نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ir
دوره‌ی ۵- شماره‌ی ۱/تابستان ۱۳۹۵

تعیین طول بهینه اجرای بتن پلاستیک جهت شروع حفاری مجدد با TBM
مطالعه موردی: ایستگاه U7 خط هفت متروی تهران

یادداشت فنی

محمد فاروق حسینی[1*]؛ مهدی مرادیان[2]

۱- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۲/۰۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2016.634

واژگان کلیدی

حفاری مکانیزه
شروع حفاری
پایداری سینه‌کار
مدل‌سازی عددی
بتن پلاستیک

چکیده

ایستگاه *U7* به‌عنوان ایستگاه پشتیبان در میانه مسیر قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران، که با ماشین *EPB* حفر می‌شود، قرار دارد. این ایستگاه قبل از رسیدن ماشین حفاری و به‌منظور خدمات‌دهی به آن احداث شده است. برای جلوگیری از ناپایداری در دهانه خروجی این ایستگاه، در هنگام عبور ماشین حفاری، باید تمهیدات لازم اتخاذ شود. از این رو لازم است سیستم مناسبی برای پایدارسازی این دهانه به‌نحوی طراحی شود که از نظر عوامل فنی، ایمن و از نظر عوامل اقتصادی به‌صرفه باشد. بنابراین بهسازی زمین با روش جایگزینی خاک با مصالح مقاوم‌تر (بتن پلاستیک) روش مؤثر در رویارویی با مشکلات انتخاب شد. با توجه به پیشرفت کامپیوترها و نرم‌افزارهای عددی، مدل‌سازی عددی آغاز حفاری می‌تواند نقش بسزایی در تعیین خصوصیات کمی و کیفی سیستم پایدارکننده داشته باشد. در این تحقیق طراحی طول بتن پلاستیک با نرم‌افزار *FLAC3D* بررسی شده و در نهایت با استفاده از نتایج مدل‌سازی‌های عددی، طول بهینه بتن پلاستیک مورد استفاده جهت به حداقل رساندن جابه‌جایی در سینه‌کار و مهار ناپایداری محتمل، چهار متر به‌دست آمد.

۱- مقدمه

به دلیل رشد روزافزون جمعیت در مناطق شهری، نیاز به توسعه سیستم‌های خدمات‌رسانی از جمله حمل-ونقل بیشتر احساس می‌شود. در همین راستا حفر تونل‌های کم‌عمق شهری با دسترسی آسان‌تر توجه خاصی پیدا کرده است. امروزه ساخت تونل با استفاده از *TBM* (*Tunnel Boring Machine*) در شرایط گوناگون زمین، به یک هنر مبدل شده است. پیشرفت-های قابل‌توجه در تکنولوژی حفاری مکانیزه، محدوده وسیعی از کاربردهای *TBM* را گشوده است. کاربرد آن به دلیل مزایایی چون سرعت، امنیت و قابلیت اطمینانی که دارد و همچنین عملکرد مناسب آن برای محیط‌زیست و ساختمان‌های موجود و نیز مقرون به-صرفه‌بودن از نظر اقتصادی، ترجیح داده می‌شود. پروژه‌هایی که در مقیاس بزرگ در شهرها انجام شده است، نشان‌دهنده کارآیی تکنولوژی حفاری مکانیزه است (*Herrenknecht, 2005*).

تونل‌زنی در مناطق شهری طبعات خاص خود را دارد. عمق روباره کم است، زمین اغلب نرم و سیمان نشده است، وجود ساختمان‌ها و پی‌های مجاور حساسیت زیادی بر نشست‌های حاصل از تونل‌کاری ایجاد می‌کنند و علاوه بر این

* تهران؛ خیابان کارگر شمالی؛ بالاتر از جلال آل احمد؛ دانشگاه تهران؛ ساختمان شماره ۲ پردیس دانشکده‌های فنی؛ دانشکده مهندسی معدن؛ صندوق پستی: ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵؛ شماره‌ی تلفن: ۸۲۰۸۴۲۴۷-۰۲۱؛ رایانامه: mfarogh@ut.ac.ir

امکان حفاری و یا تقویت را از طریق سطح زمین (مثلاً روش کندن و پوشاندن *(Cut & Cover)*) محدود می‌کنند. با وجود چنین شرایطی تونل‌ها باید به روش‌هایی ایجاد شوند که موجب بروز کمترین خسارت به ساختارهای سطحی شوند یعنی تغییرشکل زمین را تا حد امکان کاهش دهند *(Saglamer, 1997)*.

آغاز به کار و پایان حفر تونل در زمین‌های شهری توسط دستگاه حفاری مکانیزه نیاز به آماده‌سازی‌های ویژه‌ای دارد تا شرایط ایمن جهت دستگاه و زمین فراهم شود. آغاز به کار و اتمام تونل در شهرها، عمدتا در چاه‌ها یا ایستگاه‌ها که از سطح زمین پایین‌تر می‌باشند، انجام می‌شود. علاوه بر نقطه شروع و پایان، امکان دارد که در بین مسیر حرکت دستگاه، با توجه به طراحی و برنامه‌ریزی صورت‌گرفته، بعضی از ایستگاه‌های میانی قبل از رسیدن دستگاه، حفر شده باشند یا اینکه چاه-هایی جهت سرویس‌دهی و تعمیر *TBM* حفر شوند. در این صورت دوباره مسائل و مشکلات اتمام و آغاز به کار حفاری در ایستگاه یا چاه مطرح می‌شود که جهت مهار و غلبه بر این چالش‌ها باید تدابیر لازم اتخاذ شود.

انتخاب روش مناسب پایدارسازی هرکدام از دهانه‌های ایستگاه *U7* و تعیین خصوصیات آن با توجه به شرایط زمین محل، محدودیت‌های فنی و اقتصادی، عوامل ترافیکی و استملاکی زمین محدوده ایستگاه و مشکلات دیگر تعیین می-شود. سیستم پایدارسازی دهانه باید به‌نحوی باشد که با صرف کمترین هزینه، پایداری دهانه را در هنگام ورود یا خروج ماشین حفاری تأمین نماید. اگر روش پایدارسازی دهانه متناسب با شرایط زمین انتخاب نشود دو حالت رخ می‌دهد: یا هزینه اجرایی گزافی صرف پایدارسازی دهانه می‌شود و یا شرایط ایمن برای عبور ماشین حفاری تأمین نخواهد شد که در نتیجه باعث تحمیل هزینه‌های اضافی به منظور بازسازی خرابی‌های ایجاد شده در دهانه می‌شود. طراحی مهندسی خصوصیات سیستم پایدارکننده ، نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌های تأمین پایداری در دهانه ورودی و خروجی ایستگاه دارد.

در مورد چگونگی برخورد با مشکلات آغاز و پایان حفاری با دستگاه حفاری مکانیزه در مناطق شهری، کارهای زیادی صورت گرفته است که با توجه به وضعیت هر پروژه نحوه مقابله با مشکلات و راه‌حل‌های آن‌ها متفاوت می‌باشد.

