ارزیابی میزان مناسب فشار جبهه کار تونلهای مکانیزه حفاری شده در آبرفتهای دانهای مترو تبریز

سعید بابائی<sup>\*</sup>؛ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ مهندسی عمران، امیر حسن رضایی؛ دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، هوشنگ کاتبی؛ دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ مهندسی عمران تاریخ: دریافت ۹۷/۱۱/۲۹

#### چکیدہ

کنترل جابهجاییهای ناشی از حفاری تونل در محیطهای شهری اهمیت ویژهای دارد. یکی از دلایل اساسی افزایش جابهجاییها، عدم اعمال فشار مناسب در جبهه کار تونل است. این پارامتر بهویژه در مواردی که تونل در محیطهای شهری حفر می شود اهمیت بیشتری پیدا می کند. تعیین مقدار این فشار برای جلوگیری از تخریب جبههٔ کار و نشست زمین از یک سو و ممانعت از بالازدگی زمین از سوی دیگر بسیار مهم است. به طورکلی روشهای تعیین فشار جبهه کار به سه دستهٔ تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم می شوند. فشار مادول الاستیسیته، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی، شرایط آب زیرزمینی، میزان روباره و مطح مقطع تونل وابسته است که در تحقیق حاضر، با کاربرد نرمافزار المان محدود مکانیزه می پردازیم. با تحلیل مدلهای سهبعدی و اندازه گیری مقادیر جابهجاییهای جبهه کار تونل به ازای مقادیر متفاوت فشار جبهه کار و پارامترها بر میزان مناسب فشار جبهه کار تونلهای مکانیزه می پردازیم. با تحلیل مدلهای سهبعدی و اندازه گیری مقادیر جابهجاییهای جبهه کار تونل به ازای مقادیر متفاوت فشار جبهه کار و پارامترهای بررسی شده، مقدار مناس فشار نونل به ازای مقادیر مناوت فشار جبهه کار و پارامترهای بررسی شده، مقدار داسب فشار نونل به ازای مقادیر مناوت فشار جبهه کار و پارامترهای بررسی شده، مقدار مانس فشار نونل به ازای مقادیر مناوت فشار جبهه کار و پارامترهای بررسی شده، مقدار مانسب فشار نور به دارنده تخمین زده شده است. صحتسنجی روند مدل سازی بر اساس نتایج ابزاربندی

<sup>\*</sup>نویسنده مسئول s.babaei@email.kntu.ac.ir

الاستیسیته خاک در مقدار فشار جبهه کار است و بهعنوان الگوی کلی، با افزایش مدول الاستیسیته فشار مناسب جبهه کار کاهش مییابد. همچنین، مقادیر مناسب فشار جبهه کار بهدست آمده با روش های تحلیلی جانکسز-استاینر، آنگونستا-کواری و روش تجربی COB مقایسه شده است که بیش ترین تطابق با روش COB مشاهده شده است. لازم به ذکر است با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و در مدول های الاستیسیته کم (کم تر از ۲۰ مگاپاسکال در پژوهش انجام شده)، رابطهٔ COB فشار جبهه کار کم تری نسبت به حالت مناسب ارائه میدهد که باید در محاسبات فشار جبهه کار در نظر گرفته شود.

**واژههای کلیدی**: فشار جبهه کار، تونل سازی مکانیزه، مدول الاستیسیته، خاکهای دانهای، مدلسازی عددی.

#### مقدمه

با توسعهٔ تونلزنی در شرایط ژئوتکنیکی نامساعد و نواحی شهری بسیار پر جمعیت، حفظ پایداری جبهه کار تونل اهمیت دو چندان یافته است. جابهجایی یا ناپایداری در جبهه کار تونل، جابهجاییهای محیطی ناشی از وجود فضای خالی بین سپر و سطح تونل یا پوشش تونل و همین طور تغییر شکل زمین در اثر تغییر شکل نگهداری و تحکیم، عوامل ایجاد نشست کلی در سطح زمین هستند. معمولاً افت زمین ناشی از فعالیت جبهه کار ۱۰ تا کلی زمین را تشکیل میدهند [۱]. در چنین شرایطی پایداری جبهه کار یکی از مهمترین و پرمخاطرهترین عوامل در حفاری تونل بوده است و نیازمند بررسی و تحلیل دقیق است.

بهطورکلی روش های تعیین فشار جبهه کار را میتوان به سه روش تجربی، تحلیلی (تعادل حدی و آنالیز حدی) و عددی تقسیم کرد. در روش های تجربی بر اساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطهای تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار جبهه کار برقرار میشود. در این روش، فشار نگهدارنده حدی حداقل و حداکثر ارائه نشده و صرفاً فشار مورد نیاز برای انجام حفاری در شرایط مناسب توصیه میشود. روش 'COB به عنوان یکی از معتبرترین این روش ها، فشار جبهه کار را کمی بیش تر از فشار جانبی فعال زمین توصیه میکند [۲].

<sup>1.</sup> Centrum Ondergronds Bouwen

محققان زیادی با استفاده از روش های تحلیلی به تخمین پایداری جبهه کار در خاکهای کاملاً چسبنده و خاکهای اصطکاکی پرداختهاند. از معتبرترین روش های تعادل حدی برای خاکهای غیرچسبنده و کمی چسبنده روش جانکسز – استاینر [۳] و برای خاکهای غیرچسبنده رابطهٔ آنگونستا-کواری [٤] است، که با استفاده از مکانیزم شکست پیشنهادی هورن (۱۹٦۱) روابطی را برای محاسبهٔ فشار پایداری جبهه کار بر اساس گسیختگی گوه و سیلوی خاک تعادل حدی پیشنهاد کردهاند. همچنین برویر در سال ۲۰۰۱ این روش را برای خاک لایهای و وجود فشار آب گسترش داد [٥]. در روشهای آنالیز حدی تنش، آنالیز تنش صورت می گیرد. از معروفترین روشهای آنالیز حدی میتوان روشهای برومز و بنرمارک پوشش)، دیویس (خاک چسبنده) و روش لکا – دومیر (خاک غیرچسبنده برای تونل بدون پوشش)، دیویس (خاک چسبنده) و روش لکا – دومیر (خاک غیرچسبنده) را نام برد [۲]. در عددی به بررسی پایداری جبهه کار تونل پرداختند.

