

مدلسازی عددی فشار مناسب جبهه کار تونل در خاک های دانه‌ای

امیر حسن رضایی^{۱*}، سعید بابائی^۲، هوشنگ کاتبی^۳

۱- *استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

Rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۹/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۲/۰۸]

چکیده

برآورد فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل، یکی از مهمترین عوامل حفاری ایمن و مناسب با استفاده از ماشین‌های حفار مکانیزه در نواحی شهری است. در مقاله حاضر، با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS به بررسی تأثیر پارامترهای مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و شرایط آب زیرزمینی روی میزان مناسب فشار جبهه کار در خاک‌های دانه‌ای پرداخته شده است. پس از درستی آزمایشی با نتایج ابزار بندی پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز، بیش از ۷۰ مدل سه بعدی تحلیل و با اندازه‌گیری مقادیر جابجایی‌های جبهه کار تونل به ازای مقادیر متفاوت فشار جبهه کار و پارامترهای مختلف مورد بررسی، مقدار مناسب فشار جبهه کار تعیین شده است. بر اساس نتایج حاصل مدول الاستیسیته خاک تأثیر قابل توجهی در مقدار فشار مناسب جبهه کار دارد. همچنین، مقدار فشار جبهه کار حاصل از روش‌های تحلیلی و تجربی با مقدار مناسب بدست آمده مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج حاصل دارای بیشترین هماهنگی با روش COB است.

واژگان کلیدی: فشار جبهه کار، تونلسازی مکانیزه، مدول الاستیسیته، خاک‌های دانه‌ای، مدلسازی عددی.

۱- مقدمه

تغییر شکل‌های ناشی از حفره انتهای سپر (۴) تغییر شکل‌های ناشی از تغییر شکل پوشش تونل و (۵) تغییر شکل‌های ناشی از تحکیم. در صورت کنترل مناسب فشار وارد بر جبهه کار میزان نشست حاصل از مؤلفه ۱ قابل توجه نخواهد بود [2]. در نتیجه در حفاری مکانیزه برای انجام حفاری مناسب و همراه با کنترل جابجایی‌ها در جبهه کار و اطراف تونل تعیین میزان مناسب فشار نگهداری در جبهه کار تونل از اهمیت بالایی برخوردار است.

روابط زیادی برای محاسبه فشار جبهه کار به صورت روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی ارائه شده است. روش‌های

استفاده از فضای زیرزمینی و پروژه‌های تونل‌سازی در سال‌های اخیر در سرتاسر دنیا بطور چشمگیری افزایش یافته است. تونلسازی مکانیزه به دلیل مزایای فراوان نسبت به روش‌های حفاری و نگهداری سنتی بعنوان مهمترین روش تونلسازی دهه‌های اخیر در مناطق شهری مطرح شده است [1]. بطور کلی حرکات ایجاد شده ناشی از تونلسازی مکانیزه در زمین اطراف را می‌توان به پنج مؤلفه کلی بصورت زیر تقسیم بندی کرد: (۱) تغییر شکل ایجاد شده در جبهه کار در نتیجه رهاسازی تنش در جبهه کار (۲) تغییر شکل‌های ناشی از اضافه حفاری تونل (۳)

جبهه کار تونل‌های با نسبت سربار به قطر مختلف در خاک ماسه‌ای را مطالعه نمودند [9]. 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 [10]. در سال ۲۰۱۵ بررسی سازوکار گسیختگی و پایداری جبهه کار تونل‌های دایره‌ای کم عمق توسط زانگ و همکاران انجام شده است [11]. توسط خیراندیش و همکاران در سال ۱۳۹۲ تأثیر فشار جبهه کار بر میزان نشست سطحی و جابه‌جایی‌های جبهه کار با استفاده از روش عددی تفاضل محدود مطالعه شده و نتایج حاصل نشان دهنده تأثیر زیاد مدول الاستیسیته خاک در مقدار فشار مورد نیاز و پایداری جبهه کار بوده است [12].

در مجموع تمرکز بیشتر مطالعات پیشین روی دو موضوع سازوکار گسیختگی و تعیین میزان فشار حدی جبهه کار است [13]. در خصوص پارامترهای مهندسی خاک نیز، بیشتر تمرکز مطالعات بر تأثیر پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بوده و الاستیسیته خاک به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. در حالیکه، مقادیر تغییر شکل و جابه‌جایی ایجاد شده در جبهه کار به میزان زیادی به این پارامتر وابسته می‌باشد [12].

در پژوهش حاضر با مدلسازی عددی با نرم افزار المان محدود ABAQUS سعی شده است به مطالعه بیشتر موضوع پرداخته و با انجام مطالعه پارامتریک به بررسی تأثیر مدول الاستیسیته خاک و شرایط آب زیرزمینی به همراه زاویه اصطکاک داخلی بر میزان فشار مناسب جبهه کار در خاکهای دانه‌ای پرداخته شود.

