

## کاربرد روش تونل کاری کم عمق برای حفاری کراس اور در خاک‌های ضعیف (مطالعه موردی: متروی شیراز)

آرمین مقبلی اسکویی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، ایران  
حامد عجم زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ایران  
سید محمد منصورزاده\*، مربی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران  
رضا اسمعیل پور قمشلو، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.mansoorzadeh@bhrc.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۷/۰۴ - پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۶۰-۴۵

### چکیده

روش های مختلفی برای حفر تونل ها ابداع و مورد استفاده قرار گرفته اند. این روش ها به طور عام دارای نقاط مشترک بوده ولی در اجرا، هر کدام از آنها با هم تفاوت داشته و ویژگی های مربوط به خود را دارا می باشند. همواره با در نظر گرفتن کاهش ریسک، هزینه و زمان، باید بهترین روش برای حفاری تونل انتخاب و اجرا گردد. انتخاب روش بهینه برای حفر تونل مستلزم شناخت کامل روش های حفاری و پارامترهای تأثیرگذار بر آنها می باشد. از جمله پارامترهای مهم که باید مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد می توان به مشخصات هندسی، مشخصات زمین شناسی و ژئومکانیکی، شرایط پروژه و زیرساخت های موجود، زمان اتمام پروژه و مسائل زیست محیطی را نام برد. همچنین پیش بینی و کنترل نشست هم از لحاظ ایمنی و هم از نقطه نظر اقتصادی از اهمیت قابل توجهی در مناطق شهری برخوردار است. در سال های اخیر، استفاده از تونل کاری در عمق کم برای حفاری فضاهای زیرزمینی از جمله ایستگاه مترو و فضاهای مشابه در خاک های مختلف مورد توجه قرار گرفته که به دلیل عدم ایجاد خلل در ترافیک، در فضاهای شهری مورد علاقه می باشد. تونل کاری در عمق کم و در خاک ضعیف، STM نام گذاری می شود. استفاده از این روش در فضاهای شهری می بایست از نظر نشست در سطح زمین و اثرات آن بر سازه های روی زمین به طور دقیق ارزیابی گردد. مطابق طرح خط ۲ قطار شهری شیراز، در حد فاصل ایستگاه رحمت و دولت بین دو خط ریل اصلی مسیر، یک تقاطع دو طرفه (کراس اور) ایجاد می گردد. طول این تقاطع حدود ۱۳۶/۵ متر و عمق روباره آن حدود ۷/۵ و دهانه آن حدود ۲۲ متر می باشد. این مقاله به انتخاب روش حفاری مناسب جهت اجرای کراس اور به روش کم عمق، با استفاده از مدلسازی عددی و با به کارگیری نرم افزار FLAC3D می پردازد. هدف از مدلسازی عددی به روش سه بعدی، بررسی دقیق میزان نشست حین اجرا و تعیین بهترین روش اجرا با کمترین میزان نشست می باشد. روش های مختلفی با تقسیم بندی های متفاوت جهت حفاری کراس اور مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت دو روش قابل استفاده در این مقاله ارائه و بهترین روش با کمترین میزان نشست به عنوان گزینه برتر معرفی گردید. بر اساس مدلسازی های انجام شده، حداکثر میزان نشست در سطح زمین با استفاده از گزینه برتر برابر ۲/۵۸ سانتیمتر تخمین زده شد.

واژه های کلیدی: روش تونل کاری کم عمق، تونل کاری در خاک ضعیف، کراس اور، FLAC3D، نشست سطح زمین

### ۱- مقدمه

سطحی مانند تونل ها و ایستگاه های مترو و تونل های ترافیکی نیز بیشتر احساس می شود. روش مدرن تونل زنی که در برابر روش های سنتی حفر تونل ها به ویژه در زمین های سست قرار می گیرد در واقع پاسخی به مسائل و مشکلات برخاسته از

امروزه تونل های شهری و متروها به عنوان یکی از کلیدی ترین و مهم ترین زیرساخت های شبکه حمل و نقل شهری به شمار می آیند. هرچه شهرها بزرگتر و شلوغ تر و به تبع آن فضای سطحی محدودتر شده، نیاز به ایجاد فضاها و سازه های زیر

پرتراکم شهری در چین استفاده می‌شود. در حین ساخت پروژه Fuxingmen مشخص شد که اگرچه تکنیک‌های ساخت حفاری مرحله‌ای در خاک نرم و خاک سخت، کم و بیش با هم یکسان است، تونل کاری کم عمق در زمین‌های نرم بسیار متفاوت از سنگ می‌باشد. بنابراین با نام روش تونل کاری کم عمق (Shallow tunnelling method) برای جدا کردن آن از روش NATM معرفی گردید. اگرچه سازه‌های زیرزمینی زیادی با این روش در دنیا ساخته شده است ولی مقالات کمی با این عنوان در ژورنال‌ها به چاپ رسیده است (Xiang et al., 2005; Fang et al., 2011).

## ۲- پیشینه تحقیق

مسیر خط ۲ راه آهن شهری شیراز از میدان سعدی در شمال شیراز شروع شده، خط ۱ را در میدان امام حسین قطع کرده و در امتداد خیابان انقلاب اسلامی به سمت میدان امیرکبیر و از آنجا در امتداد بلوار عدالت به سمت میدان قهرمانان ادامه می‌یابد و از این میدان به سمت غرب تغییر جهت داده و پس از ایستگاه‌های قهرمان و شکوفه به دپو می‌رسد. این خط با طولی حدود ۱۴/۱ کیلومتر شامل ۱۳ ایستگاه (۱۰ ایستگاه اصلی و ۳ ایستگاه توسعه شمالی) است. در حد فاصل ایستگاه رحمت و دولت بین دو خط ریل اصلی مسیر، یک تقاطع دو طرفه (Crossover) ایجاد می‌گردد. طول این تقاطع حدود ۱۳۶/۵ متر و عمق روباره برابر ۷/۵ متر است. هدف از این مقاله بررسی روش اجرای این سازه زیرزمینی به صورت حفاری مرحله‌ای و با در نظر داشتن ترتیب مراحل اجرا می‌باشد. با توجه به عمق روباره کم و ضعیف بودن خاک محدود، روش اجرای در نظر گرفته شده از نوع حفاری مرحله‌ای به روش تونل کاری کم عمق شناخته می‌شود.

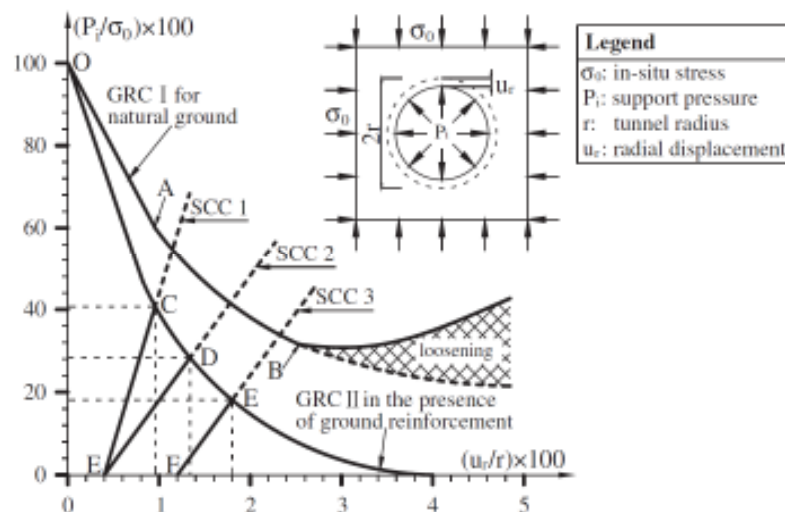
روشهای قدیمی می‌باشد (Tonon, 2010). به تدریج اصلاحات و تغییرات زیادی طی سال‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی در روش سنتی احداث تونل به وجود آمد.

به این ترتیب روش جدیدی ارائه شد که کاربرد وسیعی در حفاری چند مرحله‌ای تونل پیدا کرده و به نام NATM مصطلح گردید. نام این روش در سال ۱۹۶۲ در سالزبورگ و جهت تمییز دادن از روش قدیمی تونلسازی اتریشی ابداع گردید. نخستین ارائه دهندگان این روش، رابسونج، مولر، پاچر و سالزبورگ بودند.

