

بررسی اثر سیستم پیش‌نگهداری (فورپولینگ) بر کنترل نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونل‌های کم‌عمق شهری تحت بارگذاری ترافیک ریلی

محمد کرم‌نیای فر^۱؛ علی‌نقی دهقان^{۲*}

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران؛ گرایش ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی،

تهران، ایران

۲- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۵/۱۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.7345.1345

چکیده

این مطالعه بر اساس مدل‌سازی‌های دوبعدی (2D) و سه‌بعدی (3D) مراحل مختلف حفاری تونل زیرگذر ضربعلی‌زاده-مداح تحت بار ترافیک ریلی جهت ارزیابی تغییر شکل و نشست سطح زمین به کمک نرم‌افزار المان محدود پلکسیس (PLAXIS) انجام گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی دوبعدی معرف شرایط پایدار تونل به‌واسطه ظرفیت قابل قبول سیستم‌های نگهداری (اصلی و موقت) طراحی‌شده در بخش‌های مختلف تونل (دیواره‌های اصلی، میانی و کف بند) در برابر بارهای ترکیبی مختلف است. همچنین بر اساس آنالیز حساسیت انجام‌شده در مدل‌سازی دوبعدی، مقاومت چسبندگی و مدول الاستیسیته از پارامترهای المان معادل سیستم فورپولینگ استفاده‌شده در اطراف تونل به‌عنوان سیستم پیش‌نگهداری، به ترتیب بیشترین تأثیر در کنترل نشست سطح زمین دارند. علی‌رغم وضعیت پایدار تونل، مقدار نشست سطحی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی دوبعدی (۴۴ میلی‌متر) بزرگ‌تر از حداکثر مقدار نشست مجاز تونل (۴۳ میلی‌متر) بوده است و نیز معرف تغییر شکل نسبتاً زیاد سطح زمین در مقایسه با داده‌های ثبت‌شده توسط ابزار دقیق (۳۰ میلی‌متر) در حین حفاری و اجرای تونل دارد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر اثر فورپولینگ بر کنترل نشست سطحی، مدل‌سازی سه‌بعدی مراحل حفاری با لحاظ نمودن پروفیل تغییر شکل طولی (Longitudinal Deformation Profile) (LDP) سینه‌کار تونل انجام گرفت. نتایج حاصل معرف مجاز بودن حداکثر مقدار نشست سطحی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سه‌بعدی (۳۲ میلی‌متر) بوده و همچنین از تطابق بسیار خوبی با داده‌های ابزار دقیق (۳۰ میلی‌متر) برخوردار است. با توجه به اینکه در مدل‌سازی سه‌بعدی مقدار ترخیص یا رهاسازی تنش در مراحل مختلف حفاری بر اساس پروفیل تغییر شکل طولی سینه‌کار در نظر گرفته می‌شود، از این‌رو مقادیر ترخیص تنش لحاظ شده در مدل‌سازی سه‌بعدی نسبت به مدل‌سازی دوبعدی که بر اساس روابط تجربی لحاظ می‌شوند، به شرایط واقعی زمین در زمان اجرای تونل نزدیک‌تر و دقیق‌تر می‌باشند.

واژگان کلیدی

نشست سطح زمین
حفاری مرحله‌ای تونل
سیستم پیش‌نگهداری
فورپولینگ
بارگذاری ترافیک ریلی
مدل‌سازی عددی 2D و 3D
روش المان محدود (FEM)
تونل زیرگذر ضربعلی‌زاده-مداح

دارای شرایط زمین‌شناسی ویژه‌ای می‌باشند. هرگونه حفاری و احداث تونل در محیط‌های شهری، اثرات و چالش‌هایی را با خود به همراه دارد که یکی از مهم‌ترین آنها نشست سطح زمین است. تأثیر نشست‌های ناشی از تونل‌های ترافیکی در حال احداث بر سازه‌ها و سایر تأسیسات شهری مجاور بسیار حائز اهمیت است. از این‌رو مهم‌ترین مسئله در طراحی و

۱- پیشگفتار

پیشرفت ترافیکی شهرهای رو به توسعه همواره در حال گسترش بوده و حفاری تونل‌ها به‌منظور عبور وسایل نقلیه و احداث خطوط مترو نیز بخشی از این روند است. تونل‌های ترافیکی شهری غالباً در محیط‌های آبرفتی حفاری‌شده و

* نویسنده مسئول - تهران؛ انتهای بزرگراه شهید ستاری؛ میدان دانشگاه؛ بولوار شهدای حصارک؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ گروه مهندسی معدن؛ صندوق پستی شماره ۱۴۷؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۸۴۰۴؛ دورنگار: ۰۲۱-۴۴۸۶۴۲۱

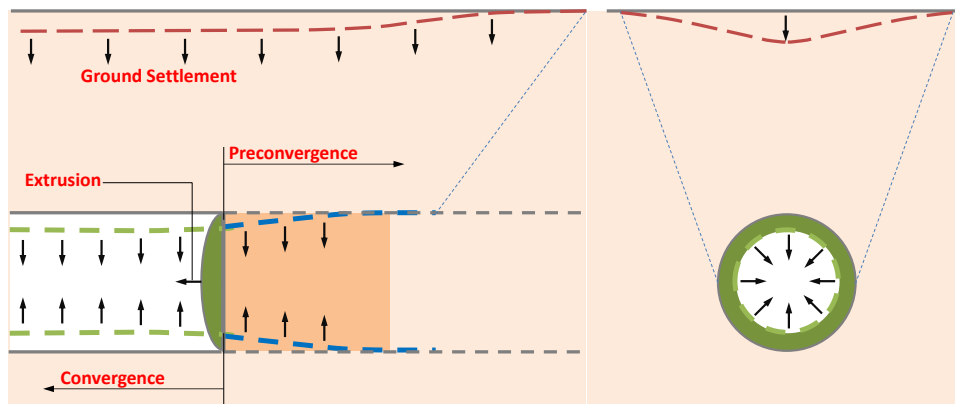
رایانامه: a.dehghan@srbiau.ac.ir

بدیهی است که با کنترل هر یک از این مؤلفه‌ها می‌توان تا حد زیادی نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل را کنترل کرد. از آنجائی که جداره تونل با استفاده از پوشش اولیه و نهایی نگهداری می‌شود، عمده تغییر شکل‌ها و ناپایداری‌ها مربوط به سینه کار حفاری است که فاقد نگهداری لازم است.

نشست به‌وجودآمده در اثر حفاری زیرزمینی سبب ایجاد آسیب‌های جدی به سازه‌های نزدیک می‌شود. روش جدید تونل‌سازی اتریشی (NATM)، یکی از کاربردی‌ترین روش‌های طراحی و ساخت تونل در مناطق شهری بوده که عمدتاً به دلیل قابلیت سازگاری این روش با شرایط مختلف زمین است. هدف اصلی روش تونل‌سازی NATM ارائه‌ی تونل پایدار و اقتصادی‌ست. این روش به‌طور کامل می‌تواند از پایداری درونی خاک‌های اطراف، به‌وسیله توزیع مجدد تنش بعد از یک حفاری مطمئن استفاده کند. این به دلیل یک طراحی دینامیکی است که مبتنی بر طبقه‌بندی توده خاک و همچنین مشاهده‌ی تغییرات درجا است (Wittke et al., 2006 و Tonon, 2010).

ساخت تونل‌های ترافیکی شهری اتخاذ شیوه‌های مناسب جهت پیش‌بینی و کنترل میزان نشست سطح زمین به‌منظور حفظ ایمنی سازه‌های سطحی است (Sadeghi et al., 2016, 2016, Fang et al., 2016).

به هنگام حفر یک فضای زیرزمینی یا یک تونل کم‌عمق در زمین‌های سست، تغییراتی در وضعیت تنش‌های داخلی زمین پدید می‌آید که نتیجه آن جابجایی‌های سریع سینه کار و همگرایی جداره تونل به‌طرف بخش حفاری‌شده و تنش‌زدایی در داخل زمین است. این پدیده در صورت وجود آب گسترش بیشتری پیدا می‌کند به‌طوری‌که عدم کنترل آن ممکن است منجر به ناپایداری‌های موضعی یا حتی کامل فضای زیرزمینی و سرانجام باعث نشست در سطح زمین شود. به‌طورکلی می‌توان جابجایی‌های اولیه ناشی از حفاری تونل را به سه مؤلفه (۱) برآمدگی سینه کار حفاری (Extrusion)، (۲) همگرایی دیواره تونل (Convergence) و (۳) پیش همگرایی (Pre-Convergence) تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱، Lunardi, 2008).



شکل ۱- انواع تغییر شکل‌های اولیه ایجادشده در اثر حفر تونل (Lunardi, 2008)

درزمینه پیش‌بینی تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجادشده ناشی از حفر تونل، تحقیقات فراوانی صورت گرفته و روش‌های مختلفی ارائه شده است که برخی از آن‌ها بر مبنای اصول محاسباتی و بر اساس خواص خاک و تعدادی مبتنی بر مشاهدات تجربی هستند. روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی از مهم‌ترین روش‌های ارائه‌شده برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین می‌باشند (Peck, 1969) و (Loganathan & Poulos, 1998)، (Han & Suwansawat & Einstein, 2006)، (Standing, 2007) و (Qu & Hsieh, 2011) و (Gong et al., 2014). در سال‌های اخیر مطالعات نسبتاً گسترده‌ای درزمینه تحلیل و پایداری فضاهای زیرزمینی و همچنین تحلیل نشست سطح زمین ناشی از فعالیت‌های زیرزمینی از جمله حفاری و ساخت تونل‌های مترو و ترافیکی در محیط‌های شهری با شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای ژئوتکنیکی مختلف توسط

درزمینه پیش‌بینی تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجادشده ناشی از حفر تونل، تحقیقات فراوانی صورت گرفته و روش‌های مختلفی ارائه شده است که برخی از آن‌ها بر مبنای اصول محاسباتی و بر اساس خواص خاک و تعدادی مبتنی بر مشاهدات تجربی هستند. روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی از مهم‌ترین روش‌های ارائه‌شده برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین می‌باشند (Peck, 1969) و (Loganathan & Poulos, 1998)، (Han & Suwansawat & Einstein, 2006)، (Standing, 2007) و (Qu & Hsieh, 2011) و (Gong et al., 2014). در سال‌های اخیر مطالعات نسبتاً گسترده‌ای درزمینه تحلیل و پایداری فضاهای زیرزمینی و همچنین تحلیل نشست سطح زمین ناشی از فعالیت‌های زیرزمینی از جمله حفاری و ساخت تونل‌های مترو و ترافیکی در محیط‌های شهری با شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای ژئوتکنیکی مختلف توسط

امتداد تونل به واسطه زون مسلح قوسی فراهم می‌آورد. این روش، جابجایی و کرنش‌های پلاستیکی در تاج و بارهای پوشش را کاهش داده و در نتیجه پایداری سینه کار افزایش یافته و از نشست‌های سطحی تونل‌های حفر شده به مقدار زیادی جلوگیری می‌شود و همچنین ایمنی اجرای عملیات حفاری تونل را با تحکیم سقف بالا می‌برد. ارزیابی عملکرد سیستم پیش‌نگهداری فورپولینگ در کنترل تغییر شکل‌ها و نشست سطحی زمین به واسطه اثر بارهای ترافیک ریلی می‌تواند نقش مؤثری در طراحی و اجرای بهینه تونل‌های شهری خصوصاً در زمین‌های آبرفتی و روباره کم ایفا نماید.

در این مطالعه با انجام مدل‌سازی‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی به روش المان محدود اثر بار ناشی از عبور قطار بر روی مراحل مختلف حفاری تونل ضربعلی-زاده-مداح که در تراز حدود ۱۵ متری از سطح زمین قرار دارد (حداکثر روباره حدود ۵ متر) و یقیناً اثر مستقیمی بر شرایط پایداری تونل در زمان ساخت و نیز متقابلاً حفاری تونل که می‌تواند با ایجاد تغییر شکل و نشست سطح زمین پایداری خطوط ریلی را تحت تأثیر قرار دهد، بررسی شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این تحقیق، بررسی اثر اجرای سیستم پیش‌نگهداری در اطراف فضای حفاری بر کنترل نشست سطح زمین با لحاظ نمودن میزان ترخیص یا رهاسازی تنش در شرایط مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی مراحل مختلف حفاری است.

