



بررسی کارایی روش‌های مختلف برای ارزیابی نشست زمین در اثر حفر تونل خط دو مترو تبریز

محمدرضا باغبان گل پسند^{۱*}، صفا پورجوادی آدمی^۱، غلامرضا باغبان گل پسند^۱، سیف الدین موسی زاده^۲

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

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱

کلمات کلیدی:

تونل‌زنی مکانیزه

نشست زمین

روش‌های نیمه تجربی و تحلیلی

روش عددی تفاضل محدود

نشست‌های واقعی

خلاصه: حفر تونل‌های مکانیزه کم عمق در مناطق شهری و زمین‌های نرم منجر به ایجاد جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در مصالح دربرگیرنده تونل شده و در نتیجه پدیده نشست زمین در اثر حفر تونل را در پی دارد که گاهاً می‌تواند اثرات نامطلوب و حتی مخربی بر ساختمان‌های سطحی و تاسیسات زیرسطحی داشته باشد. در تحقیق حاضر، نشست زمین در اثر حفر تونل مکانیزه خط دو مترو تبریز با استفاده از روش‌های نیمه تجربی، تحلیلی و عددی ارزیابی شده و تاثیر عوامل مختلف بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. جهت انجام مطالعه بخشی از تونل انتخاب شده و ارزیابی نشست با استفاده از هر سه روش صورت گرفته و نتایج به دست آمده پس از مقایسه با نشست‌های واقعی (اندازه‌گیری شده حین حفر تونل) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج حاصله نشان دهنده این است که در روش نیمه تجربی به خاطر ویژگی‌های ذاتی این روش، مقادیر بالاتری برای نشست حاصل می‌شود اما روش‌های تحلیلی و به ویژه عددی، به علت به کارگیری پارامتر بیشتری از خاک و تونل، عموماً نتایج منطقی و قابل اعتمادی را ارائه می‌نمایند. همچنین در این ارتباط و جهت تاکید روی قابلیت‌های ارزشمند روش‌های عددی (2D FLAC)، تاثیر عوامل مختلف بر نشست زمین مورد بررسی قرار گرفته و مشخص گردید که با کاهش مدول الاستیسیته دوغاب، افزایش بار سطحی، کاهش مدول الاستیسیته خاک و افت سطح آب زیرزمینی، مقدار نشست زمین در اثر حفر تونل افزایش پیدا کرده است.

۱- مقدمه

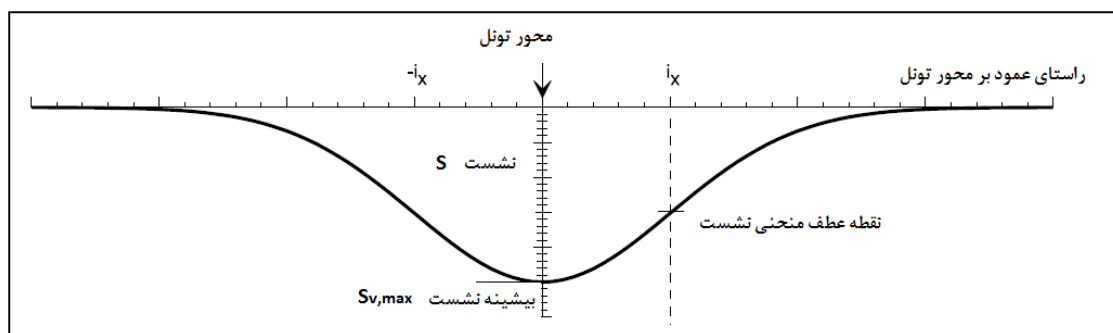
همچنین ساختارهای سطحی و زیرسطحی بوده و گاهی خسارت‌های زیادی را به بار می‌آورد. بنابراین لازم است تا مقدار نشست زمین و نحوه گسترش آن به طور دقیق پیش‌بینی شده و تمهیدات لازم برای آن اندیشیده شود. به عبارت دیگر در صورتی که قبل از آغاز روند حفاری ارزیابی درستی از نشست زمین حاصل گردد، می‌توان از بسیاری از پیشامدهای ناگوار در این خصوص جلوگیری نمود. روش‌های مختلفی جهت پیش‌بینی و ارزیابی نشست زمین در اثر حفر تونل پیشنهاد گردیده است که از جمله می‌توان به روش‌های نیمه تجربی، تحلیلی و عددی اشاره نمود. لازم به ذکر است که روش‌های دیگری نیز مانند مدل‌سازی فیزیکی و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بدین منظور پیشنهاد شده‌اند که بیشتر جنبه پژوهشی و تحقیقی داشته و مورد استفاده چندانی به عنوان روش‌های کاربردی و صنعتی ندارند. در تحقیق حاضر نشست‌های ایجاد شده در زمین ناشی از حفر تونل خط ۲ مترو تبریز با استفاده از روش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و ضمن مقایسه با نشست‌های واقعی، کارایی هر کدام از این روش‌ها جهت مطالعه این پدیده مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در نهایت تاثیر عوامل موثر بر آن بررسی

در دهه‌های اخیر و با توجه به گسترش و توسعه شهرنشینی و نیازهای روزافزون به حفر تونل در پروژه‌های مختلف شهری از جمله خطوط مترو، استفاده از دستگاه‌های حفاری مکانیزه TBM در انواع و ابعاد مختلف رواج و توسعه بیشتری پیدا کرده است. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در پروژه‌های حفر تونل‌های کم عمق در مناطق شهری و زمین‌های نرم و آبرفتی با آن مواجه می‌شویم و می‌بایست با دقت بالایی مدنظر قرار گیرد، مسئله نشست سطح زمین در اثر حفر تونل می‌باشد.

به طور کلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به برداشته شدن توده‌ای از خاک و بروز تغییرات چشمگیر در وضعیت تنش‌های اولیه در اطراف آن می‌شود. این موضوع همگرایی و جابه‌جایی خاک به سمت تونل را در پی داشته و در نهایت باعث بروز نشست زمین می‌شود. نشست مذکور به ویژه در محیط‌های شهری و در شرایطی که تونل در مجاورت سازه‌ها و تاسیسات شهری حفر گردد، عامل بروز مشکلاتی در سازه‌ها، تاسیسات و

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





شکل ۱. منحنی گودی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل

Fig. 1. Trough of the settlement of ground surface due to tunneling

در این رابطه i نشان دهنده فاصله افقی نقطه عطف منحنی از مرکز تونل بوده و از معادله زیر به دست می‌آید:

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

در این رابطه، z_0 فاصله قائم محور تونل تا سطح زمین و k ضریبی است که بستگی به شرایط ژئوتکنیکی زمین دارد و در ادامه توضیحات بیشتری در این ارتباط ارائه خواهد شد. موضوع نشست زمین در اثر تونل از جمله موضوعات مهم و مورد بحث در مهندسی ژئوتکنیک بوده و مطالعات زیادی بر روی آن صورت گرفته است که همگی در جهت تایید و تکمیل کارهای پک بوده است که از جمله می‌توان به مطالعات آریلی و نیو^۴ [۳]، آتول و همکاران^۵ [۴]، میپر و تیلور^۶ [۵] و در سال‌های اخیر به مطالعات ژو^۷ و همکاران [۶]، هو^۸ و همکاران [۷] و زو^۹ و همکاران [۸] اشاره کرد. این سخن بدان معناست که رابطه پک 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. همچنین دوباره متذکر می‌شود که با توجه به فراوانی مطالعات انجام شده در ارتباط با این موضوع، عملاً نام بردن از همه آن‌ها در این مقاله مقدور نمی‌باشد اما با توجه به ارتباط موضوعی و همچنین پروژه مورد مطالعه می‌توان به مطالعات

خواهد شد. 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 می‌باشد. استفاده از نشست‌های واقعی صحت‌سنجی و کنترل نتایج حاصل از روش‌های مختلف به ویژه 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، کارایی و قابل اعتماد بودن هر کدام از سه روش ذکر شده در بالا برای پیش‌بینی نشست زمین در اثر حفر تونل مورد کنکاش قرار گیرد.

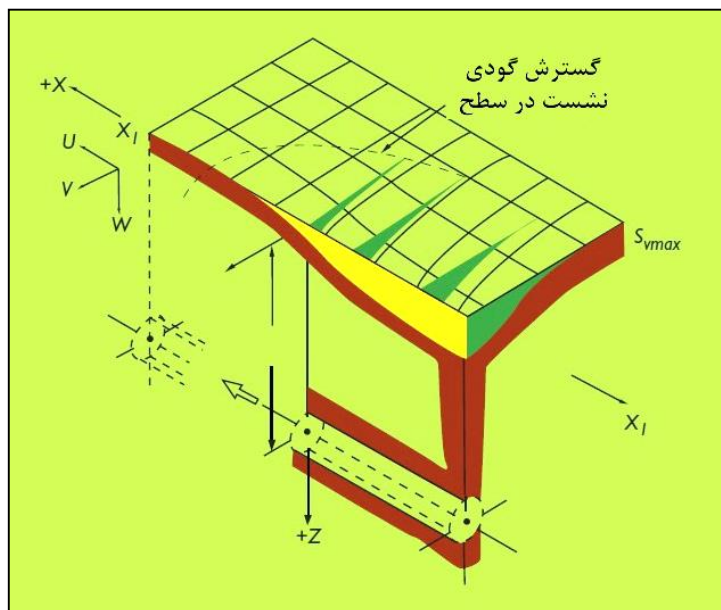
۲- پیشینه مطالعات

محققین زیادی بر روی این مسئله مطالعه نموده و روش‌های مختلفی نیز در این راستا گسترش یافته‌اند. ترزاقی^۱ (۱۹۴۶) اصول مدونی را برای اولین بار برای طراحی تونل‌ها در آمریکای شمالی ارائه کرد [۱]. پک^۲ (۱۹۶۹) یک گزارش مدون حاوی جمع‌آوری کلی از عملیات اجرایی تونل در زمین‌های نرم تا آن زمان ارائه نمود [۲]. او نشان داد که منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل تشابه زیادی به منحنی توزیع نرمال^۳ داشته (شکل ۱) و یک رابطه به صورت زیر برای پروفیل نشست سطحی ارائه کرده است:

$$s_v(x) = s_{v \max} e^{\frac{-x^2}{2i_x^2}} \quad (1)$$

4 O'Reilly and New
5 Attwel
6 Mair and Taylor
7 Zhu
8 Hu
9 Xu

1 Terzaghi
2 Peck
3 Gaussian Distribution



شکل ۲. نمایی سه بعدی از پدیده نشست زمین در اثر حفر تونل

Fig. 2. Three dimensional view of the phenomenon of ground settlement due to tunneling

۲-۱- افت زمین (V_L)

