



یادداشت فنی

بررسی عددی میزان تأثیرپذیری نشست زمین ناشی از حفر تونل خط دو متروی تبریز از تغییرات ضریب فشار جانبی زمین (K_0)

محمدرضا باغبان گل پسند^{۱*}، مصطفی عباس زاده^۱، امیر حسن رضایی فرعی^۲، سید غفور علوی^۳

۱- گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی سراج، تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت: خرداد ۱۴۰۱، پذیرش: آذر ۱۴۰۱)

چکیده

نشست زمین از تبعات اجتناب‌ناپذیر حفر تونل‌های کم‌عمق (اعم از مکانیزه و سنتی) در زمین‌های نرم مانند مصالح خاکی است. این پدیده خود معلول به هم خوردن رژیم تنش‌های طبیعی زمین است که در اثر برداشتن مصالح در طی حفر تونل اتفاق می‌افتد. پیش‌بینی مقدار نشست زمین و محدوده گسترش آن از نظر آسیب‌های احتمالی که می‌تواند به ساختمان‌های سطحی و سازه‌ها و تأسیسات زیرسطحی وارد کند، از اهمیت بالایی برخوردار بوده و با توجه به خطرات ناشی از آن می‌بایست با دقت هر چه تمام‌تر مورد بررسی قرار گیرد. عوامل مختلفی می‌توانند بر وقوع این پدیده و مقدار آن مؤثر باشند که از جمله می‌توان به نوع خاک موجود در محل حفاری تونل و خصوصیات ژئوتکنیک آن، قطر و عمق تونل، سازه‌های بالای محیط حفاری، سطح آب‌های زیرزمینی و... اشاره نمود. پارامتر K_0 (ضریب فشار جانبی خاک) از جمله خصوصیات ژئوتکنیکی مهم خاک بوده و نقش اساسی در طراحی تونل به‌ویژه پوشش بتنی آن دارد. در این تحقیق نشست زمین در اثر حفر تونل مکانیزه خط دو متروی تبریز مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پارامتر K_0 بر آن با استفاده از روش تفاضل محدود و مدل‌سازی با نرم‌افزار FLAC 2D با مقادیر مختلف پارامتر K_0 (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱) بررسی شده است. مدل عددی ساخته شده و نتایج حاصل از آن با استفاده از نشست‌های واقعی که در حین حفاری تونل اندازه‌گیری می‌شوند، مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان‌دهنده این است که با افزایش مقدار K_0 ، میزان نشست زمین کاهش پیدا می‌کند و مقدار این کاهش از یک تابع‌نمایی تبعیت می‌کند.

کلمات کلیدی

نشست زمین در اثر حفر تونل، ضریب فشار جانبی خاک (K_0)، روش تفاضل محدود، نشست‌های واقعی

*عهده‌دار مکاتبات: golpasand.mr@seraj.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت در کلان‌شهرها و ازدیاد تردد و ترافیک شهری، اهمیت و کارایی خطوط قطارهای شهری بیشتر شده و با توجه به این موضوع، لزوم حفر تونل‌های شهری به صورت روزافزونی افزایش یافته است. تونل‌سازی در مناطق کم‌عمق شهری و مجاورت سازه‌های بزرگ، تغییر شیب‌ها و تغییر مسیرها، همواره مشکلاتی را به وجود می‌آورد که می‌تواند خسارات و مخاطراتی را در پی داشته باشد. یکی از این مخاطرات، مسئله نشست سطح زمین و تأثیر آن بر ساختمان‌های سطحی و سازه‌ها و تأسیسات زیرسطحی است که این امر به خصوص در هنگام عبور تونل از زیر مناطق مسکونی و بافت قدیمی شهرها اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر در پروژه‌های مختلف قطار شهری از دستگاه‌های حفاری مکانیزه TBM جهت حفر تونل در انواع و ابعاد مختلف استفاده شده و با توجه به اهمیت این موضوع که قبلاً اشاره گردید، لازم است تا ارزیابی اولیه صحیح و کاملی از میزان نشست زمین به عمل آید. عوامل مختلفی می‌توانند بر میزان نشست زمین تأثیرگذار باشند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، قطر و عمق تونل، سازه‌های بالای محیط حفاری، سطح آب‌های زیرزمینی و ... اشاره نمود. ضریب فشار جانبی خاک (K_0) یکی از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک است که ارتباط تنگاتنگی با زاویه اصطکاک داخلی خاک و یکسری عوامل دیگر داشته و به‌عنوان یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در طراحی انواع سازه‌ها به‌ویژه سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها موردتوجه است. در مطالعه حاضر میزان تغییرات پارامتر ضریب فشار جانبی خاک (K_0) در مسیر تونل خط دو مترو تبریز موردبررسی قرار گرفته و تأثیر آن بر نشست زمین در اثر حفر تونل مذکور موردتوجه قرار گرفته است. در دسترس بودن و

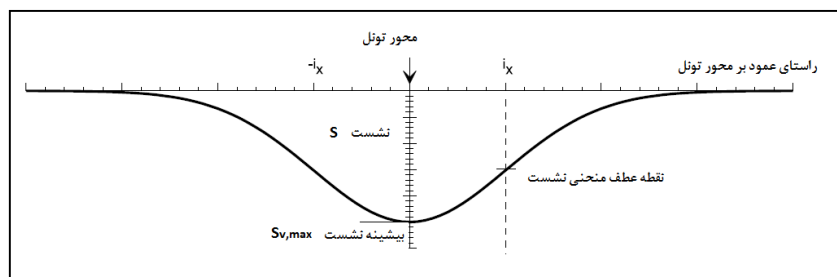
استفاده از نشست‌های واقعی زمین مربوط به پروژه خط ۲ مترو تبریز یکی از جنبه‌های نوآوری و نقاط قوت مطالعه حاضر است. استفاده از نشست‌های واقعی صحت سنجی و کنترل نتایج حاصل از روش‌های مختلف به‌ویژه مدل‌سازی عددی را امکان‌پذیر نموده و حصول اطمینان لازم در این خصوص را در پی خواهد داشت. با توجه به این موضوع، در مطالعه حاضر سعی شده است تا با استفاده از این اطلاعات ارزشمند، صحت سنجی کامل و دقیقی بر روی عملکرد روش عددی (FLAC 2D) انجام گیرد.

۲- پیشینه مطالعات در ارتباط با نشست زمین در اثر حفر تونل

با توجه به اهمیت موضوع و تأثیرات اساسی که پدیده "نشست زمین در اثر حفر تونل" می‌تواند بر زندگی روزمره انسان‌ها داشته باشد، مطالعات نسبتاً فراوانی در ارتباط با این پدیده صورت گرفته است. یکی از اولین و اساسی‌ترین بررسی‌ها در ارتباط با نشست زمین ناشی از حفر تونل، توسط پک (Peck) در سال ۱۹۶۹ انجام شد [۱]. او یک گزارش مدون حاوی جمع‌آوری کلی عملیات اجرایی تونل در زمین‌های نرم تا آن زمان ارائه نموده و نشان داد که منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل دارای توزیع نرمال است (شکل ۱) و یک رابطه به‌صورت زیر برای پروفیل نشست سطحی ارائه کرده است:

$$S_v(y) = S_{vmax} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{2i_x^2}\right] \quad (1)$$

این رابطه پایه تئوری ندارد و به علت شباهت آن به شکل منحنی توزیع نرمال به‌صورت فوق پیشنهاد شده است. در رابطه (۱) دو پارامتر i_x و S_{vmax} دارای نقش تعیین‌کننده می‌باشند و تحقیقات بسیاری جهت تعیین این مقادیر صورت گرفته و پیشنهادهای گوناگونی به‌منظور محاسبه مقدار آن‌ها داده شده است.



شکل ۱: منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل

در ارتباط با تأثیرپذیری این پارامتر از نوع خاک به‌طور کلی می‌توان عنوان کرد که مقدار این پارامتر در خاک‌های ماسه‌ای بیشتر از خاک‌های چسبنده بوده و در نتیجه نشست حداکثر معمولاً در خاک‌های غیر چسبنده بیشتر است.

از جمله کارهای دیگر در خصوص موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل می‌توان به تحقیقات آتول و وودمن، ۱۹۸۲ [۶]، آتول و همکاران ۱۹۸۶ [۷]، میر و تیلور، ۱۹۹۷ [۸] و... که همگی در جهت تأیید و تکمیل کارهای پک بوده است، اشاره کرد. به‌عبارت‌دیگر مفاهیم و رابطه ارائه‌شده از سوی این محقق با وجود قدیمی بودن اما زیربنای همه کارهای بعدی در این خصوص بوده و در تمام مطالعات مربوط به نشست زمین در اثر حفر تونل به این رابطه ارجاع داده می‌شود. این سخن بدان معناست که مطالعات وسیعی در ارتباط با موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل از جنبه‌های مختلف و با استفاده از روش‌های گوناگون اعم از نیمه تجربی، تحلیلی، عددی، شبکه عصب مصنوعی و مدل‌سازی فیزیکی صورت گرفته است که با توجه به تنوع بالا و گستردگی زیاد این مطالعات، عملاً نام بردن از همه آنها در این مقاله مقدور نیست. بخشی از این مطالعات توسط باغبان گل پسند ۱۳۹۴ مورد بررسی قرار گرفته است [۹]. در مطالعه حاضر با توجه به ارتباط موضوعی و همچنین پروژه مورد مطالعه، به تعدادی از آنها اشاره خواهد شد. به‌عنوان نکته پایانی در این بخش، همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره گردید، در مطالعات مربوط به نشست زمین در اثر حفر تونل، در دسترس بودن و استناد به نشست‌های واقعی زمین که در حین حفاری اندازه‌گیری می‌شوند، با توجه به فراهم شدن امکان صحت سنجی نتایج حاصل از روش‌های دیگر ارزیابی نشست اعم از تحلیلی، عددی و... به‌عنوان نقطه قوت قلمداد می‌شود.

