

## بررسی اثرات پارامترهای مختلف در تعیین میزان بهینه فشار جبهه کار تونل‌های مکانیزه در خاک‌های رسی - سیلتی

امیرحسین رضایی فرعی\*<sup>۱</sup> و سعید بابائی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۵/۱۱/۱۸، پذیرش: ۹۶/۶/۴، نشر آنلاین: ۹۶/۶/۵)

### چکیده

برآورد فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل، یکی از مهم‌ترین عوامل حفاری ایمن و بهینه با استفاده از ماشین‌های حفار مکانیزه در نواحی شهری است. چرا که اعمال فشار کمتر و یا بیشتر از حد تعادلی به جبهه کار به ترتیب باعث فرونشست و بالادگی در جبهه کار و سطح زمین می‌شود. در مقاله حاضر، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS به بررسی تأثیر پارامترهای مدول الاستیسیته، مشخصات مهندسی خاک با تأکید بر چسبندگی و همچنین شرایط آب زیرزمینی بر روی میزان بهینه فشار جبهه کار در خاک‌های چسبنده پرداخته شده است. بیش از ۱۳۰ مدل سه‌بعدی تحلیل و با اندازه‌گیری مقادیر جابجایی‌های جبهه کار تونل به ازای مقادیر متفاوت فشار جبهه کار و پارامترهای مختلف مورد بررسی، مقدار بهینه فشار جبهه کار تعیین شده است. بر اساس نتایج حاصل مدول الاستیسیته خاک و تراز آب زیرزمینی تأثیر قابل توجهی در مقدار فشار بهینه جبهه کار دارد. همچنین، زاویه اصطکاک داخلی دارای تأثیر بیشتری نسبت به چسبندگی در مقدار فشار بهینه جبهه کار می‌باشد. با توجه به تعداد بسیار زیاد پارامترهای دخیل در حفاری مکانیزه مشخصات هندسی تونل، پارامترهای مختلف ماشین حفار و مشخصات ژئوتکنیکی مسیر، از مشخصات پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز انتخاب شده است تا پارامترهای استفاده شده در تحلیل‌های عددی منطبق بر واقعیت باشد. همچنین، صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با استفاده از نتایج نشست سطحی حاصل از ایزاربنندی پروژه انجام یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** تونل‌سازی مکانیزه، فشار جبهه کار، مدول الاستیسیته، خاک‌های چسبنده، ABAQUS

### ۱- مقدمه

گردیده است (کاتسی و همکاران، ۱۳۹۴). بطور کلی حرکات ایجاد شده ناشی از تونل‌سازی مکانیزه در زمین اطراف را می‌توان به پنج مؤلفه کلی تقسیم‌بندی کرد: (۱) تغییر شکل ایجاد شده در جبهه کار در نتیجه رهاسازی تنش در جبهه کار یا به عبارتی افت جبهه کار (۲) تغییر شکل‌های ناشی از اضافه حفاری تونل (۳) تغییر شکل‌های ناشی از حفره انتهای سپر (۴) تغییر شکل‌های ناشی از تغییر شکل پوشش تونل و (۵) تغییر شکل‌های ناشی از تحکیم خاک (Mair و Taylor، ۱۹۹۷). میزان نشست حاصل از مؤلفه ۱ در صورت کنترل مناسب فشار وارد بر جبهه کار ناچیز خواهد بود. در نتیجه میزان فشار نگهداری در جبهه کار تونل در حفاری مکانیزه، پارامتری مؤثر و تعیین‌کننده برای حفاری ایمن و بهینه همراه با کنترل جابجایی‌های جبهه کار و سطح زمین است.

امروزه حمل و نقل درون شهری و ترافیک سنگین آن، از جمله مهم‌ترین مشکلات شهرهای بزرگ است. یکی از بهترین روش‌ها برای کاهش این مشکلات استفاده از سیستم حمل و نقل زیرزمینی مانند قطار شهری می‌باشد. سازگاری با محیط زیست و محیط شهری، مقاومت زیاد در برابر زلزله، استفاده‌های استراتژیک، سرعت و حجم بالای انتقال مسافر برخی از مزایای قطار شهری می‌باشد که باعث توسعه آن در جوامع امروزی شده است. تونل‌سازی مکانیزه به دلیل مزایای فراوان نسبت به روش‌های حفاری و نگهداری سنتی؛ از جمله امکان حفاری در انواع مختلف خاک‌ها و شرایط سخت ژئوتکنیکی مانند تراز آب زیرزمینی بالا، زمین‌های نرم یا عمق سربار کم و امکان کنترل نشست‌های سطحی؛ به عنوان مهم‌ترین روش تونل‌سازی دهه‌های اخیر در مناطق شهری مطرح

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۴۰۵۷۳۴۷

تونل به تغییرات فشار گروت از نظر نشست سطح زمین و گسیختگی توده خاک حساس است، در حالی که طیف گسترده‌ای از فشار جبهه کار را می‌توان بدون گسیختگی در نظر گرفت. Kasper و Meschke (۲۰۰۶) با استفاده از مدل‌سازی سه-بعدی آلمان محدود، به مطالعه تأثیر پارامترهای ماشین حفار شامل فشار جبهه کار، فشار تزریق، وزن ماشین و مخروطی بودن سپر ماشین بر نشست سطح زمین پرداخته و نتیجه گرفتند که فشار جبهه کار، فشار تزریق و مخروطی بودن دستگاه حفار تأثیر قابل توجهی در نشست سطح زمین دارد.

Zhang و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از روش عددی آلمان گسسته به بررسی تأثیر مقادیر مختلف فشار جبهه کار و نسبت سربار به قطر تونل در خاک‌های چسبنده بر نشست سطح زمین پرداختند. با کاربرد روش عددی آلمان گسسته به صورت سه بعدی Chen و همکاران (۲۰۱۱) مکانیزم گسیختگی و فشار حدی جبهه کار در خاک ماسه‌ای خشک را مورد بررسی قرار دادند. Lamborghini و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود به تحلیل حساسیت مدل‌های رفتاری گوناگون خاک و بررسی تأثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین برای پروژه‌ی متروی مادرید پرداخته و نتیجه گرفتند که مدل رفتاری کم کلی اصلاح شده تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های میدانی دارد.

تأثیر فشار جبهه کار و تزریق توسط حیدری و همکاران (۱۳۹۱) با روش عددی آلمان محدود بررسی شده و به این نتیجه رسیدند که فشارهای مختلف جبهه کار تأثیر چندانی بر بیشترین نشست سطح زمین ندارد، این در حالی است که تأثیر فشار تزریق در میزان نشست کلی به وضوح دیده می‌شود. همچنین، میزان تأثیر فشار نگهداری بر میزان نشست و جابجایی‌های جبهه کار در شرایط مختلف توسط خیراندیش و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود مطالعه شده و به این نتیجه دست یافتند که مدول الاستیسیته خاک اهمیت زیادی در مقدار فشار جبهه کار و پایداری جبهه کار دارد و نیاز به بررسی بیشتر این پارامتر است. بخشنده و همکاران (۱۳۹۴) نیز به بررسی فشار جبهه کار تونل خط ۷ متروی تهران پرداخته و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی را با روش تحلیلی مقایسه کردند.

تمرکز اکثر مطالعات پیشین بر روی دو موضوع مکانیزم گسیختگی و میزان فشار حدی جبهه کار می‌باشد. به عبارت دیگر، میزان فشارهای حداقل و حداکثر قابل اعمال به جبهه کار برای حالات ریزش جبهه کار و بالازدگی خاک جلوی جبهه کار تخمین زده شده است (Ahmed و Iskander، ۲۰۱۲؛ Chambon و Corte، ۱۹۹۴). همچنین، بیشتر تمرکز بر تأثیر پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بوده و پارامترهای الاستیسیته خاک به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که، مقادیر

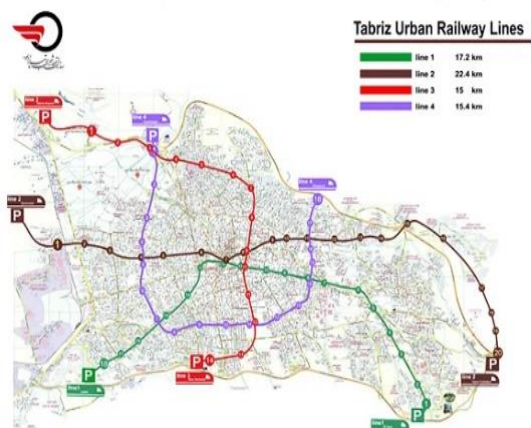
در طول دهه‌های اخیر روابط زیادی برای محاسبه فشار جبهه کار به صورت روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی ارائه شده است. در روش‌های تجربی بر اساس تجربیات موجود در چند پروژه، رابطه‌ای تجربی بین چندین پارامتر و مقدار فشار جبهه کار تخمین زده می‌شود. در این روش، فشار مورد نیاز برای کار کردن در شرایط مناسب حفاری توصیه می‌شود. به طور کلی، مقادیر حاصل به سمت فشار حداقل متمایل هستند تا اصطکاک حداقل شده و سرعت حفاری افزایش یابد. یکی از معتبرترین این روش‌ها، روش پیشنهادی مرکز ساخت و ساز زیرزمینی آلمان (COB) است که فشار جبهه کار را کمی بیشتر از فشار فعال زمین توصیه می‌کند (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۸).