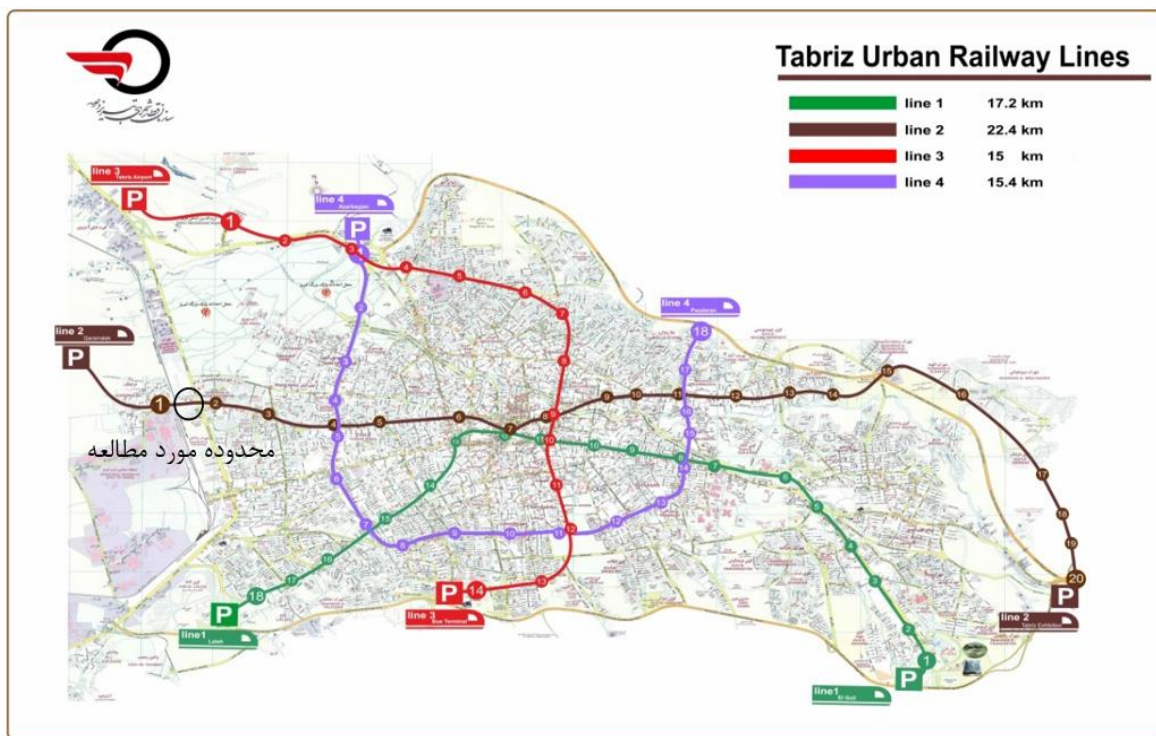
حفر یک تونل باعث می‌شود که مقدار خاکی که حفاری می‌شود از مقداری خاکی که معرف حجم نظری تونل است، زیادتر باشد. به عبارت دیگر در اثر حفاری تونل لازم است تا مقدار خاک بیشتری نسبت به حجم تونل از آن به بیرون انتقال داده شود. این مقدار اضافی حفاری تحت عنوان حجم از دست رفته (یا افت حجم) نامیده شده و به صورت V_L نشان داده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که این پارامتر نسبت مقدار اختلاف حجم خاک حفاری شده و حجم تونل (که به وسیله قطر بیرونی تونل تعریف می‌شود) به حجم تونل می‌باشد. حجم از دست رفته معیاری از به هم خوردگی کلی وضعیت زمین می‌باشد و مقدار آن بسته به نوع زمین متفاوت خواهد بود. مطالعات نسبتاً زیادی در ارتباط با این پارامتر صورت گرفته و مقادیر متنوعی برای این پارامتر پیشنهاد شده است. باغبان گل پسند و همکاران با جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تعداد زیادی پروژه‌های تونل مکانیزه مقدار این پارامتر بین ۰/۲ تا ۲ درصد تعیین نموده [۲۲] و همچنین با انجام ارزیابی‌های تحلیلی و عددی و با انجام تحلیل برگشتی بر اساس نشست‌های واقعی، مقدار این پارامتر را برای تونل ابوذر تهران بین ۰/۴ تا ۰/۶ درصد محاسبه نمودند [۲۳]. رضایی و احمدی عدلی بررسی‌هایی در ارتباط با مقادیر V_L اتفاق افتاده در مسیر خط ۲ مترو تبریز انجام داده و با معرفی عمق تونل به عنوان یکی از عوامل

مولر^۱ [۹]، مییر^{۱۰} [۱۰]، لوگاناتان^۲ [۱۱]، فارگنولی و همکاران^۳ [۱۲]، فنگ و همکاران^۴ [۱۳]، پاورز^۵ و همکاران [۱۴]، هامرونی^۶ و همکاران [۱۵]، رضایی و همکاران [۱۶]، کاتبی و همکاران [۱۷]، باغبان گل پسند [۱۸]، باغبان گل پسند و همکاران [۱۹] و نیک اختر و همکاران [۲۰] اشاره نمود. در شکل ۲ نمایی سه بعدی از پدیده نشست زمین در اثر حفر تونل نشان داده شده است. یکی از پارامتر مهم در رابطه پیشنهادی پک، پارامتر S_{max} می‌باشد. برای به دست آوردن این پارامتر رابطه ای بدین صورت زیر توسط مییر و همکاران پیشنهاد شده است [۲۱]:

$$S_{max} = 0.313V_L (D^2 / kz_0) \quad (3)$$

در این رابطه D عبارتست از قطر تونل و همچنین پارامترهایی مانند V_L و k به چشم می‌خورند که جهت تبیین موضوع لازم است تا اشاره مختصری به آن‌ها بشود.

- 1 Mueller
- 2 Loganathan
- 3 Fargnoli
- 4 Feng
- 5 Powers
- 6 Hamrouni



شکل ۳. مسیر خطوط چهارگانه قطار شهری تبریز و موقعیت محدوده مورد مطالعه بر روی خط ۲

Fig. 3. Routes of Tabriz metro lines and the location of study area

مقدار $k=0.5$ را برای این پارامتر پیشنهاد نمود [۲۶]. با توجه به این یافته‌ها و بر اساس نوع مصالح موجود در مسیر تونل که در بخش بعد مفصلاً بحث خواهد شد، مقدار $k=0.4$ در محاسبات ارزیابی نشست به روش تجربی، مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۳- معرفی طرح

طبق طرح مصوب، طول خط ۲ قطار شهری تبریز در حدود ۲۲/۵ کیلومتر بوده که از محدوده جاده اختصاصی تصفیه خانه واقع در قراملک (غرب تبریز) آغاز و تا محدوده نمایشگاه بین‌المللی در شرق تبریز ادامه می‌یابد. این خط دارای ۲۰ ایستگاه با فواصل تقریباً یک کیلومتر از یکدیگر بوده که به ترتیب با حروف لاتین از ایستگاه S01 تا ایستگاه S20 نام‌گذاری شده است. محدوده مورد مطالعه مابین ایستگاه‌های S01 و S02 واقع شده است. در شکل ۳ مسیر کریدور خط ۲ نشان داده شده است.

۴- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

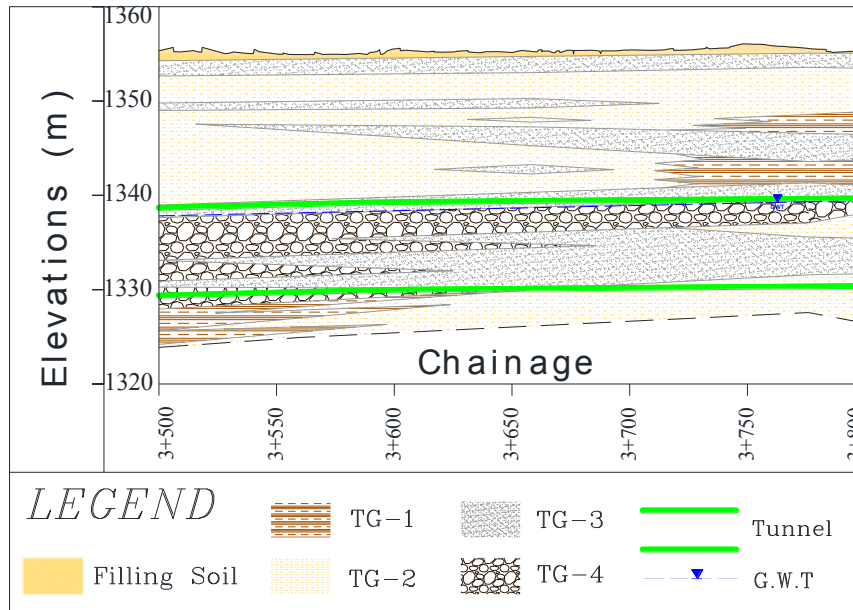
منطقه مورد مطالعه در زون البرز آذربایجان قرار می‌گیرد. شهر تبریز

موثر بر این پارامتر، مقدار آن را بین 0.13 تا $1/35$ درصد معرفی نمودند [۲۴]. در مطالعه حاضر با مد نظر قرار دادن این مقادیر و با توجه به شرایط کلی حاکم بر پروژه، از نظر زمین‌شناسی و عمق تونل، مقدار 0.55 تا 0.6 درصد برای محدوده مورد مطالعه انتخاب گردیده و ارزیابی‌ها بر این اساس صورت گرفته است.

۲-۲ پارامتر بی‌بعد ژئوتکنیکی خاک (k)

k پارامتری تجربی و بدون بُعد است که مقدار آن وابسته به نوع خاک و خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک آن می‌باشد. بر اساس مطالعات گویلیلمتی^۱ و همکاران مقدار k برای خاک‌های چسبنده در دامنه 0.4 تا 0.6 و برای خاک‌های دانه‌ای و غیرچسبنده در دامنه 0.25 تا 0.35 پیشنهاد شده است [۲۵]. آریلی و نیو مقدار k را به نوع خاک نسبت دادند و برای خاک‌های رسی مقدار 0.5 و برای خاک ماسه‌ای مقدار 0.25 را پیشنهاد نمودند. رانکین^۲ با مطالعه بر روی تونل‌هایی در انگلستان و دیگر نقاط جهان

1 Guglielmetti
2 Rankin



شکل ۴. نیم‌رخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه [۲۸]

Fig. 4. Engineering geological profile of tunnel route in the studied part

داشته‌اند. از جمله رودخانه‌های مهم منطقه مهران‌رود (قوری‌چای) است که در حوالی پل قاری خط ۲ قطار شهری را قطع می‌کند.

۵- ژئوتکنیک مسیر

جهت انجام مطالعات ژئوتکنیک در محدوده مورد مطالعه، حفر گمانه و چاهک دستی به عمق ۱۵ تا ۳۵ متر توام با مغزه‌گیری پیوسته صورت گرفته است. در همه گمانه‌ها به منظور بررسی لایه‌های زیرسطحی و مقاومت زمین و همچنین بررسی وضعیت آب زیرزمینی، آزمایشات صحرایی و همچنین نمونه‌برداری دست نخورده (جدار نازک^۱ یا موم اندود) و دست‌خورده مورد نیاز برای انجام آزمایشات آزمایشگاهی انجام شده است. همچنین در داخل چاهک‌ها و گمانه‌ها آزمایشات برجا جهت تعیین پارامترهای مهندسی مصالح صورت گرفته است [۲۸]. بر اساس نتایج حاصل از حفاری گمانه‌های مذکور و لاگ آن‌ها و همچنین با در نظر گرفتن نتایج آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی، نیم‌رخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه ترسیم شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود از نظر زمین‌شناسی مهندسی تعداد ۴ واحد خاکی در مصالح این محدوده تفکیک شده است. برای تفکیک این واحدها از نتایج مطالعات ژئوتکنیک استفاده شده است.

از شمال با رشته کوه‌های شرقی- غربی عون‌ابن‌علی و از جنوب توسط بلندی‌های نه چندان مرتفع که جنس آن‌ها از رسوبات آبرفتی سخت شده و کنگلومرا است، محصور شده است. ارتفاعات شرقی- غربی مذکور باعث شده تا تبریز به صورت دشتی کشیده با امتداد شرقی- غربی درآید. شیب کلی دشت رو به سمت غرب بوده و در نتیجه جهت زهکشی عمومی آب‌های سطحی و زیرسطحی نیز به سمت غرب است.