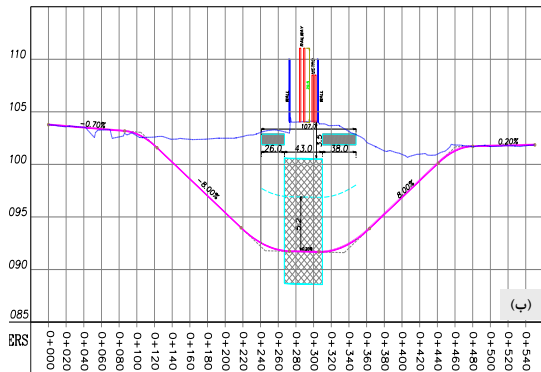
۲- مشخصات پروژه تونل ضربعلی‌زاده-مداح

۲-۱- معرفی پروژه

طرح اتصال خیابان ضربعلی‌زاده به خیابان مداح حد فاصل میدان عباسی تا خیابان شهید رجایی از معابر محدوده جنوبی تهران (منطقه ۱۶ شهرداری) است که در طرح تفصیلی تهران، نیاز به ارتباط این معبر دیده شده است شکل ۲ (Sahel, 2016a). عبور خط متروی شهری (خط ۱ متروی تهران) و خط راه‌آهن به صورت شمالی-جنوبی، این منطقه را به دو قسمت شرقی و غربی تبدیل کرده است. بنابراین هدف از اجرای پروژه زیرگذر ضربعلی‌زاده-مداح، عبور از زیر کریدور مترو-راه‌آهن و اتصال خیابان ضربعلی‌زاده به خیابان مداح است. موقعیت

محققین مختلف انجام شده است (Li & Zhang, 2013), (Choi & Lee, 2010), (Dehghan et al., 2012), (Carranza-Torres & Reich, 2017), (Lai et al., 2017), (Patemesi et al., 2017), (Chen et al., 2016), (Nagan et al., 2017), (Zhao et al., 2017), (Ukritchon et al., 2017), (Ali et al., 2017) و (Pan & Dias, 2017). عمده این مطالعات بر پایه روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی ارائه شده توسط محققین پیشین با رویکردهای جدید (با در نظر گرفتن مشخصات هندسی تونل و پارامترهای مهندسی توده خاک دربرگیرنده تونل) انجام شده است. امروزه با بهره‌گیری از روش‌های حفاری ایمن (مرحله‌ای) و نیز سیستم‌های نگهداری بهینه سعی بر کنترل تغییر شکل‌ها و نشست سطحی زمین در مناطق شهری شده است؛ اما گاهی اوقات به علت شرایط زمین‌شناسی نامناسب (پارامترهای فیزیکی و مکانیکی زمین) اجرای تونل حتی با ایمن‌ترین روش‌های حفاری و سیستم‌های نگهداری امکان‌پذیر نبوده و یا اجرای آنها با ریسک بسیار بالایی از نظر پایداری تونل و نشست سطح زمین برخوردار است. از این رو در بسیاری از روش‌های نوین حفاری و ساخت تونل (به صورت چندمرحله‌ای و یا تمام مقطع) از جمله روش‌های *NATM*, *STM*, *ADECO-RS* و غیره از روش‌های کمکی نظیر پیش‌نگهداری (فورپولینگ)، تقویت سطح برش، تقویت پاشنه کار و غیره به منظور تقویت زمین پیشرو در مسیر حفاری و کنترل تغییر شکل و نشست سطحی زمین اطراف استفاده می‌نمایند (Date et al., 2008; Lunardi, 2008; Juneja et al., 2009; Kontothanassis et al., 2010; Kimura et al., 2011; Hun, 2011; Fang et al., 2012; Tuncdemir et al., 2012; Lunardi et al., 2014). یک روش کمکی، روشی ساخت ثانویه با ماهیتی ویژه است تا امنیت ساخت تونل و ایمنی زیست‌محیطی فضای اطراف را در مکان‌هایی که الگوهای نگهداری سنتی یا مقیاس‌های حفاری متوالی راه‌حل‌های مؤثر یا سودآوری را ارائه نمی‌دهد، تضمین نماید (Lunardi et al., 2014 و Fang et al., 2012). سیستم پیش‌نگهداری فورپولینگ، توانایی پایداری محدود سینه کار تونل را در هر دو جهت عمود و طولی

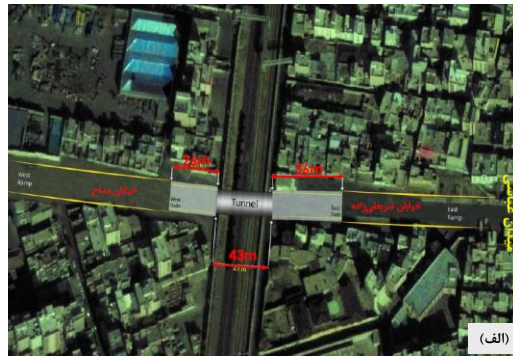
۵ متر) بوده که عرض و ارتفاع تونل (مرز حفاری) به ترتیب ۱۴/۱۴ و ۱۱/۵۵ متر در نظر گرفته شده است شکل ۳ (Sahel, 2016a). تونل زیرگذر ضریبی‌زاده-مداح دارای دو رمپ شرقی و غربی به طول تجمعی ۲۶۰ متر و دو محدوده پوش و کند به طول تجمعی ۶۲ متر است.



(ب) پروفیل مسیر زیرگذر ضریبی‌زاده-مداح

شکل ۲- مشخصات پروژه مورد مطالعه (Sahel, 2016a)

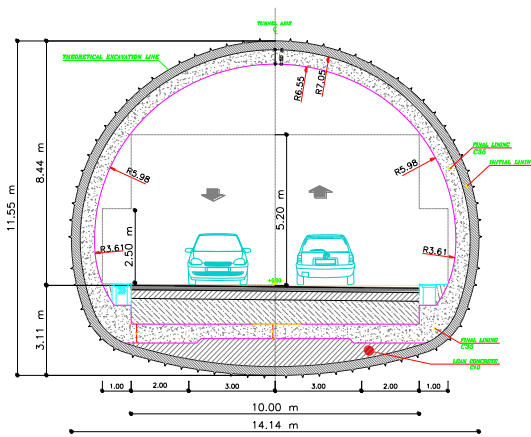
جغرافیایی محل احداث پروژه و نیز پروفیل مسیر به ترتیب در شکل ۲- الف و ب نشان داده شده است. پروژه زیرگذر ضریبی‌زاده-مداح شامل یک تونل با مقطع نسبتاً نعل اسبی شکل دوخطه (Two lanes cross section) به طول تقریبی ۴۳ متر و روباره کم (حداکثر



(الف) تصویر هوایی از محدوده طرح

BH-2 و BH-3 به ترتیب در اعماق ۲۸ و ۲۹ است). آزمون های آزمایشگاهی شامل آزمون سه محوره و تک‌محوره، آزمون برش مستقیم، آزمون تحکیم، دانه‌بندی و اتربرگ و آزمایش شیمیایی بر روی نمونه‌های اخذ شده از چاهک‌ها و گمانه‌ها در مراحل مختلف مطالعات صورت گرفته است. آزمون‌های برجا (صحرایی) انجام شده نیز شامل آرایش بارگذاری صفحه‌ای و SPT در گمانه‌ها و چاهک حفاری شده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، لایه‌های خاکی مسیر به سه واحد اصلی زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند. در شکل ۴، نیز پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل ضریبی‌زاده-مداح نشان داده شده است. توصیفی از واحدهای خاکی موجود در محدوده طرح در زیر ارائه شده است (Sahel, 2016b):

الف) واحد زمین‌شناسی مهندسی D: این واحد دارای ریزدانه‌هایی بیش از ۶۰ درصد و شامل رسوبات رس و سیلت است که در بعضی مواقع می‌تواند مقادیر بسیار کمی از ماسه را نیز داشته باشد. از لحاظ طبقه‌بندی یونیفاید ذرات تشکیل‌دهنده این واحد خاکی عمدتاً در رده‌های CL و ML قرار می‌گیرند. این واحد بر اساس دو ویژگی، شاخص استحکام و درصد باقیمانده بر روی الک شماره ۴ به چهار



شکل ۳- مشخصات هندسی مقطع عرضی تونل

(Sahel, 2016a)

۲-۲- ویژگی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی
مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی انجام شده شامل بازدیدهای میدانی، حفاری گمانه و چاهک و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی است. به منظور دستیابی به داده‌های مورد نیاز طراحی تعداد ۳ گمانه ماشینی و ۱ چاهک اکتشافی در مسیر تونل حفر گردیده است (تراز آب زیرزمینی در گمانه BH-1 در عمق ۲۳ متر و در گمانه‌های

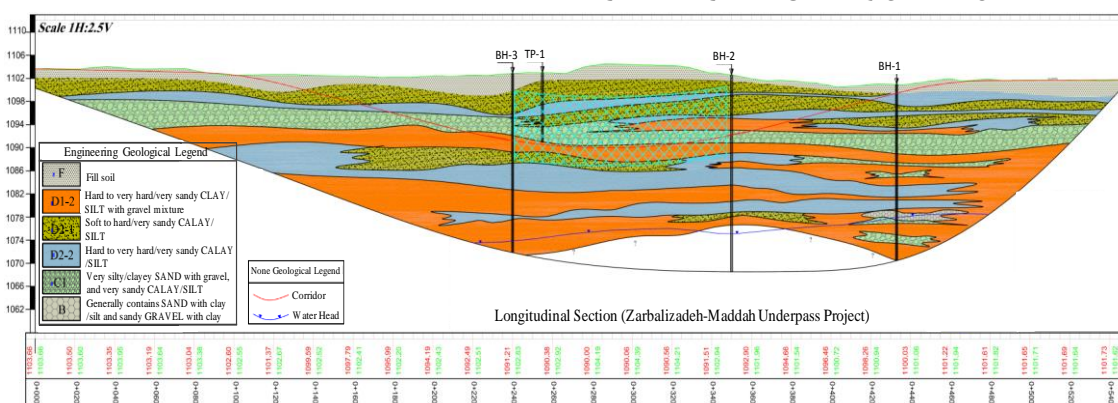
نوع خاک‌های *GC*، *SM* و *SC* است.

(پ) واحد زمین‌شناسی مهندسی *B*: نهشته‌های تشکیل‌دهنده این واحد عمدتاً از شن ماسه‌ای و در بعضی از محدوده‌ها از ماسه شنی تشکیل شده است. این واحد خاکی طبق استاندارد *USCS* در گروه خاک‌های *GP-GC*، *GW-GM*، *BSCS* در رده خاک‌های *GWC*، *GWM*، *GWC* و *GWM* طبقه‌بندی می‌شود. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) برای این واحد کمتر از ۱۲ تا ۳۵٪ است.

بر پایه مطالعات ژئوتکنیکی و مکانیک خاک انجام گرفته‌شده از توده خاک مسیر تونل، ۱۱ نوع لایه خاکی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف شناسایی شده که مشخصات آنها در جدول ۱، ارائه شده است.

گروه مختلف تقسیم می‌گردد. دو گروه *D2-1* و *D2-2* دارای مقادیر باقیمانده کمتر از ۱۵ درصد بر روی الک شماره چهار هستند با این تفاوت که در اولی (*D2-1*) مقدار شاخص استحکام کمتر از ۱ و در دومی (*D2-2*) بیشتر از یک است. همچنین در دو گروه *DI-1* و *DI-2* مقادیر باقیمانده بر روی الک شماره چهار بیشتر از ۱۵ درصد است در این دو گروه وقتی شاخص استحکام بیشتر از ۰/۷ باشد خاک از نوع *DI-2* و اگر کمتر از ۰/۷ باشد خاک از نوع *DI-1* است.