روش‌های تحلیلی در حالت کلی به دو روش تعادل حدی و روش آنالیز حدی تقسیم می‌شوند (Ibrahim و همکاران، ۲۰۰۸). روش‌های تعادل حدی بر اساس نظریه فشار خاک تعریف می‌شوند. هدف از آنالیز حدی به دست آوردن برآوردی از شرایط پایداری برای سیستم‌های مکانیکی صرف‌نظر از رفتار مصالح سازنده آن است.

از مهم‌ترین روش‌های تعادل حدی روش‌های Jancsecz و Steiner (۱۹۹۴) برای خاک‌های غیر چسبنده و کمی چسبنده و Anagnostou و Kovari (۱۹۹۶) برای خاک‌های غیر چسبنده است که با استفاده از مکانیزم شکست پیشنهادی Horn (۱۹۶۱) روابطی را برای محاسبه فشار پایداری جبهه کار بر اساس گسیختگی گوه و سیلوی خاک تعادل حدی پیشنهاد کرده‌اند. Broere (۲۰۰۱) این روش را برای حالت‌های خاک لایه‌ای و وجود فشار آب گسترش داد. در ادامه Anagnostou (۲۰۱۲) با استفاده از این روش توزیع قوس‌زدگی افقی جبهه کار تونل را مطالعه کرد. نتایج نشان داد که قوس‌زدگی افقی تأثیر قابل توجهی در فشار جبهه کار حدی دارد. همچنین، از روش‌های تعادل حدی برای خاک‌های چسبنده می‌توان به روش‌های محکم و کروس نیز اشاره کرد (Guglielmetti و همکاران، ۲۰۰۸).

در روش‌های آنالیز حدی تنش، آنالیز تنش عمدتاً با ارائه کران بالا و پایین که به ترتیب از نقطه نظر استاتیکی و دینامیکی مطرح می‌شوند، صورت می‌گیرد. از روش‌های آنالیز حدی می‌توان Dormieux را نام برد (بخشنده و همکاران، ۱۳۹۴).

مدل‌سازی‌های عددی از روش‌های پرکاربرد هستند که نسبت به سایر روش‌ها امکان بررسی مراحل ساخت، رفتار سه‌بعدی جبهه کار، در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر خاک مانند مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و همچنین، برهم کنش بین تونل و پوشش بتنی را فراهم می‌سازند. Greenwood (۲۰۰۳) با استفاده از روش آلمان محدود به بررسی تأثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته است. نتایج نشان داد زمین اطراف



شکل ۱- شمای کلی خط ۲ قطار شهری تبریز

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی محیط اطراف تونل

SM	CL-ML	طبقه بندی خاک
۱۶/۲۵	۱۶/۲۵	دانسسته خشک ( $\text{KN/m}^3$ )
۲۰	۲۰	دانسسته اشباع ( $\text{KN/m}^3$ )
$1 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	نفوذپذیری (cm/s)
۰/۳	۰/۳	ضریب پواسون
۳۴	۲۵	زاویه اصطکاک داخلی

### ۳- مدل سازی عددی

در سال های اخیر پیشرفت های سخت افزاری و نرم افزاری چشمگیر امکان مدل سازی عددی مسائل ژئوتکنیکی را بطور کامل فراهم ساخته است. محققان زیادی در کنار روش های متداول بررسی پدیده های ژئوتکنیکی از قبیل مدل سازی فیزیکی، روش های تحلیلی و یا روابط تجربی، به بررسی جنبه های مختلف تونل سازی با مدل سازی عددی دو بعدی و سه بعدی پرداخته اند (Kasper و Meschke، ۲۰۰۴؛ Katebi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Do و همکاران، ۲۰۱۴).

تونل سازی در عمل یک پدیده سه بعدی بوده و سبب می شود تا به دلیل پدیده قوسی شدن زمین، عملکردی سه بعدی در رفتار تنش- کرنش زمین در جبهه حفاری تونل به وجود آمده و تغییر شکل هایی در اطراف و بالای تونل ایجاد گردد که نمی تواند بطور مستقیم در مدل های دوبعدی در نظر گرفته شود (Karakus، ۲۰۰۷). با انجام یک تحلیل سه بعدی، شرایط واقعی تا حد ممکن بازسازی شده و براساس نتایج حاصل از آن می توان نسبت به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در فشار جبهه کار تونل های مکانیزه بزرگ مقطع اقدام نمود.

برای بررسی دقیق فرآیند تونل سازی مکانیزه از نرم افزار توانمند المان محدود ABAQUS استفاده شده است. در مدل سازی

تغییر شکل و جابجایی ایجاد شده در جبهه کار به میزان زیادی به این پارامتر بستگی دارد (خیراندیش و همکاران، ۱۳۹۲).

در تحقیق حاضر سعی شده است با مدل سازی عددی با نرم افزار المان محدود ABAQUS به مطالعه بیشتر موضوع پرداخته و با انجام مطالعه پارامتریک تأثیر مدول الاستیسیته خاک به همراه شرایط آب زیرزمینی و چسبندگی بر میزان فشار بهینه جبهه کار مورد بررسی قرار گیرد. برای تعیین فشار بهینه، با در نظر گرفتن مقادیر منطقی برای پارامترهای مورد بررسی در مدل های مختلف، فشارهای متفاوتی بر جبهه کار تونل اعمال و جابجایی میانگین اندازه گیری شده است. همچنین، نتایج تحلیل های عددی با نتایج حاصل از روش تجربی COB مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای دخیل در موضوع برای مشخصات هندسی تونل (از قبیل قطر، نسبت سربار به قطر و مشخصات پوشش تونل)، پارامترهای مختلف دستگاه (از قبیل قطر حفاری، اضافه حفاری، مشخصات شیلد) و مشخصات ژئوتکنیکی خاک مسیر از مشخصات پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز استفاده شده است تا پارامترهای انتخاب شده منطبق بر واقعیت باشد.

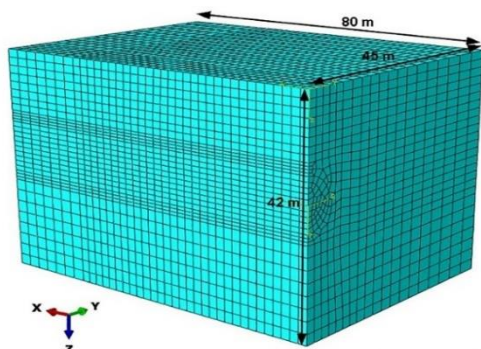
### ۲- معرفی پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز

پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز از غرب به شرق تبریز به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر از منطقه قراملک در غرب تبریز شروع شده و در محدوده نمایشگاه بین المللی تبریز خاتمه می یابد. طول مسیر پروژه به صورت مکانیزه توسط دو دستگاه سپر تعادلی زمین حفاری خواهد شد. طرح کلی خطوط قطار شهری تبریز در شکل (۱) ارائه گردیده است.

بطور کلی، از لحاظ ژئوتکنیکی لایه های زیرسطحی مسیر پروژه در بخش عمده ای از آن عمدتاً تناوبی از خاک های رسی- سیلتی و ماسه ای می باشند که در مجموع به دو گروه رسوبات درشت دانه (ماسه ای) و ریزدانه قابل تقسیم هستند. لایه های ماسه- ای عمدتاً با طبقه بندی SM و لایه های ریزدانه با طبقه بندی CL و ML شناسایی شده اند (Katebi و همکاران، ۲۰۱۳).

با توجه به طول زیاد مسیر، مشخصات ژئوتکنیکی در مقاطع مختلف متفاوت می باشد. با این حال برای مدل سازی می توان مشخصات غالب خاک اطراف تونل را برای سازندهای ریزدانه و درشت دانه مطابق جدول (۱) در نظر گرفت. در تحقیق حاضر مشخصات مهندسی خاک ریزدانه به عنوان حالت مرجع در مدل سازی در نظر گرفته شده است.

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 (۲ سانتی متر مخروطی) می باشد.



شکل ۲- مدل ساخته شده به همراه مش بندی مورد استفاده

### ۲-۳- ماشین حفار

سپر ماشین حفار با استفاده از المان‌های پوسته‌ای با رفتار الاستیک خطی مدل شده است. به منظور ساده‌سازی هندسه مدل سپر مخروطی شکل به صورت یک استوانه با قطر ثابت و برابر با قطر متوسط قطر سپر جلویی و انتهایی دستگاه جایگزین گردیده است. برای تأمین صلبیت سپر و همچنین، در نظر گرفتن وزن ماشین ضخامت المان‌های متناظر سپر برابر ۳۵ سانتی‌متر انتخاب می‌گردد (جدول (۲)).

