

تخمین میزان نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل قطعه شرقی - غربی خط هفت متروی تهران

میثم رازی فر^۱، مهدی حسینی^{۲*}، سیامک هاشمی^۳

دریافت مقاله: ۹۰/۲/۷ پذیرش مقاله: ۹۰/۱۰/۷

چکیده

لزوم بررسی و تخمین نشست‌های سطح زمین از مهم‌ترین اصول طراحی تونل‌های کم‌عمق شهری است که در صورت صحت مطالعات می‌توان با اقدامات مقتضی مانع از بروز خسارات بر سازه‌های سطحی و زیرسطحی شد. در این تحقیق چهار مقطع از قطعه شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران به عنوان مقاطع با استعداد نشست‌های سطحی بیشتر، انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفت. این بخش از پروژه مترو، در نهشته‌های آبرفتی جوان تهران قرار داشته و بیشتر شامل خاک‌های ریزدانه است. مسئله نشست زمین لزوماً نیاز به یک طراحی در فضای سه بعدی دارد. لذا نرم‌افزار FLAC 3D برای مطالعه استعداد نشست سطح زمین در طول مسیر تونل مورد مطالعه، انتخاب و استفاده شد. یکی از مهم‌ترین مزایای طراحی‌های سه بعدی، حفاری مرحله‌ای و بررسی اثرات حفر هر مرحله، بر زمین میزبان تونل است. لذا حفاری مرحله‌ای با سیکل پیشروی ۱/۵ متر تا جایی انجام شد که حفاری‌های جدید تأثیری بر نشست‌های سطحی نقطه منطبق بر ورودی تونل در مدل ساخته شده، نداشته باشد. به‌رغم ناتوانی روش‌های تحلیلی و تجربی در برآورد اثر آب‌های زیرزمینی و اثرات سربار ناشی از سازه‌های سطحی و ترافیک خیابان بر نشست‌های سطحی، به دلیل عدم نصب وسایل ابزارنگاری از روش‌های تحلیلی ساگاستا (Sagasetta)، لوگاناتان و پولوس (Loganathan and Polous)، ورویجت و بوکر (Verruijt and Booker)، بابت (Bobet) و روش تجربی و تصادفی پک (Peck) نیز برای بررسی بیشتر بروز پدیده نشست زمین در مقاطع مورد مطالعه، استفاده شد. پس از به کارگیری روش‌های مختلف برای مطالعه چهار مقطع انتخاب شده می‌توان نتیجه گرفت که نشست سطح زمین (به غیر از مقطع دوم) در حد مجاز می‌باشد.

کلید واژه‌ها: نشست زمین، متروی تهران، روش‌های عددی، نرم‌افزار FLAC 3D، روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، meh_hosseini18@yahoo.com

۳- دکترای ژئوتکنیک، شرکت سهامی خدمات مهندسی برق (مشانیر).

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

- مطالعات تأثیر شیب سطح زمین، بارهای خارجی و شکل مقطع تونل بر مقدار نشست زمین (وفائیان و همکاران، ۱۳۸۲)
 - مطالعات نشست‌های ناشی از حفاری تونل متروی تبریز (صدقیانی و همکاران، ۱۳۸۷)
 - بررسی تأثیر طول گام و مراحل حفر در روش حفاری مرحله‌ای بر نشست زمین (شریف‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸)
 - همچنین مطالعاتی روی نشست زمین در مسیر خط هفت متروی تهران انجام شده است. مطالعات فوق در مراحل ابتدایی طراحی پروژه انجام پذیرفته است. در این مطالعات نشست زمین در محل چهار گمانه برآورد شده است که فقط دو گمانه در مسیر قطعه شرقی - غربی وجود دارد. به نظر می‌رسد که مطالعه مذکور نارسایی‌هایی دارد که به شرح ذیل بیان می‌شود (ستاری، ۱۳۸۷):
 - تحقیق مذکور در زمان مطالعات اولیه انجام شده و لذا اطلاعات از پارامترهای حفاری و شرایط زمین‌شناختی منطقه برای یک تحلیل مناسب کافی نبوده است.
 - بررسی پدیده نشست زمین مشخصاً نیاز به یک تحلیل سه بعدی دارد در صورتی که تحقیق مذکور در حالت دوبعدی انجام شده است.
 - نسبت تنش‌ها $k=1$ انتخاب شده و دلایل کافی برای انتخاب این نسبت ارائه نشده است.
 - شرایط تزریق پشت سگمنت‌های بتنی، در مدل‌سازی منظور نشده است.
 - فشارهای وارده به جبهه کار از سوی ماشین حفاری EPB مدل‌سازی نشده است.
 - پروفیل طولی نشست زمین برآورد نشده است.
 - برای محاسبه نشست بیشینه و به دست آوردن پروفیل نشست زمین فقط از دو روش تحلیلی استفاده شده است.
 - اندرکنش خاک میزبان تونل و سپر حفاری و اثر اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر کله حفار و بدنه سپر، بر نشست‌های سطحی مورد توجه قرار نگرفته است.
- انجام پروژه‌های تونل‌سازی در نواحی پرجمعیت شهری برای اهداف مختلف در طول دهه گذشته به سرعت رو به رشد بوده است. رشد فزاینده جمعیت و لزوم دسترسی سریع به نقاط مختلف و افزایش تراکم در مناطق شهری، نیاز به استفاده از فضاهای زیرزمینی را در مناطق شهری ناگزیر کرده است. تونل‌سازی در مناطق کم‌عمق شهری و زمین‌های نرم، همواره با مخاطراتی مواجه است که نادیده گرفتن آن‌ها می‌تواند عواقب ناخوشایندی در بر داشته باشد. مسئله نشست سطح زمین و تأثیر آن بر سازه‌های سطحی از مهم‌ترین این مخاطرات است. به منظور جلوگیری از خسارت بر سازه‌های سطحی، لزوم کنترل نشست‌های سطح زمین بر طبق آئین‌نامه‌های مربوطه، همواره باید مورد توجه قرار گیرد. این امر به خصوص در هنگام عبور تونل از زیر مناطق مسکونی اهمیت زیادی دارد. اگرچه پیشرفت تکنولوژی و به‌کارگیری روش‌های نوین تونل‌سازی مکانیزه موجب کنترل تغییر شکل‌های زمین میزبان تونل شده است، اما این تکنیک‌های مدرن نیز نمی‌توانند به طور کامل مانع از حرکات سطحی زمین شوند. به همین دلیل مسئله نشست حاصل از تونل‌سازی و اثرات متعاقب آن همواره از سوی محققین مختلف تحت بررسی بوده است تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب، میزان آن را قبل از شروع عملیات ساخت برآورد کنند. به عبارت دیگر از جمله اهداف مهم در اجرای تونل‌های شهری، به حداقل رساندن نشست‌های سطحی است. این مسئله یکی از ملزومات طراحی و اجرای موفقیت‌آمیز یک تونل در مناطق شهری است. به طور کلی می‌توان روش‌های پیش‌بینی نشست سطح زمین را به سه گروه عمده روش‌های تجربی - تصادفی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی نمود.
- در ایران نیز تحقیقاتی روی پدیده نشست‌های سطحی ناشی از تونل‌سازی انجام شده است که برخی از آن‌ها عبارتند از:
- مطالعات نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌های مترو (شریعتمداری و همکاران، ۱۳۸۰)

است و اگرچه در مواردی اختلاف نظرهایی وجود دارد، ولی تقریباً همگی محققین، تقسیم‌بندی انجام شده توسط ریبن (Rieben) را کم و بیش پذیرفته و به کار برده‌اند. مبنای تقسیم‌بندی ریبن، زمان تشکیل رسوبات بوده و به جنبه‌های ژئوتکنیکی و کاربردی، برای تقسیم‌بندی کمتر توجه کرده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده رسوبات آبرفتی شهر تهران را به ترتیب از قدیم به جدید می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود (ستاری، ۱۳۸۷):

سازند هزار دره (A)، سازند آبرفتی B، سازند آبرفتی تهران (C)، آبرفت عهد حاضر یا رسوبات سری D. مسیر تونل در بخش‌های اصلی سازند D قرار گرفته است ولی به نظر می‌رسد که در عمق، واحدهای خاکی تشکیل دهنده سینه‌کار تونل، عمدتاً از سازندهای قدیمی‌تر مانند سازند C تشکیل شده باشد. رسوبات سری D را می‌توان جدیدترین آبرفت‌های ناحیه تهران دانست که به وسیله رودخانه‌های عهد حاضر به جای مانده‌اند و در واقع پوششی از شن و قلوه‌سنگ و رسوبات دانه‌ریزتر، به ضخامت کمتر از ۱۰ متر می‌باشد که بر روی رسوبات قدیمی‌تر لاتریتی ته‌نشین شده است. در طی مطالعات مقدماتی تعداد ۱۵ گمانه و ۳ چاهک اکتشافی بر روی بخش شرقی- غربی مسیر خط ۷ متروی تهران، توسط پیمانکاران ژئوتکنیک حفر گردید و سپس در طی مطالعات تکمیلی، ۱۳ گمانه و ۵ چاهک بر روی مسیر تونل و همچنین ۳۳ گمانه و ۸ چاهک بر روی ایستگاه‌های مسیر حفاری شد. بدین ترتیب به طور کلی ۶۱ گمانه ماشینی (با مجموع طول ۲۴۸۸ متر) و ۱۶ چاهک دستی (با مجموع طول ۲۹۷ متر) در طی مطالعات مراحل مقدماتی و تکمیلی حفاری شده است. به طور کلی بر اساس حضور واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در سینه‌کار تونل و حضور آب زیرزمینی، مسیر تونل به ۴۰ زون تقسیم شده است (جدول ۱). مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی لایه‌های خاکی در برگیرنده مسیر تونل به شش واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند. این واحدها در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

