

بررسی عدم قطعیت موجود در پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تونل و نقش آن در بروز نشست‌های سطحی (مطالعه موردی پروژه خط ۲ متروی تبریز)

علی کلانتری مزرعه نو^۱؛ عنایت الله رنجینه خجسته^۱؛ حمید چاکری^{۲*}؛ علیرضا طالبی نژاد^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

۲- دکتری مهندسی معدن، سرپرست نظارت پروژه خط ۲ قطار شهری، تبریز، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

(*نویسنده مسئول: chakeri@sut.ac.ir)

چکیده

حفاری تونل‌های مترو، در شهرهای بزرگ و پرجمعیت با چالش‌های اساسی از جمله حفظ پایداری زمین در زمان حفاری و جلوگیری از نشست‌های ناخواسته همراه است. نشست زمین یکی از مسائل اساسی در حفاری تونل‌های کم عمق در زمین‌های نرم می‌باشد. این پدیده می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی سازه‌ها و تأسیسات مجاور داشته باشد و اهمیت اندازه‌گیری و بررسی عوامل مؤثر بر آن را نمایان سازد. برآورد میزان نشست زمین در حفاری تونل‌ها بر اساس پارامترهای ژئوتکنیکی انجام می‌شود، با این حال، عدم قطعیت موجود در داده‌های ژئوتکنیکی می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجهی در مدل‌های شبیه‌سازی شود. در این مقاله در ابتدا به بررسی تأثیر عدم قطعیت موجود در پروفیل ژئوتکنیکی و تأثیر آن بر نشست و حتی ریزش موجود در مسیر شرقی خط ۲ متروی تبریز که در سنگ نرم مارن در حال حفاری می‌باشد، پرداخته شده است. در بخش دوم، تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی بر میزان نشست با استفاده از مدل‌سازی دو بعدی در نرم‌افزار *PLAXIS2D* تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد، وجود لایه بسیار سست ماسه‌ای در قسمت بالایی تونل و عدم امکان تشخیص آن با مطالعات پایه ژئوتکنیک منجر به اضافه حفاری و وقوع ریزش سطح زمین در محدوده مورد بررسی گردیده است. از سوی دیگر بر مبنای آنالیز حساسیت انجام یافته، کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک لایه فوقانی تونل و همچنین افزایش مدول الاستیسیته لایه‌ای که تونل در داخل آن حفاری می‌شود، بیشترین تأثیر در افزایش نشست در مسیر تونل را داشته است.

واژگان کلیدی

ریزش تونل، نشست زمین، تحلیل حساسیت، پارامترهای ژئوتکنیکی، مدل‌سازی دو بعدی

۱- مقدمه

حفاری تونل‌ها به ویژه در پروژه‌های بزرگ عمرانی و حمل و نقل مانند مترو، دو چالش اساسی را به همراه دارد: حفظ پایداری سازه‌های زیرزمینی و جلوگیری از ریزش ناخواسته

آن‌ها.

یکی از مهمترین مسائل مطرح در حفاری تونل‌های کم عمق در مناطق شهری و زمین‌های نرم و آبرفتی، مسئله نشست سطح زمین در اثر حفاری است. این پدیده که گاه تحت

ژئوتکنیکی بر اساس اطلاعات محدود از مطالعات مکانیک خاک، آب‌شناسی و زمین‌شناسی می‌باشد. بر اساس نوع طرح و اطلاعات زمین‌شناسی موجود در پروژه‌های حفاری تونل، گمانه‌ها در هر ۵۰ تا ۳۰۰ متر در طول مسیر تونل حفاری می‌شوند [۱] و پروفیل ژئوتکنیکی مسیر از برون‌یابی مابین اطلاعات بدست آمده از گمانه‌ها می‌باشد. در صورت وجود تغییرات خاص در شرایط خاک و برآورد نادرست پارامترهای خاک، این عدم قطعیت مستقیماً در پیش‌بینی دقیق پارامترهای مربوط به حفاری تأثیر گذاشته و می‌تواند موجب بروز مخاطرات زمین‌شناسی در حین حفاری از جمله نشست سطح زمین گردد. بنابراین تخمین صحیح لایه‌بندی زمین و خصوصیات ژئوتکنیکی آن، از اهمیت بالایی برخوردار است [۴].

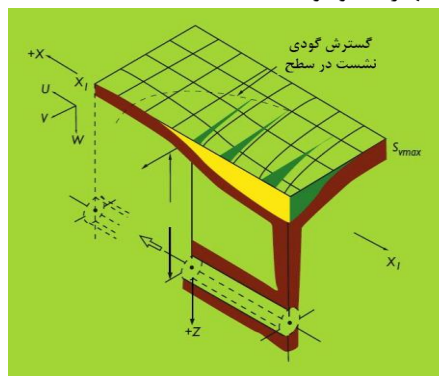
اگر شرایط موجود زمین با پیش‌بینی‌های به عمل آمده در فاز طراحی متفاوت باشد، تدقیق این پارامترها با استفاده از تحلیل حساسیت می‌تواند تأثیر بسزایی بر پیش‌بینی و طراحی دقیق‌تر پارامترهای حفاری داشته باشد. با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌سازی عددی، اهمیت و تأثیر پارامترهای ورودی در صحت نتایج بدست آمده، قبل از ساخت مدل عددی، یک تحلیل حساسیت برای تعیین گروه پارامترهای مهم و حساس در خروجی مدل‌سازی باید انجام شود. حساسیت ورودی‌ها شدیداً به بازه پارامترهای انتخاب شده و هدف از مدل‌سازی بستگی دارد. در گزارش‌های ژئوتکنیکی در پروژه‌های تونل‌سازی در محیط‌های شهری، بازه‌ای قابل قبول از پارامترها که معرف حدود خصوصیات مصالح اطراف تونل باشد معرفی می‌گردد. به دلیل حساسیت پارامترهای مذکور در تعیین میزان نشست، در نظر گرفتن این بازه برای انجام پیش‌بینی‌ها منجر به نتایج با دقت کم و بعضاً نادرست می‌شود. انجام آنالیزهای تحلیل حساسیت برای این داده‌های ورودی از جمله روش‌های متداول برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها می‌باشد [۵]. روش‌های مختلفی برای انجام تحلیل حساسیت وجود دارد. این روش‌ها در دو دسته مهم محلی و جامع دسته‌بندی می‌شوند. فنون تحلیل حساسیت نقش مهمی در مدل‌سازی توسعه یافته در دو دهه اخیر دارد [۶]، [۷] و [۸].

در سال‌های اخیر محققان مختلفی برای شناسایی پارامترهای موثر، از آنالیز حساسیت جامع استفاده نموده‌اند، نمونه‌هایی از

عنوان جابجایی خاک در اثر حفاری تونل نیز شناخته می‌شود، زمانی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند که تونل در مجاورت سازه‌ها و تأسیسات شهری حفر شود. در چنین شرایطی، نشست سطحی می‌تواند بر روی سازه‌ها و تأسیسات سطحی تأثیرات مخربی داشته باشد. بنابراین ضرورت پیش‌بینی دقیق مقدار نشست و بررسی عوامل مؤثر بر آن در پروژه‌های شهری از اهمیت خاصی برخوردار است [۱].

به‌طور کلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک منطقه و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش‌های محیط اطراف گردیده و باعث جابجایی در خاک اطراف تونل می‌شود (شکل ۱). این جابجایی‌ها تا سطح زمین ادامه پیدا کرده و نشست زمین را باعث می‌شود [۲]. پارامترهای مختلف عملیاتی و زمین‌شناسی بر روی میزان نشست زمین تأثیر دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- شرایط زمین‌شناسی مهندسی حاکم بر مسیر تونل و مصالح موجود در آن (نوع خاک، سطح آب زیرزمینی و ...)
- شیوه حفاری و نحوه کنترل پارامترهای مرتبط با آن از قبیل فشار جبهه کار، فشار تزریق (در حفاری مکانیزه)، گام‌های حفاری (در حفاری سنتی) و ...
- عوامل هندسی از قبیل عمق تونل، قطر تونل، شکل مقطع و ...
- عوامل اجرایی (کارگاهی)، مدیریتی و همچنین تجهیزات موجود.