(ب) واحد زمین‌شناسی مهندسی *CI*: جنس این واحد خاکی عمدتاً از ماسه شنی به همراه مقادیر زیادی از سیلت و رس تشکیل شده و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در این واحد بین ۳۵ تا ۶۰٪ است. نهشته‌های تشکیل‌دهنده این واحد طبق استاندارد *USCS* از



شکل ۴- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (Sahel, 2016b)

۲-۳- روش حفاری و مراحل اجرایی

تونل پروژه زیرگذر ضریعی‌زاده-مداح روش مرحله‌ای/ناتم (*SEM/NATM*) گالری‌های جانبی یا شاخ‌بزی (*Twin sidewall drift*) در هفت مرحله حفاری می‌شود (شکل ۵). پس از اجرای عملیات پیش تحکیم (شامل اجرای فورپولینگ)، حفاری تونل آغاز می‌شود. بر اساس طراحی انجام‌شده، حفاری و نگهداری اولیه و موقت تونل به ترتیب در هفت مرحله مطابق شکل ۵ صورت می‌گیرد (Sahel, 2016a).

به‌طورکلی مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری اولیه و موقت تونل به‌صورت ذیل است
الف- حفاری مقطع با گام طراحی شده

ب- اجرای لایه اول شاتکریت

ج- اجرای لایه اول مش

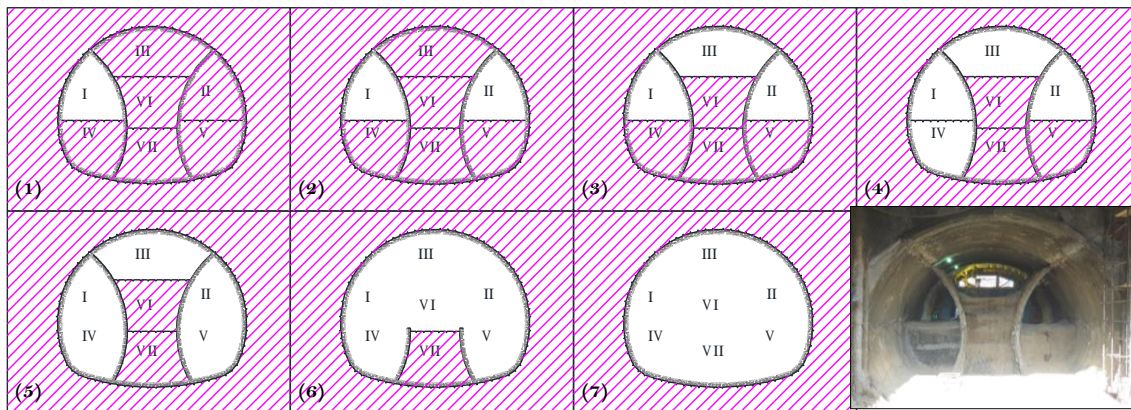
د- نصب قاب خربایی/ مشبک فولادی (*Lattice girder*)

ه- اجرای شاتکریت

و- نصب لایه دوم مش و در نهایت اجرای شاتکریت نهایی
گام پیشروی (و فواصل نصب لتیس گیردر) برای محدوده کریدور (محدوده ریل قطار و مترو) ۵۰ سانتیمتر و برای محدوده قبل از کریدور ۷۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در شکل ۶، پلانی از مراحل اجرای تونل به همراه گام پیشروی مقاطع مختلف تونل نشان داده شده است. فاصله طولی میان مراحل مختلف حفاری برای بخش‌های فوقانی و تحتانی تونل در حدود ۲ متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی مسیر تونل (Sahel, 2016b)

لایه	ID	D (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	m (NU)	v (NU)	c (kPa)	ϕ (deg.)	Ψ (deg)	K_0^{nc} (NU)
۱	Fill	۰-۲/۷	۱۸	۱۸	۲۳	۲۳	۶۹	۰/۵	۰/۵	۱۵	۲۶	۰	۰/۵۶
۲	D2-1	۲/۷-۶	۱۸	۱۸	۲۸	۲۸	۸۴	۰/۵	۰/۳۰	۳۰	۲۸	۰	۰/۵۳
۳	D2-2	۶-۷/۵	۱۸	۱۸	۲۶	۲۶	۷۸	۰/۵	۰/۳۰	۳۲	۲۷	۰	۰/۵۴
۴	D2-1	۷/۵-۱۰	۱۸	۱۸	۲۸	۲۸	۸۴	۰/۵	۰/۳۰	۳۰	۲۸	۰	۰/۵۳
۵	C1	۱۰-۱۴/۵	۱۸/۵	۱۸/۵	۵۲	۵۲	۱۵۶	۰/۵	۰/۳۱	۲۰	۳۴	۴	۰/۴۴
۶	D1-2	۱۴/۵-۱۸	۱۸	۱۸	۳۰	۳۰	۹۰	۰/۵	۰/۳۲	۳۱	۳۰	۰	۰/۵۰
۷	D2-1	۱۸-۱۹/۷	۱۸	۱۸	۲۸	۲۸	۸۴	۰/۵	۰/۳۰	۳۰	۲۸	۰	۰/۵۳
۸	D2-2	۱۹/۷-۲۳/۵	۱۸	۱۸	۲۶	۲۶	۷۸	۰/۵	۰/۳۰	۳۲	۲۷	۰	۰/۵۴
۹	D1-2	۲۳/۵-۲۷	۱۸	۱۸	۳۰	۳۰	۹۰	۰/۵	۰/۳۲	۳۱	۳۰	۰	۰/۵۰
۱۰	D2-2	۲۷-۲۸	۱۸	۱۸	۲۶	۲۶	۷۸	۰/۵	۰/۳۰	۳۲	۲۷	۰	۰/۵۴
۱۱	D1-2	۲۸-۵۰	۱۸	۱۸	۳۰	۳۰	۹۰	۰/۵	۰/۳۲	۳۱	۳۰	۰	۰/۵۰



شکل ۵- مقطع عرضی مراحل اجرای تونل (حفاری و نصب سیستم نگهداری) زیرگذر ضربعلی‌زاده-مداح (Sahel, 2016a)

موقت در جدول ۳، ارائه شده است (Sahel, 2016a).

۴-۲- مشخصات سیستم نگهداری

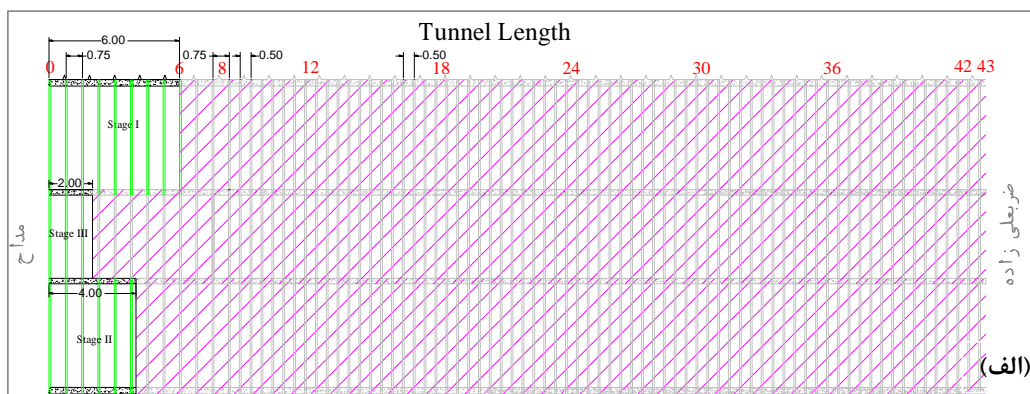
به منظور کنترل پایداری فضای زیرزمینی، در مراحل مختلف حفاری از دو نوع سیستم نگهداری اولیه و موقت در بخش‌های مختلف تونل استفاده شده است. دیواره اصلی تونل با شاتکریت به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر به عنوان پوشش اولیه (Initial support) و دیواره فرعی تونل (دیواره گالری‌های کناری) و کف بند به عنوان پوشش تخریبی یا موقت (Temporary support) با استفاده از شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر اجرا می‌شود. جزئیات مربوط به سیستم نگهداری (پوشش) اولیه و موقت در نظر گرفته شده برای تونل در جدول ۲، ارائه شده است (Sahel, 2016a). همچنین مشخصات مقاومتی سیستم‌های نگهداری اولیه و

۳- مدل‌سازی عددی برآورد میزان نشست

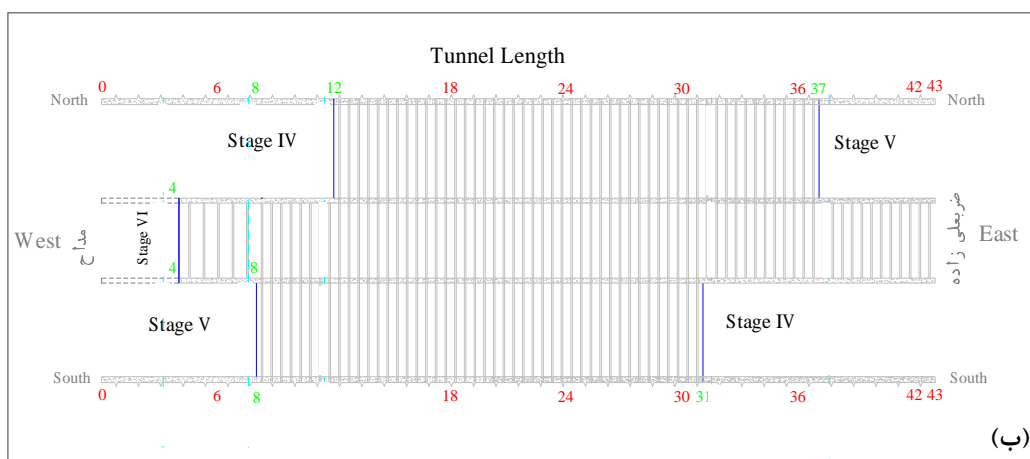
سطح زمین

طراحی تونل نیازمند برآورد مناسبی از تغییر شکل‌های زمین است. بسته به روش حفاری و نگهداری، تونل‌سازی می‌تواند باعث ایجاد نشست‌هایی با مقادیر مختلف در سطح زمین شود. به منظور ارزیابی و برآورد میزان نشست سطح زمین ناشی از فرآیند حفاری تونل کم‌عمق ضربعلی‌زاده-مداح تحت بار ترافیکی ریلی زیاد از نرم‌افزار پلکسیس (نرم‌افزار دوبعدی Plaxis 2D ver 8.x و نرم‌افزار 3D tunnel ver 1.2) استفاده شده است. نرم‌افزار

پلکسیس بر مبنای روش المان محدود توسعه یافته به منظور محاسبات میدان تنش و جابجایی ایجاد شده در اطراف فضاهای زیرزمینی (تحلیل تغییر شکل و پایداری) در مسائل ژئوتکنیکی به ویژه تونل سازی کاربرد دارد.