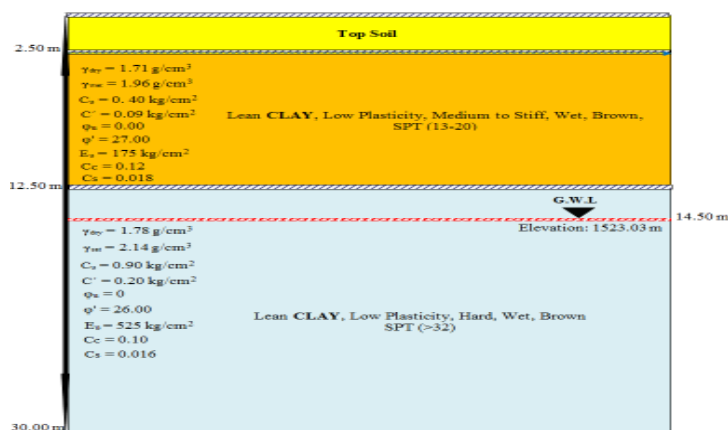
ایده نخستین این روش استفاده از فشارهای زمین در برگیرنده جهت مقاوم سازی و نگهداری تونل می‌باشد. از اصول مورد قبول این روش، فعال کردن مقاومت زمین به حداکثر مقدار ممکن با استفاده از تغییر شکل‌های کنترل شده می‌باشد (Sauer, 1988, Brown, 1981, Will, 1989 Health and Safety Executive, 1996). با وجود رویکردهای مختلفی که در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد، هنوز اختلاف نظرهایی وجود دارد (Karakus and Fowell, 2004 - Kolymbas, 2005).

یکی از بحث‌ها، مناسب بودن روش NATM برای خاک‌های نرم می‌باشد (Brown, 1981). بر اساس نظر انستیتو مهندسی عمران (ICE) هرگونه کاربرد NATM در زمین‌های نرم شامل دو اصل اساسی می‌باشد:

۱) گام‌های حفاری باید به اندازه کافی از لحاظ طول و زمان کوتاه باشد. ۲) کامل کردن سیستم نگهداری مخصوصا به صورت یک رینگ بدون تاخیر انجام شود. با توجه به اینکه این دو مولفه سازگار با فلسفه اصلی NATM نمی‌باشد، ICE عنوان متفاوتی را به صورت لاینینگ بتنی شاکرتیتی ((Sprayed Concrete Lining (SCL)) به جای NATM برای زمین‌های نرم استفاده کرده است (ICE, 1996). استفاده از روش تونل کاری کم عمق به صورت گسترده برای ساخت ایستگاه‌ها در محیط‌های



شکل ۱. شماتیک منحنی اندرکنش زمین و نگهداری معمول (Qian Fang et al., 2012)



شکل ۲. پارامترهای مهندسی خاک جهت طراحی در حد فاصل ایستگاه دولت تا رحمت

### ۳- اطلاعات فنی در زمینه روش STM

اثر قوس زدگی محتمل‌ترین پدیده در خاک می باشد که در اجرا و آزمایشگاه دیده می شود (Terzaghi, 1943). در اثر قوس زدگی، ارتفاع زون سست در بالای سقف تونل در اثر حفاری تونل برابر  $D$  (ارتفاع زون قوس زده) به جای  $H$  (عمق روباره) می باشد. اثر قوس زدگی نقش مهمی در کاهش بار بر روی سیستم نگهداری در تونل های عمیق دارد. در تونل های کم عمق، اثر قوس زدگی نمی تواند به صورت کامل در بالای تونل توسعه یابد تا خاصیت خود نگهداری برای حفاری را تامین کند. بنابراین در این شرایط سیستم نگهداری بخش عظیم بار ناشی از خاک بر روی خود را تحمل می کند. فلسفه NATM بر اساس بسیج مقاومت زمین با اجازه به تغییر شکل آن می باشد. در روش STM نشست زمین باید بصورت جدی کنترل شود به جای اینکه به زمین اجازه جابجایی داده شود. این امر اهمیت بسیار زیادی برای تونل های کم عمق در محیط های شهری دارد که نشست های زیاد باعث ایجاد آسیب های جدی بر روی سازه های سطحی می شود. بنابراین پارامتر کلیدی برای STM کنترل تغییر شکل زمین برای اطمینان از پایداری تونل و ایمنی محیط اطراف می باشد. روش همگرایی - همجواری ابزار مهمی برای ارزیابی اولیه همگرایی ها و نگهداری مورد نیاز در شرایط مختلف زمین شناسی می باشد (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000; Oreste, 2003) (شکل ۱).

- نگهداری صلب با زمان نصب کم: شاتکریت با زودگیر به همراه دو لایه مش و لئیس برای سیستم نگهداری اولیه استفاده می‌شود.

- تکمیل رینگ نگهداری در کوتاه‌ترین زمان: لازم است تا رینگ نگهداری اولیه در کوتاه‌ترین فاصله از سینه کار تکمیل گردد. که در اکثر موارد از کف بند موقت بدین منظور استفاده می‌شود.

- مونیتورینگ منظم جابجایی‌ها: مونیتورینگ جابجایی‌ها در پروژه‌های تونل باید بصورت مرتب در سطح زمین و داخل تونل انجام شود (Qian Fang et. al., 2012).

با توجه به مطالب گفته شده در این بخش تفاوت اصلی روش NATM و STM که بسیج مقاومت زمین با اجازه دادن به انجام تغییرشکل می‌باشد، مشخص می‌شود. روش STM از تکنیک‌های NATM استفاده کرده ولی لزوماً از فلسفه NATM استفاده نمی‌کند.

### ۳-۲- مقایسه روش‌های حفاری تونل‌های کم عمق

استفاده از هرکدام از روش‌های حفاری مکانیزه، کند و پوش و STM دارای مزایا و معایبی بوده که برخی از آنها به‌منظور مقایسه و به‌طور مختصر در جدول ۱ ارائه شده است (Hanhua Zhu et. al., 2017).

### ۳-۳- وضعیت ژئوتکنیکی زمین در مسیر تونل

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک، آزمایشات صحرایی از جمله آزمایش‌های نفوذ استاندارد، دانسیته صحرایی و پرسیمتری در سایت و آزمایش‌های آزمایشگاهی فیزیکی شامل دانه‌بندی، هیدرومتری، حدود اتربرگ، تعیین درصد رطوبت بر روی تمامی نمونه‌های اخذ شده و همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی مقاومتی شامل تک محوری، برش مستقیم، تحکیم و سه محوری بر روی برخی از نمونه‌های اخذ شده بصورت دست‌نخورده و بازسازی شده و با رطوبت طبیعی انجام گرفته است. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده فوق، وضعیت لایه‌بندی زمین و پارامترهای مهندسی خاک جهت طراحی کراس اور درحد فاصل ایستگاه دولت و رحمت در شکل ۲ ارائه شده است.

با استفاده از تکنیک‌های خاص حفاری، STM امکان حفاری تونل در شرایط زمین‌های سست از قبیل سیلت، رس، ماسه و گراول را فراهم می‌کند. دو پیش شرط پایداری سینه کار و شرایط تونل کاری خشک در زمان استفاده از روش STM باید تامین شود. به طور کلی خود نگهداری تونل‌های کم عمق در خاک‌های سست بسیار محدود می‌باشد. بنابراین، باید از روش‌های مختلف مانند استفاده از پیش نگهداری و یا پوزه خاک برای افزایش زمان خود نگهداری استفاده کرد. برای تونل‌های کم عمق در زیر سطح ایستایی یا زمین‌های دارای آب، شرایط تونل کاری خشک باید تامین گردد. شرایط تونل کاری خشک برای تامین پایداری سینه کار که در اثر جریان آب و افزایش تنش موثر از بین می‌رود، مورد نیاز می‌باشد. همچنین تونل کاری در شرایط خشک باعث بهبود محیط کار، افزایش راندمان کار و کاهش زمان نصب نگهداری می‌شود. در عمل این دو شرط همیشه قابل دستیابی نبوده و لذا استفاده از روش‌های کمکی ضروری می‌باشد (Qian Fang et. al., 2012).

### ۳-۱- اصول روش STM

روش حفاری در این حالت شامل حفاری پله ای، روش حفاری تونل پیشرو، روش دیافراگرام میانی و روش استفاده از ستون‌های مرکزی می‌باشد. با توجه به اینکه روش STM عمدتاً در محیط‌های شهری با تراکم سطحی زیاد استفاده می‌شود، اولین هدف این روش کنترل تغییرشکل زمین برای اطمینان از پایداری تونل و ایمنی محیط می‌باشد. اصول زیر برای این روش بر اساس تجارب مهندسی به دست آمده است.

- استفاده از روش‌های کمکی مناسب: روش‌های کمکی مناسب باید بعد از ارزیابی کارایی آنها، تاثیر هزینه ای و سازگاری آنها با شرایط خاص تونل انتخاب شود.

- حفاری مرحله ای با گام‌های حفاری کم: حفاری باید در بخش‌های کوچکتر بطوری که کنترل سینه کار آسان تر باشد، انجام شود. ارتفاع هر بخش بین ۲/۵ تا ۶ متر و ارتفاع پله‌های حفاری بین ۱/۵ تا ۳ متر تغییر می‌کند. گام‌های حفاری باید محدود به فاصله لئیس‌های نصب شده باشد که می‌تواند در حدود ۰/۵ تا ۰/۷۵ متر باشد.

