

تعیین فشار جبهه کار حفاری با EPB به روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی (مطالعه موردی: متروی تبریز)

امیرحسین رضایی*^۱ و مجتبی شیرزه حق^۲

^۱ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۶/۹/۲۶، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۴)

چکیده

تعیین فشار بهینه جبهه کار از مهم‌ترین مسائل قابل توجه در حفاری تونل با دستگاه TBM-EPB است. این پارامتر با نشست‌های سطحی ناشی از تونل‌سازی در ارتباط است. در این نوشتار فشار جبهه کار تونل متروی خط ۲ تبریز در بخش غربی مسیر با استفاده از روش تجربی COB و روش‌های تحلیلی Leca، Atkinson، Krause و Jancsecz و مدل‌سازی عددی سه بعدی در نرم‌افزار المان محدود Abaqus محاسبه گردیده است. پس از آن، مقادیر فشار جبهه کار محاسبه شده با روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی با مقادیر فشار جبهه کار اعمال شده در طول عملیات حفاری مقایسه شده است. خط متروی تبریز در محدوده مذکور در خاک عمدتاً درشت‌دانه با چسبندگی پایین و در زیر سطح ایستایی حفاری شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در بین روش‌های تعیین فشار جبهه کار، روش تجربی COB و روش تحلیلی Krause تطابق بیشتری با آنچه که در واقعیت روی داده است، داشته‌اند. روش COB با اختلاف جزئی در جهت اطمینان عمل کرده است. روش‌های Atkinson و Jancsecz با اختلاف محسوسی مقادیر بیشتری نسبت به سایر روش‌ها و واقعیت محاسبه نموده‌اند و روش Leca در حالت کلی نتایجی بر خلاف اطمینان ارائه داده است. مدل‌سازی‌های سه بعدی با اعمال فشار واقعی جبهه کار و تزریق، نشست‌ها را به خوبی تخمین زده و می‌توان گفت در ادامه مسیر با مدل‌سازی در Abaqus و اعمال فشارهای محاسبه شده به روش COB می‌توان پیش بینی بسیار نزدیکی از آنچه که در واقعیت روی خواهد داد، انجام داد.

کلیدواژه‌ها: TBM-EPB، فشار جبهه کار، روش‌های تحلیلی، روش COB، مدل‌سازی عددی، نشست‌های سطحی.

۱- اجزای مقاله

کار، فشار شعاعی و فشار تزریق، نقش بسیار مهمی در محدود کردن تغییر شکل‌های زمین و سازه‌های سطحی ایفا می‌نمایند. فشار اعمالی بر جبهه کار به عنوان عکس‌العمل فشار زمین (یعنی تنش-های قائم و جانبی زمین و فشار هیدروستاتیکی آب حفره‌ای) در محدوده مرزهای TBM وارد عمل می‌شود. در طول عملیات حفاری توسط TBM با رهاسازی تنش‌های قائم و جانبی، قوس‌زنی در خاک و گرادپان هیدرولیکی (در صورتی که وقوع جریان آب زیرزمینی به داخل جبهه مجاز باشد) تنش‌های مؤثر تغییر می‌یابد و منجر به وقوع تغییر شکل‌های زمین و نشست‌های سطحی می‌گردد (Mooney و همکاران، ۲۰۱۶).

فن‌آوری ساخت ماشین EPB مبتنی بر استفاده از خاک حفاری شده موجود در اتاقک حفاری برای نگهداری جبهه کار است. به این صورت که مصالح حفاری شده با عبور از دریچه و محفظه‌های تعبیه شده بر روی صفحه، ابتدا وارد محفظه اتاقک

نیاز روزافزون به سیستم حمل و نقل عمومی و پایدار در مناطق شلوغ شهری توسعه هرچه بیشتر مترو را در این نواحی می‌طلبد. عملیات حفاری و ساخت مترو با چالش‌هایی مانند هزینه بالا و زمان طولانی تکمیل عملیات روبروست. این چالش‌ها در مناطق پرتراکم شهری شدیدتر است. چرا که وجود سازه‌های سطحی که به نشست‌های ناشی از تونل‌سازی حساس هستند، کار را پیچیده‌تر می‌نماید (Sebastianelli و همکاران، ۲۰۱۳).

ماشین‌های حفاری تونل با جبهه تحت فشار یعنی سپرهای دوغایی و متعادل کننده فشار زمین (EPB) به طور فزاینده‌ای در عملیات تونل‌سازی در مناطق شهری به کار گرفته می‌شوند تا تغییر شکل‌های زمین را کنترل نمایند. TBM‌ها در جبهه تونل، در طول سپر و در انتهای سپر و پشت سگمنت‌ها، فشارهای نگهدارنده را تولید می‌کنند. این فشارها که به ترتیب عبارتند از فشار جبهه

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۱۴۵۲۶۰۰

حفاری شده و سپس به وسیله نوار نقاله مارپیچی به بیرون از محفظه اتاقک حفاری منتقل می‌شود. میزان خروج مصالح حفاری از نوار نقاله مارپیچی به سرعت چرخش آن بستگی دارد و از این رو سرعت چرخش نوار باید با نرخ نفوذ دستگاه TBM متناسب باشد. در هنگام خروج مصالح حفاری از نقاله مارپیچی، یک تعادل دینامیکی میان حجم مصالح حفاری وارد شده به درون اتاقک حفاری و حجم مصالح خروجی از نوار نقاله ایجاد می‌شود. اپراتور دستگاه TBM می‌تواند با ایجاد تغییر در میزان سرعت چرخش نوار نقاله مارپیچی و تجمع مصالح حفاری شده درون محفظه اتاقک حفاری، فشار درون آن را تنظیم کند.

به طور اساسی دو پارامتر کنترل کننده برای پیشروی بهینه دستگاه TBM وجود دارد که عبارتند از: فشار داخل چمبر و نسبت حجم مصالح تخلیه شده به حجم مصالح حفاری شده (R). در صورتی که نسبت R برابر با یک باشد، حالت تعادل ایجاد می‌شود. در صورتی که R کوچک‌تر از یک باشد، حجم مصالح تخلیه شده کمتر از حجم مصالح حفاری شده است، ناحیه پلاستیک در پیش روی جبهه کار توسعه پیدا کرده و فشار داخل چمبر نیز افزایش می‌یابد. در حالت دیگر، هنگامی که R بزرگ‌تر از یک باشد، فشار درون چمبر کاهش یافته و در جبهه کار تغییر شکل رخ می‌دهد. در این حال اگرچه ممکن است مقدار فشار جبهه کار تثبیت شود، اما به دلیل تخلیه مصالح بیش از مقدار حفاری شده، شرایط خطرناک و نامطلوب است. بنابراین فشار جبهه کار به تنهایی برای کنترل پیشروی و تعیین حالت مطمئن حفاری کافی نیست و حالت بهینه پیشروی باید با در نظر گرفتن دو عامل تعادل بین مصالح حفاری شده و مصالح تخلیه شده و تثبیت فشار داخل چمبر صورت پذیرد. مقدار بهینه فشار جبهه کار برای حفظ پایداری جبهه کار و حداقل نمودن جابه‌جایی زمین، اغلب برابر با فشار زمین در حالت سکون در نظر گرفته می‌شود. از نظر تئوری، در صورتی که فشار جبهه کار کمتر از فشار جانبی زمین در حالت سکون باشد ($\sigma_T < \sigma_0$)، خطر نشست زمین افزایش می‌یابد همان‌گونه که پیشتر بحث شد، این حالت در شرایطی رخ می‌دهد که R بزرگ‌تر از یک باشد و در صورتی قابل قبول است که تغییر شکل پلاستیک زمین مجاز باشد. در صورتی که فشار جبهه کار بین فشار زمین در حالت سکون و فشار زمین در حالت محرم باشد ($\sigma_a < \sigma_T < \sigma_0$)، امکان کنترل جبهه کار وجود دارد. فشار زمین در حالتی محرم است که جبهه کار دارای تغییر شکل پلاستیک به سمت سرتمه باشد. چنانکه جبهه کار توسط سرتمه و مصالح موجود در چمبر فشرده شود، حالت فشار مقاوم در زمین ایجاد می‌گردد (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۷).

تعیین دقیق مقدار فشار جبهه کار برای جلوگیری از ناپایداری آن به عوامل مختلفی از جمله چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و میزان نفوذپذیری زمین، نوع دستگاه TBM، سرعت پیشروی، وزن روش‌های تعادل حدی بر اساس نظریه فشار خاک تعریف می‌شوند. فرضیات استفاده شده برای روش تعادل حدی، عبارت است از: روش COB یکی از متداول‌ترین روش‌های تجربی است. این روش فشار جبهه کار را کمی بیشتر از فشار فعال زمین توصیه می‌کند (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۷). روش‌های تحلیلی در عین سادگی، پارامترهای متعددی را در تعیین فشار جبهه کار لحاظ می‌نمایند. این روش‌ها مقادیر دقیق و مناسبی برای طراحی‌های مرحله تکمیلی ارائه می‌دهند. روش‌های تحلیلی مختلفی که جهت برآورد فشار جبهه کار وجود دارد، با توجه به شرایط خاک به دو دسته روش‌های تحلیل تنش حدی و روش‌های تعادل حدی تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیل تنش حدی شامل روش Broms و Bennermark (برای خاک چسبنده و زهکشی نشده)، Atkinson و Potts (برای خاک غیرچسبنده برای تونل بدون پوشش)، Davis (برای خاک چسبنده) و Leca و Dormieux (برای خاک غیرچسبنده) هستند. روش‌های تعادل حدی شامل Krause (برای خاک چسبنده و غیرچسبنده)، Mohkam (برای خاک چسبنده و غیرچسبنده)، Jancsecz و Stainer (برای خاک غیرچسبنده و کمی چسبنده)، Kovari و Anagnostou (برای خاک غیرچسبنده) و روش Broere (برای خاک غیر چسبنده) هستند (Amnieh و همکاران، ۱۳۹۴).