به منظور مدل‌سازی اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر و سرمه حفاری یک لایه نازک با رفتار الاستیک خطی تعریف شده است. برای ماشین TBM در نظر گرفته شده در این تحقیق ضخامت این لایه برابر ۲ سانتی‌متر می‌باشد (Katebi و همکاران، ۲۰۱۵). به منظور سادگی، مدل‌سازی تحت هدایت صحیح دستگاه انجام گرفته و از اضافه حفاری ناشی از انحراف دستگاه از امتداد صحیح صرف‌نظر می‌گردد. مشخصات الاستیک لایه معادل اضافه حفاری با استفاده از یک سری تحلیل حساسیت و اندازه‌گیری همگرایی دیواره تونل حفاری شده به دست می‌آید. مقادیر بهینه مشخصات الاستیک لایه طوری انتخاب می‌گردد تا همگرایی دیواره در تاج تونل با مقدار اضافه حفاری در نظر گرفته شده برابر باشد. برای مدل، حفاری تونل در خاک دانه‌ای با نسبت سربار به قطر ۱/۵ مشخصات الاستیک لایه معادل اضافه حفاری در جدول (۲) ارائه گردیده است. مشخصات این لایه همزمان با فعال‌سازی لایه گروت پشت سگمنت به مشخصات گروت تغییر داده می‌شود تا تمامی فضای خالی مابین سگمنت و دیواره حفاری شده از گروت پر گردد.

جدول ۲- مشخصات لایه معادل اضافه حفاری و سپر ماشین

بخش مدل شده	ضخامت (m)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (KPa)
لایه اضافه حفاری	۰/۰۲	۰/۲	۱۲۰
سپر ماشین	۰/۳۵	۰/۲۵	۲۱×۱۰ <sup>۷</sup>

سه‌بعدی انجام شده در مطالعه حاضر، عملیات اجرایی تونل به صورت کامل و گام به گام مدل شده و بدین ترتیب مدلی واقعی از رفتار مجموعه تهیه و بررسی گردیده است. مدل شامل تمامی مؤلفه‌های تأثیرگذار در فرآیند حفاری از قبیل سپر ماشین و اصطکاک مابین سپر و خاک اطراف، فشار تزریق گروت و فشار سینه کار بوده و حفاری و ساخت تونل به طول ۲۱ متر در ۲۴ گام شبیه‌سازی می‌گردد.

خاک اطراف تونل بالای تراز آب زیرزمینی به وسیله المان‌های ۸ گره‌ای پیوسته مرتبه اول با انتگرال‌گیری کامل (C3D8) و خاک پایین تراز آب زیرزمینی و مصالح دوغاب به صورت محیط متخلخل اشباع با کاربرد المان‌های فشار منفذی (C3D8P) مدل گردیده است که در نظر گرفتن آب زیرزمینی و فشار دوغاب را امکان‌پذیر می‌سازد. پوشش تونل و سپر ماشین با المان‌های پوسته‌ای S4 مدل می‌گردد.

رفتار خاک با مدل الاستوپلاستیک موهر- کولمب با قانون جریان غیر همراه مدل گردیده و یک رفتار الاستیک برای مصالح پوشش تونل در نظر گرفته شده است. اتصال گروت به پوشش تونل و خاک اطراف نیز بدون لغزش در نظر گرفته شده است. با توجه به تزریق پیوسته دوغاب در فضای خالی پشت سگمنت‌ها و آب‌بند بودن قطعات و تأمین فشار مناسب در جبهه کار حفاری، نفوذ آب درون تونل در طی فاز ساخت تونل در نظر گرفته نمی‌شود که به این معنی است که تراز آب در طی عملیات ساخت تغییر نمی‌کند. مدل‌سازی بخش‌های مختلف ماشین حفار و عملیات اجرای تونل در این مطالعه، به شرح زیر می‌باشد:

### ۳-۱- ابعاد مدل

موقعیت مرزهای جانبی، شرایط مرزی، نوع المان و تراکم المان‌ها براساس تحلیل حساسیت طوری انتخاب گردیده است که تغییر پارامترهای فوق تأثیر قابل ملاحظه در میدان تنش- کرنش- فشار منفذی نداشته باشد.

مش‌بندی مدل به میزان حداقل دو برابر قطر تونل پایین‌تر از کف تونل امتداد یافته و بطور جانبی ۵ برابر قطر تونل نسبت به مرکز تونل امتداد داده شده است. طول مدل نیز ۸ برابر قطر تونل به دست آمده است. در نهایت مدل ساخته شده شامل حدود ۲۰۰۰۰ المان سه‌بعدی و ابعاد مدل به ترتیب عرض، عمق و طولی برابر ۹۰، ۴۲ و ۸۰ متر می‌باشد که با پیشنهاد‌های محققان قبلی (Moller, ۲۰۰۶) نیز تطابق خوبی دارد. جهت کاهش زمان تحلیل و تقارن موجود در حالت‌های مورد بررسی نصف مدل تحلیل شده است. در شکل (۲) نمونه‌ای از مدل ساخته شده به همراه مش- بندی مورد استفاده نشان داده شده است.

### ۳-۳- پوشش تونل و گروت پشت سگمنت

برای مدل سازی پوشش تونل از المان های سازه ای با رفتار الاستیک خطی استفاده شده است. براساس مشخصات پروژه قطر خارجی پوشش بتنی ۹/۱۸ متر و ضخامت آنها ۳۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. عرض قطعات پوشش تونل و در نتیجه میزان گام پیشروی در هر سیکل حفاری تونل نیز برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به لزوم استفاده از بتن با مقاومت بالا در ساخت سگمنت و با عنایت به پروژه های مشابه اجرا شده بتن مورد استفاده با طبقه بندی C45/55 در نظر گرفته می شود.

پوشش سگمنتی تونل در مدل سازی ها به صورت همگن و یکپارچه در نظر گرفته می شود اما در حقیقت این پوشش از تعدادی قطعات بتنی پیش ساخته تشکیل شده است که با استفاده از مفصل هایی به یکدیگر متصل شده اند. وجود مفصل در پوشش تونل سبب می شود تا از میزان سختی آن در مقایسه با یک پوشش یکپارچه کاسته شود. بنابر این، برای در نظر گرفتن کاهش سختی در مفصل ها، یک ضریب اصلاحی انتقال ممان خمشی مناسب باید در نظر گرفته شود که مقدار آن برابر ۰/۳ انتخاب شده است (کاتبی و همکاران، ۱۳۹۳).

رفتار گروت پشت سگمنت الاستیک خطی در نظر گرفته شده و مشخصات وابسته به زمان مصالح گروت در نتیجه هیدراسیون با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته و ضریب پواسون وابسته به زمان مدل گردیده است. میزان فشار تزریق گروت پشت سگمنت بطور معمول ۰/۵ بار بیشتر از فشار جبهه کار در نظر گرفته می شود (Atkinson و Potts، ۱۹۹۷).

با توجه به طرح اختلاط پیشنهاد شده برای گروت و آزمایشات انجام شده در پروژه مورد مطالعه زمان لازم برای گیرش اولیه گروت و در نتیجه حذف فشار ناشی از آن حدود ۸ ساعت برآورد گردیده است که با توجه به میانگین سرعت پیشروی نیم رینگ در ساعت، طول فشار اعمالی تزریق در مدل سازی ها برابر ۴ رینگ لحاظ شده است.

در جدول (۳) مشخصات مقاومتی سگمنت ها به همراه مشخصات در نظر گرفته شده برای گروت پشت سگمنت ها ارائه گردیده است.

جدول ۳- مشخصات مصالح بکار برده شده در مدل سازی

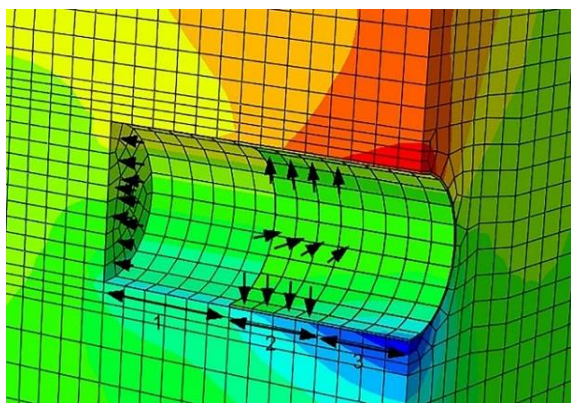
مصالح	وزن واحد (KN/m <sup>3</sup> )	مقاومت (MPa)	عدد	
			مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
پوشش تونل	۲۵	۴۰	۲۵۲۰۰	۰/۲
گروت (سیال)	۱۸	۰	۵	۰/۴۷
گروت (سخت شده)	۱۸	۳	۲۰	۰/۳

### ۴-۳- فرآیند حفاری تونل

مراحل مختلف فرآیند حفاری تونل گام به گام و بصورت زیر مدل سازی می گردد: در اولین گام تعادل ژئواستاتیکی مدل با در نظر گرفتن میدان تنش های اولیه بر اساس لایه بندی و تراز آب زیرزمینی متناظر هر مدل برقرار گردیده و گام دوم بار ترافیک ۲۰ کیلوپاسکال به عرض ۱۲ متر به سطح زمین اعمال می گردد. در هر مرحله حفاری تمام سطح مقطع تونل با گام ۱/۵ متری حفاری و فشار جبهه کار به سطح حفاری شده اعمال می گردد و همزمان المان های لایه اضافه حفاری با در نظر گرفتن حداکثر جابجایی شعاعی برابر اضافه حفاری فعال می گردد.

در شروع عملیات تونل سازی حفاری تونل به طول پیشروی ۹ متر (برابر با طول سپر ماشین) معادل ۶ گام تکرار می شود. با پیشروی حفاری، همزمان در اولین گام حفاری شده در ابتدای مدل سپر دستگاه حذف شده و همزمان با فعال کردن المان های گروت با مشخصات گروت تازه، اولین پوشش بتنی نصب می گردد. فشار تزریق گروت بر محیط تونل و سطح خارجی پوشش تونل اعمال می شود. در ادامه به ازای هر مرحله حفاری در جبهه تونل، یک مرحله نصب پوشش در انتهای سپری انجام شده و این عملیات بطور متوالی تکرار می شود.