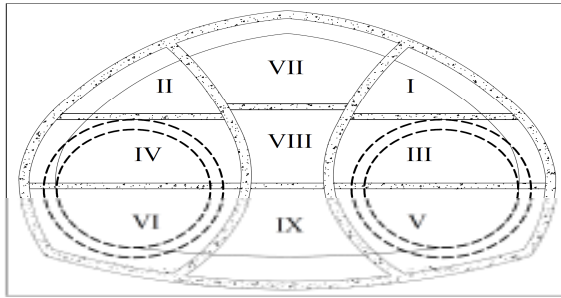
#### ۴- انتخاب روش مناسب حفاری

جهت حفاری تونل‌ها در خاک ضعیف و با مقاومت کم، بخصوص در مورد تونل‌ها با مقطع نسبتاً بزرگ، امکان حفاری کل مقطع تونل در یک مرحله (Full Face Excavation) به دلایلی از قبیل امکان رخدادهای ریزش، مسایل مربوط به نشست‌های غیرمجاز در سطح زمین، غیراقتصادی بودن عملیات و ... مقدور نمی‌باشد. دو راهکار متداول در اینگونه موارد، بکارگیری روش‌های بهسازی زمین جهت بهبود پارامترهای مقاومتی زمین و افزایش پایداری و استفاده از روش‌های حفاری مرحله‌ای بوده که طبق شرایط یک و یا ترکیبی از این دو راه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور اجرای کراس اور رحمت-دولت روش حفاری مرحله‌ای در نظر گرفته شده‌است. با توجه به ضعف خاک محدوده و عمق روباره کم روش در نظر گرفته شده از نوع STM بوده و می‌بایست تمهیدات خاصی در حین اجرای این

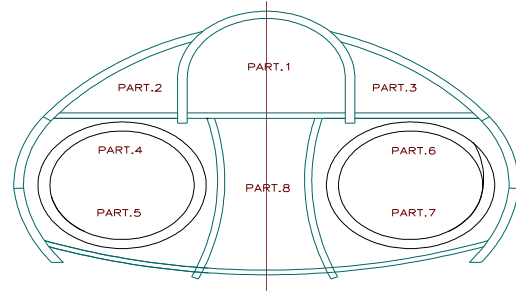
روش در نظر گرفته شود. در روش‌های حفاری مرحله‌ای، مقطع حفاری به چند مقطع کوچکتر تقسیم شده و پیشروی جبهه‌کار تونل طی چند مرحله صورت می‌گیرد. تقسیم بندی مقطع بر اساس ابعاد مقطع تونل و شرایط ژئوتکنیکی زمین، به روش‌های مختلفی می‌تواند انجام شود. روش پله‌ای، روش دیافراگم میانی، روش گالری‌های کناری، روش برش حلقه ای و روش آلمانی برخی از روش‌های حفاری مرحله‌ای می‌باشند. جهت انتخاب مراحل مناسب حفاری، دو حالت متفاوت حفاری در نظر گرفته شده و با استفاده از مدل‌سازی عددی، بر اساس شرایط خاک و ابعاد دهانه حفاری، روش مناسب انتخاب شده است. در شکل ۳ هندسه کراس اور و بخش بندی مراحل اجرا برای دو حالت نمایش داده شده‌است. در ادامه مراحل اجرای هر دو حالت براساس شماره بخش معرفی می‌شود.

جدول ۱. روش‌های حفاری تونل‌های کم عمق

معیار مقایسه	روش	
	مکانیزه	کند و پوش
زمین شناسی	هر نوع زمین	هر نوع زمین
مکانی	نیاز به سطح کوچک پوشش فولادی	نیاز به سطح بزرگ پوشش فولادی
تغییر مقطع	غیر قابل کاربرد	مناسب برای مقاطع مختلف
عمق	عمق حداقلی مورد نیاز است	کم عمق
آب بندی	دشوار	آسان
نشست زمین	قابل توجه	ندارد
مانع ترافیکی	متوسط	خیلی زیاد
لوله های زیرسطحی	تغییر مکان و حفاظت نیاز نیست.	تغییر مکان و حفاظت نیاز است.
مزاحمت لرزه ای و صوتی	متوسط	زیاد
جابجایی زمین	نسبتاً زیاد	زیاد
تغییر وضعیت آب زیرزمینی	ترکیب آب کثیف و آب بندی	آب کثیف و زهکشی
پیشروی	پیشروی پیچیده، زمان ساخت مناسب طولانی	با توجه به تغییر سطحی زیاد، زمین ساخت کم می باشد.



حالت دوم

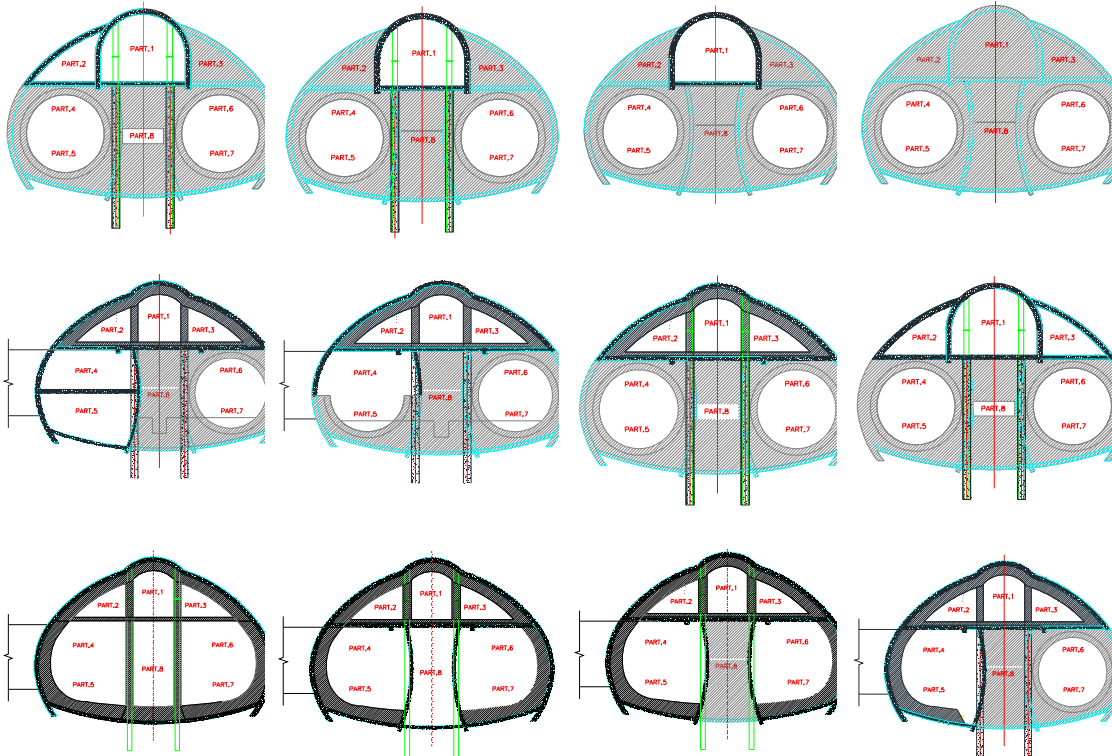


حالت اول

شکل ۳. مراحل اجرای کراس اور رحمت-دولت در دو حالت

الف - حفاری مقطع، ب- اجرای لایه اول شاتکریت، ج- اجرای لایه اول مش، د- نصب لیتس و یا فریم با فواصل ۱ متر (قابل تغییر می باشد)، ه- اجرای شاتکریت میانی، و- نصب لایه دوم مش و در نهایت اجرای شاتکریت نهایی.

مراحل اجرا برای حالت اول در شکل ۴ و برای حالت دوم در شکل ۵ نشان داده شده است. قابل ذکر بوده که ترتیب مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری اولیه در حین اجرای روش STM به صورت ذیل بوده که در انجام حفاری و تحکیم هر بخش در نظر گرفته می شود.