۲- مطالعه موردی

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 می‌یابد. طول مسیر پروژه بصورت مکانیزه توسط دو دستگاه سپر تعادلی زمین حفاری می‌گردد. با توجه به خطی بودن پروژه

تحلیلی به دو روش تعادل حدی و آنالیز حدی تقسیم می‌شوند. از معتبرترین روش‌های تعادل حدی روش جانکسز و استاینر [3] در سال ۱۹۹۴ برای خاک‌های غیرچسبنده و کمی چسبنده و رابطه آنگونستا و کواری [4] در سال ۱۹۹۶ برای خاک‌های غیر چسبنده است؛ که با استفاده از مکانیزم شکست پیشنهادی هورن (۱۹۶۱) روابطی را برای محاسبه فشار پایداری جبهه کار بر اساس گسیختگی گوه و سیلوی خاک تعادل حدی پیشنهاد کرده‌اند. در ادامه برویر در سال ۲۰۰۱ این روش را برای خاک لایه‌ای و وجود فشار آب گسترش داد [5]. در روش‌های آنالیز حدی تنش، آنالیز تنش بیشتر با ارائه کران بالا و پایین که به ترتیب از نقطه نظر استاتیکی و دینامیکی مطرح می‌شوند، صورت می‌گیرد. از روش‌های آنالیز حدی می‌توان روش‌های برومز و بنرمارک، اتکینسون و پاتز، دیویس و روش لکا و دومیر را نام برد [2]. در یکی از مطالعات اخیر در سال ۲۰۱۷ پن و دیاس [6] با تحلیل حد بالا و مدلسازی عددی به بررسی پایداری جبهه کار تونل پرداختند.

در روش‌های تجربی فشار نگهدارنده حدی کمینه و بیشینه ارائه نشده و فقط فشار مورد نیاز برای انجام حفاری در شرایط مناسب توصیه می‌شود. روش COB بعنوان یکی از معتبرترین این روش‌ها، فشار جبهه کار را کمی بیشتر از فشار جانبی فعال زمین توصیه می‌کند [2].

استفاده از مدلسازی‌های عددی با توجه به امکان بررسی سه بعدی ساخت تونل و در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر خاک بطور روزافزون گسترش می‌یابد. از جمله این مطالعات، گرین وود در سال ۲۰۰۳ با استفاده از روش المان محدود به بررسی تأثیر فشار جبهه کار بر میزان نشست‌های سطحی پرداخته است [7]. با مدلسازی سه بعدی المان محدود و انجام مطالعه پارامتریک تأثیر فشار جبهه کار، فشار تزریق و پارامترهای ماشین حفار بر میزان نشست‌های سطحی توسط کاسپر و مسچه بررسی شده است [8]. در سال ۲۰۱۱ چن و همکاران با روش عددی المان گسسته سازوکار گسیختگی و فشار حدی جبهه کار در خاک ماسه‌ای خشک را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در سال ۲۰۱۳ نیز چن و همکاران با مدلسازی عددی المان گسسته در کنار مدلسازی فیزیکی کوچک مقیاس پایداری

۳- مدلسازی عددی

پژوهشگران زیادی در سال‌های اخیر به مطالعه جنبه‌های مختلف تونل‌سازی با مدلسازی عددی دو و سه بعدی پرداخته‌اند [15-16]. به دلیل پدیده قوسی شدن زمین و عملکرد سه بعدی در رفتار تنش-کرنش زمین در جبهه حفاری تونل برای بررسی دقیق‌تر از مدلسازی سه بعدی استفاده می‌شود. در مدلسازی انجام شده، عملیات اجرایی تونل به صورت کامل و گام به گام مدل شده است. مدل شامل مؤلفه‌های تأثیرگذار در فرآیند حفاری مکانیزه از جمله سپر ماشین، فشار جبهه کار و فشار تزریق گروت بوده و حفاری و ساخت تونل به طول ۲۱ متر در ۲۴ گام شبیه سازی شده است. رفتار خاک با مدل الاستیک-پلاستیک کامل موهر-کولمب با قانون جریان غیرهمراه مدل شده است.

در مطالعه پارامتریک حاضر برای خاک‌های دانه‌ای مشخصه‌های مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و تراز آب زیرزمینی تغییر داده شده و بقیه مشخصه‌های ژئوتکنیکی ثابت و مطابق با شرایط پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به زیاد بودن پارامترهای موثر، مشخصات هندسی تونل و پارامترهای مختلف دستگاه (از قبیل قطر حفاری، اضافه حفاری، مشخصات سپر) نیز از مشخصات این پروژه انتخاب شده است تا پارامترها منطبق بر واقعیت باشد. در ادامه بخش‌های مختلف مدلسازی به طور مختصر بیان گردیده و توضیحات تفصیلی در مطالعات پیشین که به منظور ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل‌های مکانیزه انجام گرفته ارائه شده است [1، 15].

۳-۱- ابعاد مدل

انتخاب ابعاد هندسی مدل، شرایط مرزی، نوع و تراکم المان‌ها بر اساس نتایج تحلیل حساسیت بطوریکه نتایج حاصل تحت تأثیر تغییر پارامترهای فوق‌الذکر قرار نگیرد، انجام شده است. مش‌بندی مدل در راستای قائم به میزان ۲ برابر قطر تونل پایین‌تر از کف تونل و بطور جانبی ۵ برابر قطر تونل نسبت به مرکز تونل امتداد داده شده است. طول مدل نیز ۸ برابر قطر تونل بدست آمده است که با پیشنهادی پژوهشگران قبلی نیز

و طول قابل توجه تونل، شرایط ژئوتکنیکی در طول مسیر متفاوت است ولی بطور کلی لایه‌های زیرسطحی مسیر پروژه در بخش عمده‌ای از آن عمدتاً تناوبی از رسوبات دانه‌ای (ماسه‌ای با طبقه‌بندی SM) و لایه‌های ریزدانه است. در بخش‌های غربی و مرکزی مسیر حفاری تونل در رسوبات آبرفتی درشت دانه انجام می‌گیرد که به‌عنوان حالت مرجع در مدلسازی در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) پروفیل ژئوتکنیکی بخش مرکزی مسیر تونل مابین ایستگاه‌های شماره ۸ و ۹ در مجاورت مهران رود (کیلومتر ۱۵۰+۱۰ الی ۱۵۵+۱۰) نمایش داده شده است. مشخصات ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده برای خاک دانه‌ای محیط اطراف تونل در مدل مرجع نیز در جدول (۱) ارائه شده است [14]. 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) است.