خط هفت متروی تهران یکی از خطوط چندگانه طراحی شده برای تهران است که در قطعه شرقی- غربی از شهرک امیرالمؤمنین شروع شده و تا بزرگراه نواب صفوی ادامه می‌یابد و در قطعه شمالی- جنوبی در طول بزرگراه نواب صفوی و چمران ادامه پیدا کرده و در نهایت در سعادت آباد به میدان بوستان (کتاب) منتهی می‌شود. در این تحقیق نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل به کمک سپر تعادلی فشار زمین (EPB) در قطعه شرقی- غربی تونل خط هفت متروی تهران، مورد توجه قرار گرفته و برای تخمین آن از روش عددی (روش تفاضل محدود به کمک نرم‌افزار FLAC3D) استفاده شده و نتایج با روش‌های تحلیلی و تجربی مقایسه شده است.

۲. پروژه خط هفت متروی تهران

برای شبکه ریلی شهر تهران ۱۳ خط ریلی به صورت ۹ خط عادی و ۴ خط سریع‌السير لحاظ شده است. یکی از خطوط اصلی که در شبکه مسیر ریلی از اهمیت بالایی برخوردار است، خط ۷ می‌باشد. قطعه شرقی- غربی شامل ۱۳ ایستگاه است. بر اساس پلان و پروفیل خط هفت متروی تهران، طول تونل این قطعه با احتساب طول ایستگاه‌ها ۱۲/۳۶ کیلومتر است. علاوه بر تونل، اجرای این پروژه شامل احداث دسترسی میانی در مترای ۵۵۰۰ و شفت دمونتاژ دستگاه می‌باشد (موسسه مهندسی مشاور ساحل، گزارش بررسی کلی پلان و پروفیل مسیر، ۱۳۸۸). گستره تهران در کوهپایه‌های جنوبی کوه‌های البرز مرکزی قرار گرفته است. دشت تهران دشتی است با شیب از شمال به جنوب که به وسیله بلندی‌ها و فرونشست‌های شرقی- غربی به بخش‌های گوناگون تقسیم می‌شود. این بخش‌ها از شمال به جنوب عبارتند از: بلندای البرز، چین‌های کناری البرز، گستره کوهپایه‌ای تهران و دشت تهران. نهشته‌های پوشاننده شهر تهران، آبرفت‌های جوانی هستند که حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی کوه‌های البرز می‌باشند (بربریان، ۱۳۶۴). این رسوبات به سبب سهولت دسترسی و اهمیت، توسط زمین‌شناسان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته

جدول ۱. واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل

(موسسه مهندسی مشاور ساحل، گزارش مطالعات زمین شناسی مسیر تونل، ۱۳۸۸)

شماره زون	موقعیت	طول مقطع (m)	گونه زمین شناسی مهندسی						حضور آب زیرزمینی
			ET-1	ET-2	ET-3	ET-4	ET-5	ET-6	
۱	۰ - ۴۲۸	۴۲۸							
۲	۴۲۸ - ۸۴۸	۴۲۰							
۳	۸۴۸ - ۱۱۱۶	۲۶۸							
۴	۱۱۱۶ - ۱۶۴۷	۵۳۱							
۵	۱۶۴۷ - ۱۷۰۸	۶۱							
۶	۱۷۰۸ - ۱۸۴۲	۱۳۴							
۷	۱۸۴۲ - ۱۹۸۹	۱۴۷							
۸	۱۹۸۹ - ۲۱۱۶	۱۲۷							
۹	۲۱۱۶ - ۲۲۲۸	۱۱۲							
۱۰	۲۲۲۸ - ۲۳۹۳	۱۶۵							
۱۱	۲۳۹۳ - ۳۴۷۹	۱۰۸۶							
۱۲	۳۴۷۹ - ۳۶۴۸	۱۶۹							
۱۳	۳۶۴۸ - ۳۹۹۷	۳۴۹							
۱۴	۳۹۹۷ - ۴۳۳۳	۳۳۶							
۱۵	۴۳۳۳ - ۴۴۷۷	۱۴۴							
۱۶	۴۴۷۷ - ۴۸۲۱	۳۴۴							
۱۷	۴۸۲۱ - ۵۱۴۲	۳۲۱							
۱۸	۵۱۴۲ - ۵۴۴۶	۳۰۴							
۱۹	۵۴۴۶ - ۵۵۹۳	۱۴۷							
۲۰	۵۵۹۳ - ۵۷۱۱	۱۱۸							
۲۱	۵۷۱۱ - ۵۷۷۶	۶۵							
۲۲	۵۷۷۶ - ۵۹۷۷	۲۰۱							
۲۳	۵۹۷۷ - ۶۲۹۶	۳۱۹							
۲۴	۶۲۹۶ - ۶۶۳۴	۳۳۸							
۲۵	۶۶۳۴ - ۶۷۸۵	۱۵۱							
۲۶	۶۷۸۵ - ۶۹۰۱	۱۱۶							
۲۷	۶۹۰۱ - ۷۵۹۰	۶۸۹							
۲۸	۷۵۹۰ - ۷۷۶۴	۱۷۴							
۲۹	۷۷۶۴ - ۷۹۹۱	۲۲۷							
۳۰	۷۹۹۱ - ۸۵۸۶	۵۹۵							
۳۱	۸۵۸۶ - ۸۸۸۸	۳۰۲							
۳۲	۸۸۸۸ - ۹۰۷۶	۱۸۸							
۳۳	۹۰۷۶ - ۹۴۷۹	۴۰۳							
۳۴	۹۴۷۹ - ۹۸۵۱	۳۷۲							
۳۵	۹۸۵۱ - ۱۱۲۱۵	۱۳۶۴							
۳۶	۱۱۲۱۵ - ۱۱۶۴۲	۴۲۷							
۳۷	۱۱۶۴۲ - ۱۱۷۹۵	۱۵۳							
۳۸	۱۱۷۹۵ - ۱۱۹۶۲	۱۶۸							
۳۹	۱۱۹۶۲ - ۱۲۲۹۲	۳۳۰							
۴۰	۱۲۲۹۲ - ۱۲۴۱۳	۱۲۱							

جدول ۲. مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

(موسسه مهندسی مشاور ساحل، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مسیر تونل، ۱۳۸۸)

ET-6	ET-5	ET-4	ET-3	ET-2	ET-1	واحد زمین‌شناسی مهندسی
Very soft clayey sandy silt	Clayey SILT & silty CLAY with sand, very sandy CLAY (or SILT)	Clayey silty SAND with gravel	Very silty clayey SAND with gravel, very sandy CLAY (or SILT) with gravel	Very gravely SAND with silt & clay	Sandy GRAVEL & gravely SAND	توصیف خاک
>60%	>60%	22-34%	30-60%	12-30%	3-12%	درصد رد شده از الک ۲۰۰
ML	CL, ML & CL-ML (rarely CH)	SC, SM	SC, SM & CL	SC, SC - SM & GC	Gw, GW-GM, GP-GC, SW & SP	نوع خاک (USCS)

ساحل برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مختلف در جدول ۳ درج شده است.

۳. پیش‌بینی نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل

برای بررسی نشست زمین در ابتدا در طول مسیر تونل مقاطع بحرانی برای انجام تحلیل و مدل‌سازی تعیین می‌شوند. برای انتخاب مقاطع بحرانی در طول مسیر تونل خط هفت از دستورالعمل و توصیه مرجع استفاده شد (I.T.A., 2000) که در آن بر اساس روبراه حداکثر و حداقل، ارتفاع آب زیرزمینی حداقل و حداکثر، ضعیف‌ترین واحد خاکی میزان تونل، شرایط سازه‌های سطحی و زیرسطحی موجود در محدوده تونل و مقادیر کمینه و بیشینه بارهای وارده به پوشش تونل، مقاطعی در نظر گرفته می‌شود.