تحلیلهای عددی از روشهای پر کاربرد هستند که امکان بررسی مراحل ساخت تونل، رفتار سهبعدی جبهه کار و در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر خاک مانند مدول الاستیسیته و ضریب پواسون را فراهم می سازند. با این وجود صحت نتایج این روشها کاملاً به دادههای اولیه مسئله بستگی دارد. در سال ۲۰۰٤ کاسپر و مسچه مدل سازی سهبعدی انجام دادند، به طوری که پارامترهای زیادی در این مدل با در نظر گرفتن پیشروی مرحله به مرحله تونل بررسی شد. همین امر مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف بر فشار جبهه کار، فشار تزریق و پارامترهای ماشین حفار بر میزان نشستهای سطحی را میسر کرد. [۷]. لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به مقایسهٔ نحوهٔ ناپایداری جبهه کار و بالازدگی زمین پرداخته و نشان دادند که شباهت زیادی بین مدلهای تحلیلی و عددی در مدل تخریب وجود دارد، لیکن در مدل بالازدگی، شکل ناپایداری متفاوت است و نشان دادند که در بالازدگی تنها نیمهٔ بالایی جبهه کار دچار ناپایداری می شود [۸]. در سال ۲۰۱۱ چن و همکاران با روش عددی المان گسته مکانیزم گسیختگی و فشار حدی جبهه کار در خاک ماسهای خشک را بررسی کردند [۹]. لامبروگی و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش عددی تفاضل محدود به تحلیل حساسیت مدلهای رفتاری مختلف خاک و بررسی تأثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین برای پروژه مترو مادرید پرداختهاند [۱۰]. همچنین در سال ۲۰۱۲ نیز بورتز و همکاران با استفاده از مدلسازی فیزیکی و شبیه سازی فرآیند تونلسازی، روابطی برای فشار جبهه کار ارائه دادند [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ بررسی مکانیزم گسیختگی و پایداری جبهه کار تونلهای دایره ای کمعمق به وسیلهٔ زانگ و همکاران انجام شده است [۲۲]. خیراندیش و همکاران در سال ۲۹۲۲ با استفاده از روش عددی تفاضل محدود تأثیر فشار جبهه کار بر میزان نشست سطحی و جابه جایی های جبهه کار بررسی کردند که نتایج حاصل نشاندهندهٔ تأثیر زیاد مدول الاستیسیته خاک در مقدار فشار مورد نیاز و پایداری جبهه کار بوده است [۳۱]. حیدریان و یایداری در سال ۱۳۹۲ با استفاده از روش عددی تفاضل محدود تأثیر فشار بعبهه کار بر میزان نشست بالاستیسیته خاک در مقدار فشار مورد نیاز و پایداری جبهه کار بوده است [۳۱]. حیدریان و الاستیسیه خاک در مقدار فشار مورد نیاز و پایداری جبهه کار بوده است [۳۵]. حیدریان و بایداری جبهه تونل متروی کرج پرداخته و نشان دادند که فشار به دست آمده از روش

در مجموع تمرکز اکثر پژوهشهای پیشین بر دو موضوع مکانیزم گسیختگی و تعیین میزان فشار حدی جبهه کار (میزان فشارهای حداقل و حداکثر قابل اعمال به جبهه کار متناظر حالات ریزش جبهه کار و بالازدگی خاک جلوی جبهه کار) است [10]. در خصوص پارامترهای مهندسی خاک نیز، بیشتر تمرکز پژوهشها بر تأثیر پارامترهای زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک است و الاستیسیته خاک بهندرت بررسی شده است. در حالی که، مقادیر تغییر شکل و جابهجایی ایجاد شده در جبهه کار بهمیزان زیادی به این پارامتر وابسته است [17].

در تحقیق حاضر با مدلسازی عددی با نرمافزار المان محدود ABAQUS سعی شده است به بررسی بیش تر موضوع پرداخته و با انجام مطالعهٔ پارامتریک به بررسی تأثیر مدول الاستیسیته خاک و شرایط آب زیرزمینی به همراه زاویهٔ اصطکاک داخلی بر میزان فشار مناسب جبهه کار در خاکهای دانهای می پردازیم.

## پروژه بررسی شده

شهر تبریز با مساحت ۱٦۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۱۲۰۰۰۰۰ نفر یکی از شهرهای بزرگ و پر جمعیت ایران در شمال غرب این کشور است. بر اساس بررسیهای توافیک اولیه ٤ خط مترو برای این شهر پیش بینی شده است. خط ۲ قطار شهری تبریز به طول تقریبی ۲۲ کیلومتر منطقه قراملک در غرب تبریز را به نمایشگاه بین المللی تبریز در شرق آن متصل میکند. با توجه به عبور تونل از سازندهای مختلف، شرایط ژئو تکنیکی در طول مسیر متفاوت است ولی لایه های زیر سطحی مسیر پروژه عمدتاً تناوبی از رسوبات ماسهای و میشود که این شرایط ژئو تکنیکی به عنوان حالت مرجع در مدل سازی در نظر گرفته شده است. شکل ۱ پروفیل ژئو تکنیکی بعنوان حالت مرجع در مدل سازی در نظر گرفته شده (کیلومتراژ ۱۰۰+۱۰ الی ۱۰۰+۱۰) را که در در مجاورت مهران رود است را نشان می دهد. بر اساس پژوهش های ژئو تکنیکی انتخاب شده برای حاک دانهای محیط اطراف تونل در مدل مرجع که بر اساس پژوهش های ژئو تکنیکی فاز یک پروژه انتخاب شده است؛ در جدول ۱ ارائه شده است [17]. لازم به ذکر است قطر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری تبریز ۱۹۵۹ متر، طول سپر ماشین حفاری ۹ متر، قطر خارجی سپر در جلوی آن ۲۵/۹ متر و در عقب آن برابر ۱۶۵ مربع در معی در مدول ۱۰۱۰ مرجع که



شکل ۱. پروفیل ژئوتکنیکی انتخاب شده برای مدل مرجع

SM	طبقه بندى خاک
۱٦/٢٥	دانسیته خشک (کیلونیوتن بر مترمکعب)
۲.	دانسیته اشباع (کیلونیوتن بر مترمکعب)
٥	چسبندگی (کیلوپاسکال)
۰۱۰	نفوذپذیری (سانتی متر بر ثانیه)
• /٣	ضريب پواسون
٣٤	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی محیط اطراف تونل [۱7]

