرنش برشی برای حفاری تمام مقطع با روباره ۸ متر را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۳۱- حداکثر کرنش برشی برای حفاری تمام مقطع با روباره ۸

در نتیجه با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و روابط ساکورایی در جداول (۶-۱۷) تا (۶-۱۹)، می‌توان چنین استنباط کرد که فضای حفاری مورد نظر دچار گسیختگی و ناپایداری شده است؛ بنابراین در مقاطع مختلف نیاز به نصب نگهداری دارد.

## ۶-۵- نصب سیستم نگهداری

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل پایداری، لازم است برای کنترل جابجایی‌ها سیستم نگهداری مناسبی طراحی شود.

## ۶-۵-۱- استفاده از روش "مقطع معادل" در طراحی نگهداری موقت تونل‌ها

برای مدل کردن پوشش طراحی شده در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$ ، از روش نوینی که در سال ۲۰۰۹ توسط آقایان کارانزا تورس و دایدرس برای سیستم‌های نگهداری مرکب<sup>۱</sup> از شاتکریت و قاب فولادی (لتیس) ارائه شده و با نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  همخوانی دارد، استفاده می‌شود. ابتدا دو سیستم نگهداری را ترکیب کرده و خصوصیات و پارامترهای مقاومتی و مکانیکی آن را محاسبه می‌کنیم. مقطع لاینینگ اولیه مورد استفاده در مدل شامل یک تیر با لتیس فولادی (مشخصات آن در جدول ۶-۲۰ و ۶-۲۱ دیده می‌شود) با ضخامت ۳۵ و ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت (مشخصات آن در جدول ۶-۲۲ و ۶-۲۳ نشان داده شده است) می‌باشد که در شکل (۶-۳۲) دیده می‌شود. میلگردهای لتیس و جزئیات آن در شکل (۶-۳۳) دیده می‌شود (Carranza-Torres, C, 2009). نکته قابل توجه در کاربرد سیستم‌های نگهداری، ایجاد وقفه زمانی مابین نصب سیستم نگهداری و حفر تونل است. لحاظ کردن وقفه زمانی بین حفر تونل و نصب نگهداری تأثیر مهمی بر روی نتایج تحلیل خواهد داشت؛ زیرا در این حالت بخش قابل توجهی از تغییر شکل توده سنگ و خاک در همین فاصله زمانی رخ می‌دهد. در اثر این جابجایی و تغییر شکل، قسمت عظیمی از تنش‌های القایی ترخیص شده و در نهایت فشار وارد بر سیستم نگهداری کاهش می‌یابد. در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  با استفاده از گام زمانی و مشاهده میزان جابجایی یک نقطه در اطراف تونل، می‌توان تأخیر زمانی مناسب نصب سیستم نگهداری را مدل‌سازی نمود. به منظور انجام این عمل می‌توان نقطه شاهدی در اطراف تونل در نظر گرفت. پس از حفر مدل و ایجاد تعادل، باید مقدار حداکثر جابجایی نقطه شاهد را یادداشت کرد. در مرحله بعدی دوباره مدل

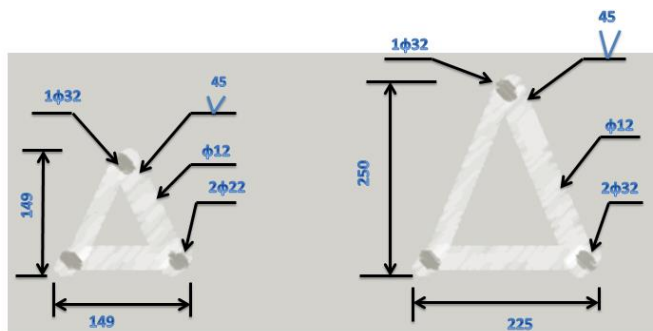
<sup>1</sup> Equivalent Section

<sup>2</sup> Composite Supports

حفر می‌شود بطوریکه وقتی به ۳۰ تا ۵۰ درصد مقدار نهایی خود رسید، اجرای برنامه متوقف‌شده و جابجایی‌ها صفر می‌شود و در نهایت سیستم نگهداری نصب می‌شود و مدل اجرا می‌گردد.



شکل ۶-۳۲- مقطع هندسی لاینینگ اولیه شامل سیستم ترکیبی (لتیس، شاتکریت) (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)



شکل ۶-۳۳- مقطع لتیس پوشش موقت ۳۵ سانتی‌متری و ۲۵ سانتی‌متری (www.dywidag.co.uk)

جدول ۶-۲۰- مشخصات لتیس با سطح مقطع مثلثی با ضخامت شاتکریت ۳۵ سانتی‌متری برای دیواره اصلی (شرکت مهندسين مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

۱φ۳۲+۲φ۲۲	میلگرد
۲۵۰ mm	ارتفاع
۱ متر	فاصله قرارگیری
$۴۰۰۰ \text{ kg/cm}^2$	تنش تسلیم
۲۰۰ Gpa	مدول الاستیسیته
۰/۲	ضریب پواسون
$۷۸۵۰ \text{ Kg/cm}^3$	وزن مخصوص

جدول ۶-۲۱- مشخصات لیس با سطح مقطع مثلثی با ضخامت شاتکریت ۲۵ سانتی‌متری برای دیواره موقت گالری‌ها (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

۱φ۳۲+۲φ۲۲	میلگرد
۱۵۰ mm	ارتفاع
۱ m	فاصله قرارگیری
۴۰۰۰ Kg/cm <sup>2</sup>	تنش تسلیم
۲۰۰ Gpa	مدول الاستیسیته
۰.۲	ضریب پواسون
۷۸۵۰ Kg/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص

جدول ۶-۲۲- خصوصیات شاتکریت با ضخامت ۳۵ سانتی‌متری (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

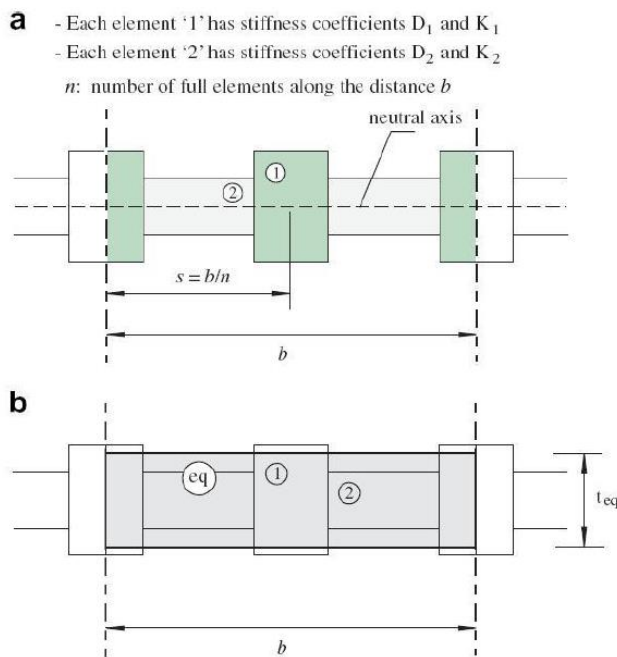
۳۵ cm	ضخامت
۲۳۸۷۵۱/۹۶ Kg/cm <sup>2</sup>	مدول الاستیک
۸/۴ KN/m	وزن حجمی w
۲۵۰ Kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
8.35e6 KN/m	سختی محوری EA
4.2 e4 KN – m <sup>2</sup> /m	سختی خمشی EI
۰/۱۵	ضریب پواسون
۲۵۰۰ Kg/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص بتن مسلح
3.5e-03 m <sup>4</sup>	ممان اینرسی (I =bh <sup>3</sup> /12)

جدول ۶-۲۳- خصوصیات شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متری (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)

۲۵ cm	ضخامت
۲۳۸۷۵۱/۹۶ kg/cm <sup>2</sup>	مدول الاستیک
۶ KN/m	وزن حجمی w
۲۵۰ Kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
5.96e6 KN/m	سختی محوری EA
15.5 e3 KN-m <sup>2</sup> /m	سختی خمشی EI
۰/۱۵	ضریب پواسون
1.3e-03 m <sup>4</sup>	ممان اینرسی (I =bh <sup>3</sup> /12)

## ۶-۵-۲- معادلات حاکم بر رویکرد مقطع معادل

رفتار لایه نگهدارنده تونل که مقطع متشکل از دو ماده مختلف است (به عنوان مثال شاتکریت و فولاد) بر اساس تئوری ارتجاعی پوسته‌ها و رفتار تیرهای منحنی مانند شکل (۵-۲۶) خواهد بود. شکل (۵-۲۶) نشان دهنده ترکیب دو ماده مختلف برای استفاده از این روش می‌باشد. این مقطع نشان دهنده لایه نگهدارنده به عرض  $b$ ، شامل  $n$  واحد از ماده "۱" (به عنوان مثال فولاد) و  $n$  واحد از ماده "۲" (به عنوان مثال شاتکریت) می‌باشد. توجه داشته باشید که  $n$  واحد از هر یک از مواد در امتداد عرض  $b$  وجود دارد. این بیان هم ارز این است که هر یک از واحدها با فاصله  $s=b/n$  از یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر یک از واحدهای "۱" و "۲" با تعاریفی برای ضرایب فشار (ضرایب تراکم پذیری) به ترتیب  $D_1$  و  $D_2$  و ضرایب انعطاف پذیری به ترتیب  $K_1$  و  $K_2$  نشان داده شده‌اند. در به دست آوردن این روابط از فرض تقارن نسبت به محور افقی مشترک (محور خنثی مقطع) استفاده گردیده است. شکل (۶-۲۸). با توجه به اینکه سیستم نگهداری موقت نصب شده در تونل شامل لئیس، شاتکریت است، برای مدل‌سازی این سیستم ترکیبی، از مفهوم مقطع معادل استفاده شده است. برای مدل‌سازی مقطع مرکب بایستی مدول الاستیسیته معادل ( $E_{eq}$ ) و ضخامت معادل ( $t_{eq}$ ) را به دست آورد (Carranza-Torres, C, 2009). بدین منظور می‌توان از روابط (۶-۶) تا (۶-۱۰) استفاده نمود.



شکل ۶-۳۴ (a) نمایش شماتیک یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲ (b) مقطع معادل برای لایه مرکب (کامپوزیتی) (Carranza-Torres, C, 2009)

برای نگهداری فولادی داریم:

$$D_{st} = \frac{E_{st} \cdot A_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \quad (6-6)$$

$$k_{st} = \frac{E_{st} \cdot I_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \quad (7-6)$$

$D_{st}$  = ضریب تراکم‌پذیری نگهداری فولادی

$K_{st}$  = ضریب انعطاف‌پذیری نگهداری فولادی

$A_{st}$  = سطح مقطع عرضی هر قاب فولاد

$I_{st}$  = ممان اینرسی هر قاب فولاد

$\nu_{st}$  = ضریب پواسون فولاد

برای نگهداری شاتکریت داریم:

$$I_{sh} = \frac{S \cdot t_{sh}^3}{12} \quad (۸-۶)$$

$$D_{sh} = \frac{E_{sh} \cdot A_{sh}}{1 - \nu_{sh}^2} \quad (۹-۶)$$

$$k_{sh} = \frac{E_{sh} \cdot I_{sh}}{1 - \nu_{sh}^2} \quad (۱۰-۶)$$

$D_{sh}$  = ضریب تراکم‌پذیری شاتکریت

$K_{sh}$  = ضریب انعطاف‌پذیری شاتکریت

$A_{sh}$  = سطح مقطع عرضی شاتکریت ( $S \cdot t_{sh}$ ) (S=فاصله بین لته‌ها از هم)

$t_{sh}$  = ضخامت شاتکریت

$I_{sh}$  = ممان اینرسی شاتکریت

$\nu_{sh}$  = ضریب پواسون شاتکریت

اکنون برای سیستم نگهداری ترکیبی یک مقطع معادل فرض کرده و ضخامت این مقطع  $t_{eq}$  و

مدول الاستیسیته آن  $E_{eq}$  با استفاده از معادلات (۱۱-۶) تا (۱۴-۶) محاسبه می‌شود:

$$k_{eq} = k_{st} + k_{sh} \quad (۱۱-۶)$$

$$D_{eq} = D_{st} + D_{sh} \quad (۱۲-۶)$$

$$t_{eq} = \frac{\sqrt{12k_{eq}}}{D_{eq}} \quad (۱۳-۶)$$

$$E_{eq} = \frac{D_{eq}}{b \cdot t_{eq}} \quad (۱۴-۶)$$

با استفاده از این روابط و جایگزینی مدول الاستیسیته شاتکریت و فولاد (به ترتیب MPa ۲۳۸۷۵/۱۹۶ و ۲۰۰ GPa) مقدار مدول الاستیسیته معادل برای دیواره اصلی، دیواره موقت و کف برابر با (به ترتیب ۲۴/۷۹۶ GPa، ۲۴/۵۲ GPa و ۱۴/۴۸ GPa) و همچنین مقدار ضخامت معادل برای دیواره اصلی، موقت و کف برابر با (به ترتیب ۰/۳۴۵ m، ۰/۲۴۹ m و ۰/۵۹۱ m) به دست خواهد آمد. که در مدل‌سازی از آن‌ها استفاده خواهد شد (Carranza-Torres, C, 2009).

### ۶-۵-۳- توالی حفاری بهینه<sup>۱</sup>

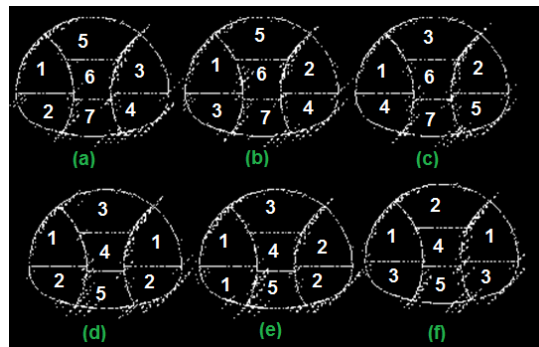
روش حفاری متوالی<sup>۲</sup> (SEM) وقتی روشی مقرون به صرفه است که به طور کامل تأثیر توالی پیشروی جبهه کار بر عملکرد تونل زنی درک شود. عامل اصلی در انتخاب توالی بهینه حفاری، محدود کردن نشست‌ها و جابجایی‌های سطحی است. انتخاب توالی حفاری بستگی به هندسه تونل، خواص زمین و غیره دارد. فقط چند تحقیق به درک اثرات روش پیشروی جبهه کارهای مختلف نسبت به عملکرد تونل‌زنی می‌پردازد. در طول ساخت یک پروژه تونل‌زنی در مناطق شهری، جبهه کار تونل به گالری‌های موقت به منظور ترویج پایداری جبهه کار و کاهش تغییر شکل و نشست سطح زمین تقسیم می‌شود. اندازه گالری‌ها باید طوری طراحی شوند که حفاری و نصب پوششی ایمن، با توجه به اندازه تجهیزات تونل زنی را فراهم کند. ترتیب بازشدگی زیرزمینی و توالی حفاری به رفتار عملیاتی مورد نیاز آن‌ها (روش حفاری، نصب و ساخت نگهداری موقت و دائم، کوتاه‌مدت و بلندمدت و غیره) بستگی دارد که با ماهیت زمین و شرایط تنش برجا مواجه می‌شوند؛ بنابراین، نیاز کاربردی برای مدل‌سازی مراحل مختلف ساخت تونل و پیدا کردن روش بهینه ساخت وجود دارد. تونل‌زنی SEM توسط حذف متوالی توده زمین پس از نصب نگهداری مشخص می‌شود. انتخاب نامناسب دنباله حفاری می‌تواند اثر

<sup>1</sup> Optimum Excavation Sequence

<sup>2</sup> Sequential Excavation Method



بی‌ثباتی در پایداری تونل داشته باشد. اگرچه، حفاری‌های متوالی تأثیر فنی و اقتصادی عمده‌ای در تونل زنی معمولی دارد، اما هیچ روش منسجمی برای تعیین آن نیست. تأثیر توالی حفاری در نشست زمین باید به‌خصوص در مورد تونل شهری دهانه بزرگ در عمق کم در نظر گرفته شود. به‌منظور پیدا کردن توالی بهینه حفاری، شش طرح حفاری مطرح شد و تحلیل عددی برای حفاری تونل موردنظر بر اساس روش گالری‌های کناری با توجه به هندسه تونل و خواص لایه‌های خاک (شکل ۶-۳۵) انجام شد. در انتخاب توالی حفاری، عوامل اصلی مانند زمان بسته شدن حلقه<sup>۱</sup>، تعداد مراحل حفاری، تقسیم‌بندی ناحیه<sup>۲</sup> و مرحله حفاری گالری مرکزی<sup>۳</sup> در نظر گرفته شد (Sharifzadeh, M., 2013).