(الف) بخش فوقانی (مراحل اول تا سوم)



(ب) بخش تحتانی یا کف برداری (از سمت پرتال غربی مراحل چهارم تا هفتم و از سمت پرتال شرقی مراحل چهارم و پنجم)

شکل ۶- پلان مراحل اجرای تونل (حفاری و نصب سیستم نگهداری) (Sahel, 2016a)

جدول ۲- سیستم نگهداری اولیه و موقت تونل (Sahel, 2016a)

پوشش (سیستم نگهداری) پیشنهادی	کلاس	
۳۰ سانتیمتر شاتکریت همراه ۲ لایه مش و لتیس گیردر سه بار از نوع فولاد AIII ($\Phi = 20/28$) با فاصله داری ۰/۵ متر	سیستم نگهداری اولیه تونل (اولیه و اصلی)	محدوده
۲۵ سانتیمتر شاتکریت همراه ۲ لایه مش و لتیس گیردر سه بار از نوع فولاد AIII ($\Phi = 25/2$) با فاصله داری ۰/۵ متر	سیستم کفبند و شاخ بزی ها (موقت و تخریبی)	گیردر

جدول ۳- مشخصات پوشش اولیه و موقت تونل (Sahel, 2016a)

SHOT-30cm پوشش اولیه			
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته (E)	$2/14 e^{+9} kN/m^2$	مقاومت فشاری (f'_c)	۲۰ MPa
سختی نرمال (EA)	$6/41 e^{+6} kN$	ضخامت (Thickness)	۳۰ cm
صلبیت خمشی (EI)	$2/40 e^{+4} kN.m^2$	فاکتور ترک خوردگی (Crackfactor)	۰/۵
SHOT-25cm پوشش موقت (تخریبی)			
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته (E)	$2/14 e^{+9} kN/m^2$	مقاومت فشاری f'_c	۲۰ MPa
سختی نرمال (EA)	$5/34 e^{+6} kN$	ضخامت Thickness	۲۵ cm
صلبیت خمشی (EI)	$1/39 e^{+4} kN.m^2$	فاکتور ترک خوردگی Crackfactor	۰/۵

نسبت به مدل موهر کولمب (مدل پلاستیک کامل و دارای سطح تسلیم ثابت) برازش بهتر و پاسخ واقع‌گرایانه‌تری را برای عموم مصالح خاکی به‌ویژه هنگام باربرداری در مسائلی همچون خاک‌برداری، تونل‌سازی و حفاری فضاهای زیرزمینی به دست می‌دهد. مدل خاک سخت شونده، مدلی الاستوپلاستیک از نوع هایپربولیک است که در قالب پلاستیسیته خاک سخت‌شونده سطح تسلیم آن با کرنش بزرگ می‌شود و همچنین تاریخچه تنش را در نظر می‌گیرد و بین بارگذاری و باربرداری تفاوت قائل است (مدل رفتاری موهر کولمب توانایی تفاوت رفتار در بارگذاری و باربرداری را نداشته و نیز تاریخچه تنش را در نظر نمی‌گیرد). در مدل‌سازی‌های انجام‌شده مدول باربرداری (E_{ur}^{ref}) سه برابر مدول بارگذاری (E_{50}^{ref}) در نظر گرفته شده است.

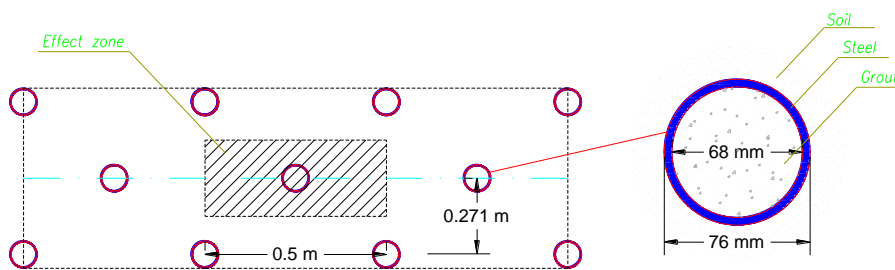
به‌منظور کنترل جابجایی‌های پیش‌همگرایی (همگرایی خط حفاری در جلوی سینه‌کار و هسته-سینه‌کار (Core-face) و جلوگیری از نشست سطح زمین پیش روی سینه حفاری (در شرایط عمق کم و بار سطحی زیاد) از روش کمکی پیش‌نگهداری (فورپولینگ) استفاده شده است. سیستم فورپولینگ با استفاده لوله‌های مانیسمان به قطر خارجی ۷۶ mm، قطر داخلی ۶۸ mm، ضخامت ۴ mm و طول ۸ m با سوراخ‌هایی به قطر ۵ mm و با فاصله‌داری عرضی ۰/۵ m و فاصله‌داری طولی ۲ m با زاویه ۷ درجه در نظر گرفته شده است (شکل ۷). به‌منظور لحاظ نمودن مشخصات پیش‌نگهداری (فورپولینگ) در مدل‌های عددی،

ابعاد مدل‌های ساخته‌شده به‌اندازه‌ای در نظر گرفته‌شده که میزان اثرات ناشی از مرزها به حداقل قابل قبول برسد. بر این اساس برای مدل دوبعدی مقدار ۶ برابر شعاع تونل از مرکز آن به‌عنوان مرزهای جانبی و تحتانی لحاظ شده است و برای مدل سه‌بعدی با توجه به بزرگ شدن ابعاد مدل و زمان‌بردن پروسه حل مسئله، مقادیر ۴ و ۲/۵ برابر شعاع تونل از مرکز آن به ترتیب به‌عنوان مرزهای جانبی و تحتانی مدل در نظر گرفته شده است. مرزهای جانبی مدل در راستای محور x و مرز تحتانی مدل به‌طور کامل در راستای هر دو محور x و y ثابت شده است. بار گسترده‌ای معادل ۹۳/۰۵ کیلو پاسکال به‌صورت شبه استاتیکی به‌عنوان بار ناشی از خطوط راه‌آهن و عبور قطار از بالای تونل در نظر گرفته شده است.

به‌منظور محاسبه بار گسترده از آیین‌نامه مشخصاً تفنی عمومی زیرسازی راه‌آهن (نشریه شماره ۲۷۹)، (MPO, 2004) و آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه شماره ۱۳۹) (MPO, 2000) استفاده شده است. تنش‌های برجای قائم در مدل به‌صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر با ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون (k_0) برای تحکیم عادی در نظر گرفته شده است $k_0 = k_0^{nc} = 1 - \sin(\varphi)$. برای حصول نتایج مدل‌سازی با دقت بالاتر، از مدل پیشرفته ژئوتکنیکی خاک سخت‌شونده (Hardeningsoil) استفاده‌شده که مقادیر پارامترهای رفتاری این مدل در جدول ۱ ارائه شده است. این مدل

فورپولینگ اجرا شده در اطراف تونل (ضخامت ۱ متر) برای مدل سازی عددی در جدول ۴، ارائه شده است.

مشخصات محدوده فورپولینگ به صورت تقریبی و بر اساس روش هوک (Hoek, 2004) بر مبنای میانگین گیری وزنی محاسبه شده است (شکل ۷). از این رو مشخصات معادل زون



Forepoling

$$\bar{X} = \frac{\sum(X_i \times A_i)}{A_{effectzone}} X = \{E, \gamma\} i = \{soil, Grout, Steel\}$$

E : Young Modulus, γ : Unit weight, A : Area

شکل ۷- نحوه محاسبه خواص معادل زون فورپولینگ

جدول ۴- خواص معادل زون فورپولینگ اجرا شده در اطراف تونل

وزن مخصوص γ (kN/m^3)	زاویه اصطکاک داخلی ϕ (deg.)	چسبندگی c (kPa)	مدول الاستیسیته E (kPa)	درصد وزنی سطح (%)	جزء تشکیل دهنده
۱۸	۲۶	۳۰	$۲/۶۰ e^{+۴}$	۹۳/۷	خاک
۷۸	-	-	$۲ e^{+۸}$	۰/۵۴۳	لوله فورپولینگ
۲۴	-	-	$۹ e^{+۶}$	۲/۲	دوغاب
۱۸/۴۷	۳۰*	۳۰۰*	$۱/۳۱ e^{+۶}$	۱۰۰	معادل

* مقدار چسبندگی زون فورپولینگ ۱۰ برابر چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی آن ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است

ناشی از تونل سازی در نظر گرفتن اثر تغییر شکل سینه کار و کورفیس تونل در مراحل مختلف حفاری و نصب سیستم نگهداری است. از آنجایی که حفاری و نصب سیستم نگهداری بخش های مختلف در زمان های مختلفی با پیشروی سینه کار حفاری صورت می گیرد، میزان آزادسازی تنش و به دنبال آن بار وارده بر سیستم نگهداری در زمان های مختلف نصب، به صورت تابعی از پیشروی سینه کار، تغییر خواهد کرد. یکی از روش های مرسوم جهت در نظرگیری آزادسازی تنش در مدل سازی دوبعدی استفاده از منحنی اندرکنش زمین (Ground response curve-GRC) است. منحنی

در شکل ۸، مدل های عددی دوبعدی و سه بعدی تونل زیرگذر ضربعلی زاده-مداح که بیانگر هندسه مدل و شرایط مرزی و بارگذاری می باشد، نشان داده شده است. در ادامه نتایج مدل سازی های مدل سازی دوبعدی و سه بعدی ارزیابی نشست سطح زمین ناشی از عملیات حفاری تونل زیرگذر ضربعلی زاده-مداح تحت شرایط بارگذاری دینامیکی (ناشی از عبور قطار) و استاتیکی (وزن روباره) ارائه شده است.

۴- تحلیل نتایج مدل سازی دوبعدی

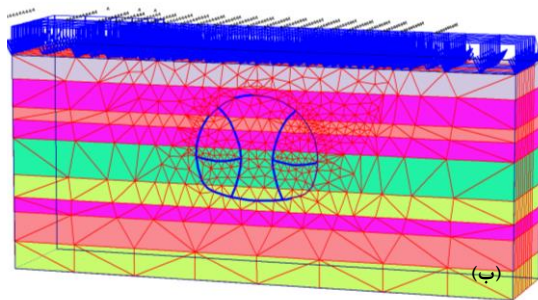
یکی از مسائل مهم در مدل سازی عددی نشست سطح زمین

از سینه‌کار برای مراحل مختلف حفاری تونل ضربعی‌زاده-مداح به دست می‌آید؛ بنابراین در هر مرحله با استفاده از منحنی اندرکنش زمین (*GRC*) می‌توان درصد رهاسازی یا تریخس تنش به ازای جابجایی محاسبه شده را تعیین و در مدل‌سازی دوبعدی اعمال کرد. سیستم نگهداری پس از حصول درصد رهاسازی تنش اعمال‌شده در هر مرحله نصب می‌شود. ضریب رهاسازی تنش در مدل‌سازی دوبعدی برای هفت مرحله حفاری تونل در جدول ۵، ارائه شده است.

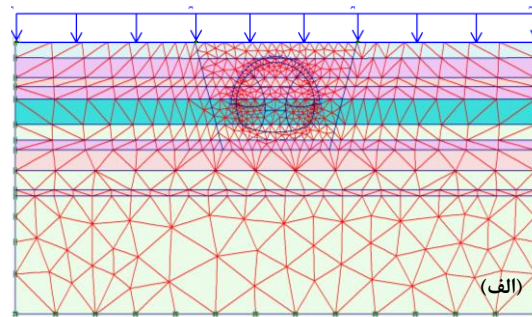
اندرکنش زمین را می‌توان با اندازه‌گیری میزان بسته‌شدگی/همگرایی جداره تونل به ازای رهاسازی تنش در سطوح مختلف به دست آورد. از طرفی بر اساس رابطه ارائه شده توسط پانه (*Panet, 1995*) می‌توان مقدار جابجایی فضای حفاری به‌صورت تابعی از فاصله سینه‌کار حفاری به دست آورد:

$$\frac{U_r}{U_r^M} = 0.25 + 0.75 \left[1 - \left(\frac{0.75}{0.75 + x/R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