#### جزئیات مدل های عددی

با توجه به پیشرفتهای چشمگیر سختافزاری و نرمافزاری و فراهم شدن امکان مدلسازی عددی مسائل ژئوتکنیکی محققان بسیاری در سالهای اخیر به بررسی جنبههای مختلف تونلسازی با مدلسازی عددی پرداختهاند. مدلسازیهای زیادی در زمینهٔ تونلسازی اطریشی جدید انجام شده است ولی به علت رفتار بسیار پیچیدهٔ تونلسازی سپری، تعداد کمی از مدلسازیهای عددی کامل برای این منظور وجود دارد [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]. با توجه به عملکرد سه بعدی در رفتار تنش –کرنش زمین در جبهه حفاری تونل و تأثیرات مربوط به قوسی شدن زمین، در تحقیق حاضر برای بررسی دقیق تر از مدلسازی سه بعدی فرآیند تونلسازی مکانیزه به صورت کامل و گام به گام استفاده شده است. مدل ساخته شده شامل مؤلفههای تأثیرگذار در فرآیند حفاری و ساخت تونل به طول ۲۶ متر در ۲۷ گام شبیه سازی شده مؤلفههای تأثیرگذار در فرآیند حفاری مکانیزه از جمله سپر ماشین، فشار جبهه کار و فشار ترریق دوغاب بوده است و حفاری و ساخت تونل به طول ۲۶ متر در ۲۷ گام شبیه سازی شده گسیختگی موهر –کولمب با قانون جریان غیر همراه مدل شده است. مدل رفتاری موهر کولمب شامل ۲ پارامتر الاستیک (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون) و ۳ پارامتر پلاستیک رچسبندگی، زاویهٔ اصطکاک داخلی، زاویهٔ اتساع) است. همچنین در این پژوهش برای محاسبهٔ زاویهٔ اتساع از رابطهٔ (۱) استفاده شده است.

$$\psi = \phi - 30 \tag{1}$$

که ۷ زاویهٔ اتساع و ۵ زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک است

مشخصههای مدول الاستیسیته، زاویهٔ اصطکاک داخلی و تراز آب زیرزمینی در پژوهش انجام یافته تغییر داده شده و بقیه مشخصههای ژئوتکنیکی بر اساس مقادیر پروژه خط ۲ مترو تبریز در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود پارامترهای بسیار زیاد مؤثر در فرآیند حفاری تونل، مشخصات هندسی تونل و پارامترهای راهبری دستگاه (از قبیل قطر حفاری، اضافه حفاری، مشخصات سپر) نیز بر اساس مطالعه موردی انتخاب شده است تا پارامترها برگرفته از واقعیت باشد. در ادامه به توضیح مختصر بخشهای مختلف مدل استفاده شده میپردازیم و توضیحات تفصیلی در بررسی پیشین که به منظور ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونلهای مکانیزه انجام گرفته قابل دسترسی است [۱۷].

## مشخصات هندسی و مرزهای جانبی

فاصلهٔ مرزهای جانبی، ابعاد هندسی مدل، شرایط مرزی، نوع و تراکم المانها بر اساس نتایج تحلیل حساسیت انتخاب شده است. به عبارت دیگر این مشخصات به نوعی انتخاب شده اند که نتایج حاصل تحت تأثیر تغییر پارامترهای مذکور قرار نگرفته و موقعیت مرزهای جانبی طوری باشد که وجود مرزهای مصنوعی تأثیر چشم گیری در میدان تنش - کرنش - فشار منفذی نداشته باشد. در شکل ۲ نمونه ای از مدل سه بعدی ساخته شده به همراه مش بندی استفاده شده نشان داده شده است. به دلیل تقارن موجود در مسئله، به منظور کاهش زمان تحلیل نصف محیط مدل سازی و تحلیل شده است. ابعاد مدل در راستای قائم، جانبی و طولی به ترتیب ۲، ۵ و ۸ برابر قطر تونل انتخاب شده است که با پیشنهاده ای محققان قبلی نیز دارای تطابق خوبی است [۲۰].

# تخمين فشار اوليه نگهدارى جبهه كار

تعیین میزان فشار مورد نیاز برای تأمین پایداری جبهه کار تونل در زمینهای خاکی که با دستگاه EPB حفاری میشوند یکی از مهمترین پارامترها برای پیشروی دستگاه است. برای تعیین فشار جبههکار بـهطورکلی از دو روش تحلیلی و عددی استفاده میشـود. یکی از



شکل ۲. تصویر شماتیک از ابعاد و هندسه مدل

رایجترین روش ها برای محاسبه فشار جبهه کار استفاده از رابطهٔ تجربی مرکز ساخت و ساز زیرزمینی آلمان (COB) است. رابطهٔ (۲) مقدار فشار جبهه کار بهدست آمده از رابطهٔ COB را نشان میدهد [۵].

 $\sigma_T = k_a \sqrt{\sigma'_v} - 2c\sqrt{k_a} + k_a \cdot q + u + 20kPa \tag{7}$ 

در رابطهٔ (۲)  $\sigma'_{v}$  تنش مؤثر قائم، c چسبندگی، p بار سطحی، u فشار آب حفرهای و  $k_{a}$  فشار در رابطهٔ (۲)  $\sigma'_{v}$  تنش مؤثر قائم، c دقت زیاد، نتایج حاصل از این روش به عنوان فشار مبنا در این پژوهش در نظر گرفته شده است. سپس با افزایش یا کاهش مقدار فشار جبهه کار و اندازه گیری تغییر شکل جبهه کار تونل میزان فشار مناسب تعیین شده است. مقدار حاصل از رابطهٔ مذکور، فشار جبهه کار در تاج تونل است که با یک گرادیان متناسب با مصالح داخل محفظه حفاری دستگاه افزایش داده می شود. در کنار روش تجربی، روابط تحلیلی متعددی نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. فشار جبههکار به مورکلی تابعی از عمق تونل، محفظه حفاری دستگاه افزایش داده می شود. در کنار روش تجربی، روابط تحلیلی متعددی نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. فشار جبههکار به مورکلی تابعی از عمق تونل، نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. فشار جبههکار به مورکلی تابعی از عمق تونل، نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. فشار جبههکار به مورکلی تابعی از عمق تونل، نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. فشار جبههکار به مورکلی تابعی از عمق تونل، نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. فشار جبهه کار به مورکلی تابعی از موش تونل، میزان بار سطحی، سطح آب، مشخصات مهندسی خاک و تنش مؤثر است. برای جانکسز –استاینر، آنگونستا کواری و روش فشار فعال زمین استفاده شده است. در روش جانکسز –استاینر [۳] حداقل فشار جبهه نگه داری از رابطهٔ (۳) به دست میآید:  $\sigma_T = K_{a3}\sigma'_v + p$ 

که $K_{a3}$  ضریب فشار فعال سهبعدی زمین، $\sigma'_v$  تنش مؤثر قائم و p فشار آب حفرهای است. میزان فشار پیشنهادی آنگونستا-کواری [٤] از رابطهٔ (٤) محاسبه می شود:  $\Delta h$ 

 $s' = F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D}$ (£)

که 'S فشار نگهدارنده مؤثر،  $F_0$  تا  $F_3$  ضرایب بدون بعد هستند که وابسته به زاویهٔ اصطکاک داخلی، پارامترهای هندسی تونل و نسبت وزن مخصوص خشک به وزن مخصوص مستغرق خاک است. C چسبندگی خاک، D قطر تونل، ' $\gamma$  وزن مخصوص مستغرق و  $\Delta h$  اختلاف بین هد فشار در جبهه کار و سطح ایستایی آب است.