شکل ۱- نمای سه بعدی از پدیده نشست زمین در اثر حفر

تونل [۲]

در مرحله طراحی همه پیش‌بینی‌ها از مقادیر پارامترهای

سه بخش غربی (از دپو غربی تا میدان دانشسرا)، شرقی (حد فاصل میدان دانشسرا تا میدان شهید فهمیده) و توسعه شرقی (میدان شهید فهمیده تا مقابل نمایشگاه بین‌المللی تبریز) می‌باشد که هر بخش به ترتیب دارای ۸، ۴ و ۸ (در مجموع ۲۰) ایستگاه خواهد بود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این خط از محدوده دپو و پارکینگ در حوالی غرب شهر تبریز شروع شده و پس از عبور از قراملک و خیابان قره‌آغاج (قدس) به قسمت‌های مرکزی شهر در ناحیه بازار می‌رسد. مسیر مذکور در ادامه بعد از عبور از میدان دانشسرا و زیر رودخانه مهران رود به خیابان عباسی و میدان شهید فهمیده امتداد یافته و پس از عبور از میدان شهید فهمیده به سمت شهرک باغمیشه ادامه می‌یابد و با تغییر مسیر به سمت جنوب شرقی در نهایت به نمایشگاه بین‌المللی تبریز ختم می‌گردد. کیلومترهاژ ۱۳+۱۵۰ و ریزش ایجاد شده در این کیلومترهاژ در بخش شرقی و در خیابان عباسی قرار گرفته و این محدوده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- مسیر تونل خط ۲ قطار شهری تبریز به همراه موقعیت محدوده مورد مطالعه

گرچه منطقه آذربایجان از لحاظ چینه‌شناسی دارای تنوع و گستردگی زمانی زیادی می‌باشد و اطراف دشت تبریز نیز از برون‌زدهای گسترده‌ای از کامبرین تا حال برخوردار است ولی سنگ‌ها و رسوبات محدوده خود شهر تبریز دارای گستردگی زمانی چندانی نبوده و واحدهای تشکیل دهنده آن مربوط به سنوزوئیک و کواترنری می‌باشند. واحدهای قرمز رنگ موجود در ارتفاعات شمالی شهر تبریز (کوه عینالی) با لیتولوژی ماسه‌سنگ، کنگلومرا، سیلتستون از جمله مهمترین آنها

کاربرد تحلیل حساسیت جامع در مکانیک خاک، برای برآورد دقیق پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، در تخمین پارامتر و بررسی شرایط مرزی وجود دارد [۹]. برخی محققان از آنالیز حساسیت جامع برای شناسایی پارامترهای موثر در مدل‌های هیدرولوژیکی و در نهایت نتایج آن را برای ساخت یک مدل استفاده کردند [۱۰]. از دو روش واریانسی تأثیر مقدماتی برای تحلیل حساسیت جامع استفاده شده است. هدف در این روش، بررسی پارامترهای کلیدی خاک و شناسایی پارامترهای موثر در تونل‌سازی مکانیزه بوده است [۵].

در سال‌های اخیر، برخی از پارامترهایی که بر نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونل در محیط‌های خاکی و نرم تأثیر می‌گذارند، معرفی شده‌اند. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین و انجام مدل‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار *Plaxis3D Tunnel*، بررسی جامع‌تری صورت گرفته و پارامترهای مؤثر بیشتری شناسایی شده است. سپس با تعیین حساسیت نشست به هر یک از این پارامترها، مؤثرترین عوامل بر نشست زمین ناشی از حفاری تونل در محیط‌های خاکی و نرم مشخص شده‌اند [۱۱]. در یک پژوهش دیگر، با استفاده از آنالیز حساسیت جامع، پارامترهای حساس در فرآیند تونل‌سازی مکانیزه در پروژه تونل اسپلند غربی شناسایی شد. در این مطالعه، شبیه‌سازی فرآیند تونل‌سازی را با بهره‌گیری از نرم‌افزار *Plaxis* به روش المان محدود انجام دادند و سپس نشست سطح زمین را با استفاده از مدل تجزیه متعامد همراه با تابع دایره‌ای اساسی پیش‌بینی کردند [۱۲]، [۱۳]، [۱۴] و [۱۵].

با توجه به مطالب فوق، در این مقاله علل نشست و ریزش ایجاد شده در اثر حفار تونل خط ۲ قطار شهری تبریز در مسیر شرقی که در زمینی از جنس سنگ مارن حفاری گردیده است، مورد بررسی قرار گرفته و روند نشست و علل ریزش که عمدتاً در اثر عدم قطعیت ژئوتکنیکی رخ داده است، پرداخته شده است. سپس با در نظر گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی تحلیل حساسیت انجام شده و تأثیر هر یک در میزان نشست مسیر با استفاده از مدل‌سازی دو بعدی با نرم‌افزار *PLAXIS* بررسی شده است.

۲- محدوده مورد مطالعه

خط ۲ قطار شهری تبریز به طول حدود ۲۲ کیلومتر شامل

۱۳+۲۵۰، مقطع حفاری تونل در داخل لایه‌های مارنی ماسه‌سنگی بوده و بخش فوقانی تونل شامل لایه‌های ماسه‌ای و رسی (SM و CL) می‌باشد. از کیلومتر ۱۳+۲۵۰ به بعد (شکل ۲)، بخش میانی و زیرین تونل داخل مصالح مارنی با چسبندگی بالا و بخش فوقانی داخل مصالح آبرفتی واقع گردیده و در این محدوده مقطع تونل در وضعیت جبهه‌کار مختلط قرار می‌گیرد. پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی این محدوده در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که در این جدول قابل مشاهده می‌باشد لایه‌های اطراف تونل دارای نفوذپذیری 10^{-4} تا 10^{-6} سانتی‌متر بر ثانیه بوده و تزریق‌پذیر نمی‌باشند. براساس نتایج آزمایشات دانه‌بندی خاک در گمانه‌های حفاری شده در این محدوده (جدول ۲) تمامی لایه‌های بالای تونل دارای حداقل ۴۵ درصد ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ می‌باشند [۱۶].

جدول ۱- نوع مصالح و پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر در

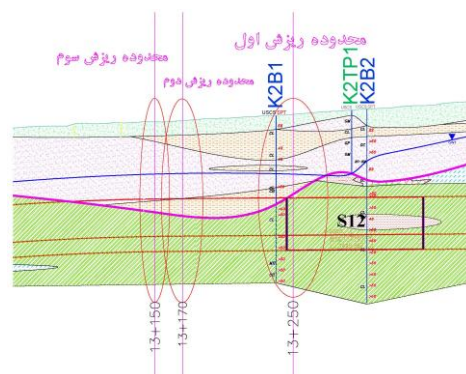
محدوده مورد مطالعه

| 16-35 | 12-16 | 8-12 | 0-8 | لاجه (صخره) به متر |
|--|--|--|----------------------|--------------------|
| جنس غالب سنگ مارن | کتوب ریزانه و مرزبندانه بافت غالب فرشندانه (SM, GC, CL) | کتوب ریزانه و مرزبندانه، بافت غالب فرشندانه (GC, GM, SM, SC, CL) | آبرفت ریزانه (CL) | |
| عدد SPT | >50 | 20-45 | 20-50 | |
| چسبندگی (kg/cm ²) | 0.3-0.5 | 0.2-0.3 | 0.25-0.35 | |
| چسبندگی (kg/cm ²) | 0.3-0.5 | 0.2-0.3 | 0.1-0.2 | |
| زاویه اصطکاک داخلی (φ ^o) | 16-18 | 16-18 | 14-16 | |
| زاویه اصطکاک داخلی (φ ^o) | 24-27 | 28-30 | 20-22 | |
| وزن مخصوص اشباع (g/cm ³) | 1.80-1.90 | 1.70-1.80 | 1.65-1.75 | |
| وزن مخصوص اشباع (g/cm ³) | 2.15-2.35 | 1.90-2.01 | 1.87-1.97 | |
| نسبت پواسون | 0.37-0.39 | 0.33-0.40 | 0.33-0.35 | 0.35-0.40 |
| مدول تغییر شکل قائم (kg/cm ²) | 400-550 | 400-500 | 300-400 | 250-350 |
| مدول تغییر شکل افقی (kg/cm ²) | 300-450 | 250-350 | 200-300 | 150-250 |
| مدول پارگاری-جند قائم (kg/cm ²) | 800-1100 | 800-1000 | 600-800 | 500-700 |
| ضریب نفوذ پذیری (cm/s) | 1E-6-1E-5 | 1E-6-1E-5 | 1E-5-1E-4 | 1E-5-1E-4 |
| ضریب نفوذ پذیری حجمی (m/s) | 0.02-0.05 | 0.02-0.05 | - | - |

جدول ۲- دانه‌بندی گمانه K2B1 و BH-7

| Log.No | NO. | Depth | Gradation | | | Classification |
|-------------------------------|-----|------------|------------|----------|----------|----------------|
| | | | Gravel (%) | Sand (%) | Fine (%) | |
| K ₂ B ₁ | 1 | 3.0-3.40 | 0.0 | 20.9 | 79.1 | CL |
| | 2 | 7.0-7.30 | 0.0 | 31.3 | 68.7 | CL |
| | 3 | 9.7-10.0 | 0.0 | 16.5 | 83.5 | CL |
| | 4 | 13.50-13.9 | 0.1 | 18.8 | 81.1 | CL |
| | 5 | 18.60-19.0 | 0.0 | 17.8 | 82.2 | CL |
| | 6 | 23.20-23.5 | 0.0 | 5.9 | 94.1 | CL |
| | 7 | 26.40-26.8 | 0.0 | 9.4 | 90.6 | CL |
| | 8 | 28.5-29.0 | 0.0 | 1.6 | 98.4 | CH |
| BH-7 | 1 | 3.0-4.0 | 7.9 | 45.5 | 46.5 | SC |
| | 2 | 7.0-8.0 | 16.9 | 39.5 | 43.6 | SM |
| | 3 | 9.7-10.0 | 0.0 | 0.9 | 99.1 | CL |
| | 4 | 12.5-13.0 | 0.0 | 0.7 | 99.3 | CL |
| | 5 | 19.0-20.0 | 0.0 | 0.7 | 99.4 | CL |
| | 6 | 22.0-22.3 | 0.0 | 18.1 | 81.9 | CL |
| | 7 | 26.40-26.8 | 0.0 | 0.4 | 99.6 | CL |