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی محیط اطراف تونل

Soil type	SM
Saturated unit weight (kN/m ³)	20
Dry unit weight (kN/m ³)	16.25
Cohesion (kPa)	5
Permeability (cm/s)	10 ⁻⁶
Friction angle (Degree)	34
Poisson ratio	0.3

Table 1. Geotechnical specifications used for soil layer of the model

شکل ۱. پروفیل ژئوتکنیکی انتخاب شده برای مدل مرجع

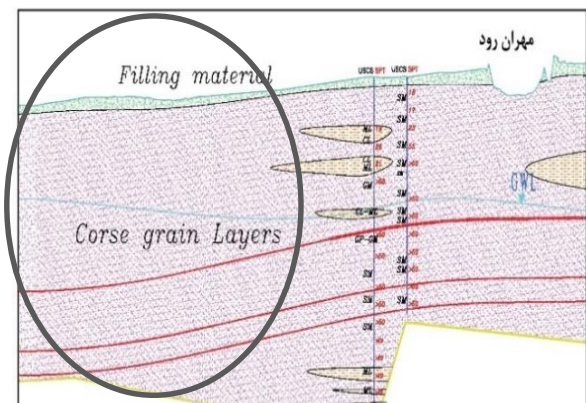


Fig. 1. Geological profile of Tabriz metro line 2 in the study area.

(۲) مشخصات انتخاب شده برای بخش‌های مختلف مدل جمع‌بندی شده است.

۳-۳ مدلسازی فرآیند حفاری تونل

مراحل مختلف فرآیند حفاری تونل به صورت گام به گام مدلسازی می‌شود. پس از ایجاد تعادل ژئواستاتیکی در هر یک از مدل‌ها، در هر مرحله حفاری تمام سطح مقطع تونل با گام ۱/۵ متری حفاری شده، سپر دستگاه فعال شده و فشار جبهه کار به سطح حفاری شده اعمال می‌شود. پس از انجام حفاری تونل بطول ۹ متر (برابر با طول سپر ماشین) معادل ۶ گام، در ابتدای مدل سپر دستگاه 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 می‌شود. میزان فشار تزریق گروت پشت سگمنت ۰/۵ بار بیشتر از فشار جبهه کار انتخاب شده است [18]. پس از گیرش گروت و تغییر مشخصات آن از حالت سیال به گروت سخت شده فشار تزریق حذف می‌شود.

هماهنگی خوبی دارد [17]. در مجموع عرض، ارتفاع و طول مدل (به موازات محور تونل) به ترتیب برابر ۹۰، ۴۲ و ۸۰ متر انتخاب شده است.

۳-۲ مدلسازی ماشین حفار، پوشش تونل و گروت پشت سگمنت

سپر ماشین حفار با استفاده از المان‌های پوسته‌ای با رفتار الاستیک خطی مدل شده است. مدل سپر مخروطی شکل به صورت یک استوانه با قطر ثابت و برابر با قطر متوسط قطر سپر جلویی و انتهایی دستگاه ساده‌سازی شده است. برای مدلسازی پوشش تونل از المان‌های سازه‌ای با رفتار الاستیک خطی استفاده شده که بر اساس مشخصات پروژه قطر خارجی پوشش بتنی ۹/۱۸ متر و ضخامت آنها ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. میزان گام پیشروی در هر سیکل حفاری تونل نیز برابر عرض سگمنت (۱/۵ متر) انتخاب شده است. برای در نظر گرفتن کاهش سختی در مفصل‌ها، یک ضریب اصلاحی انتقال ممان خمشی در نظر گرفته شده است [15].

جدول ۲. مشخصات مصالح در مدلسازی عددی [۱۵]

	Unit weight (kN/m ³)	Compressive strength (MPa)	Young modules (MPa)	Poisson ratio (-)	Tickness (m)
Tunnel lining	25	41	25200	0.2	-
Grout (fluid)	18	0	5	0.47	-
Grout (hardened)	18	3	20	0.3	-
Over- excavation layer	-	-	0.12	0.2	0.02
TBM shield	-	-	210000	0.25	0.35

Table 2. The properties of concrete and grout in modelling

۳-۴ تعیین فشار جبهه کار

فشار جبهه کار بطور کلی تابعی از عمق و قطر تونل، میزان بار سطحی، سطح آب، مشخصات مهندسی خاک و تنش مؤثر است. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای محاسبه فشار جبهه کار استفاده از رابطه تجربی مرکز ساخت و ساز زیرزمینی آلمان (COB) است [2]. رابطه (۱) مقدار فشار جبهه کار بدست آمده از رابطه COB را نشان می‌دهد.

$$\sigma_T = k_a \cdot \sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + k_a \cdot q + u + 20kPa \quad (1)$$