## المانهای مختلف مدل و نحوهٔ مدلسازی حفاری تونل

پوشش بتنی تونل با استفاده از المانهای سازهای با رفتار الاستیک خطی مدل شده که با توجه به مشخصات پروژه قطر خارجی پوشش بتنی ۹/۱۸ متر و ضخامت آنها ۳۵ سانتی متر منظور شده است. برای مدلسازی سپر ماشین حفار نیز از المانهای پوسته ای با رفتار الاستیک خطی استفاده شده است. به منظور ساده سازی مدل، سپر ماشین حفار به صورت یک استوانه با قطر ثابت که مقدار آن برابر با متوسط قطر سپر جلویی و انتهایی دستگاه است، مدل سازی شده است. اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر و سرمته حفاری مدل سازی شده است. اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر و سرمته حفاری ماشین MTB پروژه، ضخامت این لایه برابر ۲ سانتی متر است. مشخصات لایه معادل اضافه حفاری با استفاده از یک سری تحلیل حساسیت به دست می آید [۱۷]. میزان گام پیش روی در ماشین MBT پروژه، ضخامت این لایه برابر ۲ سانتی متر است. مشخصات لایه معادل اضافه مو مرحله حفاری تونل نیز به میزان ۱۵/۱ متر برابر با عرض سگمنت انتخاب شده است. به منظور اعمال کاهش سختی در مفصلها، یک ضریب اصلاحی برای انتقال ممان خمشی تعریف شده است [۱۷]. رفتار گروت پشت سگمنت الاستیک خطی در نظر گرفته شده و بر اساس نتایج طرح اختلاط ارائه شده برای پروژه، مشخصات وابسته به زمان مصالح گروت در نتیجه هیدراسیون با در نظر گرفتن مدول الاستیسته و ضریب پواسون وابسته به زمان مدل شده است.

			-		
ضخامت (متر)	ضريب پواسون	مدول الاستيسيته (مگا پاسكال)	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	وزن واحد (کیلونیوتن بر متر مکعب)	مصالح
-	۰/۲	707	٤٠	٢٥	پوشش تونل
-	•/£V	٥	•	١٨	گروت (سیال)
-	٠/٣	۲.	٣	١٨	گروت (سخت شده)
•/•٢	٠/٢	•/17	-	-	لايه اضافه
٠/٣٥	٠/٢٥	71	-	-	حفاری سپر ماشین

این لایه نیز به مشخصات گروت (سخت شده) تغییر داده می شود. جمعبندی مشخصات انتخاب شده برای بخش های مختلف مدل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح در مدلسازی عددی [۱۷]

برای مدلسازی حفاری تونل از یک روش گام به گام استفاده شده است. در اولین گام تعادل ژئواستاتیکی مدل با در نظر گرفتن میدان تنشهای اولیه بر اساس لایهبندی و تراز آب زیرزمینی متناظر هر مدل برقرار شده و گام دوم بار ترافیک ۲۰ کیلوپاسکال به عرض ۱۲ متر به سطح زمین اعمال می شود. پس از تعادل تنشهای اولیه، در هر مرحلهٔ حفاری تمام سطح مقطع تونل با گام ۱/۵ متری حفاری شده، سپر دستگاه همزمان با اعمال فشار به سطح جبهه کار فعال می شود. پس از مدل مدای تونل به طول ۹ متر که برابر با طول سپر ماشین است، المانهای معادل سپر در ابتدای مدل حذف شده و همزمان با نصب پوشش بتنی و فعال کردن المانهای گروت، فشار تزریق گروت بر محیط تونل و سطح خارجی پوشش تونل اعمال می شود. در ادامه بهازای هر مرحله حفاری در سینه تونل، یک مرحله نصب پوشش در انتهای سپری انجام شده و این عملیات به طور متوالی تکرار می شود. میزان فشار تزریق گروت پشت سگمنت ۰/۵ بار بیش تر از فشار جبهه کار انتخاب شده است [۲۲]. حفاری تونل تحت شرایط ایده آل با پیشروی حفاری تحت هدایت صحیح دستگاه مدل شده و از نشستهای ایجاد شده در نتیجه انحراف دستگاه صرف نظر می شود. بر اساس ۱/۵ انتخاب شده و مشخصات هندسی تونل نیز برابر مشخصات پروژه خط ۲ مترو تبریز انتخاب شده است.

اعتبارسنجي نتايج

برای صحتسنجی مدلسازی انجام گرفته در تحقیق حاضر از نتایج اندازه گیریهای میدانی پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز استفاده شده است. با توجه به نتایج موجود ابزاربندی، جنس مصالح و حفاری تونل در خاک دانهای مقطع مربوط به متراژ ۷۵۳ برای صحتسنجی انتخاب شده است. پروفیل ژئوتکنیکی مقطع مورد نظر در شکل ۳ ارائه شده است. این مقطع عمدتاً شامل مصالح سطحی ریزدانه رسی است که یک لایه ماسهای در زیر آن قرار گرفته است که در جدول ۳ مشخصات ژئوتکنیکی این لایه به عنوان محیط اطراف تونل ارائه شده است.



## شکل ۳. پروفیل ژئوتکنیکی متراژ ۷۵۰ [۱٦]

مدل مقطع مورد نظر با شرایط ژئوتکنیکی واقعی ساخته شده، فرآیند حفاری تونل مدلسازی شده و فشار جبهه کار اعمالی برابر با مقدار اعمال شده در حین اجرا ۹۱ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. در جدول ٤ مقادیر نشست سطحی بهدست آمده از مدلسازی در بالای محور تونل به همراه نتایج حاصل از قرائتهای ابزار دقیق مقطع مورد نظر ارائه شده است. با توجه به انطباق بالای نتایج می توان با دقت مناسب از مدل رفتاری و الگوی مدلسازی انجام گرفته استفاده کرد.