در مرحله بعد علاوه بر ادامه روند فوق، پس از گذشت ۴ گام نصب پوشش و اعمال فشار تزریق، عملاً گیرایی ملات گروت انجام شده و بنابر این در مدل سازی مشخصات گروت به گروت سخت شده تبدیل می شود و همزمان فشار تزریق حذف می گردد (شکل (۳)).



شکل ۳- مراحل مدل سازی حفاری تونل: ناحیه ۱ حفاری تونل و سپر ماشین، ناحیه ۲ نصب پوشش و اعمال فشار تزریق به طول ۴ سگمنت و ناحیه ۳ نصب پوشش و گروت سخت شده

### ۵-۳- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی فرآیند مدل سازی انجام گرفته از اندازه گیری های میدانی انجام گرفته در پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز

نمی‌تواند مبنای مناسبی جهت برآورد فشار مورد نیاز باشد. برای تعیین میزان جابجایی ایجاد شده در جبهه کار حفاری از جابجایی میانگین پیشنهاد شده توسط Kim و Tonon (۲۰۱۰) استفاده شده است (رابطه (۱)):

$$U_{Xavg} = \frac{1}{2D} \sum_{i=0}^n ((u_X)_{i+1} + (u_X)_i) ((Z)_{i+1} - (Z)_i) \quad (1)$$

جابجایی میانگین  $U_{Xavg}$  به صورت ناحیه احاطه شده توسط پروفیل تغییر شکل یافته جبهه کار تونل و پروفیل اولیه آن تقسیم بر قطر تونل تعریف می‌شود. مقادیر مثبت  $U_{Xavg}$  بیانگر جابجایی جبهه کار تونل در جهت پیشروی و مقادیر منفی نشان دهنده جابجایی جبهه کار تونل به سمت داخل می‌باشد.

با توجه به این که روش تجربی و معتبر مرکز ساخت و ساز زیرزمینی آلمان (COB) مقدار فشار جبهه کار را به صورت حدی در نظر نگرفته و آن را برای حفاری بهینه دستگاه ارائه می‌دهد. برای تعیین میزان فشار جبهه کار مبنا از این روش استفاده شده است. رابطه (۲) مقدار فشار جبهه کار به دست آمده از رابطه COB را نشان می‌دهد:

$$\sigma_T = k_a \cdot \sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + k_a \cdot q + u + 20kPa \quad (2)$$

در رابطه فوق  $\sigma'_v$  تنش مؤثر قائم،  $c$  چسبندگی،  $q$  بار سطحی،  $u$  فشار آب حفره‌ای و  $k_a$  فشار فعال زمین می‌باشد. مقادیر حاصل از رابطه تجربی به عنوان فشار مبنا در این مطالعه انتخاب شده و سپس با افزایش یا کاهش مقدار فشار اعمال شده به جبهه کار در مدل عددی اقدام به محاسبه فشار بهینه جبهه کار شده است. در مدل‌های عددی فشار جبهه کار در تاج تونل محاسبه گردیده و با یک گرادیان متناسب با مصالح داخل محفظه حفاری دستگاه افزایش داده می‌شود.

#### ۴- مطالعه پارامتریک

به دلیل عدم امکان بررسی تمامی پارامترهای تأثیرگذار در فشار جبهه کار به مطالعه پارامترهای مدول الاستیسیته، چسبندگی و سطح تراز آب زیرزمینی خاک‌های چسبنده مطابق جدول (۶) پرداخته شده است.

از آنجایی که در این تحقیق، مطالعه بر روی پروژه خط ۲ مترو تبریز صورت می‌گیرد، مشخصات تونل برابر مشخصات پروژه مورد بررسی فرض شده و همچنین بر اساس پروفیل مسیر پروژه و مقادیر متداول در سایر پروژه‌های مترو، نسبت سربار به قطر تونل برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده است. بر اساس مقادیر در نظر گرفته شده در جدول (۶) و ترکیبات این مقادیر تعداد ۴۵ مدل مختلف ساخته شده است.

استفاده شده است. مشخصات ژئوتکنیکی مقطع انتخاب شده در جدول (۴) ارائه گردیده است. فرآیند حفاری تونل مدل‌سازی گردیده و فشار جبهه کار اعمالی با توجه به مقادیر واقعی اعمال شده در حین حفاری ۹۱ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.

مقدار نشست سطحی به دست آمده از مدل‌سازی در سطح زمین بالای محور تونل به همراه نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق مقطع مورد نظر در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به نزدیکی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و قرائت‌های محلی می‌توان برای شرایط ژئوتکنیکی مورد نظر با دقت مناسب از مدل رفتاری و الگوی مدل‌سازی انجام گرفته استفاده نمود.

#### جدول ۴- خصوصیات ژئومکانیکی خاک اطراف تونل در

کیلومتر ۷۵۳ خط ۲ قطار شهری تبریز	
SP-SM	طبقه‌بندی خاک
۱۸	عمق سربار (m)
۱۲/۴	عمق تراز آب (m)
۱۹/۶۵	وزن مخصوص اشباع (KN/m <sup>3</sup> )
۱۷/۲۵	وزن مخصوص خشک (KN/m <sup>3</sup> )
۵	چسبندگی (KPa)
۳۸	مدول یانگ (MPa)
۳۴	زاویه اصطکاک داخلی

#### جدول ۵- مقایسه نتایج حاصل از ابزاربندی و مدل‌سازی عددی

کیلومتر ۷۵۳/۲۶ حفاری	کیلومتر ۷۲۲/۶۶	پین نشست- سنجی	نشست قرائت شده از ابزاربندی (m)	نشست حاصل از مدل‌سازی عددی (m)
۰/۰۱۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۵
۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸
۰/۰۰۲	۰	۰	۰	۰/۰۰۲

#### ۳-۶- فشار جبهه کار

تعیین میزان فشار مورد نیاز جهت تأمین پایداری جبهه کار یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت پیشروی دستگاه می‌باشد. فشار جبهه کار بطور کلی تابعی از عمق و قطر تونل، میزان بار سطحی، سطح آب، نوع ماشین حفار، مشخصات مهندسی خاک و تنش مؤثر می‌باشد.

در اکثر مطالعات پیشین انجام یافته تمرکز مطالعات بر تعیین میزان حداقل و حداکثر فشار جبهه کار برای جلوگیری از ریزش یا بالازدگی جبهه کار می‌باشد. در این تحقیق هدف تعیین فشار حدی نبوده و فشار بهینه جبهه کار، فشاری در نظر گرفته می‌شود که جابجایی جبهه کار، کم‌ترین مقدار را داشته باشد و به طبع آن کم‌ترین نشست یا بالازدگی در سطح زمین ایجاد گردد. معمولاً پروفیل جابجایی جبهه کار شکل منظمی ندارد. بنابر این جابجایی جبهه کار تونل در مرکز و حداکثر جابجایی جبهه کار هیچکدام

جدول ۶- پارامترها و مقادیر به کار رفته در مطالعه پارامتریک

پارامتر	شرح	مقادیر انتخاب شده
$h_w$	تراز سطح آب زیرزمینی	۲۷ و ۹،۰
$c$	چسبندگی	۴۰ و ۳۰، ۲۰
$E$	مدول الاستیسیته (MPa)	۴۰ و ۳۵، ۳۰، ۲۵، ۲۰

۵- بررسی نتایج

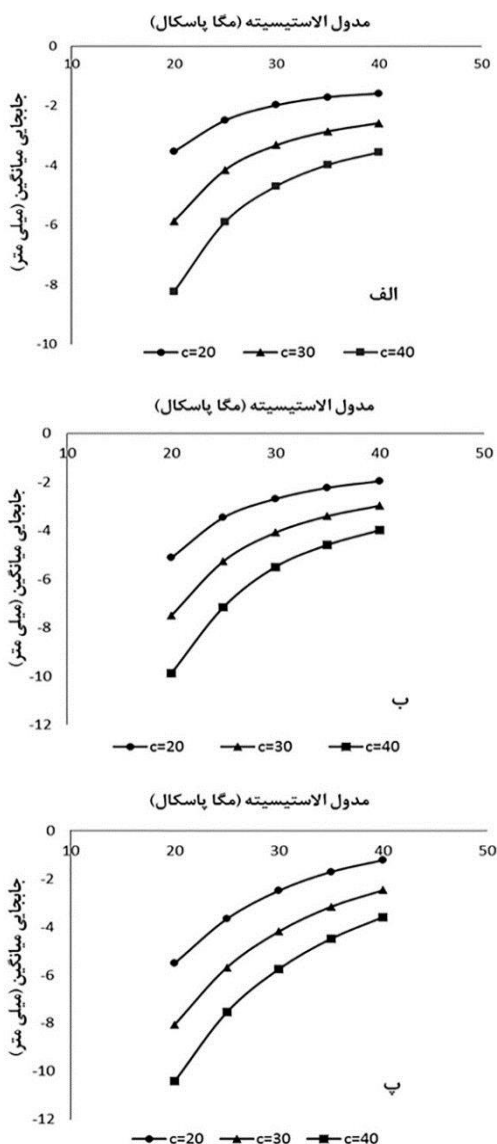
هر یک از ۴۵ مدل مورد مطالعه برای مدول الاستیسیته، چسبندگی و تراز آب زیر زمینی حداقل با دو مقدار متفاوت فشار جبهه کار مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین، حدود ۲۰ مدل با مشخصات خاک دانه‌ای اطراف تونل برای بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و ثابت در نظر گرفتن بقیه مشخصات خاک انتخاب شده است. بنابر این با تحلیل بیش از ۱۳۰ مدل سه بعدی، تأثیر مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک و سطح آب زیرزمینی بر میزان بهینه فشار جبهه کار بررسی گردیده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۵-۱- تأثیر مدول الاستیسیته