شکل ۶-۳۵-پیشنهاد توالی حفاری تونل در روش گالری‌های کناری (Sharifzadeh, M., 2013)

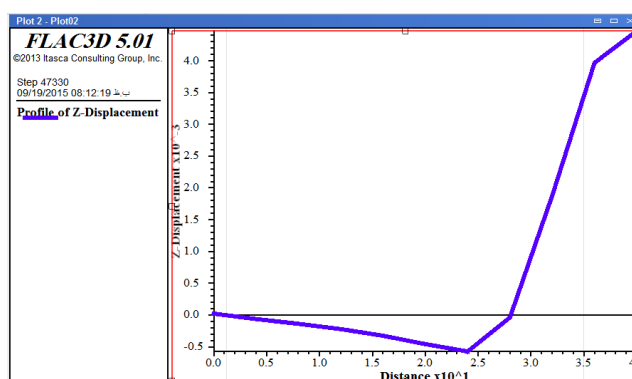
جابجایی عمودی برای شش توالی حفاری در جدول (۶-۲۴) نشان داده شده است. با توجه به این جدول، حداقل و حداکثر جابجایی در سقف تونل برای طرح‌های حفاری (A) تا (F) محاسبه شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی، طرح حفاری (A) دارای کمترین میزان جابجایی و به‌عنوان طرح بهینه حفاری پروژه تونل حکیم انتخاب شد و طرح حفاری (C) دارای بیشترین میزان جابجایی انتخاب شد. این نتایج نشان می‌دهد که بسته شدن سریع حلقه نگهداری و مرحله حفاری گالری مرکزی (گالری وسط) از عوامل مهم در کنترل تغییر شکل تونل و نشست سطح در تونل زمین نرم می‌باشد. بر این اساس حفاری گالری مرکزی (گالری وسط) در آخرین مرحله نشست‌های سطح را

<sup>1</sup> Ring Closure Time

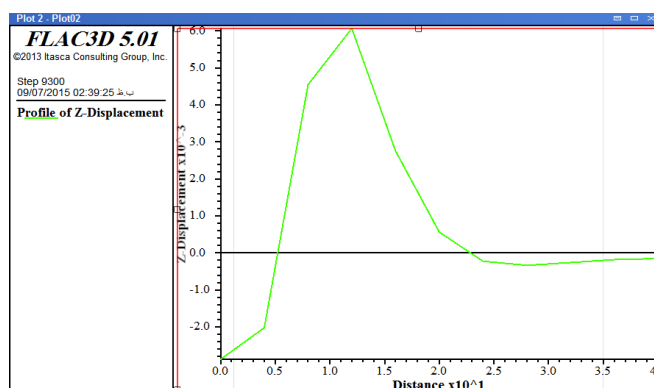
<sup>2</sup> Subdividing Area

<sup>3</sup> Central Gallery Excavation

کاهش می‌دهد. حجم حفاری هر مرحله دارای اثرات مضاعف در نشست سطحی است. حجم کوچک حفاری منجر به جابه‌جایی و نشست سطحی کمتر می‌شود. در مقابل، حجم حفاری کوچک‌تر باعث افزایش تعداد مراحل حفاری و تأخیر بسته شدن حلقه نگهداری (سراسر نگهداری شده) و منجر به افزایش نشست سطحی می‌شود. بستن حلقه نگهداری در زمین نرم باید در مراحل کمتری نصب شود و تأخیر انداختن بستن حلقه منجر به تغییر شکل‌ها و نشست‌های بزرگ می‌شود. بسته شدن سریع حلقه با اتخاذ حجم حفاری بزرگ‌تر مؤثرتر از اتخاذ حجم حفاری کوچک‌تر برای محدود کردن تغییر شکل تاج تونل و نشست سطحی در تونل زمین نرم در عمق کم است اگر پایداری جبهه کار به‌اندازه کافی حفظ شده باشد.



شکل ۶-۳۶- جابجایی عمودی برای طرح حفاری A



شکل ۶-۳۷- جابجایی عمودی برای تمام مقطع

نتایج شکل (۶-۳۶) و (۶-۳۷) حداکثر کاهش جابجایی را در حدود ۲۶٪ نشان می‌دهد که

ناشی از تقسیم بندی مقاطع حفاری است. نتایج تقسیم بندی مورد (۶-۳۶ A) بهتر است هنگامیکه قضاوت مشترک و متعارفی از روش NATM انتظار می‌رفت.

جدول ۶-۲۴- حدافل و حداکثر جابجایی در سقف تونل برای طرح‌های حفاری (A) تا (F)

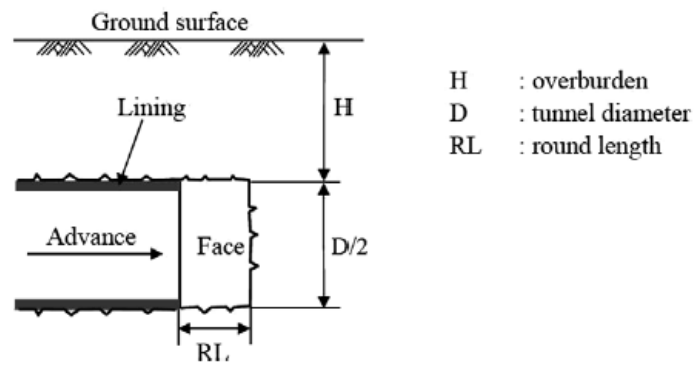
حداکثر جابجایی سقف (mm)	طرح حفاری
۴/۴۷	A
۴/۶۶	B
۴/۶۹	C
۴/۵۹	D
۴/۵۱	E
۴/۶۵	F
۶/۰۶۴	Full-face

#### ۶-۵-۴- تعیین طول بهینه گام حفاری<sup>۱</sup>

یکی دیگر از عوامل مهم و مؤثر در کنترل جابجایی ناشی از حفر تونل در روش حفاری مرحله‌ای، طول هر گام حفاری در هر جبهه کار است. اکثر محققین بر این عقیده‌اند که طول هر گام حفاری تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی پتانسیل ریزش جبهه کار و دهانه خود پایدار و در کل پایداری تونل دارد. همچنین هزینه و زمان اجرای یک تونل، وابستگی شدیدی به انتخاب این عامل دارد (Tang, D.K.W, 2004).

همان‌طور که در شکل (۶-۳۸) نشان داده شده است، طول گام (RL) حفاری عبارت است از فاصله یا طولی از دهانه بدون پوشش (نگهداری نشده) تونل که در یک مرحله قبل از نصب نگهداری حفاری می‌شود. سربار (H) فاصله تاج تا سطح زمین و (D) قطر تونل است. پیچ سنگ‌ها و پیش نگهداری مانند لوله‌گذاری سقف یا forepoling در نظر گرفته نشده است (Young-Zoo L, 2008).

<sup>1</sup> Round Length



شکل ۶-۳۸- معرفی طول گام حفاری (Young-Zoo L, 2008)

در این تحقیق مقدار جابجایی به ازای مقادیر مختلف طول گام برآورد و مقدار مناسب برای حفر تونل پیشنهاد شده است. در اجرای تونل حکیم مقدار هر گام حفاری برای قسمت فوقانی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر و برای قسمت زیرین نیز سه مقدار ۰/۵، ۱ و ۲/۵ متر را به عنوان طول هر گام حفاری در نظر می‌گیریم؛ و در هر تحلیل مقادیر حداکثر جابجایی برای هر مقدار گام حفاری تعیین شد.

البته لازم به ذکر است که در حفاری مرحله‌ای، باید همواره جبهه کار فوقانی زودتر حفاری شده و نسبت به جبهه کار زیرین جلوتر باشد. به عنوان نمونه برای حالت ۱-۱/۵، دو بار پیشروی در قسمت بالایی به طول ۱ متر و یکبار در قسمت پایینی به طول ۱/۵ متر انجام می‌گیرد.

مقادیر حداکثر جابجایی (تاج تونل) در حالت‌های مختلف در جدول (۶-۲۵ تا ۶-۲۷) نشان

داده شده است.

جدول ۶-۲۵- مقادیر جابجایی حداکثر به ازای مقادیر مختلف طول گام حفاری در روباره ۱۳ متر

حداکثر جابجایی در دیواره تونل (mm)	حداکثر جابجایی کل (mm)	واحد طول گام در قسمت کف (۲)	واحد طول گام در قسمت سقف (۱)	حالت
۱۰/۹۷	۲۰/۱۱	۱/۵	۰/۵	۱
۱۳/۸۵	۲۰/۶۴	۲	۰/۵	۲
۱۶/۸۷	۲۰/۵۲	۲/۵	۰/۵	۳
۱۱/۲۱	۲۰/۱۴	۱/۵	۱	۴
۱۳/۹۳	۱۴/۴۳	۲	۱	۵
۱۷/۱۵	۲۰/۹۴	۲/۵	۱	۶
۱۱/۲۱	۱۱/۵۹	۱/۵	۱/۵	۷
۱۴/۱۸	۱۴/۵۶	۲	۱/۵	۸
۱۷/۳۵	۲۱/۲۱	۲/۵	۱/۵	۹

جدول ۶-۲۶- مقادیر جابجایی حداکثر به ازای مقادیر مختلف طول گام حفاری در روباره ۸ متر

حداکثر جابجایی در دیواره تونل (mm)	حداکثر جابجایی کل (mm)	واحد طول گام در قسمت کف (۲)	واحد طول گام در قسمت سقف (۱)	حالت
۸/۷۴	۱۵/۸۸	۱/۵	۰/۵	۱
۱۱/۱۷	۱۷/۵۴	۲	۰/۵	۲
۱۳/۲۵	۱۶/۱۴	۲/۵	۰/۵	۳
۸/۷۷	۱۵/۹۴	۱/۵	۱	۴
۱۰/۹۴	۱۰/۹۵	۲	۱	۵
۱۳/۲۵	۱۶/۱۴	۲/۵	۱	۶
۸/۵۳	۸/۵۵	۱/۵	۱/۵	۷
۱۱/۰۹	۱۱/۱۱	۲	۱/۵	۸
۱۳/۳۴	۱۶/۸۲	۲/۵	۱/۵	۹

جدول ۶-۲۷- مقادیر جابجایی حداکثر به ازای مقادیر مختلف طول گام حفاری در روبره ۴ متر

حداکثر جابجایی در دیواره تونل (mm)	حداکثر جابجایی کل (mm)	واحد طول گام در قسمت کف (۲)	واحد طول گام در قسمت سقف (۱)	حالت
۲/۷۷	۱۰/۱۲	۱/۵	۰/۵	۱
۴/۵۱	۱۳/۹۲	۲	۰/۵	۲
۶/۳۴	۱۶/۸۹	۲/۵	۰/۵	۳
۲/۷۳	۱۰/۰۹	۱/۵	۱	۴
۴/۴۸	۱۳/۶۲	۲	۱	۵
۶/۲	۱۶/۸۱	۲/۵	۱	۶
۲/۸	۹/۷۸	۱/۵	۱/۵	۷
۴/۴۹	۱۳/۶	۲	۱/۵	۸
۶/۲۱	۱۶/۸۲	۲/۵	۱/۵	۹

هرچند در روش تونل سازی مرحله‌ای، طول گام حفاری یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر جنبه‌های فنی و اقتصادی می‌باشند، ولی فرآیند منسجمی برای تعیین این پارامتر وجود ندارد. به‌منظور بررسی طول گام حفاری، با توجه به سطح مقطع تونل، پنج طول گام حفاری ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ متری در نظر گرفته شد. در این تحلیل ۹ حالت مختلف برای حفاری قسمت فوقانی و تحتانی در نظر گرفته شده است که در جداول (۶-۲۵) تا (۶-۲۷) منحنی جابجایی عمودی حاصل از تحلیل‌ها برای همه حالت‌ها نشان داده شده است. در این جدول عدد سمت چپ طول گام قسمت بالایی و عدد سمت راست طول گام قسمت پایینی است. مقایسه جداول نشان می‌دهد که در اغلب موارد، هر چه اختلاف بین دو طول گام قسمت فوقانی و تحتانی کمتر باشد، اختلاف بین جابجایی‌ها و روند تغییرات کمتر می‌شود.

#### ۶-۵-۵- برخی احتمالات توالی‌های پیشروی با (NATM)

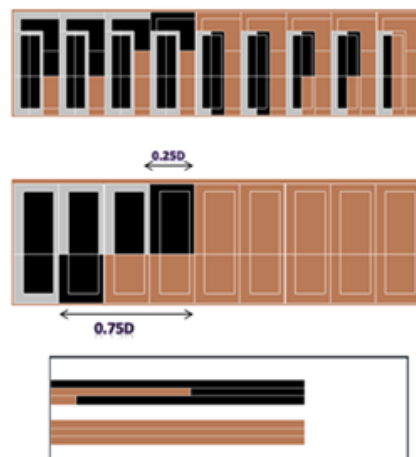
در این بخش چند تحلیل برای بررسی اثر چگونگی پیشروی فرآیند تونل‌زنی انجام شد. چهار توالی حفاری مختلف با توالی‌های متفاوت با توجه به پارامترهای فاصله نگهداری نشده بین جبهه کار

حفری و نگهداری سقف ( $L_1$ )، فعال‌سازی کامل نگهداری ( $L_2$ )، فاصله بین جبهه کار سقف و پله ( $L_3$ )، تقسیم‌بندی جبهه کار، فاصله بین گالری‌ها از هم ( $LD$ ) و بسته شدن قوس کف موردبررسی قرار گرفت شکل (۶-۴۰). این موارد در شکل (۶-۳۹) نشان داده شده است (Farias, M. M, 2004).

حالت	فاصله نگهداری/حفری جزئی/فاصله گالری ها	الگوی حفری
1	$L_1=0.25D$ $L_2=0.25D$ Full face $LD=9$	
2	$L_1=0.5D$ $L_2=0.5D$ Full-face $LD=13.5$	

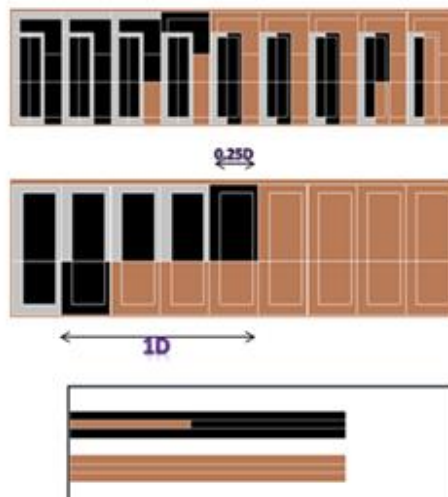
3

L1=0.25D  
L2=0.75D  
L3=0.5D  
Partial-face  
LD=18



4

L1=0.25D  
L2=1D  
L3=0.75D  
Partial-face  
LD=22.5

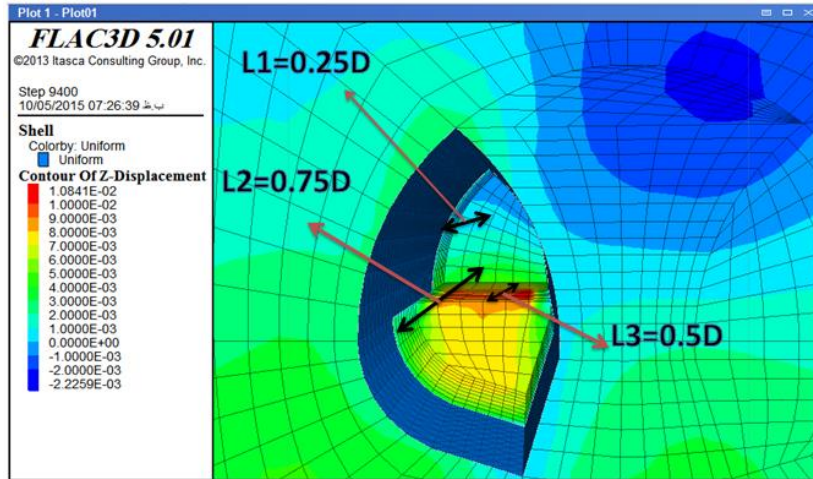


شکل ۶-۳۹- الگوهای حفاری برای پیشروی فرایند تونل‌زنی

ارزیابی جابجایی این تحلیل‌ها در جداول (۶-۲۸ تا ۶-۴۲) برای سه روبراه مختلف نشان

داده شده است.