۲-۱- بررسی تأثیر فشار جانبی خاک بر نشست زمین در اثر حفر تونل

اگر یک توده خاک در عمق h از زمین با چگالی γ در نظر گرفته شود، تنش‌های قائم و افقی ایجادشده بر این توده را می‌توان بر اساس روابط (۴) و (۵) محاسبه نمود.

$$\sigma_v = \gamma \cdot h \quad (4)$$

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v \quad \text{یا} \quad \sigma_h = K_0 \cdot \gamma \cdot h \quad (5)$$

در این رابطه i_x نشان‌دهنده فاصله افقی نقطه عطف منحنی از مرکز تونل بوده و از نظر ریاضی، در هر دو طرف خط مرکزی تونل واقع شده است. مقدار i_x با توجه به خواص منحنی احتمال مال با انحراف استاندارد، برابر با $6\sigma_{max}$ است. وابط مختلفی به‌منظور محاسبه i_x ارائه‌شده است که یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین آنها رابطه‌ای است که آرلیلی و نیو، ۱۹۸۲ به‌صورت رابطه (۲) ارائه کرده‌اند [۲]:

$$i_x = k \cdot z_0 \quad (2)$$

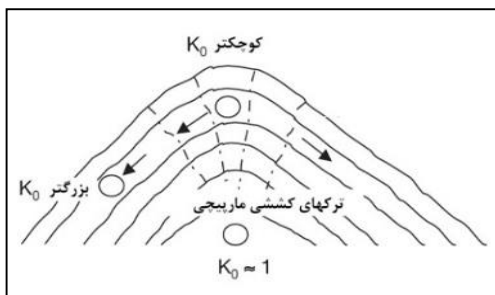
که در این رابطه k پارامتر بی‌بعد و مرتبط با شکل گودی نشست (وابسته به نوع خاک) و z_0 عمق محور تونل است.

در ارتباط با مقدار عددی این پارامتر، آرلیلی و نیو، ۱۹۸۲ مقدار k را به نوع خاک نسبت دادند و برای خاک‌های رسی مقدار 0.5 و برای خاک ماسه‌ای غیر چسبنده مقدار 0.3 را پیشنهاد نمودند [۲]. رانکین، ۱۹۸۸ بر اساس مطالعات دیگری که بر روی اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در تونل‌هایی در انگلستان و دیگر نقاط جهان انجام داد و با ترسیم مقدار i_x در مقابل z_0 به این نتیجه رسید که مقدار $k = 0.5$ برای اغلب اندازه‌گیری‌های مذکور، مقداری مناسب است [۳]. لازم به ذکر است که پارامتر k ذکرشده در رابطه (۲) متفاوت از پارامتر K_0 (ضریب فشار جانبی خاک) بوده و نبایستی با آن اشتباه گرفته شود. پارامتر مهم دیگر در رابطه (۱)، پارامتر نشست حداکثر زمین است که با علامت S_{vmax} نشان داده شده است. رابطه (۳) برای محاسبه حداکثر نشست سطحی ارائه شده است. این رابطه توسط میر و همکاران، ۱۹۹۳ ارائه گردیده است [۴].

$$S_{vmax} = 0.313V_L(D^2/i) \quad (3)$$

که در این رابطه D قطر تونل و V_L حجم ازدست‌رفته (Volume Loess) زمین است که به شکل درصدی از حجم حفاری بیان می‌شود. مطالعات زیادی جهت تعیین مقدار V_L انجام گرفته است. در واقع می‌توان گفت که اکثر افرادی که در ارتباط با موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل مطالعاتی انجام داده‌اند، در مورد مقدار پارامتر V_L نیز برآوردهایی کرده و پیشنهادهایی به‌عنوان مقدار این پارامتر ارائه نموده‌اند که در بازه 0.2 درصد تا 2 درصد بوده‌اند [۵].

داده شده است. در این شرایط با در نظر گرفتن وضعیت توپوگرافی محدوده و مقادیر تنش‌های افقی و قائم می‌توان به سادگی مشاهده نمود که تنش‌های افقی بیشتر از تنش‌های قائم شده ($\sigma_h > \sigma_v$) و در نتیجه $K_0 > 1$ خواهد شد. این حالت را می‌توان برای شرایطی در نظر گرفت که تونلی در مجاورت یک سازه بزرگ که بار قائم قابل توجهی را به زمین اعمال می‌کند، در حال حفاری است. در این شرایط نیز تنش‌های افقی از تنش‌های قائم فراتر خواهد رفت و وضعیت $K_0 > 1$ برقرار خواهد شد [۱۰].



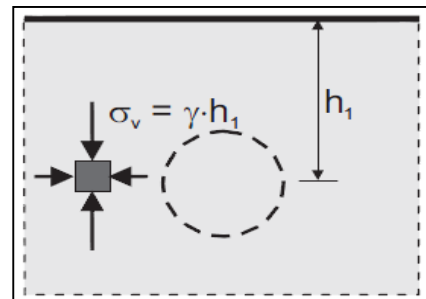
شکل ۳: شرایط ایجاد $K_0 > 1$ [۹].

از این بحث می‌توان نتیجه گرفت که K_0 می‌تواند مقادیر کمتر و بیشتر از یک را دارا باشد و در تحلیل‌های مربوط به پایداری تونل و بارهای وارده بر پوشش بتنی آن، نشست زمین در اثر حفر تونل و... لازم است تا مقادیر متنوعی از پارامتر K_0 در نظر گرفته شود. مطالعات زیادی در ارتباط با تأثیر مقدار K_0 بر نشست زمین در اثر حفر تونل انجام شده است که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

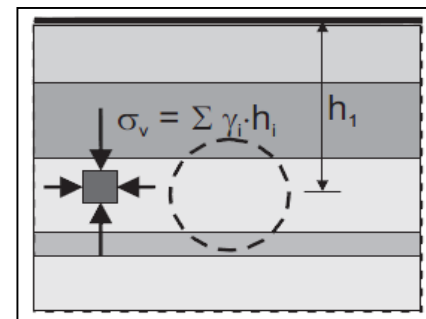
جون، ۱۹۹۳ با مدل‌سازی حفر تونل در رس لندن (London Clay) مقدار $K_0=1$ را در نظر گرفته و تحلیل‌ها را به صورت دوبعدی انجام داده است. در این تحقیق با وجود اینکه خصوصیات فنی و مهندسی خاک مشابه با نتایج مطالعات قبلی (انجام شده بر روی رس لندن) در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، اما منحنی گودی نشست بازتر و پهن‌تری نسبت به شرایط عادی، در مقایسه با نمودار توزیع نرمال، حاصل شده است [۱۰].

آدنبروک و همکاران، ۱۹۹۷ در تحلیل دوبعدی خود بر روی مصالح ریزدانه با استفاده از مقادیر $K_0=1.5$ مقدار گودی عریضی را حاصل کردند که قدری با شرایط طبیعی مغایرت نشان می‌داد. از جمله نتایج دیگر مطالعات ایشان این بود که در حالت کلی تحلیل تونل یک پدیده سه‌بعدی

که در این روابط K_0 به عنوان ضریب فشار جانبی خاک و یا نسبت تنش‌های افقی به قائم نامیده می‌شود. در حالت کلی تنش‌های اولیه و به ویژه نسبت تنش‌های افقی به قائم یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل در طراحی فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌ها است. در بحث تونل و بارهای وارد بر پوشش بتنی آن و با در نظر گرفتن همه شرایط محتمل از نظر ژئوتکنیکی، توپوگرافی و وضعیت بارگذاری در محدوده مورد مطالعه (از نظر نوع سازه‌های سطحی و زیرزمینی)، حالات مختلفی می‌توانند در نظر گرفته شوند. انواع حالات محتمل در این خصوص در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده است. ساده‌ترین حالت مربوط به حالتی است که زمین افقی بوده و سازه‌ای روی آن احداث نشده باشد. این حالت به صورت شماتیک در شکل (۲ الف) نشان داده شده است. در این حالت مقادیر تنش‌های قائم و افقی و همچنین مقدار K_0 از روابط فوق قابل محاسبه هستند. در صورتی که لایه‌بندی در مصالح مشاهده گردد، مقدار تنش قائم از رابطه $\sigma_v = \sum \gamma_i \cdot h_i$ محاسبه می‌گردد. این حالت نیز در شکل (۲ ب) نشان داده شده است. در هر دو حالت نشان داده شده در شکل ۲ معمولاً تنش افقی کوچک‌تر بوده و در نتیجه رابطه $K_0 < 1$ برقرار است.



(الف)



(ب)

شکل ۲: تعیین نسبت تنش‌های افقی به قائم در حالت‌های

مختلف [۹].