محسوب می‌شود. محدوده دشت تبریز عموماً توسط رسوبات آبرفتی سخت نشده پوشیده شده است. نهشته شدن رسوبات دشت حاصل فرسایش ارتفاعات اطراف دشت و حمل آن‌ها توسط جریان‌های رودخانه‌ها و مخروط افکنه‌ها به سمت داخل دشت می‌باشد. با توجه به شیب عمومی رودخانه‌ها به سمت غرب، با فاصله گرفتن از ارتفاعات، ابعاد و اندازه ذرات کاهش می‌یابد. مطالعات سطح آب زیرزمینی در اعماق زمین در محدوده ۲ تا ۲۴ متر، متغیر می‌باشد. جهت انجام مطالعات ژئوتکنیک مسیر تونل، گمانه‌های ماشینی و دستی به عمق ۱۵ تا ۴۰ متر حفر گردیده و در همه گمانه‌ها به منظور بررسی وضعیت لایه‌ها و مقاومت زمین، آزمایشات صحرائی و همچنین نمونه‌برداری دست نخورده (شلیبی یا موم اندود) و دست‌خورده مورد نیاز برای انجام آزمایشات آزمایشگاهی صورت گرفته است. براساس نتایج حاصل از حفاری گمانه‌های مذکور و لاگ آن‌ها و همچنین با در نظر گرفتن نتایج آزمایشات صحرائی و آزمایشگاهی، نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، تونل در محدوده مورد مطالعه عمدتاً در سنگ نرم (مارن) حفاری شده است؛ قسمت فوقانی تونل نیز عمدتاً از ماسه تشکیل شده است [۱۶].



شکل ۳- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی محدوده مورد مطالعه

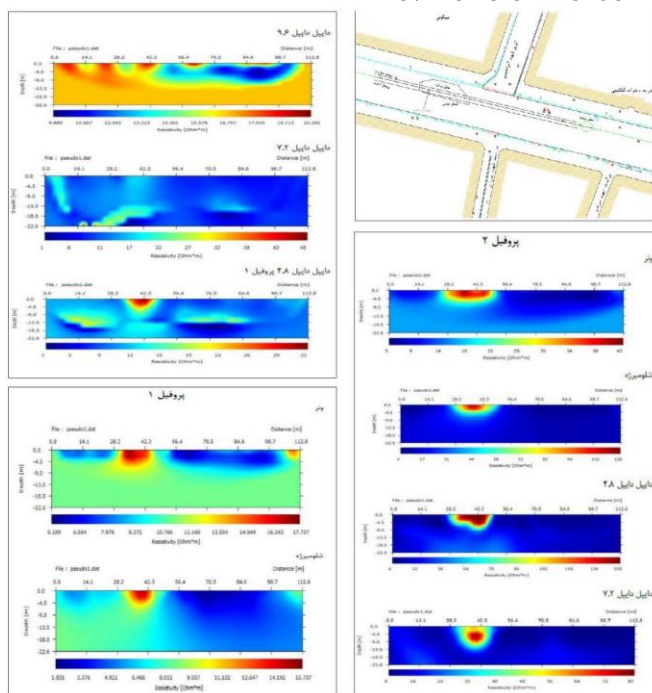
۳- محدوده مورد مطالعه

با توجه به مطالعات ژئوتکنیکی انجام یافته از محدوده مورد مطالعه، از ایستگاه S15 (کیلومتر ۱۶+۰۰۰) تا کیلومتر ۱۶+۰۰۰

۳-۱- پارامترهای ژئوتکنیکی حاصل از گمانه‌های محدوده

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، بررسی لایه‌های زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی محدوده نشان می‌دهد که لایه ماسه شن و سیلت و رس‌دار با ضخامت حدود ۸ متر در بالای تونل و سطح آب با تراز ۴/۵ متر بالاتر از تاج تونل قرار دارد. با توجه به نتایج آزمایشات برش مستقیم و مقاومت سه‌محوری، نمودار چسبندگی خاک در عمق‌های مختلف تعیین گردیده است. با توجه به این نمودارها، کمترین میزان چسبندگی در عمق ۸ تا ۱۳ متری از سطح زمین، یعنی در نزدیکی تاج تونل مشاهده شده است. نفوذپذیری متوسط خاک محدوده مورد بررسی نیز در حدود ۱۰^{-۵} سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. بعد از ریزش دوم و به منظور بررسی وضعیت زیرسطحی محدوده ریزش، مطالعات ژئوفیزیکی (مقاومت ویژه) جهت بررسی وضعیت لایه‌های زیرسطحی انجام گرفت که در این مطالعات در راستای پروفیل‌های مختلف از چندین آرایش شامل ونر، شلومبرژه و دایپل - دایپل استفاده شده است (شکل ۴) بررسی نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیک در آرایش دایپل -

دایپل پس از ریزش سوم نشان می‌دهد که به دلیل وجود لایه ماسه سیلت‌دار بسیار سست در این محدوده و عدم شناسایی این لایه در مطالعات ژئوتکنیک پایه، باعث فرار فوم در این بخش از جبهه کار مختلط شده و اختلاط مناسب فوم و خاک مارنی انجام نیافته است. لذا عمل‌آوری نامناسب خاک به این دلیل و عدم استفاده از فوم آنتی کلاگ مناسب با لایه موجود در جبهه کار موجب افزایش کلاگینگ دستگاه و در نتیجه افزایش گشتاور و تراست دستگاه گردیده است. تمامی موارد فوق‌الذکر در اثر عدم شناسایی لایه مذکور در مطالعات اولیه و پیش‌بینی نادرست از وضعیت جبهه کار بوده است. همچنین وجود کانال آب قدیمی به صورت مدفون و متقاطع با مسیر تونل در عمق ۲ متری در این محدوده به همراه خاک ضعیف موجود در اطراف تأسیسات زیرسطحی (مسیرهای آب، گاز، فاضلاب، مخابرات و...) و جابجایی‌هایی که در زمان شروع حفاری با فشار جبهه کار بالاتر انجام یافته، به همراه تأثیر آب موجود در شستن فوم در سطح زمین و تأثیر آن بر خاک داخل فضای ریزش، از مهم‌ترین عوامل وقوع ریزش‌ها در این محدوده از مسیر می‌باشد.



شکل ۴- وضعیت زیر سطحی محدوده ریزش و نتایج پروفیل‌های ژئوفیزیک محدوده ریزش

۴- بررسی نتایج علل ریزش محدوده مورد

مطالعه

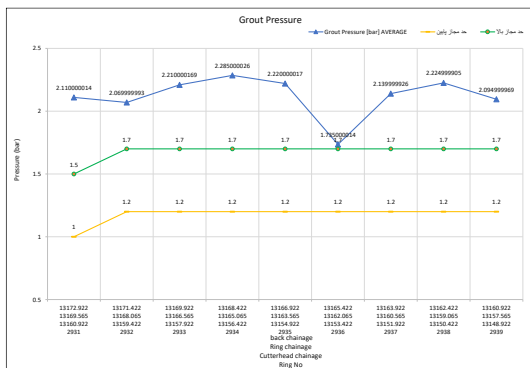
نتایج حاصل از تحلیل دیتالاگر دستگاه حفاری در محدوده ریزش سوم، در ادامه ارائه شده است.

۴-۱- تحلیل نتایج میزان فشار جبهه کار دستگاه

حفاری

فشار جبهه کار برای شروع مجدد حفاری *TBM* شرقی در کیلومتراژ ۱۳+۱۵۸ تا ۱۳+۰۰۰ (محدوده ریزش دوم خیابان عباسی تا اتمام محدوده جبهه کار مختلط) بر اساس محاسبات و مدل سازی عددی برای رینگ اول ۰/۵ بار (به منظور کاهش تنش اعمالی به خاک اطراف تونل در محدوده ریزش دوم) و در ادامه حفاری معادل ۰/۷۰ بار اعلام شده است. بر اساس نتایج دیتالاگر دستگاه حفاری در محدوده حفاری ریزش سوم (شکل ۵) فشار در شروع حفاری به طور متوسط تا ۰/۸۶ بار افزایش یافته و در ادامه نیز فشار اعمالی متوسط جبهه کار در حدود ۰/۸ بار بوده است. از سوی دیگر، با توجه به شکل ۵ مشاهده می شود که حداکثر و حداقل فشار جبهه کار اعمالی در بازه ۰/۶ تا ۱/۴ بوده و مقادیر حداکثر فشار در رنج های بالاتری از فشار اعلامی قرار دارند. لذا می توان گفت به جز رینگ اول، از لحاظ فشار جبهه کار مطابقت خوبی بین فشار اعلامی و وجود دارد.

جبهه کار (۰/۵) الی ۱ بار بیشتر از مقدار فشار جبهه کار طراحی می باشد. نمودار شکل ۶ میزان فشار تزریق در رینگ های ۲۹۳۱ تا ۲۹۳۹ را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که فشار تزریق گروت، در حد بالاتری از محدوده مجاز قرار دارد و علت فشار بالای اعمالی نسبت به مقادیر طراحی پر کردن و بهبود شرایط خاک در محدوده خاک دست خورده روی شیلد ناشی از ریزش های قبلی می باشد. بررسی ها نشان می دهد، فشار تزریق در رینگ ۲۹۳۶ با افت همراه بوده است؛ ولیکن همچنان در محدوده مجاز قرار می گیرد.