در رابطه فوق σ'_v تنش مؤثر قائم، c چسبندگی، q بار سطحی، u فشار آب حفره‌ای و k_a فشار فعال زمین است. به دلیل سادگی و دقت بالا، نتایج حاصل از این روش به عنوان فشار مینا در این مطالعه 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 رابطه فوق، فشار جبهه کار در تاج تونل است که با یک گرادیان متناسب با مصالح داخل محفظه حفاری دستگاه افزایش داده

اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر و سرمه حفاری دستگاه با تعریف یک لایه نازک با رفتار الاستیک خطی مدل می‌شود. مطابق مشخصات ماشین TBM پروژه، ضخامت این لایه برابر ۲ سانتی‌متر است. مشخصات لایه معادل اضافه حفاری با استفاده از یک سری تحلیل حساسیت بدست می‌آید [15]. برای مدلسازی تزریق پشت سگمنت مشخصات گروت از نتایج طرح اختلاط ارائه شده برای پروژه انتخاب شده و همزمان با فعال‌سازی لایه گروت پشت سگمنت مشخصات این لایه نیز به مشخصات گروت تغییر داده می‌شود. در جدول

می‌شود. اعمال شده در حین اجرا ۹۱ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.

شکل ۲. پروفیل ژئوتکنیکی متراژ ۷۵۰ [۱۴].

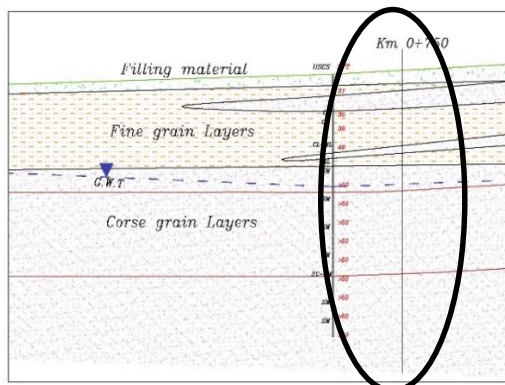


Fig. 2. Geological profile of Tabriz metro line 2 at KM +0.750

جدول ۳. ویژگی‌های ژئومکانیکی خاک اطراف تونل در

متراژ ۷۵۳ خط ۲ قطار شهری تبریز [۱۴]

Soil type	SP-SM
Depth of tunnel (m)	18
Ground water level (m)	16
Saturated unit weight (kN/m ³)	19.65
Dry unit weight (kN/m ³)	17.25
Cohesion (kPa)	30
Young modulus (kPa)	50000
Frictional angle (°)	27

Table 3. Geotechnical properties of Tabriz line 2 metro at KM +0.753

در جدول (۴) مقادیر نشست سطحی بدست آمده از مدلسازی در بالای محور تونل به همراه نتایج حاصل از قرائت-های ابزار دقیق مقطع مورد نظر ارائه شده است. با توجه به هماهنگی بالای نتایج می‌توان با دقت مناسب از مدل رفتاری و الگوی مدلسازی انجام گرفته استفاده نمود.

جدول ۴. مقایسه نتایج ابزاربندی و مدلسازی عددی

Km	Surface settlement (m) (instrumentation)	Surface settlement (m) (numerical modeling)
0+732.66	0.017	0.015
0+747	0.008	0.008
0+753.26	0	0.002

Table 4. Comparison the results of the instrumentation and numerical modeling

در کنار روش تجربی، روابط تحلیلی متعددی نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. برای بررسی دقیق‌تر مقادیر فشار بهینه حاصل از مدل عددی با نتایج روش‌های تحلیلی نیز مقایسه شده است. برای این منظور و با توجه به نوع خاک و شرایط ژئوتکنیکی در نظر گرفته از روش‌های تحلیلی جانکسز و استاینر، آنگونستا و روش فشار فعال زمین استفاده شده است. در روش جانکسز و استاینر [3] حداقل فشار جبهه نگهداری از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_T = K_{a3}\sigma'_v + p \quad (2)$$

که K_{a3} ضریب فشار فعال سه بعدی زمین، σ'_v تنش مؤثر قائم و p فشار آب حفره‌ای است. میزان فشار پیشنهادی آنگونستا و کواری [4] از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$s' = F_0\gamma'D - F_1c + F_2\gamma'\Delta h - F_3c \frac{\Delta h}{D} \quad (3)$$

که s' فشار نگهدارنده مؤثر، F_0 تا F_3 ضرایب بدون بعد هستند که وابسته به زاویه اصطکاک داخلی، پارامترهای هندسی تونل و نسبت وزن مخصوص خشک به وزن مخصوص مستغرق خاک است. c چسبندگی خاک، D قطر تونل، γ' وزن مخصوص مستغرق و Δh اختلاف بین هد فشار در جبهه کار و سطح ایستایی آب است.