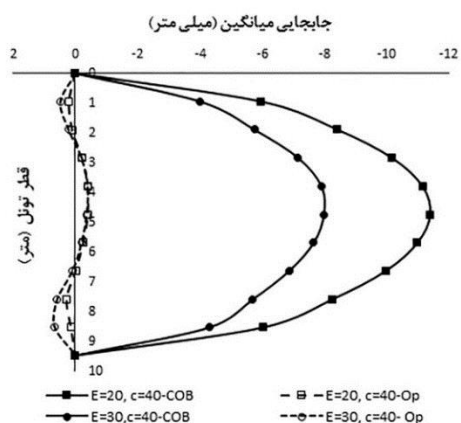
با اعمال چندین فشار مختلف در محدوده فشار جبهه کار مورد مطالعه مشاهده شد که منحنی فشار جبهه کار-جابجایی میانگین تقریباً به صورت خطی تغییر می‌کند. بنابر این با اعمال مقادیر کمتر یا بیشتر فشار جبهه کار نسبت به مقادیر رابطه تجربی COB و به دلیل زمان بسیار زیاد تحلیل مدل‌ها، تمامی منحنی‌ها با فرض خطی و با دو فشار جبهه کار ترسیم و فشار بهینه جبهه کار تعیین شده است.

در شکل (۴) میزان جابجایی میانگین در مقابل مدول الاستیسیته برای مقادیر مختلف چسبندگی و تراز آب زیرزمینی نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد با افزایش مدول الاستیسیته خاک، جابجایی میانگین جبهه کار به دلیل افزایش سختی به صورت غیر خطی در تمام حالات تراز آب زیرزمینی کاهش می‌باشد. همچنین، با افزایش چسبندگی مقدار جابجایی میانگین افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر کاهش زیاد فشار جبهه کار مورد نیاز در رابطه تجربی COB با افزایش مقدار چسبندگی می‌باشد.

در شکل (۵) برای دو حالت مدول الاستیسیته ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال با چسبندگی ۴۰ کیلو پاسکال، جابجایی جبهه کار مربوط به فشار حاصل از رابطه COB رسم گردیده و با جابجایی فشار بهینه جبهه کار به دست آمده در این مطالعه مقایسه شده است. مطابق شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش سختی خاک جابجایی جبهه کار برای یک چسبندگی مشخص کاهش پیدا می‌کند.

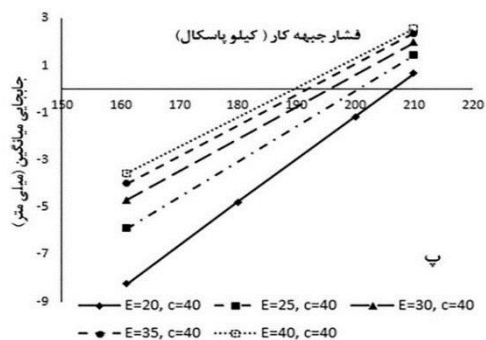
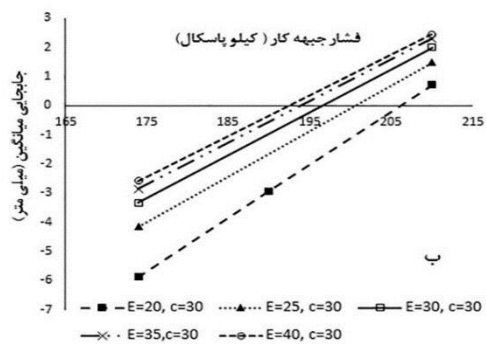
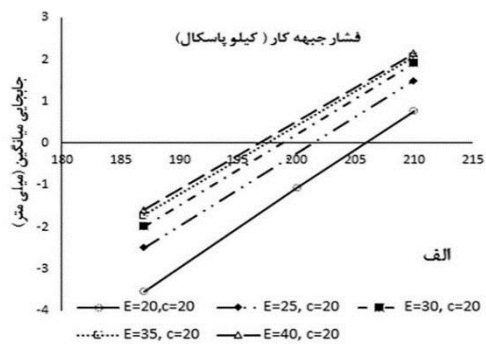


شکل ۴- جابجایی میانگین- مدول الاستیسیته، آب در تراز: (الف) ۰، (ب) ۹، (پ) ۲۷ متری



شکل ۵- جابجایی افقی در جهت جبهه کار

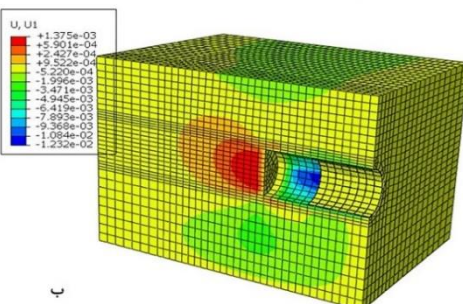
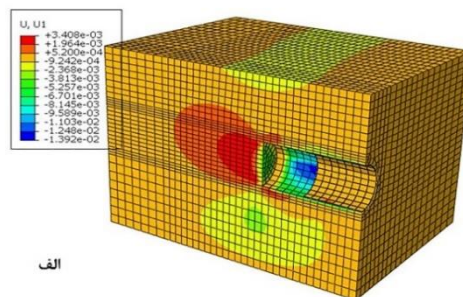
در شکل (۸) فشار جبهه کار به دست آمده از رابطه تجربی COB در مقابل جابجایی میانگین و همچنین، فشار جبهه کار متناظر برای رسیدن به مقدار جابجایی میانگین صفر رسم شده است.



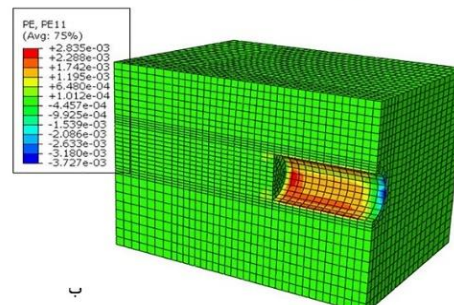
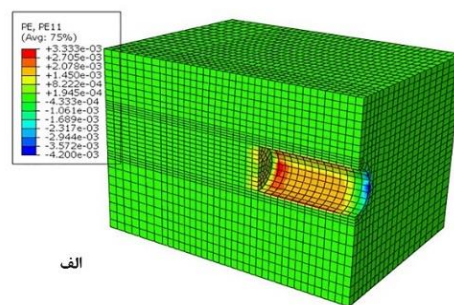
شکل ۸- فشار جبهه کار- جابجایی میانگین، آب در تراز سطح زمین برای چسبندگی: الف) ۲۰، ب) ۳۰، پ) ۴۰ کیلو پاسکال

در شکل (۹) مقادیر فشار بهینه جبهه کار در مقابل میزان مدول الاستیسیته خاک برای مقادیر مختلف چسبندگی ارائه شده است. مطابق شکل (۹)، در تمام حالات مدول الاستیسیته برای خاک‌های چسبنده، رابطه COB مقدار فشار جبهه کار کمتری نسبت به حالت فشار بهینه جبهه کار ارائه می‌دهد. همچنین، با افزایش مدول الاستیسیته جابجایی میانگین و مقدار فشار بهینه جبهه کار به دست آمده از این رابطه کاهش می‌یابد که اهمیت پارامتر مدول الاستیسیته خاک را در جابجایی ایجاد شده در جبهه کار تونل نشان می‌دهد.

در شکل (۶) و (۷) کانتور جابجایی افقی و کرنش پلاستیک در مدل‌سازی عددی برای دو حالت فشار جبهه کار COB و بهینه نشان داده شده است که با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌گردد ناحیه پلاستیک کمتری در جبهه کار تونل در حالت فشار بهینه جبهه کار تشکیل شده است که باعث جابجایی کمتر جبهه کار و در نتیجه کاهش نشست در سطح زمین می‌گردد.