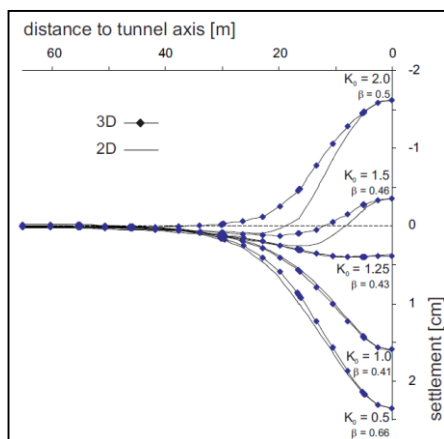
اکنون حالتی را در نظر می‌گیریم که تونل در یک محدوده شیب‌دار حفاری گردد. این حالت در شکل ۳ نشان

باغبان گل پسند و همکاران ۲۰۱۸، با مطالعه مقادیر نشست زمین در اثر حفر تونل خط هفت مترو تهران (قطعه شرقی-غربی) و تونل ابوذر به بررسی تأثیر مقدار K_0 بر آن با استفاده از مدل‌سازی عددی (FLAC 3D) پرداخته و نتیجه‌گیری کردند که با افزایش مقدار K_0 ، میزان نشست زمین در اثر حفر تونل کاهش می‌یابد و میزان کاهش فوق از یک رابطه نمایی تبعیت می‌کند (رابطه ۶) و در ضمن عمق و قطر تونل نیز بر میزان باز یا بسته بودن منحنی‌های گودی نشست در مقطع عرضی تأثیر دارد [۱۵]. همچنین در این تحقیق رابطه تجربی جهت نشان دادن ارتباط بین نشست حداکثر زمین در اثر حفر تونل و پارامتر K_0 به شرح زیر پیشنهاد گردید:

$$S_{v \max} = Ae^{-BK_0} \quad (6)$$

که در این رابطه پارامترهای A و B ضرایب تجربی هستند که به نوع خاک و ویژگی‌های هندسی تونل مانند قطر و عمق آن بستگی دارند. مقادیر به دست آمده برای این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است.

هانگ و همکاران، ۲۰۱۹ با بررسی فازهای مختلف ایجاد شده در پدیده فروریزش در زمین‌های متشکل از قلوه‌سنگ‌های ماسه‌ای در اثر حفر تونل مکانیزه و تأثیر فشار جبهه کار بر روی آن، ضمن تشریح تأثیر پارامتر ضریب فشار جانبی خاک بر مکانیسم این پدیده، دریافتند که این پارامتر در ارتباط با قوس زدگی (Arching) در خاک با توجه به حفر تونل بوده و به علت وقوع این مسئله، مقدار ضریب فشار جانبی خاک در بخشی از خاک که دچار قوس زدگی شده است بیشتر از مقدار آن در زون تحت حفاری است [۱۶].



شکل ۴: نشست‌های حاصل از اعمال مقادیر مختلف K_0 در مقطع عرضی [۱۴].

است و با استفاده از تحلیل‌های سه‌بعدی مقادیر واقعی‌تری به دست می‌آید [۱۱].

دولزالوف، ۲۰۰۲ نتایج تحلیل عددی را با مقادیر اندازه‌گیری شده از نشست واقعی زمین در اثر حفاری تونل در شهر براگ مقایسه نموده و با لحاظ کردن مقادیر متفاوت K_0 از 0.5 تا 1.5 چنین نتیجه‌گیری کرد که مقادیر $K_0=0.5$ نتایج رضایت بخشی را در خصوص شکل گودی نشست اندازه‌گیری شده ارائه می‌کنند و در ضمن تحلیل‌های 2D و 3D اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهند [۱۲].

فرانزیوس و همکاران ۲۰۰۵ در تحقیقات خود تأثیرات آنیزوتروپی و همچنین پارامتر K_0 را بر میزان نشست زمین در اثر حفر تونل به صورت توأم مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه از برنامه کامپیوتری ICFEP (Imperial College Finite Element Program) استفاده شده است که مبتنی بر روش اجزای محدود (FEM) بوده و قابلیت تحلیل به صورت دوبعدی و سه‌بعدی را دارا است. در این تحلیل حفاری گام‌به‌گام توسط نرم‌افزار مدل شده و نصب پوشش بتنی توسط برنامه فوق لحاظ شده است [۱۳]. مسئله مهم در ارتباط با مطالعه فوق استفاده از مقادیر متفاوت K_0 و اجرای برنامه با این مقادیر و نتیجه‌گیری مقادیر مختلف از آن است. نتایج حاصله نشان‌دهنده این است که در مقدار $K_0=1.5$ جابجایی قائم کمتری نسبت به شرایط $K_0=0.5$ حاصل شده است.

در تحقیق جامعی که توسط مولر، ۲۰۰۶ انجام گرفته است، مدل‌سازی تونل جهت بررسی تأثیر K_0 بر نشست زمین در اثر حفر تونل انجام گرفته است [۱۴]. در این تحقیق از برنامه المان محدود Plaxis هم به صورت دوبعدی و هم به صورت سه‌بعدی استفاده شده و مدل‌سازی بر اساس نوع مصالح میزبان تونل و شرایط ژئوتکنیکی حاکم بر محدوده تونل صورت گرفته و حفاری مرحله‌به‌مرحله لحاظ شده است. نکته مهم در این ارتباط استفاده از مقادیر متنوعی از پارامتر نسبت تنش افقی به تنش قائم بوده و مدل‌سازی با مقادیر 0.5, 1, 1.25, 1.5, 2 انجام گرفته است. بررسی نتایج نشان داد که در حالت کلی با افزایش مقدار K_0 ، نشست زمین کاهش پیدا کرده و حتی در مقادیر $K_0=1.5$ و $K_0=2$ به جای نشست، بالا زدگی (Heave) حاصل شده است (شکل ۴).

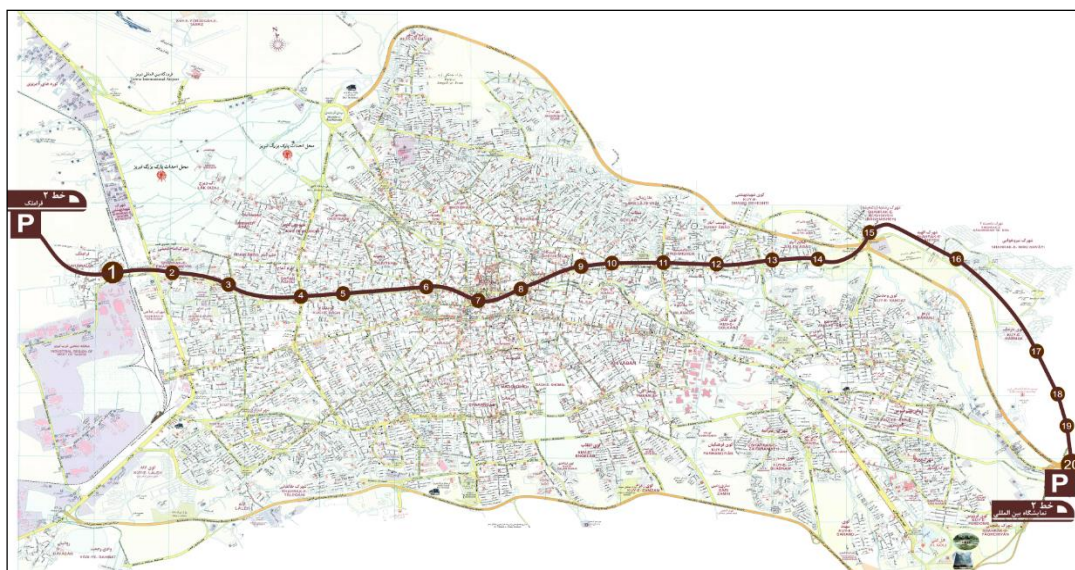
غرب تبریز آغاز شروع شده و بعد از گذشتن از خیابان‌های قره‌آغاج، جمهوری، میدان دانشسرا، خیابان عباسی به اتوبان پاسداران و منطقه باغمیشه رسیده و تا محدوده نمایشگاه بین‌المللی در شرق تبریز ادامه می‌یابد. خط ۲ قطار شهری تبریز دارای ۲۰ ایستگاه بوده که به ترتیب با حروف لاتین از ایستگاه S01 تا ایستگاه S20 نام‌گذاری شده است. در شکل ۵ مسیر کریدور خط ۲ قطار شهری تبریز نشان داده شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای A و B

B	A	نسبت $(\frac{C}{D})$ روباره به قطر	D قطر تونل (متر)	تونل
۱,۲۱	۱۵,۲۸	۱,۲۱	۴,۲	ابوذر
۳,۸۷	۹۹,۲۳	۲,۳۴	۹,۱۶	خط هفت تهران

۳- موقعیت جغرافیایی طرح

طبق طرح مصوب، طول خط دو قطار شهری تبریز در حدود ۲۲/۵ کیلومتر بوده که از منطقه قراملک واقع در



شکل ۵: مسیر کریدور خط دو قطار شهری تبریز به همراه موقعیت محدوده مورد مطالعه

صورت گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از حفاری گمانه‌های مذکور و لاگ آنها و همچنین با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی، نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل ترسیم شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جهت مشاهده واضح‌تر واحدها و مرز بین آنها و موارد دیگر، این نیمرخ تنها در محدوده مورد مطالعه ارائه گردیده است. این محدوده مابین ایستگاه‌های S01 و S02 در فاصله متراژ ۳۵۰۰ تا ۳۸۰۰ واقع شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود از نظر زمین‌شناسی مهندسی تعداد ۴ واحد خاکی در مصالح این محدوده تفکیک شده است که در ادامه، توضیحات مختصری در این ارتباط ارائه می‌شود.