شکل ۶-۴۰- تعریف پارامترهای حفاری الگوی ۳ در گالری چپ

جدول ۶-۲۸- نتایج الگوی حفاری ۱ برای روباره ۱۳ متر در حالت ( $L1=L2=0.25D$ )

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۲۸۹۴	۰/۴۹۵۹	۰/۳۵۳۳	۰/۴۸۶۷	مرحله اول
۰/۷۵۴	۱/۰۰۳	۰/۸۱۸۱	۰/۶۰۷۴	مرحله دوم
۰/۶۸۲۵	۰/۹۳۲۳	۰/۷۶۳۷	۰/۶۱۸۱	مرحله سوم
۰/۶۷۶۲	۰/۹۷۶۸	۰/۷۴۴۷	۰/۶۵۸۵	مرحله چهارم
۰/۸۲۷۳	۱/۲۹۵۸	۱/۲۴۹۸	۰/۶۱۴۲	مرحله پنجم
۰/۳۹۲۱	۰/۷۷۵۲	۰/۳۱۱۳	۰/۴۲۸۲	مرحله ششم
۰/۵۱۰۹	۰/۹۵۰۲	۰/۴۴۱۸	۰/۵۲۲۳	مرحله هفتم
۰/۱۲۷۵	۰/۷۷۸	۰/۰۶۲۶	۰/۳۳۴۵	مرحله هشتم
۰/۹۶۷۹	۲/۱۷۰۹	۰/۰۸۳۳	۰/۹۰۶۵	مرحله هشتم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۲۹- نتایج الگوی حفاری ۲ برای روباره ۱۳ متر در حالت ( $L1=L2=0.5D$ )

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۴۳۴۱	۰/۸۳۵۷	۰/۴۱۴۹	۰/۵۸۶۴	مرحله اول
۰/۹۷۸۵	۱/۵۳۰۴	۰/۹۷۰۵	۱/۲۲۴۵	مرحله دوم
۱/۰۱۱۴	۱/۸۲۷۲	۰/۹۶۹۱	۲/۰۷۴۶	مرحله سوم
۱/۳۴۴۹	۲/۳۸۶۳	۰/۲۳۲	۱/۸۲۷۱	مرحله چهارم
۰/۳۶۱۱	۰/۸۹۹۹	۰/۲۶۹۴	۰/۳۹۵	مرحله پنجم
۰/۱۵۳۱	۰/۹۷۲۳	۰/۱۳۰۹	۰/۴۳۸۸	مرحله ششم
۱/۰۱۱۸	۲/۲۷۵	۰/۱۴۰۳	۰/۹۷۳۷	مرحله ششم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۳۰- نتایج الگوی حفاری ۳ برای روباره ۱۳ متر در حالت ( $L1=0.25D, L2=0.75D, L3=0.5D$ )

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۷۹۷۵	۱/۰۸۴۱	۰/۹۱۰۹	۰/۵۶۱۹	مرحله اول
۱/۵۰۳۲	۲/۳۵۹۹	۱/۶۵۰۴	۰/۸۳۵۶	مرحله دوم
۱/۴۵۴۲	۲/۳۱۱۹	۱/۵۳۸۲	۰/۷۶۸۹	مرحله سوم
۱/۰۲۲۲	۱/۴۳۳۹	۰/۲۷۴۸	۰/۹۴۶	مرحله چهارم
۱/۰۵۶۵	۱/۱۳۹	۰/۵۹۶۴	۰/۶۷۲۴	مرحله پنجم
۰/۱۲۴۸	۰/۸۵۹۱	۰/۱۱۸۲	۰/۴۰۸	مرحله ششم
۰/۷۳۴۹	۲/۲۷۴۲	۰/۱۲۴۷	۱/۰۰۶۷	مرحله ششم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۳۱- نتایج الگوی حفاری ۴ برای روباره ۱۳ متر در حالت ( $L1=0.25D, L2=1D, L3=0.75D$ )

مراحل حفاری	حداکثر جابجایی	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
مرحله اول	۰/۱۶۰۲۵	۰/۹۶۰۴	۱/۱۸۰۱	۰/۸۲۲۴	
مرحله دوم	۱/۲۰۵۶	۱/۷۱۸۸	۲/۵۴۲۴	۱/۵۳۲۶	
مرحله سوم	۰/۹۵۳۱	۱/۱۲۷	۲/۱۲۴	۱/۵۹۴۴	
مرحله چهارم	۱/۰۱۰۳	۰/۳۵	۱/۴۷۶۶	۱/۲۱۴۵	
مرحله پنجم	۰/۶۰۴۶	۰/۵۲۱۸	۱/۰۸۸۱	۰/۹۳۰۱	
مرحله ششم	۰/۳۳۸۷	۰/۰۹۱۳	۰/۶۹۴۳	۰/۱۲۹۶	
مرحله ششم با حذف گالری موقت	۰/۸۸۹۵	۰/۰۸۹۶	۱/۹۰۷۸	۰/۷۱۲۷	

جدول ۶-۳۲- نتایج الگوی حفاری ۱ برای روباره ۴ متر در حالت ( $L1=L2=0.25D$ )

مراحل حفاری	حداکثر جابجایی	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
مرحله اول	۰/۶۳۳۹	۰/۵۸۰۲	۰/۷۷۴۹	۰/۵۷۳۶	
مرحله دوم	۰/۶۰۸۶	۰/۶۶۱۸	۱/۰۵۷۶	۰/۵۹۶۴	
مرحله سوم	۰/۶۲۲۲	۰/۵۶۸۴	۰/۹۲۶۹	۰/۶۰۷۲	
مرحله چهارم	۰/۷۰۶۹	۰/۸۱۱۸	۱/۰۵۳۱	۰/۵۸۷۵	
مرحله پنجم	۰/۶۸۴۸	۰/۸۴۵۸	۱/۱۸۷۳	۰/۶۸۴	
مرحله ششم	۰/۳۶۷۳	۰/۳۱۹۱	۰/۸۹۸۱	۰/۵۹۵۱	
مرحله هفتم	۰/۴۲۶۱	۰/۴۶۹۸	۱/۰۴۱۶	۰/۶۱۲	
مرحله هشتم	۰/۲۶۱۸	۰/۰۵۴۵	۰/۸۱۵۵	۰/۱۳۶۴	
مرحله هشتم با حذف گالری موقت	۰/۷۴۴۲	۰/۰۸۲۲	۲/۰۱۸۲	۰/۵۴۲۱	

جدول ۶-۳۳- نتایج الگوی حفاری ۲ برای روباره ۴ متر در حالت ( $L1=L2=0.5D$ )

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۷۹۳۱	۱/۲۵۴۹	۰/۶۸۷۸	۱/۰۹۸۸	مرحله اول
۰/۷۳۸۳	۰/۹۰۲۵	۰/۶۴۲۸	۰/۸۹۹۷	مرحله دوم
۱/۳۰۸۷	۲/۱۲۹۶	۰/۶۶۴۷	۲/۰۹۸۲	مرحله سوم
۲/۳۳۱۹	۳/۷۴۰۷	۰/۳۹۱۷	۱/۷۴۷۶	مرحله چهارم
۲/۳۱۹۲	۳/۷۵۸۴	۰/۴۱۸۴	۰/۶۹۲۶	مرحله پنجم
۰/۱۴۵۴	۱/۰۷۰۹	۰/۱۰۳۸	۰/۳۸۴	مرحله ششم
۰/۷۳۹۸	۲/۲۵۷۳	۰/۱۳۰۱	۰/۸۸۲۵	مرحله ششم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۳۴- نتایج الگوی حفاری ۳ برای روباره ۴ متر در حالت ( $L1=0.25D, L2=0.75D, L3=0.5D$ )

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۹۹۳۶	۱/۴۴۴۷	۱/۲۳۶۸	۰/۷۵۶۱	مرحله اول
۱/۱۲۴۸	۲/۱۳۷۲	۱/۴۰۰۶	۰/۸۷۸۹	مرحله دوم
۱/۱۷۷	۲/۲۶۷	۱/۳۷۱۷	۰/۸۵۸۹	مرحله سوم
۰/۷۰۸۵	۱/۱۶۲۷	۰/۳۱۵	۰/۷۲۱۶	مرحله چهارم
۱/۲۹۹۹	۱/۱۸۸۵	۰/۸۷۱۵	۰/۵۴۰۴	مرحله پنجم
۰/۱۵۱۶	۱/۰۴۴۴	۰/۰۹۶۷	۰/۳۵۸۴	مرحله ششم
۰/۴۳۹۹	۲/۳۲۲۶	۰/۱۱۱۱	۰/۸۸۳	مرحله ششم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۳۵- نتایج الگوی حفاری ۴ برای روباره ۴ متر در حالت ( $L1=0.25D, L2=1D, L3=0.75D$ )

مراحل حفاری	حداکثر جابجایی	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
مرحله اول	۰/۷۹۸۴	۱/۳۱۴	۱/۵۹۰۱	۱/۰۴۱۲	
مرحله دوم	۱/۱۵۴۲	۱/۴۶۸۷	۲/۲۴۶۷	۱/۱۶۲	
مرحله سوم	۱/۲۰۷	۱/۳۶۸۲	۲/۶۳۵۸	۱/۶۵۷۱	
مرحله چهارم	۰/۷۷۸۳	۰/۳۲۷	۱/۳۱۱۶	۰/۷۲۱۳	
مرحله پنجم	۰/۵۹۱۹	۰/۸۳۶۴	۲/۴۴۷۶	۱/۸۸۵۲	
مرحله ششم	۰/۳۰۸۸	۰/۰۷۹۱	۰/۹۳۷۱	۰/۱۴۲۹	
مرحله ششم با حذف گالری موقت	۰/۸۲۱۵	۰/۰۸۸۸	۲/۱۷۷۵	۰/۳۶۵۴	

جدول ۶-۳۶- نتایج الگوی حفاری ۱ برای روباره ۸ متر در حالت ( $L1=L2=0.25D$ )

مراحل حفاری	حداکثر جابجایی	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
مرحله اول	۰/۲۸۱۲	۰/۱۱۹۸	۰/۲۱۰۴	۰/۱۲۱۱	
مرحله دوم	۰/۳۱۱۱	۰/۳۲۲۸	۰/۳۸۳۶	۰/۲۸۵۱	
مرحله سوم	۰/۳۳۸۳	۰/۲۹۰۲	۰/۳۵۹۳	۰/۲۶۵۲	
مرحله چهارم	۰/۴۰۸۳	۰/۳۴۵۵	۰/۶۷۳۶	۰/۳۱۸۵	
مرحله پنجم	۰/۳۳۵۵	۰/۵۵۸۲	۰/۶۵۶۲	۰/۴۰۵	
مرحله ششم	۰/۳۱۳۶	۰/۱۸۱۴	۰/۴۱۶۷	۰/۲۳۶	
مرحله هفتم	۰/۳۶۴۷	۰/۲۶۶۵	۰/۵۳۹۷	۰/۳۰۱۴	
مرحله هشتم	۰/۲۵۷	۰/۰۵۷۱	۰/۵۰۵۱	۰/۰۸۷۸	
مرحله هشتم با حذف گالری موقت	۰/۷۰۵۶	۰/۰۷۴۴	۱/۷۷۱۸	۱/۰۴۱۴	

جدول ۶-۳۷- نتایج الگوی حفاری ۲ برای روباره ۸ متر در حالت ( $L1=L2=0.5D$ )

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۲۰۷۱	۰/۳۴۶۳	۰/۱۴۴۹	۰/۵۵۶۵	مرحله اول
۰/۴۳۴۱	۰/۵۹۴۸	۰/۳۷۷۳	۰/۶۴۵۳	مرحله دوم
۰/۵۰۸۶	۰/۸۳۵	۰/۳۹۴۴	۱/۳۷۴۵	مرحله سوم
۰/۷۳۱۱	۰/۹۳۴	۰/۱۸۸۸	۰/۸۱۲۵	مرحله چهارم
۰/۲۱۲۸	۰/۴۹۷۴	۰/۱۵۲۱	۰/۲۶۷۴	مرحله پنجم
۰/۱۱۰۶	۰/۷۲۷۶	۰/۱۱۶۸	۰/۳۳۱۵	مرحله ششم
۹/۶۳۴۲	۱/۸۲۷۳	۰/۱۲۵۶	۰/۷۴۰۳	مرحله ششم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۳۸- نتایج الگوی حفاری ۳ برای روباره ۸ متر در حالت ( $L1=0.25D, L2=0.75D, L3=0.5D$ )

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۳۸۸۴	۰/۵۲۵	۰/۴۳۵۸	۰/۱۳۲۶	مرحله اول
۰/۵۵۹۸	۰/۹۱۶۲	۰/۶۲۵۴	۰/۵۹۵۳	مرحله دوم
۰/۶۱۲۷	۱/۰۲۱۷	۰/۶۷۲۳	۰/۴۲۲۵	مرحله سوم
۰/۵۰۴۶	۰/۸۷۹	۰/۱۲۵۲	۰/۵۶۷۴	مرحله چهارم
۰/۶۴۲۴	۰/۷۰۸۸	۰/۳۱۱۵	۰/۴۵۳۳	مرحله پنجم
۰/۰۸۱۶	۰/۵۹۷۱	۰/۱۱۰۱	۰/۳۰۲۴	مرحله ششم
۰/۷۷۴۱	۱/۷۹۳۳	۰/۱۱۲۸	۰/۷۵۹۴	مرحله ششم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۳۹- نتایج الگوی حفاری ۴ برای روباره ۸ متر در حالت ( $L1=0.25D, L2=1D, L3=0.75D$ )

مراحل حفاری	حداکثر جابجایی	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
مرحله اول	۰/۳۷۰۴	۰/۴۷۲۹	۰/۵۸۶۳	۰/۴۱۴۳	
مرحله دوم	۰/۷۵۹۳	۰/۶۳۵۴	۰/۹۶۵۳	۰/۵۶۲۳	
مرحله سوم	۰/۵۲۲۷	۰/۶۸۵۷	۱/۲۴۰۶	۰/۹۰۵۷	
مرحله چهارم	۰/۶۱۰۴	۰/۱۴۶۴	۰/۹۲۷۶	۰/۵۴۶۳	
مرحله پنجم	۰/۴۱۵۶	۰/۳۱۶	۰/۶۸۷۹	۰/۶۱۱۲	
مرحله ششم	۰/۲۷۸۳	۰/۰۷۸۷	۰/۵۱۵۵	۰/۱۰۸۸۳	
مرحله ششم با حذف گالری موقت	۰/۶۹۲۶	۰/۰۸۷۶	۱/۵۸۹۸	۰/۷۶۲۲	

جدول ۶-۴۰- نتایج حفاری تمام مقطع با روباره ۱۳ متر

نوع حفاری	$L1=L2=L$	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
تمام مقطع	۴/۵	۰/۸۶۳۴	۲/۳۴۶۶	۲/۹۹۴۶	۱/۲۱۸۱
	۹	۱/۲۷۵۸	۲/۵۲۳۵	۳/۸۶۱۸	۱/۳۴۸۲