بر اساس این رابطه، میزان جابجایی شعاعی در فاصله معینی



(ب) سه‌بعدی



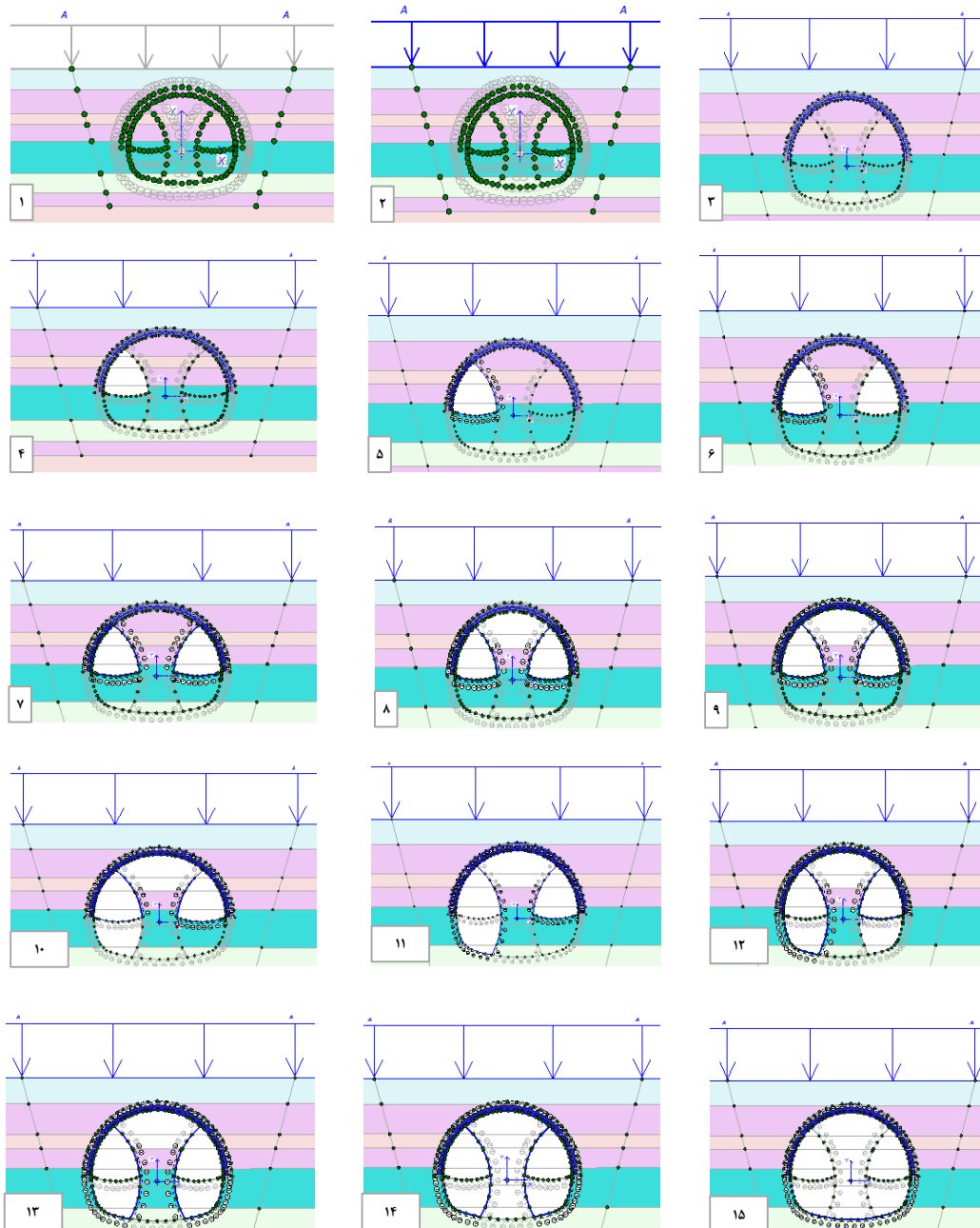
(الف) دوبعدی

شکل ۸- مدل‌های تونل زیرگذر ضربعی‌زاده-مداح

جدول ۵- مقادیر رهاسازی تنش در مراحل مختلف حفاری

مرحله حفاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
ضریب رهاسازی تنش	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۶۲

- ۱- مراحل مدل‌سازی دوبعدی نشست سطح زمین در ۱۵ مرحله مطابق شکل ۹، انجام شده است:
- ۱- ایجاد تنش‌های اولیه تحت اثر وزن
- ۲- اعمال بار سطحی ناشی از سیستم ریلی، در انتهای این مرحله (ابتدای مرحله بعدی) تغییر مکان‌ها برابر صفر در نظر گرفته شده است.
- ۳- فعال‌سازی زون فورپولینگ
- ۴- حفاری گالری جانبی (شاخ‌بزی) اول (همراه با رهاسازی تنش)
- ۵- نصب سیستم نگهداری گالری جانبی (شاخ‌بزی) اول
- ۶- حفاری گالری جانبی (شاخ‌بزی) دوم (همراه با رهاسازی تنش)
- ۷- نصب سیستم نگهداری گالری جانبی (شاخ‌بزی) دوم
- ۸- حفاری تاج تونل (همراه با رهاسازی تنش)
- ۹- نصب سیستم نگهداری تاج
- ۱۰- حفاری کف زیر گالری جانبی (شاخ‌بزی) اول (همراه با رهاسازی تنش)
- ۱۱- نصب پوشش کف زیر گالری جانبی (شاخ‌بزی) اول
- ۱۲- حفاری کف زیر گالری جانبی (شاخ‌بزی) دوم (همراه با رهاسازی تنش)
- ۱۳- نصب پوشش کف زیر گالری جانبی (شاخ‌بزی) دوم
- ۱۴- حفاری بخش‌های میانی (همراه با رهاسازی تنش) و تخریب سیستم نگهداری موقت گالری‌های جانبی (شاخ‌بزی)
- ۱۵- نصب پوشش کف بخش میانی

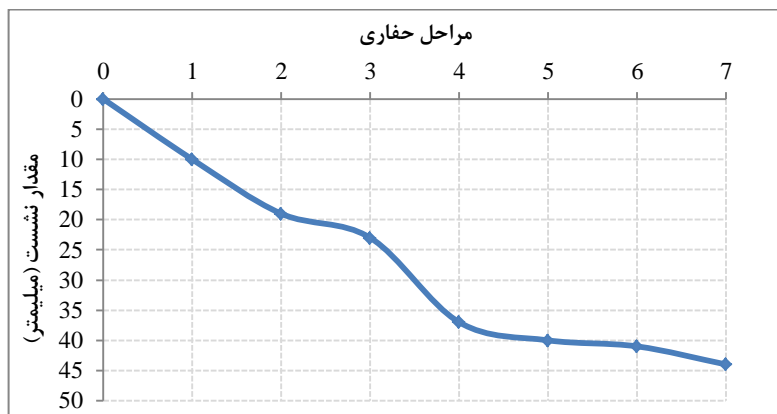


شکل ۹- مراحل اجرای مدل سازی دوبعدی

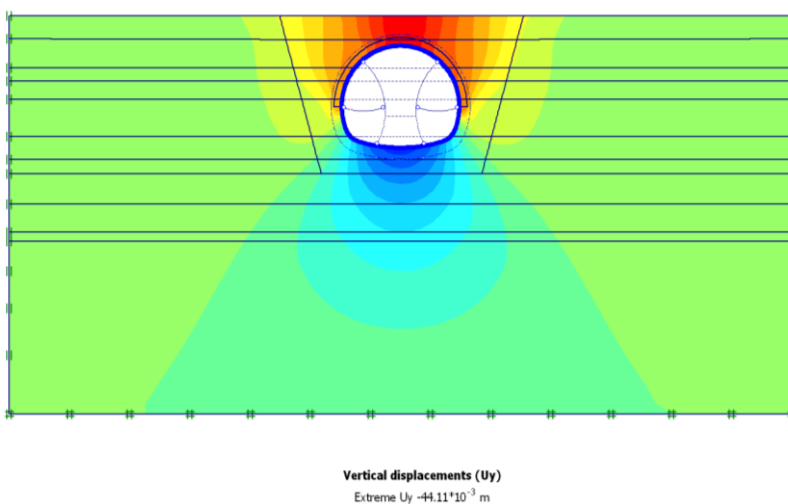
مربوط به مرحله نهایی حفاری و به میزان ۴۴ میلی متر است. کانتور جابجایی قائم (نشست) اطراف تونل مربوط به مرحله پایانی حفاری در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین پروفیل عرضی حداکثر نشست سطحی زمین در شکل ۱۲، ارائه شده است.

نتایج حاصل از مدل سازی عددی برای مراحل مختلف حفاری تونل در شکل ۱۰، ارائه شده است. همان گونه که در شکل ۱۰، نشان داده شده است با پیشرفت مراحل حفاری و بزرگ شدن سطح مقطع تونل، میزان نشست سطح زمین افزایش یافته است. حداکثر نشست سطحی به دست آمده

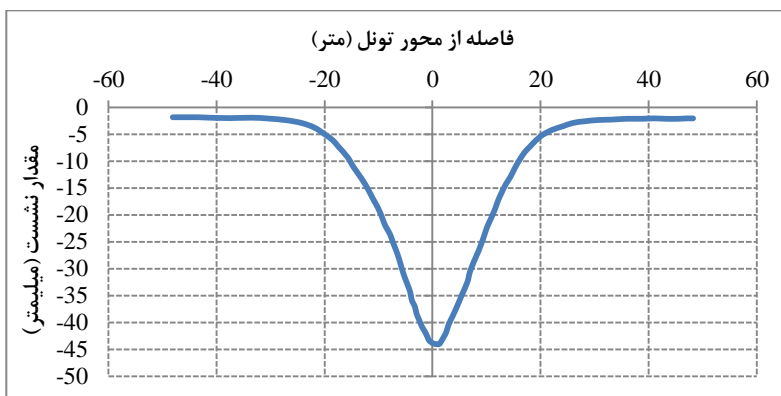
بررسی اثر سیستم پیش‌نگهداری (فورپولینگ) بر کنترل نشست سطح زمین ناشی از ...: ص ۶۱-۸۴



شکل ۱۰- نشست سطحی حاصل از مدل‌سازی عددی در مراحل مختلف حفاری تونل



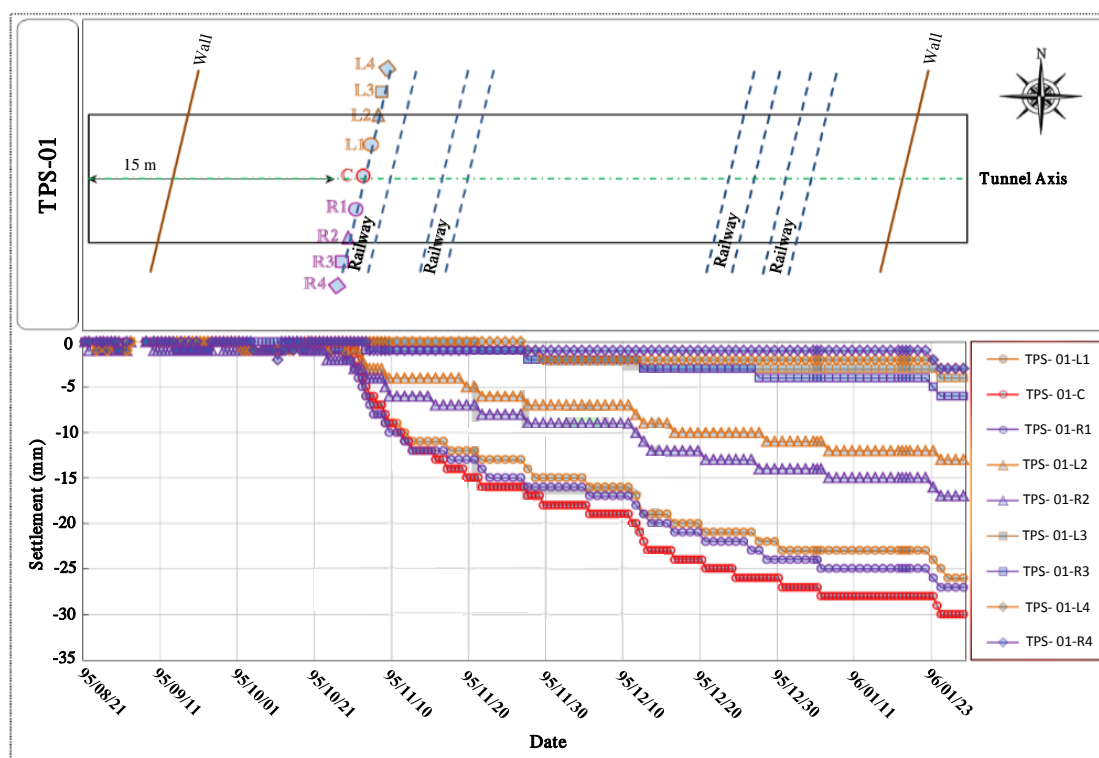
شکل ۱۱- کانطور جابجایی قائم (نشست) اطراف تونل



شکل ۱۲- پروفیل عرضی حداکثر نشست سطحی

۳۸، ۴۰ و ۴۳ است. حداکثر مقدار نشست به دست آمده از مدل سازی عددی دوبعدی (۴۴ میلی متر) از حداکثر مقدار نشست مجاز (۴۳ میلی متر) نیز بزرگ تر است. در حالی که حداکثر مقدار نشست ثبت شده توسط پین های نشست سنجی (۳۰ میلی متر) در سطح زمین و در راستای محور تونل (TPS-01-C) (شکل ۱۳)، (Sahel, 2016c) کمتر از مقادیر نشست مجاز (در سطح اقدام (۴۳ میلی متر) و حتی سطح آماده باش (۳۴ میلی متر)) است. اختلاف میان مقدار نشست حداکثر به دست آمده از روش عددی و داده های ابزار دقیق قابل توجه و حدود ۴۶ درصد برآورد شده است.