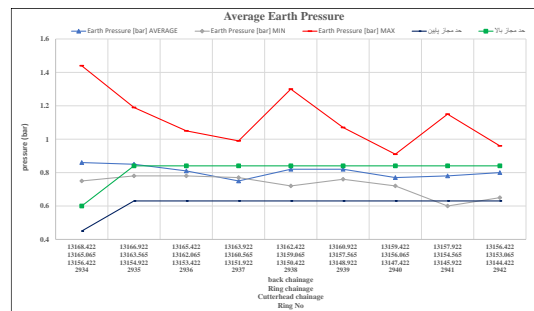


شکل ۶- مقادیر متوسط فشار تزریق در محدوده مورد بررسی

۴-۳- تحلیل نتایج میزان حجم تزریق دوغاب پشت

سگمنت

بررسی نمودار حجم تزریق دوغاب پشت سگمنت (شکل ۷) نشان می دهد، در رینگ های ۲۹۳۳ تا ۲۹۳۵ حجم دوغاب تزریق شده در محدوده مجاز (۶/۷۵ تا ۹ متر مکعب) قرار دارد. پس از رینگ ۲۹۳۵ حجم تزریق روند افزایشی داشته و مقدار حجم تزریق شده تا ۱۳/۲۷ متر مکعب (در رینگ ۲۹۳۷) افزایش یافته است. این روند با توجه به ریزش دوم اتفاق افتاده و محدوده تأثیر آن کاملاً منطقی بوده و روند طبیعی را دارد و بیانگر پر شدن فضای دست خورده اطراف تونل در محدوده ریزش می باشد.



شکل ۵- مقادیر متوسط فشار جبهه کار اعمالی در محدوده ریزش سوم

۴-۲- تحلیل نتایج میزان فشار تزریق دوغاب پشت

سگمنت

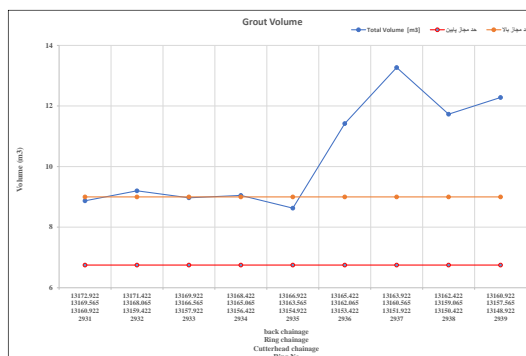
میزان فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت بر مبنای میزان فشار

۵- بررسی عددی و آنالیز حساسیت

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و نیاز به سیستم‌های حمل و نقل کارآمد، طراحی و ساخت تونل‌های مترو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این تونل‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر بارهای دینامیکی، تغییرات زمین‌شناسی و شرایط محیطی قرار دارند که می‌تواند بر پایداری و عملکرد آن‌ها تأثیر بگذارد. تحلیل حساسیت تونل‌های متروی حفاری شده در سنگ‌های ضعیف به عنوان یک ابزار کلیدی در مهندسی ژئوتکنیک و طراحی زیرساخت‌های حمل و نقل شهری شناخته می‌شود. تحلیل حساسیت به مهندسان این امکان را می‌دهد که با شناسایی و ارزیابی پارامترهای بحرانی، به بهینه‌سازی طراحی و کاهش ریسک‌های مرتبط با ساخت و بهره‌برداری از تونل‌ها بپردازند. نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی مانند *PLAXIS*، ابزارهای مؤثری برای انجام این تحلیل‌ها فراهم می‌آورند. این نرم‌افزار با قابلیت شبیه‌سازی رفتار خاک و سازه‌ها در شرایط مختلف، امکان بررسی تأثیر تغییرات در پارامترهای مختلف را فراهم می‌کند. در این بخش، با استفاده از نرم‌افزار عددی و با استفاده از داده‌های حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی به تحلیل حساسیت تونل پرداخته شده است.

تحلیل حساسیت در طراحی و آنالیز تونل‌ها، به‌ویژه در پروژه‌های مترو، یک جنبه بسیار مهم است که به ما کمک می‌کند تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف خاک و مصالح را بر روی رفتار سازه در شرایط بارگذاری مختلف ارزیابی کنیم. در این بخش با توجه به مطالب ارائه شده در بخش قبل و تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی در ریزش، به‌طور خاص به بررسی تأثیر پارامترهای مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک بر روی عملکرد تونل‌های مترو پرداخته شده است.

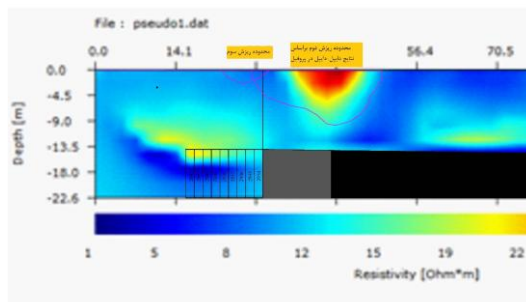
آنالیز حساسیت یک فرآیند، نه تنها برای شناسایی اینکه کدام پارامترها بیشترین تأثیر را بر نتایج مدل دارند، بلکه برای درک نحوه تغییر این نتایج در پاسخ به تغییرات در پارامترهای ورودی است. مدول الاستیسیته یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی خاک است که بیانگر قابلیت خاک برای برگشت به حالت اولیه پس از بارگذاری می‌باشد. افزایش مدول الاستیسیته معمولاً منجر به کاهش تغییر شکل‌های ناشی از بارگذاری می‌شود. در شرایط مقایسه‌ای، تونل‌هایی که خاک زیر آن‌ها دارای مدول الاستیسیته بالایی هستند، مقاومت بیشتری در برابر جابجایی‌ها و نشست‌های ناخواسته دارند. در



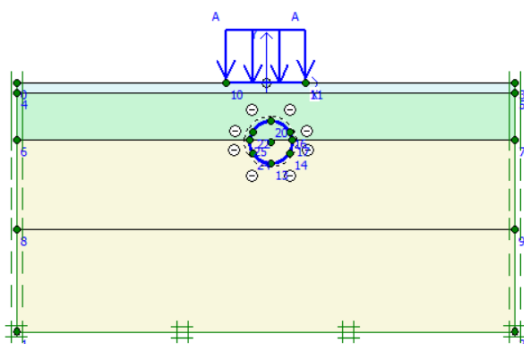
شکل ۷- مقادیر حجم دوغاب تزریق شده پشت سگمنت در محدوده مورد بررسی

۴-۴- تحلیل نتایج تناژ مصالح خروجی

تناژ مصالح خروجی در شکل ۸ ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در رینگ‌های اول، تناژ مصالح خروجی متناسب با ترکیب خاک جلوی جبهه‌کار (مارن و ماسه سیلت‌دار) بوده و در بازه ۱۶۵ تا ۱۹۰ تن متغیر بوده است. اما در رینگ‌های ۲۹۳۹، ۲۹۴۰ و ۲۹۴۱ تناژ خروجی با کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی به ۱۵۰ تا ۱۵۵ تن رسیده است. دلیل این موضوع با بررسی پروفیل شماره دو دایپل - دایپل مطالعات ژئوفیزیک ارائه شده در شکل ۸ مشخص می‌گردد. همانطور که در این شکل به وضوح مشخص است، مقاومت ویژه خاک در قسمت فوقانی در محدوده این سه رینگ، افزایش چشم‌گیری یافته است که این امر می‌تواند بیانگر وجود لایه درشت‌دانه یا فضای خالی باشد. همان‌طوری که قبلاً نیز اشاره گردیده است، در این محدوده لایه رسی موجود در مقطع تونل اتمام یافته و در بالای تونل ماسه سیلت‌دار بسیار سست وجود داشته است.



شکل ۸- مقادیر تناژ مصالح خروجی از هر رینگ حفاری



شکل ۹- مدل سازی عددی محدوده مورد مطالعه

۵-۲- بررسی نتایج مدلسازی عددی

در ادامه به بررسی و تحلیل حساسیت تغییرات پارامترهای مورد بررسی در هر گمانه پرداخته شده است.

۵-۲-۱- نتایج مربوط به گمانه BH07

نتایج مربوط به تحلیل حساسیت بر روی گمانه BH07 و تاثیر مشخصات برشی زمین (چسبندگی و زاویه اصطکاک) و مدول الاستیسیته در جدول ۴ و اشکال ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده میزان مدول الاستیسیته لایه سوم (لایه‌ای که تونل در داخل آن قرار دارد) و مقدار چسبندگی لایه دوم (لایه فوقانی تونل) بیشترین تاثیر را روی نشست دارد.

شرایطی که مدول الاستیسیته کمتر است، احتمال ناپایداری و خطر ریزش وجود دارد.

چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل حساسیت تونل‌های مترو است و تأثیر مستقیمی بر رفتار و پایداری این سازه‌ها دارد. در تحلیل حساسیت، تغییرات در چسبندگی و زاویه اصطکاک، می‌تواند به صورت غیرخطی بر نتایج تأثیرگذار باشد. به همین دلیل، باید حساسیت نتایج به تغییرات کوچک در چسبندگی به دقت بررسی شود. چسبندگی و زاویه اصطکاک از عوامل تعیین‌کننده در تحلیل حساسیت تونل‌های مترو است. تغییر در این پارامتر می‌تواند تأثیرات عمیقی بر روی پایداری، نشست و رفتار کلی تونل داشته باشد.

۵-۱- پارامترهای هندسی

مدل مورد بررسی در این مرحله بصورت یک مدل عددی دو بعدی ساخته شده است. برای نمایش ویژگی‌های فیزیکی خاک و سنگ پارامترهایی مانند مدول الاستیسیته (E)، چگالی (γ)، ضریب پواسون (ν)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده مدل هندسی به صورت مستطیلی شکل بوده و در دو ضلع کناری اجازه تغییر مکان قائم وجود دارد، در حالی که ضلع پایین مدل در جهت‌های قائم و افقی بسته شده است. ابعاد مورد نیاز برای مدل سازی شامل موارد زیر است: عرض و ارتفاع مدل هندسی ($B=100$) و ($H=50$)، قطر تونل ($D=9.49$)، عمق مرکز تونل ($Z_0=16.74$) و ضخامت کف تونل تا بستر سنگی (H_b). مشخصات وضعیت هندسی ناحیه مورد بررسی به همراه وضعیت لایه‌بندی و بار سطحی اعمالی در شکل ۹ نشان داده شده است.

برای اعمال مشخصات لایه‌های مورد استفاده در مدل سازی عددی از مشخصات محیط حفاری تونل مترو تبریز استفاده شده است. به منظور تعیین مشخصات ژئومکانیکی خاک و مارن موجود در مقطع تونل تعداد ۴ گمانه ($BH3-K2B1-$ و $BH06-F3BH3$) در محدوده مورد مطالعه اجرا شده و مشخصات هر کدام از گمانه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

مدل رفتاری مورد استفاده در مدلسازی‌های انجام شده، مدل *Hardening Soil* می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات ژئوتکنیکی مربوط به گمانه BH07, K2B1, BH06, F3BH3

| K2B1 | | | | | BH07 | | | |
|-----------|-------|---------|------|-------|-----------|----------|------|-------------------------|
| 11.9 | 4.2 | 6.9 | 4.1 | 3 | 18 | 9.5 | 2 | لایه (عمق) به متر |
| Marl | CL-CH | SM-CPGM | CL | H.S | Marl | SM,SC,GM | H.S | جنس غالب |
| 40 | 25 | 12 | 17 | 0 | 40 | 12 | 0 | c' (kpa) |
| 25 | 27 | 29 | 22 | 27 | 25 | 29 | 27 | ϕ' |
| 65 | 29 | 16 | 21 | 10 | 65 | 16 | 10 | C _u (kpa) |
| 20 | 22 | 27 | 16 | 21 | 20 | 27 | 21 | ϕ_u |
| 1.85 | 1.77 | 1.75 | 1.70 | 1.60 | 1.85 | 1.75 | 1.6 | γ_d (gr/cm3) |
| 2.20 | 2.02 | 2.01 | 1.90 | 1.85 | 2.2 | 2.01 | 1.85 | γ_m (gr/cm3) |
| 500 | 450 | 350 | 300 | 200 | 500 | 250 | 200 | E _m (kg/cm2) |
| F3BH3 | | | | | BH06 | | | |
| 3.43 | 10.93 | 3.64 | 2 | 14.40 | 8.90 | 5.40 | 2 | لایه (عمق) به متر |
| Marlstone | SM | CL | H.S | Marl | Siltstone | SM-SC | H.S | جنس غالب |
| 40 | 12 | 17 | 0 | 47 | 11 | 9 | 0 | c' (kpa) |
| 25 | 29 | 22 | 27 | 28 | 27 | 29 | 29 | ϕ' |
| 65 | 16 | 21 | 10 | 75 | 22 | 15 | 12 | C _u (kpa) |
| 20 | 27 | 16 | 21 | 22 | 24 | 27 | 22 | ϕ_u |
| 1.85 | 1.75 | 1.7 | 1.6 | 1.85 | 1.75 | 1.75 | 1.60 | γ_d (gr/cm3) |
| 2.2 | 2.01 | 1.9 | 1.85 | 2.25 | 2.10 | 2 | 1.90 | γ_m (gr/cm3) |

فوقانی تونل) بیشترین تاثیر را در نشست دارد.

جدول ۵- پارامترهای تحلیل حساسیت مربوط به گمانه

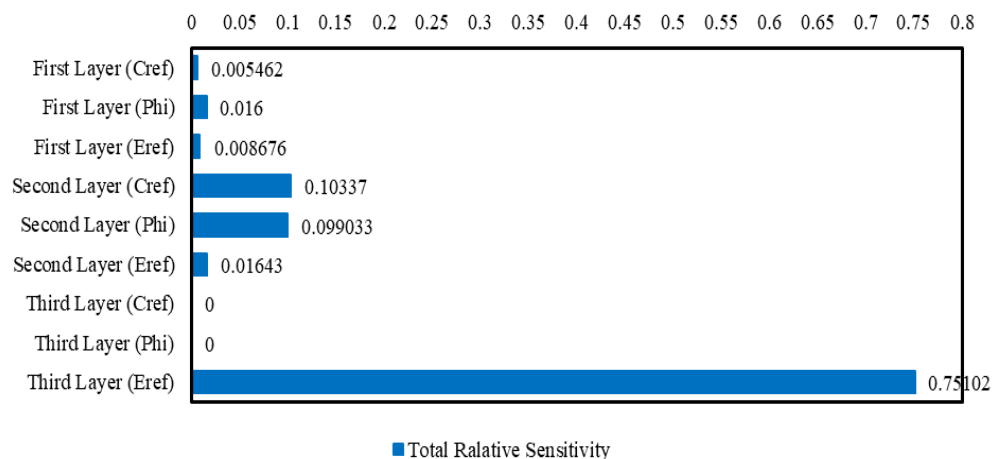
| K2B1 | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.5 | 3 | 5.5 | 0.13 |
| First Layer (Cref) | 0.5 | 3 | 5.5 | 0.13 |
| First Layer (Phi) | 23 | 27 | 31 | 0.002 |
| First Layer (Eref) | 15000 | 2000 | 25000 | 0 |
| Second Layer (Cref) | 7 | 12 | 17 | 0.18 |
| Second Layer (Phi) | 25 | 29 | 33 | 0 |
| Second Layer (Eref) | 25000 | 30000 | 35000 | 0 |
| Third Layer (Cref) | 20 | 25 | 30 | 0.38 |
| Third Layer (Phi) | 36 | 40 | 44 | 0 |
| Third Layer (Eref) | 30000 | 35000 | 40000 | 0 |
| Fourth Layer (Cref) | 20 | 25 | 30 | 0.29 |
| Fourth Layer (Phi) | 23 | 27 | 31 | 0 |
| Fourth Layer (Eref) | 40000 | 45000 | 50000 | 0 |

جدول ۴- پارامترهای تحلیل حساسیت مربوط به گمانه

| BH07 | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.5 | 3 | 5.5 | 0.005 |
| FIRST LAYER (CREF) | 0.5 | 3 | 5.5 | 0.005 |
| FIRST LAYER (PHI) | 23 | 27 | 31 | 0.016 |
| FIRST LAYER (EREF) | 15000 | 2000 | 25000 | 0.008 |
| SECOND LAYER (CREF) | 7 | 12 | 17 | 0.103 |
| SECOND LAYER (PHI) | 25 | 29 | 33 | 0.099 |
| SECOND LAYER (EREF) | 20000 | 25000 | 3000 | 0.016 |
| THIRD LAYER (CREF) | 20 | 25 | 30 | 0 |
| THIRD LAYER (PHI) | 35 | 40 | 45 | 0 |
| THIRD LAYER (EREF) | 45000 | 50000 | 55000 | 0.751 |

۲-۲-۵- نتایج مربوط به گمانه K2B1

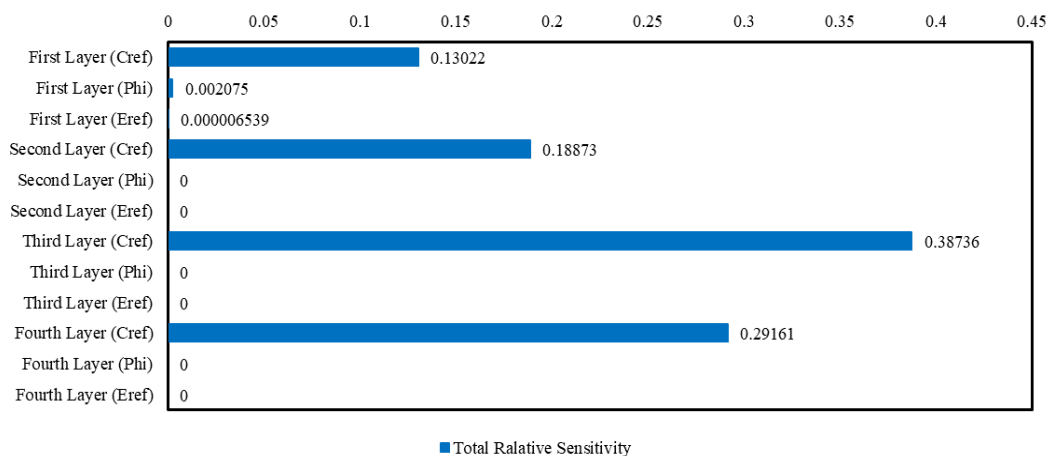
با توجه به نتایج تحلیل حساسیت بر روی گمانه K2B1، تاثیر مشخصات برشی زمین (چسبندگی و زاویه اصطکاک) و مدول الاستیسیته در جدول ۵ و اشکال ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. با توجه به این نتایج در این گمانه، چسبندگی لایه سوم (لایه