Murayama برای ارزیابی حداقل فشار نگهداری جبهه حفاری از یک سطح لغزش اسپیرال لگاریتمی دو بعدی استفاده کرد (Broere، ۲۰۰۱). پس از آن، Horen در سال ۱۹۶۱ از مدل گوه سه گوش با سطحی صاف در جلوی گوه استفاده نمود (Kovari و Anagnostou، ۱۹۹۶).

Chambone و Corte (۱۹۹۴) با انجام آزمایش‌هایی توانستند الگوی شکست جبهه و فشار نگهدارنده (حدی) را تعیین کنند. آن‌ها نشان دادند که الگوی شکست جبهه حفاری سطح گوه‌ای شکلی است که با سیلویی از خاک روباره بارگذاری شده است.

هدف از تحلیل تنش حدی ارزیابی شرایط پایداری برای سیستم‌های مکانیکی با صرف‌نظر از رفتار مصالح سازنده آن‌هاست (Lee و Nam، ۲۰۰۱). در حالت حدی رفتار مصالح به صورت خمیری کامل فرض می‌گردد. در روش‌های تحلیل تنش حدی، تحلیل تنش عمدتاً با ارائه کران بالا و پایین که به ترتیب از نقطه نظر استاتیکی و دینامیکی مطرح می‌شوند، صورت می‌گیرد (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۷).

روش‌های تعادل حدی بر اساس نظریه فشار خاک تعریف می‌شوند. فرضیات استفاده شده برای روش تعادل حدی، عبارت است

به طور اساسی دو پارامتر کنترل کننده برای پیشروی بهینه دستگاه TBM وجود دارد که عبارتند از: فشار داخل چمبر و نسبت حجم مصالح تخلیه شده به حجم مصالح حفاری شده (R). در صورتی که نسبت R برابر با یک باشد، حالت تعادل ایجاد می‌شود. در صورتی که R کوچک‌تر از یک باشد، حجم مصالح تخلیه شده کمتر از حجم مصالح حفاری شده است، ناحیه پلاستیک در پیش روی جبهه کار توسعه پیدا کرده و فشار داخل چمبر نیز افزایش می‌یابد. در حالت دیگر، هنگامی که R بزرگ‌تر از یک باشد، فشار درون چمبر کاهش یافته و در جبهه کار تغییر شکل رخ می‌دهد. در این حال اگرچه ممکن است مقدار فشار جبهه کار تثبیت شود، اما به دلیل تخلیه مصالح بیش از مقدار حفاری شده، شرایط خطرناک و نامطلوب است. بنابراین فشار جبهه کار به تنهایی برای کنترل پیشروی و تعیین حالت مطمئن حفاری کافی نیست و حالت بهینه پیشروی باید با در نظر گرفتن دو عامل تعادل بین مصالح حفاری شده و مصالح تخلیه شده و تثبیت فشار داخل چمبر صورت پذیرد. مقدار بهینه فشار جبهه کار برای حفظ پایداری جبهه کار و حداقل نمودن جابه‌جایی زمین، اغلب برابر با فشار زمین در حالت سکون در نظر گرفته می‌شود. از نظر تئوری، در صورتی که فشار جبهه کار کمتر از فشار جانبی زمین در حالت سکون باشد ($\sigma_T < \sigma_0$)، خطر نشست زمین افزایش می‌یابد همان‌گونه که پیشتر بحث شد، این حالت در شرایطی رخ می‌دهد که R بزرگ‌تر از یک باشد و در صورتی قابل قبول است که تغییر شکل پلاستیک زمین مجاز باشد. در صورتی که فشار جبهه کار بین فشار زمین در حالت سکون و فشار زمین در حالت محرم باشد ($\sigma_a < \sigma_T < \sigma_0$)، امکان کنترل جبهه کار وجود دارد. فشار زمین در حالتی محرم است که جبهه کار دارای تغییر شکل پلاستیک به سمت سرتمه باشد. چنانکه جبهه کار توسط سرتمه و مصالح موجود در چمبر فشرده شود، حالت فشار مقاوم در زمین ایجاد می‌گردد (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۷).

تعیین دقیق مقدار فشار جبهه کار برای جلوگیری از ناپایداری آن به عوامل مختلفی از جمله چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و میزان نفوذپذیری زمین، نوع دستگاه TBM، سرعت پیشروی، وزن روش‌های تعادل حدی بر اساس نظریه فشار خاک تعریف می‌شوند. فرضیات استفاده شده برای روش تعادل حدی، عبارت است از: روش COB یکی از متداول‌ترین روش‌های تجربی است. این روش فشار جبهه کار را کمی بیشتر از فشار فعال زمین توصیه می‌کند (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۷). روش‌های تحلیلی در عین سادگی، پارامترهای متعددی را در تعیین فشار جبهه کار لحاظ می‌نمایند. این روش‌ها مقادیر دقیق و مناسبی برای طراحی‌های مرحله تکمیلی ارائه می‌دهند. روش‌های تحلیلی مختلفی که جهت برآورد فشار جبهه کار وجود دارد، با توجه به شرایط خاک به دو دسته روش‌های تحلیل تنش حدی و روش‌های تعادل حدی تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیل تنش حدی شامل روش Broms و Bennermark (برای خاک چسبنده و زهکشی نشده)، Atkinson و Potts (برای خاک غیرچسبنده برای تونل بدون پوشش)، Davis (برای خاک چسبنده) و Leca و Dormieux (برای خاک غیرچسبنده) هستند. روش‌های تعادل حدی شامل Krause (برای خاک چسبنده و غیرچسبنده)، Mohkam (برای خاک چسبنده و غیرچسبنده)، Jancsecz و Stainer (برای خاک غیرچسبنده و کمی چسبنده)، Kovari و Anagnostou (برای خاک غیرچسبنده) و روش Broere (برای خاک غیر چسبنده) هستند (Amnieh و همکاران، ۱۳۹۴).

Murayama برای ارزیابی حداقل فشار نگهداری جبهه حفاری از یک سطح لغزش اسپیرال لگاریتمی دو بعدی استفاده کرد (Broere، ۲۰۰۱). پس از آن، Horen در سال ۱۹۶۱ از مدل گوه سه گوش با سطحی صاف در جلوی گوه استفاده نمود (Kovari و Anagnostou، ۱۹۹۶).

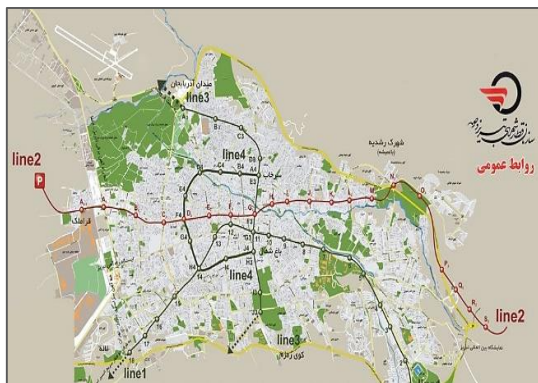
Bakhshandeh Amnieh و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی فشار جبهه کار تونل خط ۷ متروی تهران پرداخته و نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی بر مبنای المان محدود را با روش تحلیلی Jancsecz و Steiner مقایسه کردند. آن‌ها در این مطالعه حضور آب زیرزمینی را در نظر نگرفته‌اند.

Golshani و Eslami (۱۳۹۶) پایداری جبهه کار ناهمگن خط ۲ متروی مشهد را با نرم افزار تفاضل محدود Flac و روش تجربی Peck و روش تحلیلی Broere بررسی کرده‌اند.

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد پیش از این مطالعه جامعی که به مقایسه روش‌های مختلف تحلیلی و تجربی و روش عددی با نتایج رفتارسنجی فشار جبهه کار و فشار تزریق دوغاب در حفاری با EPB پردازد، انجام نگرفته است. از این رو در این نوشتار، پروژه خط ۲ متروی تبریز در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه SO2 تحت مطالعه جامعی قرار گرفته است. در این مطالعه، فشار جبهه کار در تاج تونل با استفاده از روش تجربی COB، روش‌های تحلیل تنش حدی Atkinson-Potts و Leca، روش‌های تحلیل تعادل حدی Krause و Jancsecz-Steiner و روش عددی المان محدود با نرم افزار Abaqus محاسبه شده و با مقادیر واقعی فشار اعمالی به جبهه کار که در طول عملیات حفاری اندازه‌گیری و ثبت گردیده، مقایسه شده است.

۲- معرفی مشخصات متروی تبریز

پروژه خط ۲ متروی تبریز (TUR2) از زمین‌های زراعتی قراملک در غرب تبریز شروع شده و در نمایشگاه بین‌المللی تبریز که در شرق این شهر قرار دارد، به پایان می‌رسد. حفاری تونل در تمام طول مسیر که بالغ بر ۲۲ کیلومتر است، به صورت مکانیزه توسط دستگاه TBM-EPB انجام می‌گیرد. در شکل (۲) خطوط متروی تبریز نشان داده شده است. براساس گزارش مطالعات ژئوتکنیکی مسیر خط ۲ متروی تبریز، محدوده ابتدای غربی مسیر را می‌توان به دو ناحیه کلی تقسیم کرد:



شکل ۲- خطوط متروی تبریز

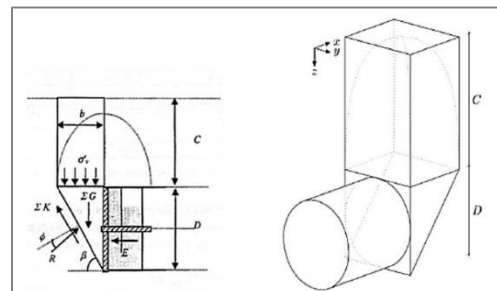
از تعریف سطوح شکست به صورت متوالی و پی در پی، توزیع یکنواخت تنش در امتداد سطح شکست و در نظر گرفتن گوه گسیختگی به صورت یک جسم صلب. متداول‌ترین روش تحلیلی برای محاسبه فشار جبهه کار، استفاده از مدل گوه و سیلو است (شکل (۱)). این مدل سه بعدی مبنای روش تعادل حدی است (Golshani و Eslami, ۱۳۹۶).