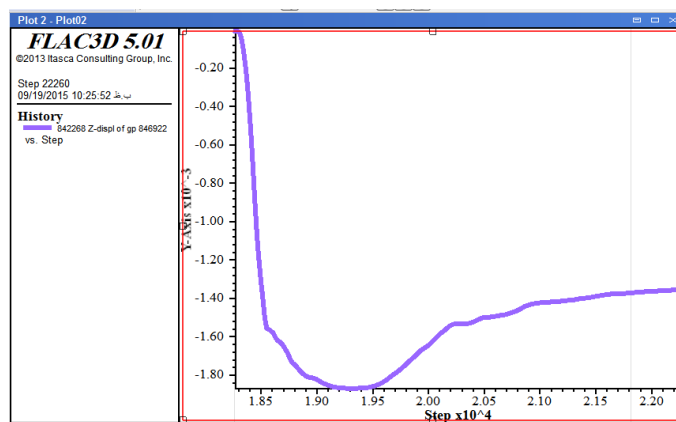
جدول ۶-۴۱- نتایج حفاری تمام مقطع با روباره ۴ متر

نوع حفاری	$L1=L2=L$	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
تمام مقطع	۴/۵	۰/۹۳۲۳	۳/۸۵۱۶	۳/۲۶۲۱	۲/۱۹۴۵
	۹	۲/۰۲۵۸	۴/۲۷۵۰	۲۶/۵۵۰	۲۳/۹۸۷

جدول ۶-۴۲- نتایج حفاری تمام مقطع با روباره ۸ متر

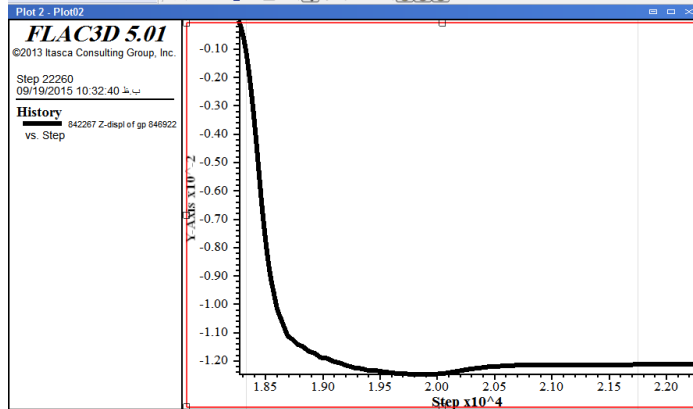
نوع حفاری	$L1=L2=L$	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
تمام مقطع	۴/۵	۰/۵۲۶۲	۱/۵۲۴۳	۰/۹۶۸۱	۰/۵۱۴۸
	۹	۰/۷۸۲۲	۱/۶۵۳۶	۱/۳۳۱۸	۰/۶۱۳۶

تأثیر پوشش نگهداری در مدل‌سازی، به‌وسیله حفاری گالری‌های کناری، حفاری تمام مقطع و ساخت کامل نگهداری به‌وسیله دهانه آزاد مختلف پشت جبهه کار حفاری در حالت  $(L=L2=L1=0.25D, 0.5D)$  و در حالت  $(L1=0.25D, L2=0.75D, 1D, L3=0.75D, 0.5D)$  و در نظر گرفته شد. شکل‌های (۶-۴۱) تا (۶-۴۴) ارزیابی جابجایی عمودی نسبت به فاصله دهانه آزاد مختلف برای نقاطی در سقف تونل در مرحله ساخت چهارم با روباره ۱۳ متر را نشان می‌دهد.

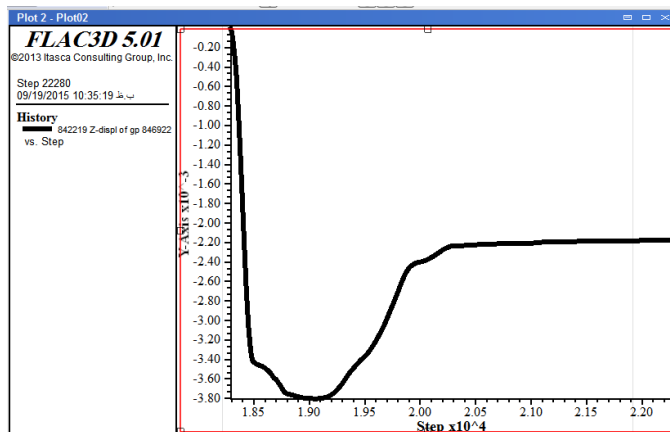


شکل ۶-۴۱- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۱ با روباره ۱۳ متر

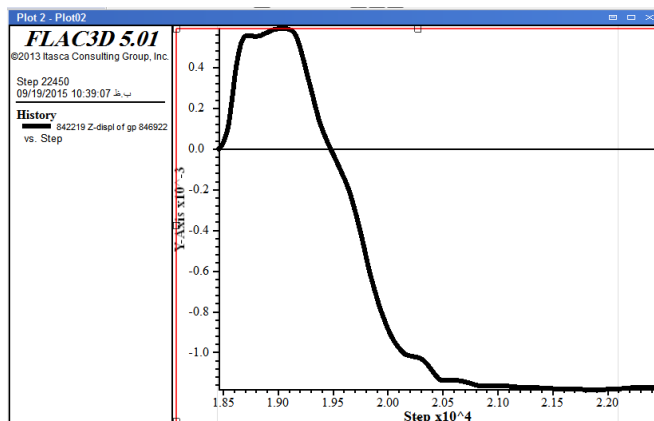




شکل ۶-۴۲- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۲ با روباره ۱۳ متر



شکل ۶-۴۳- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۳ با روباره ۱۳ متر



شکل ۶-۴۴- حداکثر جابجایی عمودی در سقف برای الگوی حفاری ۴ با روباره ۱۳ متر

حداکثر جابجایی عمودی در مرحله چهارم برای الگوهای ۱، ۲، ۳ و ۴ با روباره های ۱۳، ۸ و ۴

متر در جدول (۶-۴۳) خلاصه شده است. همان‌طور که نشان داده شد کاهش دهانه آزاد تا حد زیادی

باعث کاهش حداکثر جابجایی در سقف می‌شود.

جدول ۶-۴۳- مقایسه مقادیر حداکثر جابجایی عمودی در مرحله چهارم برای الگوهای ۱، ۲، ۳ و ۴ با سه روباره

روباره	الگوی حفاری	حداکثر جابجایی عمودی (mm)
۱۳	۱	۱/۸۶
	۲	۱۲/۴
	۳	۳/۸
	۴	۰/۵۹۱
۸	۱	۰/۷۶۹
	۲	۶/۳۴
	۳	۱/۸۷
	۴	۰/۵۵۲
۴	۱	۰/۶۳۴
	۲	۱۲/۴
	۳	۳/۴۵
	۴	۰/۴۰۱

در این بخش چند تحلیل برای بررسی اثر چگونگی پیشروی فرآیند تونل‌زنی انجام شد. چهار توالی حفاری مختلف با توالی‌های متفاوت برای نصب نگهداری، تقسیم بندی جبهه کار و بسته شدن کف مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های (۶-۳۵) تا (۶-۳۸) ارزیابی حداکثر جابجایی عمودی را نشان می‌دهد که برای چهار حالت در این بخش مورد تحلیل قرار گرفت. همانطور که قبلاً اشاره شد، نصب نگهداری و حفاری جزئی جبهه کار جابجایی نهایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین، مواردی باید در هنگام تحلیل نتایج به منظور کاهش جابجایی‌ها گروه بندی شود.

- ۱- با مقایسه الگوهای ۱ و ۲، کاهش فاصله دهانه آزاد حداکثر نشست را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در این حالت کاهش در جابجایی نهایی بیش از ۸۵٪ وقتی که دهانه آزاد از 0.5D تا 0.25D بود محاسبه شد.

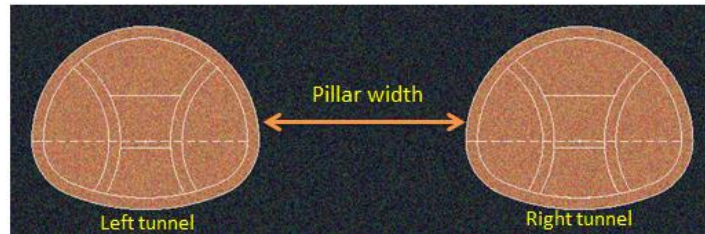
۲- با مقایسه الگوهای ۳ و ۴، توالی جزئی جبهه کار در حفاری و بسته شدن کف متفاوت است. کف با  $0.75D = L2$  در الگوی ۳ و  $1.00D = L2$  در الگوی ۴ بسته می شود تا موقعی که در طی پیشروی دیگری نگهداری شود. پله با  $L3=0.5D$  در الگوی ۳ و  $L3=0.75D$  در الگوی ۴ باقی می ماند. در این حالت باقی ماندن پله در الگوی ۴ جابجایی نهایی را بیش از ۷۰٪ کاهش می دهد.

۳- با مقایسه الگوهای ۱ و ۳، کف با  $0.25D = L2$  در الگوی ۱ و  $0.75D = L2$  در الگوی ۳ بسته می شود. نزدیکتر شدن فاصله نگهداری کامل در الگوی ۱ جابه جایی نهایی را بیش از ۵۰٪ درصد کاهش می دهد.

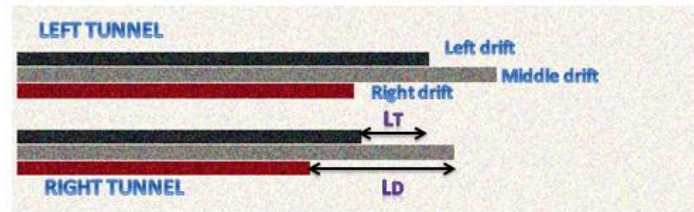
نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که روش حفاری گالری‌های کناری در محدود کردن نشست سطح زمین و همچنین تغییر شکل تونل مؤثر است. همچنین نشان می‌دهد که کاهش فاصله عقب‌ماندگی فازها بین گالری‌های چپ و راست در روش گالری‌های جانبی، تغییر شکل‌های بزرگ‌تر تونل و نشست سطحی زمین را نتیجه می‌دهد که بهترین عملکرد تونل زنی وقتی که فاصله پس فازها بیشتر از یک قطر تونل است به دست می‌آید که با گفته‌های (Chungsik Yoo, 2009) مطابقت خوبی دارد.

## ۶-۶- اثر متقابل دو تونل بر هم

در شهرهای شلوغ، بسیاری از تونل‌های جدید نزدیک یا به موازات تونل‌های موجود طراحی و برنامه‌ریزی شده است. با وجود محبوبیت روزافزون (NATM)، درک تکنیک و دانش استفاده از این روش ساخت در زمین نرم، به‌ویژه برای تونل دوقلوی موازی، هنوز هم به‌طور کامل شناخته‌نشده است. نیاز فوری برای بررسی اثرات سه‌بعدی روش ساخت، برای درک رفتار اثر متقابل بین تونل‌های متعدد در طول ساخت وجود دارد (Tang, D.K.W. 2004).



شکل ۶-۴۵- مقطع عرضی تونل دوقلو (شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۲)



شکل ۶-۴۶- مقطع طولی تونل دوقلو (Tang, D.K.W. 2004)

توالی حفاری تونل دو قلو همانطور که در شکل (۶-۴۵) و (۶-۴۶) نشان داده می شود به شرح

زیر است:

۱- حفر گالری چپ از تونل سمت چپ.

۲- نصب پوشش برای گالری چپ (گالری چپ از تونل سمت چپ)، طول دهانه نگهداری نشده

ثابت  $LU = 4/5$  متر پشت جبهه کار تونل باقی می گذارد.

۳- حفر گالری راست تونل سمت چپ در فاصله پس فاز  $LD = 0.5D$  (۹ متر) در پشت جبهه

کار تونل از گالری سمت چپ.

۴- نصب پوشش گالری راست از تونل سمت چپ،  $LU$  نگهداری نشده همان  $4/5$  متر باقی

می ماند.

۵- حفر گالری چپ از تونل سمت راست در فاصله  $LT = 0.5D$  پشت جبهه کار تونل از گالری

<sup>1</sup> Length Of Unsupported Span Behind The Tunnel Face

<sup>2</sup> Lagged Distance Of Tunnel Subsection Face

<sup>3</sup> Lagged Distance Of Lagging Tunnel

چپ تونل اول؛

۶- نصب پوشش (گالری چپ از تونل سمت راست) تونل دوم، طول نگهداری نشده LU همان

۴/۵ متر را باقی می‌ماند؛

۷- حفر گالری راست از تونل سمت راست در  $0.5D = LD$  پشت جبهه کار تونل از گالری چپ

تونل سمت راست.

۸- نصب پوشش گالری راست از تونل سمت راست (تونل دوم)، LU همان ۴/۵ متر باقی

می‌ماند.

۹- حفر گالری وسط تونل سمت چپ در فاصله  $1D = LD$  پشت جبهه کار تونل از دو گالری

کناری

۱۰- نصب پوشش گالری وسط از تونل سمت چپ، طول دهانه نگهداری نشده ثابت  $LU = 4/5$

متر پشت جبهه کار تونل باقی می‌ماند.

۱۱- حفر گالری وسط تونل سمت راست در فاصله  $1D = LD$  پشت جبهه کار تونل از دو

گالری کناری

۱۲- نصب پوشش گالری وسط از تونل سمت راست، طول دهانه نگهداری نشده ثابت  $LU =$

۴/۵ متر پشت جبهه کار تونل باقی می‌ماند.

مراحل (۱) تا (۱۲) را تکرار تا زمانی که حفاری دو تونل کامل شود.

در این پروژه، دو فاصله پس فاز مختلف (به‌عنوان مثال،  $0.5D = LT$ ،  $1D$ ) بین تونل سمت

چپ (تونل اول) و تونل سمت راست (تونل دوم) مورد مطالعه قرار گرفت (Tang, D. K. W, 2001).

نتایج این تحلیل‌ها در جدول (۶-۴۴) تا (۶-۴۹) قابل مشاهده است.