ریچارد و همکاران در سال ۱۹۹۶ بحث مفصلی در مورد چالش‌های راه‌اندازی و پایان حفاری با استفاده از *EPB (Earth Pressure Balance)* با پوشش سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته گردآوری کردند. این مقاله، خلاصه تجارب خط ۲ مترو قاهره و ۱۱ پروژه بزرگ دیگر بود *(Richards D.P., 1996)*. همچنین دین و یانگ (*Dean and Young*) در سال ۲۰۰۶ بحث تفضیلی مشکلات آغاز و خاتمه حفاری با *EPB* و سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته را در چندین پروژه امریکای شمالی جمع‌آوری کردند *(Dean, 2006)* . میلنز (*Mielenz*) در سال ۲۰۰۳ بحث کاملی از روش‌های اتمام تونل در چاه با استفاده از *EPB* و سگمنت استفاده شده، در تونل راه‌آهن لندن فراهم کرد. این مقاله در مورد استفاده پلاستیک تقویت شده با رشته‌های شیشه (*GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer(Plastic)*) جهت استفاده در ناحیه دهانه نرم (*Soft Eye*) درون دیوار دیافراگمی بنتونیتی و آب-بندی مکانیکی ناحیه مجاور دهانه تونل ارائه شد *(Mielenz, 2003)*. اسچارچ و جاست (*Schurch and Jost*) در سال ۲۰۰۶ نیز، در مورد استفاده *GFRP* در دهانه نرم درون دیوار دیافراگمی بنتونیتی جهت شروع و پایان حفر تونل با دستگاه با توجه به پروژه‌هایی در استرالیا، سنگاپور و سویس بحث کرده‌اند *(Schurch & Jost, 2006)* . تون (*Town*) در سال ۲۰۰۳ یک مقاله آموزنده با عنوان بازیابی *TBM* بعد از ناموفق‌بودن آب‌بندی و راه‌اندازی ارائه داد که در آن استفاده از تزریق چسب پلی‌یورتان (*Polyurethane*) برای کاهش مشکلات جریان آب و ریزش زمین جهت راه‌اندازی *MTBM* (*Micro Tunnel Boring Machine*) و اتمام تونل با ماشین حفر تونل مورد بحث قرار گرفت. این مقاله نشان می‌دهد که چه نتایج خطرناکی ممکن است بر اثر عدم انجام اقدامات پیشگیرانه قبل از آغاز و اتمام حفر تونل درون زمین‌های آب-دار و نفوذپذیر رخ دهد *(Town, 2003)* .

۲- چالش‌های مربوط به زمین در هنگام شروع حفاری

عمده مشکلات زمین شامل ناپایداری سینه‌کار و وجود آب زیرزمینی می‌باشد که بین آغاز و پایان حفاری تونل مشترک است. خطرها معمولا با افزایش سطح آب زیرزمینی، تنوع زیاد لایه‌بندی و نزدیکی به

تأسیسات آب و برق و ساختمان‌ها و... بیشتر می‌شود. بر اثر جریان بیش از حد آب زیرزمینی به داخل ایستگاه، خسارت‌های عمده به تجهیزات پیمانکار و کارهای زیرزمینی ساخته‌شده، وارد می‌شود و همچنین سبب پایین افتادن سطح آب شده که احتمال خسارت به اماکن اطراف بر اثر نشست زمین وجود دارد که سبب تأخیر و هزینه‌های زیاد جهت جبران این مشکلات می‌شود. همچنین ناپایداری سینه‌کار، فرسایش و جریان یافتن خاک ممکن است باعث خسارت به پوشش و تأسیسات اطراف شده و از بین رفتن سیستم نگهداری ایستگاه و بروز مشکلات در هدایت و راه‌اندازی *TBM* را در پی داشته باشد. هزینه و تأخیرهای ناشی از ورود آب زیرزمینی به ایستگاه و ریزش زمین در اثر ناپایداری به طور قابل توجهی از هزینه و زمان اقدامات پیشگیرانه در جهت مهار زمین و آب زیرزمینی تجاوز می‌کند *(Hunt, 2008)*.

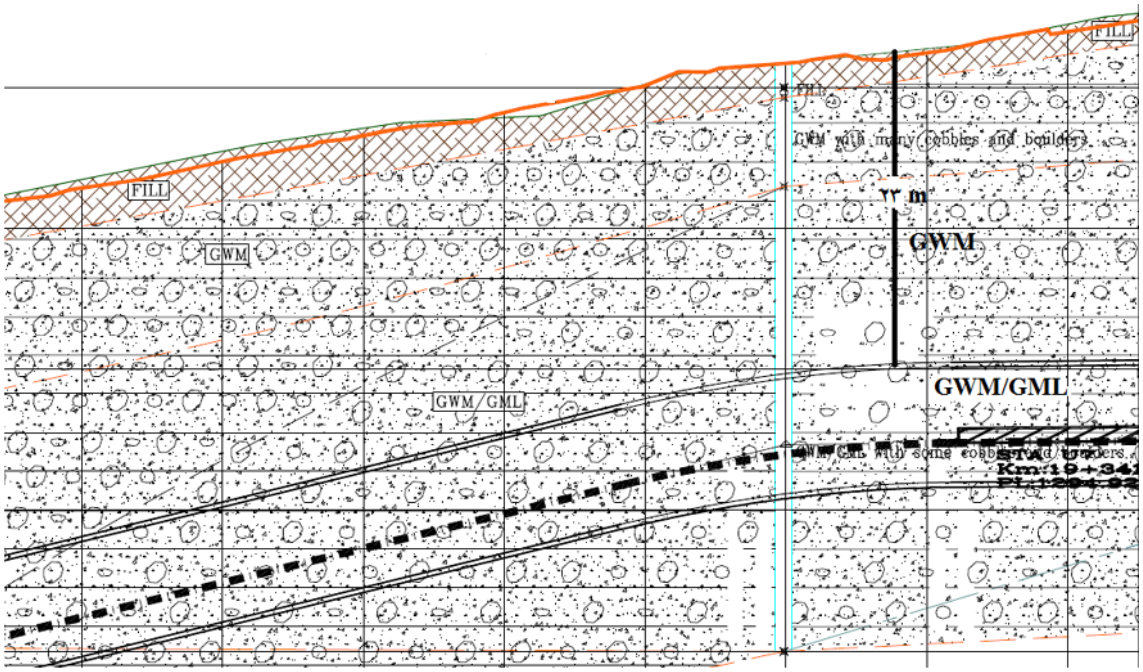
۳- وضعیت زمین‌شناسی ایستگاه U7

خصوصیات ژئوتکنیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی محدوده مطالعه با استفاده از بررسی و تحلیل آماری حاصل از مطالعات صحرایی (لاگینگ گمانه‌ها و آزمایش‌های صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی برآورد و تعیین شده است. بر این اساس، پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی در مسیر خط هفت متروی تهران در جدول ۱ درج شده است.

جدول ۱- اطلاعات ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی خط هفت متروی تهران

واحد زمین شناسی	گروه	توصیف	وزن مخصوص(γ) Kg/m^3	چسبندگی (C) KPa	زاویه اصطکاک داخلی (φ) درجه	مدول الاستیسیته GPa (E)	ضریب پواسون (ν)
I	*GWM,GPM GWC,GPC SWM,SPM SWC,SPC*	سیلت رسی با دانه-بندی ضعیف تا خوب	۱۹۰۰	۲۰	۳۸	۰/۱	۰/۲۷
II	*GML,GMI GCL,GCI SML,SMI SCL,SCI*	گراول ماسه‌ای با رس و سیلت	۱۹۰۰	۳۰	۳۵	۰/۰۸	۰/۲۷
III	*MLG,MIG CLG,CIG MLS,MIS CLS,CIS*	سیلت گراولی با خمیر کم تا متوسط	۱۹۰۰	۳۰	۳۵	۰/۰۸	۰/۲۷
IV	*ML,MI CL,CI*	سیلت و رس با خمیر کم تا متوسط	۱۹۰۰	۴۰	۲۷	۰/۰۳	۰/۳۵

شرایط زیرسطحی ایستگاه *U7* خط هفت متروی تهران به کمک حفر تعدادی گمانه و چاله‌ی شناسایی در محدوده ایستگاه مذکور، مورد مطالعه و ارزیابی قرارگرفته است. در این مطالعات، دو حلقه گمانه اکتشافی به عمق‌های ۵۵ و ۴۵ متر و همچنین دو چاله شناسایی به عمق‌های ۸ و ۲۰ متر در مجاورت ایستگاه حفر شد. نتایج حاصل از عملیات صحرایی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که لایه‌های زیرسطحی مسیر تونل خط هفت در محدوده ایستگاه *U7* به ترتیب شامل واحد زمین‌شناسی *I* به ضخامت تقریبی ۲۳ متر و تا کف ایستگاه ترکیبی از واحد زمین‌شناسی *I* و *II* است(جدول ۱ و شکل ۱). در هیچ یک از گمانه‌های حفرشده تا حداکثر عمق حفاری به سطح آب زیرزمینی برخورد نشده است *(SELI, 2008)*.