سطح دشت عموماً با رسوبات آبرفتی سخت نشده پوشیده شده و در حقیقت مسیر تونل مورد مطالعه نیز در داخل همین رسوبات آبرفتی قرار گرفته است. رسوبات آبرفتی مذکور حاصل فرسایش سنگ‌ها و رسوبات محدوده خود شهر تبریز هستند که از نظر سنگ‌شناسی بیشتر لیتولوژی‌هایی مانند ماسه سنگ، سیلتستون، مارن، توف، سنگ رس و ... را شامل می‌شود. این سنگ‌ها از دیدگاه چینه‌شناسی دارای گستردگی زمانی چندانی نبوده و واحدهای تشکیل دهنده آن مربوط به سنوزوئیک و کواترنری هستند [۲۷]. ژئومورفولوژی منطقه، حاصل تاثیر نیروهای تکتونیکی، فعالیت گسل‌ها، چین‌ها و فرسایش می‌باشد. گسل شمال تبریز مرز بین کوه و دشت در شمال شهر تبریز را تشکیل می‌دهد. در قسمت‌های جنوبی شهر نیز گسل‌های متعدد کوچکی واقع شده است. فرسایش و رسوب‌گذاری به وسیله رودخانه‌ها نیز از عوامل مهمی هستند که در شکل‌دهی مورفولوژی منطقه نقش موثری

جدول ۱. مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل [۲۸]

Table 1. Specification of engineering geological types categorized through the studied part of tunnel

| TG-4 | TG-3 | TG-2 | TG-1 | واحد زمین‌شناسی مهندسی |
|---|---|---|---|------------------------|
| شن ماسه‌ای یا ماسه شنی 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 | درصد رد شده از الک ۲۰۰ |
| 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 ۲. مشخصات ژئوتکنیک واحدهای خاکی [۲۸]

Table 2. Geotechnical properties of soil types

| 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 | ۳۳-۳۶ | ۳۰-۳۲ | ۴۵-۵۵ | ۰/۳ | ۱۶/۸-۱۷/۶ |

شده‌اند. این واحدها در جدول ۱ معرفی گردیده‌اند. در جدول ۲ خصوصیات ژئوتکنیک واحدهای خاکی مذکور ارائه شده است. مسیر تونل عمدتاً در واحدهای TG-3 و TG-4 جانمایی شده است اما روبراه تونل اغلب شامل واحد TG-2 می‌باشد که در ضمن میان لایه‌هایی از TG-3 و TG-1 در آن دیده می‌شود.

۶- ارزیابی نشست زمین در اثر حفر تونل مورد مطالعه ۶-۱- روش نیمه تجربی

برای پیش‌بینی نشست حداکثر زمین (S_{max}) در این نقاط به روش نیمه تجربی، پارامترهای V_L و k با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی هر کدام از مقاطع مورد نظر و همچنین توصیه‌های محققین مختلف که در بخش‌های قبلی مورد بحث و بررسی قرار گرفت، تخمین زده شده و محاسبات مربوطه با استفاده از رابطه (۲) انجام شده است. تعدادی از پارامترها

۵-۱- تفکیک واحدهای خاکی از دیدگاه حفر تونل

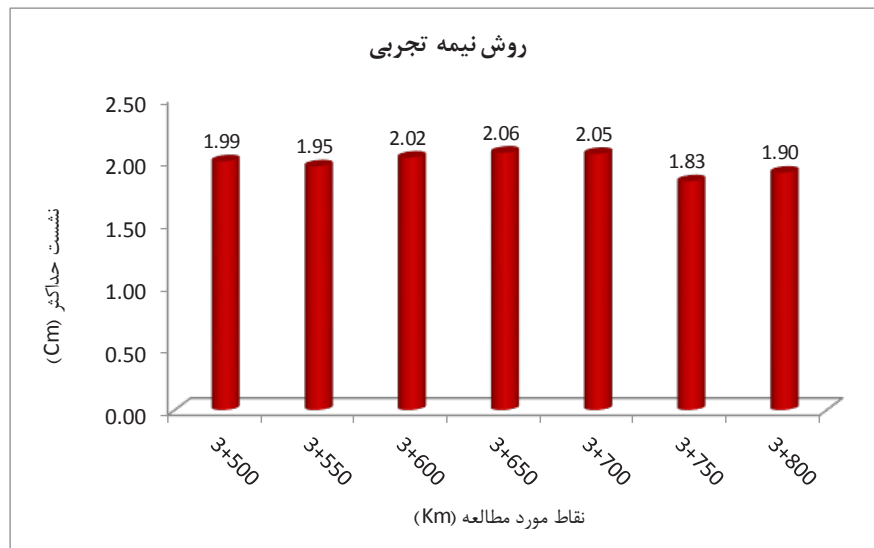
بر اساس پیشنهاد مراجع رسمی و معتبر در زمینه مهندسی تونل مانند انجمن بین‌المللی تونل [۲۹] و کمیته سازه‌های زیرزمینی آلمان [۳۰] یکی از مهم‌ترین عوامل برای تفکیک واحدهای خاکی، درصد ذرات ریزدانه (رد شده از الک ۲۰۰) می‌باشد. در این مطالعه نیز به منظور تفکیک واحدهای خاکی، درصد رد شده از الک ۲۰۰ به عنوان مبنا 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^۳ با اسامی TG-1 تا TG-4 تفکیک

- 1 International Tunneling Association
- 2 DAUB
- 3 Engineering geological Type

جدول ۳. ارزیابی نشست به روش نیمه تجربی برای تونل خط ۲

Table 3. Evaluation of settlement via semi-empirical method

| شماره نقطه (km) | واحد زمین شناسی مهندسی | | | پارامترهای مورد نیاز | | | حداکثر نشست پیش بینی شده (cm) |
|-----------------|------------------------|------------------|-----------|----------------------|-----------|--|-------------------------------|
| | جبهه کار | روباره | $V_L(\%)$ | k | Z_0 (m) | | |
| 3+500 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۰/۶ | ۰/۴ | ۲۱/۳ | | ۱/۹۹ |
| 3+550 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۰/۶ | ۰/۴ | ۲۱/۷ | | ۱/۹۵ |
| 3+600 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۰/۶ | ۰/۴ | ۲۰/۹ | | ۲/۰۲ |
| 3+650 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۰/۶ | ۰/۴ | ۲۰/۵۱ | | ۲/۰۶ |
| 3+700 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۰/۶ | ۰/۴ | ۲۰/۶۷ | | ۲/۰۵ |
| 3+750 | TG-3, TG-4 | TG-1, TG-2, TG-3 | ۰/۵۵ | ۰/۴ | ۲۱/۲۱ | | ۱/۸۳ |
| 3+800 | TG-3, TG-4 | TG-1, TG-2, TG-3 | ۰/۵۵ | ۰/۴ | ۲۰/۴۴ | | ۱/۹۰ |



شکل ۵. نمودار ستونی نشست‌های پیش‌بینی شده در مسیر تونل خط ۲ به روش نیمه تجربی

Fig. 5. Column diagram of predicted settlements via semi-empirical method

تخصیص داد.

بر اساس این پارامترها نشست زمین در محدوده مورد مطالعه و در بازه‌های ۵۰ متری محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در جدول ۳ و به صورت نمودار ستونی در شکل ۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر نشست‌های پیش‌بینی شده در نقاط مورد مطالعه، در بازه ۱/۸۳ تا ۲/۰۶ سانتی‌متر متغیر می‌باشد.

مانند قطر و عمق تونل مربوط به خصوصیات هندسی تونل بوده و با دقت کافی قابل محاسبه هستند. مقادیر پارامترهای تجربی V_L و k بر اساس نوع خاک و خصوصیات ژئوتکنیکی آن و با توجه به توصیه‌های محققین قبلی و یافته‌های به دست آمده در این خصوص قابل تخمین می‌باشد. با توجه به این مباحث و بر اساس شرایط زمین‌شناسی مهندسی حاکم بر محدوده مورد مطالعه، می‌توان مقدار $k=0.4$ و همچنین $V_L=0.55\sim 0.6$ را برای مصالح موجود در مسیر تونل (حد فاصل کیلومتر 3+500 تا 3+800)

جدول ۴. ارزیابی نشست به روش تحلیلی لگاناتان و پولوس

Table 4. Evaluation of settlement via analytical (Loghanathan and Polous) method

| شماره نقطه (km) | واحد زمین‌شناسی مهندسی | | پارامترهای مورد نیاز | | | حداکثر نشست پیش‌بینی شده (cm) |
|-----------------|------------------------|------------------|----------------------|-------|-----------|-------------------------------|
| | جبهه کار | روباره | ϕ (°) | ν | Z_0 (m) | |
| 3+500 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۲۶ | ۰/۳۴ | ۲۱/۳ | ۱/۴۱ |
| 3+550 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۲۶ | ۰/۳۴ | ۲۱/۷ | ۱/۴۲ |
| 3+600 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۲۷ | ۰/۳۴ | ۲۰/۹ | ۱/۴۶ |
| 3+650 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۲۸ | ۰/۳۴ | ۲۰/۵۱ | ۱/۴۹ |
| 3+700 | TG-3, TG-4 | TG-2, TG-3 | ۲۷ | ۰/۳۴ | ۲۰/۶۷ | ۱/۵ |
| 3+750 | TG-3, TG-4 | TG-1, TG-2, TG-3 | ۲۶ | ۰/۳۴ | ۲۱/۲۱ | ۱/۴۷ |
| 3+800 | TG-3, TG-4 | TG-1, TG-2, TG-3 | ۲۵ | ۰/۳۴ | ۲۰/۴۴ | ۱/۵۴ |

۶-۲- روش تحلیلی

این روش‌ها بر مبنای تحلیل‌های ریاضی بوده و تغییر شکل ایجاد شده در زمین در اثر حفر تونل را بر اساس تغییرات تنش مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش‌ها عمدتاً فرضیاتی را در نظر می‌گیرند (مانند همگن بودن و تراکم ناپذیر بودن خاک) که در اغلب موارد غیرقابل حصول می‌باشند. روش‌های متعددی در این ارتباط پیشنهاد شده است که می‌توان به روش‌های ورویت و بوکر^۱ [۳۱]، لگاناتان و پولوس^۲ [۳۲]، بابت^۳ [۳۳]، پارک^۴ [۳۴] و ... اشاره کرد.

در این مطالعه از روش لگاناتان و پولوس جهت برآورد نشست استفاده شده است. در این روش میزان جابه‌جایی یک نقطه در سطح زمین بر اساس رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$S = \frac{(1-\nu)H}{H^2 + x^2} (4gR + g^2) \times \exp\left[\frac{-1.38x^2}{(H \times \cot g(45 + \phi/2) + R)^2}\right] \quad (4)$$

در این رابطه پارامترها عبارتند از:

X: فاصله افقی نقطه مورد نظر از محور تونل

R: شعاع تونل

H: عمق تونل (فاصله سطح زمین تا محور)

ν : نسبت پواسون خاک

ϕ : زاویه اصطکاک داخلی خاک

g: پارامتر گپ (Gap)

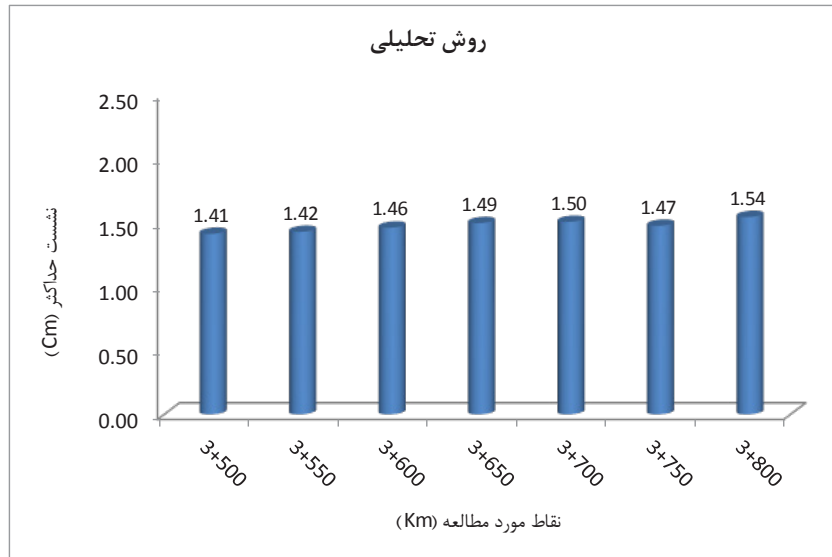
اغلب این پارامترها با توجه به شکل ۴ و جدول ۲ قابل حصول هستند. پارامتر گپ (Gap) بر اساس خصوصیات هندسی سپر و لاینینگ تونل قابل تعیین است. در این مطالعه این پارامتر بر اساس ابعاد هندسی TBM مورد استفاده در حفاری تونل خط ۲ مترو تبریز و همچنین توصیه‌های لی و همکاران^۵ [۳۵]، این پارامتر به میزان $g=0.025$ m تعیین شده است. نشست زمین در اثر حفر تونل مورد مطالعه به روش تحلیلی و با توجه به اطلاعات موجود پیش‌بینی و نتایج آن در جدول ۴ و به صورت نمودارهای میله‌ای (نشان دهنده نشست حداکثر) در شکل ۶ و به صورت گودی‌های نشست در مقاطع عرضی در شکل ۷ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر نشست در بازه ۱/۴۱ تا ۱/۵ سانتی‌متر پیش‌بینی شده‌اند.