۳-۵- درستی‌آزمایی مدل

برای درستی‌آزمایی مدلسازی انجام گرفته در این پژوهش از نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز استفاده شده است. با توجه به نتایج موجود ابزار بندی، جنس مصالح و حفاری تونل در خاک دانه ای مقطع مربوط به متراژ ۷۵۳ برای درستی‌آزمایی انتخاب شده است (شکل ۲). مشاهده می‌شود مقطع مورد نظر از ۷ لایه تشکیل شده است که ضخامت لایه‌های فوقانی در مجموع حدود ۱۰ متر بوده و لایه هفتم که حفاری تونل در آن انجام می‌گیرد شامل یک لایه ماسه‌ای است. مشخصات ژئوتکنیکی لایه هفتم بعنوان محیط اطراف تونل در جدول (۳) ارائه شده است. مدل مقطع مورد نظر با شرایط ژئوتکنیکی واقعی ساخته شده، فرآیند حفاری تونل مدلسازی شد و فشار جبهه کار اعمالی برابر با مقدار

۴- پارامترهای مورد بررسی

به دلیل تعداد زیاد پارامترهای تاثیر گذار در فشار جبهه کار و عدم امکان بررسی تمامی این پارامترها، از مهمترین فاکتورهای اثرگذار به مطالعه تاثیر مدول الاستیسیته، سطح تراز آب زیرزمینی و زاویه اصطکاک خاک‌های دانه‌ای پرداخته شده است. بر اساس مقادیر در نظر گرفته شده در جدول (۵) و ترکیبات این مقادیر تعداد ۳۶ مدل سه بعدی برای بررسی اثر تغییرات آنها تحلیل شده است. همچنین، بر اساس پروفیل مسیر و مقادیر متداول در پروژه های مترویی، نسبت سربار به قطر تونل برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده و مشخصات هندسی تونل نیز برابر مشخصات پروژه خط ۲ مترو تبریز انتخاب شده است.

جدول ۵. معرفی پارامترها و مقادیر بکار رفته در مطالعه

Parameter	Introduction	values
G.W.L	Groundwater level (m)	0, 9, 27
fi	Friction angle (Degree)	25,30,35
E	Young modulus (MPa)	10, 20, 30

Table 5. Introduction of parameters and their values in parametric study

به دلیل شکل نامنظم پروفیل جابه‌جایی جبهه کار، هیچکدام از مقادیر جابه‌جایی جبهه کار در مرکز تونل و حداکثر جابه‌جایی جبهه کار نمی‌تواند مبنای مناسبی برای برآورد فشار مناسب باشد. در این مطالعه برای تعیین جابه‌جایی جبهه کار تونل و در نتیجه تعیین میزان فشار مناسب جبهه کار، از جابه‌جایی میانگین پیشنهاد شده توسط کیم و تونان [19] در تحلیل‌ها استفاده شده است. U_{Xavg} مطابق رابطه زیر به صورت ناحیه احاطه شده توسط پروفیل تغییر شکل یافته جبهه کار تونل و پروفیل اولیه آن تقسیم بر قطر تونل تعریف می‌شود:

$$U_{Xavg} = \frac{1}{2D} \sum_{i=0}^n ((u_x)_{i+1} + (u_x)_i) ((z)_{i+1} - (z)_i) \quad (4)$$

مقادیر مثبت و منفی U_{Xavg} به ترتیب بیانگر جابه‌جایی جبهه کار در جهت پیشروی و سمت داخل تونل است.

۵- نتایج

هریک از مدل‌های ساخته شده، حداقل با دو مقدار متفاوت فشار جبهه کار مورد تحلیل قرار گرفته است. بنابراین با تحلیل بیش از ۷۰ مدل سه بعدی تأثیر مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و سطح آب زیرزمینی بر میزان فشار مناسب جبهه کار بررسی شده است. در ادامه مهمترین نتایج بدست آمده ارائه شده است:

۵-۱- فشار مناسب جبهه کار

در مطالعه حاضر مقدار فشار جبهه کار مورد نیاز حاصل از رابطه تجربی COB بعنوان فشار مبنا، بر اساس شرایط و مشخصات ژئوتکنیکی هر مدل محاسبه، به جبهه کار اعمال و مقدار جابه‌جایی میانگین جبهه کار تونل اندازه‌گیری شده است. سپس با اعمال مقادیر کمتر و بیشتر فشار نسبت به مقادیر مبنا و اندازه‌گیری جابه‌جایی میانگین فشار مناسب جبهه کار تعیین شده است. فشار مناسب، فشاری است که جابه‌جایی میانگین جبهه کار کمترین مقدار را داشته باشد و به طبع آن کمترین نشست یا بالازدگی در سطح زمین مشاهده شود.

شکل ۳. فشار جبهه کار- جابه‌جایی میانگین برای تراز آب الف، ب) ۰، ۲۷

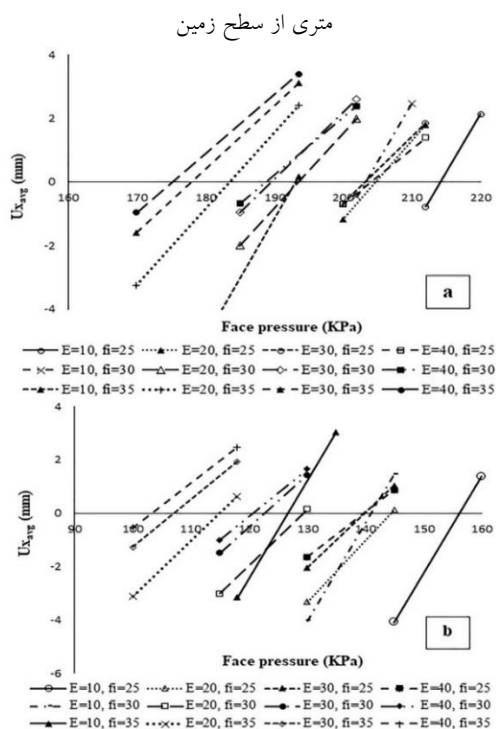


Fig. 3. Variation of face pressure- average displacement

a) GWL=0, b) GWL=27

نیاز است.