جدول ۶-۴۴- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۴ متر در حالت  $(0.25D = L1=L2)$  و  $(0.5D = LT)$

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۵۷۳۶	۰/۷۷۴۹	۰/۵۸۰۲	۰/۶۳۳۹	مرحله اول
۰/۶۱۰۳	۱/۱۳۲۲	۰/۶۹۴۴	۰/۷۶۴۳	مرحله دوم
۰/۶۳۴۱	۱/۱۸۵۴	۰/۶۳۹۱	۰/۶۵۳۳	مرحله سوم
۰/۷۱۲۶	۱/۳۷۹۹	۰/۷۷۸۱	۰/۸۵۸۴	مرحله چهارم
۰/۷۳۳۸	۱/۱۸۸۳	۰/۸۲۸۷	۰/۷۴۱۵	مرحله پنجم
۰/۸۲۰۸	۱/۲۲۹۱	۰/۹۳۰۶	۰/۶۶۷۷	مرحله ششم
۰/۶۲۶۷	۱/۱۵۱۱	۰/۶۷۰۷	۰/۴۲۲۸	مرحله هفتم
۰/۸۶۵۲	۱/۴۶۴	۱/۲۰۷	۰/۴۶۵۳	مرحله هشتم
۰/۵۸۸۶	۲/۴۳۶۴	۰/۰۸۵۲	۰/۷۹۷۵	مرحله نهم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۴۵- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۸ متر در حالت  $(0.25D = L1=L2)$  و  $(0.5D = LT)$

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۱۲۱۱	۰/۲۱۰۴	۰/۱۱۹۸	۰/۲۸۱۲	مرحله اول
۰/۲۷۳۳	۰/۳۶۲۳	۰/۳۲۴	۰/۴۳۶	مرحله دوم
۰/۳۰۵۳	۰/۴۰۳۷	۰/۳۵۶۴	۰/۳۷۲۲	مرحله سوم
۰/۴۵۸	۱/۰۴۸۲	۰/۲۸۹	۰/۶۸۴۱	مرحله چهارم
۰/۳۲۸۱	۰/۶۱۷۳	۰/۴۹۱۷	۰/۴۱۶۹	مرحله پنجم
۰/۳۶۸۲	۰/۵۷۱۷	۰/۵۱۸۸	۰/۳۷۰۵	مرحله ششم
۰/۲۱۷۳	۰/۳۸۹۲	۰/۱۹۶	۰/۳۵۲۱	مرحله هفتم
۰/۲۸۱	۰/۴۲۹۷	۰/۱۹۳۷	۰/۳۷۴۵	مرحله هشتم
۱/۰۰۷	۱/۶۴۰۲	۰/۰۷۱۳	۰/۶۶۰۸	مرحله هشتم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۴۶- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۱۳ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(0.5D = LT)$

مراحل حفاری	حداکثر جابجایی	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
مرحله اول	۰/۴۸۶۷	۰/۳۵۳۳	۰/۴۹۵۹	۰/۲۸۹۴	
مرحله دوم	۰/۷۱۲۵	۰/۷۱۷۹	۰/۷۶۹۲	۰/۶۱۰۸	
مرحله سوم	۰/۶۲۰۳	۰/۶۸۲۴	۰/۷۹۹۹	۰/۵۶۸۲	
مرحله چهارم	۰/۹۸۹۲	۰/۷۰۷۳	۱/۴۸۹۵	۰/۷۳۹۱	
مرحله پنجم	۰/۷۱۲۴	۱/۱۹۵۶	۱/۱۳۸۱	۰/۸۰۶۷	
مرحله ششم	۰/۴۸۲۲	۱/۰۴۲۹	۱/۰۱۵۷	۰/۶۶۱۹	
مرحله هفتم	۰/۵۰۵۹	۰/۳۷۵۸	۰/۷۱۹۷	۰/۴۰۵۵	
مرحله هشتم	۰/۵۷۷۴	۰/۴۳۰۲	۰/۸۳۷	۰/۴۸۹۹	
مرحله نهم با حذف گالری موقت	۰/۸۲۲۱	۰/۰۸۱۹	۲/۰۲۵۵	۰/۸۹۳۵	

جدول ۶-۴۷- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۴ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(1D = LT)$

مراحل حفاری	حداکثر جابجایی	جابجایی در راستای X (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای Z (cm)	حداکثر کرنش برشی
مرحله اول	۰/۶۸۴۷	۰/۵۸۴۲	۰/۷۸۵۴	۰/۵۶۹	
مرحله دوم	۰/۸۴۷۹	۰/۸۰۲۳	۱/۱۱۷۱	۰/۵۷۶۴	
مرحله سوم	۰/۸۰۲۶	۰/۷۶۰۶	۱/۲۳۹۴	۰/۶۰۴۵	
مرحله چهارم	۰/۶۷۴۵	۰/۷۷۱۱	۱/۵۲۴۲	۰/۶۸۳	
مرحله پنجم	۰/۴۲۹۳	۰/۴۳۱	۱/۱۱۰۳	۰/۵۵۲۸	
مرحله ششم	۰/۴۷۵۶	۰/۴۸۴۴	۱/۲۳	۰/۵۵۰۳	
مرحله هفتم با حذف گالری موقت	۰/۷۱۰۶	۰/۰۸۱۲	۱/۸۶۷۸	۰/۵۱۰۷	

جدول ۶-۴۸- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۸ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(1D=LT)$

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۱۳۷۵	۰/۲۸۹۸	۰/۱۳۲۲	۰/۳۸۵۲	مرحله اول
۰/۳۳۷۳	۰/۴۲۸۷	۰/۳۶۶۵	۰/۶۳۲۳	مرحله دوم
۰/۳۶۵۱	۰/۵۶۳	۰/۵۰۴۴	۰/۵۰۹۴	مرحله سوم
۰/۳۹۶۹	۱/۲۸۸	۰/۵۴۶	۰/۶۳۸۱	مرحله چهارم
۰/۲۶۳۸	۰/۹۱۲۶	۰/۲۴۲	۰/۳۹۸۲	مرحله پنجم
۰/۳۴۰۴	۰/۷۳۷۸	۰/۲۳۵۳	۰/۴۲۹	مرحله ششم
۱/۰۰۱۸	۱/۶۶۵۸	۰/۰۶۴۴	۰/۶۶۶۲	مرحله هفتم با حذف گالری موقت

جدول ۶-۴۹- نتایج حفر تونل دوقلو برای روباره ۱۳ متر در حالت  $(0.25D=L1=L2)$  و  $(1D=LT)$

حداکثر کرنش برشی	جابجایی در راستای Z (cm)	جابجایی در راستای Y (cm)	جابجایی در راستای X (cm)	حداکثر جابجایی مراحل حفاری
۰/۲۹۹۳	۰/۵۳۰۷	۰/۳۶۲۴	۰/۵۷۳۶	مرحله اول
۰/۶۴۱۴	۰/۸۲۷۸	۰/۷۳۳	۰/۸۲۵۹	مرحله دوم
۰/۷۸۳۶	۱/۰۴۳۲	۱/۱۵۴۱	۰/۷۵۱۷	مرحله سوم
۰/۶۴۲۶	۱/۴۲۳۱	۱/۰۳۵۸	۰/۸۰۴۳	مرحله چهارم
۰/۴۲۵۹	۱/۲۱۴۱	۰/۳۹۵۱	۰/۵۳۹۹	مرحله پنجم
۰/۵۲۹۸	۱/۰۸۰۲	۰/۴۵۹۱	۰/۵۸۸۵	مرحله ششم
۰/۸۷۵۹	۲/۰۵۱۱	۰/۰۶۵۷	۰/۸۴۹۱	مرحله هفتم با حذف گالری موقت

توجه ویژه به اثر فاصله پس فازها بین جبهه کار تونل دوقلوی حفاری شده (LT) و مکانیسم

انتقال بار بین دو تونل پرداخت شده است. پارامترهای مهمی که در این مطالعه در نظر گرفته شده



عبارت‌اند از: عرض ستون<sup>۱</sup> جداکننده دو تونل، ضخامت روباره، شرایط نگهداری و توالی حفاری می‌باشد.

جدول ۶-۵۰- مقایسه جابجایی تونل تکی با تونل دوقلو در حالت  $(0.25D = L1=L2)$

حداکثر جابجایی (cm)	حالت تونل	روباره (m)
۲/۱۷۰۹	تونل تکی LD=0.5D	۱۳
۲/۰۵۳۱	تونل دوقلو LT=1D	
۲/۰۲۸	تونل دوقلو LT=0.5D	
۱/۷۷۱۸	تونل تکی LD=0.5D	۸
۱/۶۶۷۷	تونل دوقلو LT=1D	
۱/۶۴۲	تونل دوقلو LT=0.5D	
۲/۰۱۸۲	تونل تکی LD=0.5D	۴
۱/۸۶۸۸	تونل دوقلو LT=1D	
۲/۴۳۶۷	تونل دوقلو LT=0.5D	

اگر دو تونل مجاور دور از هم به طوری که مناطق تأثیر آن‌ها روی هم نیفتد ساخته شود، سپس تونل‌ها را به صورت انفرادی می‌توان به طور جداگانه به عنوان تونل تکی در نظر گرفت و همین‌طور تحلیل کرد. با این حال، اگر مناطق تأثیر دو تونل باهم همپوشانی (روی هم بیفتد) داشته باشد در جاتی از اثر متقابل بین دو تونل رخ خواهد داد (Ghaboussi J, 1977).

با توجه به جدول (۶-۵۰) در روباره ۴ متر با افزایش LT حداکثر جابجایی کاهش می‌یابد اما

<sup>1</sup> Pillar width

در روباره ۱۳ و ۸ متر با افزایش LT مقادیر جابجایی تقریباً ثابت است. اثر متقابل دو تونل بر حالت تنش و تغییر مکان در اطراف تونل‌ها، جابه‌جایی سطح زمین و بارهای نگهداری تأثیر می‌گذارد. نتایج جدول (۶-۵۰) نشان می‌دهد که اثر متقابل بین دو تونل برای مقادیر نسبت عرض ستون به قطر تونل از  $1 = W/D$  و یا بیشتر ناچیز است.

از آنجاکه فاصله سطح بیرونی دو تونل در نزدیک‌ترین مکان از هم ۱۰ متر و در دورترین مکان ۲۰ متر هست و با توجه به بررسی‌های عددی جهت تعیین حداقل فاصله بین دو تونل حاکی از آن است که با افزایش فاصله دو تونل نسبت به هم مقدار جابجایی‌ها کاهش یافته به طوری که با فاصله بیش از یک برابر عرض تونل (۱۸ متر) به مقادیر ثابتی خواهد رسید. افزایش فاصله دو تونل از هم سبب کاهش قابل توجهی در مقادیر جابجایی‌های تونل اول خواهد شد، ضمن آنکه در این فاصله اثرات اندرکنشی دو تونل بر هم نیز قابل صرف نظر کردن می‌باشد. در نتیجه می‌توان حداقل فاصله‌ای معادل با یک برابر عرض تونل (۱۸ متر) را به عنوان فاصله بهینه برای تونل‌های دو قلووی بزرگراهی مورد نظر در نظر گرفت. که با گفته‌های معادینخواه و همکارانش (۱۳۹۳) مطابقت خوبی دارد.

#### ۶-۷- تحلیل پایداری بعد از نصب سیستم نگهداری

پس از نصب سیستم نگهداری و تعیین مقدار جابجایی در توده سنگ و خاک اطراف تونل‌ها، لازم است تا با توجه به نتایج به دست آمده وضعیت پایداری تونل‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

مطابق جداول (۶-۵۱ تا ۶-۵۳) ماکزیمم جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری در روباره ۱۳ متر برای گالری‌های کناری ۵/۱۶۱۱ و ۱۸/۵ سانتی‌متر و بعد از نصب نگهداری برابر با ۰/۷۷۸۰ و ۲/۱۷۰۹ سانتی‌متر، در روباره ۸ متر قبل از نصب سیستم نگهداری برای گالری‌های کناری ۴/۲۶۰۹ و ۱۰/۳۸۲ سانتی‌متر و بعد از نصب نگهداری برابر با ۰/۵۰۵۷ و ۱/۷۷۱۸ سانتی‌متر و در آخر در روباره ۴ متر قبل از نصب نگهداری برای گالری‌های کناری ۴/۶۵۲۵ و ۱۳/۳۵۰ سانتی‌متر و بعد از نصب نگهداری برابر با ۰/۸۱۵۵ و ۲/۰۱۸۲ سانتی‌متر شده است.

بر اساس وضعیت جابجایی‌های اطراف تونل قبل و بعد از نگهداری مشاهده می‌شود که نگهداری نصب‌شده کارایی مناسبی را از خود نشان می‌دهد.

جدول ۶-۵۱- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روبراه ۱۳ متر بعد از نصب نگهداری

جابجایی حفاری تمام مقطع به ازای حفر ۹ متر از طول تونل (cm)	جابجایی مرحله آخر با حذف میان‌بند در حالت $L1=0.25D, L2=0.25D$ (cm)	جابجایی مرحله آخر بدون حذف میان‌بند در حالت $L1=0.25D, L2=0.25D$ (cm)	جابجایی مجاز برحسب کرنش بحرانی (cm)	کرنش بحرانی $\varepsilon_{cr}$ (%)	E Kgf/cm <sup>2</sup>
۳/۸۶۴۲	۲/۱۷۰۹	۰/۷۷۸۰	۲۳/۰۲۲	۲/۵۵	۹۲۹/۷
			تراز هشدار خطر I		
۳/۸۶۴۲	۲/۱۷۰۹	۰/۷۷۸۰	۹/۸۱۹	۱/۰۹	۹۲۹/۷
			تراز هشدار خطر II		
۳/۸۶۴۲	۲/۱۷۰۹	۰/۷۷۸۰	۴/۱۸۵	۰/۴۶۵	۹۲۹/۷
			تراز هشدار خطر III		

جدول ۶-۵۲- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۸ متر بعد از نصب نگهداری

جابجایی حفاری تمام مقطع به ازای حفر ۹ متر از طول تونل (cm)	جابجایی مرحله آخر با حذف میان‌بند در حالت $L1=0.25D, L2=0.25D$ (cm)	جابجایی مرحله آخر بدون حذف میان‌بند در حالت $L1=0.25D, L2=0.25D$ (cm)	جابجایی مجاز برحسب کرنش بحرانی (cm)	کرنش بحرانی $\epsilon_{cr}$ (%)	E Kgf/cm <sup>2</sup>
۱۱/۵۵۰	۱/۷۷۱۸	۰/۵۰۵۷	۲۳/۰۲۲	۲/۵۵	۹۲۹/۷
				تراز هشدار خطر I	
۱۱/۵۵۰	۱/۷۷۱۸	۰/۵۰۵۷	۹/۸۱۹	۱/۰۹	۹۲۹/۷
				تراز هشدار خطر II	
۱۱/۵۵۰	۱/۷۷۱۸	۰/۵۰۵۷	۴/۱۸۵	۰/۴۶۵	۹۲۹/۷
				تراز هشدار خطر III	

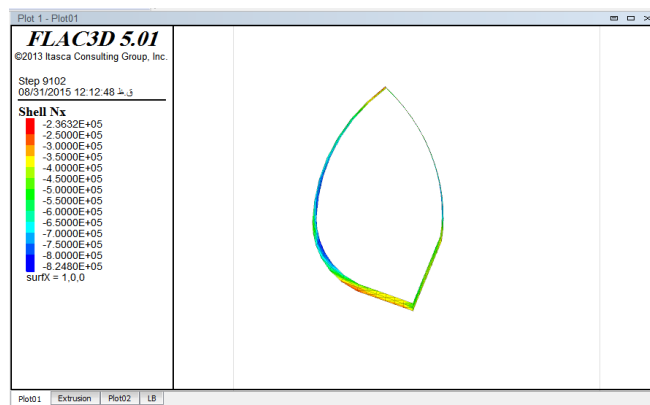
جدول ۶-۵۳- مقادیر کرنش‌ها و همگرایی‌های بحرانی با روباره ۴ متر بعد از نصب نگهداری

جابجایی حفاری تمام مقطع به ازای حفر ۴/۵ متر از طول تونل (cm)	جابجایی مرحله آخر با حذف میان‌بند در حالت $L1=0.25D, L2=0.25D$ (cm)	جابجایی مرحله آخر بدون حذف میان‌بند در حالت $L1=0.25D, L2=0.25D$ (cm)	جابجایی مجاز برحسب کرنش بحرانی (cm)	کرنش بحرانی $\epsilon_{cr}$ (%)	E Kgf/cm <sup>2</sup>
۴۹/۹۷۳	۲/۰۱۸۲	۰/۸۱۵۵	۲۴/۴۸	۲/۷۲	۷۷۳/۱
				تراز هشدار خطر I	
۴۹/۹۷۳	۲/۰۱۸۲	۰/۸۱۵۵	۱۰/۴۴	۱/۱۶	۷۷۳/۱
				تراز هشدار خطر II	
۴۹/۹۷۳	۲/۰۱۸۲	۰/۸۱۵۵	۴/۴۶	۰/۴۹۵	۷۷۳/۱
				تراز هشدار خطر III	

## ۸-۶- تجزیه و تحلیل نتایج بعد از نصب سیستم نگهداری اولیه تونل

## ۸-۶-۱- ارزیابی نتایج لاینینگ تونل با روباره ۱۳، ۸ و ۴ متری

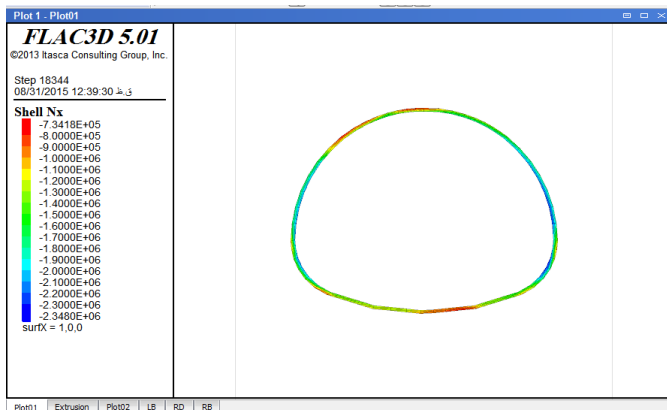
نیروها و گشتاور خمشی به وجود آمده در مقطع سیستم نگهداری اولیه در سه حالت حفاری گالری چپ، راست، وسط و در حالت مرحله نهایی که منجر به حفر کل فضا می شود برای روباره ۱۳، ۸ و ۴ متری در شکل های (۶-۴۷) تا (۶-۶۳) آمده است.