قابل ذکر است که در واحد ET-6 به علت دسترسی محدود و گسترش کم آن، آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی بر روی نمونه‌ها انجام نگرفته است. به همین دلیل پارامترهای ژئوتکنیکی مربوط به این واحد از مقایسه بین ویژگی‌ها و توصیفات صحرایی این واحد با جداول راهنما و استانداردها، تخمین زده شده است (موسسه مهندسی مشاور ساحل، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مسیر تونل، ۱۳۸۸). مطالعات هیدروژئولوژی مسیر تونل نشان می‌دهد، تراز محور تونل در نواحی شرقی محدوده پروژه، بالاتر از تراز آب‌های زیرزمینی و در نواحی مرکزی و غربی پایین‌تر از تراز آب‌های زیرزمینی است. لذا به جز نواحی شرقی مسیر تونل (از متر ۰ الی ۴۳۰۰)، حفاری تونل با ورود آب همراه خواهد بود. مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی شرکت مشاور مهندسی

جدول ۳. مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

(موسسه مهندسی مشاور ساحل، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مسیر تونل، ۱۳۸۸)

Dry Unit weight (kN/m ³)	v	E (MPa)	ϕ_{cu} (degree)	C_{cu} (MPa)	ϕ (degree)	C' (MPa)	واحد زمین‌شناسی مهندسی
۱۸/۶	۰/۳	۸۰	۲۹	۰/۰۱۶	۳۴	۰/۰۱۴	ET-1
۱۸/۴	۰/۳	۷۵	۲۹	۰/۰۱۸	۳۳	۰/۰۱۵	ET-2
۱۹	۰/۳۲	۵۰	۲۳	۰/۰۴۰	۳۳	۰/۰۳۰	ET-3
۱۸/۲	۰/۳	۵۰	۲۶	۰/۰۲۸	۳۲	۰/۰۲۲	ET-4
۱۷	۰/۳۵	۳۵	۱۹	۰/۰۴۳	۲۸	۰/۰۳۱	ET-5
۱۷	۰/۳۵	۱۰	۲۵	۰	۲۷	۰	ET-6

ج) مقطع شماره ۳

در این محدوده (کیلومتر ۰۷+۴۰۰ تا ۰۷+۵۰۰ در محدوده بعد از میدان قیام) ضعیف‌ترین واحد زمین‌شناختی موجود در طول مسیر تونل (ET-6)، دقیقاً در تاج تونل واقع شده است. سایر واحدهای موجود در این محدوده عبارتند از: ET-2، ET-1، ET-3 و ET-5. همچنین بر اساس مطالعات هیدروژئولوژیکی انجام شده در طول مسیر، مشخص گردید بیشترین تراز متوسط آب زیرزمینی در این ناحیه است.

گسترش واحد زمین‌شناسی ET-6 به عنوان ضعیف‌ترین واحد خاکی در محدوده تاج تونل و همچنین وجود بالاترین تراز آب زیرزمینی در این ناحیه و نیز وجود بارهای اضافی ناشی از ترافیک خیابان ری، همگی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در انتخاب این محدوده به منظور بررسی نشست زمین می‌باشند.

د) مقطع شماره ۴

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، به طور کلی از شرق به غرب رسوبات میزبان تونل، دانه‌ریزتر می‌شوند، به‌طوری‌که در قسمت‌های غربی مسیر تونل، لایه‌های ریزدانه توسعه بیشتری دارند. بخش اعظم مصالح در برگیرنده تونل، در محدوده شماره ۴ را واحد زمین‌شناسی ET-5 تشکیل داده است. همچنین در این محدوده واحدهای خاکی ET-2 و ET-3 نیز دیده می‌شود. لازم به ذکر است که در این منطقه (کیلومتر ۱۱+۱۰۰ تا ۱۱+۲۰۰ در محدوده بعد از میدان رازی) نیز حفاری در زیر سطح ایستایی انجام می‌شود.

مشخصات زمین‌شناختی و پارامترهای طراحی شده برای تونل‌سازی در مقاطع ۳، ۲، ۱ و ۴ به شرح جدول ۴ است. از اطلاعات ذکر شده در فوق و همچنین جدول ۴ جهت مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود.

تفاوت در نوع لایه‌های خاکی تشکیل دهنده این محدوده و حضور آب زیرزمینی و نیز وجود نیروهای سطحی ناشی از ترافیک موجود در خیابان مولوی از عوامل اصلی انتخاب این محدوده برای بررسی پدیده نشست زمین می‌باشد. البته باید گفت که این محدوده بحرانی نیست و صرفاً برای بررسی وضعیت نشست زمین و مقایسه نتایج با سایر مقاطع انتخاب شده است.

لذا با توجه به مطالب ذکر شده، برای انجام مطالعه پدیده نشست در مسیر تونل خط هفت (شرقی - غربی) چهار مقطع به عنوان مقاطع بحرانی به شرح ذیل در نظر گرفته شد. شرایط هر مقطع و دلایل انتخاب آن در ادامه توضیح داده می‌شود.

الف) مقطع شماره ۱

محدوده مقطع شماره ۱ (کیلومتر ۰۱+۸۰۰ تا ۰۱+۹۰۰ در بزرگراه شهید محلاتی) در نواحی شرقی مسیر تونل قرار دارد. خاک میزبان تونل در نواحی شرقی مسیر عموماً از رسوبات دانه درشت تشکیل شده است. خاک محدوده مورد نظر عموماً از واحد ET-3 همراه با میان لایه‌ها و عدسی‌هایی از واحدهای خاکی ET-2 و ET-4 تشکیل شده است. از نظر وضعیت آب‌های زیرزمینی باید گفت که در این منطقه از تونل، سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز حفاری تونل است. یکی از عوامل تأثیرگذار در انتخاب این مقطع برای پیش‌بینی نشست زمین، حداقل روباره تونل می‌باشد. همچنین در معرض بارهای سطحی ناشی از ترافیک در بلوار شهید محلاتی قرار دارد.

ب) مقطع شماره ۲

از نظر زمین‌شناسی، خاک میزبان تونل در این منطقه از واحدهای مختلف زمین‌شناختی تشکیل شده است. این واحدهای خاکی عبارتند از: ET-1، ET-3، ET-4 و ET-5. سطح آب زیرزمینی در این ناحیه (کیلومتر ۰۶+۵۰۰ تا ۰۶+۶۰۰ در محدوده تقاطع بزرگراه شهید محلاتی و خیابان ری) بالای تراز حفاری تونل می‌باشد.

عبور تونل از زیر منطقه مسکونی در محدوده مورد نظر، شرایط حفاری را دشوارتر و حساس‌تر از حفاری در سایر قسمت‌های مسیر تونل کرده است. لذا حفاری تونل در این منطقه نیاز به توجه بیشتر در طراحی و اجرا دارد. وجود بارهای اضافی ناشی از سازه‌های سطحی، حفاری در زیر سطح ایستایی و همچنین بیشترین مقدار روباره (۲۵ متر)، مزید بر شرایط حساس و دشوار حفاری در این منطقه است.

جدول ۴. مشخصات و پارامترهای طراحی شده برای مقطع

شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ (موسسه مهندسين مشاور ساحل، گزارش

توزیع پشت سگمنت، ۱۳۸۸)

کیلومتر	ضخامت روباره (m)	تراز آب نسبت به کف تونل (m)	فشار سینه کار (kPa)	فشار تزریق در سقف (kPa)	فشار تزریق در کف (kPa)
۰۱+۸۰۰ (مقطع ۱)	۹/۵	۰	۵۰	۵۰	۱۹۰
۰۶+۵۰۰ (مقطع ۲)	۲۵	۱۴	۱۳۰	۱۱۰	۲۵۰
۰۷+۴۰۰ (مقطع ۳)	۲۱	۱۶	۱۵۲	۱۳۲	۲۷۲
۱۱+۱۰۰ (مقطع ۴)	۲۱	۱۲	۹۸	۷۸	۲۱۸

جدول ۵. مشخصات بلوک‌های ساخته شده برای تحلیل عددی

نام مقطع	ابعاد بلوک (m)	تعداد زون‌ها
مقطع اول	۴۴ * ۷۵ * ۴۰	۳۱۶۰۰
مقطع دوم	۵۹/۵ * ۷۵ * ۵۰	۴۷۱۰۰
مقطع سوم	۵۵/۵ * ۷۵ * ۵۰	۴۴۶۰۰
مقطع چهارم	۵۵/۵ * ۷۵ * ۵۰	۴۴۶۰۰

از مدل پلاستیک موهر- کلمب برای تحلیل نشست استفاده شده است. این مدل برای موادی به کار می‌رود که تحت بارگذاری تسلیم می‌شوند. اما تنش تسلیم تنها وابسته به تنش‌های حداکثر و حداقل است و تنش اصلی متوسط، تأثیری در شکست ندارد. این مدل پرکاربردترین مدل در مطالعات علوم مهندسی زمین می‌باشد و می‌تواند در مواد دانه‌ای شل، سیمان، خاک، سنگ و بتن مورد استفاده قرار گیرد. به منظور بررسی بهینه و نزدیک کردن هر چه بیشتر شرایط مدل ساخته شده به شرایط واقعی زمین میزان تونل و با توجه به عبور تونل تحت مطالعه از زیر مناطق مسکونی و خیابان‌ها، لازم است علاوه بر منظور کردن تنش‌های اولیه زمین، سربار ناشی از وزن سازه‌های سطحی و ترافیک موجود در خیابان نیز لحاظ گردند. لذا میزان سربار ترافیکی معادل ۲/۴ تن بر مترمربع و سربار ناشی از وجود ساختمان در سطح زمین، با فرض وجود ساختمان پنج طبقه در بالای تونل، معادل ۱۰ تن بر مترمربع فرض می‌شود. این اعداد بر اساس وزن متوسط یک ساختمان ۵ طبقه و وزن متوسط وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است (موسسه مهندسين مشاور ساحل، گزارش مبانی و معیارهای تحلیل و طراحی، ۱۳۸۸). این بارها به صورت بار گسترده یکنواخت در طراحی مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند. تنش‌های قائم برابر pgz می‌باشد. که g شتاب ثقل و ρ چگالی خاک و Z عمق نقطه مورد نظر می‌باشد. برای محاسبه نسبت تنش‌ها در مدل‌سازی مقاطع انتخاب شده، حالت خاک به صورت تحکیم‌شده عادی منظور شد. برای یک زمین با وضعیت تحکیم عادی معمولاً رابطه تجربی $K_0^{nc} = 1 - \sin\phi'$ برای محاسبه نسبت تنش‌ها اتخاذ می‌شود. nc نشان دهنده وضعیت تحکیم عادی و ϕ' زاویه اصطکاک مؤثر زمین است (Moller,

۴. تحلیل عددی نشست سطح زمین به کمک

نرم‌افزار Flac^{3D}

اصول مدل‌سازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی در مدل‌سازی با نرم افزار Flac^{3D} به ترتیب زیر می‌باشد.