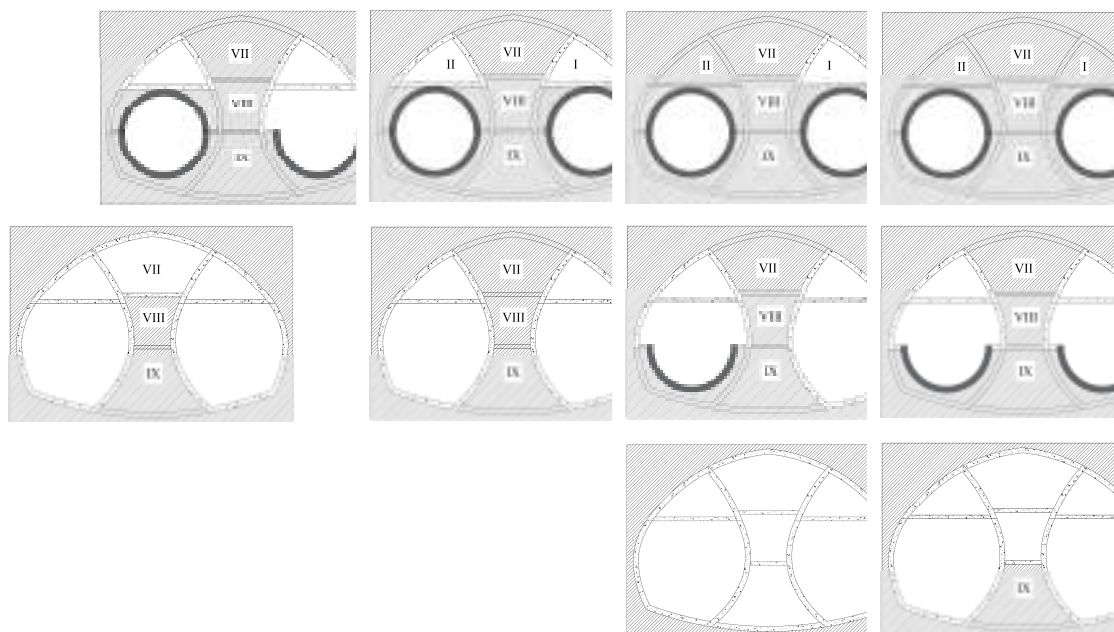
شکل ۴. مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری برای حالت اول (ترتیب مراحل از راست به چپ)

#### ۴- مشخصات هندسی

جهت ایجاد پایداری بیشتر سازه نهایی بخش فوقانی و کاهش نشست در سطح زمین پس از حفاری بخش تحتانی، از شمع‌های با هسته فولادی در روش اول استفاده شده است. مطابق شکل ۴ پس از حفاری بخش میانی (بخش ۱)، شمع‌هایی با هسته فولادی در طول سازه اجرا می‌شود. هسته‌های فولادی تا زیر سازه اولیه بخش میانی امتداد می‌یابد. قابل ذکر بوده که موقعیت این شمع‌ها در محل ستون‌های سازه نهایی بوده و در مرحله اجرای سازه نهایی در مقطع ستون استفاده می‌شود. استفاده از شمه‌های با هسته فولادی منجر به کاهش نشست در سطح زمین پس از حفاری بخش‌های ۲ و ۳ و همچنین حفاری بخش تحتانی می‌گردد.

در بخش قبل ۲ حالت جهت اجرای مرحله‌ای کراس اور رحمت-دولت معرفی و مراحل هر کدام نمایش داده شد. در این قسمت به بیان ویژگی‌های هندسی این دو روش پرداخته می‌شود. با توجه به عبور دستگاه حفاری تونل (TBM) پیش از اجرای سازه مورد نظر، پیش از شروع به اجرا، تونل مکانیزه موجود بوده و می‌بایست تمهیدات لازم جهت تخریب آن در هر دو روش در نظر گرفته شود. در حالت اول به جهت تخریب سگمنت و همچنین حفاری بخش پایین مقطع از دو رمپ مجزا استفاده شده و با ایجاد رمپ دوم، تخریب سگمنت از مقابل تونل انجام شده در حالی که در روش دوم از یک رمپ استفاده و تخریب از بالا و کنار تونل انجام می‌شود.

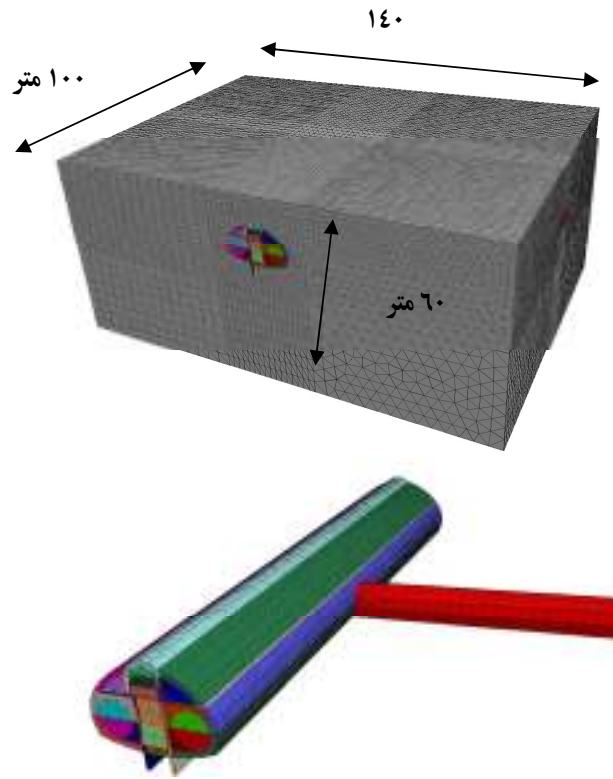
- در روش اول سازه نهایی مقطع حین اجرای بخش‌های مختلف لاینینگ می‌گردد. بدین ترتیب مطابق شکل ۴، پس از حفاری کامل بخش فوقانی و نصب سازه اولیه آن، سازه نهایی این قسمت اجرا می‌گردد. در ادامه با حفاری دو قسمت کناری بخش تحتانی (بخش ۴، ۵، ۶، ۷) مقطع، لاینینگ هر کدام نیز اجرا می‌شود. اجرای سازه نهایی در حالت دوم پس از حفاری و نصب سازه اولیه مقطع کامل بوده و لذا هیچ تداخلی با مراحل اجرای سازه نگهبان ندارد.



شکل ۵. مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری برای حالت دوم (ترتیب مراحل از راست به چپ)

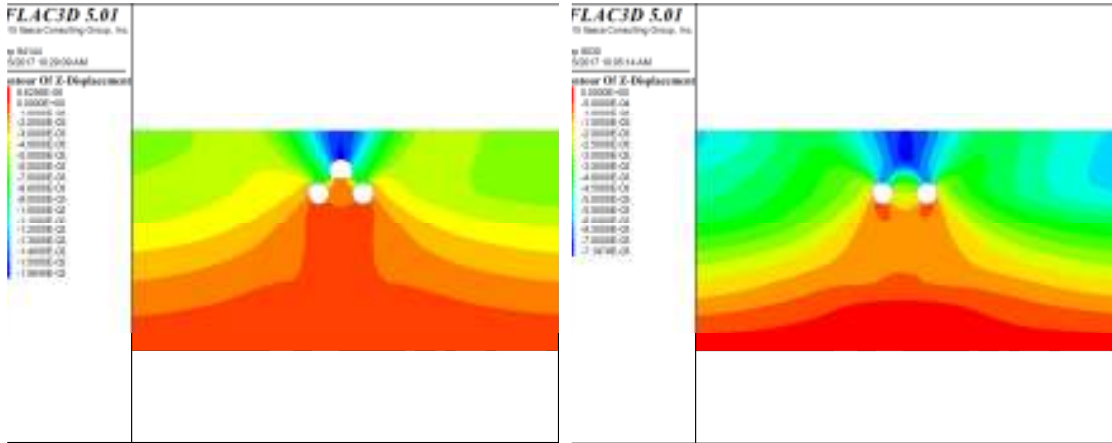
### ۵- مدل‌سازی عددی و بررسی روش های اجرا

به منظور بررسی امکان پذیری حفاری crossover به روش NATM و تعیین میزان نشست‌های بوجود آمده، مدل‌سازی crossover با استفاده از نرم افزار FLAC3D انجام شده است. هدف از مدل‌سازی عددی به روش سه بعدی، بررسی دقیق میزان نشست ها بر اساس روش اجرا می باشد. در ادامه نتایج نشست‌ها و جابجایی‌های بوجود آمده در هر مرحله برای هر دو حالت در نرم افزار FLAC3D ارائه شده است. هندسه مدل عددی ساخته شده با استفاده از نرم افزار FLAC3D برای حالت اول در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل‌های ۷ تا ۱۷ نیز میزان جابجایی‌های قائم به دست آمده در هر مرحله از حفاری ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۸ هندسه مدل عددی در حالت دوم و در شکل‌های ۱۹ تا ۲۷ میزان جابجایی های قائم بدست آمده در هر مرحله از حفاری ارائه شده است.