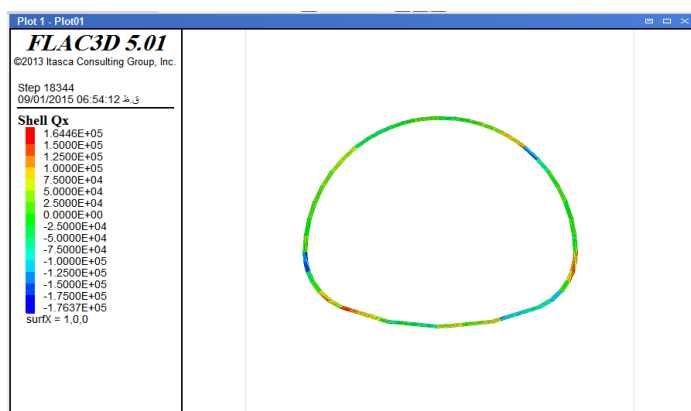
شکل ۶-۴۷- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، گالری چپ (روباره ۱۳)



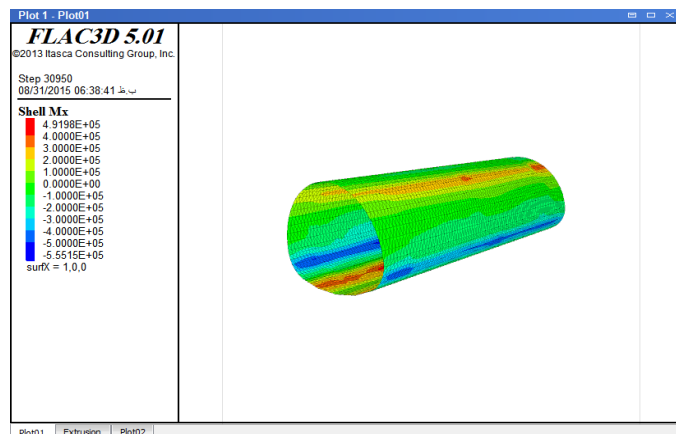
شکل ۶-۴۸- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، گالری راست و چپ (روباره ۱۳)



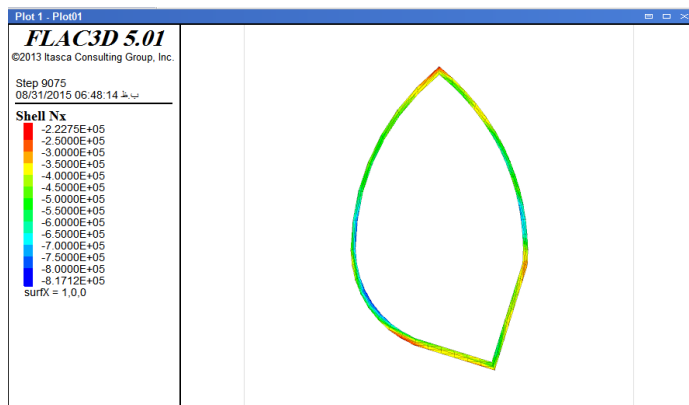
شکل ۶-۴۹- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۱۳)



شکل ۶-۵۰- نیروی برشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۱۳)



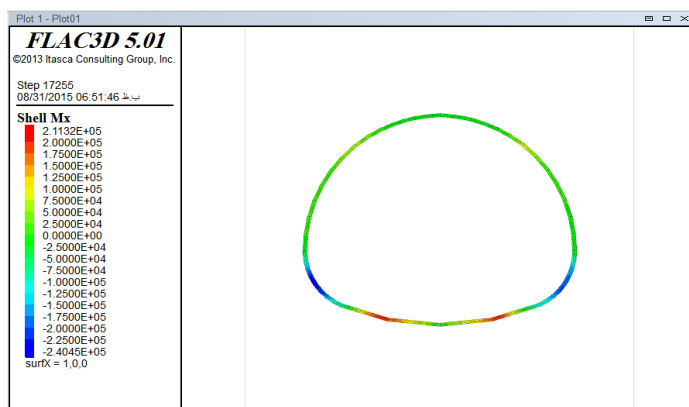
شکل ۶-۵۱- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه بعد از اتمام حفاری (روباره ۱۳)



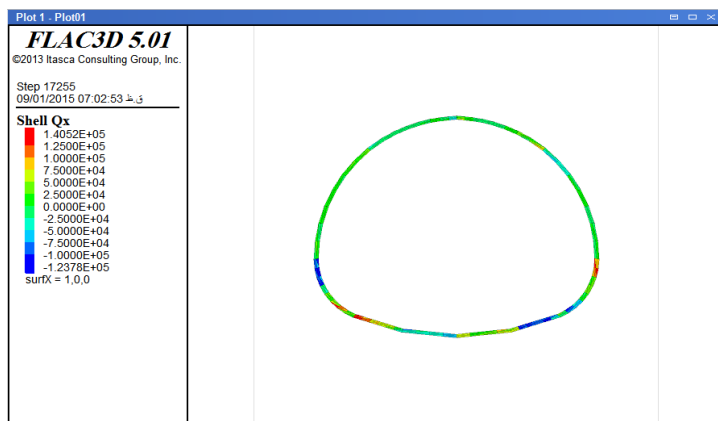
شکل ۶-۵۲- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، گالری چپ (روباره ۸)



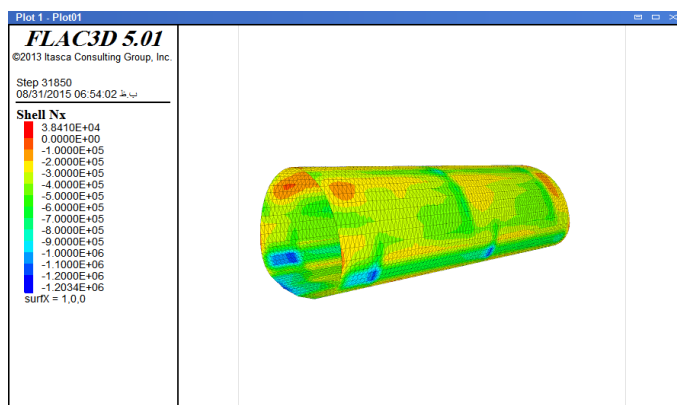
شکل ۶-۵۳- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، گالری راست و چپ (روباره ۸)



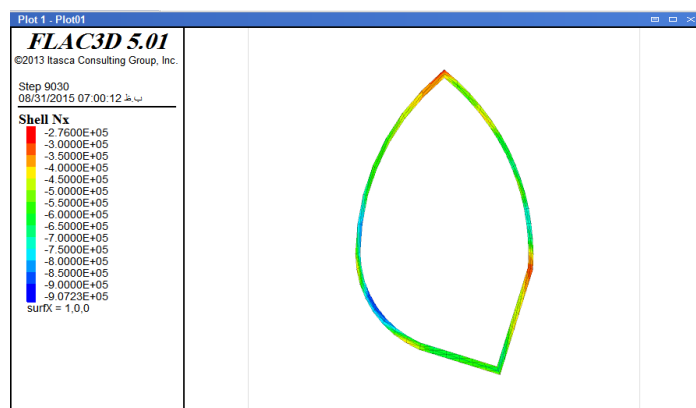
شکل ۶-۵۴- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری‌ها (روباره ۸)



شکل ۶-۵۵- نیروی برشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری ها (روباره ۸)



شکل ۶-۵۶- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه بعد از اتمام حفاری (روباره ۸)

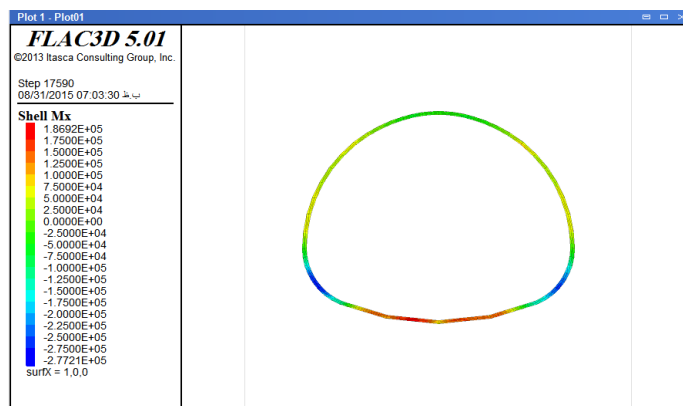


شکل ۶-۵۷- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه، گالری چپ (روباره ۴)

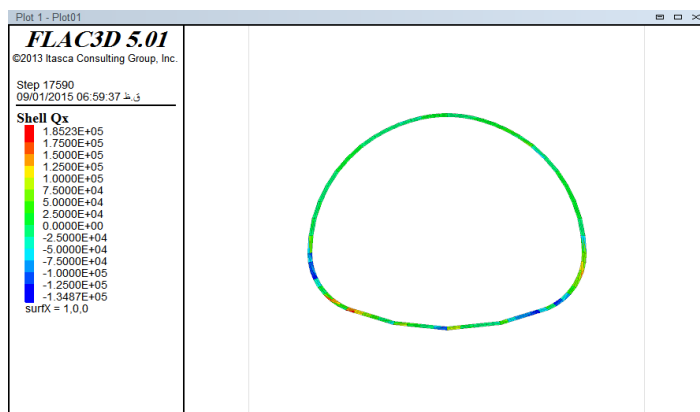




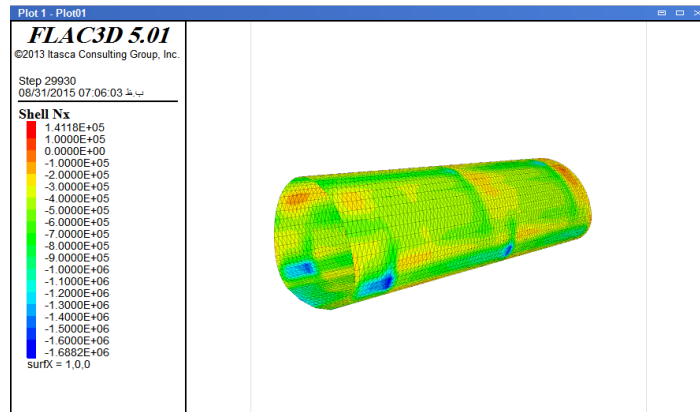
شکل ۶-۵۸- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، گالری راست و چپ (روباره ۴)



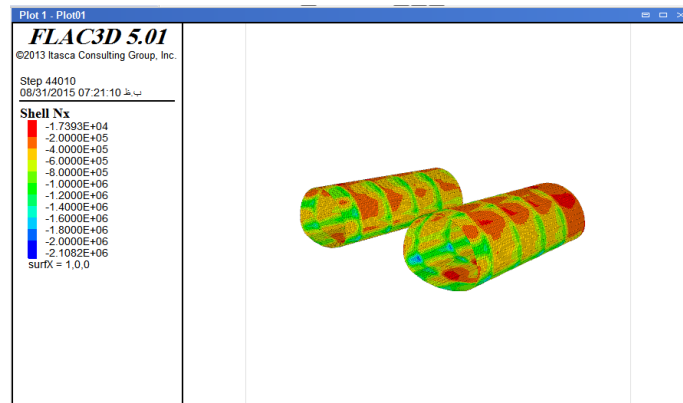
شکل ۶-۵۹- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری‌ها (روباره ۴)



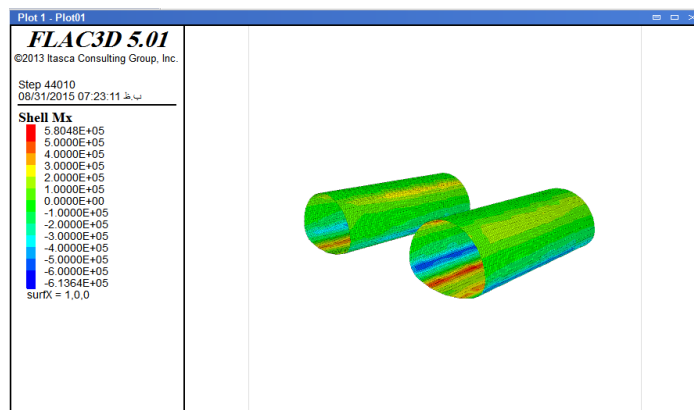
شکل ۶-۶۰- نیروی برشی وارد بر پوشش اولیه، بعد از اتمام گالری‌ها (روباره ۴)



شکل ۶-۶۱- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه بعد از اتمام حفاری (روباره ۴)



شکل ۶-۶۲- نیروی محوری وارد بر پوشش اولیه در تونل دوقلو



شکل ۶-۶۳- گشتاور خمشی وارد بر پوشش اولیه در تونل دوقلو

ماکزیمم نیروهای محوری و لنگرهای خمشی سیستم نگهداری ترکیبی برای تونل در

جداول (۵۴-۶) تا (۵۶-۶) درج شده است.

جدول ۶-۵۴- ماکزیمم نیروهای محوری و لنگرهای خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳)

پارامتر	گالری راست و چپ	اتمام گالری ها	گالری چپ	اتمام حفاری
P(KN)	۱۰۷۰/۷	۲۳۴۸	۸۲۴/۸	۲۲۲۲
M(KN.M)	۳۲۲/۱۹	۲۸۶/۱۹	۳۱۵/۲۹	۴۹۱/۹۸

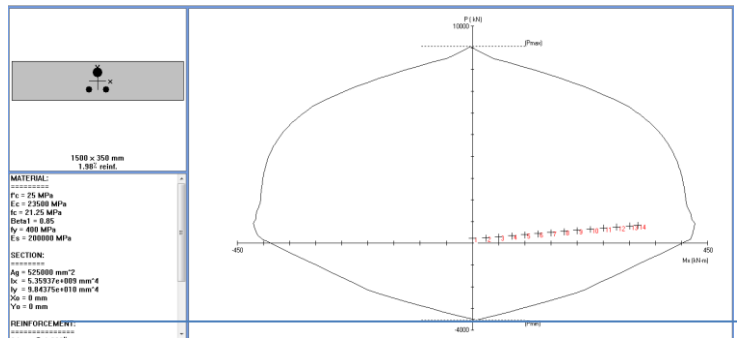
جدول ۶-۵۵- ماکزیمم نیروهای محوری و لنگرهای خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۸)

پارامتر	گالری راست و چپ	اتمام گالری ها	گالری چپ	اتمام حفاری
P(KN)	۸۳۳/۱۹	۱۷۹۱	۸۱۷/۱۲	۱۲۰۳
M(KN.M)	۳۳۱/۰۲	۲۴۰/۴۵	۳۱۵/۲۹	۳۹۲/۵۵

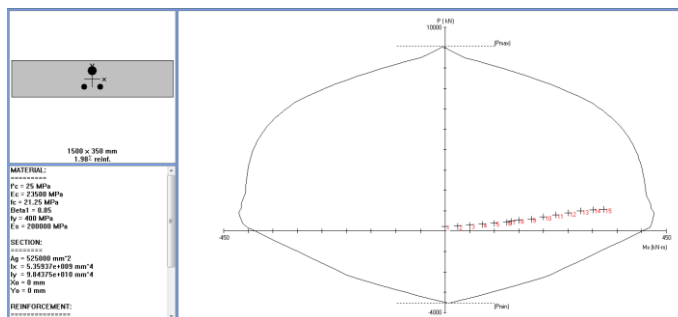
جدول ۶-۵۶- ماکزیمم نیروهای محوری و لنگرهای خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۴)

پارامتر	گالری راست و چپ	اتمام گالری ها	گالری چپ	اتمام حفاری
P(KN)	۹۱۷/۶۰	۱۸۰۴/۵	۹۰۷/۲۳	۱۶۸۸/۲
M(KN.M)	۴۶۰/۳۵	۲۷۷/۲۱	۴۷۱/۹۲	۴۸۸/۱۲

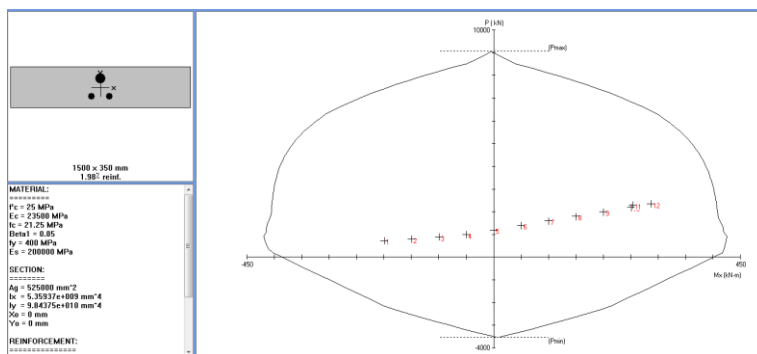
به منظور کنترل نیروها و گشتاور خمشی ایجاد شده در مقطع پوشش اولیه تونل، از روش تنش مجاز استفاده شده است. با مدل سازی مقطع مورد نظر و اعمال نیروی محوری و گشتاور خمشی (محاسبه شده توسط نرم افزار  $FLAC^{3D}$ ) در نرم افزار PCACOL، مقدار ضریب اطمینان را می توان برای مراحل مختلف حفاری محاسبه کرد. نتایج این بررسی ها برای مقطع پوشش اولیه که تحت تاثیر نیروی محوری و لنگر خمشی قرار گرفته در شکل (۶-۶۴) تا (۶-۷۲) نشان داده شده است.