شکل ۱- پروفیل طولی ژئوتکنیکی خط هفت متروی تهران در ایستگاه U7

۴- بهسازی زمین با بتن پلاستیک

روش بهسازی و تعویض خاک با مصالح مناسب و با مقاومت بالاتر با ساخت بتن پلاستیک انجام می‌شود. اساس روش، جایگزینی مصالح مقاوم تر به جای خاک موجود در دهانه‌ی ورودی یا خروجی ماشین حفاری است. این مصالح شامل آب، سیمان، بنتونیت و درصد کمی شن و ماسه می‌باشند. بتن پلاستیک از انواع بتن‌های ویژه‌ای است که تفاوت آن با بتن معمولی نسبت بالای آب به سیمان و وجود بنتونیت در ساختار آن است. این بتن از آن جهت پلاستیک نامگذاری شده است که دارای قابلیت تغییرشکل‌پذیری و محدوده رفتار پلاستیک بالایی است. عامل اصلی ایجادکننده این خاصیت، استفاده از بنتونیت در ساختار بتن پلاستیک است. هدف از کاربرد بتن پلاستیک در بهسازی دهانه‌های ورودی و خروجی، تأمین مقاومت فشاری لازم، کاهش نفوذپذیری زمین و ایجاد منطقه‌ای با ضریب تغییرشکل‌پذیری نزدیک با محیط مجاور است. در طراحی بتن پلاستیک اجرا شده در دهانه‌های ورودی و خروجی سه عامل بسیار مهم تأثیرگذار هستند: اولا مقاومت آن به حدی باشد که کله‌حفار بتواند آن را حفاری کند ثانیا نشست آن در اثر وزن ماشین کمتر از میزان مجاز باشد تا موجب انحراف دستگاه از مسیر اصلی خود نشود و ثالثاً در مورد دهانه خروجی بایستی بعد از حفاری چشمه تونل، منطقه بهسازی شده پایدار باشد. در این روش قبل از رسیدن ماشین حفاری به نزدیکی دهانه، شمع‌های بتن پلاستیک از سطح زمین تا چند متر زیر تراز کف تونل حفاری و بتن‌ریزی می‌شوند. به منظور یکنواخت کردن خواص مقاومتی و نفوذپذیری فضای بهسازی شده، شمع‌ها را به‌صورتی اجرا می‌کنند که با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند(*El-Nahhas, 2006*) .

۵- مدل‌سازی

هدف اصلی بهسازی زمین، حذف آب در اطراف تونل و پایداری سینه‌کار در چند متر اول حفاری است. اما نکته حائز اهمیت این است که با بررسی پروژه‌های مختلف و همچنین تخمین‌هایی که در منابع مختلف در مورد طول ناحیه بهسازی‌شده صورت گرفته است، طول زمین بهسازی‌شده از طول سپر بیشتر درنظرگرفته می‌شود. دلیل این امر را این‌طور می‌توان توجیه کرد که طول ذکرشده برای بهسازی، در وهله اول به خاطر خطرات جبران‌ناپذیر نفوذ آب به ایستگاه متأثر از وجود آب زیرزمینی است تا ناپایداری سینه‌کار، و همچنین

طول بهسازی بیشتر از سپر، ناپایداری سینه‌کار را نیز برطرف می‌کند. بنابراین چنان‌چه در پروژه‌ای آب زیرزمینی وجود نداشته باشد طول بهسازی زمین فقط تابعی از ناپایداری سینه‌کار می‌شود که طول آن از آنالیز به‌دست می‌آید و مقدار آن با توجه به این‌که در هر پروژه، تا چه متری از ابتدای حفاری دستگاه حفاری قادر به تأمین فشار لازم جهت پایداری جبهه‌کار است و نوع خاک متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه در خط هفت متروی تهران ناپایداری سینه‌کار بعد از ۱٫۵ متر حفاری توسط فشار چمبر *EPB* تأمین می‌شود، بنابراین بهسازی زمین با بتن پلاستیک برای تأمین پایداری سینه‌کار بعد از ۱٫۵ متر حفاری لحاظ شده است.

برای تعیین ابعاد بلوک باید در نظر داشت که ابعاد بلوک باید به گونه‌ای انتخاب شوند که موقعیت تنش‌ها در اطراف مرز بلوک، مستقل از آشفتگی میدان تنش در اطراف حفاری باشند و مقدار آن‌ها با تنش‌های اولیه قبل از انجام حفاری برابر باشد. طبق معادلات کرش (*Kirsch*) در فاصله‌ای دورتر از ۵ برابر شعاع تونل از محور آن، تنش‌ها به حالت اولیه خود می‌رسند. روابط کرش مبتنی بر فرض الاستیک بودن محیط می‌باشند *(Brown & Brady, 2007)*. با توجه به اینکه محیط حفاری در واقعیت از این فرض تبعیت نمی‌کند، بلوک‌هایی با ابعاد مختلف ساخته شد و وضعیت کنتورهای تنش، پس از عملیات حفاری بررسی و مشاهده شد که در فاصله‌ی بیش از ۶ برابر شعاع تونل از مرکز آن، وضعیت کنتورهای تنش به حالت اولیه خود باز می‌گردند. بدین ترتیب طول بلوک‌ها در راستای محورهای X، Y و Z به‌ترتیب ۶۰، ۳۰ و ۵۷ تعیین شد. همچنین شرایط اولیه و مرزی با توجه به شرایط مسأله به مدل اعمال شد. انتخاب اندازه‌ی مش‌ها و فواصل بین گره‌ها هم از نظر دقت پاسخ‌های بدست آمده و هم از نقطه نظر مدت زمان لازم برای حل مسئله دارای اهمیت است. در این پژوهش جهت رسیدن به یک حالت بهینه، مدل‌هایی با ابعاد مش‌بندی متفاوت ساخته شد. در نهایت برای رسیدن به دقت مناسب، در اطراف محدوده حفاری، به دلیل آشفتگی در میدان‌های بر جای تنش و همینطور جابجایی‌های بزرگ‌تر، ابعاد مش‌ها نسبت به سایر نقاط، در مقاطع عرضی کوچکتر انتخاب گردید. همینطور در امتداد راستای Y بلوک، فاصله‌ی بین گره‌ها ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. این موضوع باعث سهولت در مدل‌سازی حفاری مرحله به مرحله‌ی تونل و همین‌طور دستیابی به دقت مناسب می‌شود.