۱. انتخاب محدوده مناسب از توده خاک اطراف تونل

۲. انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

۳. ترسیم هندسه تونل و اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه و حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

۴. حفاری تونل و تعیین میزان جابه‌جایی‌ها

۵. آزادسازی مقداری از تنش‌ها با مقدار جابه‌جایی محدود

۶. مدل‌سازی سیستم نگهداری و حل نهایی مدل

در مدل‌های ساخته شده تمامی مرزهای مصنوعی جانبی و نیز مرزهای مصنوعی ایجاد کننده کف مدل‌ها، به صورت غلتکی بسته شده و فقط مرزهای بالایی که منتهی به سطح زمین می‌شوند به صورت طبیعی باقی گذاشته شد. ابعاد چهار بلوک ساخته شده برای مقاطع انتخاب شده در جدول ۵ ارائه شده است.

2006). در مدل‌سازی عددی برای تمام مقاطع مقدار نسبت تنش افقی به قائم ۰/۵ در نظر گرفته شد. مقدار وزن مخصوص متوسط محاسبه شده برای هر مقطع در جدول ۶ قابل مشاهده است.

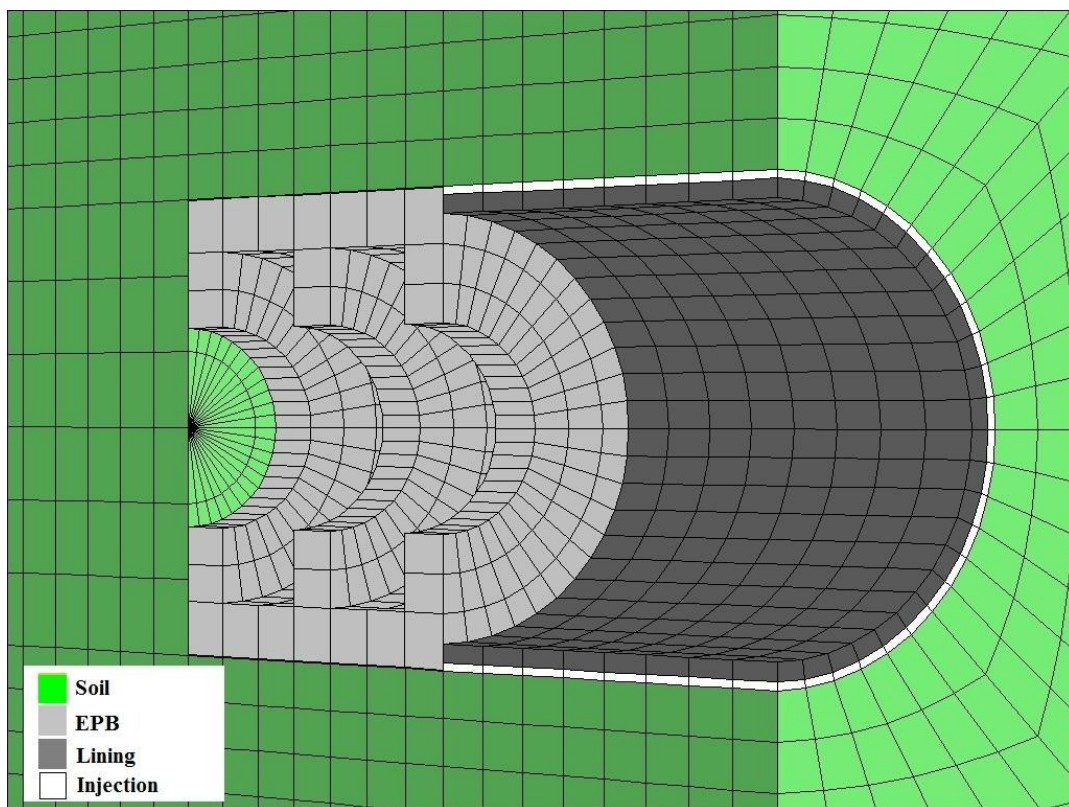
جدول ۶. مقادیر وزن مخصوص متوسط محاسبه شده

برای خاک هر مقطع

شماره مقطع	۱	۲	۳	۴
وزن مخصوص بالای سطح آب زیرزمینی (Kg/m^3)	۲۱۰۰	۲۱۰۵	۲۰۰۰	۱۹۶۶
وزن مخصوص زیر سطح آب زیرزمینی (Kg/m^3)	-	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۱۱۰

یکی از ارکان مهم در مدل‌سازی سه‌بعدی، توانایی حفاری مرحله به مرحله و بررسی کامل مدل پس از هر مرحله حفاری است. پس از بررسی شرایط تعادل در بلوک ساخته شده، حفاری تمام مقطع، با در نظر گرفتن اضافه حفاری انجام می‌شود. فاصله به وجود آمده در حد فاصل بدنه سپر و قوس

خارجی پوشش تونل، پروسه تزریق در پشت سپر دنباله و با توجه به طول هر سیکل حفاری (۱/۵ متر)، به صورت مرحله به مرحله لحاظ می‌شود. همچنین در مدل‌های ساخته شده فشار وارد شده به سینه‌کار، فشارهای تزریق دوغاب در سقف و کف تونل نیز مدل‌سازی شد. لازم به ذکر است که شرایط مکانیکی دوغاب تزریق شده با توجه به نرخ پیشروی پیش‌بینی شده برای ماشین EPB تهیه شده برای پروژه مورد مطالعه ($1/5 \text{ m/h}$) و نیز خواص مکانیکی یک ساعته دوغاب تزریق شده، تعیین شد. همچنین برای مدل‌سازی حالت سپر در تونل، از یک سیلندر استفاده شد که وزنی مطابق با وزن سپر تهیه شده در پروژه به آن اختصاص داده شد. برای کنترل همگرایی سپر در اثر فشار خاک میزبان تونل، از سه مهار در فواصل مساوی در طول سپر استفاده شد. نحوه مدل‌سازی سپر و نمایی از یک مدل ساخته شده به همراه عناصر دوغاب و سگمنت‌های بتنی، در شکل ۱ دیده می‌شود.



شکل ۱. نمایی از بلوک ساخته شده پس از ۸ مرحله حفاری

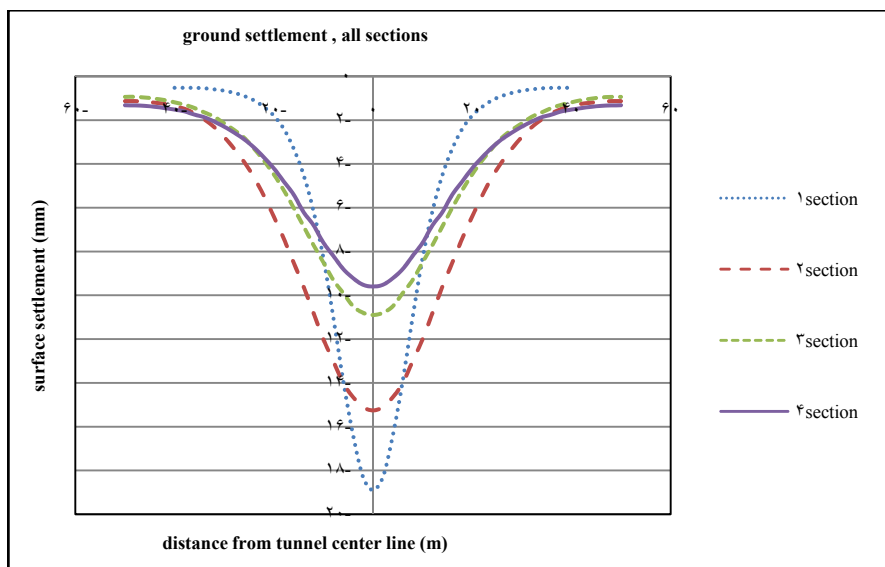
مرحله اول متروی تهران، مقادیر نشست مجاز را در زیر ساختمان‌ها برابر ۱ سانتی‌متر و در سطح خیابان ۲ سانتی‌متر تعیین کرده است (شریعتمداری، ۱۳۸۰). نتایج نشان می‌دهد با توجه به میزان نشست مجاز در زیر مناطق مسکونی (۱ سانتی‌متر) و در زیر خیابان‌ها (۲ سانتی‌متر) مقدار نشست بیشینه محاسبه شده از تحلیل عددی تمامی مقاطع (به غیر از مقطع دوم)، کمتر از میزان مجاز تعریف شده است. پروفیل‌های عرضی نشان می‌دهد که مقدار نشست بیشینه در سطح زمین در مقطع شماره یک که دارای کمترین روباره (۹/۵ متر) است ۱۸/۹ میلی‌متر بوده که بیشترین مقدار نشست در بین ۴ مقطع می‌باشد. همچنین عرض محدوده نشست در مقطع ۱ به دلیل میزان کم روباره، کمترین عرض را در بین ۴ مقطع دارا است. البته در مقطع ۳ و ۴ با اینکه عمق روباره یکی است (۲۱ متر) ولی مقدار نشست بیشینه و محدوده نشست در این دو مقطع متفاوت است که به علت گسترش واحد زمین‌شناسی ET-6 به عنوان ضعیف‌ترین واحد خاکی در محدوده تاج تونل در مقطع شماره ۳ است. همچنین در مقطع شماره ۲ به علت وجود بارهای سطحی که از طرف ساختمان‌ها وارد می‌شود باعث شده است به‌رغم اینکه بیشترین روباره (۲۵ متر) را دارد ولی نشست بیشینه در این مقطع بیشتر از مقطع ۳ و ۴ باشد. همچنین در شکل ۴ پروفیل طولی نشست‌های به دست آمده از تحلیل عددی مقاطع ذکر شده، آورده شده است.