۴-۱- تفکیک واحدهای خاکی

بر اساس پیشنهاد انجمن بین‌المللی تونل ITA، ۲۰۰۰ [۱۷] و کمیته سازه‌های زیرزمینی آلمان DAUB، ۱۹۹۷

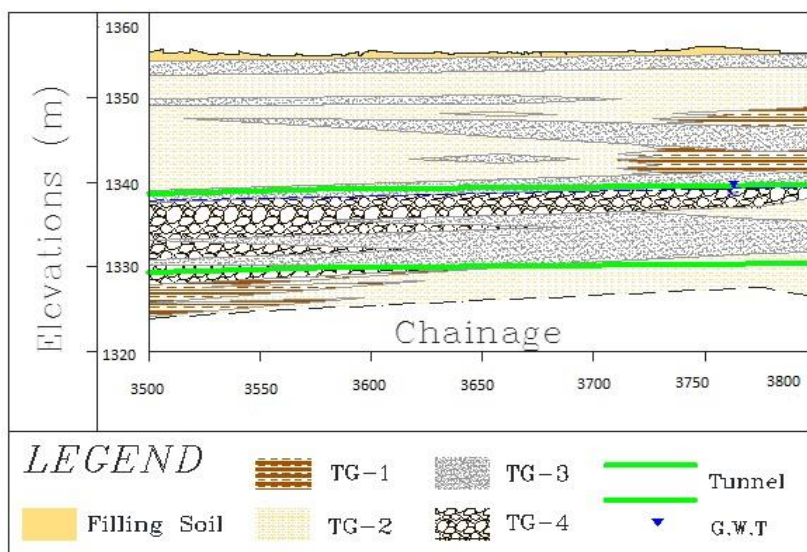
۴-۲ زمین‌شناسی و ژئوتکنیک

محدوده دشت تبریز عموماً توسط رسوبات آبرفتی سخت نشده پوشیده شده است. نهشته شدن رسوبات دشت حاصل فرسایش ارتفاعات اطراف و حمل آنها توسط جریان‌های رودخانه‌ها و مخروط افکنه‌ها به سمت داخل دشت است. با توجه به شیب عمومی رودخانه‌ها به سمت غرب، با فاصله گرفتن از ارتفاعات، ابعاد و اندازه ذرات کاهش می‌یابد. با توجه به مطالعات سطح آب زیرزمینی در اعماق ۱۲ تا ۱۷ متر متغیر است. جهت انجام مطالعات ژئوتکنیک در محدوده مورد مطالعه که در شکل ۵ با دایره‌ای مشخص گردیده است، تعدادی گمانه و چاهک دستی به عمق ۱۵ تا ۳۵ متر حفر گردیده است. در همه گمانه‌ها به منظور بررسی وضعیت لایه‌ها و مقاومت زمین آزمایش‌های صحرایی و همچنین نمونه‌برداری دست‌نخورده (شلیبی یا موم اندود) و دست‌خورده مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی

روباره تونل اغلب شامل واحد TG-2 و TG-3 است. در جدول ۴ خصوصیات ژئوتکنیک واحدهای مذکور درج گردیده است.

در این ارتباط ذکر این نکته ضروری است که تفکیک واحدهای خاکی روشی مناسب و مفید جهت تحلیل رفتار خاک در هنگام حفر مکانیزه تونل، پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی، مدل‌سازی عددی جهت برآورد مقدار نشست زمین و بسیاری دیگر از مباحث مرتبط با این موضوعات است و نخستین بار توسط مارینوس و همکاران در سال ۲۰۰۹ برای مصالح موجود در مسیر مترو آتن صورت گرفته است [۱۹]. در ارتباط با پروژه‌های داخلی نیز این روش در مطالعات مرتبط با بسیاری از پروژه‌های تونل‌های شهری که به روش حفاری مکانیزه اجرا شده‌اند، مورداستفاده قرار گرفته است که از جمله می‌توان به مطالعات باغبان گل پسند و همکاران [۲۰]، طریق ازلی و همکاران [۲۱] و حسینی و همکاران [۲۲] ۱۳۹۷ اشاره نمود.

[۱۸] یکی از مهم‌ترین عوامل برای تفکیک واحدهای خاکی، درصد ذرات ریزدانه (رد شده از الک ۲۰۰) است. در این مطالعه نیز به منظور تفکیک واحدهای خاکی، درصد رد شده از الک ۲۰۰ به عنوان مبنای اصلی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن این عامل و عوامل دیگری مانند ویژگی‌های مکانیکی، رفتار چسبناکی (برای ذرات ریزدانه) و نفوذپذیری (برای خاک‌های دانه‌ای)، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه به چهار واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی (Engineering geological Type) با اسامی TG-1 تا TG-4 تفکیک شده‌اند. این واحدها در شکل ۶ و جدول ۲ معرفی گردیده‌اند. در جدول ۳ خصوصیات ژئوتکنیک واحدهای خاکی مذکور شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی (در هر دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده)، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و چگالی خشک ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، مسیر تونل عمدتاً در واحدهای TG-3 و TG-4 جانمایی شده است اما



شکل ۶: نیم‌رخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه [۲۳].

جدول ۲: مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک‌شده در مسیر تونل [۲۴].

TG-4	TG-3	TG-2	TG-1	واحد زمین‌شناسی مهندسی
شن ماسه‌ای یا ماسه‌شنی به همراه مقداری رس یا سیلت	ماسه دارای رس و سیلت فراوان همراه با کمی شن	سیلت رس دار یا رس سیلت دار همراه با شن و ماسه	رس سیلت دار یا سیلت رس دار همراه با مقداری ماسه	توصیف خاک
کمتر از ۲۵ درصد	۲۵-۵۰	۵۰-۷۵	بیشتر از ۷۵ درصد	رد شده از الک ۲۰۰ (درصد)
GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP	SC, SC-SM & GC	CL, ML & CL-ML	CL, ML & CL-ML (rarely CH)	نوع خاک (USCS)

جدول ۳: مشخصات ژئوتکنیک واحدهای خاکی [۲۴].

Unit	C (kPa)	C _{cu} (kPa)	Φ (degree)	Φ _{cu} (degree)	E (MPa)	v	γ _d (kN/m ³)
Fill	۲-۵	۵-۱۰	۲۰-۲۲	۵-۷	۱۰-۱۴	۰٫۳۵	۱۵-۱۶
TG-1	۱۰-۲۰	۴۰-۷۰	۱۹-۲۳	۰-۵	۱۵-۲۵	۰٫۳۵	۱۵٫۷-۱۶٫۵
TG-2	۷-۱۵	۳۰-۴۰	۲۱-۲۷	۰-۵	۲۵-۳۵	۰٫۳۳	۱۶٫۵-۱۷
TG-3	۳-۹	۸-۱۵	۲۸-۳۲	۲۸-۳۰	۳۰-۴۰	۰٫۳۱	۱۵٫۴-۱۷٫۵
TG-4	۲-۷	۶-۱۲	۲۳-۳۶	۳۰-۳۲	۴۵-۵۵	۰٫۳	۱۶٫۸-۱۷٫۶

۵- حفاری مکانیزه و مشخصات سپر

سپر مورد استفاده در این مطالعه، سپر مخروطی با مفصل پسیو و به طول ۱۰ متر است. سپر ماشین به گونه‌ای طراحی شده که امکان عبور از قوس‌هایی با شعاع ۲۵۰ متر را داشته باشد. در شکل ۷ نمایی از کاترهد این دستگاه (در زمان ورود به یکی از ایستگاه‌ها) و در جدول ۴ مشخصات فنی این دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۷: کاترهد دستگاه TBM استفاده شده در حفاری تونل خط دو مترو تبریز (تهیه شده در زمان ورود دستگاه TBM به ایستگاه)

جدول ۴: مشخصات کلی دستگاه

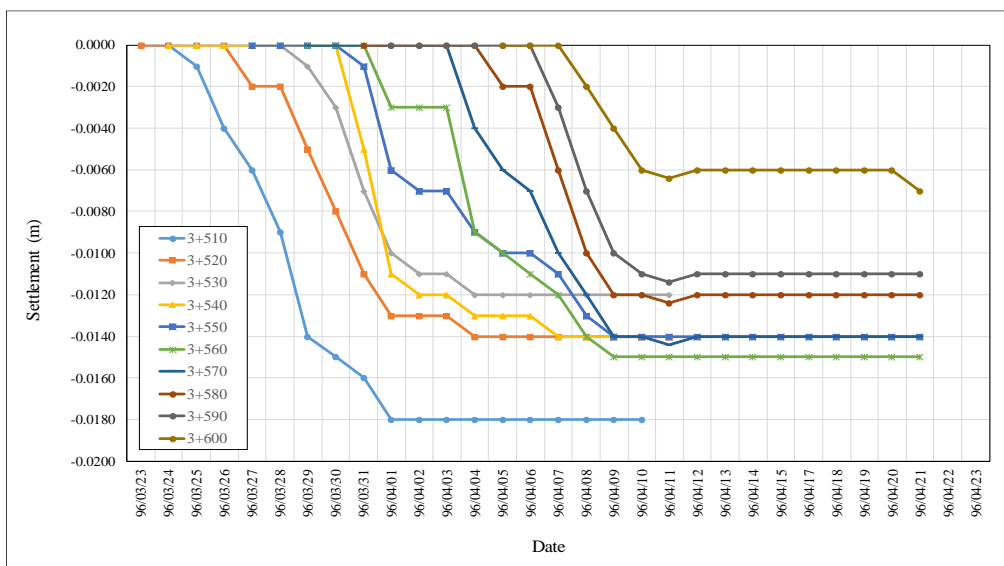
مقدار	مشخصه
EPB	نوع TBM
۹۴۹۰	قطر حفاری (mm)
۹۴۶۸	قطر سپر (mm)
جلویی	
۹۴۵۶	میان‌ی
۹۴۴۴	انتهایی
۶٫۸۲	حجم فضای خالی پشت سگمنت (مترمکعب)
۱۵٫۵	ضخامت گروت پشت سگمنت (Cm)
۱۰	طول سپر (m)
۸۱۰	وزن سپر (تن)
۱۰۰	طول تقریبی کل دستگاه (m)

۶- نشست‌های واقعی (اندازه‌گیری شده)