۶-۳- روش‌های عددی

نرم‌افزار انتخاب شده برای این تحقیق نرم‌افزار FLAC 2D می‌باشد

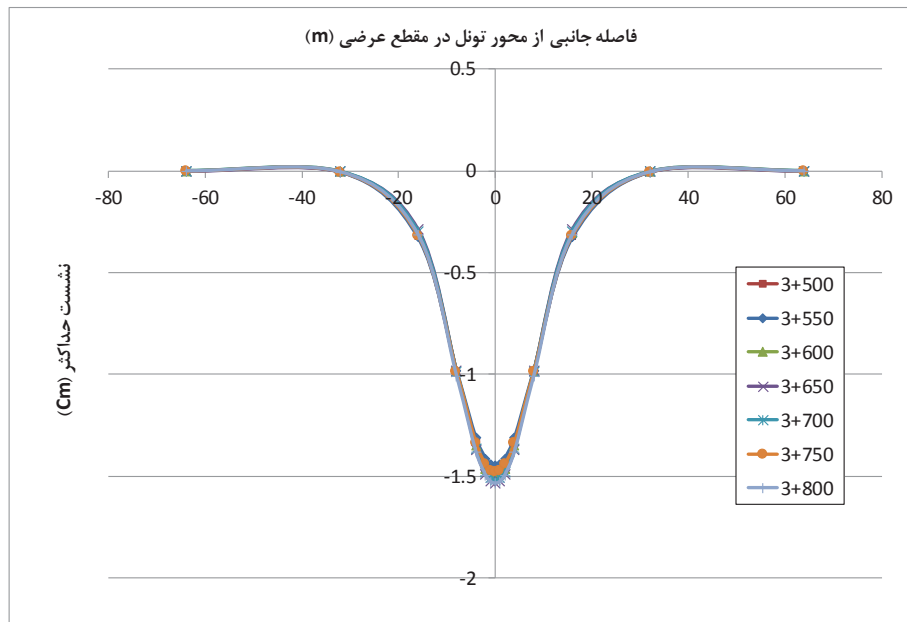
- 1 Verruijt and Booker
- 2 Loganathan and Poulos
- 3 Bobet
- 4 Park

5 Lee et al.



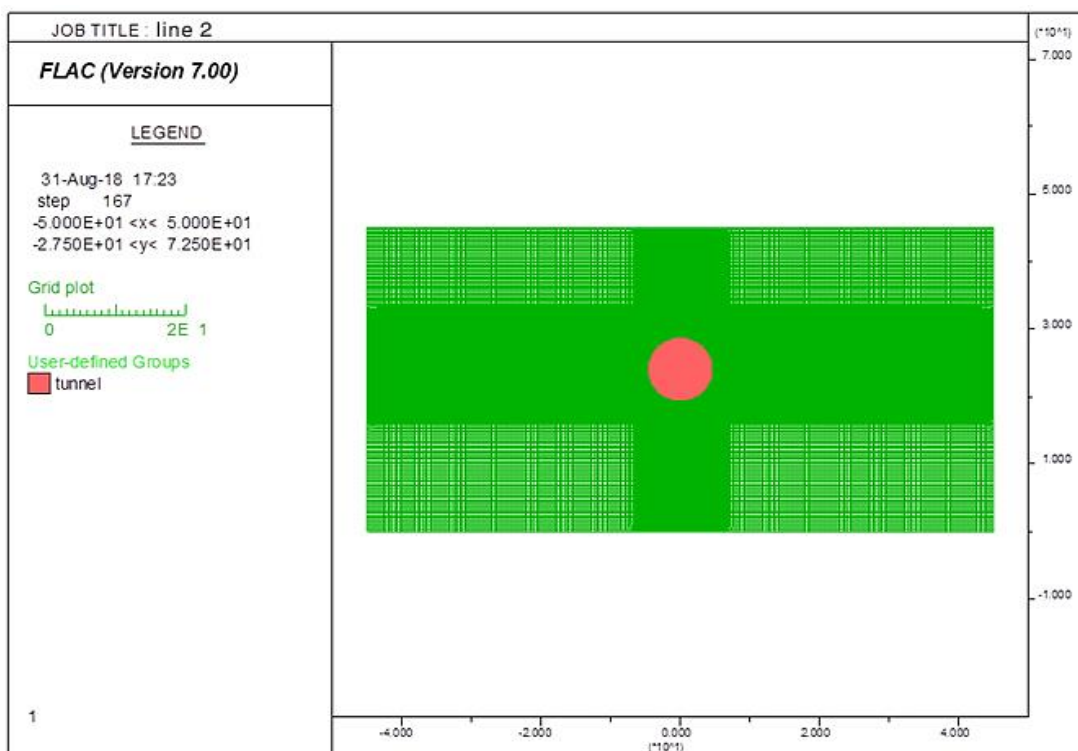
شکل ۶. نمودار ستونی نشست‌های پیش‌بینی شده در مسیر تونل خط ۲ به روش تحلیلی

Fig. 6. Column diagram of predicted settlements via analytical method



شکل ۷. منحنی‌های گودی نشست (ارزیابی شده به روش تحلیلی لگاناتان و پولوس) در مقاطع عرضی

Fig. 7. Troughs of the settlements evaluated via analytical method in transverse section



شکل ۸. هندسه مدل ساخته شده

Fig. 8. Geometry of constructed model

مراحل مدل سازی عددی با این برنامه به ترتیب زیر است:

- انتخاب محدوده مناسبی از توده خاک اطراف تونل
- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
- اعمال شرایط مرزی و تنش اولیه
- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری
- حفر تونل و حل مدل تا رسیدن به تعادل
- نصب المان‌های نگهداری (پوشش بتنی تونل)
- حل نهایی مدل‌ها و دریافت و تحلیل نتایج

۶-۳-۱ روند مدل سازی عددی

شبکه بندی و ایجاد تونل و زمین اطراف آن، اولین گام در ایجاد هندسه مدل می باشد. ابعاد مدل ساخته شده برای این منطقه در راستای طولی (راستای X) برابر ۹۰ متر، در راستای قائم (راستای Y) برابر ۴۵ متر می باشد. انتخاب این ابعاد با توجه به روش به کار گرفته شده توسط شیرزه حق و علیایی [۴۰] صورت گرفته است. در شکل ۸ نمایی از هندسه مدل ساخته شده نشان داده شده است. در این مدل تونل به قطر ۹/۴۹ متر مدل سازی

که تحلیل‌ها را بر اساس روش تفاضل انجام می دهد. این نرم افزار با توجه به امکانات و قابلیت‌های بالا، مدل سازی کارآ، تحلیل دقیق و نیز سرعت عمل در محاسبات عمومیت زیادی یافته است و یکی از پرکاربردترین نرم افزارها می باشد.

لازم به ذکر است که اثر حفر تونل بر نشست سطحی و سازه‌های 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 دو بعدی شبیه سازی عددی می شود. در این نوع تحلیل با در نظر گرفتن فرض کرنش صفحه‌ای، از روش‌های 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 توصیه‌ها و روش‌های به کار رفته توسط خلج زاده و آزادی [۳۶]، باغبان گل پسند و همکاران [۳۸ و ۳۷]، دو و همکاران [۳۹] مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اصول مدل سازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی،

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 نشان دهنده به تعادل رسیدن مدل است.

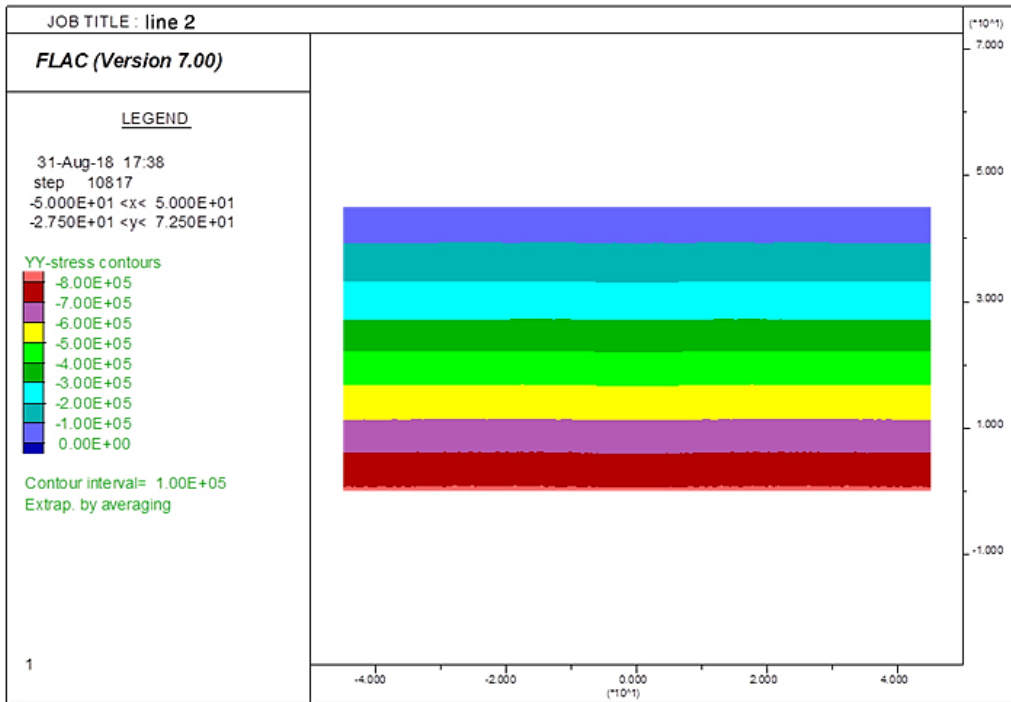
حفاری تونل

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 جابه‌جایی 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 جابه‌جایی 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 جابه‌جایی 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 جابه‌جایی به میزان $S_{max} = 1\text{cm} \sim 2\text{cm}$ به دست آمده است. همچنین با توجه به این شکل مقداری بالا زدگی در کف تونل ملاحظه می‌شود. مطالعات محققین مختلف نشان داده است که علت این موضوع استفاده از مدل رفتاری موهر-کلمب بوده و با توجه به وزن لاینینگ بتنی تونل قابل جبران می‌باشد [۴۱]. در شکل ۱۲ روند جابه‌جایی نقطه‌ای که دقیقاً در بالای محور تونل و در سطح زمین انتخاب گردیده است، نشان داده می‌شود. ملاحظه می‌شود که حداکثر جابه‌جایی 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 می‌باشد، لذا نقاط مشخصی در سطح زمین انتخاب شده و جابه‌جایی آن‌ها پس از اتمام حل مدل مورد مطالعه دقیق‌تر قرار گرفته است. اشکال ۱۲ و ۱۳ از تفسیر و تحلیل جابه‌جایی این نقاط حاصل شده است. در شکل ۱۳ منحنی گودی نشست در مقطع عرضی که بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی به دست

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 مربع 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 جابه‌جایی افقی نقاط واقع بر مرزهای سمت چپ و راست در راستای محور X و همچنین جابه‌جایی 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 پیش فرض‌های 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 هر گونه 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 جریانی 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 کیلوپاسکال فرض می‌شود. این بار به صورت بار گسترده یکنواخت در طراحی مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