پس از مدل‌سازی بدنه سپر در داخل تونل، هر مرحله حفاری به صورت زیر انجام می‌شود:

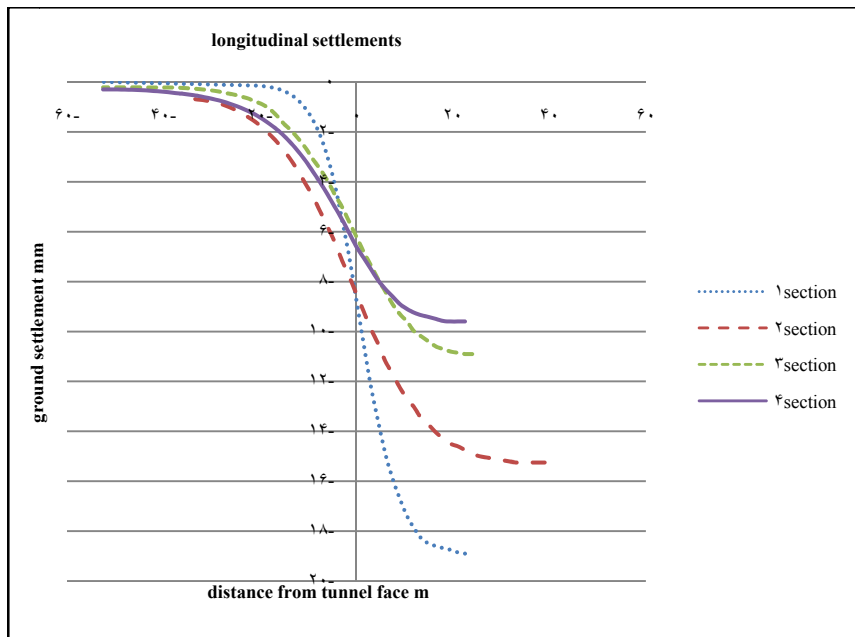
۱. برداشتن ۱/۵ متر از سینه‌کار تونل
۲. حرکت دادن بدنه سپر به اندازه ۱/۵ متر رو به جلو
۳. اعمال نیروی تعیین شده به سینه‌کار جدید
۴. ایجاد عناصر تزریق در پشت سپر
۵. اعمال فشارهای تزریق در سقف و کف تونل
۶. ایجاد عناصر سگمنت‌های بتنی و تخصیص خواص آن
۷. بهبود خواص مکانیکی دوغاب تزریق شده در پشت سگمنت‌های قبلی
۸. تعیین شرایط مرزی صلب برای دو حلقه بتنی مجاور
۹. حل مدل تا رسیدن نسبت نیروهای نامتعادل کننده به 10^{-5} (Itasca Consulting Group, 2002)

پس از ایجاد شرایط تعادل در بلوک‌های ساخته شده و مدل‌سازی سپر در بلوک‌ها، حفاری مرحله‌ای تا جایی انجام می‌شود که حفاری‌های جدید در میزان نشست بیشینه به‌وجود آمده در نقطه منطبق بر ابتدای تونل، تأثیری نداشته باشد. برای رسیدن به این هدف برای مقاطع ۱ تا ۴ به ترتیب ۸، ۹، ۱۹، ۸ مرحله حفاری انجام شد.

در شکل ۲ منحنی‌های نشست زمین در مقطع عرضی که از تحلیل عددی چهار محدوده مذکور حاصل شده، ارائه شده است. شرکت فرانسوی سوفرتو به عنوان مسئول مطالعات



شکل ۳. پروفیل‌های عرضی نشست محاسبه شده از حل عددی چهار مقطع مورد مطالعه



شکل ۴. پروفیل‌های طولی نشست محاسبه شده از حل عددی چهار مقطع مورد مطالعه

چهارم به ترتیب ۰.۴۲، ۰.۲۴، ۰.۲۸ و ۰.۲۴. مقدار نشست بیشینه در آن مقطع می‌باشد.

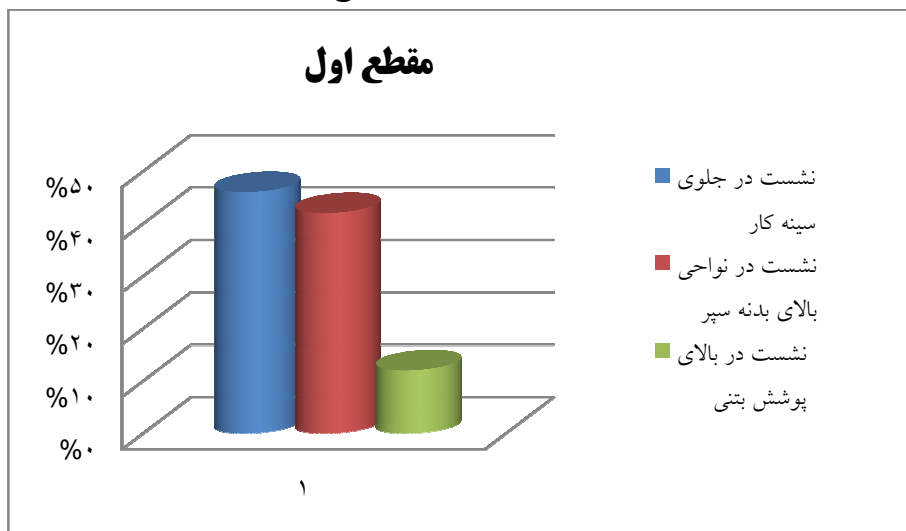
پس از بررسی منحنی‌های نشست طولی، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- مقدار نشست پس از عبور سپر (بالای پوشش بتنی) برای مقاطع اول تا چهارم به ترتیب ۰.۱۲، ۰.۲۰، ۰.۱۵ و ۰.۸ مقدار نشست بیشینه در آن مقطع می‌باشد.

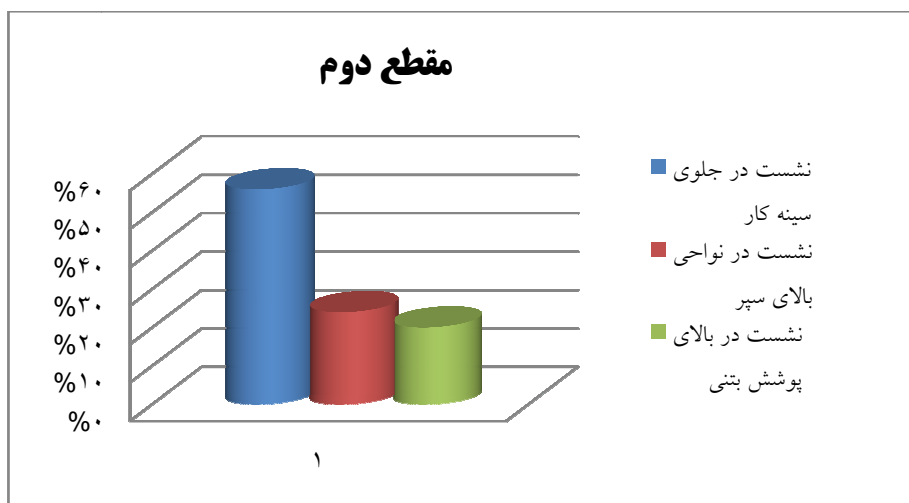
- مقدار نشست در بالای سینه‌کار تونل برای مقاطع اول تا چهارم به ترتیب ۰.۴۶، ۰.۵۶، ۰.۵۷ و ۰.۶۸ مقدار نشست بیشینه در آن مقطع می‌باشد.

این نتایج در شکل‌های ۵ تا ۸ قابل مشاهده است.