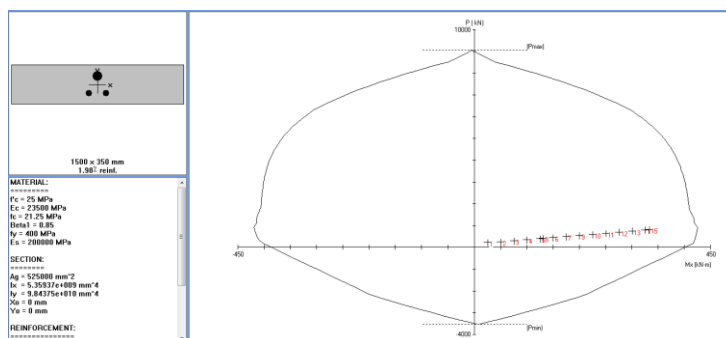
شکل ۶-۶۴- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳ متر)



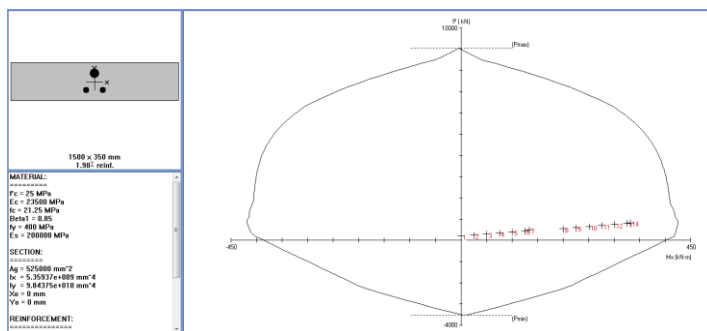
شکل ۶-۶۵- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳ متر)



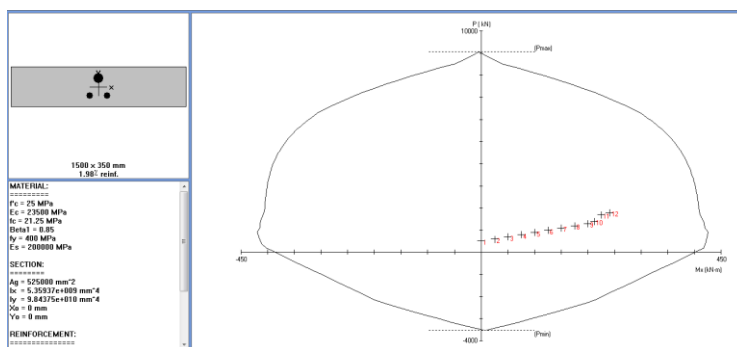
شکل ۶-۶۶- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۱۳ متر)



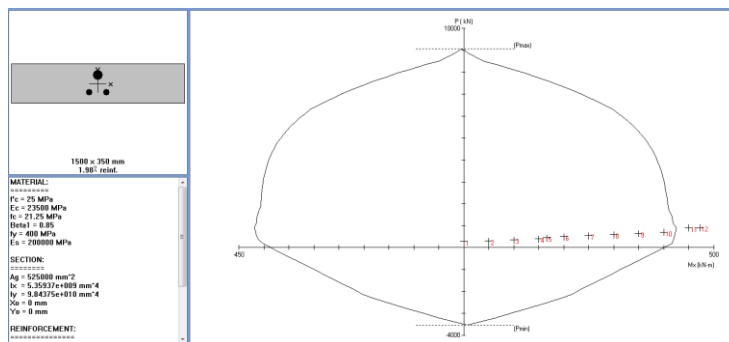
شکل ۶-۶۷- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۸ متر)



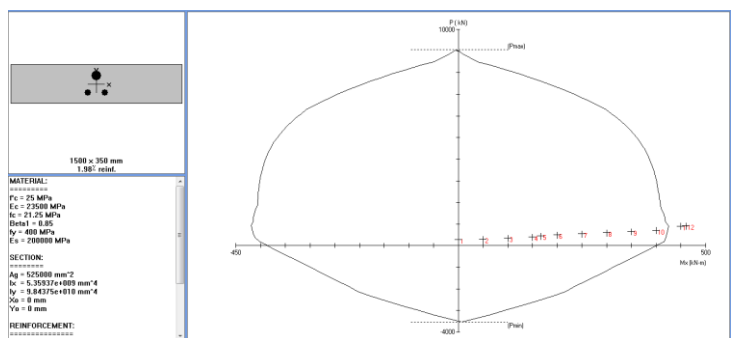
شکل ۶-۶۸- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روپاره ۸ متر)



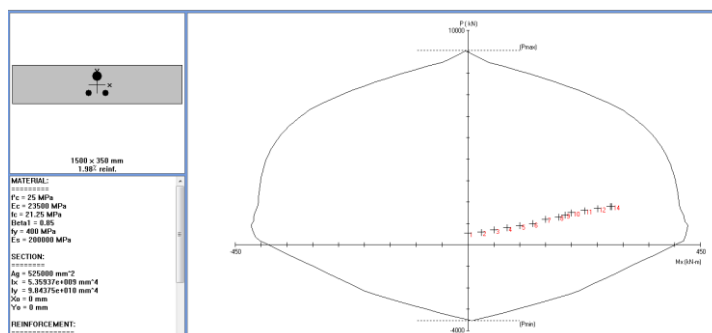
شکل ۶-۶۹- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روپاره ۸ متر)



شکل ۶-۷۰- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روپاره ۴ متر)



شکل ۶-۷۱- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روپاره ۴ متر)



شکل ۶-۷۲- نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی سیستم نگهداری ترکیبی (روباره ۴ متر)

لتیس با  $2\Phi 22 + 1\Phi 32$  با فواصل طولی ۱ متر جوابگوی تنش‌های محوری وارد بر مقطع (گالری چپ، راست و وسط) برای روباره ۱۳، ۸ و ۴ متر خواهد بود.

ظرفیت برشی مجاز  $V_c$  طبق آیین‌نامه ACI318-99 به دست می‌آید. جدول (۶-۵۷) مقادیر حداکثر نیروهای برشی نگهداری ترکیبی برای سه روباره را نشان می‌دهد. برای کنترل نیروهای برشی در پوشش از رابطه (۶-۱۵) تا (۶-۱۷) استفاده شده است.

جدول ۶-۵۷- مقادیر حداکثر نیروهای برشی نگهداری ترکیبی برای سه روباره

روباره	V(KN)
۱۳	۱۷۶/۳۷
۸	۱۴۰/۵۲
۴	۱۸۵/۲۳

$$V_t = V_c + V_s \quad (۱۵-۶)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (۱۶-۶)$$

$$V_s = 0.34 \times f_y \times A_s \quad (۱۷-۶)$$

در این رابطه  $V_t$  مقاومت برشی یک مقطع مسلح،  $V_c$  مقاومت برشی تامین شده توسط بتن و  $V_s$  مقاومت برشی تامین شده توسط فولاد می‌باشد. برای محاسبه مقاومت برشی بتن و فولاد می

توان از رابطه (۶-۱۶) و (۶-۱۷) استفاده کرد (قدیری ذ، ۱۳۸۹).

در رابطه (۶-۱۶)،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن و  $b_w$  و  $d$  به ترتیب عرض و ارتفاع مقطع تحت برش می باشند. در رابطه (۶-۱۷)،  $f_y$  و  $A_s$  به ترتیب مقاومت تسلیم فولاد و سطح مقطع تحت برش می باشد.

برای کنترل نیروی برشی در مقطعی از جنس شاتکریت به ارتفاع ۳۵ سانتی متر و عرض ۱/۵ متر به همراه لتیس با  $2\phi 22 + 1\phi 32$  با فواصل طولی ۱ متر استفاده شده است.

با توجه به روابط بالا نیروی برشی بتن  $437/5$  کیلو نیوتن و نیروی برشی فولاد  $21/31$  کیلو نیوتن به دست می آید. با توجه به مجموع هر دونیرو مقطع طراحی شده برای نیروهای برشی برای روبره ۱۳، ۸ و ۴ متر جوابگو است.

به منظور اعمال سیستم نگهداری تونل در مدل عددی از سیستم نگهداری معادل استفاده شد. پس از مدل سازی و اعمال این سیستم نگهداری در مدل عددی، ارتباط میان گشتاور خمشی و نیروی محوری تونل برای سیستم نگهداری ترکیبی برای حفاری کامل مقطع تونل به دست آورده شد. همان طوری که مشاهده می شود، مقادیر گشتاور خمشی و نیروی محوری تونل در درون منحنی اثر متقابل نیروی محوری-گشتاور خمشی قرار دارد و شکست کششی یا فشاری در نگهداری تونل اتفاق نمی افتد. در نتیجه با توجه به این شکل ها سیستم نگهداری به خوبی ایمنی تونل را تأمین نموده و تونل پایدار خواهد بود.

پس از مدل سازی عددی تونل با نرم افزار  $FLAC^{3D}$ ، تحلیلی از وضعیت پایداری آن به عمل آمد و در نهایت سیستم نگهداری پیشنهادی که ترکیبی از لتیس و شاتکریت می باشد، تحلیل شد و به خوبی پایداری تونل را تأمین نمود و نتیجه گرفته شد که با توجه به نگهداری اعمال شده، تونل پایدار خواهد بود.

## ۶-۸-۲- اعتبار سنجی روش عددی تفاضل محدود توسط داده‌های ابزار دقیق (پین

## ژئودتیک)

در این قسمت اطلاعات حاصل از ابزاربندی با جابجایی‌های به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی موردبررسی قرار گرفته‌اند تا بر این اساس نیز بتوان یک قضاوت مهندسی انجام داد.

جهت بررسی و اعتبار سنجی مدل‌های عددی، از مقادیر ثبت‌شده داده‌های ژئودتیک نصب‌شده در تونل استفاده‌شده که جهت تحقق یافتن این امر مقادیر جابجایی سقف و کف سه گالری چپ، راست و وسط در مدل‌های عددی و نتایج ابزار با یکدیگر مقایسه گردیده و سپس نتایج حاصله در جدول (۶-۵۸) ارائه‌شده است.

جدول ۶-۵۸- مقایسه جابجایی‌های مدل عددی و ابزار دقیق در حالت ( $L1=0.25D, L2=1D, L3=0.75D$ )

روپاره (m)	جابجایی مدل عددی (mm)	نتایج ابزار (mm)
۱۳	۲۸/۳۳۱	۲۸
۸	۱۵/۸۹۸	۱۴
۴	۲۴/۴۹۰	۲۹

همان‌طور که از جدول (۶-۵۸) مشخص می‌باشد، مقادیر جابجایی به‌دست‌آمده توسط داده‌های ژئودتیک و مدل‌های عددی تطابق نسبتاً خوبی با یکدیگر دارند. اختلاف جزئی بین دو روش می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد که مهم‌ترین آن نصب دیر هنگام ابزار بوده است؛ زیرا با توجه به این نکته که ۳۰ درصد جابجایی‌ها زمان حفر جبهه کار به وجود می‌آید، لذا مناسب‌ترین زمان نصب ابزار، زمان حفاری جبهه کار می‌باشد که می‌توان رفتار توده خاک اطراف را در حین و بعد از حفاری بررسی نمود که در این پروژه ابزار نصب‌شده بیشتر جهت کنترل و بررسی رفتار توده خاک بعد از حفاری و کارایی سیستم نگهداری اولیه بوده است. همچنین به علت نزدیکی روباره ۴ متر به سطح زمین (ورودی پرتال‌ها و قسمت‌های ابتدایی تونل) جابجایی‌های بیشتری را نسبت به دو روباره دیگر نشان می‌دهد.



دهد و حالت بحرانی تونل در نظر گرفته شد.

روباره ۱۳ متر به علت فشار محصور کننده زیاد بعد از روباره ۴ متر بیشترین جابجایی‌ها را نسبت به روباره ۸ متر نشان می‌دهد.

در مدل‌سازی عددی مدل رفتاری موهر کلمب، مطابقت بسیار خوبی با نتایج ابزار نصب‌شده از خود نشان داده است. به طوری که حداکثر جابجایی ثبت‌شده توسط ابزار در روباره ۱۳، ۸ و ۴ متر به ترتیب ۲۸، ۱۴ و ۲۹ میلی‌متر بوده که این مقدار توسط مدل عددی به ترتیب در روباره‌های ۱۳، ۸ و ۴ متر ۲۸/۳۳۱، ۱۵/۸۹۸ و ۲۴/۴۹۰ میلی‌متر است. با توجه به مقدار خطای مجاز ابزار که حدود ۲۰٪ درصد می‌باشد، می‌توان درستی مدل ساخته‌شده را تأیید نمود.





## فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادها

---



## ۷-۱- نتیجه‌گیری

- محدوده تونل مورد مطالعه از نظر ساختاری بخشی از زون البرز می‌باشد. در مسیر تونل نهشته‌های سازند A و C وجود دارند. نهشته‌های سازند C بیشتر در رمپ‌های دسترسی و قسمت‌های ابتدایی تونل برونزد دارند بقیه مسیر تونل در داخل نهشته‌های سازند A قرار دارد. در مسیر تونل هیچ‌گونه قناتی وجود ندارد. البته به موازات تونل و در سمت شمال شرق آن یک رشته قنات وجود دارد. عمق آب زیرزمینی در محدوده تونل بیش از ۹۰ متر است ولی آب‌های نفوذی از سطح زمین ممکن است در بخش‌هایی از مسیر تونل نشت نماید.

- مطالعات ژئوتکنیکی تکمیلی تونل توسط موسسه مهندسی مشاور ساحل با همکاری مرکز مطالعات ژئوتکنیک مقاومت مصالح شهرداری تهران انجام شده است. برای بررسی شرایط زیرسطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک موجود در مسیر تونل، آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است.

- با توجه به جداول و نمودارهای موجود و همچنین ابعاد مقطع و مشخصات خاک دربرگیرنده تونل، دو روش گالری‌های جانبی و روش دیافراگم میانی برای حفاری تونل در نظر گرفته شد. به دلیل مزایایی مانند سهولت عملیات اجرایی و راندمان بالاتر و همچنین کنترل بهتر رفتار زمین و همچنین بر اساس ابعاد و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مسیر تونل، روش‌های مختلف تقسیم‌بندی مقطع مورد مقایسه قرار گرفته و بر اساس جداول و نمودارهای به دست آمده از تجربیات تونل‌سازان، روش مناسب که استفاده از روش گالری‌های جانبی می‌باشد، انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفته و در نهایت پیشنهاد و اجرا شده است.