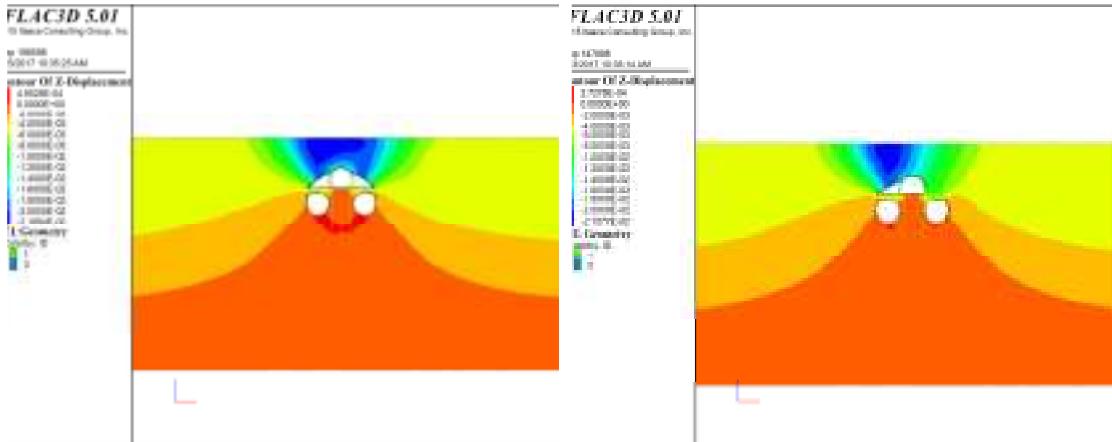
شکل ۶. هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC3D





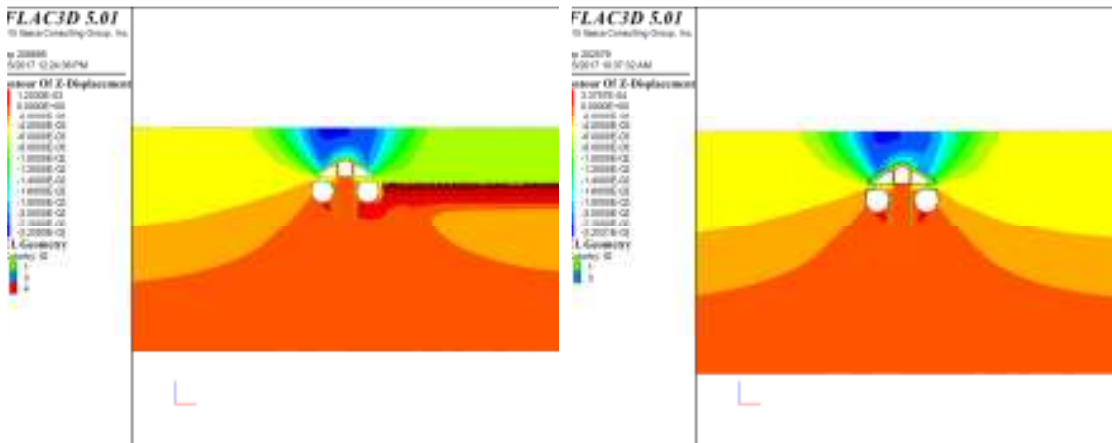
شکل ۸. جابجایی قائم پس از حفاری بخش I

شکل ۷. جابجایی قائم پس از عبور TBM



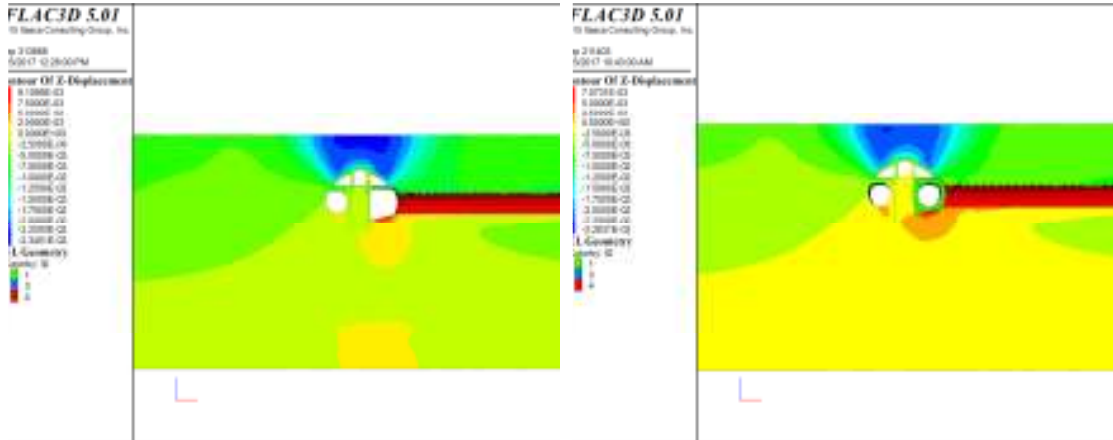
شکل ۱۰. جابجایی قائم پس از حفاری بخش III

شکل ۹. جابجایی قائم پس از حفاری بخش II



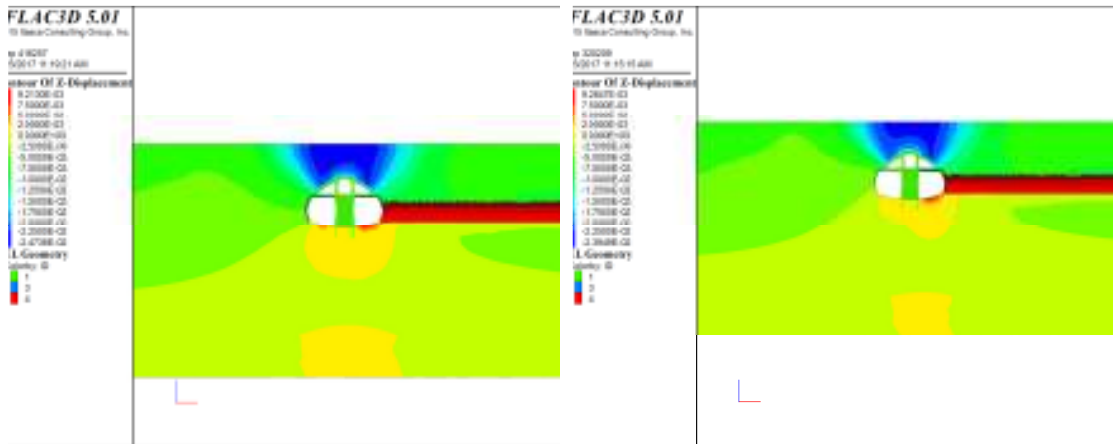
شکل ۱۲. جابجایی قائم پس از حفاری رمپ تا محل کراس اور