در مطالعه حاضر هم‌زمان با حفاری تونل مقدار نشست ایجاد شده در زمین اندازه‌گیری و ثبت شده است. در این راستا بر اساس توصیه‌های دانیلیف و گرین، ۱۹۹۳ [۲۵] نقاطی بر روی زمین مشخص شده و میزان جابجایی قائم آنها با استفاده از ابزارهای دقیق و روش‌های نقشه‌برداری اندازه‌گیری شده است. نام نقاط بر اساس متر از تونل در آن نقطه انتخاب و در جداول و نمودارها درج شده است. پس از اتمام عملیات حفاری و اندازه‌گیری میزان جابجایی قائم (Leveling)، مقدار نشست نهائی (S_{vmax}) هر کدام از نقاط فوق ثبت و به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نقاط مورد نظر در یک محدوده ۳۰۰ متری (حداصل متر از ۳۵۰۰ تا ۳۸۰۰) در نظر گرفته شده و مقادیر نشست اندازه‌گیری شده در این فاصله در محدوده مورد مطالعه در بازه ۱۲ تا ۱۹ میلی‌متر هستند که به عنوان نشست‌های عادی زمین در نقاط مزبور تلقی می‌شوند. با توجه به عوامل فنی و اجرایی متعددی که می‌توانند بر نشست زمین تأثیرگذار باشند، این طیف مقادیر نشست، طبیعی و قابل قبول تلقی می‌شود. در شکل ۹ میزان نشست‌های روزانه هر کدام از نقاط مورد نظر در بازه زمانی نشست سنجی (که در شرایط عادی ۲۰ الی ۳۰ روز به طول انجامیده است)، به عنوان نمونه نشان داده شده است. شایان ذکر است که در مطالعات حاضر با توجه به محدودیت‌های موجود، تنها پارامتر نشست حداکثر (S_{vmax}) ایجاد شده در سطح زمین (اندازه‌گیری شده دقیقاً در بالای محور تونل) مورد سنجش و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۸: مقادیر نشست واقعی اندازه گیری شده در محدوده مورد مطالعه (متر از ۳۵۰۰ تا ۳۸۰۰)



شکل ۹: نمودار نشست های روزانه نقاط ۳۵۱۰ تا ۳۶۰۰ در بازه زمانی نشست سنجی

۷- مدل سازی عددی

با توجه به عدم قطعیت های موجود در فرموله کردن راه حل های تحلیلی، روش های عددی به طور فزاینده ای در مسائل مکانیک خاک و سنگ استفاده شده است. در این تحقیق روش تفاضل محدود FDM مورد استفاده قرار گرفته و نرم افزار انتخاب شده برای این منظور نرم افزار FLAC 2D است. مطالعات نسبتاً زیادی در ارتباط با روش های مدل سازی تونل های خاکی انجام شده و پیشنهادهایی در این خصوص ارائه شده است. در مطالعه حاضر جهت مدل سازی تونل روش ها و توصیه های پیشنهادی ظاهری و همکاران [۲۶ و ۲۷]، نعمت الهی و همکاران [۲۸ و ۲۹] و موسی زاده و همکاران [۳۰] مدنظر بوده است.

لازم به ذکر است که اثر حفر تونل بر نشست سطحی و سازه های مجاور یک مسئله سه بعدی است که تحلیل عددی سه بعدی کامل آن اغلب به امکانات محاسباتی (حافظه و زمان) فراوان نیاز دارد. از این رو معمولاً با رعایت

اصول مربوطه حفر تونل به صورت دوبعدی شبیه سازی عددی می شود. در این نوع تحلیل با در نظر گرفتن فرض کرنش صفحه ای، از روش های گپ، همگرایی- محدودیت، کاهش صلبیت (نرم شوندگی)، روش کنترل افت حجم و ... برای در نظر گرفتن تأثیرات سه بعدی مسئله استفاده می شود. در مدل سازی حاضر از روش گپ استفاده شده است و در این راستا توصیه ها و روش های به کاررفته توسط باغبان گل پسند و همکاران [۳۱]، دو و همکاران [۳۲] و ژو و همکاران [۳۳] مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اصول مدل سازی عددی و هم چنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدل سازی عددی با این برنامه مطابق با روندی است که در ادامه مورد توجه قرار می گیرد.

۷-۱- روند مدل سازی عددی

شبکه بندی و ایجاد تونل و زمین اطراف آن، اولین گام در ایجاد هندسه مدل است. ابعاد مدل ساخته شده برای این منطقه در راستای طولی (راستای X) برابر ۹۰ متر، در

منطقی و قابل قبولی ارائه می‌دهد. بر اساس نوع مصالح میزبان تونل در مدل‌سازی تونل‌های مورد مطالعه، برای تحلیل رفتار زمین از مدل موهر-کلمب استفاده شده است. لازم به ذکر است که علاوه بر این مدل، مدل‌های رفتاری دیگری مانند Cam Clay نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند اما به علت در دسترس نبودن پارامترهای مورد نیاز، از مدل موهر-کولمب استفاده شده است.

- ایجاد تعادل اولیه

بعد از ساخت هندسه مدل، تعریف مدل رفتاری و تخصیص خواص به مواد، تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه به مدل، مدل اجرا شده بایستی به حالت تعادل برسد. در شکل ۹ مقدار تنش‌های برجا در جهت Y و در شکل ۱۰ وضعیت نیروهای نامتعادل کننده پس از حصول تعادل اولیه نشان داده شده است که این نمودار نشان‌دهنده به تعادل رسیدن مدل است.

- حفاری تونل

بعد از حصول اطمینان از تعادل اولیه، نوبت به حفر تونل و ارزیابی میزان جابجایی‌های رخ داده می‌رسد. حفاری به صورت برداشتن (حذف) مصالح خاکی محدوده تونل انجام گرفته و پس از حفر تونل، به دیواره‌ها اجازه داده می‌شود تا به میزان مشخصی به داخل تونل جمع شوند. مقدار جابجایی دیواره به میزانی در نظر گرفته می‌شود که برابر با اختلاف قطر کاترهد و سپر باشد. سپس نصب پوشش بتنی به دیواره داخلی تونل انجام گرفته و اجازه داده می‌شود تا مدل دوباره به تعادل برسد و جابجایی بخش‌های مختلف مشخص شوند. در مطالعه حاضر جهت شبیه‌سازی پوشش بتنی تونل نقطه (node) های مورد نظر انتخاب گردیده و سپس از المان‌های beam به عنوان پوشش بتنی تونل استفاده شده است. در شکل ۱۱ بازه‌های رنگی معرف جابجایی در جهت Y در بخش‌های مختلف مدل (محدوده تونل و سطح زمین) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نشست در سطح زمین ناشی از حفر تونل خط ۲ مترو تبریز در بازه معرف جابجایی به میزان $S_{max} = 1\text{cm} \sim 2\text{cm}$ به دست آمده است. در شکل ۱۲ روند جابجایی نقطه‌ای که دقیقاً در بالای محور تونل و در سطح زمین انتخاب گردیده است، نشان داده می‌شود. ملاحظه می‌شود که حداکثر جابجایی در جهت قائم در نقطه مذکور در حدود ۱/۷۵ سانتی‌متر به دست آمده است. با توجه به اینکه مسئله مورد بحث در این مقاله نشست زمین است، لذا

راستای قائم (راستای Y) برابر ۴۵ متر است. در شکل ۸ نمایی از هندسه مدل ساخته شده نشان داده شده است. در این مدل تونل به قطر ۹/۴۹ متر مدل‌سازی شده است. در مطالعه حاضر از المان‌های حجمی عادی برای مدل‌سازی خاک استفاده شده و همچنین برای اندازه‌گیری دقیق‌تر میزان نشست از المان‌های کوچک‌تری با ابعاد $125 * 125$ میلی‌متر در اطراف تونل استفاده شده است. جهت اعمال شرایط مرزی به غیر از مرز بالایی مدل‌ها، سایر مرزها در نقاط مرزی ثابت شدند. بدین ترتیب که جابجایی افقی نقاط واقع بر مرزهای سمت چپ و راست در راستای محور X و همچنین جابجایی نقاط بر مرز پایینی مدل در راستای قائم با آنچه گفته شده صفر شد. برای محاسبه تنش ثقلی در مقطعی که تونل در زیر سطح ایستایی حفاری می‌شود، از وزن مخصوص اشباع (بر اساس پیش‌فرض‌های برنامه FLAC) و در بالای آن از وزن مخصوص خشک استفاده گردیده است. با توجه به استفاده از ماشین EPB برای حفاری تونل تحت مطالعه، این ماشین از هرگونه ورود آب به تونل در سینه کار جلوگیری می‌کند. همچنین تزریق دوغاب و استفاده از آب‌بندی‌های جاذب آب در هنگام نصب کردن سگمنت‌های بتنی، مانع از ورود آب به تونل می‌شود. لذا حالت جریان آب در مدل‌سازی منظور نشده است. به منظور بررسی بهینه و نزدیک کردن هر چه بیشتر شرایط مدل ساخته شده به شرایط واقعی زمین میزبان 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 ۲۰ کیلو پاسکال فرض می‌شود. این بار به صورت بار گسترده یکنواخت در طراحی مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

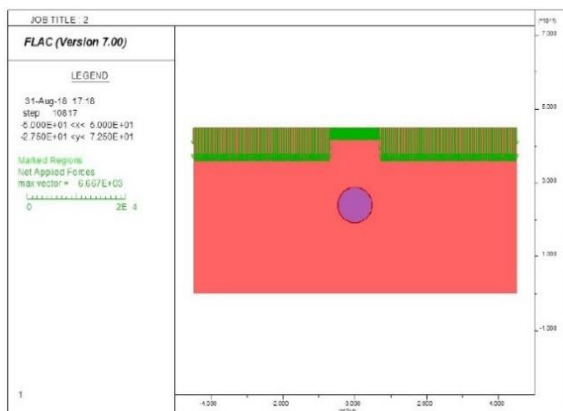
- مدل رفتاری

در این مطالعه از مدل رفتاری موهر-کولمب به عنوان مدل رفتار مصالح خاکی استفاده شده است. این مدل برای موادی به کار می‌رود که تحت بارگذاری ابتدا تغییر شکل الاستیک از خود نشان داده و سپس وارد مرحله تغییر شکل پلاستیک می‌شوند. این مدل پرکاربردترین مدل در مطالعات علوم مهندسی زمین است و می‌تواند در مواد دانه‌ای شکل، سیمن، خاک، سنگ و بتن مورد استفاده قرار گیرد. این مدل در تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی، با توجه به ماهیت مسئله و یافته‌های آزمایشگاهی، نتایج

حل نهایی مدل و دریافت نتایج تحلیل

به منظور بررسی بهینه و نزدیک کردن هر چه بیشتر شرایط مدل ساخته شده به شرایط واقعی زمین میزبان تونل و با توجه به عبور تونل تحت مطالعه از زیرزمین 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 بار سطحی معادل ۲۰ کیلو پاسکال فرض می‌شود. این بار به صورت بار گسترده یکنواخت در طراحی مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱۱).