شکل ۱۰- نمودار امتیاز آنالیز حساسیت جهت هر پارامتر در لایه های مختلف-گمانه BH07

| Run | Input | | | | | | | | | Result | Sensitivity score |
|------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------------|------------------------|
| | first layer cref | first layer phi | first layer Eref | Second layer cref | Second layer phi | Second layer Eref | third layer cref | third layer phi | third layer Eref | Uy Phase 3/Point A [m] | Uy Phase 3/Point A [m] |
| SA1 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017544 | 0 |
| SA2 | 0.5 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017529 | 1.7750E-3 |
| SA3 | 5.5 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017532 | 1.4278E-3 |
| SA4 | 3 | 23 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017489 | 6.2421E-3 |
| SA5 | 3 | 31 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017517 | 3.1455E-3 |
| SA6 | 3 | 27 | 15000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017516 | 3.2643E-3 |
| SA7 | 3 | 27 | 25000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017528 | 1.8234E-3 |
| SA8 | 3 | 27 | 20000 | 7 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017098 | 0.050867 |
| SA9 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.01763 | 9.7503E-3 |
| SA10 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 25 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017154 | 0.044455 |
| SA11 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 33 | 25000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017664 | 0.013619 |
| SA12 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 20000 | 25 | 40 | 50000 | 0.01757 | 2.8960E-3 |
| SA13 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 50000 | 0.017485 | 6.7387E-3 |
| SA14 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 20 | 40 | 50000 | 0.017544 | 0 |
| SA15 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 30 | 40 | 50000 | 0.017544 | 0 |
| SA16 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 35 | 50000 | 0.017544 | 0 |
| SA17 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 45 | 50000 | 0.017544 | 0 |
| SA18 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 45000 | 0.01966 | 0.24126 |
| SA19 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 55000 | 0.015797 | 0.19914 |

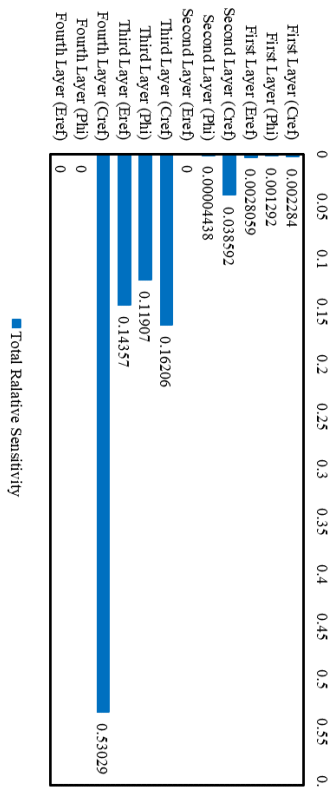
شکل ۱۱- امتیازگیری و محدوده تغییرات پارامترها.



شکل ۱۲- نمودار امتیاز آنالیز حساسیت جهت هر پارامتر در لایه های مختلف-گمانه K2B1

| Run | Input | | | | | | | | | | | | Result | |
|------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | first layer cref | first layer phi | first layer Eref | Second layer cref | Second layer phi | Second layer Eref | third layer cref | third layer phi | third layer Eref | Fourth Layer cref | Fourth Layer phi | Fourth Layer Eref | Uy Phase 3/Point A [m] | Sensitivity score |
| SA1 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA2 | 0.5 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.3158E-3 | 0.028464 |
| SA3 | 5.5 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2043E-3 | 0.023931 |
| SA4 | 3 | 23 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2570E-3 | 8.3503E-4 |
| SA5 | 3 | 31 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 1.5990E-7 |
| SA6 | 3 | 27 | 15000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 3.0818E-7 |
| SA7 | 3 | 27 | 25000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 2.3230E-6 |
| SA8 | 3 | 27 | 20000 | 7 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.3414E-3 | 0.040499 |
| SA9 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.1798E-3 | 0.035435 |
| SA10 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 25 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA11 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 33 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA12 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 25000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA13 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 35000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA14 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 20 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.4369E-3 | 0.085397 |
| SA15 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 30 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.1053E-3 | 0.070454 |
| SA16 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 36 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA17 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 44 | 35000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA18 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 30000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA19 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 40000 | 25 | 27 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA20 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 20 | 27 | 45000 | -4.3897E-3 | 0.063225 |
| SA21 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 30 | 27 | 45000 | -4.1401E-3 | 0.054104 |
| SA22 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 23 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA23 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 31 | 45000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA24 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 40000 | -4.2552E-3 | 0 |
| SA25 | 3 | 27 | 20000 | 12 | 29 | 30000 | 25 | 40 | 35000 | 25 | 27 | 50000 | -4.2552E-3 | 0 |

شکل ۱۳- جدول امتیازگیری و محدوده تغییرات پارامترها مربوط به گمانه K2B1



شکل ۱۴- نمودار امتیاز آنالیز حساسیت جهت هر پارامتر در

لایه های مختلف- گمانه BH06

۵-۲-۳- نتایج مربوط به گمانه BH6

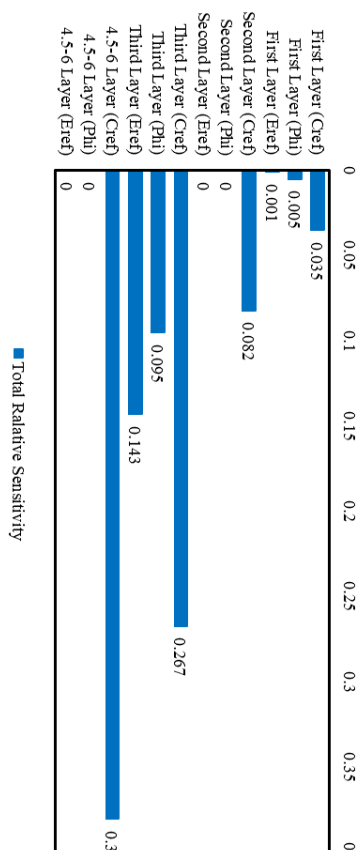
نتایج تحلیل حساسیت بر روی گمانه BH06 و تاثیر مشخصات برشی زمین (چسبندگی و زاویه اصطکاک) و مدول الاستیسیته در جدول ۶ و اشکال ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. در این گمانه نیز چسبندگی لایه سوم و چهارم (لایه‌ای که تونل در داخل آن قرار دارد و لایه فوقانی تونل) بیشترین تأثیر را در میزان نشست دارند.

جدول ۶- پارامترهای تحلیل حساسیت مربوط به گمانه

| BH06 | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------------------|
| Layer | Min. | Ref. | Max. | Total Sensitivity |
| 1 (Cref) | 0.5 | 3 | 5.5 | 0.002284 |
| 1 (Phi) | 23 | 27 | 33 | 0.001292 |
| 1 (Eref) | 15000 | 2000 | 25000 | 0.0028059 |
| 2 (Cref) | 4 | 9 | 14 | 0.038892 |
| 2 (Phi) | 25 | 29 | 33 | 0.00004438 |
| 2 (Eref) | 20000 | 25000 | 30000 | 0 |
| 3 (Cref) | 6 | 11 | 17 | 0.16206 |
| 3 (Phi) | 23 | 27 | 31 | 0.11907 |
| 3 (Eref) | 35000 | 40000 | 45000 | 0.14337 |
| 4 (Cref) | 42 | 47 | 52 | 0.53029 |
| 4 (Phi) | 24 | 28 | 32 | 0 |
| 4 (Eref) | 45000 | 50000 | 55000 | 0 |

جدول ۷- پارامترهای تحلیل حساسیت مربوط به گمانه

| F3BH3 | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------------------|
| Layer | Min. | Ref. | Max. | Total Sensitivity |
| 1 (Cref) | 0.5 | 3 | 5.5 | 0.035 |
| 1 (Phi) | 23 | 27 | 33 | 0.005 |
| 1 (Eref) | 15000 | 2000 | 25000 | 0.001 |
| 2 (Cref) | 14 | 17 | 20 | 0.082 |
| 2 (Phi) | 17 | 22 | 27 | 0 |
| 2 (Eref) | 25000 | 30000 | 35000 | 0 |
| 3 (Cref) | 7 | 12 | 17 | 0.267 |
| 3 (Phi) | 24 | 29 | 34 | 0.095 |
| 3 (Eref) | 30000 | 35000 | 40000 | 0.143 |
| 4.5-6 (Cref) | 35 | 40 | 45 | 0.38 |
| 4.5-6 (Phi) | 20 | 25 | 30 | 0 |
| 4.5-6 (Eref) | 45000 | 50000 | 55000 | 0 |