شکل ۱۱. جابجایی قائم پس از اجرای لاینینگ در بخش بالایی



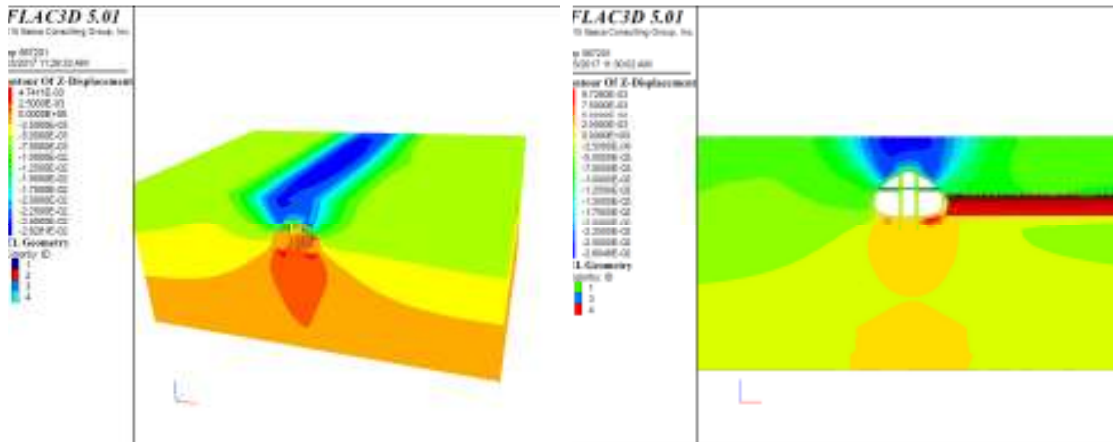
شکل ۱۴. جابجایی قائم پس از حفاری بخش IV

شکل ۱۳. جابجایی قائم پس از حفاری بخش IV به طول ۶ متر و تخریب سگمنت

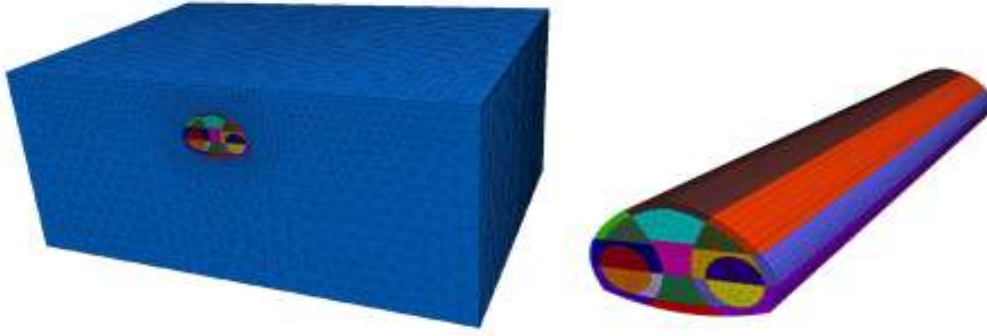


شکل ۱۶. جابجایی قائم پس از حفاری بخش V

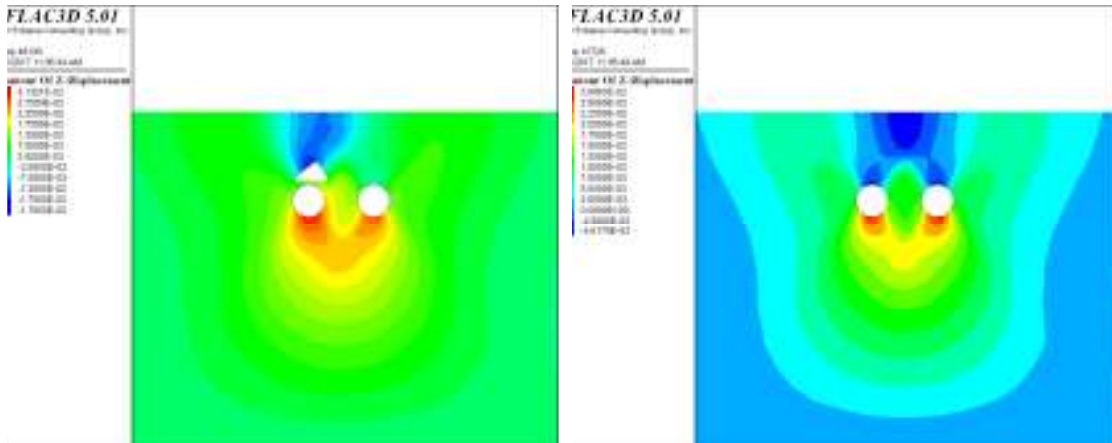
شکل ۱۵. جابجایی قائم پس از بازگشایی ادامه رمپ تا انتهای کراس اور



شکل ۱۷. جابجایی قائم پس از اتمام ساخت Crossover

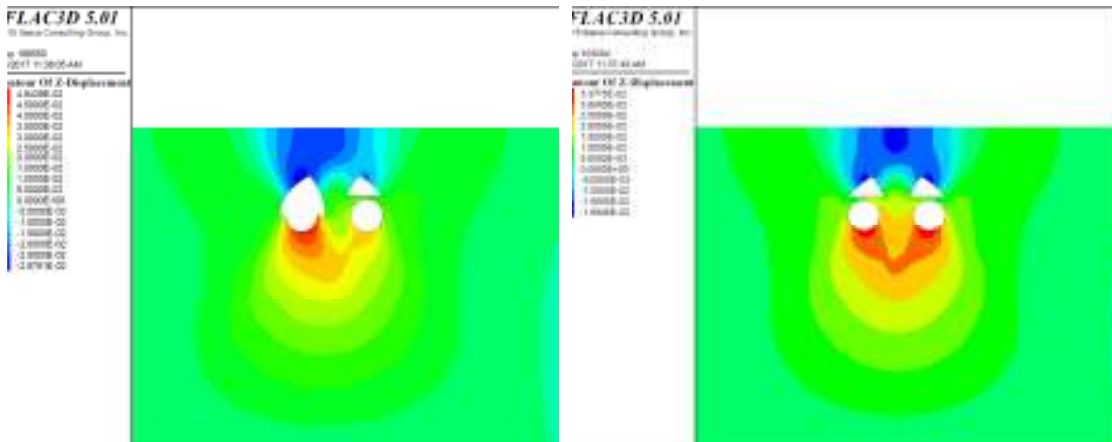


شکل ۱۸. هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC3D



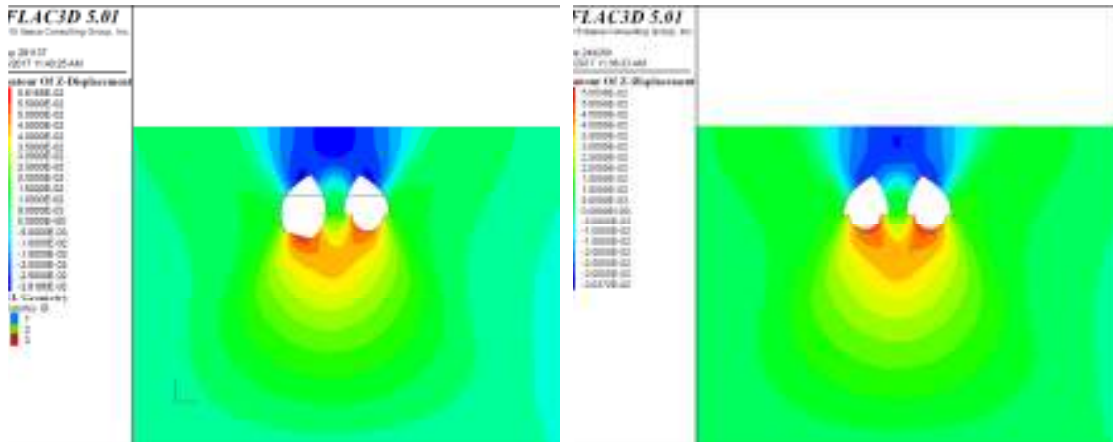
شکل ۲۰. جابجایی قائم پس از حفاری بخش I

شکل ۱۹. جابجایی قائم پس از عبور TBM



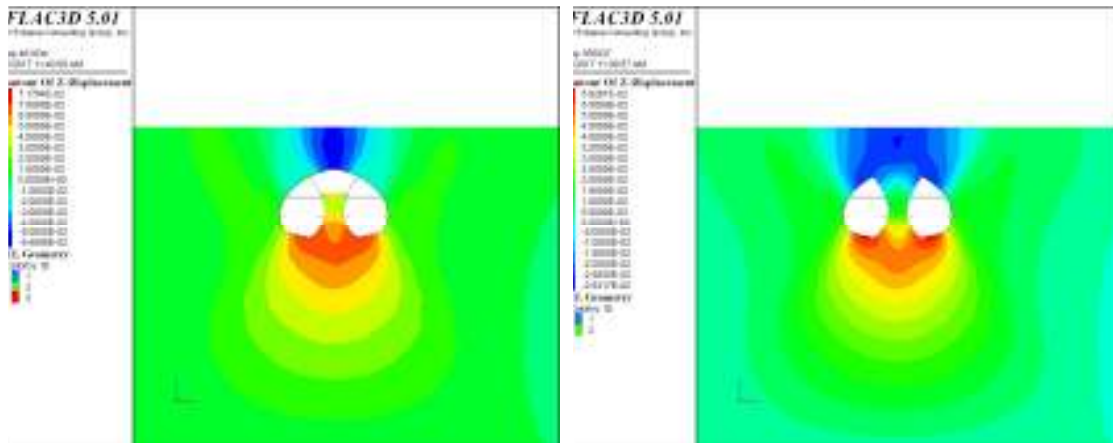
شکل ۲۲. جابجایی قائم پس از حفاری بخش III