برای تعیین فشار بهینه جبهه کار در حفاری با EPB، علاوه بر روش‌های تجربی و تحلیلی، از روش‌های عددی نیز به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. با استفاده از این روش‌ها امکان شبیه‌سازی سه‌بعدی عملیات حفاری با رعایت تمام جزئیات و لایه‌بندی زمین و اندرکنش‌های خاک، سازه و لاینینگ تونل و مشاهده تغییر شکل‌های زمین و نشست‌های سطحی ناشی از حفاری وجود دارد. روش‌های المان محدود و تفاضل محدود پرکاربردترین روش‌های عددی مورد استفاده برای این کار هستند. همچنین نرم‌افزارهای Abaqus و Flac که به ترتیب بر مبنای المان محدود و تفاضل محدود به محاسبه می‌پردازند، متداول‌ترین کدهای عددی هستند که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

Meschke و Kasper (۲۰۰۶) با استفاده از روش المان محدود و مدل سازی سه بعدی، تأثیر پارامترهای TBM-EPB یعنی فشار جبهه کار، فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها، وزن TBM و مخروطی بودن شکل سپر بر نشست‌های سطحی ناشی از حفاری را مطالعه کرده‌اند.

Lambrughi و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود Flac به تحلیل حساسیت مدل‌های رفتاری مختلف خاک و بررسی تأثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست‌های سطحی ناشی از حفاری پروژه متروی مادرید پرداخته‌اند.

Heidari و همکاران (۲۰۱۳) پارامترهای فشار جبهه کار و تزریق را با روش المان محدود بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که فشارهای مختلف جبهه کار تأثیر چندانی بر نشست سطحی ماکزیم ناشی از تونل‌سازی ندارد، این در حالی است که تأثیر فشار تزریق در میزان نشست کلی به وضوح دیده می‌شود.



شکل ۱- مدل سطح گسیختگی گوه و سیلو در جبهه تونل

در حالت کلی می‌توان نوع خاک را در محدوده شفت غربی تا ایستگاه 02 عمدتاً درشت‌دانه و با چسبندگی کم در نظر گرفت. قطر حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز ۹/۴۹ متر، طول سپر ماشین حفاری ۹ متر، قطر خارجی سپر در جلوی آن ۹/۴۶ متر و در عقب آن برابر ۹/۴۴ متر است. همچنین وزن TBM و وزن قسمت پشتیبان آن به ترتیب برابر ۶۵۰ و ۳۲۰ تن است. تونل با سگمنت‌های بتنی پیش ساخته به طول ۱/۵ متر و عرض ۳۵ سانتی‌متر پوشیده می‌شود. (Katebi و همکاران، ۲۰۱۵).

۳- روش‌های محاسبه فشار جبهه کار

۳-۱- محاسبه فشار جبهه کار به روش تجربی COB

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای محاسبه فشار جبهه کار استفاده از روش تجربی مرکز ساخت و ساز زیرزمینی آلمان (COB) است. بر اساس روش COB مقدار فشار جبهه کار از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. پارامترهای دخیل در این رابطه، از روابط (۲) تا (۵) به دست می‌آیند (COB، ۱۹۹۶).

$$\sigma_T = \eta_e k_a \sigma'_v + \eta_w \gamma_w H_w + 20KPa \quad (1)$$

$$K_a = 1 - \sin \phi' / 1 + \sin \phi' \quad (2)$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (3)$$

$$a = 0.5D/1 + \tan \theta \quad (4)$$

$$\sigma'_v = \left\{ \frac{\gamma' a - c'}{K \tan \phi'} \left(1 - e^{-K \tan \phi' \frac{H_w}{a}} \right) + \left(\frac{\gamma_a a - c'}{K \tan \phi'} \right) \left(e^{-K \tan \phi' \frac{H_w}{a}} - e^{-K \tan \phi' \frac{H}{a}} \right) + (q_0 e^{-K \tan \phi' \frac{H}{a}}) \right\} \quad (5)$$

در جدول (۱) پارامترهای مورد استفاده در روابط COB معرفی شده است. در این نوشتار، ضرایب η_e و η_w به ترتیب برابر ۱/۷۵ و ۱/۰۵ انتخاب شده است.

۳-۲- محاسبه فشار جبهه کار به روش تحلیلی Atkinson

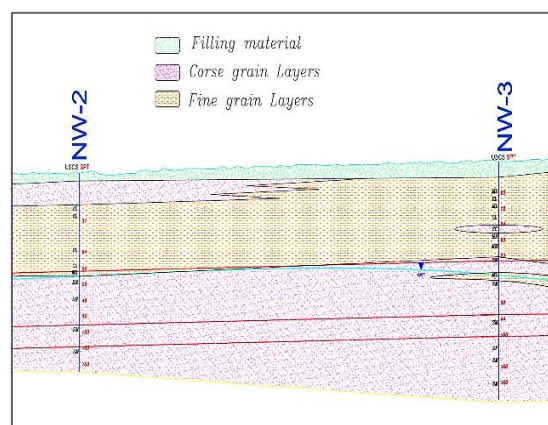
Potts و

در این روش مبتنی بر تحلیل تنش حدی، فشار مینیمم نگهدارنده جبهه حفاری در خاک زهکشی شده غیرچسبیده از رابطه (۶) به دست می‌آید. ثابت K_p نیز رابطه (۷) محاسبه می‌شود. (Atkinson و Potts، ۱۹۹۷).

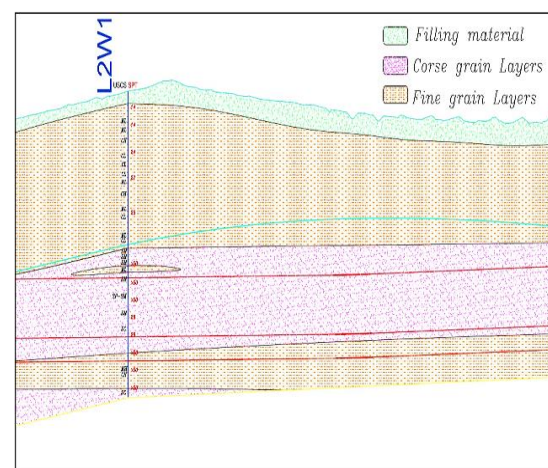
در روش Atkinson فشار جبهه کار به مقدار روباره بستگی ندارد و در حالت کلی با ضریب ایمنی بزرگی محاسبه می‌شود. (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۷).

ناحیه یک: حد فاصل شفت غربی تا میدان ماشین‌سازی (از ابتدای مسیر تا کیلومتر ۲+۵۰)؛ خاک در این ناحیه از جنس رسوبات آبرفتی ریزدانه در سطح و رسوبات شن و ماسه آبدار در عمق است. مسیر تونل در ناحیه یک عمدتاً درون رسوبات آبرفتی درشت دانه با نفوذپذیری بالا قرار دارد. عمق آب زیرزمینی در محدوده ناحیه یک بین ۱۳ تا ۱۶ متر متغیر است.

ناحیه دو: حد فاصل میدان ماشین‌سازی تا ایستگاه 02 (از کیلومتر ۲+۵۰ تا کیلومتر ۳+۸۰)؛ خاک در این ناحیه از جنس رسوبات آبرفتی ریزدانه رسی و سیلتی با چسبندگی کم است. در میان این لایه‌های آبرفتی ریزدانه، میان لایه‌هایی از رسوبات ماسه‌ای هم وجود دارد، اما مسیر تونل به طور عمده از درون رسوبات آبرفتی ریزدانه می‌گذرد. عمق آب زیرزمینی در محدوده ناحیه دو بین ۱۴ تا ۲۲ متر متغیر است. در شکل‌های (۳) و (۴) پروفیل زمین‌شناسی مهندسی در دو ناحیه از این بخش نشان داده شده است. میانگین وزنی چسبندگی در لایه‌های زمین از شفت غربی تا ایستگاه 01 تقریباً کمتر از ۴۰ کیلوپاسکال و از ایستگاه 01 تا ایستگاه 02 کمتر از ۱۵-۲۰ کیلوپاسکال است.



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی مسیر (کیلومتر ۲+۴۰۰ تا ۲+۸۰۰)



شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی مسیر (کیلومتر ۳+۲۰۰ تا ۳+۶۰۰)

$$N_r = \frac{1}{3} \left[\frac{\tan \alpha R_B + \frac{\cos \varphi \cos(\beta + \varphi) R_C^3}{2 \sin \varphi \sin(\beta + \varphi) R_A} - 1}{\sin(\beta - \varphi) R_E^3} \right] \quad (10)$$

$$R_A = \frac{\sqrt{\cos(\alpha - \varphi) \cos(\alpha + \varphi)}}{\cos \varphi} \quad (11)$$

$$R_B = \frac{\cos(\alpha - \varphi) \cos(\alpha + \varphi)}{\sin 2\varphi} \quad (12)$$

$$R_C = \frac{\cos(\alpha + \varphi)}{\cos \alpha} \left[\frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)} \right]^{0.5} \quad (13)$$

$$R_D = \frac{\sin \beta}{\sin \varphi \sin(\beta + \varphi)} \quad (14)$$

$$R_E = \frac{\sin(\beta - \varphi) \cos(\alpha + \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)} \quad (15)$$

$$\beta = \pi/4 + \alpha/2 \quad (16)$$

$$\alpha = 49 - \theta/2 \quad (17)$$

جدول ۳- معرفی پارامترهای روش Leca

واحد	توضیح	پارامتر
KN/m ²	بار سطحی	σ_s
KN/m ²	چسبندگی خاک	C
m	قطر تونل	D
KN/m ³	وزن واحد حجم خاک	γ
درجه	زاویه اصطکاک داخلی خاک	φ

۳-۴- محاسبه فشار جبهه کار به روش تحلیلی Krause
این روش فشار نگهداری مینیمم را برای مکانیسم‌های مختلف گسیختگی محاسبه می‌نماید. در روش Krause فشار پایداری ماکزیمم با فرض سطح گسیختگی ربع دایره از رابطه (۱۸) به دست می‌آید. در جدول (۴) پارامترهای مورد نیاز برای روش Krause معرفی گردیده است. این روش بر مبنای تعادل حدی به محاسبه می‌پردازد (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۷).