در اشکال ۱۱ و ۱۲ به ترتیب هندسه مدل به همراه شرایط اعمال بار سطحی و حصول تعادل اولیه در توده خاک (قبل از حفر تونل) نشان داده شده است. چنانچه ذکر گردید پس از انجام این مراحل و رسیدن مدل به تعادل نهایی، مقدار نشست زمین به صورت کنترلهای رنگی در خروجی‌های برنامه FLAC قابل مشاهده است. در مطالعه حاضر نیز با توجه به ساخت مدل برای هر محدوده مورد مطالعه، مقادیر نشست زمین در شرایط عادی مشخص شده و در شکل ۱۳ نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، مقدار نشست حداکثر ایجاد شده در اثر حفر تونل مورد مطالعه در حدود ۱۶ میلی‌متر حاصل شده است که سازگاری نسبتاً خوبی با نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در مسیر تونل داشته و حاکی از صحت انجام مدل‌سازی است. در شکل ۱۴ نمودار گودی نشست به دست آمده از نتایج مدل‌سازی عددی نشان داده شده است.

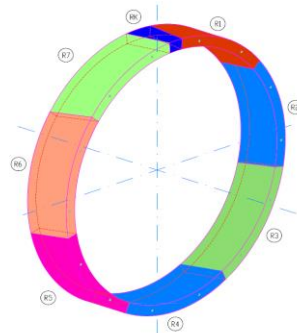


شکل ۱۱: هندسه مدل به همراه اعمال بار سطحی

نقاط مشخصی در سطح زمین انتخاب شده و جابجایی آنها پس از اتمام حل مدل مورد مطالعه دقیق‌تر قرار گرفته است. اشکال ۱۲ و ۱۳ از تفسیر و تحلیل جابجایی این نقاط حاصل شده است. در شکل ۱۳ منحنی گودی نشست در مقطع عرضی که بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی به دست آمده است، نشان داده شده است.

مدل‌سازی پوشش بتنی

بر اساس طرح مصوب پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز، پوشش بتنی تونل (سگمنت) به صورت یونیورسال با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر و قطر داخلی ۸/۴۸ اجرا شده و تعداد و چیدمان آنها به صورت ۷+۱+۱ بوده که در آن سگمنت‌های R1, R2, R3, R4, R5, R6 و R7 سگمنت‌های اصلی و RK سگمنت کلید بوده و سگمنت اینورت نیز در کف تونل نصب می‌شود. در شکل ۱۴ نمایی طرح هندسی سگمنت‌های اجرا شده در این پروژه به صورت شماتیک نشان داده شده است. مدل رفتاری حاکم بر سگمنت‌ها الاستیک در نظر گرفته شده است و برای مدل‌سازی دوغاب پشت سگمنت‌ها از المان حجمی با رفتار الاستیک استفاده شده است. جهت برآورد خصوصیات مکانیکی دوغاب و سگمنت، نتایج به دست آمده از مطالعات باغبان گل پسند و همکاران [۳۴] مدنظر قرار گرفته است که در جدول ۵ قابل مشاهده است. همچنین جهت مدل‌سازی سگمنت‌ها از توصیه‌های هامرونی و همکاران [۳۵] استفاده شده است.



شکل ۱۰: طرح سه بعدی رینگ سگمنتال تونل مورد مطالعه

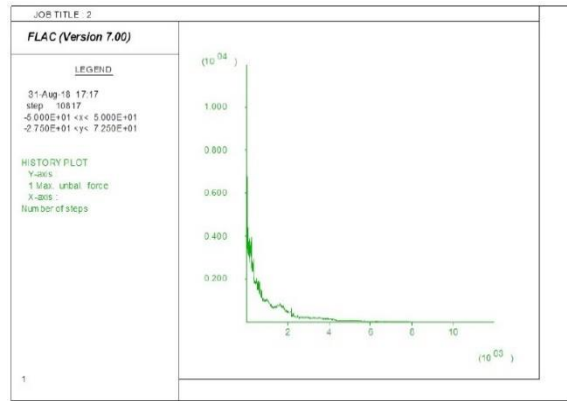
جدول ۵: خصوصیات سگمنت و تزریق پشت سگمنت

توزیع پشت سگمنت	سگمنت	پارامترها (واحد)
-	3.5e7	مدول الاستیسیته-E (kPa)
0.3	0.2	نسبت پواسون-ν
2.1e3	-	مدول بالک-K (kPa)
1.0e3	-	مدول برشی-G (kPa)
15	26	دانسیته-γ (kN/m3)

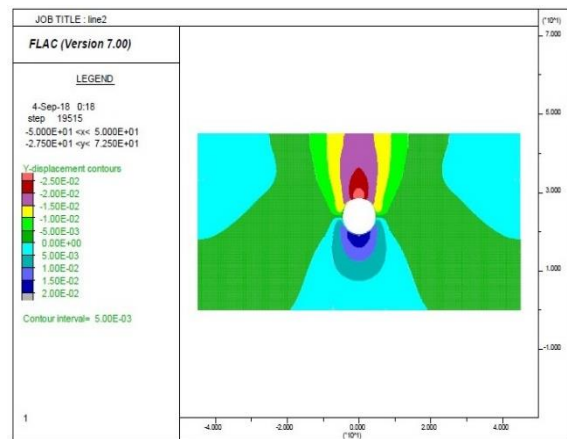
۷-۲- بررسی تأثیر مقادیر مختلف K_0 بر اساس مدل‌سازی عددی

جهت بررسی تأثیر مقادیر مختلف K_0 بر نشست زمین ناشی از حفر تونل، از نرم‌افزار FLAC 2D و قابلیت‌های موجود در آن استفاده شده است. بدین منظور پس از ساختن مدل در محدوده مورد مطالعه و اطمینان از صحت کارکرد آن که با توجه به نشست‌های واقعی حاصل گردید، جهت شبیه‌سازی مقادیر مختلف K_0 و تأثیر آن در تحلیل‌ها، مقادیر متفاوتی از تنش‌های افقی و قائم بر مدل اعمال می‌شود تا با توجه به رابطه (۵) مقادیر مختلف K_0 (۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱) شبیه‌سازی شوند [۳۶]. نکته‌ای که می‌بایست در اینجا بدان اشاره گردد این است که با وجود اینکه خاک از لایه‌های مختلفی تشکیل شده است، اما به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در خصوص ضخامت لایه‌ها و وجود میان لایه‌ها و عدسی‌هایی از مصالح متفاوت و همچنین به خاطر رعایت اصل ساده‌سازی، حالت میانگینی از لایه‌های مختلف خاک، با توجه به ضخامت تقریبی و پارامترهای ژئوتکنیک، در نظر گرفته شده و مدل‌سازی تنها بر روی این خاک میانگین صورت گرفته است تا تنها تأثیر پارامتر K_0 بر میزان نشست (بدون در نظر گرفتن تأثیر عوامل دیگر) مورد بررسی قرار گیرد. به عبارت ساده‌تر هدف اصلی این مطالعه صرفاً بررسی تأثیر تغییرات پارامتر K_0 بر میزان نشست زمین در اثر حفر تونل فارغ از فاکتورها و عوامل دیگر است.

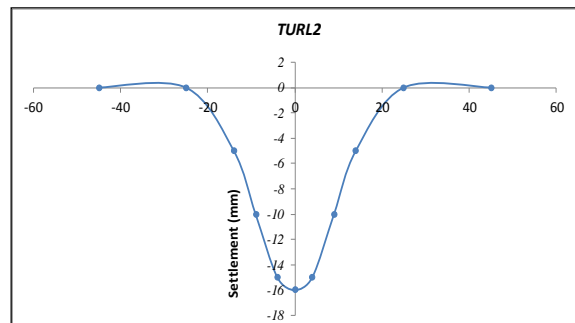
نتایج به‌دست‌آمده از این مرحله در اشکال ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با توجه به انتخاب مقادیر متفاوتی برای پارامتر K_0 و اعمال آن در مدل، مقادیر متفاوتی برای نشست نهایی حاصل شده و به‌طور کلی با افزایش مقدار این پارامتر، نشست زمین کاهش پیدا کرده است.