شکل ۵. مدول الاستیسیته- فشار جبهه کار برای تراز آب (الف ۰، ب ۹، ج ۲۷ متری از سطح زمین).

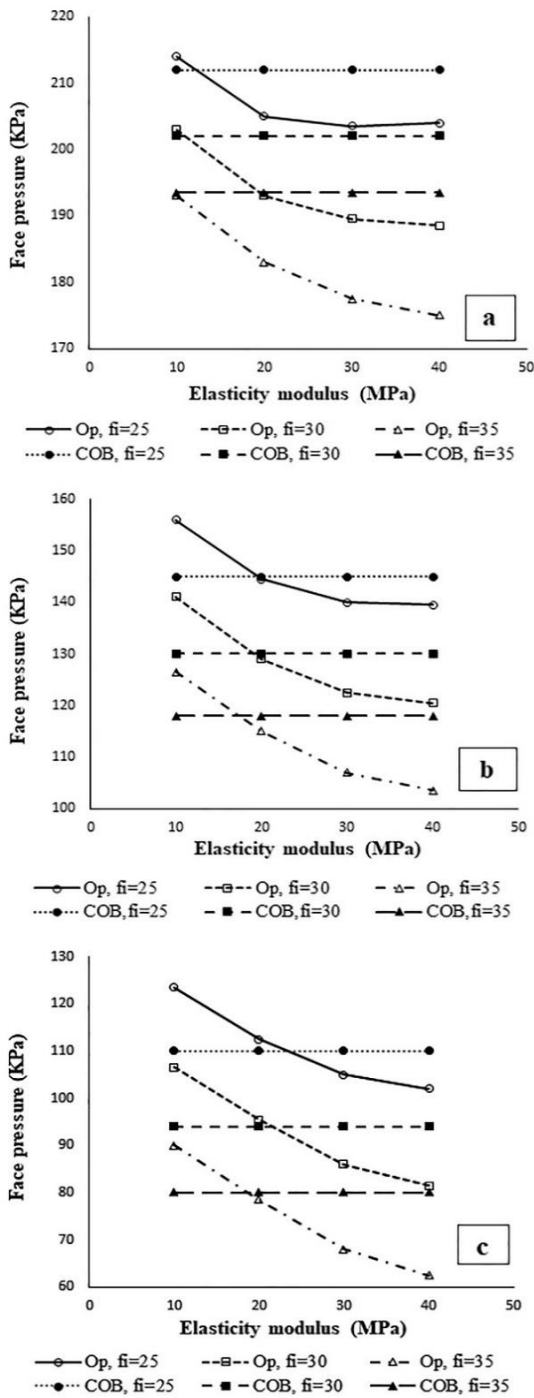


Fig. 5. Variation of face pressure- elasticity modulus
a) GWL=0, b) GWL= 9, c) GWL=27

۳-۵- تأثیر زاویه اصطکاک

در شکل (۶) نمودار زاویه اصطکاک داخلی در برابر

در شکل (۳) فشار جبهه کار اعمالی به جبهه کار تونل در مقابل جابه‌جایی میانگین برای مدل‌های با مشخصات مختلف رسم شده است. در شکل (۴) و بعنوان نمونه جابه‌جایی جبهه کار مربوط به فشار حاصل از رابطه COB به همراه جابه‌جایی حاصل از فشار مناسب جبهه کار بدست آمده برای تراز آب زیرزمینی ۲۷ متری از سطح زمین ترسیم شده است.

شکل ۴. جابه‌جایی افقی جبهه کار تونل

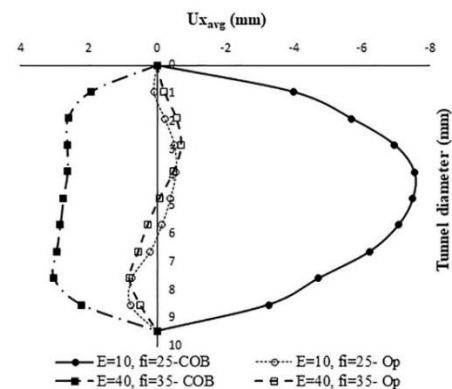


Fig. 4. horizontal displacement at face

۲-۵- تأثیر مدول الاستیسیته

در شکل (۵) نمودار فشار جبهه کار در مقابل مدول الاستیسیته نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که رابطه COB برای مدول الاستیسیته‌های متفاوت، فشار جبهه کار یکسانی را در نظر می‌گیرد. در حالیکه، فشارهای جبهه کار مناسب نشان می‌دهند که با افزایش مدول الاستیسیته به مقدار فشار جبهه کار کمتری نیاز است.

مطابق شکل (۵) در خاک‌هایی با مدول الاستیسیته کم، رابطه COB مقدار فشار جبهه کار کمتری نسبت به حالت مناسب ارائه می‌دهد. همچنین، با افزایش مدول الاستیسیته فشار جبهه کار بدست آمده از این رابطه نسبت به حالت مناسب افزایش می‌یابد که به دلیل در نظر نگرفتن تأثیر مدول الاستیسیته خاک در رابطه 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 می‌دهد. لازم بذکر است، با پایین رفتن تراز سطح آب زیرزمینی مدول الاستیسیته تأثیر خود را بیشتر نشان می‌دهد و در مدول الاستیسیته کم فشار جبهه کار بیشتری نسبت به حالت COB

در شکل (۷) نمودار فشار جبهه کار در برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک برای مقادیر مدول الاستیسیته مختلف و تراز آب ۲۷ متری رسم شده است. مطابق شکل با افزایش زاویه اصطکاک، مقدار فشار جبهه کار برای هر دو حالت COB و مناسب کاهش پیدا می‌کند که با نتایج بدست آمده از مطالعات پیشین [19] همخوانی دارد.