مدل رفتاری پلاستیک موهر کلمب، با توجه به خصوصیات محیط حفاری، به عنوان مدل مناسب برای توده خاک در نظر گرفته شد. از شش پارامتر چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خاک، زاویه اتساع، مدول تغییر شکل و ضریب پواسون برای تعیین رفتار محیط در این مدل رفتاری استفاده می‌شود. در نرم افزار *FLAC3D* به‌جای استفاده از مدول تغییر شکل و ضریب پواسون، از مدول حجمی و مدول برشی خاک استفاده می‌شود. با توجه به روابط زیر می‌توان مدول حجمی و برشی خاک را با توجه به مدول تغییر شکل و ضریب پواسون محاسبه کرد:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad (۱)$$

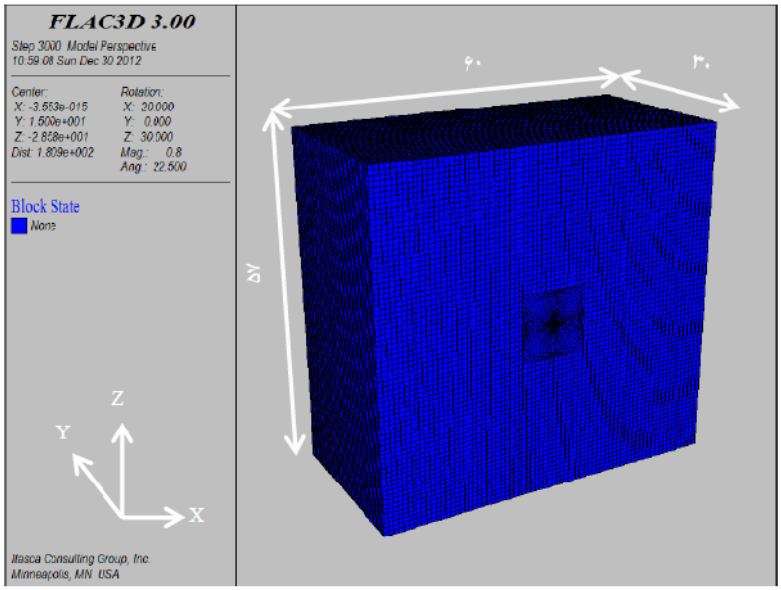
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad (۲)$$

همچنین ضریب فشار جانبی (κ) از رابطه ۳ محاسبه شده است و مشخصات هندسی دستگاه حفاری استفاده شده در خط هفت متروی تهران (قطعه شمالی-جنوبی) در جدول ۲ بیان شده است *(SELI, 2008)*.

$$\kappa = 1 - \mathrm{Sin}\varphi \qquad (۳)$$

جدول ۲- مشخصات ماشین حفاری خط هفت متروی تهران (قطعه شمالی-جنوبی)

مشخصات	اندازه
قطر حفاری	۹/۱۶۴ متر
قطر سپر	۹/۱۲۶ متر
طول سپر	۱۰ متر
گام حفاری	۱/۵ متر



شکل ۲- نمای کلی از مدل ساخته‌شده‌ی اولیه

۶- بررسی پایداری سینه‌کار بعد از بهسازی زمین با بتن پلاستیک با طول‌های مختلف

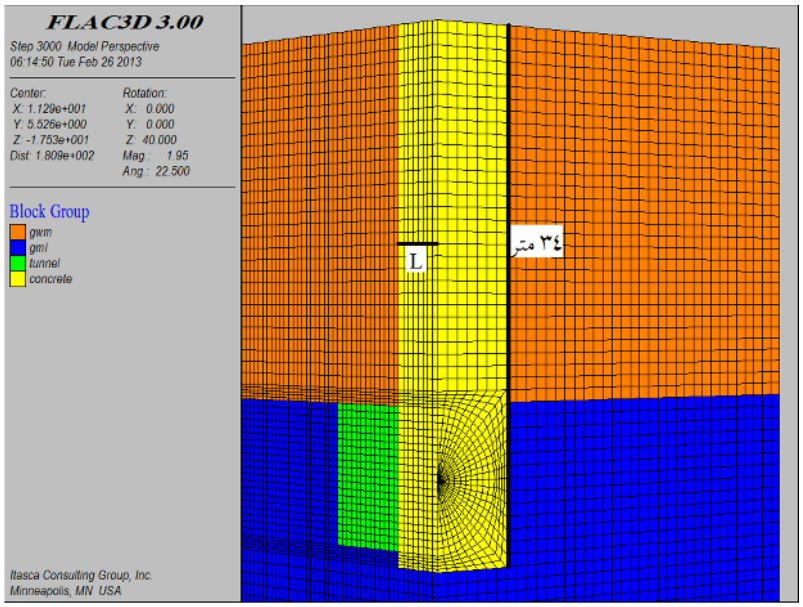
لازم به ذکر است پژوهش علمی حاضر کاری تحقیقاتی بوده و به طور عملی در ایستگاه *U7* استفاده نشده و به همین دلیل نتایجی جهت اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده وجود ندارد. همچنین جهت ارزیابی ناپایداری سینه‌کار معیاری بر مبنای جابه‌جایی سینه‌کار یافت نشد بنابراین علاوه بر جابه‌جایی سینه‌کار، گسیختگی سینه‌کار بعد از حفاری لحاظ شد. باید به این نکته توجه کرد که در حفاری تونل با *EPB*، جهت کنترل جابه‌جایی و پایداری سینه‌کار، فشار جبهه‌کار اعمال می‌شود اما در شروع حفاری با توجه به نوع ماشین حفار، در چند متر اول اعمال این فشار ممکن نیست. در قطعه‌ی شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران تا ۱٫۵ متر اول حفاری اعمال فشار جبهه‌کار مقدور نیست. بنابراین جهت پایداری و مهار جابه‌جایی در سینه‌کار از روش بهسازی زمین با بتن پلاستیک استفاده می‌شود. از این‌رو در این بخش بررسی و نحوه تأثیرگذاری بتن پلاستیک بر پایداری اطراف تونل و به‌خصوص سینه‌کار و همچنین تعیین طول بهینه بتن پلاستیک جهت برطرف‌شدن ناپایداری سینه‌کار در ۱٫۵ متر ابتدای تونل مدنظر است. در جدول ۳ مقدار پارامترهای مواد مختلف استفاده‌شده در مدل آورده شده است. (لازم به ذکر است که با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که از عمق ۲۳ متر به بعد زمین شامل دو نوع خاک بوده که در مدلسازی خصوصیات خاک ضعیف‌تر لحاظ شده است).

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مواد اعمال شده در مدل

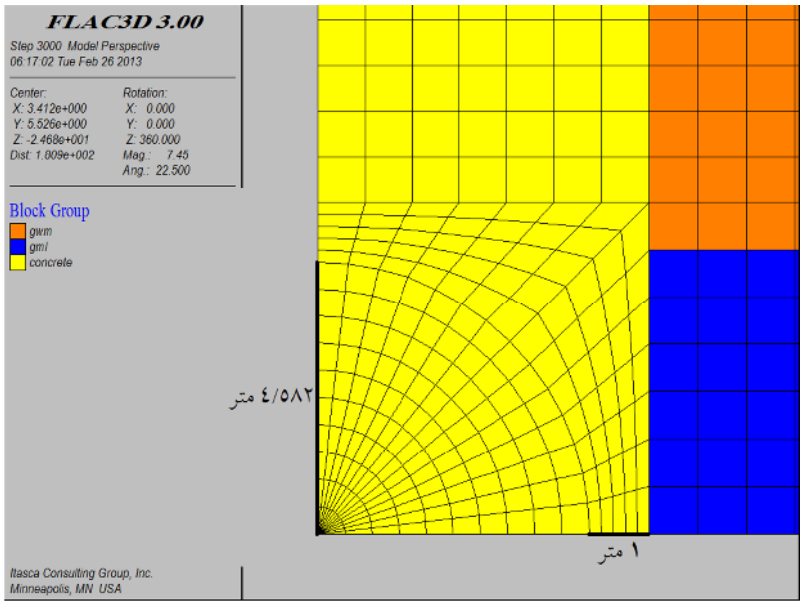
نام	چسبندگی (C) *KPa*	زاویه اصطکاک داخلی(φ) درجه	وزن مخصوص (γ) *Kg/m³*	زاویه اتساع (ψ) درجه	مدول الاستیسیته(E) *GPa*	ضریب پواسون (ν)	مدول برشی خاک (G) *MPa*	مدول حجمی خاک (K) *MPa*
خاک *GWM*	۲۰	۳۸	۱۹۰۰	۰	۰٫۱	۰٫۲۷	۳۹	۷۲
خاک *GML*	۳۰	۳۵	۱۹۰۰	۰	۰٫۰۸	۰٫۲۷	۳۱	۵۷
بتن پلاستیک	۲۵۰	۳۰	۲۲۰۰	۰	۱٫۵	۰٫۲	۶۲۵	۸۳۳