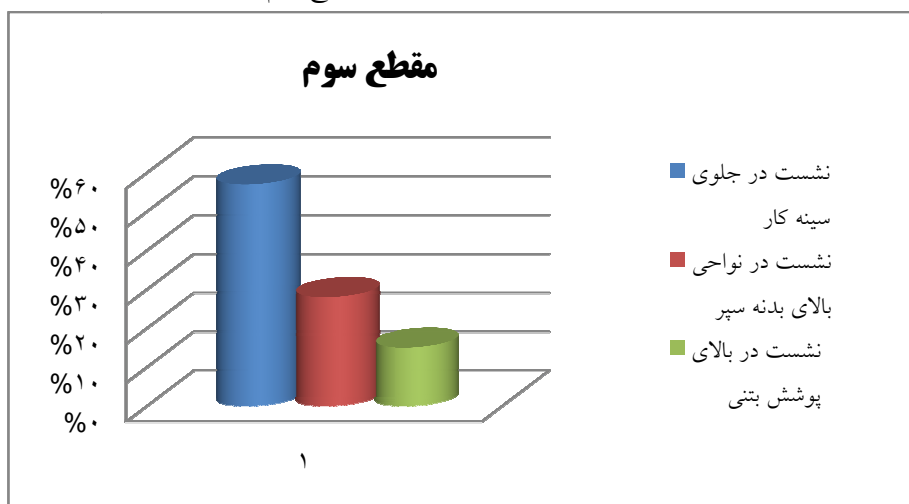
- مقدار نشست در بالای بدنه سپر برای مقاطع اول تا



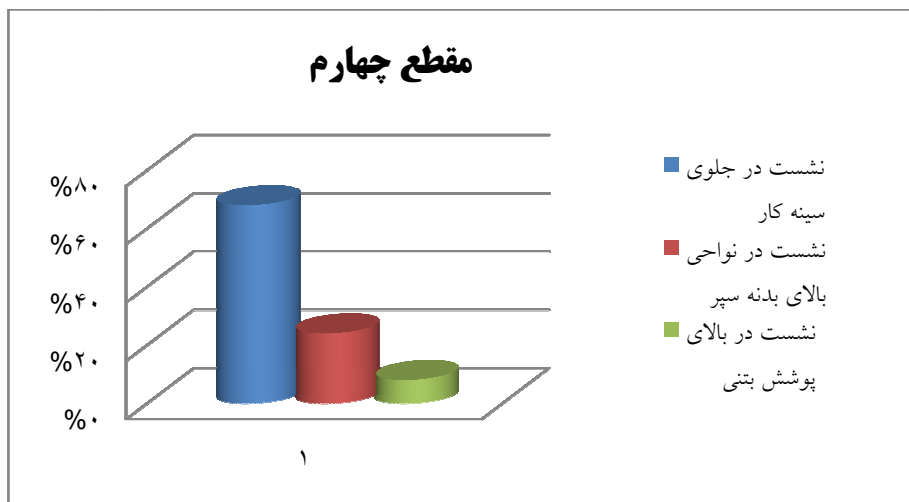
شکل ۵. میزان نشست سطحی به وجود آمده در نواحی مختلف مقطع اول و بر اساس مقدار نشست بیشینه



شکل ۶. میزان نشست سطحی به وجود آمده در نواحی مختلف مقطع دوم و بر اساس مقدار نشست بیشینه



شکل ۷. میزان نشست سطحی به وجود آمده در نواحی مختلف مقطع سوم و بر اساس مقدار نشست بیشینه



شکل ۸. میزان نشست سطحی به وجود آمده در نواحی مختلف مقطع چهارم و بر اساس مقدار نشست بیشینه

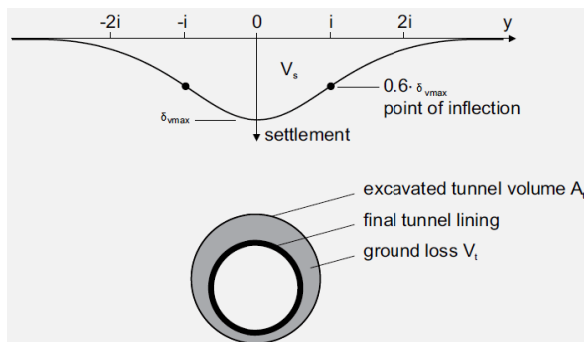
تجربی مقایسه شده است که در ذیل شرح مختصری در مورد این روش‌ها آورده شده است.

۴-۱. روش پک

بر اساس اطلاعات موجود بسیاری از پروژه‌های تونل‌سازی، پک (Peck, 1969) مشاهده کرد که معمولاً گودی نشست در بالای یک تونل را می‌توان در درون محدوده معقول توسط تابع خطا یا منحنی احتمال نرمال (به عنوان یک منحنی گاوسی) شبیه‌سازی کرد. راه‌حل پک تخمین نشست را در فواصل متفاوت جانبی از مرکز تونل فراهم می‌کند. بر اساس رابطه پک (رابطه ۱) جابه‌جایی در هر نقطه عبارت است از:

$$\delta_z(x) = \delta_{z,Max} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right] \quad (1)$$

خواص مرتبط با تابع احتمال نرمال و رابطه آن‌ها با ابعاد تونل در شکل ۹ قابل مشاهده است. شعاع تونل با R و عمق مرکز تونل با z نشان داده شده است.



شکل ۹. منحنی احتمال نرمال که برای توصیف مخروط

نشست عرضی استفاده می‌شود

در ارتباط با این منحنی دو پارامتر مهم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

۱. نشست حداکثر (δ_{max}) که قاعدتاً روی محور مرکزی تونل (محور تقارن تونل) در سطح زمین ایجاد می‌شود.
۲. پارامتر i که عبارت است از فاصله نقطه عطف منحنی (Inflection Point) نشست تا خط مرکزی تونل.

نقاط عطف منحنی در فاصله i در هر دو طرف خط مرکزی تونل واقع شده است. نقطه i از منحنی نشست، نقطه‌ای است که در آن جابه‌جایی افقی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و از

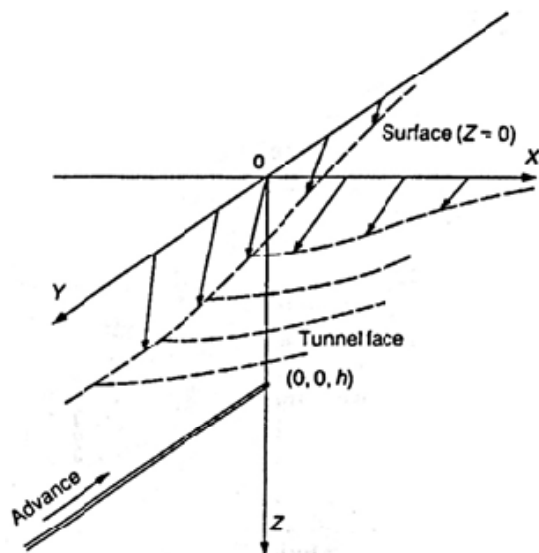
مقطع اول، در نواحی بالای سینه‌کار و در نواحی بالای بدنه سپر بیشترین سهم در میزان نشست بیشینه را دارند. دلیل این موضوع را می‌توان به میزان کم روباره نسبت داد. زیرا میزان کم روباره موجب وارد آمدن فشارهای کمتر به پوشش بتنی و در نتیجه همگرایی کمتر آن می‌شود. همچنین در مقادیر کم روباره سهم بیشتری از جابه‌جایی‌های به وجود آمده در اطراف تونل، به سطح زمین منتقل می‌شود. در مقطع دوم نشست در نواحی بالای سینه‌کار تونل، نشست در نواحی بالای بدنه سپر و نشست در بالای پوشش تونل به ترتیب بیشترین سهم در میزان نشست بیشینه را دارند. چنانچه دیده می‌شود در این مقطع نسبت به مقطع اول نیروهای بیشتری به پوشش تونل وارد می‌شود و لذا سهم این محدوده در میزان نشست بیشینه بیشتر از محدوده مشابه در مقطع اول است. همچنین به دلیل میزان روباره زیاد، سهم کمتری از جابه‌جایی‌های به وجود آمده در بالای بدنه سپر به سطح زمین منتقل می‌شود.

در مقطع سوم نیز نشست به وجود آمده در بالای سینه‌کار بیشترین سهم در میزان نشست بیشینه را دارد. در این مقطع به دلیل روباره نسبتاً زیاد، سهم کمی از جابه‌جایی‌های به وجود آمده در بالای بدنه سپر (ناشی از اندرکنش خاک و ماشین حفاری و نیز فضای خالی ناشی از بیش حفاری) به سطح زمین منتقل شده است.

در مقطع چهارم مقدار نشست به وجود آمده در سینه‌کار تونل مقدار قابل توجهی می‌باشد. بر همین اساس نشست‌های به وجود آمده در نواحی بالای پوشش بتنی سهم بسیار کمی در میزان نشست بیشینه دارد.