$$S = (1/\tan \varphi) (D\gamma'/3 - \pi C/2) \quad (18)$$

جدول ۴- معرفی پارامترهای روش Krause

واحد	توضیح	پارامتر
deg	زاویه اصطکاک داخلی خاک	φ
m	روباره تونل	C
m	قطر تونل	D
KN/m ³	وزن مخصوص غوطه‌وری خاک	γ'

جدول ۱- معرفی پارامترهای روش COB

واحد	توضیح	پارامتر
	ضریب اطمینان تخمین فشار خاک	η_e
	ضریب اطمینان تخمین فشار آب	η_w
KPa	فشار مؤثر زمین	σ'_v
	ضریب فشار خاک در حالت فعال	K_a
	ضریب فشار خاک در حالت سکون	K_0
deg	زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک	φ'
m	ارتفاع آب	H_w
KN/m ²	بار سطحی	q_0
KN/m ³	وزن واحد حجم آب	γ_w
KN/m ³	وزن مؤثر واحد حجم خاک	γ'
m	قطر	D
deg	زاویه لغزش گوه	θ

جدول ۲- معرفی پارامترهای روش Atkinson

واحد	توضیح	پارامتر
deg	زاویه اصطکاک داخلی خاک	φ
m	شعاع تونل	R
	ضریب فشار خاک در حالت مقاوم	K_p
KN/m ³	وزن واحد حجم خاک	γ

در

جدول (۲) پارامترهای مورد استفاده در روش Atkinson به طور خلاصه معرفی شده است.

$$S_{min} = [2K_p/(K_p^2 - 1)] \gamma R \quad (6)$$

$$K_p = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi) \quad (7)$$

۳-۳- محاسبه فشار جبهه کار به روش تحلیلی Leca و Dormieux

این روش بر تئوری کران بالا و پایین و مدل‌سازی سه‌بعدی مبتنی است. نتایج کران‌های بالا (+) و پایین (-) به ترتیب به وسیله روش دینامیکی و روش استاتیکی به دست می‌آیند و تخمین‌های خوش بینانه و بدبینانه از فشار نگهداری جبهه کار ارائه می‌دهند. فشار جبهه کار در این روش از رابطه (۸) به دست می‌آید. پارامترهای دخیل در رابطه (۸) از روابط (۹) تا (۱۷) محاسبه می‌گردد. پارامترهای مربوط به محاسبات روش مبتنی بر تحلیل تنش حدی Leca و Dormieux در جدول (۳) معرفی شده است (Panet و Leca، ۱۹۹۰).

$$\sigma_T = \gamma D N_\gamma + C N_C + \sigma_s N_s \quad (8)$$

$$N_s = \frac{1}{\cos \alpha \cos^2 \varphi} \frac{\sin(\beta - \varphi) R_E^2}{\sin(\beta + \varphi) R_A} \quad (9)$$

برای این منظور در هر مقطع پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به صورت میانگین وزنی از لایه‌بندی واقعی خاک (با استفاده از روابط (۲۳) تا (۲۵)) در نظر گرفته شده است.

$$\varphi_m = \frac{\sum \varphi_i H_i}{\sum H_i} \quad (23)$$

$$C_m = \frac{\sum C_i H_i}{\sum H_i} \quad (24)$$

$$\gamma_m = \frac{\sum \gamma_i H_i}{\sum H_i} \quad (25)$$

در همه محاسبات، با توجه به این که تونل خط ۲ متروی تبریز در محدوده مورد بررسی از زیر خیابان عبور می‌کند، بار سطحی برابر ۲۰ کیلوپاسکال در نظر فرض شده است.

۴- جزئیات رفتارسنجی خط ۲ متروی تبریز

در طول عملیات حفاری تونل، در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه 01 (کیلومتر از ۱+۸۰۰ تا ۳+۰۰۰) و از ایستگاه 01 تا ایستگاه 02 (کیلومتر از ۳+۱۴۰ تا ۳+۸۰۰) بین‌هایی در فواصل ۱۰ متری در سطح زمین نصب شده و با پیشروی TBM-EPB نشست‌های سطحی ناشی از حفاری قرائت و ثبت شده است. در تک تک رینگ سگمنت‌های نصب شده در این محدوده، فشار اعمالی به جبهه کار اندازه‌گیری و ثبت شده است. همچنین فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها در انتهای سپر در حد فاصل ایستگاه S01 تا ایستگاه S02 قرائت شده است.

۵- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی‌های عددی بر مبنای روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار Abaqus انجام گرفته است. در این مدل‌سازی-های سه‌بعدی، زمین، سپر EPB، سگمنت‌های پوشش تونل و دوغاب تزریق شده در پشت سگمنت‌ها (گروت) و وجود آب زیرزمینی مد نظر قرار گرفته است. برای زمین در بالای سطح ایستابی از المان پیوسته ۸ گرهی C3D8، برای زمین در زیر سطح ایستابی و دوغاب از المان متخلخل اشباع با فشار آب حفره‌ای C3D8P و برای لاینینگ تونل و سپر از المان‌های پیوسته ۴ گرهی S4 استفاده شده است.

با توجه به این که فشار جبهه کار و فشار تزریق دوغاب در حد فاصل ایستگاه 01 تا ایستگاه 02 در طول عملیات ثبت شده، در این نوشتار دو مقطع از همین محدوده برای مدل‌سازی عددی با Abaqus انتخاب شده است. در مقطع شماره ۱، TBM تا کیلومتر از ۳+۳۱۸ حفاری کرده است. بیشترین روباره مسیر تونل در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه 02 به مقطع شماره ۱ مربوط است. لایه‌بندی خاک و عمق آب زیرزمینی دقیقاً مطابق گزارش مطالعات

۳-۵- محاسبه فشار جبهه کار به روش تحلیلی Jancsecz و Steiner

بر اساس مدل Horen سطح گسیختگی سه‌بعدی شکل (۱) از گوه و سیلوی خاک تشکیل شده است. فشار قائم ناشی از سیلو که بر گوه وارد می‌شود، از حل معادله ترازقی محاسبه می‌شود. در روش Jancsecz و Steiner مکانیزم گسیختگی با استفاده از تحلیل تعادل حدی بررسی شده و فشار جبهه کار از رابطه (۱۹) به دست می‌آید. پارامترهای دخیل در این رابطه از روابط (۲۰) تا (۲۲) محاسبه می‌گردد. در جدول (۵) پارامترهای این روش معرفی گردیده است. پارامتر فشار سه‌بعدی فعال زمین با استفاده از جدول (۶) تعیین می‌شود (Jancsecz و Steiner، ۱۹۹۴).

$$\sigma_T = K_{a3} \sigma'_V \quad (19)$$

$$K_{a3} = \frac{(\sin \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \varphi - \frac{K \alpha \cos \beta \tan \varphi}{1.5})}{(\sin \beta \cos \beta + \sin^2 \beta \tan \varphi)} \quad (20)$$

$$K = (1 - \sin \varphi + \tan^2 (45 - \frac{\varphi}{2})) \quad (21)$$

$$\alpha = (1 + \frac{3C}{D}) / (1 + \frac{2C}{D}) \quad (22)$$

در این نوشتار در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه 02 خط ۲ متروی تبریز، از کیلومتر از ۱+۸۰۰ تا ۳+۸۰۰، در فواصل ۵۰ متری، مقطعی عمود بر محور مرکزی تونل (راستای پیشروی حفاری) تهیه شده و در هر یک از آن‌ها مقدار فشار جبهه کار با روش تجربی COB و روش‌های تحلیلی Leca، Atkinson، Krause و Jancsecz محاسبه شده است.

جدول ۵- معرفی پارامترهای روش Jancsecz

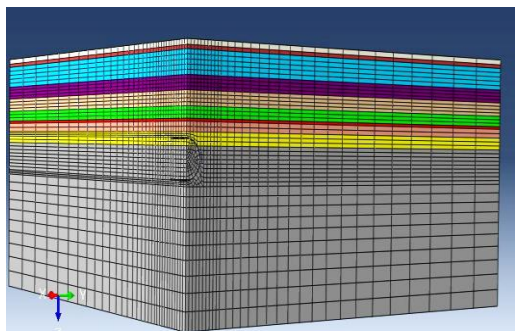
پارامتر	توضیح	واحد
φ	زاویه اصطکاک داخلی خاک	درجه
K_{a3}	ضریب فشار سه‌بعدی خاک در حالت فعال	
α	ضریب عمق تونل	
C	روباره تونل	m
D	قطر تونل	m
β	زاویه گسیختگی با سطح افق	deg

جدول ۶- ضریب فشار فعال سه‌بعدی زمین در روش Jancsecz

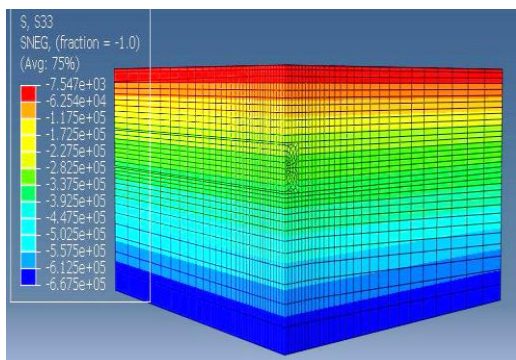
$\frac{C}{D}$	K_{a3}				
	φ	φ	φ	φ	φ
	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
۰	۰/۳۸۶	۰/۳۱۰	۰/۲۴۸	۰/۱۹۹	۰/۱۵۹
۱	۰/۳۵۴	۰/۲۷۹	۰/۲۲۲	۰/۱۷۷	۰/۱۴۱
۲	۰/۳۴۸	۰/۲۷۳	۰/۲۱۷	۰/۱۷۳	۰/۱۳۸
۳	۰/۳۴۵	۰/۲۷۱	۰/۲۱۴	۰/۱۷۱	۰/۱۳۶

در مدل سازی عددی با نرم افزار Abaqus ابعاد زمین بر اساس توصیه های Lambrugی و همکاران (۲۰۱۲) تعیین شده است. برای این منظور طول و عرض مدل (به ترتیب در راستای x و y) برابر $2(Z_0 + D)$ و عمق مدل (در راستای z) برابر $Z_0 + D$ انتخاب شده است. Z_0 عمق محور تونل و D قطر آن را نشان می دهد. این مرزها به حد کافی بزرگ بوده و بر نتایج مدل سازی عددی تأثیر نگذاشته اند. همچنین مدل عددی نسبت به ابعاد مش بندی حساسیت سنجی شده است. در این مدل سازی ها، ابتدا در گام ژئواستاتیک تنش های اولیه و تراز آب زیرزمینی در زمین برقرار گردیده و مدل به تعادل اولیه رسیده است (شکل ۶).