با توجه به این‌که در ایستگاه $U7$ آب زیرزمینی وجود ندارد، بنابراین کاربرد بتن پلاستیک تنها به منظور پایدارکردن سینه‌کار به‌کار می‌رود. در این بخش با توجه به شکل ۳ خاک را با طول‌های متفاوت (L) از بتن پلاستیک جایگزین شده است و در هر مرحله جابه‌جایی و طول زون‌های گسیخته‌شده اطراف تونل ثبت شده تا بتوان طول مناسب بتن پلاستیک را جهت پایداری سینه کار تعیین کرد.

همچنین در شکل ۴ شعاع تونل و گسترش عرضی بتن پلاستیک (راستای X) کاملا مشخص است.

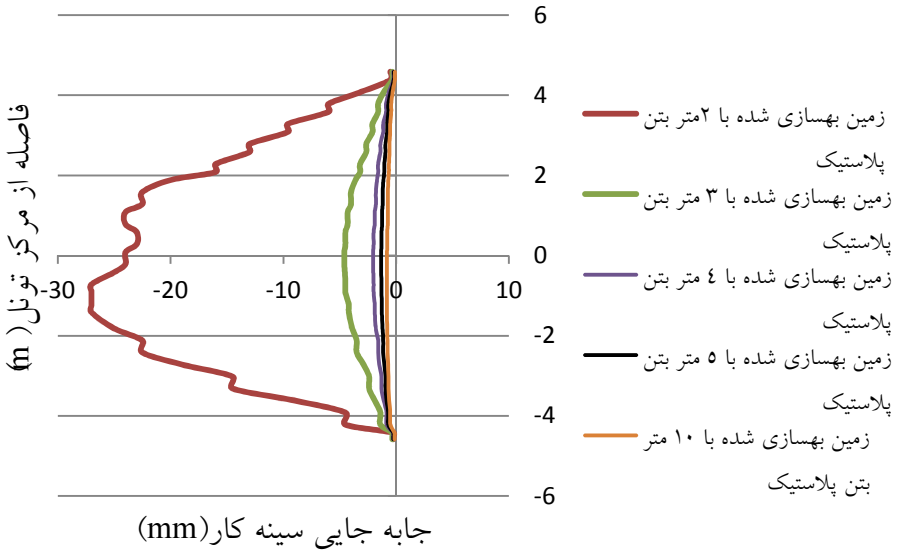


شکل ۳- جایگزینی خاک با بتن پلاستیک با طول‌های مختلف



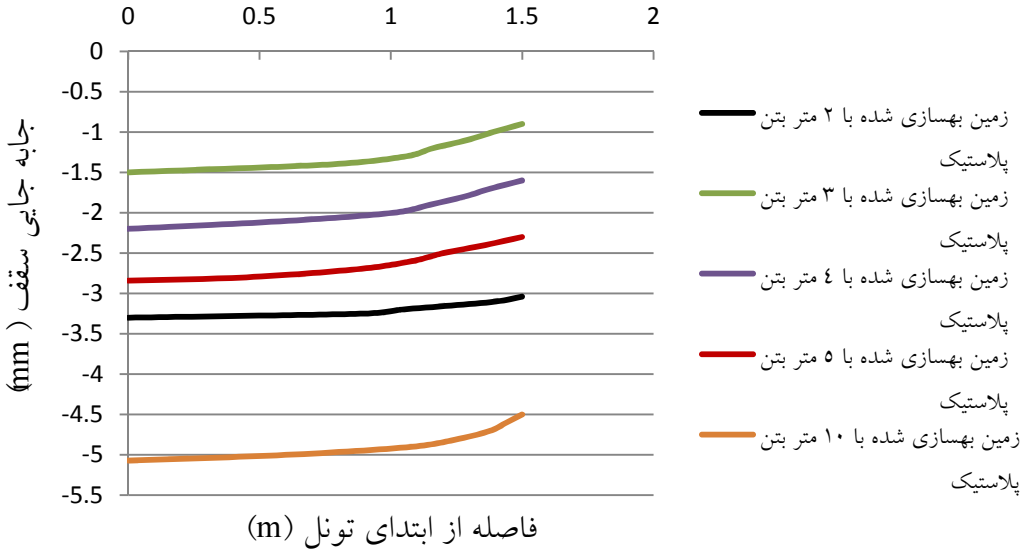
شکل ۴- نمای یک چهارم مدل از روبه‌رو و نزدیک تونل

بنابراین مدل‌هایی ساخته شد و بتن پلاستیک با طول دو، سه، چهار، پنج و ۱۰ متر استفاده شد. میزان حفاری همان‌طور که قبلا هم گفته شد ۱٫۵ متر صورت گرفت. شکل ۵ میزان جابه‌جایی سینه‌کار را در راستای محور Y مربوط به طول‌های مختلف بتن پلاستیک نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است با کاربرد دو متر بتن پلاستیک حداکثر جابه جایی ۲٫۶۷ سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش طول بتن پلاستیک به سه متر میزان تغییر مکان در جبهه‌کار به کمتر از یک سانتی‌متر(۴٫۶۳ میلیمتر) می‌رسد و همچنین در طول‌های چهار، پنج و ۱۰ متر میزان جابه‌جایی تقریبا به صفر میل می‌کند که نشان‌دهنده تأثیر مناسب بتن پلاستیک بر مهار جابه‌جایی در سینه‌کار می‌باشد. بنابراین مناسب‌ترین طول بتن پلاستیک با توجه به نتایج شکل ۵ چهار متر می‌باشد.



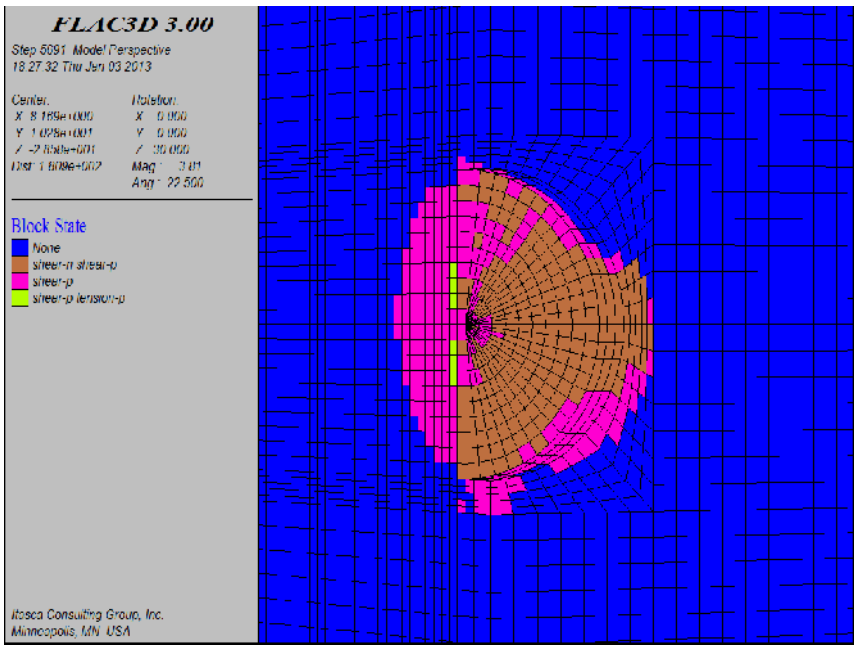
شکل ۵- نمودار میزان تغییر مکان سینه‌کار در حالت‌های مختلف در راستای Y