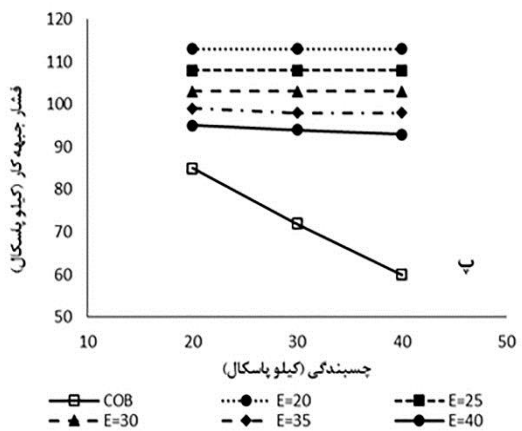
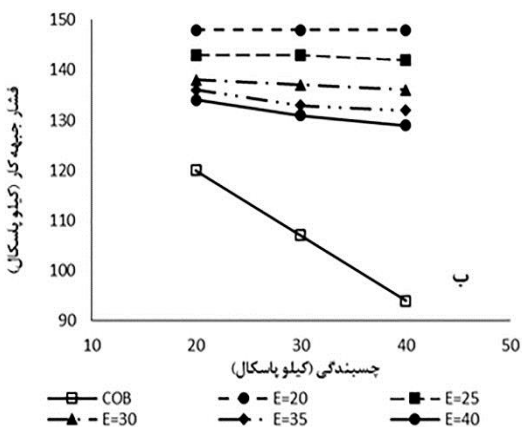
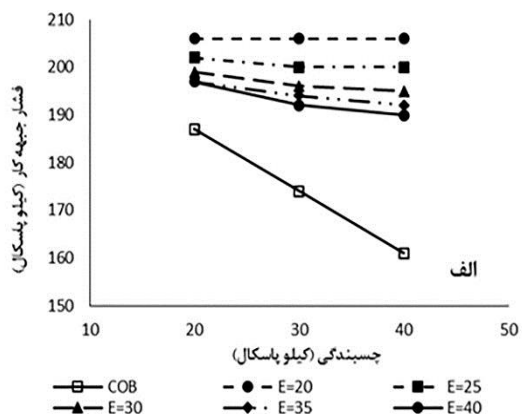
شکل ۶- کانتور جابجایی افقی در مدل‌سازی عددی: الف) فشار جبهه کار COB، ب) فشار بهینه جبهه کار



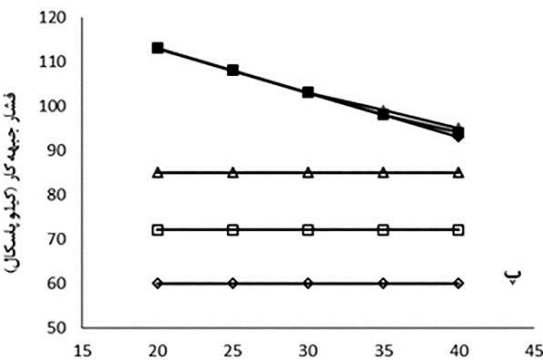
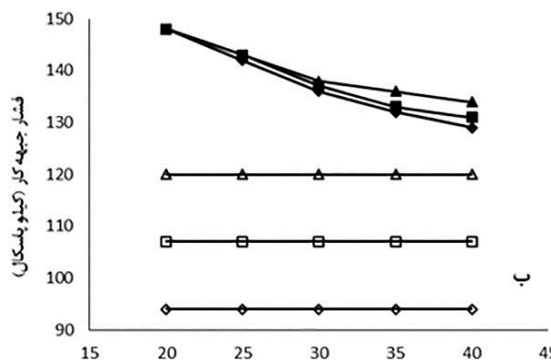
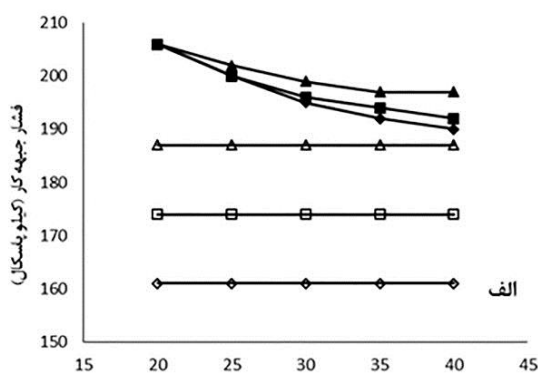
شکل ۷- کانتور کرنش پلاستیک در مدل‌سازی عددی: الف) فشار جبهه کار COB، ب) فشار بهینه جبهه کار



نسبت به فشار بهینه جبهه کار کاهش می‌دهد که باعث افزایش جابجایی میانگین جبهه کار می‌شود. حال این که فشار بهینه جبهه کار با افزایش چسبندگی با شیب کمتری کاهش پیدا می‌کند. با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی تأثیر چسبندگی بر مقدار فشار جبهه کار کم شده و فشار بهینه جبهه کار یکسانی حاصل می‌شود که به دلیل قرار گرفتن جبهه کار در فاز الاستیک و مستقل بودن از پارامترهای پلاستیک خاک مثل چسبندگی می‌باشد.



شکل ۱۰- فشار جبهه کار- چسبندگی، آب در تراز: الف)، ب) (پ، ۲۷ متری



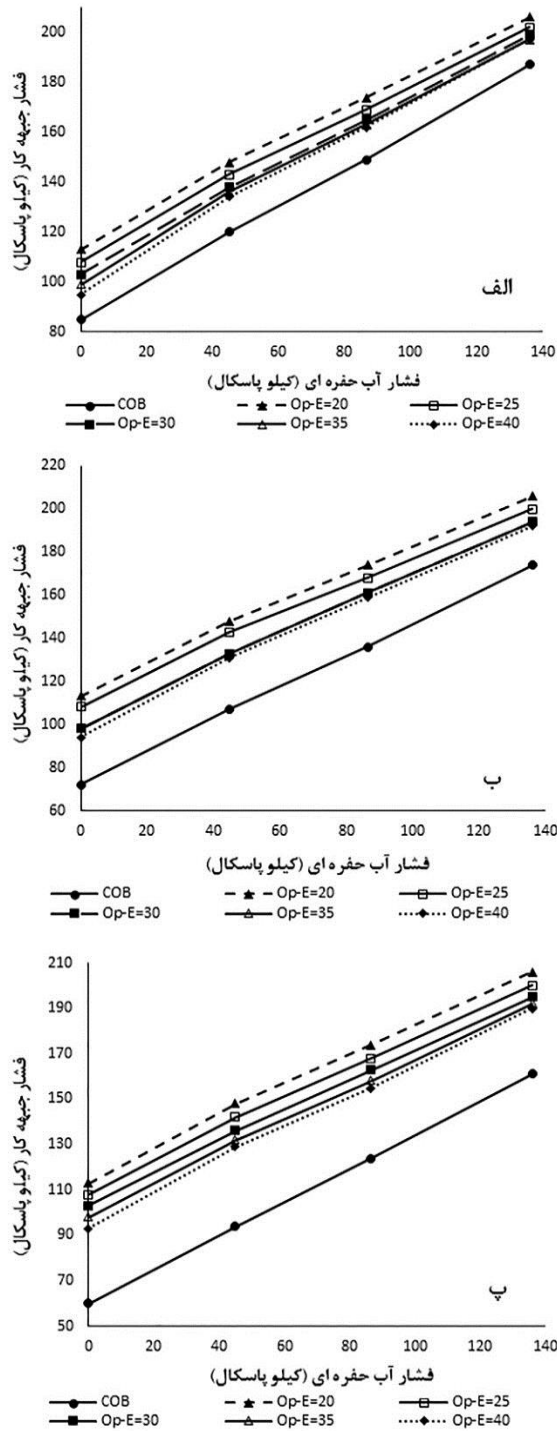
شکل ۹- فشار جبهه کار- مدول الاستیسیته، آب در تراز: الف)، ب) (پ، ۲۷ متری

۵-۲- چسبندگی

شکل (۱۰) فشار جبهه کار- چسبندگی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته خاک نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ با افزایش چسبندگی رابطه تجربی COB مقدار فشار جبهه کار کمتری برای پایداری تونل ارائه می‌نماید. همچنین، با افزایش چسبندگی، رابطه تجربی COB فشار جبهه کار را با شیب زیادی

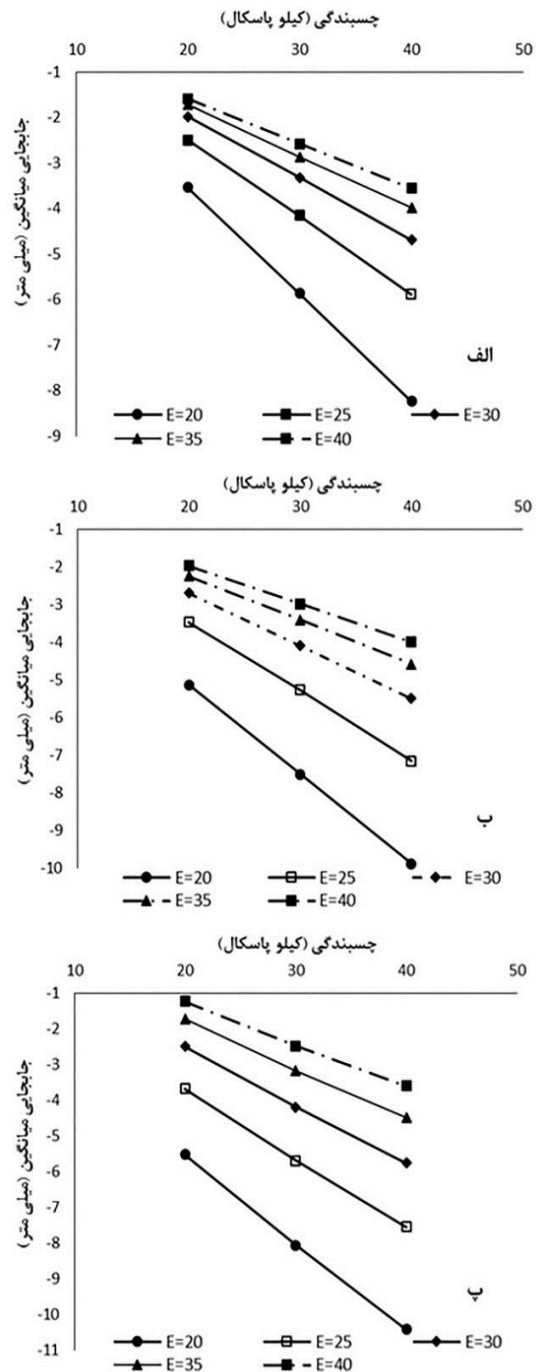
۳-۵- تراز آب زیرزمینی

در شکل (۱۲) فشار جبهه کار در مقابل فشار آب حفره‌ای در تاج تونل با چسبندگی‌های متفاوت رسم شده است.