شکل ۱۶- نمودار امتیاز آنالیز حساسیت جهت هر پارامتر در

لایه های مختلف-گمانه F3BH3

| Run | First Layer Cref | First Layer Phi | First Layer Eref | Second Layer Cref | Second Layer Phi | Second Layer Eref | Third Layer Cref | Third Layer Phi | Third Layer Eref | Fourth Layer Cref | Fourth Layer Phi | Fourth Layer Eref | U1/Freq A | U2/Freq A | Stability Index |
|------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------------|
| SA1 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 0 | 0 |
| SA2 | 0.5 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 1.747E-4 | 0 |
| SA3 | 5.5 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 1.440E-3 | 0 |
| SA4 | 3 | 26 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 7.899E-4 | 0 |
| SA5 | 3 | 39 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 1.332E-4 | 0 |
| SA6 | 3 | 29 | 15000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 8.082E-4 | 0 |
| SA7 | 3 | 29 | 25000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 1.179E-3 | 0 |
| SA8 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 0.01892 | 0 |
| SA9 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01159 | 0.01427 | 0 |
| SA10 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 26 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 1.139E-5 | 0 |
| SA11 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 33 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 0 | 0 |
| SA12 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 20000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 0 | 0 |
| SA13 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 30000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01088 | 0 | 0 |
| SA14 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 17 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01412 | 0.0840E2 | 0 |
| SA15 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01094 | 0.0695E8 | 0 |
| SA16 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 23 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.010742 | 0.0625E1 | 0 |
| SA17 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 31 | 4000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01209 | 0.0219E6 | 0 |
| SA18 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 39000 | 47 | 28 | 5000 | 0.010613 | 0.0783E4 | 0 |
| SA19 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 49000 | 47 | 28 | 5000 | 0.01728 | 0.0656E4 | 0 |
| SA20 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 42 | 28 | 5000 | 0.01222 | 0.234E2 | 0 |
| SA21 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 52 | 28 | 5000 | 0.010142 | 0.1709 | 0 |
| SA22 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 24 | 5000 | 0.01088 | 0 | 0 |
| SA23 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 32 | 5000 | 0.01088 | 0 | 0 |
| SA24 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 49000 | 0.01088 | 0 | 0 |
| SA25 | 3 | 29 | 20000 | 9 | 29 | 25000 | 11 | 27 | 4000 | 47 | 28 | 59000 | 0.01088 | 0 | 0 |

شکل ۱۵- جدول امتیازگیری و محدوده تغییرات پارامترها مربوط به گمانه BH06

۵-۲-۴- نتایج مربوط به گمانه F3BH3

با توجه به تحلیل حساسیت بر روی گمانه F3BH3 و تأثیر مشخصات برشی زمین (چسبندگی و زاویه اصطکاک) و مدول الاستیسیته در جدول ۷ و اشکال ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که چسبندگی لایه سوم و چهارم بیشترین تأثیر را در نشست زمین دارد.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های مطرح‌شده، عدم شناسایی برخی لایه‌های سست (مانند لایه ماسه سیلت‌دار) در مطالعات اولیه بوده که منجر به ریزش و نشست شده است.

عدم قطعیت در پارامترهای ژئوتکنیکی: پارامترهای ورودی به مدل‌های عددی بر اساس گمانه‌زنی و داده‌های محدود استخراج شده‌اند که ممکن است دقت مدل‌سازی را کاهش دهد.

پیچیدگی جبهه‌کار مختلط و تأثیر آن بر مدل‌سازی: وجود شرایط پیچیده زمین‌شناسی (مانند تغییر ناگهانی جنس لایه‌ها) مدل‌سازی را دشوارتر و نتایج را حساس‌تر به فرضیات ورودی می‌سازد.

نتایج حاصل از بررسی داده‌های میدانی دستگاه حفاری *TBM* نشان داد که در محدوده‌هایی که ریزش رخ داده، فشار جبهه‌کار و میزان دوغاب تزریقی به‌درستی تنظیم شده بود. با این حال، وجود لایه‌های بسیار سست و ناشناخته در قسمت فوقانی تونل، که در مطالعات ژئوتکنیکی اولیه شناسایی نشده بودند، نقش کلیدی در بروز نشست‌ها و ناپایداری‌ها داشته‌اند. این لایه‌ها منجر به فرار فوم، اختلاط نامناسب آن با خاک، افزایش اصطکاک دستگاه حفاری و نهایتاً بروز فضاهای خالی و ریزش در بالای تونل شده‌اند.

از سوی دیگر، تحلیل حساسیت عددی با استفاده از نرم‌افزار *PLAXIS 2D* نشان می‌دهد که پارامترهایی نظیر مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک لایه‌های خاکی، تأثیر چشمگیری بر میزان نشست زمین دارند. در گمانه‌های مختلف، به‌ویژه *BH07*، *K2B1*، *BH06* و *F3BH3*، مشخص شد که بیشترین اثرگذاری مربوط به چسبندگی لایه‌های فوقانی و مدول الاستیسیته لایه‌هایی است که تونل درون آن‌ها حفاری شده است. کاهش این پارامترها، به‌طور مستقیم با افزایش میزان نشست در ارتباط است. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت در مقاله، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

مدول الاستیسیته: نمایانگر سختی خاکی است. هرچه مقدار آن بیشتر باشد، خاک در برابر تغییر شکل مقاومت بیشتری دارد. در لایه‌هایی که تونل مستقیماً در

| Run | Input | First layer cat | First layer phi | First layer Eref | Second layer cat | Second layer phi | Second layer Eref | Third layer cat | Third layer phi | Third layer Eref | 4.5.5 layer cat | 4.5.6 layer phi | 4.5.6 layer Eref | Phase Param A | Phase Param B | Sensitivity score |
|------|-------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|-------------------|
| SA1 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA2 | 0.5 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.9467E-4 | 0.2022 | 0 | |
| SA3 | 5.5 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.297E-4 | 0.19177 | 0 | |
| SA4 | 3 | 23 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.673E-4 | 0.652484 | 0 | |
| SA5 | 3 | 31 | 19000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.959E-4 | 1.200E-3 | 0 | |
| SA6 | 3 | 27 | 25000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.9597E-4 | 5.399E-3 | 0 | |
| SA7 | 3 | 27 | 20000 | 14 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -4.409E-4 | 1.769E-3 | 0 | |
| SA8 | 3 | 27 | 20000 | 20 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -2.870E-4 | 0.4951 | 0 | |
| SA9 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -2.870E-4 | 0.39786 | 0 | |
| SA10 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA11 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA12 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 35000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA13 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 1.5988 | 0 | |
| SA14 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -1.329E-4 | 1.2801 | 0 | |
| SA15 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -4.6901E-4 | 0.6178 | 0 | |
| SA16 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.114E-4 | 0.26157 | 0 | |
| SA17 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -5.719E-4 | 1.1874 | 0 | |
| SA18 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.057E-4 | 0.29595 | 0 | |
| SA19 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.189E-5 | 2.1769 | 0 | |
| SA20 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -6.797E-4 | 1.7943 | 0 | |
| SA21 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA22 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA23 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA24 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |
| SA25 | 3 | 27 | 20000 | 17 | 22 | 30000 | 12 | 29 | 35000 | 40 | 25 | 50000 | -3.982E-4 | 0 | 0 | |

شکل ۱۷: جدول امتیازگیری و محدوده تغییرات پارامترها مربوط به گمانه *F3BH3*

۶- بحث و نتیجه‌گیری

با توسعه روزافزون خطوط مترو در کلان‌شهرها، حفاری تونل در مجاورت سازه‌های سطحی به یکی از دغدغه‌های مهم در پروژه‌های عمرانی تبدیل شده است. در این شرایط، وقوع نشست زمین نه تنها می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های شهری شود، بلکه چالش‌های فنی و اقتصادی گسترده‌ای نیز به همراه دارد.

مطالعه حاضر با تمرکز بر محدوده شرقی خط ۲ متروی تبریز، به بررسی عوامل مؤثر بر وقوع نشست و ریزش‌های زمین ناشی از حفاری مکانیزه در شرایط ژئوتکنیکی پیچیده پرداخته است. در این مطالعه می‌توان محدودیت‌های زیر را عنوان کرد: محدودیت در دقت و پوشش مطالعات ژئوتکنیکی پایه:

بنابراین نمی‌توان یک پاسخ مطلق داد؛ باید به موقعیت لایه در مقطع عمقی و نقش آن در انتقال بار توجه کرد.

در مجموع، این پژوهش بر اهمیت شناخت دقیق شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تأکید دارد. عدم توجه به عدم قطعیت در داده‌های ورودی، می‌تواند منجر به برآوردهای نادرست در طراحی و بهره‌برداری شود. همچنین استفاده از تحلیل‌های حساسیت در طراحی عددی، ابزار قدرتمندی برای شناسایی عوامل بحرانی و ارتقای ایمنی پروژه‌های تونلسازی محسوب می‌شود.