شکل ۲۱. جابجایی قائم پس از حفاری بخش II



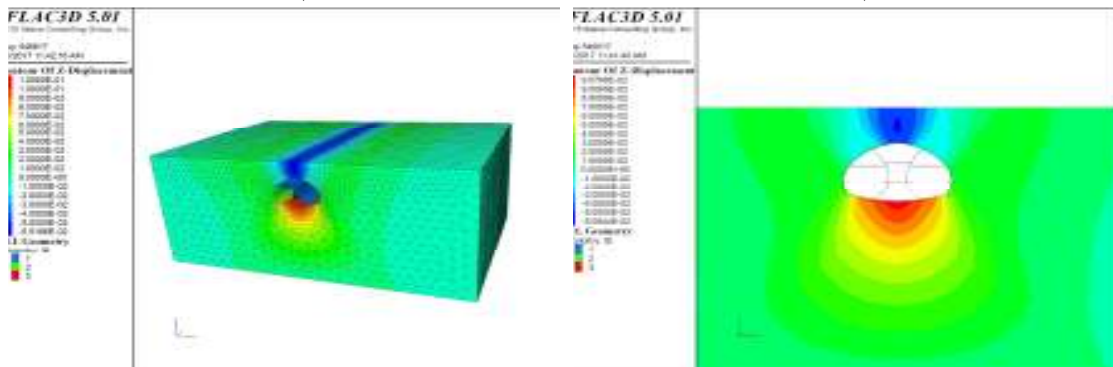
شکل ۲۴. جابجایی قائم پس از حفاری بخش V

شکل ۲۳. جابجایی قائم پس از حفاری بخش IV

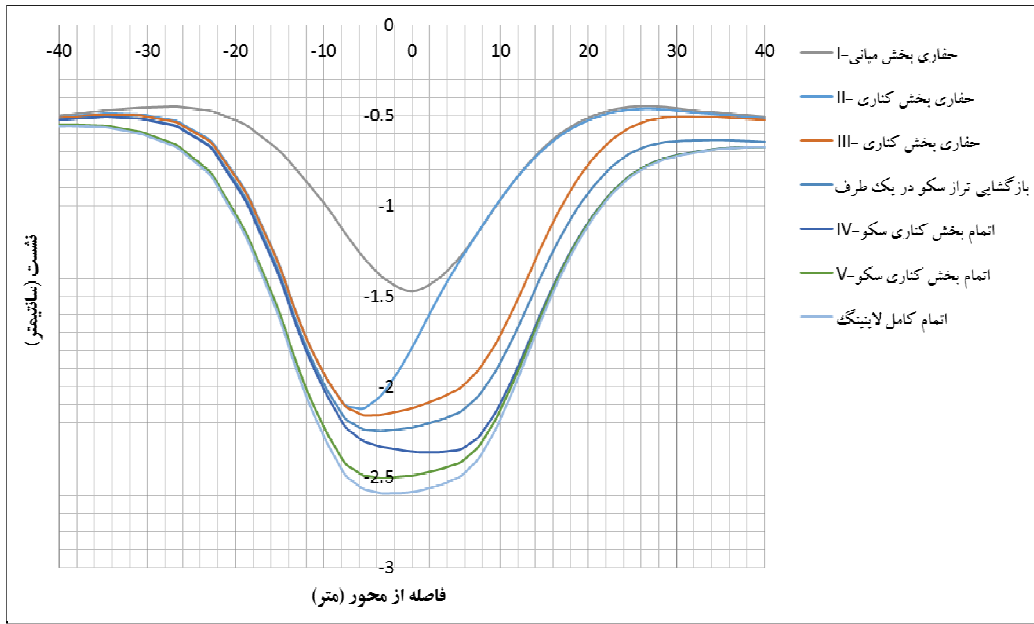


شکل ۲۶. جابجایی قائم پس از حفاری بخش VII

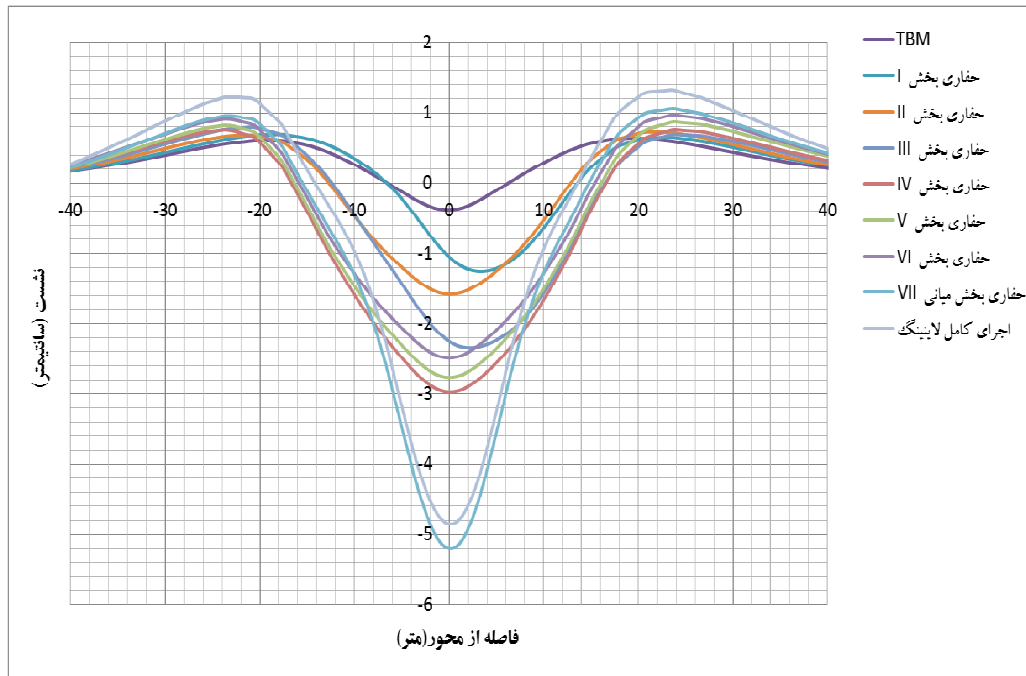
شکل ۲۵. جابجایی قائم پس از حفاری بخش VI



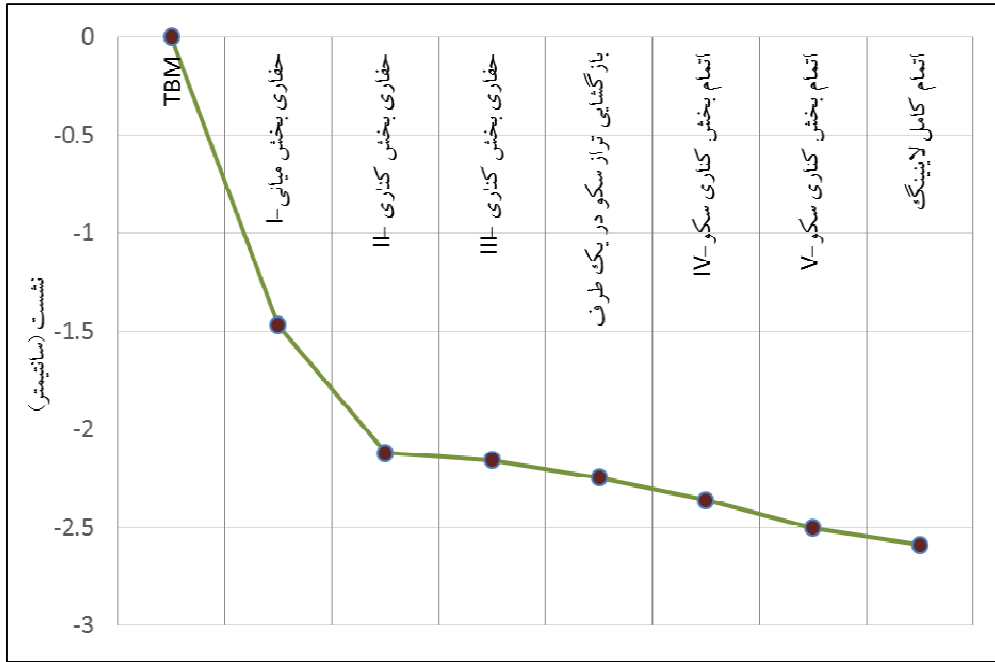
شکل ۲۷. جابجایی قائم پس از اتمام ساخت Crossover



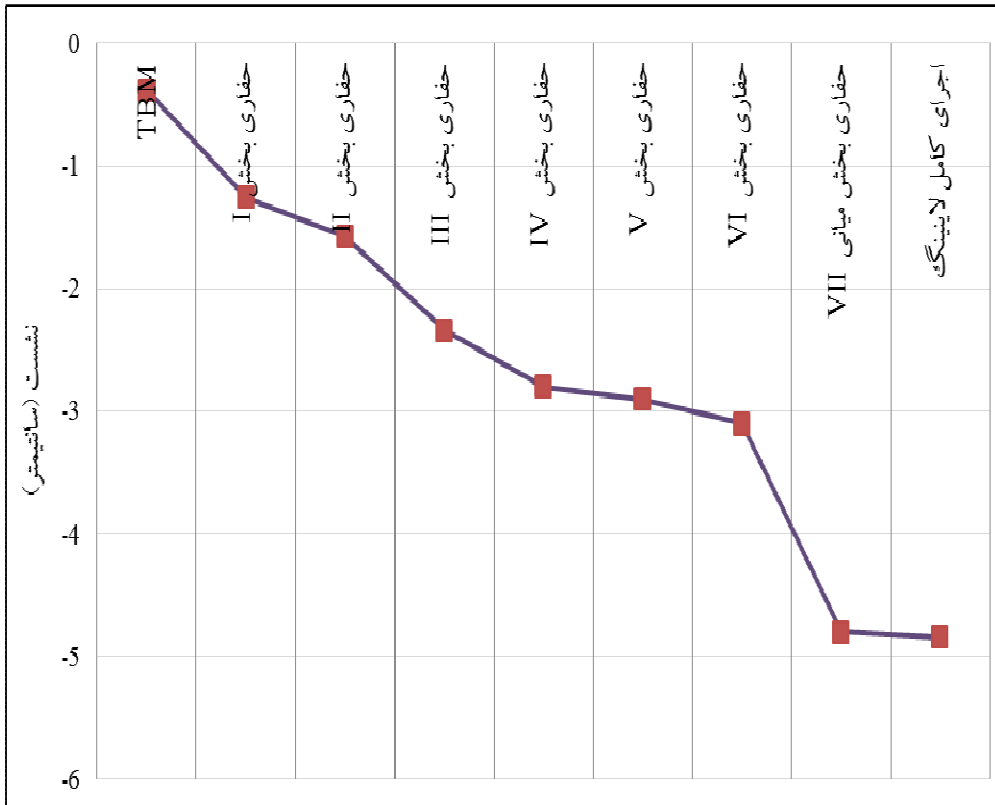
شکل ۲۸. مقایسه نشست های بوجود آمده در مدل سه بعدی در مراحل مختلف (حالت اول)