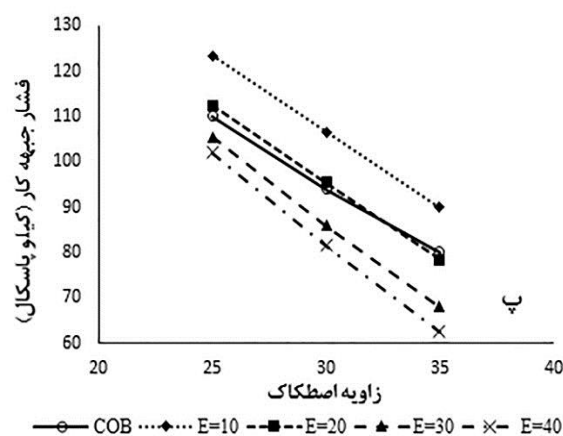
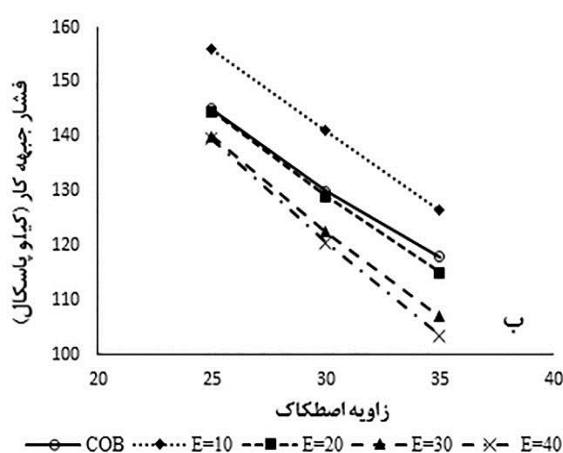
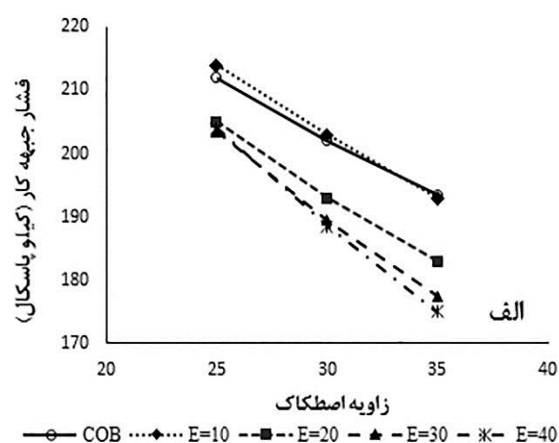


شکل ۱۲- فشار جبهه کار- فشار آب حفره‌ای در تاج تونل برای چسبندگی: الف) ۲۰، ب) ۳۰، پ) ۴۰ کیلو پاسکال

در شکل (۱۱) جابجایی میانگین- چسبندگی برای فشار جبهه کار به دست آمده از رابطه تجربی COB برای ترازهای مختلف آب زیرزمینی نمایش داده شده است که مشابه نتایج قبلی مشاهده می‌گردد با افزایش چسبندگی جابجایی میانگین خاک افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- جابجایی میانگین- چسبندگی، آب در تراز: الف) ۰، ب) ۹، پ) ۲۷ متری



شکل ۱۳- فشار جبهه کار- زاویه اصطکاک، آب در تراز: الف)، ب) ۹، پ) ۲۷ متری

• روش تجربی COB در این مطالعه برای محیط‌های با مدول الاستیسیته مختلف فشار جبهه کار یکسانی را پیشنهاد می‌کند، در حالی که، با استفاده از نتایج عددی ملاحظه می‌گردد که در فشارهای جبهه کار یکسان، میزان جابجایی جبهه کار در مدول‌های متفاوت دارای اختلاف معناداری است که اهمیت در نظر

مطابق شکل (۱۲) با افزایش سطح آب، مقدار فشار جبهه کار مورد نیاز در تمامی حالات افزایش می‌یابد. همچنین، در تمامی حالت با افزایش تراز سطح آب زیرزمینی اختلاف مقادیر فشار جبهه کار به دست آمده از رابطه COB و فشار بهینه کمتر می‌شود. با توجه به شکل با افزایش چسبندگی اختلاف بین فشار بهینه جبهه کار در مدول‌های الاستیسیته متفاوت با فشار جبهه کار COB بیشتر می‌شود و در تمامی حالات فشار جبهه کار به دست آمده بیشتر از فشار جبهه کار به دست آمده از رابطه تجربی می‌باشد.

#### ۴-۵- زاویه اصطکاک

در این مطالعه علی‌رغم بررسی پارامترهای ذکر شده برای خاک‌های چسبنده، برای مقایسه بهتر به بررسی و تأثیر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک در انتخاب فشار بهینه جبهه کار برای خاک دانه‌ای با چسبندگی صفر هم پرداخت شده است. مطابق شکل (۱۳) با افزایش زاویه اصطکاک، مقدار فشار جبهه کار برای هر دو حالت COB و بهینه کاهش پیدا می‌کند که این روال با نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین (Kim و Tonon, 2010) همخوانی دارد.

این روال برای تمام سطوح تراز آب زیرزمینی روند یکسانی دارد. همچنین، اختلاف مقدار فشار بهینه جبهه کار با افزایش زاویه اصطکاک و یکسان بودن مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۳- الف)، مقدار فشار جبهه کار COB از حالت فشار بهینه جبهه کار برای تمامی حالات تقریباً مقدار بیشتری دارد که با کم شدن تراز آب زیرزمینی مقدار فشار جبهه کار به دست آمده از رابطه COB در محدوده بین حالات بهینه قرار می‌گیرد که تأثیر سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. همچنین با مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۲) مشاهده می‌گردد که زاویه اصطکاک تأثیر بیشتری نسبت به چسبندگی در کاهش فشار بهینه جبهه کار دارد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مشخصات خط ۲ قطار شهری تبریز و مدل‌سازی سه‌بعدی با کاربرد نرم‌افزار آباکوس، تأثیر پارامترهای مدول الاستیسیته، چسبندگی و سطح آب زیرزمینی بر میزان فشار بهینه جبهه کار در خاک‌های چسبنده ارزیابی گردید. نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند در جهت تعیین فشار جبهه کار و اهمیت مدول الاستیسیته در تونل‌های مکانیزه به کار گرفته شود. بر اساس نتایج حاصل:

- grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling", *Tunnelling and Underground Space Technology*; 2006, 21 (2), 160-71.
- Kasper T, Meschke G, "A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground", *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2004, 28 (14), 1441-60.
- Katebi H, Rezaei AH, Hajjalilue-Bonab M, "The influence of surface building and ground staficitaion on lining loads applying the finite element method", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 18, 1845-1861.
- Katebi H, Rezaei AH, Hajjalilue-Bonab M, Tarifard A, "Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM)", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49, 67-78.
- Kim SH, Tonon F, "Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane-Drained case", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25 (5), 526-42.
- Lambrughi A, Rodríguez LM, Castellanza R, "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations", *Computers and Geotechnics*, 2012, 40, 97-113.
- Mair R, Taylor R, "editors. Theme lecture: Bored tunneling in the urban environment", *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1997, 4, 2353-2385.
- Möller SC, "Tunnel induced settlements and structural forces in linings", *Master of engineering Thesis, Univ. Stuttgart, Germany*, 2006.
- Zhang Z, Hu X, Scott KD, "A discrete numerical approach for modeling face stability in slurry shield tunnelling in soft soils", *Computers and Geotechnics*, 2011, 38 (1), 94-104.
- بخشنده ح، زمزم م ص، موسوی ا، "برآورد کمینه فشار جبهه کار تونل‌های درون‌شهری با ماشین EPB به روش تحلیلی و عددی مطالعه موردی: تونل خط ۷ متروی تهران (قطعه شرقی- غربی)"، *مجله علمی پژوهشی شریف*، ۱۳۹۴، ۳۱ (۳)، ۱۳۷-۱۴۵.
- حیدری ر، زارع ش، نصیرآباد ح، فروغی م، "بررسی تأثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونل‌سازی مکانیزه در زمین نرم- مطالعه موردی: تونل قطعه شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی*، ۱۳۹۱، ۱ (۱)، ۵۷-۶۷.
- خیراندیش ا، فاروق حسینی م، طالبی نژاد ع، "تأثیر فشار نگهداری جبهه کار در حفر تونل به روش EPB بر تغییر شکل‌های سطحی و جبهه کار"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی معدن*، ۱۳۹۲، ۸ (۲۰)، ۳۷-۴۸.
- کاتبی ه، رضایی ا م، حاجی‌علیلوی بناب م، تاری فر ا، "امکان‌سنجی استفاده از سربار مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی گرفتن مدول الاستیسیته در طراحی فشار نگهدارنده را نشان می‌دهد. همچنین، با افزایش مدول الاستیسیته به فشار جبهه کار کمتری نیاز است.
- میزان فشار حاصل از رابطه COB کمتر از مقادیر بهینه حاصل از تحلیل عددی می‌باشد. دلیل این امر نزدیک بودن فشار COB به میزان فشار حداقل ناشی از فشار جانبی خاک می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده پارامتر زاویه اصطکاک داخلی تأثیر بیشتری نسبت به پارامتر چسبندگی در مقدار فشار بهینه جبهه کار دارد.
- ### ۷- مراجع
- Ahmed M, Iskander M, "Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 27 (1), 101-10.
- Anagnostou G, "The contribution of horizontal arching to tunnel face stability", *geotechnik*, 2012, 35 (1), 34-44.
- Anagnostou G, Kovari K, "Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11 (2), 165-73.
- Atkinson J, Potts D, "Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil", *Geotechnique*, 1977, 27 (2), 203-15.
- Broere W, "Tunnel Face Stability & New CPT Applications", *PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands*, 2001.
- Chambon P, Corte JF, "Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120 (7), 1148-1165.
- Chen R, Tang L, Ling D, Chen Y, "Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method", *Computers and Geotechnics*, 2011, 38 (2), 187-95.
- Do NA, Dias D, Oreste P, Djeran-Maigre I, "Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern", *Acta Geotechnica*, 2014, 9 (4), 673-94.
- Greenwood JD, "Three-dimensional analysis of surface settlement in soft ground tunneling", *Master of engineering Thesis, Massachusetts Institute of Technology, US*, 2003.
- Guglielmetti V, Grasso P, Mahtab A, Xu S, "Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control", *CRC Press*, 2008.
- Ibrahim E, Soubra A-H, Mollon G, Raphael W, Dias D, Reda A, "Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49, 18-34.
- Jancsecz S, Steiner W, "Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions", *Tunnelling 94, Springer*, 1994, 531-550.
- Karakus M, "Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis", *Tunnelling and Underground Space Technology*; 2007, 22 (1), 47-56.
- Kasper T, Meschke G, "On the influence of face pressure,