در پروژه تونل زیرگذر ضریبی زاده-مداح، بر اساس شرایط زمین شناختی و ژئوتکنیکی، ژئومتری تونل، روش ساخت، الزامات روش مرحله ای (SEM/NATM)، الزامات سازه ای و محدودیت های خاص پروژه، مقادیر ۲۲، ۳۴ و ۴۳ میلی متر نشست سطحی، به ترتیب به عنوان سطح هوشیاری (alert level - ۵۰ درصد نشست پیش بینی شده)، سطح آماده باش (alarm level - ۸۰ درصد نشست پیش بینی شده) و سطح خطر و اقدام (action level - ۱۰۰ درصد نشست پیش بینی شده) برای مقطع نهایی تونل تعریف شده است. در مرحله طراحی تونل، مقادیر نشست پیش بینی شده (مجاز) طی ۷ مرحله حفاری به ترتیب ۲۲، ۲۲، ۳۰، ۳۵،



شکل ۱۳- نتایج حاصل از داده های ابزار دقیق نصب شده در محدوده تونل (Sahel, 2016c)

فورپولینگ نقش مؤثری بر روی کنترل نشست سطح زمین دارند. اثر چسبندگی نسبت به مدول الاستیسیته بر روی کنترل نشست سطحی بیشتر بوده به طوری که با کاهش ۵۰ درصدی مقاومت چسبندگی المان فورپولینگ، مقدار نشست سطحی از ۴۴ میلی متر به ۵۶ میلی متر افزایش یافته است. با توجه به مقدار نشست سطحی نسبتاً زیاد

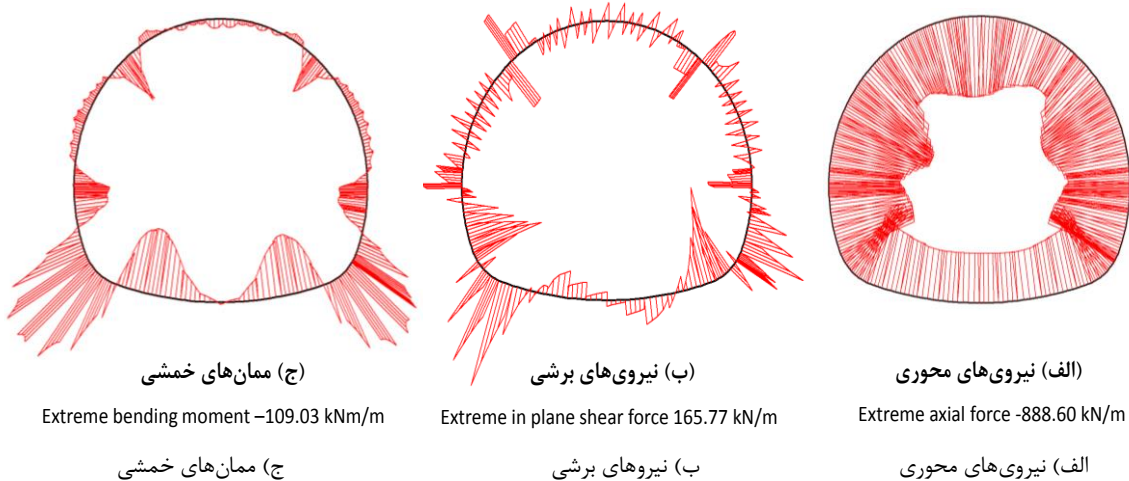
همچنین به منظور بررسی اثر سیستم فورپولینگ بر نشست سطحی، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای چسبندگی و مدول الاستیسیته المان معادل آن صورت گرفت. خلاصه نتایج آنالیز حساسیت در جدول ۶، ارائه شده است. بر اساس آنالیز حساسیت انجام شده، مشخص شد که دو پارامتر چسبندگی و مدول الاستیسیته المان معادل

محوری و ممان خمشی ایجاد شده در بخش‌های مختلف تحکیم اولیه در مراحل مختلف اجرای تونل ارائه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، تحکیم اولیه اصلی تونل به صورت لتیس‌های سه بار از نوع فولاد $AIII$ ($\Phi = 20/28$) با فاصله‌داری $0/5$ متر و تحکیم اولیه تخریبی (شاخ بزی و کف بندها) به صورت لتیس‌های سه بار از نوع فولاد $AIII$ ($\Phi = 25/2$) با فاصله‌داری $0/5$ متر برای محدوده کریدور جهت کنترل بارهای وارده و نیز پایداری تونل مناسب است.

به دست آمده از مدل‌سازی عددی نسبت به نتایج ابزار دقیق، ظرفیت سیستم نگهداری اولیه تونل در برابر بارهای وارده، توزیع نیروهای محوری، نیروهای برشی و ممان خمشی ایجاد شده در بخش‌های مختلف سیستم نگهداری اولیه تونل ضریبی‌زاده-مداح در محدوده کریدور مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نحوه توزیع نیروهای محوری، نیروهای برشی و ممان خمشی ایجاد شده در سیستم نگهداری (پوشش) اولیه شکل ۱۴، ارائه شده است. در شکل ۱۵، نیز منحنی اندرکنش سیستم نگهداری و نیروهای

جدول ۶- نتایج آنالیز حساسیت چسبندگی و مدول الاستیسیته فورپولینگ

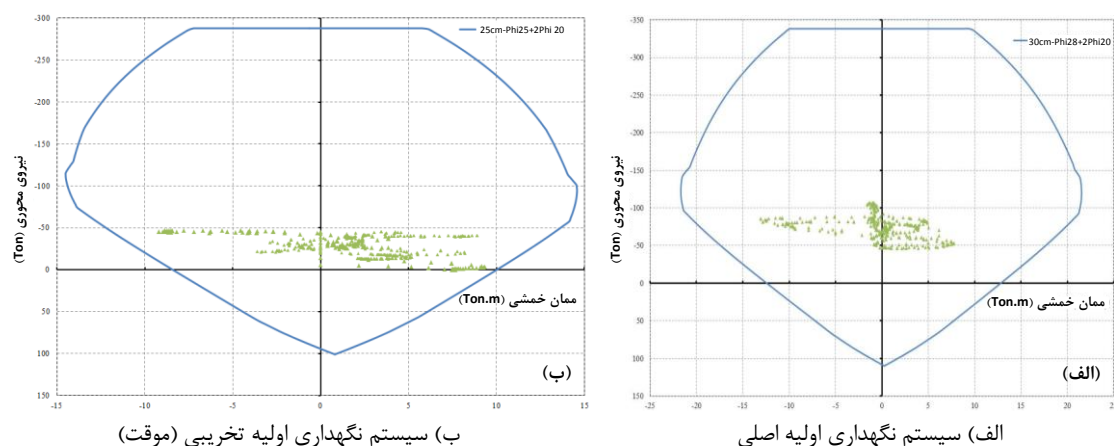
ردیف	عنوان مدل	نشست نهایی در مراحل مختلف حفاری (mm)						
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	طرح سیستم پیش‌تثبيت و پوشش اولیه	۱	۱۹	۲۳	۳۷	۴۰	۴۱	۴۴
۲	بررسی پارامتریک اثر چسبندگی (کاهش ۵۰٪ چسبندگی)	۱	۱۹	۴۵	۵۰	۵۳	۵۴	۵۶
۳	بررسی پارامتریک اثر مدول الاستیسیته (کاهش ۵۰٪ مدول الاستیسیته)	۱/۱	۲۲	۳۹	۴۳	۴۶	۴۷	۴۹



شکل ۱۴- توزیع نیروی‌های سیستم نگهداری اولیه تونل در مقطع نهایی

داده‌های ابزار دقیق، در مرحله بعد به مدل‌سازی مراحل مختلف حفاری تونل در شرایط سه‌بعدی پرداخته شده است.

به منظور بررسی اختلاف قابل توجه میان مقادیر نشست سطحی حاصل از مدل‌سازی عددی دوبعدی و



شکل ۱۵- منحنی اندرکنش (نیروی محوری - ممان خمشی) تونل

۳-۲- تحلیل نتایج مدل سازی سه بعدی

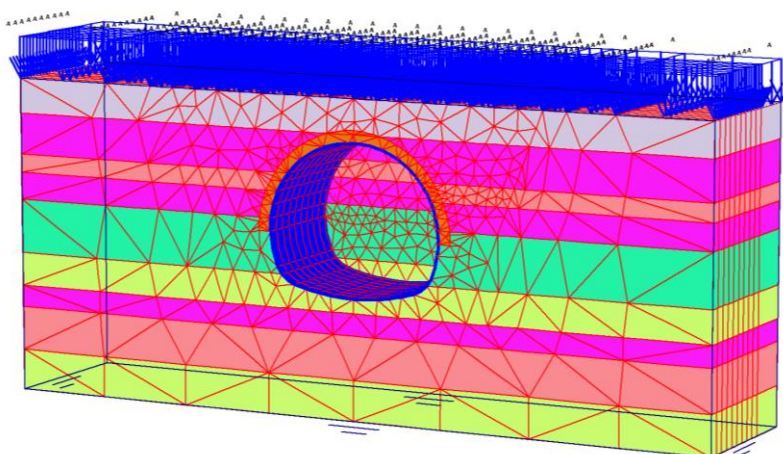
با توجه به اثر قابل توجه پدیده سه بعدی قوس زدگی ناشی از اجرای سیستم فورپولینگ، علاوه بر مدل سازی عددی دوبعدی، از مدل سازی سه بعدی نیز استفاده شده است. به منظور به حداقل رساندن تفاوت های مدل سازی مدل سازی، فرضیات مربوط به مدل سازی سه بعدی مشابه فرآیند مدل سازی دوبعدی است. با این تفاوت که با توجه به مدل سازی کامل فرآیند حفاری در مدل سازی سه بعدی نیازی به در نظر گرفتن ضریب رهاسازی تنش نیست و در این فرآیند بدون نیاز به روش های غیرمستقیم مرسوم در مدل سازی دوبعدی، به اعمال مستقیم رهاسازی تنش به صورت خودکار و بر اساس مکانیزم پاسخ زمین به حفاری می پردازد؛ بنابراین جبهه های حفاری مربوط به بخش فوقانی شاخ بزی یا گالری های جانبی و بخش میانی (مرحله سوم) با فاصله ۲ متری نسبت به یکدیگر شروع و در ادامه تکمیل می گردند. پس از آن به ترتیب در بخش تحتانی شاخ بزی- های جانبی (مراحل چهارم و پنجم)، حفاری و نصب پوشش انجام می شود. در پایان نیز بخش میانی (مراحل ششم و هفتم) با تخریب شاتکریت دیواره های میانی، حفاری و پوشش آن نصب می شود. در شکل ۱۶، مدل سازی سه بعدی مرحله پایانی حفاری و نصب سیستم نگهداری تونل نشان داده شده است.