شکل ۲۹. مقایسه نشست های بوجود آمده در مدل سه بعدی در مراحل مختلف (حالت دوم)



شکل ۳۰ نمودار ماکزیمم نشست‌های بوجود آمده در مدل سه بعدی در مراحل مختلف (حالت اول)



شکل ۳۱ نمودار ماکزیمم نشست‌های بوجود آمده در مدل سه بعدی در مراحل مختلف (حالت دوم)

## ۶- نتیجه گیری

همانطور که پیشتر بیان شد در این مقاله به منظور انتخاب روش حفاری مناسب برای کراس اور، از مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار FLAC3D استفاده شده است. هدف از مدلسازی عددی به روش سه بعدی، بررسی دقیق میزان نشست ها بر اساس روش اجرا و تعیین بهترین روش اجرا با کمترین میزان نشست ها می باشد. روش های مختلفی با تقسیم بندی های متفاوت برای حفاری کراس اور مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت دو روش قابل استفاده در این مقاله ارائه و بهترین روش با کمترین میزان نشست به عنوان گزینه برتر انتخاب گردید. حفاری در حالت دوم بر اساس تقسیم بندی مرسوم در فرانس ها انجام و مشاهده گردید مقادیر نشست ها برابر ۴/۸ سانتیمتر می گردد. لذا به منظور کاهش مقادیر نشست، تمهیدات مختلفی بررسی شده و بر آن اساس دو فاکتور با تاثیر قابل توجهی بر روی مقادیر نشست مشخص گردید. این دو فاکتور استفاده از ستون فلزی در زمان حفاری بخش میانی و استفاده از سیستم نگهداری نهایی پس از حفاری بخش فوقانی می باشد. استفاده از این تمهیدات باعث کاهش میزان ماکزیمم نشست در سطح زمین تا ۲/۶ سانتیمتر شده که با توجه به روباره کم، خصوصیات ژئوتکنیکی ضعیف خاک و ابعاد بزرگ سازه حفاری شده، بسیار مناسب می باشد.

## ۷- مراجع

- Brown, E.T., (1981), "Putting the NATM into perspective". *Tunnels and Tunnelling* 13, pp.13-17.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., (2000), "Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion". *Tunnelling and Underground Space Technology* 15, pp.187-213.
- Fang, Q., Zhang, D.L., Wong, L.N.Y., (2011), "Environmental risk management for a cross interchange subway station construction in China. *Tunnelling and*

همانطور که در شکل های ۱۷ و ۲۷ مشاهده می شود ماکزیمم جابجایی قائم در مدل در حالت اول برابر ۲/۶ سانتیمتر و در حالت دوم برابر ۵/۵ سانتیمتر می باشد. در شکل ۲۸ نیز مقادیر نشست های بوجود آمده در حالت اول و در شکل ۲۹ مقادیر نشست های بوجود آمده در حالت دوم در هر مرحله از حفاری در مدل سه بعدی ارائه شده است. همچنین در شکل های ۳۰ و ۳۱ نیز مقدار افزایش ماکزیمم نشست در هر مرحله در مدل سه بعدی ارائه شده است. همانطور که در شکل های ۳۰ و ۳۱ مشاهده می شود بیشترین مقدار افزایش نشست در هر دو حالت در زمان حفاری بخش میانی بوجود می آید. همانطور که در بخش قبلی مشاهده گردید مقادیر نشست ها در حالت اول (۲/۶ سانتیمتر) به مراتب کمتر از حالت دوم (۴/۸ سانتیمتر) می باشد. دلیل این امر استفاده از ستون های فلزی در مرحله ساخت سازه نگهدارنده و همچنین استفاده از سازه نهایی در زمان اتمام بخش بالایی می باشد که این تمهیدات تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی نشست ها داشته است. روش اجرا در حالت اول بدین صورت می باشد که بعد از حفاری بخش میانی، شمع هایی تا عمق پایین تر از کف کراس اور حفاری و ستون های فلزی از این تراز ارتفاعی تا زیر سازه نگهدارنده این بخش نصب می گردد. این ستون های فلزی نقش تکیه گاه را برای سازه نگهدارنده بخش فوقانی تا قبل از اجرای سازه نهایی و پایه های نگهدارنده سازه نهایی بخش فوقانی پس از حفاری بخش های زیرین داشته و لذا در حفاری بخش های کناری فوقانی و بخش های تحتانی افزایش نشست قابل ملاحظه ای مشاهده نشده است. همچنین پس از اتمام سه بخش فوقانی، سازه نهایی در این قسمت اجرا و حفاری بخش های تحتانی در زیر دال بتنی انجام می پذیرد که این امر خود هم از لحاظ ایمنی برای حفاری بخش پایینی و هم از لحاظ کاهش نشست تاثیر قابل ملاحظه ای دارد. لذا با بررسی های انجام شده حالت اول با توجه به مقادیر نشست کمتر به عنوان گزینه برتر انتخاب گردید.

- Powell, D.B., Sigl, O., Beveridge, J.P., (1997), "Heathrow-Express-design and performance of platform tunnels at Terminal 4". In: *Tunnelling'97*. IMM, London, pp. 565–593.
- Qian Fang, Dingli Zhang, Louis Ngai Yuen Wong, (2012), "Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground, *Tunnelling and Underground Space Technology* 29, pp.10–30.
- Rabcewicz, L., (1964), "The New Austrian Tunnelling Method. Part one. *Water Power* (November), pp. 453–457. Part two. *Water Power* (December), pp.511–515. Rabcewicz, L., 1965. *The New Austrian Tunnelling Method*. Part three. *Water Power* (January), pp. 19–24
- Sauer, G., (1988), "When an invention is something new: from practice to theory in tunnelling". *Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy, Section A* 97, pp.94–108.
- Terzaghi, K., (1943), "Theoretical Soil Mechanics". Wiley and Sons, New York.
- Tonon, F., Sequential Excavation, NATM and ADECO: What they have in common and how they differ. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 2010, 245–265. DOI: 10.1016/j.tust.2009.12.004.
- Will, M., (1989), "Excavation of Large Cross Section Tunnels in Accordance with the Basic Principles of New Austrian Tunnelling Method" (N.A.T.M.) with Particular Regard for the use of Boom-type tunnelling Machines, *World Tunnelling*, April, pp. 51–55.
- Xiang, Y.Y., He, S.H., Cui, Z.J., Ma, S.Z., (2005), "A subsurface "drift and pile" protection scheme for the construction of a shallow metro tunnel". *Tunnelling and Underground Space Technology* 20, pp.1–5.
- Underground Space Technology* 26, pp.750–763.
- Hanhua Zhu, Mengchong Chen, Yu Zhao, Fusheng Niu, (2017), "Stability Assessment for Underground Excavations and Key Construction Techniques", *Springer Tracts in Civil Engineering*, DOI 10.1007/978-981-10-3011-6
- Health and Safety Executive (HSE), (1996), "Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels", *A Review of Sprayed Concrete Lined Tunnels with Particular Reference to London Clay*, HSE Books.
- Institution of Civil Engineers (ICE), (1996), "Sprayed Concrete Linings (NATM) for Tunnels in Soft Ground", *ICE Design and Practice Guide*. Thomas Telford, London.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE), (1996), "Standard Specification of Tunnel (Mountain Tunneling Tunnel) and Explanation".
- Karakus, M., Fowell, R.J., (2004), "An insight into the new Austrian tunnelling method (NATM)". KAYAMEK02004-VII. In: *Bölgesel Kaya Mekanik 'i Sempozyumu/ROCKMEC0 2004 – VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*, Sivas, Türkiye.
- Karakus, M., Fowell, R.J., (2005), "Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20 (6), pp.514–524.
- Kolymbas, D., (2005), "Tunnelling and Tunnel Mechanics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg".
- Oreste, P.P., (2003), "Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence–confinement approach". *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, pp.347–363.