SP-SM	طبقه بندي خاک
١٨	عمق مرکز تونل (متر)
١٢/٤	عمق تراز آب (متر)
19/70	وزن مخصوص اشباع (كيلونيوتن برمترمكعب)
11/10	وزن مخصوص خشک (کیلونیوتن بر مترمکعب)
٥	چسبندگی (کیلوپاسکال)
٣٨	مدول يانگ (مگاپاسكال)
٣٤	زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)

جدول ۳. خصوصیات ژئومکانیکی خاک اطراف تونل در متراژ ۷۵۳ خط ۲ قطار شهری تبریز [۱٦]

#### جدول ٤. مقایسهٔ نتایج ابزاربندی و مدلسازی عددی

نشست حاصل از مدلسازی عددی (متر)	نشست قرائت شده از ابزاربندی (متر)	كىلومتراژ نصب پين نشستسنجى	كيلومتراژ حفاري
•/• \ 0	•/• \V	۰+V٣٢/٦٦	
•/••A	•/••A	۰+٧٤٧	V0W/17
•/••۲	•	۰+۷٥٣	

#### مشخصات انتخاب شده

در پژوهش حاضر بهدلیل محدودیتهای انجام تحلیل سهبعدی، از بین مهمترین عاملهای اثرگذار بر مقادیر فشار جبهه کار به بررسی تأثیر مدول الاستیسیته، سطح تراز آب زیرزمینی و زاویهٔ اصطکاک خاکهای دانهای پرداخته شده است. بر اساس مقادیر انتخاب شده در جدول ٥ و ترکیبات این مقادیر تعداد ٣٦ مدل سهبعدی برای بررسی اثر تغییرات آنها تحلیل شده است که مشخصات این مدلها در جدول ٦ ارائه شده است.

با توجه به شکل نامنظم پروفیل جابهجایی جبهه کار، هیچ کدام از مقادیر جابهجایی جبهه کار در مرکز تونل و حداکثر جابهجایی جبهه کار نمیتواند مبنای مناسبی برای برآورد فشار مناسب باشد. در این پژوهش برای تعیین جابهجایی جبهه کار تونل و در نتیجه تعیین میزان فشار مناسب جبهه کار، از جابهجایی میانگین پیشنهاد شده بهوسیلهٔ کیم و تونان [۲۲] در تحليل ها استفاده شده است.  $U_{Xavg}$  مطابق رابطهٔ (۵) به صورت ناحيهٔ احاطه شده به وسيلهٔ پروفيل تغيير شكل يافته جبهه كار تونل و پروفيل اوليه آن تقسيم بر قطر تونل تعريف می شود:  $U_{Xavg} = \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^{n} ((u_X)_{(i+1)} + (u_X)_i)((z)_{(i+1)} - (z)_i)$  (٥)

مقادیر مثبت و منفی U<sub>Xavg</sub> بهترتیب بیانگر جابهجایی جبهه کار در جهت پیشروی و سمت داخل تونل است.

مقادير انتخاب شده	شرح	پارامتر
۰، ۹ و۲۷	تراز سطح آب زیرزمینی (متر)	$h_{\rm w}$
۲۵، ۳۰ و ۳۵	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	fi
٤٠ ، ٣٠ ، ٢٠ ، ١٠	مدول الاستيسيته (مگاپاسكال)	Е

جدول ٥. معرفي يارامترها و مقادير به کار رفته در يژوهش

جدول ٦. مشخصات و شمارهٔ مدل ها

تراز سطح آب (متر)	زاویه اصطکاک داخلی(درجه)	مدول الاستيسيته (مگا پاسكال)	شماره مدل	تراز سطح آب (متر)	زاویه اصطکاک داخلی(درجه)	مدول الاستيسيته (مگا پاسكال)	شماره مدل	تراز سطح آب (متر)	زاویه اصطکاک داخلی(درجه)	مدول الاستيسيته (مگا پاسكال)	شماره مدل	تراز سطح آب (متر)	زاویه اصطکاک داخلم (درجه)	مدول الاستيسيته (مگا پاسكال)	شمارة مل
77	۲٥	٤٠	۲۸	٩	۳۰	٣.	۱۹	•	۳٥	۲.	۱۰	•	۲٥	١.	١
۲۷	٣٠	۱.	۲٩	٩	٣٠	٤٠	۲۰	•	٣٥	۳۰	۱۱	•	۲٥	۲۰	۲
۲۷	۳.	۲.	۳۰	٩	٣٥	۱.	۲۱	•	٣٥	٤٠	١٢		۲٥	۳.	٣
۲۷	۳.	٣٠	۳١	٩	٣٥	۲.	77	٩	۲٥	۱.	۱۳		۲٥	٤٠	٤
۲۷	۳۰	٤٠	٣٢	٩	٣٥	٣٠	۲۳	٩	۲٥	۲.	١٤		۳۰	۱.	٥
۲۷	٣٥	۱.	٣٣	٩	٣٥	٤٠	٢٤	٩	۲٥	٣٠	۱٥		۳۰	۲۰	٦
۲۷	٣٥	۲.	٣٤	۲۷	٢٥	۱.	٢٥	٩	٢٥	٤٠	١٦		۳۰	٣٠	v
۲۷	٣٥	٣٠	٣٥	۲۷	٢٥	۲.	۲٦	٩	۳.	۱.	۱۷		۳۰	٤٠	٨
۲۷	٣٥	٤٠	٣٦	۲۷	۲٥	٣.	۲۷	٩	٣٠	۲.	۱۸		٣٥	۱.	٩

### نتايج

مطابق جدول ٦ تأثیر مدول الاستیسیته، زاویهٔ اصطکاک داخلی و سطح آب زیرزمینی بر میزان فشار مناسب جبهه کار بهصورت سه بعدی بررسی شده است. در ادامه مهمترین نتایج بهدست آمده برای تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی ارائه شده است:

#### فشار مناسب جبهه کار

در پژوهش حاضر مقدار فشار جبهه کار مورد نیاز حاصل از رابطهٔ تجربی COB بهعنوان فشار مبنا، بر اساس شرایط و مشخصات ژئوتکنیکی هر مدل محاسبه، به جبهه کار اعمال و مقدار جابهجایی میانگین جبهه کار تونل اندازه گیری شده است. سپس با اعمال مقادیر کم تر و بیش تر فشار نسبت به مقادیر مبنا و اندازه گیری جابهجایی میانگین فشار مناسب جبهه کار تعیین شده است. فشار مناسب، فشاری است که جابهجایی میانگین جبهه کار کم ترین مقدار را داشته باشد و به طبع آن کم ترین نشست یا بالازدگی در سطح زمین مشاهده گردد. در شکل ٤ فشار جبهه کار اعمالی به جبهه کار تونل در مقابل جابهجایی میانگین برای مدل ها با

در شکل ۵ و بهعنوان نمونه جابهجایی جبهه کار مربوط به فشار حاصل از رابطهٔ COB بههمراه جابهجایی حاصل از فشار مناسب جبهه کار بهدست آمده برای تراز آب زیرزمینی ۲۷ متری از سطح زمین در دو حالت مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال، زاویهٔ اصطکاک ۲۵ درجه و مدول الاستیسیته ٤٠ مگاپاسکال، زاویهٔ اصطکاک درجه ۳۵ ترسیم شده است. در شکل ٦ نیز یک نمونه از کانتورهای جابهجایی افقی ایجاد شده در جبهه کار حفاری و خاک اطراف تونل ارائه شده است.