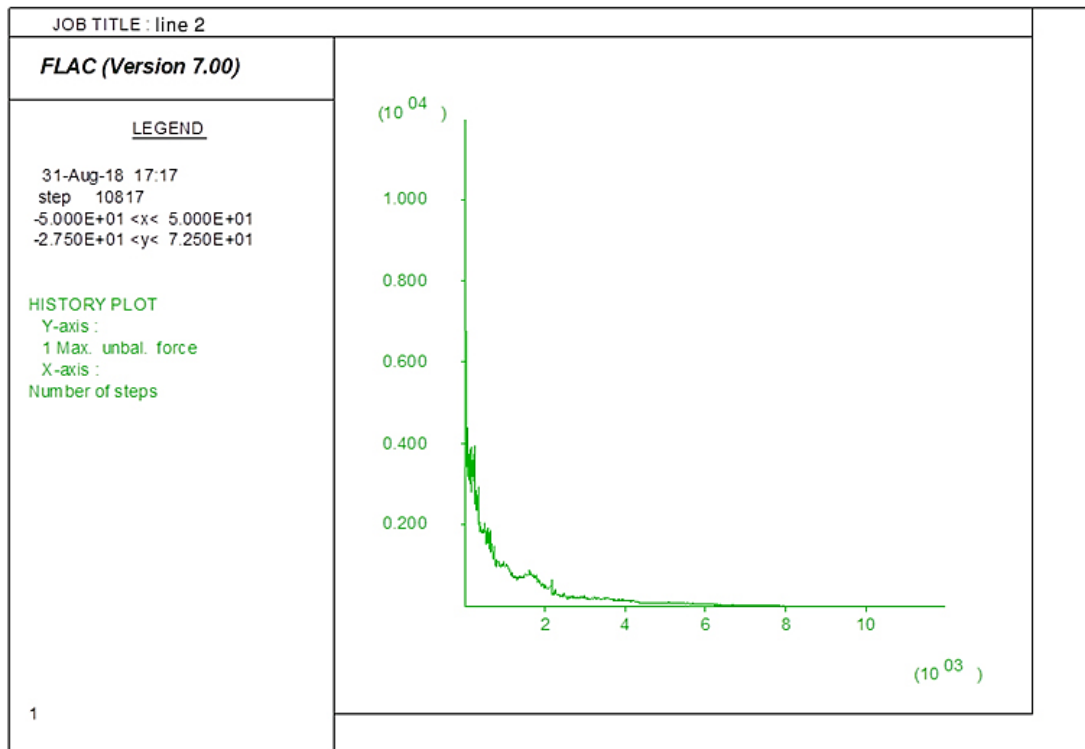
مدل رفتاری

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 می‌باشد و می‌تواند در مواد دانه‌ای شکل، سیمان، خاک، سنگ و بتن مورد استفاده قرار گیرد. این مدل در تحلیل پایداری سازه‌های زیر زمینی، با توجه به ماهیت مسئله و یافته‌های آزمایشگاهی، نتایج 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 از قبیل دراگر پراگر نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند اما به علت در دسترس نبودن پارامترهای مورد نیاز، از مدل مذکور استفاده نشده است.



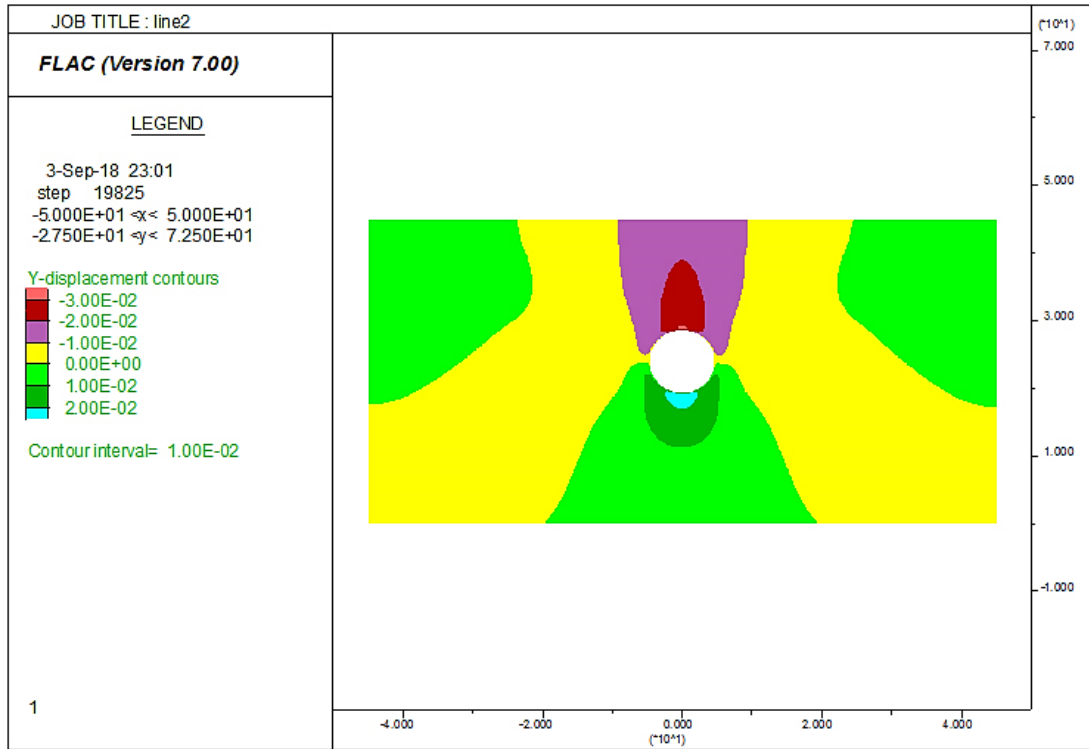
شکل ۹. وضعیت تنش‌های برجا پس از حصول تعادل اولیه

Fig. 9. Status if in-situ stresses after creation of initial equilibrium



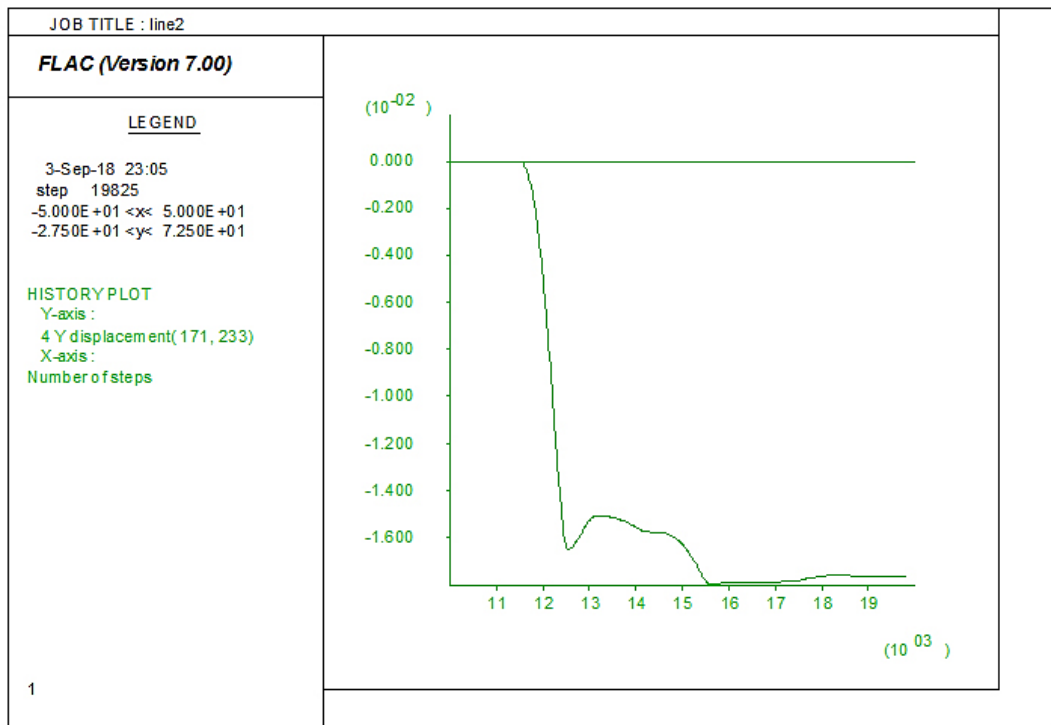
شکل ۱۰. ایجاد تعادل اولیه با کاهش نیروهای نامتعادل کننده

Fig. 10. Creation of initial equilibrium with decreasing of unbalanced forces



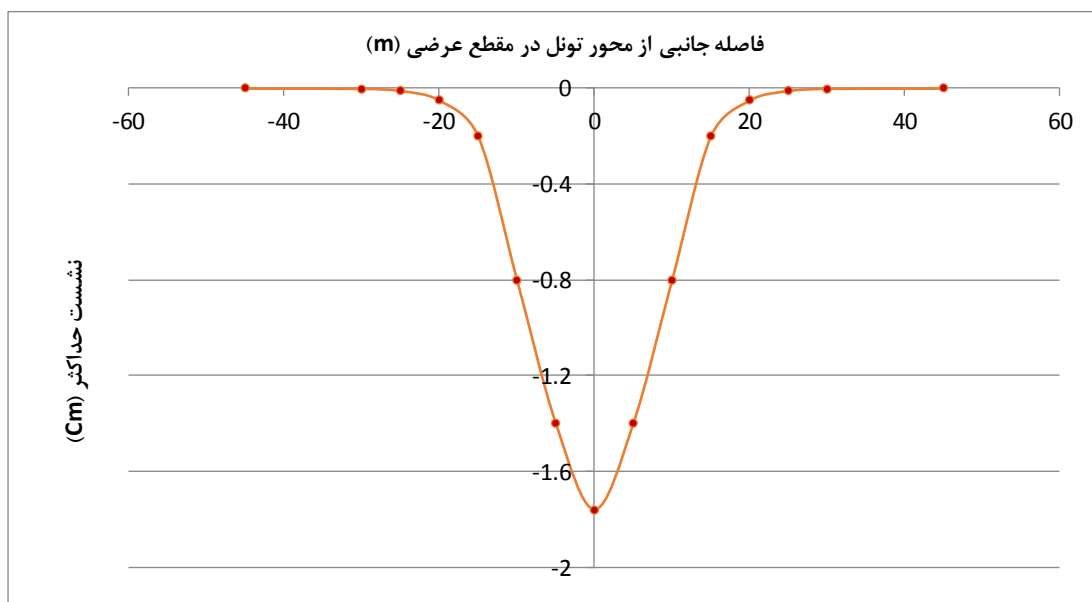
شکل ۱۱. کنتور جابه‌جایی در جهت قائم در اثر حفاری تونل

Fig. 11. Contours of vertical displacements resulted from tunnel excavation



شکل ۱۲. هیستوری جابه‌جایی در سطح زمین در بالای محور تونل

Fig. 12. History of the displacement of ground surface, above the tunnel axis



شکل ۱۳. پروفیل نشست در سطح زمین در مقطع عرضی حاصل از مدل‌سازی عددی

Fig. 13. Profile of ground settlement in transverse section, obtained from numerical modeling

۶-۴- نتایج نشست‌های واقعی (اندازه‌گیری شده)