با بیشتر شدن زاویه اصطکاک داخلی، تاثیر مدول الاستیسیته بر کاهش میزان فشار مناسب جبهه کار افزایش می‌یابد. در حالت اشباع مقدار فشار جبهه کار COB، تقریباً برای تمامی حالات از حالت فشار مناسب جبهه کار بیشتر است. با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی مقدار فشار جبهه کار بدست آمده از رابطه COB در محدوده بین حالات مناسب قرار می‌گیرد که نشانگر تاثیر سطح آب زیرزمینی است.

۵-۵- مقایسه نتایج مقادیر فشار مناسب با فشارهای جبهه کار تجربی و تحلیلی

مقادیر فشار مناسب جبهه کار به دست آمده از این پژوهش با مقادیر حاصل از رابطه تجربی COB که حالت مبنا قرار گرفته بود و روابط تحلیلی جانکسز و استاینر، آنگونستا و کواری مقایسه شده است. مطابق نتایج حاصل، روابط تحلیلی جانکسز و استاینر، آنگونستا و کواری همواره مقدار کمتری نسبت به فشار مناسب جبهه کار ارائه می‌دهند. مقادیر فشار کمتر حاصل از روابط تحلیلی نسبت به فشار مناسب بدست آمده در تحقیق حاضر، به این دلیل است که این روابط فشار حداقل مورد نیاز برای جلوگیری از ریزش جبهه کار را ارائه می‌دهند. در هیچیک از روابط تجربی و تحلیلی ارائه شده تاثیر مدول الاستیسیته خاک در میزان فشار مورد نیاز جبهه کار در نظر گرفته نشده است. در حالیکه، مدلسازی عددی به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر مانند مدول الاستیسیته نتایج دقیقتری نسبت به روابط تجربی و تحلیلی ارائه می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این پژوهش می‌تواند برای تعیین فشار مناسب جبهه کار با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته خاک

جابه‌جایی میانگین برای فشارهای جبهه کار حاصل از رابطه COB نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی حالات تراز آب و با ثابت در نظر گرفتن مدول الاستیسیته، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مقدار جابه‌جایی میانگین روند صعودی دارد که این شیب بعد از زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه بیشتر می‌شود. همچنین تفاوت قابل توجه در مقادیر جابه‌جایی جبهه کار در یک زاویه اصطکاک داخلی ثابت و مدول‌های مختلف قابل مشاهده است.

شکل ۶. زاویه اصطکاک- جابه‌جایی میانگین برای تراز آب (الف، ۰، ب) ۲۷ متری از سطح زمین

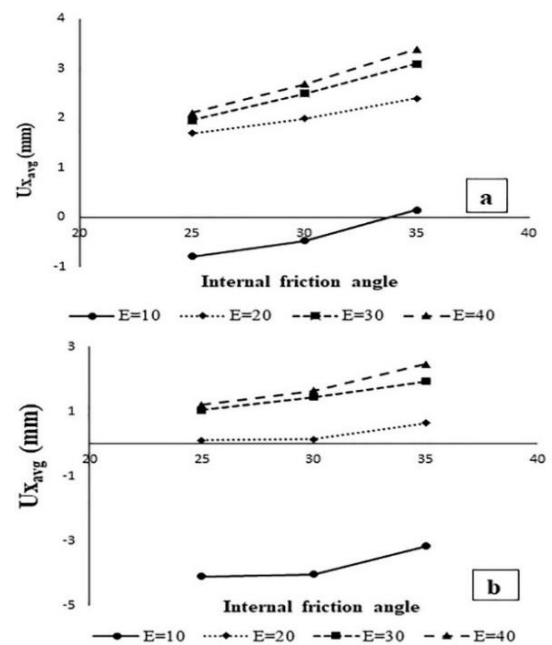


Fig. 6. Variation of internal friction angle- average displacement a) GWL=0, b) GWL=27

شکل ۷. زاویه اصطکاک داخلی - فشار جبهه کار

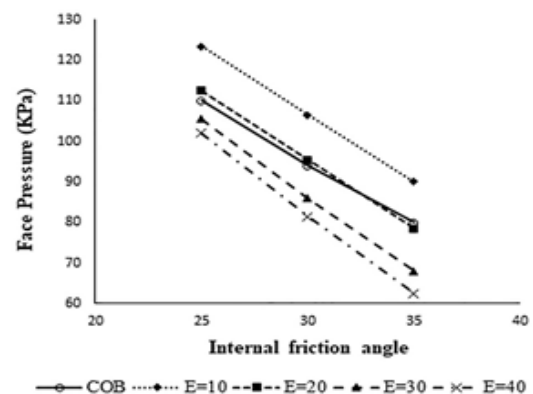


Fig. 7. Variation of internal friction angle- face pressure

pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**, 160-171.

9. Chen R., Li J., Kong L., Tang L. 2013 Experimental study on face instability of shield tunnel in sand. *Tunneling and Underground Space Technology*, **33**, 12-21.