### تأثير مدول الاستيسيته

در شکل ۷ نمودار فشار جبهه کار در مقابل مدول الاستیسیته نشان داده شده است. ملاحظه می شود که رابطهٔ COB برای مدول الاستیسیته های متفاوت، فشار جبهه کار یکسانی را در نظر می گیرد. در حالی که، فشارهای جبهه کار مناسب نشان می دهند که با افزایش مدول الاستیسیته به مقدار فشار جبهه کار کم تری نیاز است.









شکل ۷. مدول الاستیسیته– فشار جبهه کار برای تراز آب الف) ۰، ب) ۹، ج) ۲۷ متری از سطح زمین

مطابق شکل ۷ در خاکهای با مدول الاستیسیته کم، رابطهٔ COB مقدار فشار جبهه کار کمتری نسبت به حالت مناسب ارائه می دهد. هم چنین، با افزایش مدول الاستیسیته فشار جبهه کار به دست آمده از این رابطه نسبت به حالت مناسب افزایش می یابد که به دلیل در نظر نگرفتن تأثیر مدول الاستیسیته خاک در رابطهٔ تجربی COB است. به عبارت دیگر، با افزایش مدول الاستیسیته به مقدار فشار مناسب جبهه کار کمتری مورد نیاز است که اهمیت پارامتر مدول الاستیسیته را نشان می دهد. لازم به ذکر است، با پایین رفتن تراز سطح آب زیرزمینی مدول الاستیسیته تأثیر خود را بیش تر نشان میدهد و در مدول الاستیسیته کم فشار جبهه کار بیش تری نسبت به حالت COB نیاز است.

# تأثير زاوية اصطكاك داخلى

در شکل ۸ نمودار مدول الاستیسیته – جابه جایی میانگین با زاویهٔ اصطکاک داخلی های مختلف برای فشارهای جبهه کار حاصل از رابطهٔ COB نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می شود در تمامی حالات تراز آب و با ثابت در نظر گرفتن مدول الاستیسیته، با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک مقدار جابه جایی میانگین روند صعودی دارد. هم چنین تفاوت قابل توجه در مقادیر جابه جایی جبهه کار در یک زاویهٔ اصطکاک داخلی ثابت و مدول های مختلف قابل مشاهده است. مطابق شکل ۸ در مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال مقدار جابه جایی میانگین تقریباً در اکثر حالات منفی است که نشان دهندهٔ مقدار فشار جبهه کار کم و در نتیجه جابه جایی جبهه کار به سمت داخل تونل است. این روند با کاهش سطح



در شکل ۹ نمودار فشار جبهه کار نرمالیز شده نسبت به COB در برابر زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک برای مدولهای الاستیسیته و ترازهای آب مختلف رسم شده است. مطابق شکل در زاویهٔ اصطکاک داخلی کم (۲۵ درجه) با کاهش تراز آب زیرزمینی اختلاف فشار مناسب جبهه کار نسبت بهروش تجربی افزایش یافته و به فشار بیشتری نیاز است. همچنین با

1.1 1.025 1.05 1 Face pressure / COB Face pressure / COB 1 0.975 0.95 0.95 0.9 0.925 0.85 الف ب 0.9 0.8 20 25 35 40 20 25 30 35 40 30 Friction angle (deg) Friction angle (deg) ----COB ----------------------E=10-Numerical --- COB ----------------------E=10-Numerical -----------------------E=30-Numerical 1.2 1.1 Face Pressure / COB 09 0.8 ε 0.7 25 35 20 30 40 Friction angle (deg) ---COB ----E=10-Numerical -E=30-Numerical 

افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک این روند برعکس شده و با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی، مقدار فشار جبهه کار مورد نیاز کاهش پیدا میکند.

شکل ۹. زاویهٔ اصطکاک داخلی– فشارجبهه کار نرمالیز شده برای تراز آب الف) ۰، ب) ۹، ج) ۲۷ متری از سطح زمین

تأثير تراز آب زيرزمينى

در شکل ۱۰ فشار جبهه کار نرمالیز شده نسبت به فشار COB در مقابل فشار آب حفرهای برای مدولهای الاستیسیته و زاویههای اصطکاک داخلی متفاوت رسم شده است. مطابق شکل در مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال در تمامی حالات زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و تراز آب زیرزمینی، فشار مناسب جبهه کار مقدار بیشتری نسبت به فشار تجربی ارائه می دهد که با افزایش تراز آب زیرزمینی این اختلاف کم تر می شود. هم چنین، در تمامی حالت با افزایش تراز سطح آب زیرزمینی اختلاف مقادیر فشار جبهه کار به دست آمده از رابطهٔ COB و فشار مناسب جبهه کار کم تر می شود. هم چنین مشاهده می شود در تمامی زاویه های اصطکاک داخلی، در مقادیر مدول الاستیسیته کم (برای تحقیق حاضر ۲۰ مگاپاسکال و کم تر) به مقدار فشار جبهه کار بیش تری نسبت به مقدار محاسبه شده به وسیلهٔ رابطهٔ COB نیاز است که نشان دهندهٔ ضرورت اعمال پارامتر مدول الاستیسیته در تعیین فشار مناسب جبهه کار است.



ب) ۳۰ ، ج) ۳۵ درجه

مقایسهٔ نتایج مقادیر فشار مناسب با فشارهای جبهه کار تجربی و تحلیلی مقادیر فشار مناسب جبهه کار بهدست آمده از تحقیق حاضر با مقادیر حاصل از رابطهٔ تجربی COB که حالت مبنا قرار گرفته بود و روابط تحلیلی جانکسز- استاینر، آنگونستا-کواری و حالت فشار فعال مقایسه شده است.