با توجه به اختلاف قطر کله حفار (۹٫۱۶۴ متر) و سپر *EPB* (۹٫۱۲۶ متر) خط هفت متروی تهران، فضای خالی بین سپر و خاک به‌وجود می‌آید که میزان آن، ۱۹ میلیمتر می‌باشد. در مورد اثرگذاری بتن پلاستیک بر جابه‌جایی سقف با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که حداکثر آن، در زمین بهسازی شده با ۱۰ متر بتن پلاستیک (پنج میلیمتر) رخ می‌دهد. بنابراین چون میزان جابه‌جایی سقف با کاربرد بتن پلاستیک کمتر از فضای خالی بین سپر و زمین می‌باشد دیگر نیازی به اعمال سپر نمی‌باشد. نکته جالب این است که اگر به روند کاهش میزان تغییر مکان سقف توجه شود، متوجه می‌شویم که با استفاده از بتن پلاستیک به میزان دو متر جابه جایی، کاهش چشمگیر و سپس سه متر میزان جابه‌جایی کاهش بیشتری پیدا می‌کند، (لازم به ذکر است که حداکثر جابه‌جایی سقف در مدل بدون بتن پلاستیک ۳/۳۲ سانتی‌متر بوده است) اما هنگامی‌که طول بتن پلاستیک به ۴ متر می‌رسد میزان جابه‌جایی سقف بیشتر شده و این روند با افزایش بتن پلاستیک ادامه پیدا می‌کند. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش طول بتن پلاستیک به میزان ۴ متر با توجه به چگالی بیشتر آن نسبت به خاک باعث افزایش وزن و بار وارده بر روی سقف تونل شده و به افزایش میزان جابه‌جایی در سقف منجر می‌شود. ناگفته نماند با وجود این مسأله باز هم جابه‌جایی سقف نسبت به حالت بدون بهسازی در وضعیت مطلوب‌تری قرار دارد.

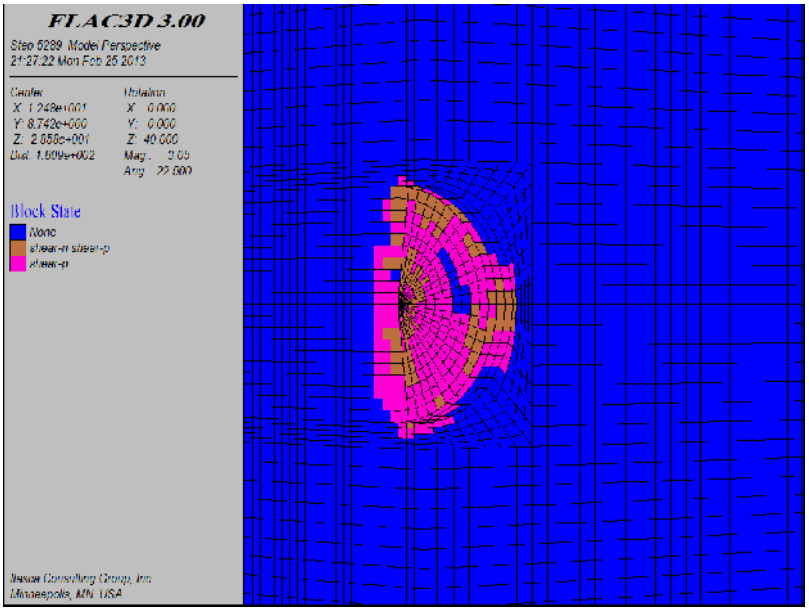


شکل ۶- میزان جابه‌جایی سقف در حالت‌های مختلف بهسازی زمین

در این قسمت زون‌های گسیخته‌شده اطراف و سینه‌کار تونل را در حالت‌های مختلف بهسازی زمین با بتن پلاستیک بررسی شده است. با توجه به شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود که علی‌رغم بهبود وضعیت اطراف تونل باز هم ناحیه پلاستیک‌شده با بهسازی زمین به طول دو و سه متر همچنان زیاد بوده و احتمال ناپایداری باقی است.



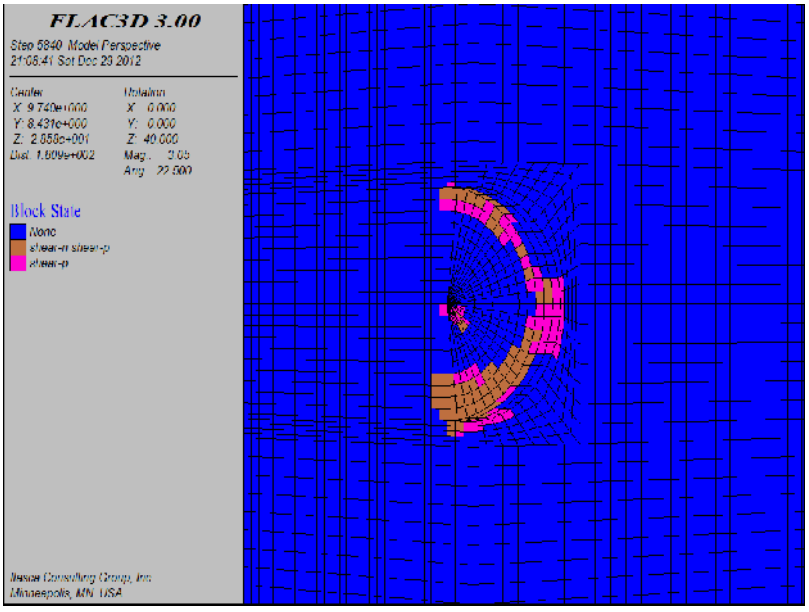
شکل ۷- ناحیه گسیخته‌شده بعد از حفاری در زمین بهسازی‌شده با ۲ متر بتن پلاستیک