10. Lambrughi A., Rodríguez L.M., Castellanza R. 2012 Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations. *Computers and Geotechnics*, **40**, 97-113.

11. Zhang C., Han K., Zhang D. 2015 Face stability analysis of shallow circular tunnels in cohesive-frictional soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **50**, 345-357.

12. Kheirandish I., Farough hoseini M., Talebi nejad A.R. 2014 The effect of face support pressure on tunnel face displacement and surface settlement in EPB tunneling method. *Iranian journal of mining engineering*, **8**(20), 37-48. (In Persian).

13. Ahmed M., Iskander M. 2012 Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **27**(1), 101-10.

14. Pazhoohesh Omran Rahvar engineering company. 2008 *Tabriz metro line 2 geotechnical study*.

15. Katebi H., Rezaei A., Hajjalilue M., Tarifard A. 2015 Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on tunnel lining loads (FEM). *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 67-78.

16. Manafi E. 2015 Static analysis of urban single tunnels in alluvial using discrete element method (DEM). *Modares civil engineering journal*, **14**(4), 179-188 (In Persian).

17. Möller S.C. 2006 Tunnel induced settlements and structural forces in linings: Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik.

18. Atkinson J., Potts D. 1997 Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil. *Geotechnique*, **27**(2), 203-15.

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

در تونل‌های مکانیزه بکار گرفته شود. بر اساس نتایج حاصل:

- روش‌های تجربی و تحلیلی برای محیط‌های با مدول الاستیسیته مختلف فشار جبهه کار یکسانی را پیشنهاد می‌کنند، در حالیکه بر اساس نتایج مدلسازی عددی در فشارهای جبهه کار یکسان، میزان جابجایی جبهه کار در مدول‌های متفاوت دارای اختلاف قابل توجه است. به عنوان الگوی کلی، با افزایش مدول الاستیسیته فشار مناسب جبهه کار کاهش می‌یابد.
- بر اساس نتایج بدست آمده با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و در مدول‌های الاستیسیته کم (کمتر از ۲۰ مگاپاسکال در مطالعه انجام شده)، رابطه COB فشار جبهه کار کمتری نسبت به حالت مناسب ارائه می‌دهد که باید در محاسبات فشار جبهه کار در نظر گرفته شود.
- در مقایسه با روابط تحلیلی جانکسز و استاینر، آنگونستا و کواری، نتایج حاصل از رابطه تجربی COB دارای بیشترین هماهنگی با فشار مناسب جبهه کار بدست آمده از مدلسازی عددی است.

References

۷- مراجع

1. Katebi H., Rezaei. A.H., Hajjalilue-Bonab M. 2016 In fluence of surface buildings and ground stratification on lining loads, applying the numerical finite element method. *Sharif civil engineering journal*, 31.2 (4.1), 3-14. (In Persian).
2. Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S. 2008 Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control: CRC Press.
3. Jancsecz S., Steiner W. 1994 Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions. *Tunnelling*, **94**, 531-550.
4. Anagnostou G., Kovari K. 1996 Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **11**(2), 165-73.
5. Broere W., 2001 Tunnel Face Stability & New CPT Applications. *PhD Thesis, Delft University of Technology*.
6. Pan Q., Dias D. 2017 Upper-bound analysis on the face stability of a non-circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **62**, 96-102.
7. Greenwood J.D. 2003 Three-dimensional analysis of surface settlement in soft ground tunneling. *Master of engineering Thesis, Massachusetts Institute of Technology*.
8. Kasper T., Meschke G. 2006 On the influence of face

Optimized Face Pressure of Mechanized Tunneling in Granular Soils by Numerical Modelling

A.H.Rezaei ^{1*}, S.Babaei ², H.katebi ³

- 1- *Assistant Professor, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University.
- 2- Ph.D candidate, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology
- 3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

*rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

Abstract:

Estimating the pressure required to maintain 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, underground water conditions, excavation method, amount of surcharge and tunnel section area. In this paper, the influence of soil elasticity modulus, friction angle and underground water condition on the optimum amount of face pressure in granular soils were studied. For this purpose, a 3D finite element model was used employing the ABAQUS software (Ver. 6.14). 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. As regards, there are too many parameters involved in mechanized excavation, the geometry of tunnel, lining segments, injection grout and the surrounding soil properties are adapted from the under construction of Tabriz urban railway line 2 project. The tunnel lining and TBM shield were simulated by S8 shell elements. The soil under the ground water level and the grout material were 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. The paper gives a detailed description of the model components and the stepwise procedure to simulate the construction process. More than 70 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. For various elasticity modulus, internal friction angle and underground water conditions different values of face pressure were applied in tunnel face and corresponding average tunnel face displacement were measured for each state. Results show that elasticity modulus of soil has a remarkable effect on the amount of the optimized face pressure and for minimize the tunnel face displacement, elasticity modulus should be considered in calculation of the applied face pressure. As the soil elasticity modulus increase the value of optimum face pressure decreases. Also the face pressure was calculated using analytical and experimental methods and the results were compared with the obtained optimum pressure. The results are in good agreement with those obtained from the COB method. In the cases with low elasticity modulus (less than 20 MPa in this study) the COB method obtained face pressures are less than optimal pressure resulted in this study. This difference increase with lowering of ground water level.

Keywords: Face Pressure, Mechanized Tunneling, Elasticity Modulus, Granular Soils , Abaqus.