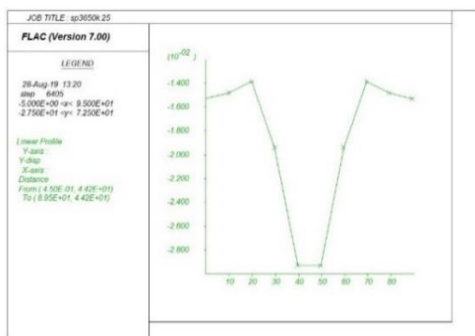
شکل ۱۲: حصول تعادل اولیه در توده خاک قبل از حفر مدل



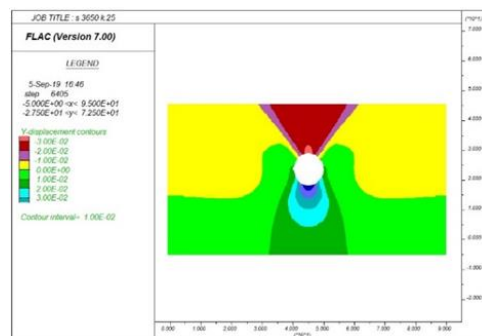
شکل ۱۳: کنتورهای نشست زمین در محدوده مورد مطالعه (شرایط عادی)

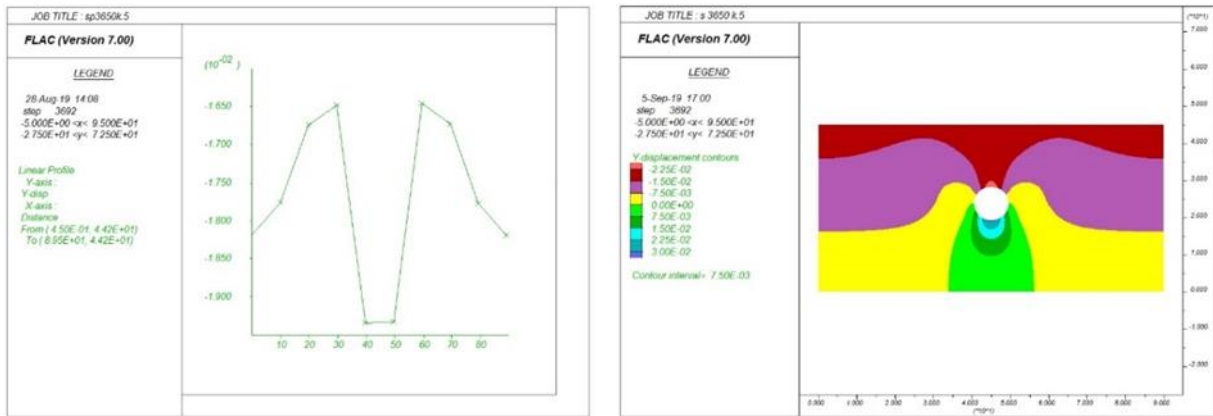


شکل ۱۴: نمودار گودی نشست زمین در محدوده مورد مطالعه

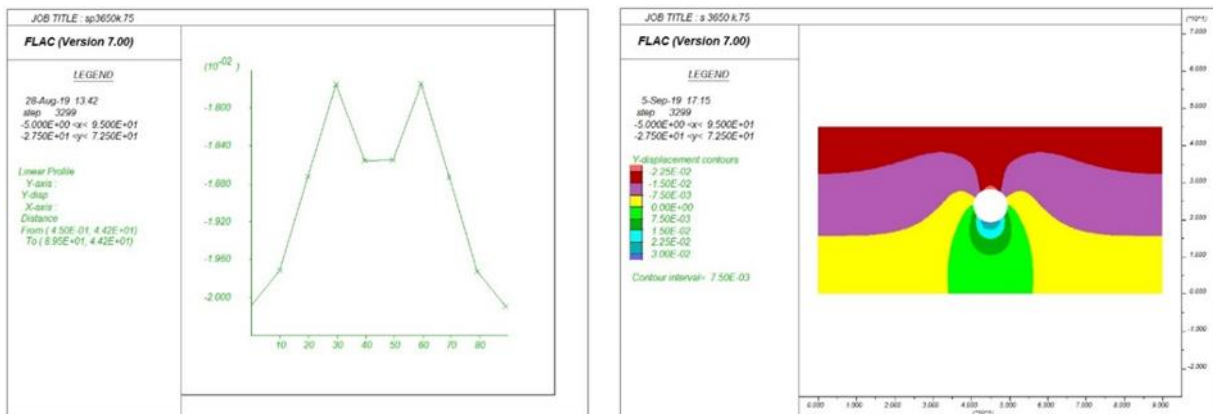


شکل ۱۵: کنتورهای جابجایی و تاریخچه نشست زمین در شرایط $K_0=0.25$

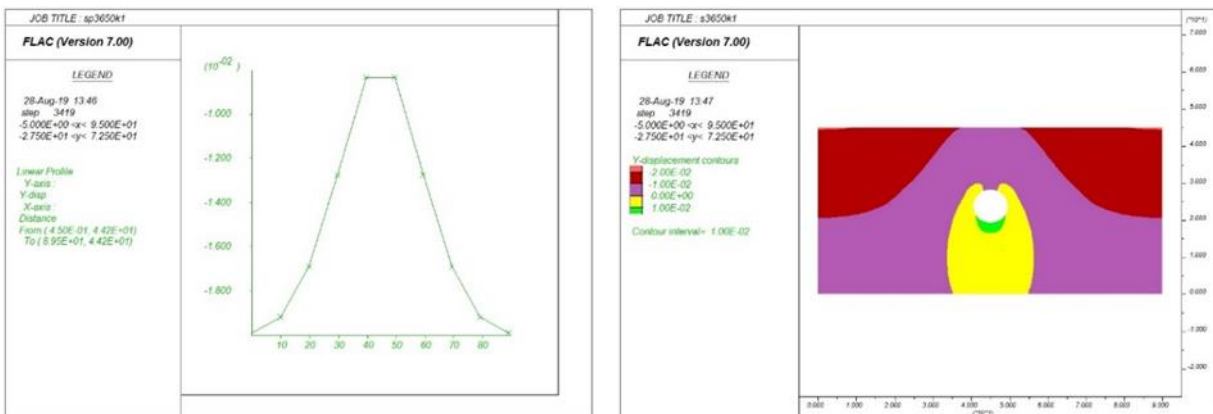




شکل ۱۶: کنتورهای جابجایی و تاریخچه نشست زمین در شرایط $K_0=0.5$



شکل ۱۷: کنتورهای جابجایی و تاریخچه نشست زمین در شرایط $K_0=0.75$



شکل ۱۸: کنتورهای جابجایی و تاریخچه نشست زمین در شرایط $K_0=1$

۸- تحلیل یافته‌ها

عددی با K_0 های متفاوت به صورت نمودارهای میله‌ای نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که به‌طور کلی با افزایش مقدار K_0 ، نشست زمین در اثر حفر تونل کاهش می‌یابد. جهت تعیین میزان و نحوه تأثیرپذیری نشست زمین در اثر حفر تونل از تغییرات مقادیر ضریب فشار جانبی زمین و همچنین تعیین پارامترهای A و B، لازم است تا این مقادیر به صورت نمودار نقطه‌ای ترسیم گردیده

بر اساس رابطه (۶) ارتباط بین مقدار K_0 و نشست زمین در اثر حفر تونل از نوع معکوس و نمایی است. همچنین پارامترهای A و B با توجه به مقادیر نشست‌های به‌دست‌آمده در مقادیر مختلف K_0 و ترسیم نمودار مربوطه قابل‌دستیابی است. در شکل ۱۹ (الف) مقادیر بیشینه نشست‌های زمین ($S_{v \max}$) به‌دست‌آمده از روش مدل‌سازی

۹- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر نشست زمین در اثر حفر تونل خط دو مترو تبریز مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر ضریب فشار جانبی زمین (K_0) بر آن مورد بررسی قرار گرفت. ذکر گردید که پارامتر K_0 تأثیر به‌سزایی در طراحی تونل و پوشش بتنی آن، به‌ویژه از نظر بارهای افقی و قائم وارد بر آن داشته و لازم است تا مقدار آن به‌طور دقیق مورد مطالعه قرار گرفته و در طراحی‌های تونل و سگمنت مورد توجه قرار گیرد. در این راستا ضمن مینا قرار دادن نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در حین حفاری تونل، از مدل‌سازی عددی به‌عنوان ابزاری توانمند در این خصوص استفاده شده و نتایج زیر به دست آمد:

- نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در حین حفاری در بازه ۱۲ تا ۱۹ میلی‌متر هستند که ضمن تأکید بر تأثیر عوامل مختلف بر آن و با توجه به تجربیات به‌دست‌آمده از پروژه‌ها و مطالعات دیگر، این مقادیر به‌عنوان نشست‌های عادی تلقی می‌شوند.

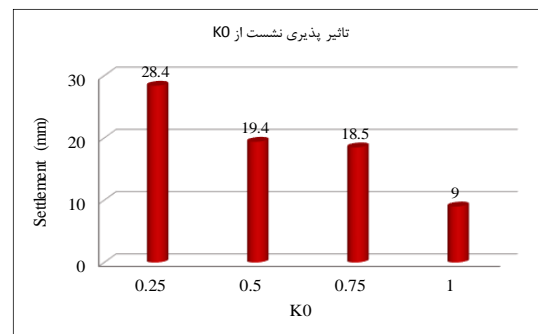
- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان داد که به‌طور کلی با افزایش K_0 ، نشست زمین در اثر حفر تونل کاهش پیدا کرده و مقدار این کاهش از یک تابع‌نمایی پیروی می‌کند. به عبارت ساده‌تر، میزان تأثیرپذیری نشست زمین در اثر حفر تونل از تغییرات K_0 ، غیرخطی و به شکل نمایی است.

- پارامترهای A و B که در این مطالعه برای تونل خط دو مترو تبریز (در بازه مورد مطالعه) به دست آمد، تقریباً در حد واسط مقادیر متناظر برای تونل‌های خط هفت مترو تهران و ابودر قرار داشته و با توجه به مشابهت نسبی بین مصالح میزبان تونل و خصوصیات ژئوتکنیک آنها، چنین نتیجه‌گیری شد که پارامترهای هندسی تونل مانند قطر و عمق نقش اساسی را در تعیین این پارامترها دارند. در این ارتباط و با توجه به اهمیت موضوع، پیشنهاد می‌گردد مطالعات بیشتری بر روی تونل‌های مختلف صورت گیرد.