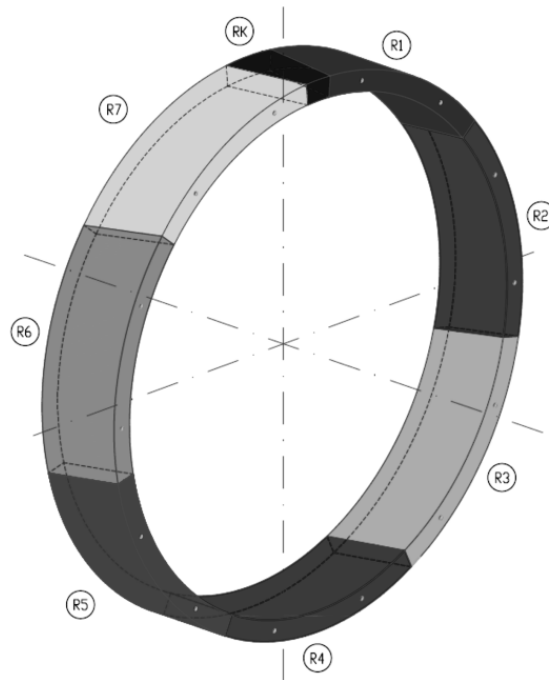
در مطالعه حاضر همزمان با حفاری تونل خط ۲ مقدار نشست ایجاد شده در زمین اندازه‌گیری و ثبت شده است. در این راستا بر اساس توصیه‌های دانیکلیف و گرین^۱ نقاطی بر روی زمین مشخص شده و میزان جابه‌جایی قائم آن‌ها با استفاده از ابزارهای دقیق و روش‌های نقشه برداری اندازه‌گیری شده است [۴۶]. نام نقاط بر اساس کیلومتر آن‌ها انتخاب و در جداول و نمودارها درج شده است. در طی این عملیات، مقدار نشست نهائی (S_{max}) هر کدام از نقاط فوق ثبت و به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل ۱۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در طول مسیر در محدوده تقریبی بین ۱ تا ۲ سانتی‌متر هستند که به عنوان نشست‌های عادی زمین در نقاط مزبور تلقی می‌شوند. شایان ذکر است که در مطالعات حاضر با توجه به محدودیت‌های موجود، تنها پارامتر نشست حداکثر (S_{max}) ایجاد شده در سطح زمین (اندازه‌گیری شده دقیقاً در بالای محور تونل) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

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 [۴۴-۴۲] مد نظر قرار گرفته است که در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین جهت مدل‌سازی سگمنت‌ها از توصیه‌های دو و همکاران

[۴۵] استفاده شده است.



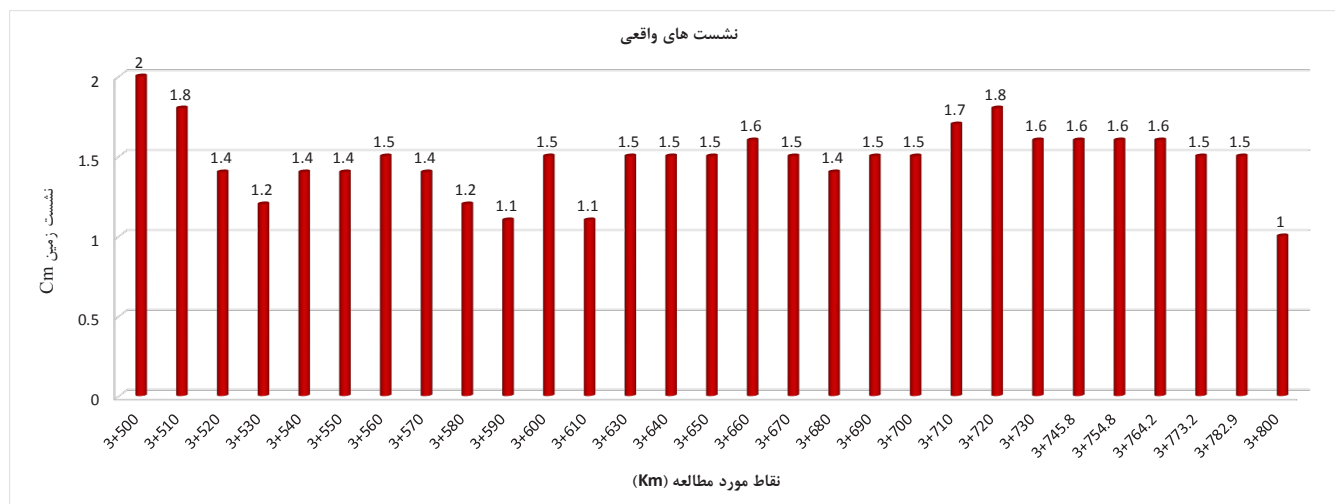
شکل ۱۴. طرح سه بعدی رینگ سگمنتال تونل مورد مطالعه

Fig. 14. Three dimensional feature of segmental ring of study tunnel

جدول ۵. خصوصیات سگمنت و تزریق پشت سگمنت (شرایط الاستیک)

Table 5. Characteristics of segment and back grout (elastic condition)

| 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 | دانسیتته - γ (kN/m ³) |



شکل ۱۵. مقادیر نشست واقعی اندازه‌گیری شده در محدوده مورد مطالعه

Fig. 15. Real settlements measured through the studied part of tunnel

تحت عنوان GIBV پیشنهاد شده است که در محیط نرم‌افزار GIS اقدام به تعیین رده آسیب‌پذیری ساختمان‌ها شده و تمهیدات مورد نیاز در این خصوص اندیشیده می‌شود. بر اساس معیار اخیر و نیز معیارهای ذکر شده در قبل و همچنین با توجه به بررسی ساختمان‌های موجود در مسیر تونل خط دو مترو تبریز، نشست قائم زمین تا ۲ سانتی‌متر، محدوده مجاز در نظر گرفته شده است که بر این اساس و با توجه به شکل ۱۵، نشست غیرمجاز در محدوده مورد مطالعه ثبت نگردیده است.

۷- مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف

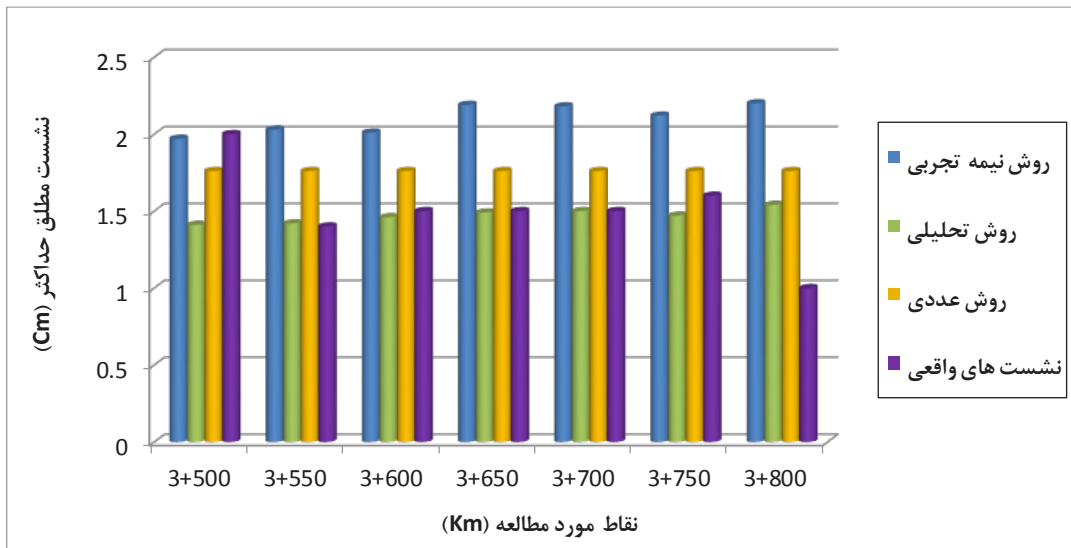
مقایسه نشست‌های به دست آمده از روش‌های تحلیلی، نیمه تجربی و عددی با نشست‌های واقعی در شکل ۱۶ و میزان اختلاف آن‌ها با نشست‌های واقعی هم به صورت کمی و هم به صورت درصدی در جدول ۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده برای نشست زمین در اثر حفر تونل خط ۲ مترو تبریز، توسط روش‌های تحلیلی و عددی نزدیک به نشست‌های واقعی بوده اما نشست‌های پیش‌بینی شده با استفاده از روش نیمه تجربی پک، بیشتر از مقادیر نشست‌های واقعی می‌باشد. علت اصلی این امر را می‌توان به عدم دخیل بودن پارامترهای حفاری مکانیزه از قبیل فشار جبهه کار و فشار تزریق پشت سگمنت در روش نیمه تجربی (که تأثیر زیادی در کنترل نشست زمین دارند) نسبت داد.

همچنین در مورد روش‌های تحلیلی و عددی و سازگاری نشست‌های

۴-۱- نشست مجاز

در این مبحث مناسب است تا اشاره‌ای به میزان مجاز نشست زمین در اثر حفر تونل گردیده و محدوده آن تعریف گردد. واقعیت این است که مقدار مجاز این نوع نشست بر اساس شرایط موجود در سطح زمین و به ویژه نوع ساختمان‌ها و تاسیسات موجود در آن تعیین می‌شود. به عبارت دیگر نشست زمین در اثر حفر تونل زمانی اهمیت مضاعف پیدا می‌کند که سازه‌ها و تاسیسات سطحی و زیرسطحی زمین در محدوده تأثیر جابه‌جایی ناشی از حفر تونل قرار گرفته و ایجاد آسیب به آن‌ها محتمل باشد. با توجه به این موضوع لازم است تا در کنار مقدار نشست زمین، میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها نیز مشخص گردد. معیارهای مختلفی بدین منظور ارائه گردیده است که از جمله می‌توان به معیارهای بورلند^۱ و همکاران، رانکین و چیریوتی^۲ و همکاران اشاره نمود [۲۵]. با توجه به اهمیت موضوع و گسترش روز افزون حفر تونل‌های شهری مطالعات گسترده‌ای در این خصوص انجام شده که از جمله آخرین و کامل‌ترین آن‌ها می‌توان به مطالعه پیکولو^۳ و همکاران اشاره نمود [۴۷]. در این مقاله با تلفیق دو پارامتر میزان جابه‌جایی زمین که تحت عنوان تأثیر زمین (GI^۴) خوانده می‌شود و آسیب‌پذیری ساختمان (BV^۵) روشی

- 1 Burland
- 2 Chiriotti
- 3 Piciullo
- 4 Ground Impact
- 5 Building Vulnerability



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر نشست حاصل از سه نوع روش پیش بینی با نشست های واقعی

Fig. 16. Comparison of the evaluated settlements with real settlements

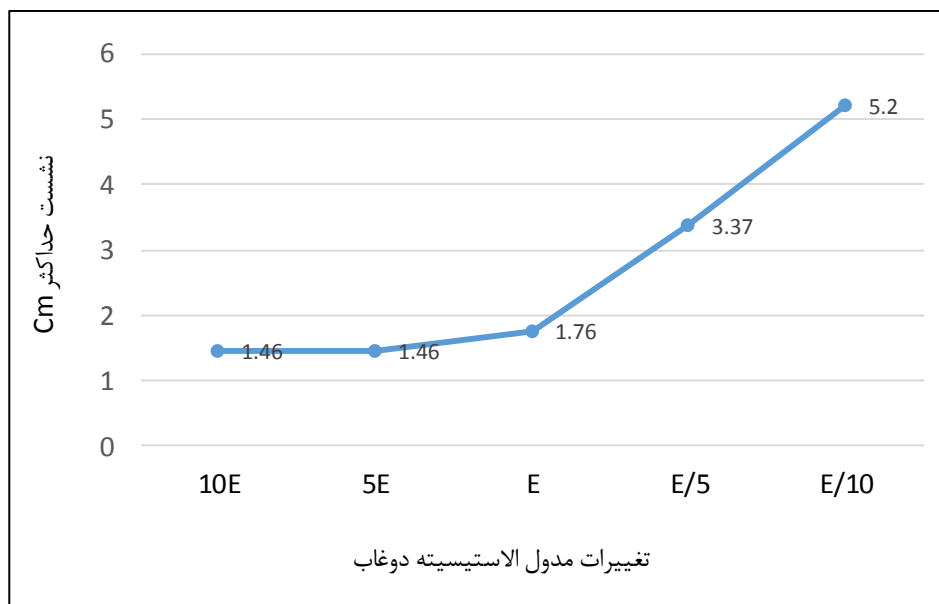
جدول ۶. مقایسه کمی نشست های به دست آمده از روش های مختلف