پس از برقراری تعادل اولیه سربار سطحی ناشی از ترافیک بر مدل اعمال گردیده است. برای حفاری تونل از گام soils استفاده شده و پیشروی تونل در هر گام حفاری برابر طول یک سگمنت (۱/۵ متر) بوده است. در هر گام حفاری المان های داخل مقطع حفاری با قطر ۹/۴۹ متر غیرفعال شده و سپر EPB با ضخامت ۳۵ سانتی متر در طول ۱/۵ متر فعال گردیده و فشار لازم به جهت کار اعمال شده است. برای ساده سازی روند کار، از شکل مخروطی سپر صرف نظر شده و قطر بیرونی آن برابر متوسط قطر جلو و عقب سپر (۹/۴۵ متر) فرض شده است. پس از این که حفاری به اندازه طول سپر (۹ متر) پیشروی کرد، المان های گروت با سختی اولیه و لاینینگ در پشت سپر فعال گردیده و فشار شعاعی تزریق در انتهای سپر اعمال شده است.



شکل ۵- لایه بندی زمین در مدل Abaqus (مقطع شماره ۱)



شکل ۶- مدل Abaqus پس از تعادل اولیه در گام ژئواستاتیک

ژئوتکنیکی مسیر مدل سازی شده است (شکل ۵). جزئیات لایه بندی و پارامترهای ژئوتکنیکی زمین در مقطع شماره ۱، در جدول (۷) ارائه گردیده است.

در مقطع شماره ۲، TBM تا کیلومتر ۳+۵۹۲ حفاری کرده است. در این مقطع روباره تقریباً با متوسط روباره تونل در حد فاصل ایستگاه 01 تا ایستگاه 02 برابر است. جزئیات لایه بندی و پارامترهای ژئوتکنیکی مقطع شماره ۲، در جدول (۸) ارائه شده است.

در جدول (۹) عمق محور تونل، میزان روباره، عمق آب زیرزمینی و وزن واحد حجم آب در مقاطع شماره ۱ و شماره ۲ که برای مدل سازی عددی در Abaqus انتخاب شده اند، نشان داده شده است. چنان که در جدول (۹) مشهود است، روباره در مقطع شماره ۱ حدود ۵ متر بیشتر از روباره در مقطع شماره ۲ تقریباً برابر مقدار میانگین روباره در طول مسیر است.

جدول ۷- جزئیات لایه بندی زمین مقطع شماره ۱

ضخامت لایه	E	ν	φ	C	γ_d	γ_m
m	$\frac{Kgf}{m^2}$		deg	$\frac{KN}{m^2}$	$\frac{KN}{m^3}$	$\frac{KN}{m^3}$
۱	۱۰	۰/۳	۲۲/۰۰	۱۰	۱۸/۰۰	۱۸/۰۰
۲	۵۵	۰/۳۳	۲۸/۳۰	۱۹	۱۵/۷	۱۹/۴۰
۳	۹۹	۰/۴۰	۲۲/۰۰	۲۷	۱۶/۰۰	۱۸/۰۰
۴	۹۶۵	۰/۳۳	۱۴/۰۰	۷	۱۶/۵۰	۱۸/۷۰
۵	۱۳۵	۰/۳۵	۸/۵۰	۵۷	۱۷/۰۰	۲۰/۱۰
۶	۷۹۵	۰/۳۳	۲۱/۶۰	۱۴	۱۶/۷۰	۲۰/۸۰
۷	۱۲۰	۰/۳۵	۲۷/۰۰	۱۲	۱۶/۵۰	۲۰/۱۰
۸	۷۹۰	۰/۳۳	۳۲/۰۰	۷	۱۶/۰۰	۲۰/۴۰
۹	۱۲۰	۰/۳۵	۲۸/۰۰	۱۲	۱۶/۵۰	۲۰/۱۰

جدول ۸- جزئیات لایه بندی زمین در مقطع شماره ۲

ضخامت لایه	E	ν	φ	C	γ_d	γ_m
m	$\frac{Kgf}{m^2}$		deg	$\frac{KN}{m^2}$	$\frac{KN}{m^3}$	$\frac{KN}{m^3}$
۱	۱۰	۰/۳۰	۲۲/۰۰	۱۰	۱۸/۰۰	۱۸/۰۰
۲	۵۵	۰/۳۳	۲۸/۳۰	۱۹	۱۵/۷۰	۱۹/۴۰
۳	۹۰	۰/۴۰	۱۸/۰۰	۲۶	۱۶/۶۰	۱۹/۵۰
۴	۱۲۰	۰/۳۵	۲۸/۰۰	۱۲	۱۶/۵۰	۲۰/۱۰

جدول ۹- عمق تونل، روباره و عمق آب زیرزمینی در مقاطع ۱ و ۲

کیلومتر مقطع	z_0	Overburden	H_w	γ_w
m	m	m	m	$\frac{KN}{m^3}$
۳+۳۰۰	۲۶/۳۹۵	۲۱/۶۵	۱۷/۴۰	۱۰/۰۰
۳+۵۶۰	۲۰/۷۹۵	۱۶/۰۵	۱۵/۶۰	۱۰/۰۰

۶- نتایج و بحث

فشارهای جبهه کار محاسبه شده در تاج تونل با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی که در بخش‌های (۳) تا (۷) معرفی شدند، در جدول (۱۱) ارائه شده است.

جدول ۱۱- فشارهای جبهه کار محاسبه شده در تاج تونل

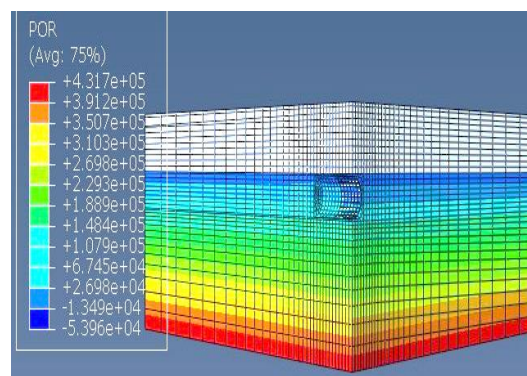
کیلو متراتژ	COB	Atkinson	Leca	Krause	Jancsecz
۱+۸۵۰	۷۲	۱۰۱	۵۸	۸۴	۷۱
۱+۹۰۰	۷۱	۹۹	۵۷	۸۳	۷۰
۱+۹۵۰	۷۰	۹۸	۵۶	۸۳	۶۸
۲+۰۰۰	۷۳	۱۱۳	۷۰	۹۲	۸۱
۲+۰۵۰	۷۳	۷۴	۳۶	۶۲	۵۶
۲+۱۰۰	۹۳	۸۶	۳۷	۶۸	۶۲
۲+۱۵۰	۹۷	۸۸	۳۷	۶۹	۶۳
۲+۲۰۰	۹۳	۸۹	۳۶	۷۶	۵۴
۲+۲۵۰	۹۸	۸۹	۳۸	۷۰	۶۴
۲+۳۰۰	۱۰۰	۹۱	۳۸	۷۰	۶۷
۲+۳۵۰	۷۶	۵۷	۲۵	۴۸	۴۶
۲+۴۰۰	۴۶	۱۰۲	۷۶	۷۸	۷۶
۲+۴۵۰	۶۰	۹۷	۶۲	۷۵	۷۲
۲+۵۰۰	۸۶	۹۳	۵۲	۷۶	۶۹
۲+۵۵۰	۷۵	۹۸	۸۵	۷۱	۷۳
۲+۶۰۰	۷۴	۱۱۹	۷۹	۸۹	۸۸
۲+۶۵۰	۷۸	۹۱	۴۳	۸۰	۶۸
۲+۷۰۰	۵۲	۱۳۱	۹۴	۱۰۹	۹۷
۲+۷۵۰	۷۷	۱۱۷	۷۷	۸۹	۸۷
۲+۸۰۰	۶۱	۱۲۷	۹۸	۹۷	۹۶
۲+۸۵۰	۴۸	۱۴۱	۱۲۲	۱۰۶	۱۰۸
۲+۹۰۰	۴۸	۱۴۲	۱۲۴	۱۰۶	۱۰۶
۲+۹۵۰	۴۴	۱۴۵	۱۳۰	۱۱۰	۱۰۵
۳+۰۰۰	۴۵	۱۴۶	۱۲۸	۱۰۵	۱۱۴
۳+۱۵۰	۱۰۸	۱۲۱	۶۶	۷۴	۱۱۶
۳+۲۰۰	۱۱۳	۱۲۰	۶۲	۶۸	۱۲۷
۳+۲۵۰	۱۲۸	۱۳۲	۷۷	۶۹	۱۴۱
۳+۳۰۰	۱۳۱	۱۳۴	۸۶	۷۱	۱۳۶
۳+۳۵۰	۱۳۱	۱۹۳	۱۵۲	۹۳	۲۱۸
۳+۴۰۰	۱۲۴	۱۹۲	۱۴۹	۹۹	۲۱۲
۳+۴۵۰	۱۰۲	۱۶۸	۱۱۹	۹۸	۱۷۶
۳+۵۰۰	۱۰۶	۱۱۹	۶۲	۷۴	۱۱۹
۳+۵۵۰	۱۰۴	۱۱۷	۶۰	۷۶	۱۱۲
۳+۶۰۰	۱۰۳	۱۶۶	۱۱۸	۹۵	۱۶۶
۳+۶۵۰	۱۰۵	۱۷۵	۱۲۷	۱۰۳	۱۷۱
۳+۷۰۰	۱۰۸	۱۸۶	۱۳۸	۱۰۷	۱۸۴
۳+۷۵۰	۱۱۶	۲۱۶	۱۷۲	۱۱۸	۱۲۵
۳+۸۰۰	۹۱	۸۲	۳۷	۵۷	۱۲۸

با گذشت زمان و تداوم پیشروی سپر، سختی المان‌های گروت به حد نهایی خود افزایش داده شده است. در مدل‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار Abaqus، برای زمین از مدل رفتاری Mohr-Coulomb با جریان غیرهمراه و برای سپر TBM، لاینینگ بتنی و گروت با سختی اولیه و نهایی از مدل رفتاری الاستیک خطی استفاده شده است. پارامترهای مکانیکی سپر، لاینینگ و گروت در جدول (۱۰) ارائه گردیده است.