مقادیر تغییر شکل تونل و توده خاک دربرگیرنده آن در مراحل مختلف حفاری و نصب پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل این تغییر شکل ها به ترتیب با حفاری و نصب

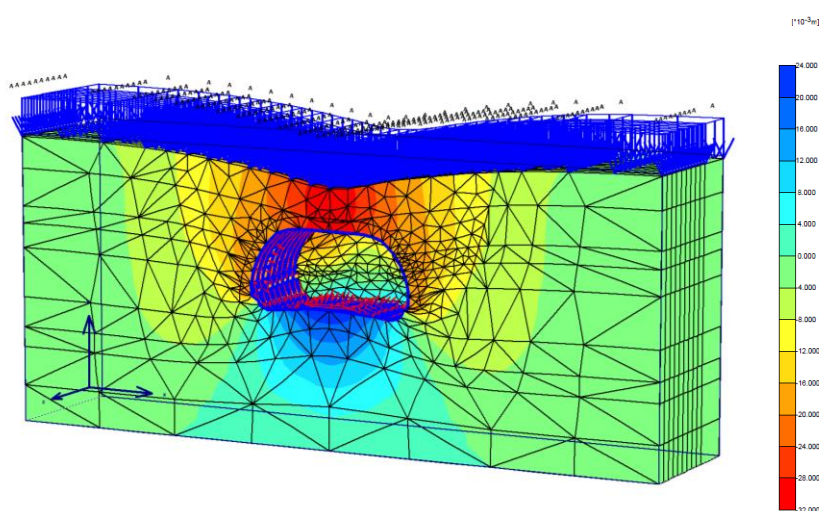
پوشش در مرحله اول آغاز و تا پایان مرحله هفتم که مربوط به حفاری و نصب پوشش مقطع نهایی تونل است، ادامه دارد. از آنجایی که هدف از این تحلیل ها، برآورد حداکثر نشست سطح زمین ناشی از عملیات حفاری و نصب پوشش تا تکمیل شدن مقطع اصلی تونل است، از این رو نتایج حاصل از تغییر شکل مقطع نهایی تونل در شکل ۱۷، نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۱۷، نشان داده شده است حداکثر نشست سطحی زمین در حدود ۳۲ میلی متر برآورد شده است. پروفیل عرضی حداکثر نشست سطحی زمین در شکل ۱۸، نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده های ابزار دقیق تطابق بسیار خوبی نشان می دهند (شکل ۱۹). همان طور که در شکل ۱۹، نشان داده شده است، اختلاف میان نشست حداکثر حاصل از داده های ابزار دقیق (۳۰ میلی متر) نسبت به تحلیل عددی سه بعدی (۳۲ میلی متر) ناچیز و در حدود ۲ میلی متر (حدود ۶ درصد خطا) است (قرائت مقادیر ابزار دقیق صرفاً در بازه های زمانی مشخص بوده و نتایج حاصل از مدل عددی بر اساس پیشروی فیزیکی تونل انجام شده است، بنابراین عدم تطابق در بخش های میانی نمودار ناشی از این موضوع است). از این رو مقادیر نشست به دست آمده از مدل سازی عددی و ثبت شده توسط ابزار دقیق در محدوده مجاز نشست های پیش بینی شده در مرحله طراحی است (سطح آماده باش و سطح اقدام). به نظر می رسد از آنجایی که در مدل سازی دوبعدی مقادیر ترخیص یا آزادسازی تنش در مراحل مختلف حفاری بر اساس روابط تجربی موجود در نظر گرفته می شود،

از حداکثر مقدار نشست مجاز تونل بوده است و در مقایسه با داده‌های ابزار دقیق از اختلاف چشمگیری برخوردار است. از این‌رو به‌منظور مقایسه و تدقیق تغییر شکل‌های سطح زمین، شرایط حفاری تونل در مراحل مختلف به‌صورت مدل‌سازی سه‌بعدی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. تطابق مناسب مقدار نشست سطحی حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی با داده‌های ابزار دقیق در مقایسه با مدل‌سازی دوبعدی و نیز قرارگیری در محدوده نشست مجاز تونل، معرف دقت بالای شرایط مدل‌سازی سه‌بعدی در تحلیل و ارزیابی نشست سطح زمین به لحاظ در نظر گرفتن تغییر شکل‌های طولی سینه‌کار یا هسته-سینه‌کار تونل دارد.

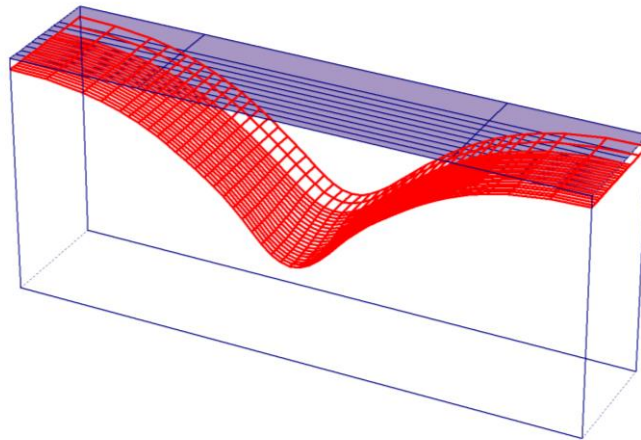
این میزان از تنش آزادشده، مقادیر واقعی نسبت به مدل‌سازی سه‌بعدی که مقادیر ترخیص تنش بر اساس منحنی تغییر شکل طولی لحاظ می‌شود نبوده و این منجر به اختلاف در میزان تغییر شکل توده خاک دربرگیرنده تونل و در نتیجه مقدار نشست سطح زمین خواهد شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی تونل نشان داد که سیستم‌های نگهداری طراحی‌شده (اولیه و موقت) به‌منظور قابلیت تحمل بارهای وارده (استاتیکی و دینامیکی) در مراحل مختلف حفاری و کنترل پایداری سازه تونل در وضعیت قابل قبولی قرار دارد. درحالی‌که حداکثر مقدار نشست سطحی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی دوبعدی بزرگ‌تر



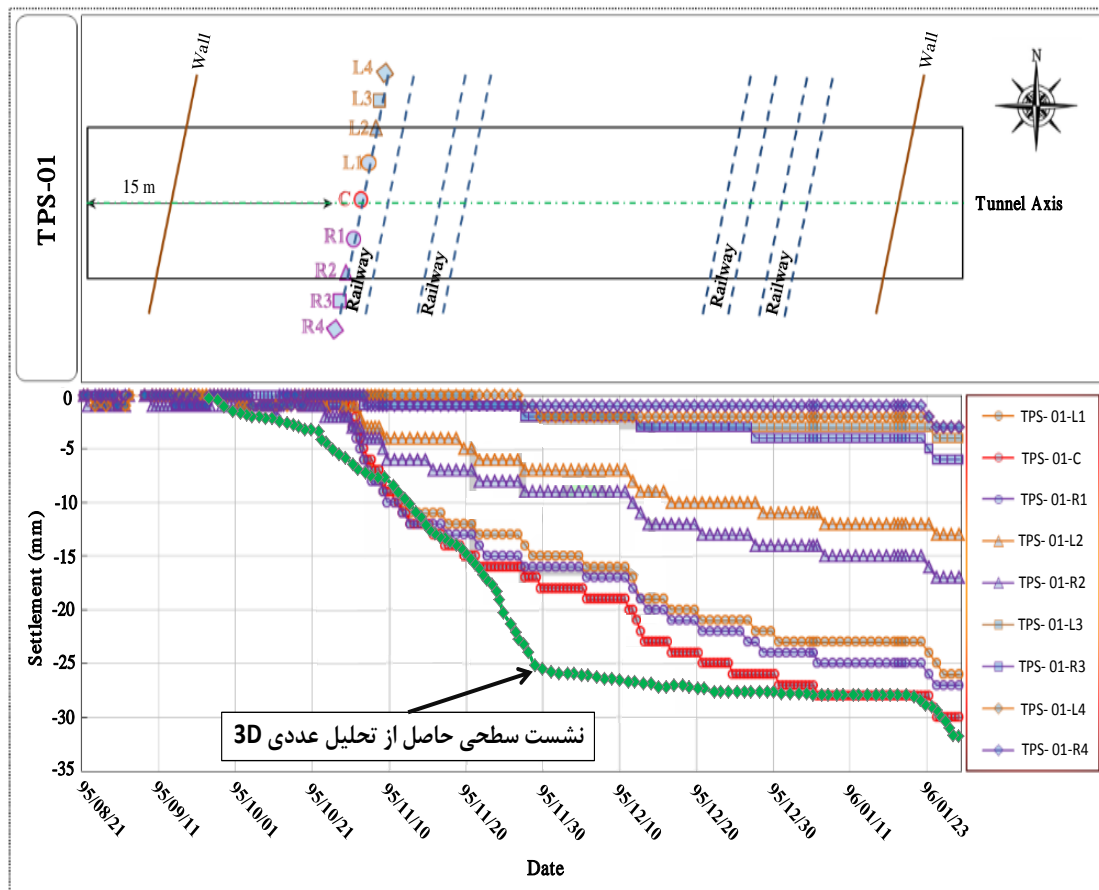
شکل ۱۶- مدل‌سازی سه‌بعدی مرحله پایانی حفاری و نصب سیستم نگهداری



شکل ۱۷- کانتور جابه‌جایی قائم پس از تکمیل حفاری



شکل ۱۸- پروفیل عرضی حداکثر نشست سطحی



شکل ۱۹- مقایسه نتایج نشست حاصل از داده‌های ابزار دقیق و تحلیل عددی سه‌بعدی (3D)

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات انجام‌شده در این تحقیق، نتایج حاصل به شرح ذیل است:

۱- مدل‌سازی سه‌بعدی به دلیل لحاظ نمودن مقادیر ترخیص تنش بر اساس منحنی تغییر شکل طولی تونل در مراحل مختلف حفاری، نتایج دقیق‌تری از حداکثر مقدار نشست سطحی زمین در مقایسه با مدل‌سازی دوبعدی ارائه می‌دهد.

۲- برخلاف حداکثر نشست سطحی حاصل از مدل‌سازی دوبعدی (۴۴ میلی‌متر)، حداکثر نشست سطحی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سه‌بعدی (۳۲ میلی‌متر) با نتایج ابزار دقیق (۳۰ میلی‌متر) از تطابق بسیار خوب و قابل قبولی برخوردار بوده است و در محدوده مجاز نشست‌های پیش‌بینی‌شده قرار دارند (سطح آماده‌باش و سطح اقدام).

۳- نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی حاکی از پایداری سینه کار حفاری تونل زیرگذر ضربعلی‌زاده در مراحل مختلف اجرای تونل در زیر محدوده کریدور و قبل از آن است.

۴- سیستم نگهداری اولیه (اصلی) و موقت (تخریبی) طراحی‌شده، ظرفیت تحمل بارهای وارده به تونل در مراحل مختلف حفاری به‌منظور تأمین پایداری و کنترل نشست سطحی زمین را دارد.

۵- سیستم پیش‌نگهداری (فورپولینگ) با ایجاد و نیز تقویت قوس‌شدگی طولی و شعاعی در اطراف فضای زیرزمینی باعث انتقال تنش‌های پیش روی سینه‌کار حفاری به سیستم نگهداری تونل شده و در نتیجه پایداری سینه‌کار حفاری و کاهش نشست سطح زمین را به همراه خواهد داشت.

۶- بر اساس آنالیز حساسیت انجام‌شده در حالت

مدل‌سازی دوبعدی، مقاومت چسبندگی و مدول الاستیسیته زون فورپولینگ به ترتیب بیشترین تأثیر بر روی کنترل تغییر شکل سینه‌کار تونل و در نتیجه نشست سطح زمین دارند.

۷- با توجه به وابستگی مقادیر ترخیص تنش به منحنی تغییر شکل طولی تونل و در صورت لزوم استفاده از مدل‌های دوبعدی برای مطالعات بیشتر و آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف، نمی‌توان ترخیص تنش را صرفاً بر اساس روابط ارائه شده موجود محاسبه کرد و لذا ضروری‌ست که میزان تغییر شکل‌های رخ داده با مدل سه‌بعدی تدقیق گردد.