Table 6. Quantitative comparison of the settlements obtained via several methods

| نشست های واقعی | نشست های پیش بینی شده | | | روش ارزیابی |
|----------------|-----------------------|--------|------------|------------------------------------|
| | عددی | تحلیلی | نیمه تجربی | |
| ۱/۶ | ۱/۷ | ۱/۵ | ۱/۹ | مقدار (cm) |
| ۰ | ۶/۲۵ | -۶/۲۵ | ۱۸/۷۵ | درصد اختلاف نسبت به نشست های واقعی |

البته این سخن بدان معنا نیست که روش های نیمه تجربی و تحلیلی به طور کامل نادیده گرفته شده اند اما با توجه به قابلیت ها و امکانات وسیع نرم افزارهای عددی در مدل کردن انواع شرایط حاکم بر محیط تونل و مخصوصا امکان بررسی تاثیرپذیری میزان نشست زمین با تغییر در هر کدام از پارامترهای مرتبط با آن (این موضوع به ویژه در مراحل اجرایی حفر تونل بسیار حائز اهمیت می باشد)، روش های عددی به عنوان رکن اصلی مطالعات ارزیابی نشست زمین در اثر حفر تونل مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه این مبحث و به عنوان یک بخش تکمیلی، با توجه به اهمیت موضوع تاثیر عوامل مختلف بر میزان نشست زمین و جهت تبیین قابلیت های موجود در

پیش بینی شده با نشست های واقعی می توان به این نکته اشاره کرد که این دو روش پارامترها و خصوصیات بیشتری از خاک و تونل را برای پیش بینی نشست مورد استفاده قرار می دهند و بنابراین شرایط محیطی را به صورت کامل تری شبیه سازی کرده و به تبع آن نتایج واقعی تری را در پی خواهند داشت. این موضوع به ویژه در مورد روش عددی، به دلیل دخیل بودن پارامترهای بیشتری از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک و همچنین هندسه و موقعیت تونل و نیز سطح آب زیرزمینی در روند مدل سازی، بیشتر صدق می کند. با توجه به این موضوع استفاده از این روش در پیش بینی نشست زمین در اثر حفر تونل به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۱۷. تغییرات جابه‌جایی‌ها با تغییر مدول الاستیسیته دوغاب

Fig. 17. Change of displacements against the change of the elasticity modulus of grout

کاهش یافته است. همچنین با کاهش مدول الاستیسیته تا میزان یک دهم مقدار اولیه، مقدار جابه‌جایی تا ۱۹۵ درصد (حدود سه برابر) بیشتر شده است. شایان ذکر است که با توجه به حالت فیزیکی دوغاب در زمان تزریق (شرایط مایع) و امکان سفت‌شدگی سریع پس از آن در پشت سگمنت، نسبت‌های ده برابری در نظر گرفته شده برای مدول الاستیسیته آن دور از ذهن نبوده و منطقی می‌باشد.

۸-۲- بار ساختمان‌های سطحی

یکی از عواملی که وجود آن‌ها، اهمیت و حساسیت نشست در سطح زمین را بالا می‌برد، وجود ساختمان‌ها در سطح زمین می‌باشد. در مدل‌سازی‌ها، معمولاً برای مدل کردن بار ساختمان‌ها، مقدار بار برای هر ساختمان یک طبقه را حدود ۱۰ کیلوپاسکال در نظر می‌گیرند. در این مدل‌سازی حالت‌های عدم وجود ساختمان‌ها و همچنین وجود ساختمان ۴ طبقه بررسی شده و نتایج در شکل ۱۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش بار سطحی از ۲۰ به ۴۰ کیلوپاسکال مقدار نشست در سطح زمین به اندازه ۱۲ درصد بیشتر می‌شود.

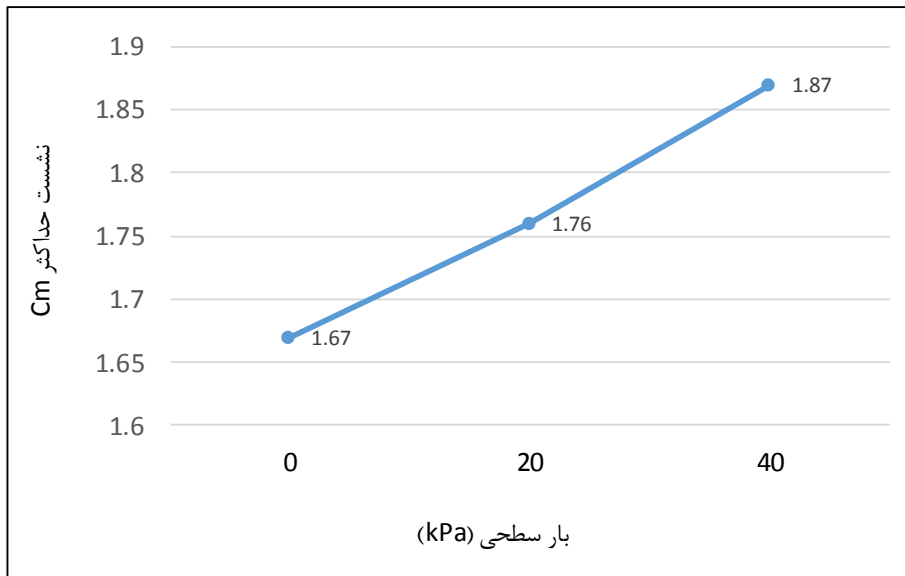
روش‌های عددی (برنامه FLAC) و امکان بررسی تاثیر عوامل مذکور توسط این برنامه، آنالیز حساسیت بر روی تعدادی از پارامترهای استفاده شده توسط برنامه مذکور انجام شده است.

۸-۱- تاثیر عوامل مختلف بر نشست در روش‌های عددی

در این بخش از مطالعه حاضر به بررسی تاثیر تغییرات رخ داده در مقدار نشست زمین در اثر کم و زیاد شدن تعدادی از پارامترهای موثر بر نشست زمین پرداخته می‌شود.

۸-۱- خصوصیات دوغاب

تزریق دوغاب پشت سگمنت یکی از پارامترهای مهم در حین حفاری تونل می‌باشد به طوری که عدم تزریق به موقع باعث افزایش نشست در سطح زمین می‌شود. در این مدل‌سازی برای بررسی تاثیر خصوصیات گروت تزریقی، اقدام به مدل‌سازی عددی گروت تزریقی با مدول الاستیسیته متفاوت شده است. همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است با افزایش مقدار مدول الاستیسیته دوغاب به اندازه ۱۰ برابر مقدار جابه‌جایی ۱۷ درصد



شکل ۱۸. تغییرات جابه‌جایی‌ها با تغییر بار سطحی

Fig. 18. Change of displacements against the change of the surface load

۸-۳- مدول الاستیسیته خاک

برای بررسی تاثیر خصوصیات زمین‌شناسی بر روی نشست سطح زمین، از بین پارامترهای تاثیرگذار بر نشست سطح زمین، تاثیر مدول الاستیسیته لایه‌های خاک مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تاثیر این پارامتر مدول الاستیسیته خاک دو و سه برابر شده است. نتایج حاصله نشان دهنده این است که با افزایش مدول الاستیسیته خاک به میزان دو برابر مقدار قبلی، مقدار جابه‌جایی در سطح زمین ۴۳ درصد کاهش یافته است (شکل ۱۹). اما این کاهش خطی نبوده و با افزایش مدول الاستیسیته خاک به سه برابر مقدار قبلی، نشست به ۵۲ درصد حالت اولیه کاهش پیدا کرده است. با توجه به جدول ۲، ملاحظه می‌گردد که تغییرات مقدار مدول الاستیسیته در واحدهای خاکی TG-1 تا TG-4، به طور میانگین بین ۲۰ تا ۵۰ مگاپاسکال بوده و بنابراین اعمال تغییرات ۲ الی ۳ برابری در این پارامتر منطقی به نظر می‌رسد.

۸-۴- سطح آب زیرزمینی

در مدل اصلی سطح آب زیرزمینی تقریباً هم سطح با تاج تونل (۱۶ متر) می‌باشد. برای بررسی تاثیر عمق سطح آب زیرزمینی بر روی تونل اقدام به ساخت مدل با سطح آب زیرزمینی در عمق‌های ۰ و ۲۱ متری (عمق آب در سطح زمین و عمق آب در محور تونل) شده است. همان‌طور که از شکل

۲۰ مشخص است، با افت سطح آب زیرزمینی از سطح زمین تا تاج تونل (به اندازه ۱۶ متر)، نشست به اندازه ۸۱/۲۵ درصد افزایش نشست اتفاق افتاده است اما با افت بیشتر سطح آب تا محور تونل (به اندازه ۵ متر)، نشست زمین ۴۰ درصد و به صورت غیرخطی افزایش پیدا کرده است. لازم به ذکر است که در شرایط عادی (مستقل از تونل) اصولاً با افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست زمین اتفاق می‌افتد اما این پدیده به صورت پیوسته و وابسته به زمان بوده و در مطالعه حاضر مدنظر قرار نگرفته است. در این مطالعه برای بررسی تاثیر این پارامتر، سه مدل مختلف با سطوح آب متفاوت ساخته شده و نشست ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

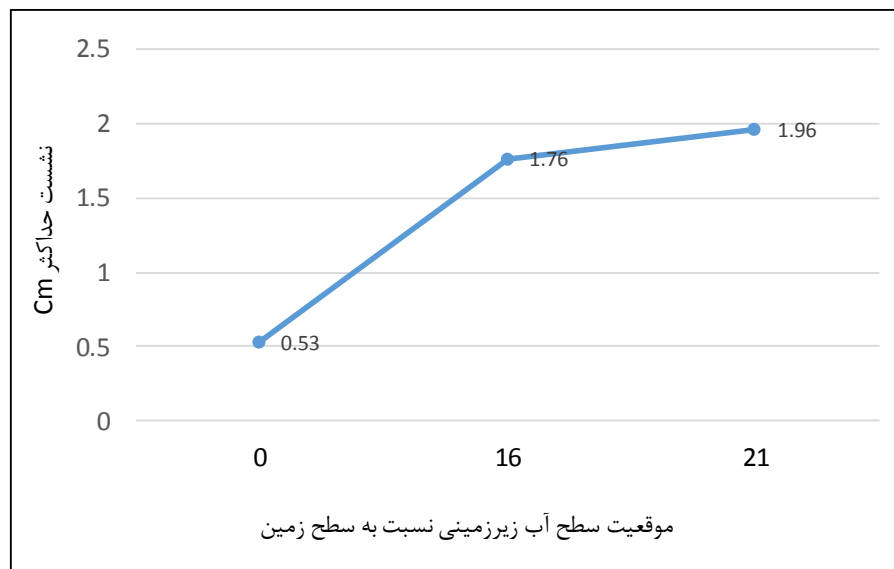
۹- نتیجه‌گیری

نشست زمین در اثر حفر تونل به ویژه در مناطق شهری از اهمیت و حساسیت بالایی برخوردار است. در مطالعه حاضر نشست زمین ناشی از حفر تونل خط ۲ مترو تبریز با روش‌های مختلف مورد ارزیابی (پیش‌بینی) قرار گرفته و نتایج به دست آمده با نشست‌های واقعی ایجاد شده در سطح زمین که همزمان با حفر تونل اندازه‌گیری شده‌اند، مقایسه گردیده و تاثیر پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر نشست سطح زمین بررسی شده است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده از دو روش تحلیلی و عددی



شکل ۱۹. تغییرات جابه‌جایی‌ها با تغییر مدول الاستیسیته خاک

Fig. 19. Change of displacements against the change of the elasticity modulus of soil



شکل ۲۰. نمودار تغییرات مقدار جابه‌جایی‌ها با تغییر موقعیت سطح آب زیرزمینی

Fig. 20. Change of displacements against the change of the water table

منابع

- [1] K. Terzaghi, Rock Tunneling with Steel Supports, Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, 1946.
- [2] R.B. Peck, Deep excavation and tunneling in soft ground, in: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969, pp. 225-290.
- [3] M.P. O'reilly, B.M. New, settlements above tunnels in the united kingdom - their magnitude and prediction, in: Tunnelling 82. Papers presented at the third International Symposium, organized by the Institution of Mining and Metallurgy., 1982, pp. 173-181.
- [4] P.B. Attewell, J. Yeates, A.R. Selby, Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, (1986).
- [5] R.J. Mair, R. Taylor, Bored tunnelling in the urban environments, in: Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceedings International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1999.
- [6] C. Zhu, S. Wang, S. Peng, Y. Song, Surface settlement in saturated loess stratum during shield construction: Numerical modeling and sensitivity analysis, Tunnelling Underground Space Technology, 119 (2022) 104205.
- [7] X. Hu, C. He, G. Walton, Y. Fang, J.W. Ju, Response of sandy soil to the volume losses at the tunnel face level, Soils Foundations, 61(5) (2021) 1399-1418.
- [8] T. Xu, A. Bezuijen, M. Thewes, Pressure infiltration characteristics of foam for EPB shield tunnelling in saturated sand – part 2: soil-foam mixture, Géotechnique, 72(4) (2022) 295-308.
- [9] S.C. Möller, Tunnel induced settlements and structural forces in linings, Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik Stuttgart, Germany, 2006.
- [10] R. Mair, Tunnelling and geotechnics: new horizons, Géotechnique, 58(9) (2008) 695-736.
- [11] N. Loganathan, An innovative method for assessing tunnelling-induced risks to adjacent structures, Parsons Brinckerhoff Incorporated, 2011.