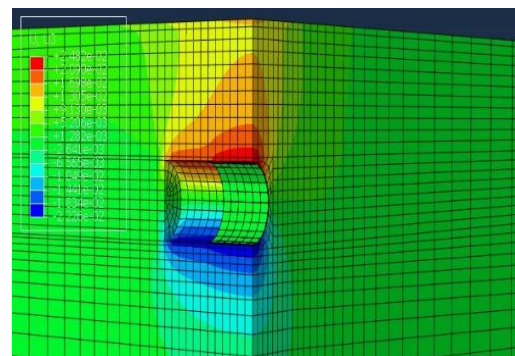
برای نمونه کنتور فشار آب حفره‌ای و کنتور نشست‌های سطحی قائم پس از ۱۲ گام حفاری (۱۸ متر پیشروی) در مقطع شماره ۲ به ترتیب در شکل (۷) و شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول ۱۰- مشخصات سپر، لاینینگ و گروت

ν	E	γ	مصالح
	MPa	$\frac{KN}{m^3}$	
۰/۳۵	۰/۲۵		سپر TBM
۰/۲۰	۲۵۲۰۰	۲۵/۰۰	لاینینگ تونل
۰/۴۷	۵	۱۸/۰۰	گروت (سیال)
۰/۳۰	۲۰	۱۸/۰۰	گروت (سخت)



شکل ۷- کنتور فشار آب حفره‌ای در مدل Abaqus



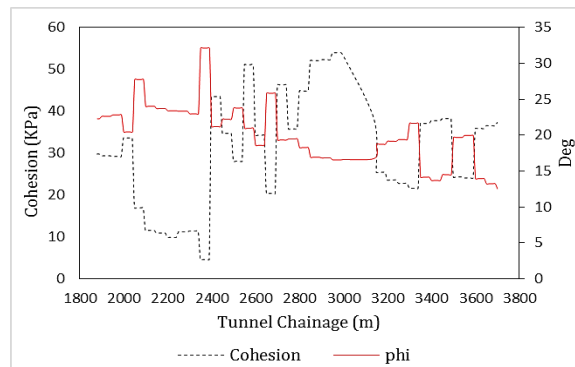
شکل ۸- کنتور نشست قائم در مدل Abaqus پس از ۱۸ متر حفاری

بر اساس شکل (۱۱) و (۱۲) می‌توان گفت روش تحلیلی Atkinson تنها در محدوده کیلومترهای ۲+۰۰۰ تا ۲+۴۰۰ که میانگین چسبندگی خاک در آن کمتر از ۱۰ کیلوپاسکال بوده و مینیمم چسبندگی در طول مسیر است، به فشارهایی که در واقعیت اعمال شده، نزدیک بوده است. با افزایش چسبندگی روش Atkinson مقادیری را برای فشار جبهه کار محاسبه نموده که به طور محسوسی از سایر روش‌ها و واقعیت بیشتر بوده است. در حالت کلی روش Atkinson در خاک با چسبندگی بسیار کم محاسبات واقع بینانه‌ای ارائه داده و با افزایش چسبندگی در جهت اطمینان و به شدت دست بالا عمل کرده است. روش تحلیلی Jancsecz و Steiner در حد فاصل کیلومترهای ۱+۸۰۰ تا ۲+۸۰۰ که میانگین زاویه اصطکاک داخلی خاک بیش از ۲۰ درجه و چسبندگی کمتر از ۱۵ کیلوپاسکال است، فشارهایی را محاسبه کرده که به فشارهای اعمال شده در واقعیت نزدیک بوده است. اما اختلاف این روش با واقعیت بر خلاف اطمینان بوده است. یعنی روش Jancsecz مقادیری را محاسبه کرده که حدود ۲۰ کیلوپاسکال از واقعیت کمتر بوده است. در ادامه مسیر و با افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، روش Jancsecz از واقعیت دور شده اما در جهت اطمینان و دست بالا عمل کرده است. در حد فاصل ایستگاه S01 و S02 با افزایش درصد خاک ریزدانه روش‌های Jancsecz و Atkinson تقریباً عین هم عمل کرده و در جهت اطمینان کاملاً از واقعیت دور بوده‌اند.

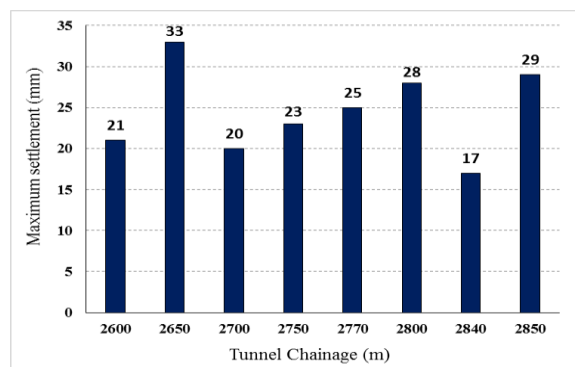
شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد روش تحلیلی Leca و Dormieux در طول مسیر به تناوب بر خلاف اطمینان محاسبه کرده است. بیشترین نشست‌های سطحی از کیلومترهای ۲+۶۰۰ تا ۲+۸۰۰ و از کیلومترهای ۳+۲۰۰ تا ۳+۴۰۰ با مقادیر بیش از ۳۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است. روش Leca در هر دو بازه مقادیری را برای فشار جبهه کار محاسبه کرده که از مقادیر اعمال شده در واقعیت حدود ۲۰-۳۰ کیلوپاسکال کمتر است. روش Leca در حد فاصل کیلومترهای ۱+۸۰۰ تا ۲+۴۰۰ با کم‌ترین میانگین چسبندگی و بیش‌ترین زاویه اصطکاک زمین، مقادیر بسیار کمتری را نسبت به واقعیت و سایر روش‌ها ارائه داده و کاملاً بر خلاف اطمینان عمل کرده است. این روش از کیلومترهای ۳+۵۵۰ به بعد که نشست‌های سطحی نهایی کمتر از ۱۵ میلی‌متر بوده، مقادیر فشار جبهه کار را بیشتر از فشار اعمال شده در واقعیت محاسبه کرده، اما در مقایسه با روش Atkinson و Jancsecz اختلاف کمتری با واقعیت داشته است. بر اساس شکل‌های (۱۱) و (۱۲) می‌توان گفت روش تجربی COB و روش تحلیلی Krause در مقایسه با سایر روش‌ها در طول مسیر تونل اختلاف کمتری با واقعیت داشته‌اند. روند تغییرات فشار جبهه کار محاسبه شده به روش تجربی COB با روند فشارهای اعمال شده در واقعیت هم‌خوانی زیادی دارد. در حد فاصل کیلومترهای ۲+۷۵۰ تا ۳+۰۰۰ روش COB بر عکس همه روش‌های تحلیلی عمل کرده است.

در شکل (۹) میانگین وزنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک که در محاسبات فشار جبهه کار با روش‌های مختلف تجربی و تحلیلی در مقاطع جدول (۱۱) به کار رفته است، به صورت تابعی از مترهای تونل نمایش داده شده است.

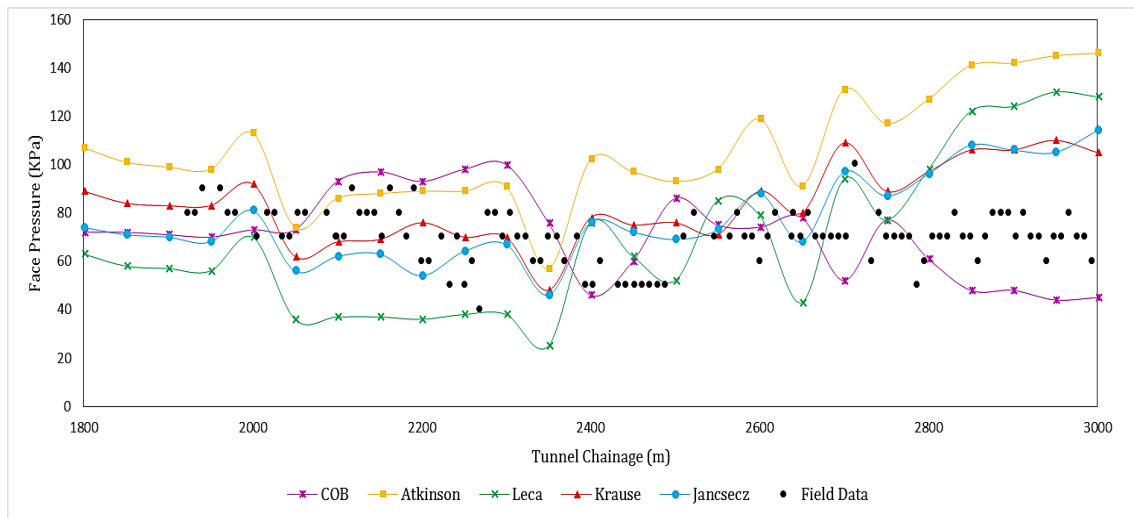
در شکل (۱۰) مقادیر نشست‌های سطحی نهایی ناشی از حفاری تونل در بازه کیلومترهای ۲+۶۰۰ تا ۲+۸۵۰ نشان داده شده است. این مقادیر در بین‌های سطحی با فواصل ۱۰ متر اندازه‌گیری شده است. میانگین نشست سطحی نهایی در طول مسیر حدود ۲۰ میلی‌متر بوده است. نشست‌های سطحی در دو بازه کیلومترهای ۲+۶۰۰ تا ۲+۸۵۰ و ۳+۲۰۰ تا ۳+۴۰۰ از ۳۰ میلی‌متر تجاوز کرده است. توجه به این نشست‌ها امکان مقایسه روش‌های مختلف تجربی و تحلیلی تعیین فشار جبهه کار را فراهم می‌نماید. در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) فشارهای جبهه کاری که با روش‌های مختلف تجربی و تحلیلی COB، Atkinson، Leca، Krause و Jancsecz در تاج تونل محاسبه شده‌اند، نمایش داده شده است. این محاسبات در مقاطعی با فواصل ۵۰ متر انجام گرفته است. در این دو شکل مقادیر فشار جبهه کار اندازه‌گیری شده در طول عملیات حفاری نیز ارائه گردیده است.