بنابراین پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های مشابه، با به‌کارگیری مدل‌سازی‌های دقیق، تحلیل حساسیت جامع و ارزیابی میدانی پیوسته، از ریسک‌های ژئوتکنیکی پیشگیری گردد.

آن‌ها حفاری شده (لایه سوم)، افزایش مدول الاستیسیته موجب کاهش نشست شده و تأثیر چشم‌گیری دارد. به‌ویژه در گمانه BH07، مدول الاستیسیته بیشترین تأثیر را روی نشست داشته است.

چسبندگی: یکی از پارامترهای مقاومت برشی خاک است. کاهش چسبندگی به‌خصوص در لایه‌های فوقانی (بالای تاج تونل) باعث افزایش پتانسیل ناپایداری و نشست سطحی می‌شود. در گمانه‌های K2B1، BH06 و F3BH3، چسبندگی لایه‌های بالایی بیشترین نقش را در نشست ایفا کرده است.

در شرایط این پروژه، چسبندگی لایه‌های فوقانی و مدول الاستیسیته لایه حفاری‌شده هر دو نقش کلیدی دارند، اما:

- اگر تمرکز روی لایه بالای تونل باشد: چسبندگی مهم‌تر است.
- اگر تمرکز روی لایه‌ای باشد که تونل در آن قرار دارد: مدول الاستیسیته اهمیت بیشتری دارد.

۷- منابع

- [1] J. Ninić, S. Freitag, G. Meschke, A hybrid finite element and surrogate modelling approach for simulation and monitoring supported TBM steering, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63 (2017) 12-28.
- [2] J. Meier, T. Schanz, Benchmarking of optimization algorithms, (2015)
- [3] X.-T. Feng, B.-R. Chen, C. Yang, H. Zhou, X. Ding, Identification of visco-elastic models for rocks using genetic programming coupled with the modified particle swarm optimization algorithm, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(5) (2006) 789- 801.
- [4] M. Calvello, R.J. Finno, Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis, *Computers and Geotechnics*, 31(5) (2004) 410-424.
- [5] S. Miro, D. Hartmann, T. Schanz, Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling, *Computers and Geotechnics*, 56 (2014) 80-88.
- [6] T. Kasper, G. Meschke, A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(14) (2004) 1441-1460.
- [7] F. Nagel, G. Meschke, An elasto-plastic three phase model for partially saturated soil for the finite element simulation of compressed air support in tunnelling, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 34(6) (2010) 605-625.

- [8] J.P. Kleijnen, Design and analysis of simulation experiments, in: International Workshop on Simulation, Springer, 2015, pp. 3-22.
- [9] N. Do, D. Dias, P. Oreste, Numerical analysis of segmental tunnel lining under seismic loads, 2015.
- [10] X.-m. Song, F.-z. Kong, C.-s. Zhan, J.-w. Han, X.-h. Zhang, Parameter identification and global sensitivity analysis of Xin'anjiang model using meta-modeling approach, Water Science and Engineering, 6(1) (2013) 1-17.
- [11] Huat, Chia Yu, Danial Jahed Armaghani, Sai Hin Lai, Haleh Rasekh, and Xuzhen he. "saT." Sustainability 15, no. 17 (2023) : 13265-13265.
- [12] C. Zhao, A.A. Lavasan, T. Barciaga, V. Zarev, M. Datcheva, T. Schanz, Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations– The Western Scheldt tunnel case, Computers and Geotechnics, 69 (2015) 601-614.
- [13] D. Kim, K. Pham, J. Y. Oh, S. Lee, Classification of surface settlement levels induced by TBM driving in urban areas using random forest with data-driven feature selection, Automation in Construction, Volume 135, March 2022, 104109.
- [14] Krishna, G., Maji, V.B. Numerical Simulation of EPBM Induced Ground Settlement. Indian Geotech J 52, 341–351 (2022).
- [15] H. Deng, H. Fu, Sh. Yue, Z. Huang, Ground loss model for analyzing shield tunneling-induced surface settlement along curve sections, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 119, January 2022, 104250
- [16] گزارش مطالعات ژئوتکنیک تونل و مسیر خط ۲ متروی تبریز، سازمان حمل و نقل ریلی تبریز و حومه، ۱۳۸۸.



Investigating the uncertainty in the geotechnical profile of the tunnel route and its role in the occurrence of surface settlements

Ali Kalantari Mazraeno¹, Enayatollah Ranjineh Khojasteh¹, Hamid Chakeri^{1*}, Alireza Talebi Nejjad²

¹Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

²PhD in Mining Engineering, Supervisor of Tabriz Metro line No. 2 project, Tabriz, Iran.

Received: 07. October. 2024 Accepted: 20. December. 2024
(*Corresponding author: chakeri@sut.ac.ir)

Keywords

Tunnel collapse,
Ground settlement,
Sensitivity analysis,
Geotechnical parameters,
Two-dimensional modeling

Final English Extended Abstract

Excavation of metro tunnels in densely populated urban areas presents significant challenges, most notably maintaining ground stability during tunneling operations and preventing unintended surface settlements. Ground subsidence is a critical issue, especially in shallow tunnel constructions through soft soils. This phenomenon can have profound impacts on surrounding infrastructures, underscoring the necessity for accurate estimation and thorough analysis of contributing factors. While settlement predictions rely heavily on geotechnical parameters, the inherent uncertainties within

geotechnical profiles can introduce notable errors in numerical models.

This study first investigates the impact of geotechnical uncertainty on ground settlement and potential collapses along the eastern section of Tabriz Metro Line 2, currently under excavation in marlstone formations. In the second phase, the influence of geotechnical parameters on settlement is analyzed using two-dimensional modeling in PLAXIS 2D software. Results reveal that an undetected loose sandy layer above the tunnel caused over-excavation and subsequent surface collapse within the affected zone. Sensitivity analysis further indicates that decreases in cohesion and internal friction angle of the upper tunnel layer, along with increased elastic modulus of the excavated formation, significantly contribute to settlement severity.

Introduction

Tunnel excavation, particularly within major infrastructure and urban transit projects such as metro systems, inherently involves two fundamental challenges: ensuring the structural stability of underground constructions and preventing unexpected ground collapses. Among the most pressing issues in shallow tunneling through urban, soft, and alluvial soils is surface settlement induced by excavation activities. This phenomenon—often referred to as soil displacement due to tunneling—becomes critically significant when tunnels are constructed near surface-level infrastructures and urban utilities. In such contexts, surface subsidence can cause severe damage to buildings and public assets. Hence, precise prediction of settlement and identification of its influencing factors are of paramount importance in urban tunneling projects.

In general, tunneling and other underground constructions result in the removal of soil masses and cause substantial changes in the surrounding stress field, leading to ground displacement around the tunnel. These deformations propagate upward, ultimately manifesting as surface settlement. Several operational and geological parameters influence the extent of ground settlement, including:

- Engineering geological conditions along the tunnel path (e.g., soil type, groundwater level);
- Excavation method and control of associated parameters such as face pressure, injection pressure (in mechanized tunneling), and excavation steps (in conventional methods);
- Geometric factors such as tunnel depth, diameter, and cross-sectional shape;
- Construction practices, managerial factors, and the quality of equipment used.



During the design phase, all geotechnical predictions are derived from limited data obtained through site-specific investigations in soil mechanics, hydrogeology, and geology. Based on the project type and available geological information, boreholes are typically drilled at intervals of 50 to 300 meters along the tunnel path, and the geotechnical profile is extrapolated between these data points. If there are considerable variations in soil conditions or misestimations in soil parameters, such uncertainties can significantly affect excavation predictions, potentially resulting in geohazards such as surface settlement. Therefore, accurate estimation of soil stratigraphy and geotechnical characteristics is of critical importance.

Conclusion

As the expansion of metro networks continues in major urban areas, tunnel excavation near surface structures has become a critical engineering concern. Ground settlement poses significant technical and economic risks, particularly in soft ground conditions commonly found in urban settings. This study focused on the eastern segment of Tabriz Metro Line 2 to evaluate the key factors contributing to ground settlement and collapse during mechanized tunneling in complex geotechnical conditions.

Field data collected from the TBM revealed that, although face pressure and grout injection levels were within acceptable limits during the collapse zones, undetected loose sandy layers above the tunnel crown, missed in preliminary geotechnical investigations, played a pivotal role in the instability. These layers caused foam loss, poor soil conditioning, increased cutterhead resistance, and eventually led to the formation of voids and surface collapses.

Furthermore, sensitivity analyses using PLAXIS 2D highlighted the critical influence of geotechnical parameters such as elastic modulus, cohesion, and internal friction angle on ground settlement. Among the boreholes analyzed—BH07, K2B1, BH06, and F3BH3—it was consistently found that reduced cohesion in upper soil layers and a lower elastic modulus in the tunnel-bearing strata significantly amplified settlement magnitudes.

Overall, this study underscores the importance of precise geotechnical characterization and the need to account for uncertainty in subsurface conditions. Failure to do so can lead to inaccurate design assumptions and increased geotechnical hazards. Sensitivity analysis, when integrated into the design process, serves as a powerful tool for identifying critical parameters and enhancing the safety and reliability of tunneling projects. It is therefore recommended that future urban tunneling endeavors incorporate rigorous numerical modeling, comprehensive sensitivity studies, and continuous field validation to mitigate geotechnical risks effectively.