ماشین حفار مکانیزه (مطالعه موردی شفت غربی خط ۲ قطار شهری تبریز)"، مجله علمی- پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، ۱۳۹۳، ۳ (۲)، ۱۶۱-۱۷۲.

کاتبی ه، رضایی ام، حاجی علیلوی بناب م، "بررسی تأثیر مشخصات سازه‌های سطحی و لایه‌بندی زمین در بارهای وارد بر پوشش تونل با استفاده از روش المان محدود"، مجله علمی- پژوهشی شریف، ۱۳۹۴، ۳۱ (۴)، ۳-۱۴.

## EXTENDED ABSTRACT

# The Soil Parameters Effects on the Optimum Face Pressure of Mechanized Tunnels in Cohesive Soils

Amir Hassan Rezaei <sup>a,\*</sup>, Saeed Babaei <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Engineering, University of Azarbaijan Shahid Madani, Tabriz, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

**Received:** 06 February 2017; **Accepted:** 26 August 2017

### Keywords:

Mechanized tunneling, face pressure, elasticity modulus, cohesive soils, ABAQUS

## 1. Introduction

Estimating the pressure required to support the tunnel face is one of the most important factors regarding safe and optimal excavation using mechanized tunnel boring machines in urban areas. Applying a pressure more or less than the balance to the face would cause collapse and blow out in the tunnel face respectively. This pressure depends on several factors such as soil type and its engineering specifications, TBM type, underground water conditions, excavation method, amount of surcharge and tunnel section area. In this paper, the influence of soil elasticity modulus, cohesion and friction angle on the optimum amount of face pressure in cohesive soil were studied in different underground water conditions. For this purpose, a 3D finite element model was used employing the ABAQUS software (Ver. 6.14). The main construction aspects and all main elements of mechanised excavation were modelled: TBM shield, concrete tunnel lining, over-excavation, tail gap grouting and progressive hardening of the cement based grout. More than 130 3D models were analyzed and optimum pressure in the tunnel face was determined through measuring the amount of induced average displacement in the tunnel face. In the other word, for various elasticity modulus, cohesion, and internal friction angle different values of face pressure were applied in tunnel face and corresponding tunnel face average displacements were measured for each state.

## 2. Methodology

In recent years, there has been some research carried out on the two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) modelling of tunnel construction (Do et al., 2014; Katebi et al., 2015; Kasper and Meschke, 2004). In this study, a three-dimensional finite element multistep simulation model for shield-driven tunnel excavation is presented. The model takes into account relevant components of the construction process as separate components in the model (including soil and ground water, tunnel lining and tail void grouting). Twenty-four steps have been performed according to the real construction sequences to achieve realistic model's results. The tunnel surrounding soil above the ground water level were discretized by 8-node first order fully integrated continuum elements (C3D8). The tunnel lining and TBM shield were simulated by S8 shell elements. The soil under the ground water level and the grout material was modelled as saturated porous media using pore pressure elements (C3D8P). The soil behaviour was assumed to be governed by an elastic perfectly-plastic constitutive relation based on the Mohr-Coulomb criterion with a non-associative flow rule. Tunnel lining and TBM shield were simulated as an elastic behaviour. The ingress of ground water into the tunnel was not considered in this study which means that the water table does not change during construction process. The paper gives a detailed description of the model components and the stepwise procedure to simulate the construction process.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: rezaei.ah@azaruniv.ac.ir (Amir Hassan Rezaei), s.babaei92@ms.tabrizu.ac.ir (Saeed Babaei).

### 3. Results and discussion

Since the evaluation of all influencing parameters on face pressure is not fully achievable, the current study emphasizes the parameters of elastic modulus, cohesion, and groundwater level in cohesive soils according to table 1. The tunnel geometric properties and TBM-EPB characteristics adopted from under construction Tabriz metro line 2 project. Moreover, the ratio of cover to diameter of the tunnel is assumed as 1.5 based on the route profile of the project and the conventional values on subway projects. As a result, 45 different models were simulated considering the values presented in Table 1 and the results are presented in the following.

**Table 1.** Introducing parameters and quantities of parametric study

Parameter	Introduction	values
$h_w$	Groundwater level (m)	0, 9, 27
$c$	Cohesion (KPa)	20, 30, 40
$E$	Young modules (MPa)	20, 25, 30, 35, 40

#### 3.1. Elasticity modulus of soil

The results showed that with an increase in the value of soil's elasticity modulus, average displacement of the tunnel face decreases nonlinearly in all groundwater conditions due to an increase in soil stiffness. Furthermore, by increasing the value of cohesion, the value of average displacement increases. The reason for this trend can be attributed to an intense reduction in required face pressure with an increase in cohesion at empirical equation of COB. Additionally, the equation of COB provides smaller value for face pressure in comparison to the optimized face pressure in all conditions of elastic modulus for cohesive soils. Besides, it can be understood that an increase in elastic modulus causes a reduction in average displacement and the value of optimized face pressure, which was calculated by using this method. This reduction indicates the importance of the soil's elasticity modulus in the induced displacement at the tunnel face.

#### 3.2. Cohesion

With an increase in cohesion, the empirical equation of COB proposes fewer values for face pressure in order to tunnel face support. Also, by increasing the cohesion, the value of COB required face pressure decreases sharper than the obtained optimum face pressure. By decreasing the groundwater level, in dry soil the influence of cohesion on face pressure decreases. However, the value of optimum face pressure approximately remains constant due to the fact that the region of tunnel face remains in the elastic phase and soil deformation is independent from the plastic parameters of the soil such as cohesion.

#### 3.3. Groundwater level

With an increase in groundwater level, the value of required face pressure increases in all conditions. Also, the difference of face pressure calculated by COB equation and obtained optimum face pressure decreases in all conditions with an increase in groundwater level. Furthermore, it can observe that an increase in cohesion cause to increase in the difference of obtained optimum face pressure in various elastic modulus and the COB face pressure. Thus, obtained face pressure is greater than the empirical face pressure in all conditions.

#### 3.4. Internal friction angle

In this study, in addition to the aforementioned parameters, the influence of internal friction angle on the optimum face pressure in cohesive-frictional soils is also investigated in order to provide a better comparison with other parameters. The results showed that with an increase in internal friction angle, the value of face pressure decreases for both COB and optimum pressure which is in good agreement with previous studies (Kim and Tonon, 2010).

### 4. Conclusions

Considering the characteristics of Tabriz metro line 2 project and 3D-modeling, which was carried out by Abaqus software, the influence of elasticity modulus, cohesion and groundwater level on optimum face pressure at cohesive soils were evaluated. Results show that elasticity modulus of soil and underground water conditions have a remarkable effect on the optimized face pressure value and for minimizing the tunnel face displacement, elasticity modulus should be considered in calculation of the applied face pressure.

## 5. References

- Do N-A, Dias D, Oreste P, Djeran-Maigre I, "Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern", *Acta Geotechnica*, 2014, 9 (4), 673-94.
- Kasper T, Meschke G, "A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground", *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2004, 28 (14), 1441-60.
- Katebi H, Rezaei A, Hajjalilue-Bonab M, Tarifard A, "Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM)", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49, 67-78.
- Kim SH, Tonon F, "Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane-Drained case", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25 (5), 526-42.