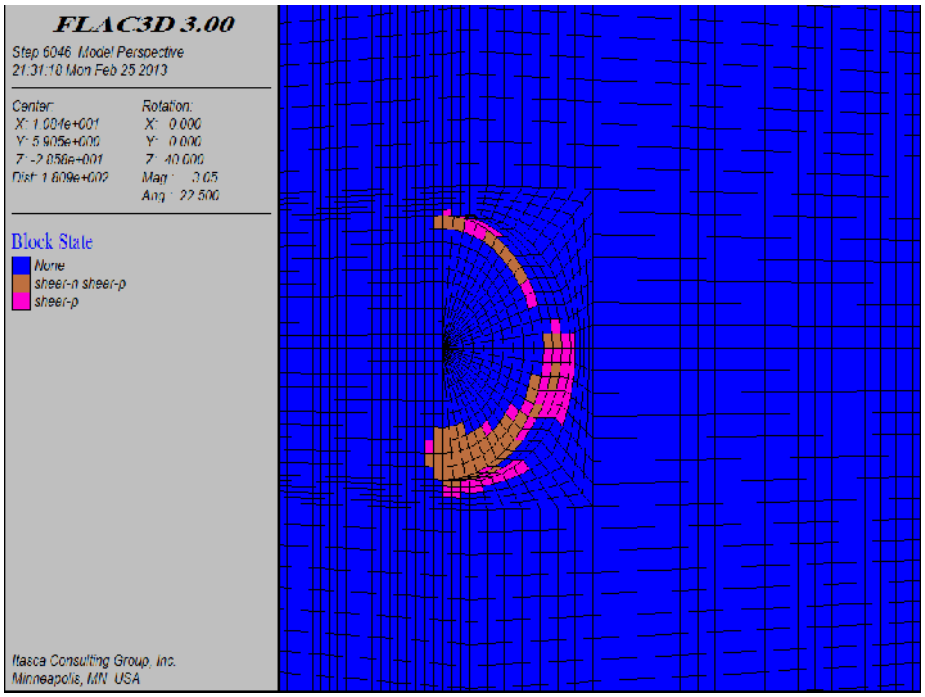
شکل ۸- ناحیه گسیخته‌شده بعد از حفاری در زمین بهسازی‌شده با ۳ متر بتن پلاستیک

با کاربرد چهار متر بتن پلاستیک (شکل ۹) جهت بهسازی زمین مشاهده شد که میزان زون‌های گسیخته‌شده در اطراف و سینه‌کار تونل به مقدار چشمگیری کاهش پیدا کرد و به نظر می‌رسد که نواحی کمی هم که در آن زون پلاستیک‌شده به‌وجود آمده سبب ناپایداری جبهه‌کار نشوند. بهسازی زمین با طول پنج و ۱۰ متر (شکل۱۰ و شکل۱۱) نشان می‌دهند که بتن پلاستیک از چهار متر به بعد در پایداری سینه‌کار بی‌تأثیر هستند. بنابراین می‌توان طول چهار متر را به‌عنوان طول بهینه جهت پایداری سینه‌کار جهت حفاری ۱٫۵ متر در نظر گرفت.

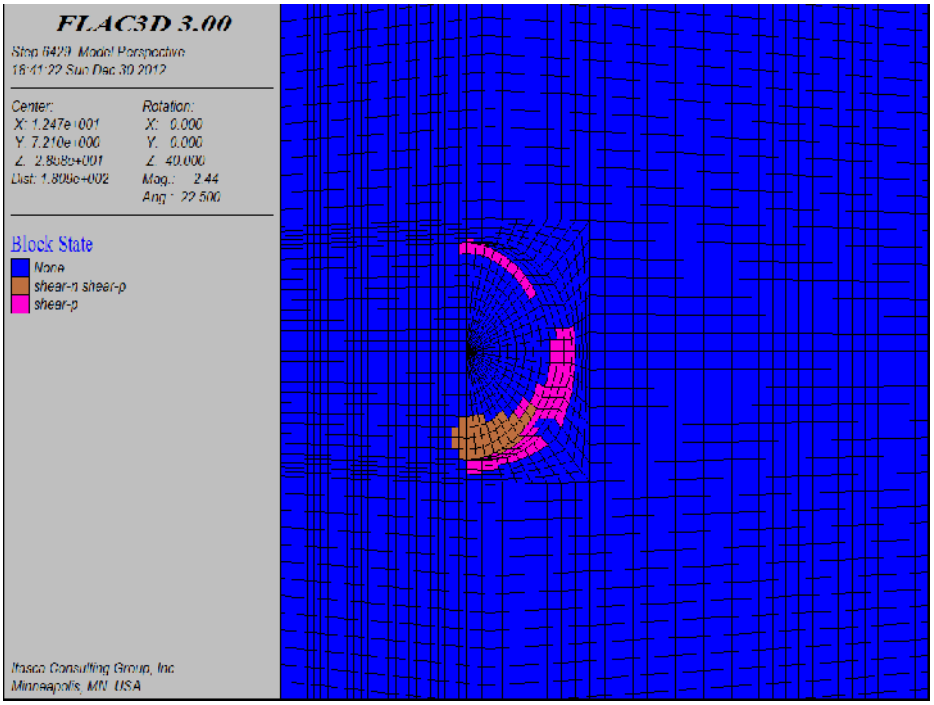
نتایج حاصل از مدل‌های مختلف در جدول ۴ بیان شده است.



شکل ۹- ناحیه گسیخته‌شده بعد از حفاری در زمین بهسازی‌شده با ۴ متر بتن پلاستیک



شکل۱۰- ناحیه گسیخته‌شده بعد از حفاری در زمین بهسازی‌شده با ۵ متر بتن پلاستیک



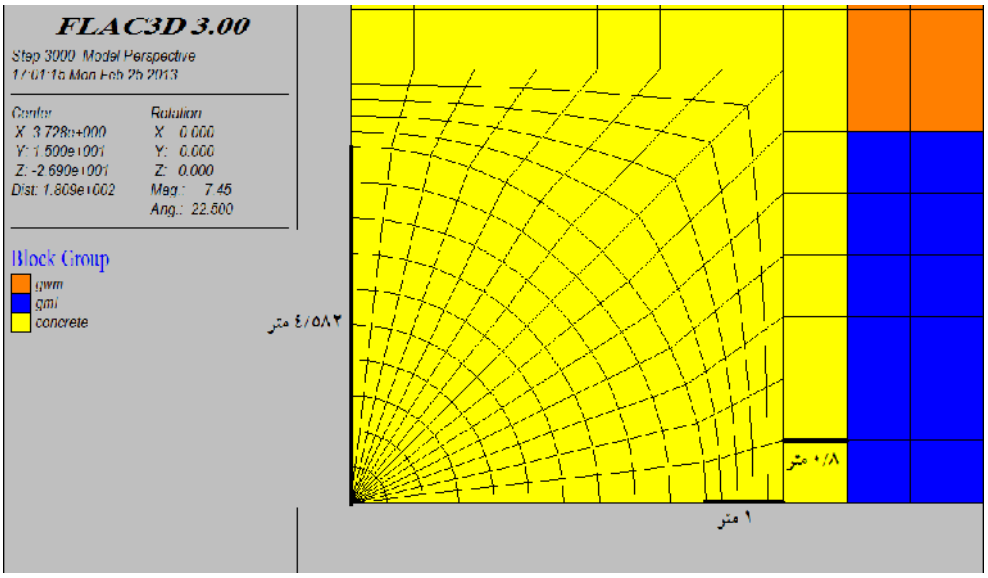
شکل۱۱- ناحیه گسیخته‌شده بعد از حفاری در زمین بهسازی‌شده با ۱۰ متر بتن پلاستیک