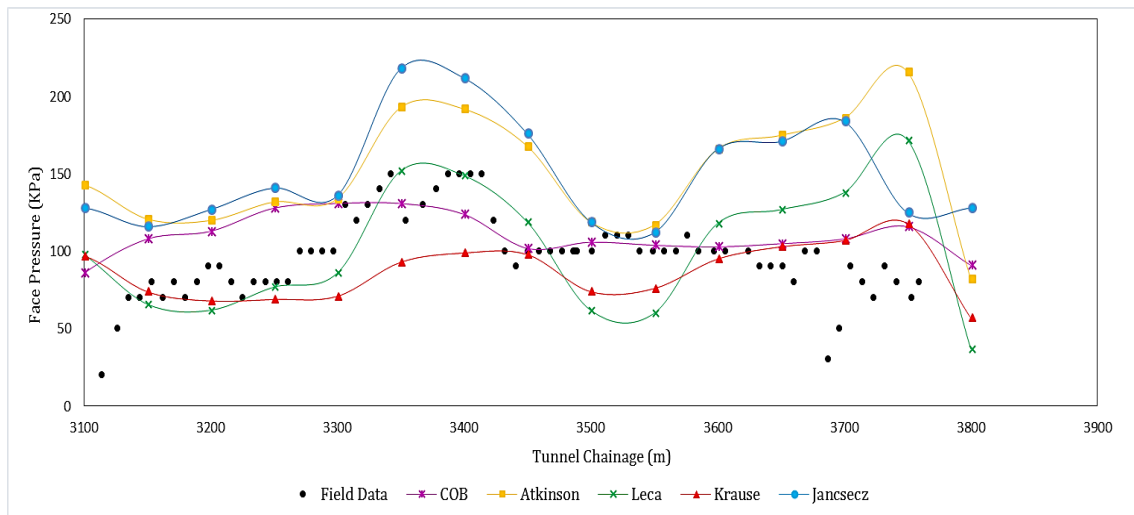
شکل ۹- میانگین وزنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک



شکل ۱۰- نشست‌های سطحی نهایی



شکل ۱۱- فشار جبهه کار در تاج تونل از شفت غربی تا ایستگاه 01 (کیلومتر از ۱+۸۰۰ تا ۳+۰۰۰)



شکل ۱۲- فشار جبهه کار در تاج تونل از ایستگاه 01 تا ایستگاه 02 (کیلومتر از ۳+۱۰۰ تا ۳+۸۰۰)

برای فشار جبهه کار محاسبه کرده است که از مقادیر اعمال شده در واقعیت کمتر است. این روش در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه 01 تطابق کاملی با روش Jancsecz دارد. پس از ایستگاه 02 و با افزایش میانگین چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی زمین نسبت به حد فاصل شفت غربی تا 02، اختلاف قابل توجهی بین روش Krause و روش Jancsecz رخ داده است. هر دو روش بر مبنای تعادل حدی کار می‌کنند. اما روش Krause مقادیر کمتر و روش Jancsecz مقادیر بیشتری را نسبت به واقعیت ارائه داده است. افزایش نشست‌های سطحی از کیلومتر ۳+۲۰۰ تا ۳+۴۰۰ نشان می‌دهد که روش Krause در این بازه بر خلاف اطمینان عمل کرده است. مقایسه شکل‌های (۱۱) و (۱۲) با مقادیر نشست سطحی نهایی نشان می‌دهد در طول عملیات حفاری آهنگ تغییرات فشار اعمالی به جبهه کار طوری تنظیم شده است

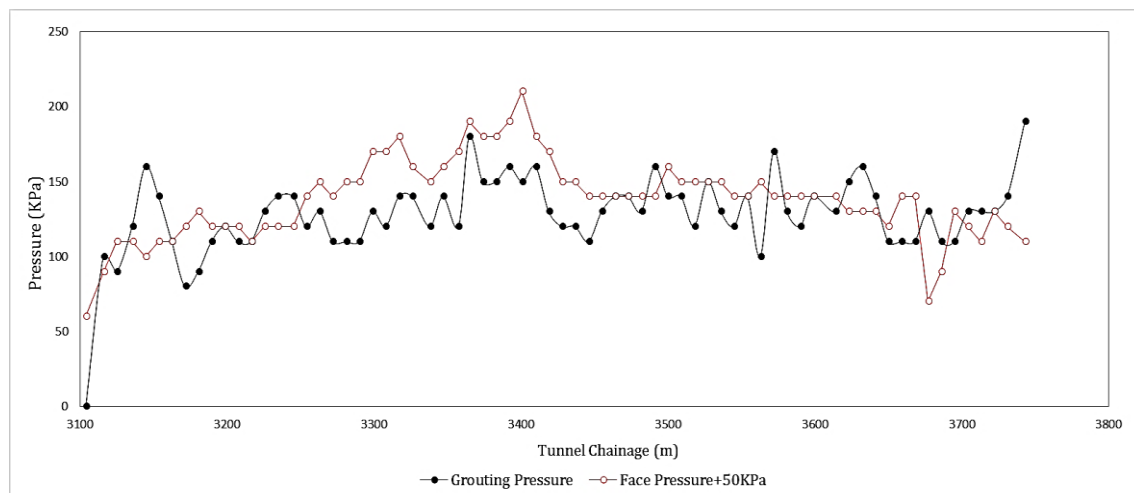
در این محدوده میانگین چسبندگی زمین به حدود ۱۵-۱۸ کیلوپاسکال افت کرده اما میانگین زاویه اصطکاک داخلی بین ۲۵ تا ۳۰ درجه بوده و حداکثر مقدار خود را در طول مسیر داشته است. در این محدوده روش‌های تحلیلی فشار جبهه کار را بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال و روش تجربی COB آن را کمتر از ۵۰ کیلوپاسکال محاسبه کرده و در واقعیت حدود ۷۵ کیلوپاسکال فشار به جبهه کار اعمال شده است. با این وجود نشست‌های سطحی در این ناحیه تقریباً کمتر از ۲۵ میلی‌متر بوده است. روش COB در حد فاصل کیلومتر ۳+۲۰۰ تا ۳+۴۰۰ که نشست‌ها افزایش پیدا کرده است، مقادیر بیشتری را نسبت به آنچه که در واقعیت اعمال شده محاسبه کرده و به روش‌های Atkinson و Jancsecz نزدیک شده است. روش تحلیلی Krause تقریباً در تمام طول مسیر مقادیری را

عملیات حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز در جهت طولی با نشست‌های حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار Abaqus مقایسه شده است. این شکل‌ها به دو مقطع در حد فاصل ایستگاه 01 و ایستگاه 02 مربوط است. اطلاعات مربوط به این مقاطع و روش حفاری در بخش (۹) توضیح داده شده است.

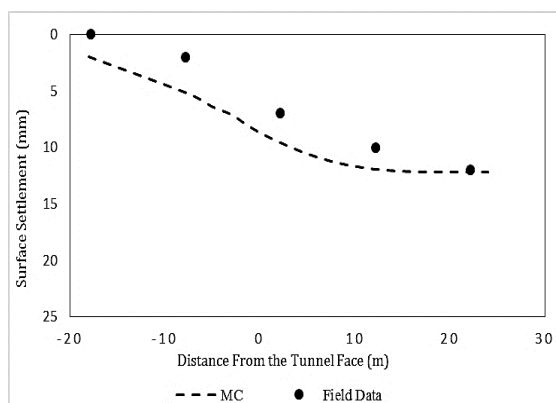
بر این اساس می‌توان گفت که نشست‌های سطحی اتفاق افتاده توسط روش عددی و مدل رفتاری MC در حد قابل قبولی پیش‌بینی شده و نشست غیر منتظره‌ای رخ نداده است. با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی و تطابق نسبی قابل قبول روش COB با واقعیت می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی عددی با مدل رفتاری MC و فشار جبهه کار محاسبه شده با روش COB پیش‌بینی خوبی برای نشست‌های سطحی ناشی از حفاری در ادامه مسیر تونل ارائه خواهد داد.

تا نشست سطحی در محدوده مجاز باقی بماند. همچنین روش تجربی COB بیشترین تطابق را با واقعیت داشته و در هنگام اختلاف با واقعیت نیز تقریباً در جهت اطمینان عمل کرده است. در شکل (۱۳) مقادیر فشار تزریق دوغاب اعمال شده در طول حفاری از ایستگاه 01 تا ایستگاه 02 ارائه گردیده است. در گام مطالعات معمولاً فشار تزریق را به اندازه ۵۰ کیلوپاسکال بیش از فشار جبهه کار در نظر می‌گیرند. شکل نشان می‌دهد که در واقعیت هم تقریباً به همین منوال عمل شده است. در حد فاصل کیلومتر ۳+۲۵۰ تا ۳+۴۵۰ که فشار تزریق با فشار جبهه کار تقریباً برابر بوده، نشست‌های سطحی ناشی از حفاری بیش از سایر نواحی بوده است. شاید اگر در این بازه فشار تزریق به اندازه ۵۰ کیلوپاسکال از فشار جبهه کار بیشتر بود، نشست‌های سطحی محدودتری رخ می‌داد.