مطابقت بیشتری با نشست‌های واقعی دارند اما مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش نیمه تجربی بیشتر از مقادیر نشست واقعی است. در ارتباط با دلایل این موضوع همان گونه که قبلاً اشاره گردید، عدم دخیل بودن پارامترهای حفاری مکانیزه از قبیل فشار جبهه کار و فشار تزریق پشت سگمنت و نیز نادیده گرفته شدن تاثیر بخش عمده‌ای از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک در روش نیمه تجربی علت اصلی این موضوع قلمداد می‌شوند. همچنین در ارتباط با سازگاری مقادیر به دست آمده از روش‌های تحلیلی و عددی با نشست‌های واقعی، به نظر می‌رسد استفاده از پارامترهای بیشتری از خاک و تونل (اعم از پارامترهای ژئوتکنیک و همچنین خصوصیات هندسی) که منجر به شبیه‌سازی واقعی‌تری از محیط می‌شود، باعث این موضوع شده است. با توجه به این موضوع استفاده از روش‌های تحلیلی و به ویژه عددی ارجحیت بیشتری نسبت به روش نیمه تجربی خواهند داشت و بین این دو روش نیز روش عددی با توجه به دخالت دادن پارامترهای بیشتری از تونل و مصالح دربرگیرنده آن و همچنین شرایط محیطی از جمله سطح آب زیرزمینی، دارای امتیاز بالاتری می‌باشد. در همین ارتباط و به عنوان بحث تکمیلی، با توجه به اهمیت موضوع تاثیر عوامل مختلف بر میزان نشست زمین در اثر حفر تونل و جهت تبیین قابلیت‌های موجود در روش‌های عددی (برنامه FLAC) و امکان بررسی تاثیر عوامل مذکور توسط این برنامه، آنالیز حساسیت بر روی تعدادی از پارامترهای استفاده شده توسط برنامه مذکور انجام گرفته و نتایج زیر به دست آمد:

- با افزایش مقدار مدول الاستیسیته دوغاب تا حدود ۱۰ برابر مقدار جابه‌جایی حدود ۱۷ درصد کاهش یافته است. همچنین با کاهش مدول الاستیسیته دوغاب تا میزان یک دهم مقدار اولیه، مقدار جابه‌جایی تا ۱۹۵ درصد (حدود سه برابر) بیشتر شده است.
- با افزایش بار سطحی از ۲۰ به ۴۰ کیلوپاسکال مقدار نشست در سطح زمین حدود ۱۲ درصد بیشتر می‌شود.
- با افزایش مدول الاستیسیته خاک به میزان دو برابر مقدار قبلی، مقدار جابه‌جایی در سطح زمین حدود ۳۹ درصد و با افزایش این پارامتر به میزان سه برابر مقدار قبلی، مقدار جابه‌جایی در سطح زمین حدود ۵۲ درصد کاهش یافته است.
- با افت سطح آب زیرزمینی از سطح زمین تا تاج تونل (به اندازه ۱۶ متر)، نشست به اندازه ۸۱/۲۵ درصد افزایش نشست اتفاق افتاده است اما با افت بیشتر سطح آب تا محور تونل (به اندازه ۵ متر)، نشست زمین ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

- [22] M.R. Baghban Golpasand, M.R. Nikudel, A. Uromeihy, 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 the Environment*, 75(2) (2016) 485-501.
- [23] M.R. Baghban Golpasand, M. Nikudel, A. Uromeihy, Effect of Engineering Geological Factors on the Parameters Associated with the Empirical Study of Ground Settlement due to Excavation of Abuzar Tunnel, Tehran, *Journal of Engineering Geology*, 10(3) (2017) 3559-3586.
- [24] A.H. Rezaei, M. Ahmadi-adli, The Volume Loss: Real Estimation and Its Effect on Surface Settlements Due to Excavation of Tabriz Metro Tunnel, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3) (2020) 2663-2684.
- [25] V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab, S. Xu, *Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control*, CRC Press, 2008.
- [26] W.J. Rankin, Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects, *Engineering Geology Special Publications*, 5(1) (1988) 79-92.
- [27] M.R. Baghban Golpasand, M. Nikudel, A. Uromeihy, Predicting the occurrence of mixed face conditions in tunnel route of Line 2 Tabriz metro, Tabriz, Iran, in: *Global View of Engineering Geology*, 2013, pp. 487-492.
- [28] ITP_Consulting_Engineering_Company, *Engineering geological profile of tunnel route from west shaft to S04 station*, 2017.
- [29] W.G. No, *International Tunnelling Association, Guidelines for the design of shield tunnel lining*, *Tunnelling Underground Space Technology*, 15(3) (2000) 303-331.
- [30] DAUB, *Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines*, in: *Tunnel 1997*, pp. 20-35.
- [31] A. Verruijt, J. Booker, Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane, *Geotechnique*, 48(5) (1998) 709-713.
- [32] N. Loganathan, H.G. Poulos, *Tunneling Induced Ground Deformation and their Effect on Adjacent Piles*, [12] V. Fargnoli, D. Boldini, A. Amorosi, TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: The case of the new Milan underground line 5, *unnelling Underground Space Technology*, 38 (2013) 336-347.
- [13] Y.-S. Fang, C.-T. Wu, S.-F. Chen, C. Liu, An estimation of subsurface settlement due to shield tunneling, *Tunnelling underground space technology*, 44 (2014) 121-129.
- [14] M. Powers, *Structural Reliability Analysis of Tunneling-Induced Ground Settlement and Damage to Adjacent Buildings: A Case Study using Moment Methods and FLAC2D*, 2017.
- [15] A. Hamrouni, D. Dias, X. Guo, Behavior of Shallow Circular Tunnels—Impact of the Soil Spatial Variability, *Geosciences*, 12(2) (2022) 97.
- [16] A.H. Rezaei, M. Shirzehhagh, M.R. Baghban Golpasand, EPB tunneling in cohesionless soils: A study on Tabriz Metro settlements, *Geomechanics Engineering*, 19(2) (2019) 153-165.
- [17] H. Katebi, A. Rezaei, M. Hajjalilue-Bonab, A. Tarifard, Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM), *Tunnelling Underground Space Technology*, 49 (2015) 67-78.
- [18] M.R. Baghban Golpasand, Evaluation of the effect of Engineering Geological characteristics of soil on ground settlement induced by shallow Tunneling in urban area (in Persian), *Tarbiat Modares University*, Tehran, Iran, 2015.
- [19] M.R. Baghban Golpasand, M.R. Nikudel, A. Uromeihy, Effect of engineering geological characteristics of Tehran's recent alluvia on ground settlement due to tunneling, *Geopersia*, 4(2) (2014) 185-199.
- [20] L. Nikakhtar, S. Zare, H. Mirzaei Nasirabad, Global Sensitivity Analysis in the Surface Settlement Prediction Caused by Mechanized Tunneling, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(6) (2021) 15-15.
- [21] R.J. Mair, R.N. Taylor, A. Bracegirdle, Subsurface settlement profiles above tunnels in clays, *Géotechnique* 43(2) (1993) 315-320.

- Induced Settlements, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(12) (2022) 5-5.
- [41] E. Farrokh, Face Pressure Evaluation in Serviceability Limit State, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(8) (2021) 24-24.
- [42] G.B. Golpasand, M. Farzam, S. Soleymani Shishvan, Experimental and numerical investigation of the effect of steel fiber on fiber reinforced concrete under multiaxial compression, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(6) (2021) 23-23.
- [43] G.B. Golpasand, M. Farzam, S.S. Shishvan, Concrete, FEM investigation of SFRCs using a substepping integration of constitutive equations, Computers and Concrete, 25(2) (2020) 181-192.
- [44] G.B. Golpasand, M. Farzam, S.S. Shishvan, Behavior of recycled steel fiber reinforced concrete under uniaxial cyclic compression and biaxial tests, Construction and Building Materials, 263 (2020) 120664.
- [45] N.A. Do, D. Dias, P. Oreste, Numerical investigation of segmental tunnel linings-comparison between the hyperstatic reaction method and a 3D numerical model, Geomechanics and Engineering, 14(3) (2018) 293-299.
- [46] J. Durnieliff, Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, John Wiley & Sons, 1993.
- [47] L. Piciullo, S. Ritter, A.O.K. Lysdahl, J. Langford, F. Nadim, Assessment of building damage due to excavation-induced displacements: The GIBV method, Tunnelling and Underground Space Technology, 108 (2021) 103673.
- in: Proceeding of 10th Australian Tunneling Conf, Melbourne, Victoria, 1999, pp. 1-34.
- [33] A. Bobet, Analytical Solutions for Shallow Tunnels in Saturated Ground, Journal of Engineering Mechanics, (ASCE), 127(12) (2001) 1258-1266.
- [34] K.H. Park, Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays, Tunnelling and Underground Space Technology, 20(3) (2005) 249-261.
- [35] K. Lee, R.K. Rowe, K. Lo, Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter, Canadian geotechnical journal, 29(6) (1992) 929-940.
- [36] M.H. Khalaj Zadeh, M. Azadi, The Effects of Tunnel Excavation on the Seismic Response of Ground Surface Using Finite Difference Method, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 51(1) (2019) 99-108.
- [37] M.R. Baghban Golpasand, N.A. Do, D. Dias, M.-R. Nikudel, Effect of the lateral earth pressure coefficient on settlements during mechanized tunneling, Geomechanics and Engineering, 16(6) (2018) 643-654.
- [38] M.R. Baghban Golpasand, N.A. Do, D. Dias, Impact of pre-existent Qanats on ground settlements due to mechanized tunneling, Transportation Geotechnics, 21 (2019) 100262.
- [39] N.A. Do, D. Dias, P. Oreste, I.J.G.E. Djeran-Maigre, 2D numerical investigations of twin tunnel interaction, Geomechanics and Engineering, 6(3) (2014) 263-275.
- [40] M. Shirzehhagh, M. Oliaei, Numerical Study of using Diaphragm Wall to Mitigate Mechanized Tunneling

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Baghban Golpasand, S. Pourjavad, Gh. Baghban Golpasand, S. Moosazadeh, Investigation on the efficiency of different methods for evaluation of ground settlement due to excavation of Tabriz metro tunnel, line 2, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3777-3800.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20545.7460