جدول ۴- نتایج حاصل از بهسازی زمین با بتن پلاستیک با طول‌های مختلف

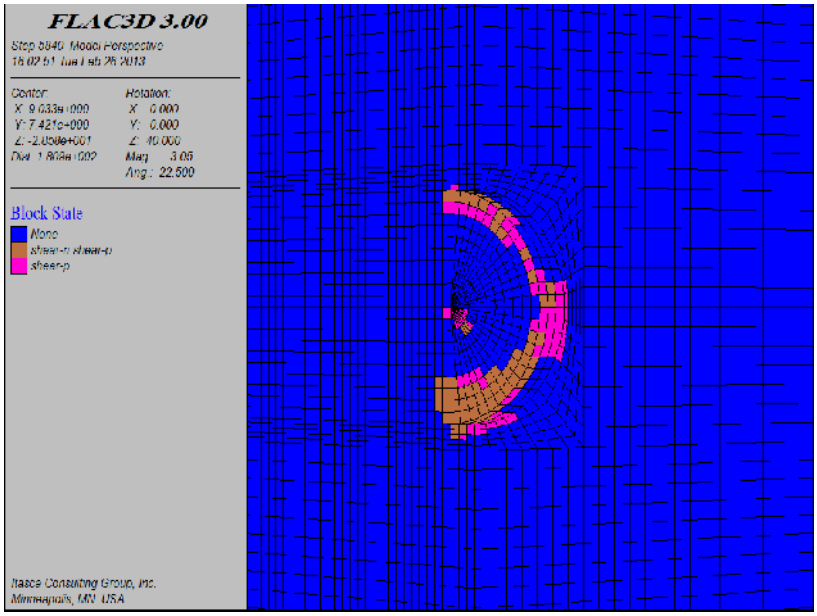
نوع حفاری	حداکثر جابه‌جایی سقف (میلی‌متر)	حداکثر جابه‌جایی سینه‌کار (میلی‌متر)	طول ناحیه گسیخته‌شده در مرکز تونل (متر)
حفاری ۱/۵ متر با کاربرد ۲ متر بتن پلاستیک	۳/۳	۲۶/۷	۴/۵
حفاری ۱/۵ متر با کاربرد ۳ متر بتن پلاستیک	۱/۵	۴/۶۳	۱/۵
حفاری ۱/۵ متر با کاربرد ۴ متر بتن پلاستیک	۲/۲	۱/۶۸	۰
حفاری ۱/۵ متر با کاربرد ۵ متر بتن پلاستیک	۲/۸	۱	۰
حفاری ۱/۵ متر با کاربرد ۱۰متر بتن پلاستیک	۵	۰/۹	۰

۷- بررسی گسترش عرضی بتن پلاستیک بر روی پایداری تونل

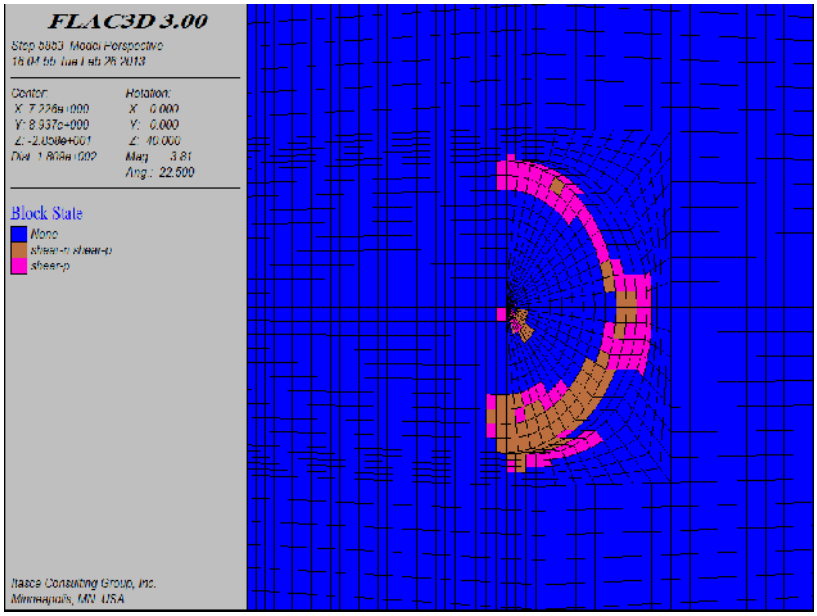
در بخش قبل دیدیم که گسترش عرضی بتن پلاستیک یک متر بیش از شعاع تونل درنظر گرفته شده بود. جهت آگاهی از تأثیر گسترش عرضی بیشتر بتن پلاستیک بر روی پایداری تونل مدل‌هایی با ابعاد عرضی ۱/۸ و ۲/۶ متر (شکل۱۲) بیش از شعاع تونل در راستای X ساخته شد. با توجه به شکل۱۳ و شکل۱۴ مشاهده می‌شود که افزایش عرضی بتن پلاستیک تأثیری بر روی بهبود زون‌های پلاستیک‌شده نداشته و بنابراین نیازی به افزایش عرضی بتن پلاستیک نیست. لازم به تذکر است که در مدل‌های ساخته شده با توجه به بخش قبل، طول بتن پلاستیک چهار متر درنظر گرفته شد.



شکل۱۲- افزایش عرضی بتن پلاستیک به میزان ۱/۸ متر



شکل۱۳- ناحیه گسیخته‌شده با گسترش عرضی ۱٫۸ متری بتن پلاستیک



شکل۱۴- ناحیه گسیخته‌شده با گسترش عرضی ۲٫۶ متری بتن پلاستیک

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور مشاهده تأثیر بتن پلاستیک بر پایداری سینه‌کار و تعیین طول بهینه آن، مدل‌های متنوعی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC3D* ساخته‌شد که با بررسی وضعیت جابه‌جایی‌ها و محدوده زون‌های پلاستیک‌شده، طول چهار متر به‌عنوان طول بهینه مدنظر قرارگرفت. همچنین با کاربرد بتن پلاستیک جابه‌جایی سقف کمتر از فضای خالی بین سپر و خاک بوده و به‌همین دلیل مدلسازی سپر در حفاری ۱٫۵ متر لازم نیست. در مدل‌های ابتدایی که جهت به‌دست‌آوردن طول بهینه بتن پلاستیک استفاده شد،

گسترش عرضی آن از اطراف تونل یک متر لحاظ شد. به منظور مشاهده تأثیر تغییر گسترش عرضی بتن پلاستیک بر پایداری تونل مدل‌هایی با ابعاد عرضی بیشتر ساخته شد که تغییر زیادی در وضعیت پایداری تونل مشاهده نشد. این امر نشان‌دهنده آن است که زون‌های گسیخته‌شده حاصل، ناشی از مشخصات ذاتی بتن پلاستیک بوده و برای برطرف‌کردن آن‌ها باید مشخصات بتن پلاستیک را بهبود بخشید.

۹- فهرست نمادها

در جدول ۵ فهرست نمادها آورده شده است.

جدول ۵- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
K	-	ضریب فشار جانبی خاک

۱۰- منابع

Brown, B. H., & Brady, E. T. (2007). *Rock mechanics: for underground mining.* Springer.

Dean, A. a. (2006). A Framework for Design of Tunnel Eyes. *Proceedings 19th Canadian Tunnelling Conference*, (pp. 26-36). Vancouver.

El-Nahhas, F. M. (2006). Tunneling and supported deep excavations in the Greater Cairo. *Tunneling and supported deep excavations in the Greater Cairo.* Sharm El-Sheikh, Egypt.

Herrenknecht, M. (2005). CHALLENGES OF URBAN CITY TUNNELLING USING MECHANIZED. *Herrenknecht AG*, (pp. 1-5). Germany.

Hunt, S. W. (2008). Mitigating Tunnel Launch and Reception Challenges. *SME*, (pp. 812-823).

Mielenz, J. (2003). Breakthrough technology on CTRL. *Tunnels and Tunnelling International*, (pp. 24-26).

Richards D.P., B. A. (1996). Review of break-in and breakout. *Proceedings North American Tunneling*, (pp. 451-460). Balkema.

Saglamer, A. Y. (1997). Soil and Foundation Engineering Evaluation. *Geotechnical Report.* Istanbul.

Schurch, M., & Jost, p. (2006). GFRP Soft-Eye for TBM Breakthrough: Possibilities with a Modern Construction Material. *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling* (pp. 397-404). Bangkok: International Tunneling Association.

SELI, C. (2008). *Tehran Metro Line 7, North - South Section.*

Town, P. (2003). TBM recovery after shaft seal failures. *Tunnels and Tunneling International*, (pp. 24-26).