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۷، روابط تحلیلی جانکسز – استاینر، آنگونستا – کواری و فشار فعال همواره مقدار کمتری نسبت به فشار مناسب جبهه کار ارائه میدهند. همچنین، رابطهٔ تجربی COB در اکثر موارد فشار جبهه کار بیشتری نسبت به حالت مناسب بهدست آمده در تحقیق حاضر نشان میدهد. در هیچ یک از روابط تجربی و تحلیلی ارائه شده تأثیر مدول الاستیسیته خاک در میزان فشار مورد نیاز جبهه کار در نظر گرفته نشده است. در حالیکه، مدلسازی عددی بهدلیل در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر نظیر مدول الاستیسیته نتایج دقیقتری نسبت به روابط تجربی و تحلیلی ارائه میدهد که لزوم استفاده از مدل-

مقادیر فشار کمتر حاصل از روابط تحلیلی نسبت به فشار مناسب بهدست آمده در تحقیق حاضر، به این دلیل است که این روابط فشار حداقل مورد نیاز برای جلوگیری از ریزش جبهه کار را ارائه میدهند. با توجه به اینکه رابطهٔ COB مقدار فشار جبهه کار برای کمترین میزان نشست یا بالازدگی را ارائه میدهد، نتایج بهدست آمده در پژوهش حاضر که با تمرکز بر حداقل جابهجایی میانگین تعیین شده است دارای انطباق بیش تر با نتایج رابطهٔ COB است. با این حال با تغییر مدول الاستیسیته خاک مقادیر فشار مناسب جبهه کار متفاوت خواهد بود که در رابطهٔ تجربی COB این پارامتر در نظر گرفته نشده است.

نتایج عددی	Anagnosto Kovari	vu &	Jancseo Kovari	cz &	Kactive		COB		شمارہ مدل
217	L	179	L	171	L	197	L	717	١
۲۰٥	L	١٦٩	L	171	L	197	Н	717	۲
۲•٤	L	١٦٩	L	171	L	197	Н	717	٣
٢٠٤	L	179	L	171	L	197	Н	717	٤
۲۰۳	L	١٥٨	L	١٦٥	L	141	L	۲۰۲	٥

جدول ۷. مقایسهٔ مقادیر فشار جبهه کار (کیلوپاسکال)

٩٨

رفتهای دانهای مترو تبریز	حفاری شده در آب	ر تونلهای مکانیزه	فشار جبهه کار	ارزيابي ميزان مناسب
--------------------------	-----------------	-------------------	---------------	---------------------

نتایج عددی	Anagnostou & Kovari		Jancsec Kovari	Jancsecz & Kactive COB					شمارہ مدل
۱۹۳	L	10/	L	١٦٥	L	١٨٢	Н	۲۰۲	٦
۱٩٠	L	104	L	١٦٥	L	171	Н	۲۰۲	v
١٨٩	L	١٥٨	L	١٦٥	L	171	Н	۲۰۲	٨
۱۹۳	L	101	L	١٦٠	L	١٧٤	Н	198	٩
١٨٤	L	101	L	١٦٠	L	١٧٤	Н	198	۱.
174	L	101	L	١٦٠	L	١٧٤	Н	198	11
110	L	101	L	١٦٠	L	١٧٤	Н	198	١٢
١٥٦	L	٧٥	L	٩٧	L	170	L	120	۱۳
120	L	٧٥	L	٩٧	L	170	-	120	١٤
١٤٠	L	٧٥	L	٩٧	L	170	Н	120	١٥
١٣٩	L	٧٥	L	٩٧	L	170	Н	120	١٦
151	L	٦٧	L	AV	L	11.	L	15.	١٧
179	L	٦٧	L	AV	L	11.	Н	13.	١٨
نتايج	Anagno	stou &	Jancsecz & Kovari		K <sub>active</sub>		СОВ		شماره
عددی	KOV	an							مدل
۱۲۳	L	٦٧	L	AV	L	11.	Н	۱۳۰	١٩
171	L	٦٧	L	AV	L	11.	Н	۱۳۰	۲.
177	L	٦١	L	٨.	L	٩٨	L	11A	۲۱
110	L	٦١	L	٨.	L	٩٨	Н	11A	77
١٠٧	L	٦١	L	٨.	L	٩٨	Н	11A	۲۳
1.5	L	٦١	L	۸.	L	٩٨	Н	11A	٢٤
172	L	٤٧	L	٥٨	L	٩٠	L	11.	۲٥
۱۱۳	L	٤٧	L	٥٨	L	٩٠	L	11.	77
1.0	L	٤٧	L	٥٨	L	٩٠	Н	11.	۲۷
1.7	L	٤٧	L	٥٨	L	٩٠	Н	11.	۲۸
1.1	L	٣٤	L	٤٧	L	٧٤	L	٩٤	۲۹
٩٦	L	٣٤	L	٤٧	L	٧٤	L	٩٤	۳.
Λ٦.	L	٣٤	L	٤٧	L	٧٤	Н	٩٤	۳۱
71	L	٣٤	L	٤٧	L	٧٤	Н	٩٤	۲۳
٩٠	L	٢٤	L	۳٩	L	٦٠	L	٨.	٣٣
٧٩	L	٢٤	L	٣٩	L	٦٠	Н	٨.	٣٤
٦٨	L	٢٤	L	٣٩	L	٦٠	Н	٨.	۳٥
٦٣	L	٢٤	L	٣٩	L	٦٠	Н	٨.	٣٦

نتيجه گيرى

به منظور تخمین فشار مناسب جبهه کار حفاری تونل های مکانیزه که در خاکهای دانه ای حفاری می شوند، در این پژوهش مقادیر فشار مورد نیاز جبهه کار حفاری تونل از سه روش تحلیلی Kactive، جانکسز – استاینر، آنگونستا – کواری و هم چنین روش تجربی COB محاسبه شده و مقادیر حاصل با نتایج مدل سازی عددی سه بعدی انجام یافته با نرم افزار ABAQUS مقایسه شده است. با انتخاب مقادیر مختلف برای زاویهٔ اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته خاک پیرامون تونل و هم چنین تراز ایستابی، تأثیر این پارامترها بر میزان فشار مورد نیاز جبهه کار تونل بررسی شده است. از مهم ترین نتایج حاصل می توان به این موارد اشاره کرد:

- بر اساس نتایج حاصل برای مشخصات خاک بررسی شده روش تحلیلی آنگونستا کواری کمترین مقدار و روش Kactive بیشترین مقدار را برای فشار مورد نیاز جبهه کار حفاری تونل ارائه میدهد. به طورکلی مقادیر حاصل از روش های تحلیلی کمتر از مقادیر حاصل از روش تجربی و همچنین نتایج مدلسازی عددی است. با توجه به این که مقادیر پیشنهادی روش های تحلیلی بر مبنای روش های حدی بوده و حداقل های لازم برای جلوگیری از ریزش جبهه کار تونل را ارائه میدهد این امر منطقی است.
- در مقایسه با روش های تحلیلی، نتایج حاصل از روش تجربی تخمین مناسب تری را از مقادیر فشار مناسب جبهه کار که بر اساس نتایج مدلسازی عددی تعیین شده است، ارائه میدهد. چنانچه در جدول ۷ به طورکلی در مقادیر مدول الاستیسیته بالا (۳۰ و ۰ عگاپاسکال در پژوهش حاضر) روش تجربی مقادیر فشار جبهه کار بیش تری را نسبت به نتایج مدلسازی عددی ارائه میدهد، به طوریکه میزان این تفاوت از حدود ٤ نسبت به نتایج مدلسازی داخلی ۲۰ و خاک اشباع) تا حدود ۲۵ درصد (زاویهٔ اصطکاک داخلی ۲۰ و مقادیر پایین مدول الاستیسیته، روش تجربی مقادیر فشار جبهه کار بیش تری را نسبت به نتایج مدلسازی عددی ارائه میدهد، به طوریکه میزان این تفاوت از حدود ٤ درصد (زاویهٔ اصطکاک داخلی ۲۰ و خاک اشباع) تا حدود ۲۵ درصد (زاویهٔ اصطکاک داخلی ۳۰ و خاک اشباع) تا حدود ۲۵ درصد (زاویهٔ اصطکاک داخلی ۳۰ و خاک اشباع) تا حدود ۲۱ درصد (زاویهٔ اصطکاک داخلی ۳۰ و خاک اشباع) تا حدود ۱۵ می دول الاستیسیته، روش تجربی مقادیر کم تری ارائه میدهد که نیازمند توجه ویژه به این امر در پروژههای حفاری تونل است. این اختلاف با کاهش تراز آب زیرزمینی افزایش می باید، به طوریکه از حدود ۱۵ درصد در خاک خشک می در در خاک اشباع به حدود در خاک می دول.

- بر اساس نتایج جدول ۷، نتایج حاصل از روش تحلیلی Kactive همخوانی بیشتری نسبت به سایر روشهای تحلیلی دیگر به مقادیر حاصل از روش تجربی و مدلسازی عددی دارد. نتایج حاصل در مقایسه با روش تجربی و نتایج مدلسازی عددی، بهترتیب در بازه ۱۹-٤ درصد و ۲۵-۹ درصد کمتر است. بیشترین درصد اختلاف در شرایط خاک خشک (عمق ایستابی ۲۷ متری) و کمترین درصد اختلاف در شرایط خاک اشباع (تراز ایستابی منطبق بر سطح زمین) مشاهده میشود.
- مطابق جدول ۷، تأثیر مدول الاستیسیته در روابط روش های تحلیلی ارائه شده و همچنین روش تجربی COB در نظر گرفته نشده است، در حالی که نمودارهای جابه-جایی جبهه کار تونل حاصل از مدلسازی عددی در مقادیر متفاوت مدول الاستیسیته کاملاً متفاوت است. به منظور انجام حفاری بهینه و کنترل تغییر شکلهای ناشی از حفاری در جبهه کار تونل، منظور کردن تأثیر این پارامتر در تعیین مقادیر مناسب فشار جبهه کار حفاری تونل که با مدلسازی سه بعدی فرآیند حفاری تونل امکان پذیر است، ضروری به نظر می رسد.

### منابع

- 1. Leca E., "Settlements induced by tunneling in Soft Ground", Tunnelling and Underground Space Technology; (2007) 119-149.
- Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S., "Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control", CRC Press (2008).
- Jancsecz S., Steiner W., "Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions", Tunnelling'94: Springer (1994) 531-550.
- Anagnostou G., Kovari K., "Face stability conditions with earthpressure-balanced shields", Tunnelling and Underground Space Technology,11(2) (1996) 165-73.

- Broere W., "Tunnel Face Stability & New CPT Applications", PhD Thesis, Delft University of Technology (2001).
- Pan Q., Dias D., "Upper-bound analysis on the face stability of a noncircular tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, 62 (2017) 96-102.
- Kasper T., Meschke G., "On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, 21 (2006) 160-171.
- Li Y., Emeriault F., Kastner R., Zhang Z. X., "Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay", Tunnelling and Underground Space Technology, 24 (4) (2009) 472-481.
- 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, 38 (2) (2011) 187-95.
- Lambrughi A., Rodríguez L. M., Castellanza R., "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations", Computers and Geotechnics, 40 (2012) 97-113.
- 11. Berthoz N., Branque D., Subrin D., Wong H., Humbert E., "Face failure in homogeneous and stratified soft ground: Theoretical and experimental approaches on 1g EPBS reduced scale model", Tunnelling and Underground Space Technology, 30 (2012) 25-37.
- Zhang C., Han K., Zhang D., "Face stability analysis of shallow circular tunnels in cohesive–frictional soils", Tunnelling and Underground Space Technology, 50 (2015) 345-357.

- ۱۳. خیراندیش ۱.، فاروق حسینی م.، طالبینژادع.، "تأثیر فشار نگهداری جبهه کار در حفر تونل به روش EPB بر تغییر شکلهای سطحی و جبهه کار"، مجلهٔ علمی پژوهشی مهندسی معدن، ۸
   ۲۰) (۱۳۹۲) (۲۰)
- ۲. حیدریان پ.، فاطمی عقدا س م.، نورزاد ع.، "تحلیل پایداری جبهه تونل (مطالعهٔ موردی: خط ۲ متروی کرج"، نشریه زمین شناسی مهندسی، ۷، (۲) (۱۳۹۲).
- Ahmed M., Iskander M., "Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models", Tunnelling and Underground Space Technology, 27 (1) (2012) 101-10.

```
۱۲. مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار، "مطالعات ژئوتکنیک فاز ۱ پروژه خط ۲ قطار شهری
تبریز" (۱۳۸۷).
```

- Katebi H., Rezaei A., Hajialilue-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, 49 (2015) 67-78.
- Kasper T., Meschke G., "A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling", Computers and Geotechnics, 33 (2006) 234-247.
- ۱۹. منافی ا.، علیائی م.، یثربی ش.، "تحلیل استاتیکی تونل های منفرد شهری در آبرفت درشتدانه با استفاده از روش اجزا مجزا"، مجلهٔ علمی پژوهشی عمران مدرس، ٤ (۱۲) (۱۳۹۳) ۱۸۹–۱۸۸.
- Möller S. C., "Tunnel induced settlements and structural forces in linings: Univ", Stuttgart, Inst. f. Geotechnik, (2006).
- Kavvadas M., Litsas D., Vazaios I., "Development of a 3D finite element model for shield EPB tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, 65 (2017) 22-34.

22. Kim S. H., Tonon F., "Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane-Drained case", Tunnelling and Underground Space Technology, 25 (5) (2010) 526-42.