۸- انتخاب مناسب و بهینه روش حفاری، سیستم پیش‌نگهداری و نگهداری در اجرای تونل‌های شهری با روباره کم و تحت بارهای دینامیکی زیاد همچون تونل زیرگذر ضربعلی‌زاده-مداح، نقش بسزایی در پایداری فضای زیرزمینی و کنترل تغییر شکل زمین و در نتیجه نشست سطحی خواهند داشت.

۵- سپاس‌گزاری

از کلیه دست‌اندرکاران پروژه تونل و زیرگذر شهید ضربعلی‌زاده-مداح که در سال ۲۰۱۸ توسط انجمن بین‌المللی تونل (ITA) در کشور چین به‌عنوان مقام نخست پروژه‌های تونلی جهان معرفی گردید (در بخش پروژه‌های تونلی با اعتبار کمتر از ۵۰ میلیون یورو)، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- سپاه‌های نمادها

تمامی نمادهای مورد استفاده در متن دست‌نوشته در جدول ۷، ارائه شده است.

۷- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
واحد رمین‌شناسی	-	ID
عمق	m	D
وزن مخصوص طبیعی	kN/m^3	γ_{unsat}
وزن مخصوص اشباع	kN/m^3	γ_{sat}
مدول الاستیسیته/یانگ	MPa	E
مدول الاستیسیته ادنومتر	MPa	E_{oed}^{ref}
مدول الاستیسیته سکانتی	MPa	E_{50}^{ref}
مدول الاستیسیته باربرداری و و بارگذاری مجدد	MPa	E_{ur}^{ref}
نسبت پواسون	NU	ν
چسبندگی	kPa	c
زاویه اصطکاک داخلی	$deg.$	ϕ
قطر آرماتور	mm	Φ
زاویه اتساع	$Deg.$	Ψ
ضریب تنش جانبی	NU	K_0^{nc}
$(K_0^{nc} = 1 - \sin \phi)$ برای تحکیم عادی		
سختی نرمال/محوری	kN	EA
صلبیت خمشی	$kN.m^2$	EI
مقاومت فشاری	MPa	f'_c
سطح مقطع	m^2	A
جابجایی شعاعی	mm	U_r
حداکثر جابجایی شعاعی	mm	U_r^M
شعاع تونل	m	R
فاصله از سینه کار	m	x
توان سطح تنش سختی	NU	m

۷- مراجع

- Ali, A., Lyamin, A. V., Huang, J., Sloan, S. W., & Cassidy, M. J. (2017). Undrained stability of a single circular tunnel in spatially variable soil subjected to surcharge loading. *Computers and Geotechnics*, 84, 16-27.
- Carranza-Torres, C., & Reich, T. (2017). Analytical and numerical study of the stability of shallow underground circular openings in cohesive ground. *Engineering Geology*, 226, 70-92.
- Chen, H. M., Yu, H. S., & Smith, M. J. (2016). Physical model tests and numerical simulation for assessing the stability of brick-lined tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 53, 109-119.
- Choi, J. I., & Lee, S. W. (2010). Influence of existing tunnel on mechanical behavior of new tunnel. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 14(5), 773-783.
- 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, 141-149.

- Date, K., Mair, R. J., & Soga, K. (2008). Reinforcing effects of forepoling and facebolts in tunnelling. In *Proceedings of the 6th International Symposium (IS-Shanghai 2008)* (pp. 635-641).
- Fang, Q., Tai, Q., Zhang, D., & Wong, L. N. Y. (2016). Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 144-151.
- Fang, Q., Zhang, D., Wong, L., (2012). Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground, *International Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Science Direct, p.p 10-30.
- Gong, W., Luo, Z., Juang, C. H., Huang, H., Zhang, J., & Wang, L. (2014). Optimization of site exploration program for improved prediction of tunneling-induced ground settlement in clays. *Computers and Geotechnics*, 56, 69-79.
- Han, X., Li, N., & Standing, J. R. (2007). An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China. *Yantu Lixue(Rock and Soil Mechanics)*, 28(1), 23-28.
- Hun, Y. C. (2011). *Stability and collapse mechanisms of unreinforced and forepole-reinforced tunnel headings* (Doctoral dissertation).
- Juneja, A., Hegde, A., Lee, F. H., & Yeo, C. H. (2010). Centrifuge modelling of tunnel face reinforcement using forepoling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 377-381.
- Kimura, H., Itoh, T., Iwata, M., Fujimoto, K. (2011). Application of New Urban Tunneling Method in Baikoh Tunnel Excavation, *International Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Science Direct, p.p 151-160.
- Kontothanassis, P., Koronakis, N., Karinas, A., & Massinas, S. (2009). Design and construction of NATM underground station tunnel by using the forepoling method in difficult conditions for Athens Metro. *Atlas of Oculoplastic and Orbital Surgery*, 265.
- Lai, H., Zhao, X., Kang, Z., & Chen, R. (2017). A new method for predicting ground settlement caused by twin-tunneling under-crossing an existing tunnel. *Environmental Earth Sciences*, 76(21), 726.
- Li, X., Du, S., & Zhang, D. (2013). Numerical simulation of the interaction between two parallel shield tunnels. In *ICPTT 2012: Better Pipeline Infrastructure for a Better Life* (pp. 1521-1533).
- Loganathan, N., & Poulos, H. G. (1998). Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(9), 846-856.
- Lunardi, P. (2008). *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media
- Lunardi, P., Bindi, R., & Cassani, G. (2014). The reinforcement of the core-face: history and state of the art of the Italian technology that has revolutionised the world of tunnelling. Some reflections. In *Proceedings of World Tunnel Congress*.
- Management and Planning Organization of Iran (MPO). (2004). *Earth Works for Railway Lines General Technical Specifications-No.279*.
- Management and Planning Organization of Iran (MPO). (2000). *Standard Loads for Bridges-No.139*.
- Ngan Vu, M., Broere, W., & Bosch, J. W. (2017). Structural analysis for shallow tunnels in soft soils. *International Journal of Geomechanics*, 17(8), 04017038.

- Notes, Evert Hoek–Unpublished. (2004). *Numerical modelling for shallow tunnels in weak rock.*
- Ou, C. Y., & Hsieh, P. G. (2011). *A simplified method for predicting ground settlement profiles induced by excavation in soft clay. Computers and Geotechnics, 38(8), 987-997.*
- Paternesi, A., Schweiger, H. F., & Scarpelli, G. (2017). *Numerical analyses of stability and deformation behavior of reinforced and unreinforced tunnel faces. Computers and Geotechnics, 88, 256-266.*
- Peck, R. B. (1969). *Deep excavations and tunneling in soft ground. Proc. 7th ICSMFE, 1969, 225-290.*
- Panet, M. (1995). *Le Calcul des Tunnels par la Méthode Convergence-Confinement. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. (in French)*
- Pan, Q., & Dias, D. (2017). *Upper-bound analysis on the face stability of a non-circular tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 62, 96-102.*
- Sadeghi, M., Pourhashemi, S. M., Dehghan, A. N., Ahangari, K. (2016). *The Effect of Excavation Progress on the Behavior of Hakim Highway Tunnel Using Geotechnical Instrumentation. ITA-AITES World Tunnel Congress 2016 (WTC 2016), 22-28 April 2016, San Francisco, California, USA.*
- Sahel Consultant Engineers Institute. (2016a). *Report of Method Statements and Support System Design of Zarbalizadeh-Maddah Underpass Tunnel.*
- Sahel Consultant Engineers Institute. (2016b). *Report of Engineering Geology of Zarbalizadeh-Maddah Underpass Tunnel.*
- Sahel Consultant Engineers Institute. (2016c). *“Report of Instrumentation and Monitoring of Zarbalizadeh-Maddah Underpass Tunnel”.*
- Suwansawat, S., & Einstein, H. H. (2006). *Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. Tunnelling and underground space technology, 21(2), 133-150.*
- Tonon, F. (2010). *Sequential excavation, NATM and ADECO: What they have in common and how they differ. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(3), 245-265.*
- Tuncdemir, H., Aksoy, C. O., Güçlü, E., & Özer, S. C. (2012, May). *Umbrella arch and forepoling support methods: a comparison. In ISRM International Symposium-EUROCK 2012. International Society for Rock Mechanics.*
- Ukritchon, B., Yingchaloenkithajorn, K., & Keawsawasvong, S. (2017). *Three-dimensional undrained tunnel face stability in clay with a linearly increasing shear strength with depth. Computers and Geotechnics, 88, 146-151.*
- Wittke, W., Pierau, B., & Erichsen, C. (2006). *New austrian tunneling method (NATM)-stability analysis and design. WBI, Essen, 2441.*
- Zhao, L., Li, D., Li, L., Yang, F., Cheng, X., & Luo, W. (2017). *Three-dimensional stability analysis of a longitudinally inclined shallow tunnel face. computers and Geotechnics, 87, 32-48.*

The Effect of Pre-Support System (Forepoling) on the Control of Ground Surface Subsidence caused by SEM/NATM in Shallow Urban Road Tunnels under Railway Traffic Loading

M. Karamniayi Far¹; A.N. Dehghan²

1. M.Sc. in Civil Engineering; Faculty of Engineering, Electronic Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Assistant Professor; Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 08 Aug 2018; Accepted: 06 Jan 2019

DOI: 10.22044/TUSE.2019.7345.1345

Keywords

*Ground Surface Subsidence
SEM/NATM
Pre-Support System
Forepoling
Railway Traffic Loading
2D & 3D Numerical Modeling
Finite Element mMethod (FEM)
Zarbalizadeh-Maddah Underpass Tunnel*

Extended Abstract

Summary

In recent years, mountain tunneling method such as SEM/NATM has been used for tunnel construction even in urban areas because of its cost effectiveness. When this method is used in urban areas compared to mountainous areas, it is important to impose some constrained conditions, such as restrictions of surface settlement and ground water drawn down, because of existing constructions such as buildings, pile foundations and

underground pipes around the tunnel face. It is said that the increase of the use of mountain tunneling method in the urban areas is due to the development of auxiliary methods such as face bolting and forepoling.

Because of plain-strain condition in tunnel excavation along the tunnel axis direction, some two-dimensional (2D) models have been applied to evaluate the ground surface settlement generated by different phases of excavation. The deformation modes of tunneling face are different. The excavation face deformation is a three-dimensional (3D) problem. It would be more complicated considering forepoling implementation and face injection effects on deformations. The longitudinal displacement profile of the tunnel crown has been generated by 3D models and the typical proposed stress release relations in this research work have been compared and evaluated.

Introduction

A method for reducing-induced ground movements in open-faced tunneling is to use tunnel support methods such as forepoling umbrella system. Forepoles are often used for supporting the ground ahead of the tunnel face during excavation. They also provide temporary support to unlined portion of tunnels. Forepoles are usually installed along the tunnel periphery in the longitudinal direction to form a supportive arch ahead of the tunnel face. This paper investigates the effect of forepoles on the stability of the tunnel face and ground surface settlement during a tunnel excavation in Tehran alluvium.

Methodology and Approaches

This study was conducted based on 2D and 3D numerical models of Zarbalizadeh-Maddah underpass tunnel for controlling the face stability and deformation of the surrounding ground using PLAXIS finite element software.

Results and Conclusions

The results of the 2D numerical modeling carried out in this research work represent the stable conditions of the tunnel due to the acceptable capacity of the support systems (primary and temporary)

designed in different sections of the tunnel (e.g. side walls, middle walls, and invert) against different combinational loads. In spite of the stable condition of the tunnel, the surface subsidence obtained from the 2D numerical modeling (43 mm) represents a relatively high value of deformation of the ground surface compared to the instrumentation data (30 mm) recorded during the tunnel excavation. In order to more accurately investigate the effect of forepoling on the control of the surface subsidence, 3D modeling of the excavation stages was performed considering the longitudinal deformation profile (LDP) of the tunnel face. The results indicate a lower value of surface subsidence (32 mm) compared to the 2D modeling (43 mm). The 3D modeling results are also in very good agreement with the instrumentation data of the surface subsidence (30 mm).