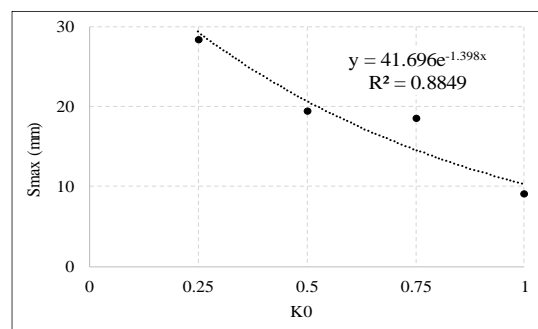
مراجع

[1] Peck, R. B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proc. Of the 7th int. Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering. State of

و پس از درون‌یابی، نسبت به تعیین پارامترهای مذکور اقدام گردد. این کار در نمودار شکل ۱۹ (ب) انجام گرفته و این پارامترها تعیین شده و در جدول ۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که در ارتباط با تونل خط دو مترو تبریز نیز مشابه تونل‌های خط هفت مترو تهران (قطعه شرقی-غربی) و ابودر، میزان و نحوه تأثیرپذیری نشست زمین در اثر حفر تونل از تغییرات مقادیر ضریب فشار جانبی زمین از نوع نمایی بوده و رابطه ۶ در این مورد هم صادق است. در ارتباط با پارامترهای A و B، مقایسه بین مقادیر موجود در جداول ۱ و ۶ نشان‌دهنده این است که مقادیر پارامترهای A و B به‌دست‌آمده برای تونل خط دو مترو تبریز، به‌طور تقریبی در حد واسط بین مقادیر متناظر در تونل‌های خط هفت و ابودر قرار دارند. با توجه به مشابهت نسبی بین مصالح دربرگیرنده هر سه تونل از نظر نوع مصالح و خصوصیات ژئوتکنیک آن، به نظر می‌رسد قطر تونل و عمق تونل آن (و یا ضخامت روباره تونل) نقش اساسی را در مقادیر پارامترهای A و B داشته باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۹: تغییر میزان نشست زمین با مقادیر مختلف K_0 (الف) و تعیین پارامترهای A و B برای محدوده مورد مطالعه (ب)

جدول ۶: مقادیر پارامترهای A و B برای تونل مورد مطالعه

B	A	نسبت ($\frac{C}{D}$) روباره به قطر	D قطر تونل (متر)	تونل
۱٫۳۹	۴۱٫۶۹	۱٫۶۵	۹٫۴۹	خط دو مترو تبریز

- [15] Baghban Golpasand, M.R., Do, N.A., Dias, D., Nikudel, M.R. (2018). Effect of the lateral earth pressure coefficient on settlements during mechanized tunneling. *Geomechanics and Engineering*. 16(6) 643-654 .
- [16] Huang, J. Y. Z., Xiaowei, O., Guoyuan, X. (2019). Lagged settlement in sandy cobble strata and earth pressure on shield tunnel. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 16(6) 6209-6230.
- [17] I.T.A. Working Group No. 2. (ITA). (2000). Guidelines for the design of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 15(3) 303-331.
- [18] DAUB (Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen). (1997). Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines. *Tunnel* 5(97) 20-35.
- [19] Marinos, P.G., Novack, M., Benissi, M. et al. (2009). Assessment of ground conditions with respect to mechanised tunnelling for the construction of the extension of the Athens Metro to the city of Piraeus. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 68 17-26.
- [20] Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, G., Hassanpour, J. (2013). Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East-West lot of line 7, Tehran Metro, Iran. *Engineering Geology*, 166, 170-185. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.07.012.
- [21] Baghban Golpasand M R, Nikudel M R, Uromeihy A. (2017). Effect of Engineering Geological Factors on the Parameters Associated with the Empirical Study of Ground Settlement due to Excavation of Abuzar Tunnel, Tehran. *JEG*. 10 (3) :3559-3586. doi: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559. (In persian)
- [22] Hosseini, S., Jalali, S., Jalali, M., Khorasani, E. (2018). Numerical investigation of mechanized shield tunnels cross-cut. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 8(16), pp. 29-43. doi: 10.29252/anm.8.16.29. (In persian)
- [23] Rezaei, A.H., Shirzehhagh, M., Baghban Golpasand, M.R. (2019). EPB tunneling in cohesionless soils: A study on Tabriz Metro settlements. *Geomechanics and Engineering*. 19(2) 153-165.
- [24] Abbaszadeh, M., Baghban Golpasand, M.R. (2019). Investigation on the effect of different values of K (lateral earth pressure coefficient) on ground settlement due to excavation of the tunnel of Tabriz metro, Line 2. 13th Iranian Tunneling Conference, 18-20 November "New Horizons in Tunneling". (In persian)
- [25] Dunicliff, J., Green, G.E. (1993). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John wiley & Sons Inc., United State. pp 577.
- [26] Zaheri, M., Ranjbaria, M., Dias, D., & Oreste, P. (2020). Performance of segmental and shotcrete linings in shallow tunnels crossing a transverse strike-slip faulting. *Transportation Geotechnics*, 23, 100333 .
- [27] Zaheri, M., Ranjbaria, M., & Dias, D. (2020). 3D numerical investigation of segmental tunnels the art Volume. *Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos*, A. C. pp 225-290.
- [2] O'Reilly, M. P., & New, B. M. (1982). Settlements above tunnel in the United Kingdom- their magnitude and prediction. *Tunnelling* 82. The Institution of Mining and Metallurgy, London .
- [3] Rankin, W.J. (1988). *Ground Movements Resulting from Urban Tunneling: Predictions and Effects*. In. *Engineering Geology of Underground Movements*, Geological Society Engineering Geology Special Publication No.5: 79-92 .
- [4] Mair, R. J., Taylor, R. N. & Bracegirdle, A. (1993). Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Geotechnique* 43, No. 2, pp 315-320.
- [5] Baghban Golpasand, M.R., Nikudel, M.R., Uromeihy, A. (2016). Specifying the real value of volume loss (VL) and its effect on ground settlement due to excavation of Abuzar tunnel, Tehran. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 75(2) 485-501 .
- [6] Attewall, P.B., and Woodman, J. P. (1982). prediction the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil. *Ground Engineering*, 15 .(V)
- [7] Attewall, P.B., Yeates. J. and Selby, A. R. (1986). *Soil movement induced by tunneling and their effects on pipelines and structures*. London., Blackie and Son Ltd .
- [8] Mair, R.J., Taylor, R.N. (1997). Bored tunnelling in the urban environment (State-of-the-art report and theme lecture). *Proc. the 14th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* pp. 2353-2385.
- [9] Baghban Golpasand, M.R. (2015). Evaluation of the effect of Engineering Geological characteristics of soil on ground settlement induced by shallow Tunneling in urban area. Ph.D. Dissertation in Engineering Geology. Tarbiat Modares University. (In persian)
- [10] Gunn, M.J. (1993). The prediction of surface settlement profile due to tunneling. In *Proceeding of the worth memorial symposium*, London, Thomas Telford, pp 304-316.
- [11] Addenbrooke, T.I., Potts, D.M., Puzrin, A.M. (1997). The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Geotechnique*, 47 (3) 693-712.
- [12] Dolezalova, M. (2002). Approaches to numerical modeling of ground movements due to shallow tunneling. *Second International Conference on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering*, Switzerland, vol. 2, pp. 365-373.
- [13] Franzius, J.N., Potts, D.M., Burland, J.B. (2005). The influence of soil anisotropy and K0 on ground surface movement resulting from tunnel excavation. *Geotechnique*. 55(3) 189-199.
- [14] Muller, M. (2006). Tunnel induced settlement and structural forces in lining. Doctoral Thesis. Stuttgart university.

performance crossing a dip-slip fault. *Geomechanics and Engineering*, 23(4), 351-364 .

[28] Nematollahi, M., & Dias, D. (2019). Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction—Case of the Shiraz subway line. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86, 75-88.

[29] Nematollahi, M., & Dias, D. (2020). Interaction between an underground parking and twin tunnels—Case of the Shiraz subway line. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95, 103150.

[30] Mousazadeh, S., Goshtasbi, K., Ghzvinian, A. (2013). Comparison of Numerical Methods in Stability Analysis of masjed-Soleyman Power House Cavern. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 3(5), pp. 89-98. (In persian)

[31] Baghban Golpasand, M.R., Do, N. A., Dias, D., 2019. "Impact of pre-existent Qanats on ground settlements due to mechanized tunneling", *Transportation Geotechnics*, v. 21, paper no. 100262, doi:10.1016/j.trgeo.2019.100262

[32] Do, N.A., Dias, D., Oreste, P.P., Djeran-Maigre, I., 2014. "2D numerical investigations of twin tunnel interaction", *Geomechanics and Engineering*, v. 6 no. 3, p. 263-275. doi:10.12989/gae.2014.6.3.263.

[33] Zhu, G., Wang, S., Peng, S., Song, Y., 2022. "Surface settlement in saturated loess stratum during shield construction: Numerical modeling and sensitivity analysis", *Tunnelling and Underground Space Technology* 119 (2022) 104205.

[34] Baghban Golpasand, G., Farzam, M., Soleymani Shishvan, S. (2020). Behavior of recycled steel fiber reinforced concrete under uniaxial cyclic compression and biaxial tests. *Construction and Building Materials*, Volume 263, 120664.

[35] Hamrouni, A.; Dias, D.; Guo, X., (2022) "Behavior of Shallow Circular Tunnels—Impact of the Soil Spatial Variability", *Geosciences*, 12, 97. <https://doi.org/10.3390/geosciences12020097>

[36] Abbaszadeh, M. (2019). Investigation on the effect of the lateral earth pressure coefficient on the ground settlements due to mechanized tunneling. Msc. Thesis in civil engineering. Seraj Institute of Higher Education (In persian)