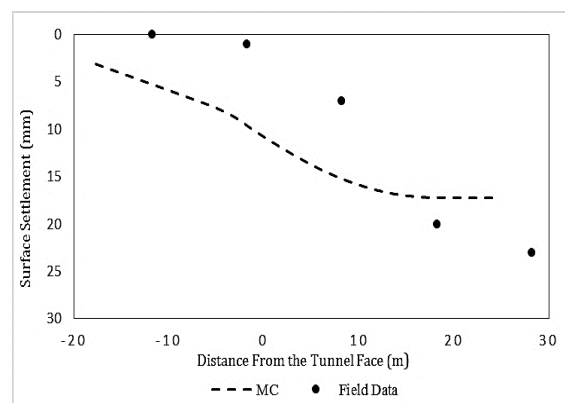
در شکل (۱۴) و شکل (۱۵) نشست‌های سطحی ناشی از



شکل ۱۳- فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها در حد فاصل شفت غربی و ایستگاه 02 (کیلومتر ۱+۸۰۰ تا ۳+۸۰۰)



شکل ۱۵- نتایج مدل‌سازی و مقادیر واقعی نشست در مقطع ۲



شکل ۱۴- نتایج مدل‌سازی و مقادیر واقعی نشست در مقطع ۱

- Civil Engineering, 2015, 31.2 (3.1), 137-145.
- Broere W, "Tunnel Face Stability & New CPT Application", PhD Thesis, University of Delft, Netherlands, 2001.
- Chambone P, Corte JF, "Shallow tunnels in cohesionless soils: Stability of tunnel face", ASCE, 1994, 120 (7), 1148-1165.
- Centrum Ondergronds Bouwen (COB), "Parameterset voor de predicties. Technical Report", K100-W-004, 1996.
- Eslami B, Golshani A, "3D Stability Analysis of Heterogeneous Face Excavation by TBM-EPB Machine -Case Study Line2 METRO of Mashhad", Sharif Journal of Civil Engineering, 2017, 33.2 (1.1), 121-128.
- Guglielmetti V, Grasso P, Mahtab A, Xu S, "Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control", Taylor & Francis Group, London, UK, 2007.
- Heidari SR, Zare S, Mirzai NH, Foroughi M, "Numerical study of face pressure effect on surface settlement in soft ground mechanized tunneling- A case study: Tehran metro line 7", Tunneling and underground space engineering, 2013, 57-67.
- Jancsecz S, Steiner W, "Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions", Tunnelling'94: Springer, 1994, 531-550.
- Kasper T, Meschke G, "On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21 (2), 160-171.
- Katebi H, Rezaei AH, Hajjalilue-Bonab M, Tarifard A, "Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specification on shield tunnel lining loads (by FEM)", Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49, 67-78.
- Lambrughi A, Medina Rodriguez L, Castellanza R, "Development and Verification of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanized excavation", Computers and Geotechnics, 2012, 40, 97-113.
- Leca E, Panet M, "Upper and Lower Bound Solutions for the Face Stability of Shallow Circular Tunnels in Frictional Material", Geotechnique, 1990, 40 (4), 581-606.
- Lee IM, Nam SW, "The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16, 31-40.
- Mooney MA, Grasmick J, Kenneally B, Fang Y, "The role of slurry TBM parameters on ground deformation: Field results and computational modelling", Tunnelling and Underground Space Technology, 2016.
- Sebastianelli M, Felice G, Malena M, Amorosi A, Boldini D, Di Mucci G, "A class C prediction of the settlements induced in a historical masonry structure by excavation of shallow twin tunnels", 2nd International Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historical Sites, Naples, Italy, 649-655, 2013.

۷- نتیجه گیری

- در این نوشتار روش‌های مختلف تجربی، تحلیلی و عددی برای تعیین فشار جبهه کار تونل خط ۲ متروی تبریز در خاک عمدتاً درشت دانه با چسبندگی کم به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از این روش‌ها با مقادیر فشار اعمال شده در طول عملیات حفاری مقایسه گردیده و با توجه به نشست‌های سطحی نهایی بالای محور مرکزی تونل تحلیل شده است. بر این اساس می‌توان گفت:
- در بین روش‌های تحلیلی، روش Krause در شرایط خاک درشت دانه با چسبندگی پایین خط ۲ تبریز تطابق بیشتری با واقعیت داشته اما اغلب به طور جزئی بر خلاف اطمینان محاسبه نموده است.
 - روش‌های تحلیلی Jancsecz و Atkinson در چسبندگی نزدیک صفر به واقعیت نزدیک بوده‌اند اما با افزایش چسبندگی با اختلاف محسوسی مقادیر فشار جبهه کار را بیش از سایر روش‌ها و فشارهای اعمال شده در واقعیت ارائه داده‌اند. در این بین روش تحلیلی Leca اغلب در خلاف جهت اطمینان عمل کرده و تقریباً پرت‌ترین نتایج را محاسبه نموده است.
 - روش تجربی COB بیشترین تطابق را با واقعیت داشته و در هنگام اختلاف با فشارهای اعمال شده در واقعیت نیز در جهت اطمینان عمل کرده است.
 - نشست‌های سطحی اتفاق افتاده در طول عملیات حفاری با نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی با روش عددی المان محدود در نرم‌افزار Abaqus با اعمال فشارهای واقعی در جبهه کار، تطابق خوبی داشته و تقریباً در بازه مجاز بوده است.
 - در طول عملیات حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز فشار جبهه کار به گونه‌ای تنظیم شده است تا نشست‌های سطحی از محدوده مجاز تجاوز ننماید.

۸- تقدیر و تشکر

- در نهایت از سازمان قطار شهری تبریز و مدیر محترم پروژه خط ۲ که بزرگوارانه اطلاعات پروژه متروی تبریز را در اختیار نویسندگان این مقاله قرار دادند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌شود.

۹- مراجع

- Anagnostou G, Kovari K, "Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields", Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11 (2), 165-173.
- Atkinson J, Potts D, "Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil", Geotechnique, 1977, 27 (2), 203-215.
- Bakhshandeh Amnieh H, ZamZam M, Mousavi E, "Evaluation Face Minimum Pressure for Urban Tunneling Using an EPB Machine and Analytical and Numerical Methods Case Study: Tunnel for Line 7 Tehran Subway (East-West)", Sharif Journal of

EXTENDED ABSTRACT

Determination of Face Pressure in EPB Tunneling Applying Empirical, Analytical and Numerical Methods (Case Study: Tabriz Underground Railway)

Amir Hassan Rezaei ^{a,*}, Mojtaba Shirzehhagh ^b

^a Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 17 December 2017; **Accepted:** 15 July 2018

Keywords:

TBM-EPB, Face Stability Pressure, Analytical Methods, COB, Numerical Modelling, Surface settlements.

1. Introduction

In the present paper, results of empirical, analytical and numerical methods for determination of face support pressure in mechanized tunneling and measurements of tunneling induced surface settlements and applied face support and grout injection pressures during the construction of Tabriz underground railway line 2 (TUR2) are presented. Face pressure plays an important role in the evolution of tunneling induced-ground movements. Determination of optimum face stability pressure is a major challenge in TBM tunneling.

2. Methodology

2.1. Empirical study

COB method for defining face support pressure in tunneling was hired in order to investigate the efficiency of empirical methods (COB, 1996).

2.2. Analytical study

There are a number of various analytical methods based on limit analysis and limit equilibrium analysis for the determination of face stability pressure in tunneling. Atkinson and Potts, Leca and Dormieux, Jancsecz and Steiner and Krause methods were employed (Guglielmetti, et al., 2008).

2.3. FE modeling

The FEM-based software package, ABAQUS, was used for the numerical modeling and analysis. In this study, different aspects of mechanized tunneling process were modelled: shield, concrete lining and grout. ABAQUS element type C3D8 and C3D8P was used to model dry soil and under water table wet soil and grout, respectively. Element type S4 was used to model steel shield and concrete lining. Static numerical calculations with Mohr-Coulomb constitutive model for soil and linear elastic behavior for shield, lining and grout are practical to simulate mechanized excavation process (Katebi et al., 2015).

3. Results and discussion

In order to compare efficiency of different empirical and analytical methods for defining face support pressure, in 41 sections perpendicular to tunnel center line with horizontal intervals of 50m, face pressures were calculated by means of these methods. In 2 sections FE 3D models were generated and analyzed. Surface

* Corresponding Author

E-mail addresses: Rezaei.ah@azaruniv.ac.ir (Amir Hasan Rezaei), mshirzeh94@ms.tabrizu.ac.ir (Mojtaba Shirzehhagh).

settlements have been recorded during the construction of TUR2 in every 10m above the tunnel center. In the region of TUR2 investigated in this paper, the soil is majorly coarse-grained with small amount of cohesion. The results show that soil cohesion and internal friction angle play an important role in face pressure values calculated with different methods. Among these methods, Leca provided values which are far from field recorded data and always underestimates. Atkinson and Jancsecz methods overestimate the face pressure in most of sections. Krause and COB puts out results which are close to pressures applied in construction process. Krause method usually underestimate about 20-30 KPa in comparison with field data but, COB calculates more accurately and has a trend completely like what has been done in excavation step with EPB machine. Numerical modellings' results match measurements of tunneling-induced surface settlements collected during the construction of TUR2.

4. Conclusions

Among various empirical and analytical methods for defining face support pressure, COB calculates more accurately and work in favor of safety.

Numerical analysis based on FEM is a reliable tool to predict TUR2 tunneling-induced ground movements and in excavation phases studied in this paper, the FE results match field recorded data.

In construction stage face pressure has been controlled in a way to limit surface final settlements in allowable range and optimum pressures were applied.

5. References

- Centrum Ondergronds Bouwen (COB), "Parameterset voor de predicties. Technical Report", K100-W-004, 1996.
- Guglielmetti V, Grasso P, Mahtab A, Xu S, "Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control", Taylor & Francis Group, London, UK, 2007.
- Katebi H, Rezaei AH, Hajjalilue-Bonab M, Tarifard A, "Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specification on shield tunnel lining loads (by FEM)", Tunneling and Underground Space Technology, 2015, 49, 67-78.