با توجه به شروع نشدن عملیات حفاری تونل مورد مطالعه، امکان ابزاربندی و رفتارنگاری و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق، وجود ندارد لذا نتایج حاصل از روش عددی با روش‌های تحلیلی و

در این روابط؛ V_s میزان افت حجمی زمین، $\delta_z(x)$ نشست قائم عرضی در فاصله x از محور تونل، $\delta_z(y)$ نشست قائم طولی، y فاصله از سینه کار تونل و H فاصله از سینه کار است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. مختصات و پارامترهای روش تحلیلی ساگاستا در محاسبه نشست زمین (Sagasetta, 1988)

در سال ۲۰۰۱ ساگاستا و گونزالز (Gonzalez) تعمیمی بر روش قدیمی ساگاستا برای پیش‌بینی نشست زمین به صورت رابطه ۵ ارائه نمودند:

(۵)

$$\delta_z(x) = 2\varepsilon R \left(\frac{R}{H}\right)^{2\alpha-1} \frac{1}{(1+\bar{X}^2)^\alpha} \left[1 + \rho \frac{1-\bar{X}^2}{1+\bar{X}^2}\right]$$

در رابطه ۵؛ R شعاع تونل، ε کرنش شعاعی، \bar{X} فاصله نسبی تا محور تونل (x/H) ، α یک پارامتر و ρ بیضی شدگی نسبی می‌باشد که از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$\rho = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (۶)$$

در رابطه مذکور δ بیضی شدگی تونل است. در رابطه ۵ توزیع حرکت خاک با سه پارامتر ρ ، α و ε مشخص می‌شود. ساگاستا پیشنهاد کرد که در خاک‌های رسی، مقدار α برابر با ۱ در نظر گرفته شود و مقادیر این پارامتر در خاک‌های دانه‌ای بستگی به عمق محور تونل دارد (وقتی که $H < 2D$ ، α برابر با ۲ است و زمانی که $H > 4D$ ، α برابر با ۱ است). همچنین

آن به بعد جابه‌جایی افقی کم می‌شود و در انتهای دو طرف منحنی نشست، تقریباً به صفر می‌رسد. از طرفی نقطه i نقطه‌ای است که تغییر شکل نسبی فشاری به تغییر شکل کششی تبدیل می‌شود. مقدار i با توجه به خواص منحنی احتمال نرمال یا انحراف استاندارد، برابر با $0.61\delta_{max}$ است. مقدار بیشینه نشست‌های قائم در رابطه پک عبارت است از (رابطه ۲):

$$\delta_{z,max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} \cong \frac{V_s}{2.5i} \quad (۲)$$

در این رابطه V_s پارامتر افت حجمی (نسبت حجم گودی نشست‌های سطحی به ازای هر متر حفاری) می‌باشد. بر اساس اطلاعات صحرائی گزارش شده توسط کوردینگ و هانسمایر (Cording And Hansmire, 1975)، حجم گودی نشست می‌تواند با افت زمین در داخل تونل رابطه داشته باشد. آنها مشاهده کرده‌اند که در بسیاری از تونل‌های حفر شده در خاک رس، حجم نشست سطحی توسعه یافته برابر با مقدار افت زمین در داخل تونل است. با فرض شرایط زهکشی نشده پارامتر افت حجمی معمولاً با مقدار افت زمین برابر می‌باشد.

۲-۴. روش ساگاستا

در این شیوه راه‌حل‌های فرم بسته‌ای برای بدست آوردن میدان کرنش در خاک ذاتاً ایزوتروپیک و هموزن تراکم ناپذیر به دلیل افت در نزدیکی سطح زمین ارائه شده است که ضمن در نظر گرفتن معادلات کرنش، از معادلات تنش‌ها صرف نظر می‌کند. این تحلیل شامل در نظر گرفتن افت حجمی در محل تونل و توزیع آن در توده خاک در حالت مصالح تراکم‌ناپذیر (تغییر حجم نسبی صفر) می‌باشد. بر این اساس مقدار جابه‌جایی‌های سطحی به کمک رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شود (شکل ۱۰) (Sagasetta, 1988).

$$\delta_z(x) = \frac{v_s}{\pi} \frac{H}{x^2 + H^2} \quad (۳)$$

$$\delta_z(y) = \frac{v_s}{2\pi H} \left\{1 + \frac{y}{\sqrt{y^2 + H^2}}\right\} \quad (۴)$$

در شکل ۱۱ دو مکانیسم تغییر شکل اساسی تونل، یعنی جابه‌جایی یکنواخت شعاعی (افت زمین که ممکن است در زمان ساخت تونل رخ دهد) و بیضوی شدن تونل که از جابه‌جایی پوشش تونل ایجاد می‌شود، دیده می‌شود.

برای حالت زهکشی نشده، δ برابر با صفر و v برابر با $0/5$ منظور می‌شود. مساحت گودی نشست A ، با انتگرال‌گیری از رابطه ۸ از $-\infty$ تا $+\infty$ حاصل می‌شود:

$$A = 4(1 - v)\varepsilon\pi R^2 \quad (9)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\varepsilon = \frac{A}{4(1-v)\pi R^2} = \frac{V_s}{4(1-v)} \quad (10)$$

۴-۴. روش لگاناتان و پولوس

لگاناتان و پولوس با توجه به راه‌حل ورویجت و بوکر پارامتری به نام افت زمین معادل را به صورت رابطه ۱۱ ارائه دادند:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{4gR + g^2}{4R^2} \right) \times 100\% \quad (11)$$

در این رابطه؛ ε_0 افت زمین معادل، g پارامتر گپ و R شعاع تونل می‌باشد. زمانی که جزئیات سیستم نگهداری ماشین و پارامترهای خاک معلوم باشد، پارامتر گپ می‌تواند با استفاده از رابطه تئوری ارائه شده توسط لی و همکارانش (۱۹۹۲) رابطه ۱۲ برآورد شود (Loganathan And Poulos, 1998).

$$g = G_p + U_{3D} + \omega \quad (12)$$

در این رابطه؛ G_p گپ فیزیکی معرف فاصله هندسی بین پوسته خارجی سپر و پوشش تونل، U_{3D} تغییر شکل الاستوپلاستیک معادل سه بعدی در سینه‌کار تونل و ω مقداری است که کیفیت اجرای تونل را در نظر می‌گیرد.

برآورد پارامتر گپ با استفاده از رابطه ۱۲، تحکیم وابسته به زمان و مؤلفه‌های خزش افت زمین را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، افت زمین معادل برآورد شده با استفاده از پارامتر گپ، فقط در شرایط زهکشی نشده کاربرد دارد.

میزان ρ بین صفر و ۱ تغییر می‌کند و در صورت اعمال تزریق می‌تواند بزرگتر از یک باشد. به عنوان یک راه حل، ε به درصد می‌تواند از افت حجمی V_s با استفاده از رابطه ۷ حاصل شود.

$$\varepsilon = \frac{V_s}{2} \quad (7)$$

۴-۳. روش ورویجت و بوکر

ورویجت - بوکر در سال ۱۹۹۶ یک تحلیل الاستیک خطی برای تونل حفر شده در یک نیم فضای همگن ارائه نمودند. آن‌ها از تئوری الاستیسیته و روش تقریبی که ساگاستا (۱۹۸۷) پیشنهاد کرده بود، استفاده نمودند. این روش تعمیمی از راه حل ساگاستا برای خاک‌های تراکم‌پذیر (مقادیر دلخواه برای نسبت پواسون) است که اثر بیضی‌شدگی (Ovalization) و تغییر شکل‌های بیضوی مقطع تونل را در نظر می‌گیرد (Verruijt And Booker, 1996). راه حل ارائه شده توسط ورویجت و بوکر برای برآورد تغییر شکل‌های سطحی و زیرسطحی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$U_z(x) = 4\varepsilon R^2(1 - v) \frac{H}{x^2 + H^2} - 2\delta R^2 \frac{H(x^2 - H^2)}{(x^2 + H^2)^2} \quad (8)$$

که در آن:

ε : افت زمین شعاعی یکنواخت (شکل ۱۱)،

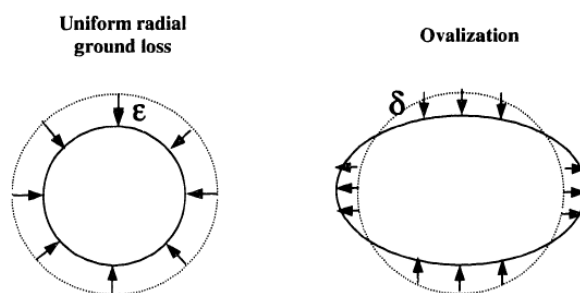
δ : تغییر شکل بلند مدت زمین ناشی از بیضوی شدن پوشش

تونل (شکل ۱۱)

R : شعاع تونل

H : عمق تونل

θ : نسبت پواسون خاک



شکل ۱۱. افت زمین و بیضوی شدن پوشش تونل

(Verruijt And Booker 1996)