- روش نصب و راه‌اندازی قاب‌های مشبک به شدت به شرایط زمین‌شناسی و نحوه استقرار آن‌ها مربوط می‌شود. قاب‌های مشبک را می‌توان به‌عنوان یک نگهداری موقت سنگ برای ایمن‌سازی محیط کار امن‌تر برای کارگران در سینه کار استفاده کرد یا به‌عنوان بخشی از پوشش نگهداری دائم سنگ در

نظر گرفت؛ که روش نصب به صورت زیر است:

شاتکریت لایه سوم → مش لایه دو نصب → شاتکریت لایه دوم → لتیس یا قاب کارگذاری  
→ مش لایه اول → شاتکریت لایه اول → حفاری

- برخی از روش‌های مربوطه برای کنترل جابجایی‌ها قراردادی و نسبتاً مهم هستند که حالتی از نتایج عددی است. این روش‌ها شامل اثر سه‌بعدی حفاری، اهمیت نصب نگهداری (استفاده از روش مقطع معادل، فاصله نگهداری نشده بین جبهه کار حفاری و نصب پوشش نگهداری، بسته شدن قوس کف، فعال‌سازی کامل نگهداری و ... است)، اهمیت حفاری جزئی جبهه کار، تعیین طول بهینه گام حفاری، تعیین فاصله بهینه بین جبهه کارهای مختلف حفاری و اثر متقابل دو تونل بر هم می‌باشد.

- با افزایش سربار طول دهانه پایدار نیز افزایش می‌یابد. به علاوه طول دهانه ریزشی در روبراه کم سریع‌تر رخ می‌دهد، با توجه به اینکه فشار محصورکننده کم است.

- کاهش دهانه آزاد تا حد زیادی باعث کاهش حداکثر جابجایی در سقف می‌شود. همچنین از بین دو حالت  $L1=L2=0.25D$  و  $L1=0.25D, L2=0.75D, L3=0.5D$  حالت دوم جابجایی کمتری را در سقف نشان می‌دهد که این امر به دلیل باقی گذاشتن پله در جبهه کار است.

- با توجه به شکل، حداقل و حداکثر جابجایی در بالای مرکز تونل برای طرح‌های حفاری (A) تا (F) محاسبه شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی، طرح حفاری (A) دارای کمترین میزان جابجایی و به عنوان طرح بهینه حفاری پروژه تونل حکیم انتخاب شد.

- برای تعیین طول بهینه گام حفاری در اغلب موارد، هر چه اختلاف بین دو طول گام قسمت فوقانی و تحتانی کمتر باشد، اختلاف بین جابجایی‌ها و روند تغییرات کمتر می‌شود.

- با توجه به بررسی‌های عددی جهت تعیین حداقل فاصله بین دو تونل حاکی از آن است که با افزایش فاصله دو تونل نسبت به هم مقدار جابجایی‌ها کاهش یافته به طوری که با فاصله بیش از یک

برابر عرض تونل (۱۸ متر) به مقادیر ثابتی خواهد رسید.

- به‌منظور اعمال سیستم نگهداری تونل در مدل عددی از سیستم نگهداری معادل استفاده شد. پس از مدل‌سازی و اعمال این سیستم نگهداری در مدل عددی، ارتباط میان گشتاور خمشی و نیروی محوری تونل برای سیستم نگهداری ترکیبی برای حفاری کامل مقطع تونل به دست آورده شد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مقادیر گشتاور خمشی و نیروی محوری تونل در درون منحنی اثر متقابل نیروی محوری-گشتاور خمشی قرار دارد و شکست کششی یا فشاری در نگهداری تونل اتفاق نمی‌افتد.

- با توجه به نتایج رفتار سنجی و مدل‌سازی عددی می‌توان درستی مدل ساخته‌شده را تأیید نمود.

## ۲-۷- پیشنهادها

- پیشنهاد می‌شود که در حفاری تونل با روباره ۴ متر به علت بزرگ بودن جابجایی‌ها و ناپایداری تونل بعد از حفر آن یک‌لایه خاک در قسمت بالایی تونل که همان خاک تقویت‌شده به‌وسیله تزریق در کارگاه می‌باشد، قرار دهیم.

- در تونل‌های بزرگ‌راهی به‌جای مش بندی از الیاف فولادی استفاده شود. تسلیح شاتکریت با توری فولادی و الیاف فولادی روشی است که برای جلوگیری از ترک در شاتکریت اجراشده و به دلیل پایین بودن مقاومت کششی اجرا می‌گردد.

- از سیستم پوشش تک پوسته‌ای استفاده شود. در این روش با امکان ایجاد اتصال کامل میان پوشش اولیه و ثانویه، امکان ایجاد پوششی یکپارچه در زمان تحویل لاینینگ نهایی فراهم می‌آید.



## منابع فارسی

- اسدی م.، سلمانی طامه م ر.، ۱۳۸۸ "کنترل جابجایی زمین در حفاری تونل با روش NATM" دومین همایش ملی سدسازی.
- جمع‌بندی گزارش مطالعات ژئوتکنیک پروژه تونل دوقلوی بزرگراهی حکیم تهران (تونل چیتگر)، شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، (۱۳۹۲).
- جلالی، م.ا.، ۱۳۸۱، "مروری بر مسائل مکانیک سنگ"، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران.
- چشمی، ا.، فاخرع.، خامه چیان م.، ۱۳۸۵، "زمین شناسی آبرفت های تهران و ارزیابی طبقه بندی ریبین جهت مطالعات زمین شناسی مهندسی"، مجله علوم دانشگاه تهران.
- دهقان ع ن.، ۱۳۹۲، "انتخاب طرح مناسب سامانه نگهداری اولیه تونل متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی" نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی.
- علی ن.، ۱۳۸۸ "تحلیل عددی تونل‌های راه‌آهن اصفهان-شیراز و بررسی نتایج حاصله با استفاده از داده‌های ابزار دقیق" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.
- علی ن.، قیامی ر.، ۱۳۹۲ "تحلیل پایداری تونل راه‌آهن اصفهان-شیراز با استفاده از داده‌های همگرایی سنجی و مدل‌سازی عددی" دهمین کنفرانس ملی تونل.
- قدیری ذ.، ۱۳۸۹ "تحلیل پایداری مترو خط ۲ قطار شهری کرج با استفاده از نتایج رفتارسنجی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کرمی م.، ابره ب.، ۱۳۹۱ "آموزش کاربردی نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>" ورژن ۴.

- گزارش مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی پروژه تونل دوقلوی بزرگراهی حکیم تهران (تونل چیتگر)، شرکت مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۹۲).
- گزارش رفتار سنجی ژئودتیکی - ژئوتکنیکی پروژه تونل دوقلوی بزرگراهی حکیم تهران (تونل چیتگر)، پروژه طرح و ساخت تونل حکیم، موسسه حرا، (۱۳۹۲).
- گزارش تحلیل و طراحی پوشش موقت تونل اصلی تیپ A پروژه تونل دوقلوی بزرگراهی حکیم تهران (تونل چیتگر)، شرکت مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار، (۱۳۹۲).
- گزارش تحلیل و طراحی پوشش موقت تونل اصلی تیپ B پروژه تونل دوقلوی بزرگراهی حکیم تهران (تونل چیتگر)، شرکت مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار (۱۳۹۲).
- مدنی ح.، ۱۳۷۹، "تونل سازی جلد سوم"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- مدنی ح.، ۱۳۸۱، "تونل سازی جلد چهارم"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- معادیخواه ع.، جاودان ر.، محمد نژاد م.، ۱۳۹۲ "طراحی روش حفاری مرحله‌ای در احداث تونل‌ها به روش کلاسیک در زمین‌های سست، مطالعه موردی: پروژه خط A متروی قم" دهمین کنفرانس ملی تونل.
- معادیخواه ع.، جاودان ر.، محمد نژاد م.، ۱۳۹۳ "بررسی اندرکنش و تعیین فاصله بهینه تونل‌های دوقلوی بزرگراه حکیم تهران (تونل چیتگر) با استفاده از تحلیل عددی" پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- نجات دهکردی ف.، بخشنده امنیه ح.، ۱۳۹۱ "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل شماره دو گردنه رخ با استفاده از روش‌های تجربی و عددی" اولین کنفرانس فناوری‌های معدن کاری ایران.

## منابع خارجی

- Baumann Th. & Betzle M. 1984. Investigation of the Performance of Lattice Girders in Tunnelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 17, pp 67-81.
- Carranza-Torres, C. and Diederichs, M.S. 2009. "Mechanical analysis of a circular liner with particular reference to composite supports –e.g., liners consisting of shotcrete and steel sets," Submitted for review and publication to *Tunneling and Underground Space Technology* (Accepted and in press - Feb 2009).
- Chungsik Yoo, 2009. "Performance of multi-faced tunnelling – A 3D numerical investigation". *Tunnelling and Underground Space Technology* 24 562–573.
- C.W.W. Ng, K.M. Lee, D.K.W. Tang, 2004, "*Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions*". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, pp. 523-539.
- Dehghan, A. N., Shafiee S. M., Rezaei F., (2012) "3-D stability analysis and design of the primary support of Karaj metro Tunnel:Based on convergence data and back analysis algorithm" *Engineering Geology* 141-142 (2012) 141–149.
- Farias, M.M., Moraes, A.H., Assis, A.P., 2004. Displacement control in excavated by the NATM: 3-D numerical simulations. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 19, 283–293.
- GHaboussi J, RANKEN E. R, 1977. " INTERACTION BETWEEN TWO PARALLEL TUNNELS ". Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign,Urbana, Illinois, U.S.A.
- Hjalmarsson, E.H.(2011). Tunnel Support, use of lattice girders in sedimentary rock. 30 ECTS thesis submitted in partial fulfilment of a *Magister Scientiarum* degree in Civil Engineering.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M.S., Corkum, B., 2008. Integration of geotechnical and structural design in tunnelling. In: *Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference*, 29 February 2008. Minneapolis, pp. 1–53. Available for downloading at Hoek's Corner.

<[www.roscience.com](http://www.roscience.com)>.

- Hock E., Carranza-Torres C., Corkum B.,(2002), "*Hock- Brown Failure Criterion- 2002 Edition*", In: Hammah R., Bawden W., Curran J., Telesnicki M., Proceeding of NARMSTAC2002, Mining Innovation and Technology. Toronto, 10 July2002, University Toronto, pp. 267-273.

- <https://www.dywidag.co.uk>,

- Itasca,(2011),FLAC3D," **Fast Lagrangian Analysis of continua in 3 Dimensional**"Version 5.01,Users Manual. Itasca Consulting Goup, Inc.

-Jorimann. (2010). *JB-Gittertrager*. Walenstadt: Jorimann Stahl-Tunnelbau.

-Karakus M., Fowell R J., (2003)"Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM" Tunneling and Underground Space Technology .pp513-523.

- Komselis, C. Blayney, N. Hindle, D. 2005. "The use of lattice girders in the construction of tunnels", London, UK: London mining and Mineral Consultants LTD.

- Kovari, K., 1994. On the existence of the NATM: erroneous concepts behind the new Austrain tunneling method. Tunnel, 16–25.

- Kovari, K., 1994. On the existence of the NATM: erroneous concepts behind the new Austrain tunneling method. Tunnel, 16–25.

- Palmstöm, A., & Nilsen, B. (2000). Engineering Geology and rock Engineering. Oslo,Norway: NBG.

- Pan XD., Hudson J., (1988), "Plane Strain Analysis In Modeling Three Dimensional Tunnel Excavation", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Geomechanics Abstract, pp. 331-337.

- Sakuraie S., (1990), "Interpretation of Field Measurement in Tunneling Practice", 9th ISRM Conference on Rock Mechanics, Paris.

- Sigh, Bhawani, Goel, Rajnish K.,(2006), "*Tunneling in Weak Rocks*", UK., Elsevier Geo. Engineering Book Series, Vol.5,pp. 230- 235.

- Sakurai S., Takeuchi K., (1983), “*Back Analysis in Measurements in Tunneling*”, Rock Mechanics and Eng. 16, 173-180.
- Sharifzadeh, M., Kolivand, F., Ghorbani, M., Yasrobi, S.H., 2013. Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground – Niayesh tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 178–188.
- Sharifzadeh, M., Daraei R., Boojerdi M. S., 2012. Design of sequential excavation tunneling in weak rocks through findings obtained from displacement based back analysis, *Tunneling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 28, pp. 10-17.
- Sakurai S., (1997), “Lesson Learned from Field Measurements in Tunneling”, *Tunneling and underground space technology*, Volume 12, Issue 4, page 453-460.
- Tang, D.K.W. 2001. Numerical studies of multiple NATM tunnel interaction in soft ground. M.Phil. thesis, Department of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- Tang, D.K.W., Lee, K.M., and Ng, C.W.W. 1999. Stress paths around a 3D numerically simulated NATM tunnel in stiff clay. *In Proceedings of the 2nd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Tokyo. Edited by O. Kusakabe, K. Fujita, and Y. Miyazaki. A.A.Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Vol. 1. pp. 443–449.*
- Xiang Ch., Zhaoyuan S, Jinying Z, (2008) "Selection of excavation methods for large cross-section tunnels on passenger-dedicated Railways", *World Tunnel Congress, India.*
- Yu, C.W. & Chern, J.C., (2007), "Expert system for D&B tunnel construction", *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises - Taylor & Francis Group, London.*
- Young-Zoo Lee, Wulf Schubert, Chang-Yong, K, 2005." The influence of the round length on the stability of tunnel face and unsupported span". *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future – Erdem & Solak (eds) © 2005 Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537 452 9.*

- Young-Zoo Lee, Wulf Schubert, 2008." *Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock*". Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 221-231.

## Abstract

In many countries, tunnels in soils and rocks are constructed by using the New Austrian Tunneling Method NATM. Hakim highway twin tunnels with a length of about 1000 meters, has been constructed by the traditional method. Useful width of the way has been considered 14.5 m and allowed longitudinal slope has been taken 5%. The tunnel has been implemented with approximate width of 17.9 meters and a height of 13.9 meters by means of the NATM method in seven stages with side drifts (SD) methods.

The aim of this thesis is the stability analysis of the highway tunnels, temporary support design, and control of structures displacement. In this study, stability analysis of tunnels was performed by using the Sakurai hazard warning level, numerical method and instrumentation results. Finally combination support system was proposed by using the equivalent sections method for the studied tunnel.

Induced displacements are empirically controlled by adjusting the speed of excavation, distance between tunnel face and support, partial-face excavation and closure of invert. In this thesis, by using the finite difference method, the impact of round length, optimum excavation sequence, excavation patterns and interaction of two tunnels were investigated. According to the results, whatever the difference between the round length of the roof and bench in each drift be lesser then the difference between the displacements and trends will be lesser. Results show that the rapid closure of the supporting ring and the excavation stage of the central gallery (middle drift) are the most important factors in controlling tunnel deformations and surface settlements in soft ground tunneling. The rapid ring closure by adopting a larger excavation volume is more effective than adopting a smaller excavation volume for limiting the tunnel crown deformations and surface settlements in soft ground tunneling at shallow depth if the face stability is adequately maintained. Four different patterns were analyzed with different sequences. According to the results, reducing the free span distance greatly reduces maximum displacements. In this case remaining bench of the final displacement decreased of more than 70%. Closer full support activation distance reduces final displacements more than 50%. If two adjacent tunnels are constructed far apart such that their influence zones do not overlap, then the individual tunnels can be considered separately as single tunnels and analyzed as such. special attention was paid to the influence of lagging distance between the twin tunnel excavated faces (LT) and the load-transfer mechanism between the two tunnels. As well as the interaction between two tunnels becomes negligible for values of the pillar width to tunnel diameter ratio of  $W/D = 1.0$  or greater. Finally, to control and bear the displacement around the tunnel by considering the different elements of the FLAC3D software and modeling them in the Situation of area, suitable support system was determined for tunnels, and Safety factors of support system was obtained by PCACOL software.

Key words: FLAC<sup>3D</sup>, NATM excavation method, Sakurai hazard warning level, Hakim Tunnel, equivalent sections method



**University of Shahrood**

**Faculty of Mining Engineering, Petroleum and  
Geophysics**

**Master of Science in Rock Mechanics  
Engineering**

**Stability analysis and design of primary  
support in Chitgar (Hakim) tunnel**

**Mostafa  
salehi sheikhi**

**Supervisor: Professor.S.R.Torabi**

**September 2015**