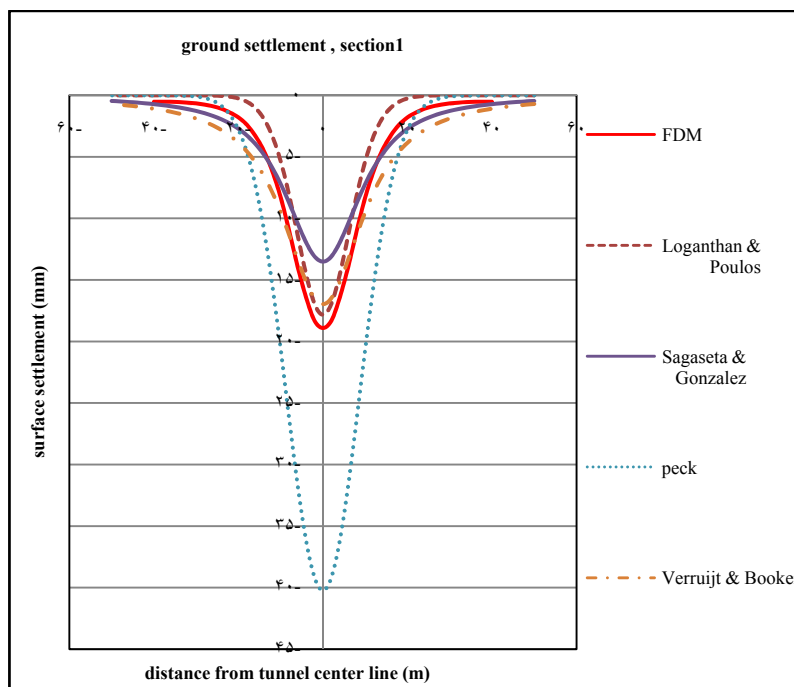
شرایط خاک را همگن در نظر می‌گیرند و لذا شرایط لایه‌های مختلف خاکی و اختلاف در پارامترهای مکانیکی آنها، در این روش‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین در روش‌های تحلیلی و تجربی اثر آب‌های زیرزمینی و سربار ناشی از ترافیک خیابان و سازه‌های سطحی، بر میزان نشست زمین در نظر گرفته نمی‌شود. پس از بررسی منحنی‌های نشست در مقطع عرضی دیده می‌شود که نتایج به‌دست آمده از رابطه ارائه شده توسط پک، بیشتر از مقادیر محاسبه شده از روابط تحلیلی و مدل‌سازی عددی است. بررسی نتایج به‌دست آمده از سایر پروژه‌های مشابه در نقاط مختلف دنیا موضوع ذکر شده را تأیید می‌کند. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد منحنی‌های به‌دست آمده از روش‌های لوگاناتان و پولوس، ورویجت و بوکر و ساگاستا هم‌پوشانی نسبتاً مناسبی با منحنی‌های نشست به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی دارند. شکل ۱۲ پروفیل‌های نشست عرضی برای مقطع شماره یک را نشان می‌دهد.

لوگاناتان و پولوس بر اساس مدل‌های ریاضی و با اعمال یکسری روابط و تعیین شرایط مرزی (در نظر گرفتن جابه‌جایی یا الگوی تغییر شکل غیر دایره‌ای در اطراف فضا)، پارامتر افت زمین معادل را برای نقطه‌ای با مختصات X و Z به صورت رابطه ۱۳ بدست آوردند.

$$\varepsilon_{x,z} = \frac{4gR+g^2}{4R^2} \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\}$$

در این رابطه؛ H عمق تونل از سطح زمین و g پارامتر گپ می‌باشد. سایر پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد (شکل ۱۲) که نشست بیشینه به‌دست آمده از این روش‌ها (به غیر از روش پک) کمتر از مقادیر محاسبه شده از تحلیل عددی مقاطع مذکور است. بررسی نتایج به‌دست آمده از سایر پروژه‌های مشابه در نقاط مختلف دنیا مانند تونل متروی مادرید (Melis, 2002) موضوع ذکر شده را تأیید می‌کند. از دلایل اصلی این موضوع می‌توان به این نکته اشاره کرد که اکثر روش‌های تحلیلی و تجربی، بر اساس پارامتر افت حجمی و یا پارامتر گپ شکل گرفته‌اند و



شکل ۱۲. پروفیل‌های عرضی نشست محاسبه شده برای مقطع اول

۵. نتیجه گیری

- پس از بررسی مقادیر نشست در مقاطع مورد مطالعه، نتایج زیر حاصل می‌شود:
- با توجه به میزان نشست مجاز در زیر مناطق مسکونی (۱ سانتی‌متر) و در زیر خیابان‌ها (۲ سانتی‌متر) مقدار نشست بیشینه حاصل شده از تحلیل عددی به غیر از مقطع دوم در تمامی مقاطع کمتر از میزان مجاز تعریف شده است.
 - عرض گودی نشست و میزان نشست بیشینه به میزان روباره بستگی دارد. به طوری که کمترین عرض گودی نشست و بیشترین مقدار نشست بیشینه (۱۸/۹ میلی‌متر) مربوط به مقطع اول بوده که دارای کمترین میزان روباره است.
 - مقدار نشست در بالای سینه‌کار تونل برای مقاطع اول تا چهارم به ترتیب ۰/۴۶٪، ۰/۵۶٪، ۰/۵۷٪ و ۰/۶۸٪ مقدار نشست بیشینه در آن مقطع می‌باشد.
 - مقدار نشست در نواحی بالای بدنه سپر برای مقاطع اول تا چهارم به ترتیب ۰/۴۸٪، ۰/۲۴٪، ۰/۲۸٪ و ۰/۲۴٪ مقدار نشست بیشینه در آن مقطع است.
 - مقدار نشست به وجود آمده در بالای پوشش بتنی پس از عبور سپر برای مقاطع اول تا چهارم به ترتیب ۰/۱۲٪، ۰/۲۰٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۸٪ مقدار نشست بیشینه در آن مقطع می‌باشد.
- با توجه به شروع نشدن عملیات حفاری تونل مورد مطالعه، امکان ابراربنندی و رفتارنگاری و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق، وجود ندارد و لذا برای مطالعه بیشتر مقاطع انتخاب شده، روش‌های تحلیلی ساگاستا، ورویجت و بوکر، لوگاناتان و پولوس، بابت و روش تجربی پک نیز به کار گرفته شدند. بررسی‌ها نشان می‌دهد منحنی‌های به دست آمده از روش‌های لوگاناتان و پولوس، ورویجت و بوکر و ساگاستا هم‌پوشانی نسبتاً مناسبی با منحنی‌های نشست به دست آمده از مدل‌سازی عددی دارند.

منابع

- بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ، ا.، مهاجر اشجعی، ا.، ۱۳۶۴. "پژوهش و بررسی ژرف‌نوی زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه، گسلش در گستره تهران و پیرامون"، گزارش شماره ۵۶ سازمان زمین‌شناسی کشور.
- ستاری، ق.، ۱۳۸۷. "برآورد عددی و تحلیلی نشست سطح زمین ناشی از تونل‌سازی با سپر تعادلی زمین (مطالعه موردی خط هفت متروی تهران)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده معدن.
- شریعتمداری، ن.، فرزانه الف، ۱۳۸۰. "مطالعه نشست سطح زمین بر اثر حفر تونل مترو"، پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۷ الی ۹ آبان ماه، تهران.
- شریف‌زاده، م.، عقیقی‌پور، م.، تسوجی‌زاده، م.، ۱۳۸۸. "تأثیر طول گام و مراحل حفر در روش حفاری مرحله‌ای بر میزان نشست سطح زمین در خط چهار متروی تهران"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره پنجم، شماره دهم، ص. ۳۹ تا ۴۶.
- صدقیانی، م.، ح.، علیاری، ی.، ۱۳۸۷. "بررسی اندرکنش خاک و تونل در مراحل حفاری به روش EPB و اثر آن‌ها در نشست سطح زمین، مورد مطالعه: تونل‌های قطار شهری تبریز"، نشریه انجمن تونل ایران، شماره ۳، ص. ۱۳.
- موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۸. "گزارش بررسی کلی پلان و پروفیل مسیر، خدمات مهندسی پروژه تونل خط هفت متروی تهران قطعه شرقی - غربی".
- موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۸. "گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل، خدمات مهندسی پروژه تونل خط هفت متروی تهران قطعه شرقی - غربی".
- موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۸. "گزارش تزریق پشت سگمنت، خدمات مهندسی پروژه تونل خط هفت متروی تهران قطعه شرقی - غربی".

موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۸. "گزارش مبنایی و معیارهای تحلیل و طراحی. خدمات مهندسی پروژه تونل خط هفت متروی تهران قطعه شرقی-غربی".

وفائیان، م، شریعت‌مداری، ن، حیدری، م، ۱۳۸۲. تأثیر شیب سطح زمین، بار خارجی و شکل مقطع تونل بر مقدار نشست زمین حاصل از حفر تونل‌های خاکی. ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

Cording, E.J., and Hansmire, W.H., 1975. Displacements around soft ground tunnels. General Report 5'h Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Session IV, pp. 571-632.

I.T.A. Working Group No. 2. (ITA), 2000. Guidelines for the design of shield tunnel lining. Tunneling and Underground Space Technol., 15(3): 303-331.

Itasca Consulting Group, 2002. Flac Version 4 User Manual, Minneapolis.

Loganathan, N., Poulos, H.G., 1998. Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(9): 846-856.

Melis, M., Medina, L., Ma Rodríguez, J., 2002. Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension. Canadian Geotechnical Journal. 39(6): 1273-1287.

Moller, S., 2006. Tunnel Induced Settlements and Structural Forces In Linings. Mitteilung 54 Des Instituts Fur Geotechnik Herausgeber P.A Vermeer.

Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft Ground. proceedings of 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, State-of-the-Art, Vol. 7, pp. 225-290.

Sagaseta C., 1988. Discussion on: Sagaseta, C., Analysis of Undrained Soil Deformation due to Ground Loss, Author's reply to B. Schmidt, Geotechnique, 38 (4): 647-649.

Verruijt ,A., Booker ,J.R., 1996. Surface Settlement due to deformation of a tunnel in an elastic half Plane. Geotechnique, 46(4): 753-757