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

سعید بابائی*؛
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 ۹۶/۱۱/۲۱ پذیرش ۹۷/۱۰/۰۳

چکیده

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 می‌شود اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. 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. به‌طورکلی روش‌های تعیین فشار جبهه کار به سه دستهٔ تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم می‌شوند. فشار نگه‌داری جبههٔ کار تونل به عوامل متعددی نظیر نوع و مشخصات مهندسی خاک از جمله مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی، شرایط آب زیرزمینی، میزان روباره و سطح مقطع تونل وابسته است که در تحقیق حاضر، با کاربرد نرم‌افزار المان محدود ABAQUS به بررسی تأثیر برخی از این پارامترها بر میزان مناسب فشار جبهه کار تونل‌های مکانیزه می‌پردازیم. با تحلیل مدل‌های سه‌بعدی و اندازه‌گیری مقادیر جابه‌جایی‌های جبهه کار تونل به‌ازای مقادیر متفاوت فشار جبهه کار و پارامترهای بررسی شده، مقدار مناسب فشار نگه‌دارنده تخمین زده شده است. صحت‌سنجی روند مدل‌سازی بر اساس نتایج ابزاربندی پروژهٔ خط ۲ مترو تبریز انجام یافته است. نتایج حاصل نشان‌دهندهٔ تأثیر چشم‌گیر مدول

*نویسنده مسئول s.babaei@email.kntu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

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 روش‌های تحلیلی جانکسز–استاینر، آنگونستا–کواری و روش تجربی COB مقایسه شده است که بیش‌ترین تطابق با روش COB مشاهده شده است. لازم به ذکر است با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و در مدول‌های الاستیسیته کم (کم‌تر از ۲۰ مگاپاسکال در پژوهش انجام شده)، رابطهٔ COB فشار جبهه کار کم‌تری نسبت به حالت مناسب ارائه می‌دهد که باید در محاسبات فشار جبهه کار در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: فشار جبهه کار، تونل‌سازی 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 همین‌طور 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 ۲۰ درصد، افت در طول سپر ٤٠ تا ٥٠ درصد و افت پس از عبور سپر ۳۰ تا ٤٠ درصد افت 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 روش‌های تعیین فشار جبهه کار را می‌توان به سه روش تجربی، تحلیلی (تعادل حدی و آنالیز حدی) و عددی تقسیم کرد. در روش‌های 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[1] به‌عنوان یکی از معتبرترین این روش‌ها، فشار جبهه کار را کمی بیش‌تر از فشار جانبی فعال زمین توصیه می‌کند [۲].

1. Centrum Ondergronds Bouwen

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

محققان زیادی با استفاده از روش‌های تحلیلی به تخمین پایداری جبهه کار در خاک‌های کاملاً چسبنده و خاک‌های اصطکاکی پرداخته‌اند. از معتبرترین روش‌های 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 عمدتاً با ارائه کران بالا و پایین که به‌ترتیب از نقطه نظر استاتیکی و دینامیکی مطرح می‌شوند، صورت می‌گیرد. از معروف‌ترین روش‌های آنالیز حدی می‌توان روش‌های برومز و بنرمارک (خاک چسبنده و زهکشی نشده)، اتکینسون و پاتز (خاک غیرچسبنده برای تونل بدون پوشش)، دیویس (خاک چسبنده) و روش لکا- دومیر (خاک غیرچسبنده) را نام برد [۲]. در یکی از پژوهش‌های اخیر در سال ۲۰۱۷ پن و دیاس [٦] با تحلیل حد بالا و مدل‌سازی 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 می‌سازند. با این وجود صحت نتایج این روش‌ها کاملاً به داده‌های اولیه مسئله بستگی دارد. در سال ۲۰۰٤ کاسپر و مسچه مدل‌سازی سه‌بعدی انجام دادند، به‌طوری 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 می‌شود [۸]. در سال ۲۰۱۱ چن و همکاران با روش عددی المان گسسته مکانیزم گسیختگی و فشار حدی جبهه کار در خاک ماسه‌ای خشک را بررسی کردند [۹].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

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 دایره‌ای کم‌عمق به‌وسیلهٔ زانگ و همکاران انجام شده است [۱۲]. خیراندیش و همکاران در سال ۱۳۹۲ با استفاده از روش عددی تفاضل محدود تأثیر فشار جبهه کار بر میزان نشست سطحی و جابه‌جایی‌های جبهه کار بررسی کردند که نتایج حاصل نشان‌دهندهٔ تأثیر زیاد مدول الاستیسیته خاک در مقدار فشار مورد نیاز و پایداری جبهه کار بوده است [۱۳]. حیدریان و همکاران در سال ۱۳۹۲ با استفاده از آنالیز حدی لکا- دورمیو و روش عددی به مقایسه پایداری جبهه تونل متروی کرج پرداخته و نشان دادند که فشار به‌دست آمده از روش تحلیلی حداقل فشاری است که می‌توان به جبهه کار اعمال کرد [۱٤].

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 [۱۵]. 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 حالی‌که، مقادیر تغییر شکل و جابه‌جایی ایجاد شده در جبهه کار به‌میزان زیادی به این پارامتر وابسته است [۱۳].

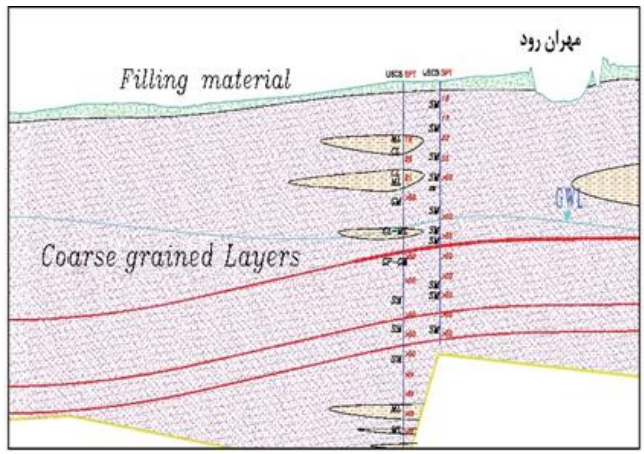
در تحقیق حاضر با مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار المان محدود ABAQUS سعی شده است به بررسی بیش‌تر موضوع پرداخته و با انجام مطالعهٔ پارامتریک به بررسی تأثیر مدول الاستیسیته خاک و شرایط آب زیرزمینی به‌همراه زاویهٔ اصطکاک داخلی بر میزان فشار مناسب جبهه کار در خاک‌های دانه‌ای می‌پردازیم.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

پروژه بررسی شده

شهر تبریز با مساحت ۱۶۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۱۶۰۰۰۰۰ نفر یکی از شهرهای بزرگ و پر جمعیت ایران در شمال غرب این کشور است. بر اساس بررسی‌های ترافیک اولیه ٤ خط مترو برای این شهر پیش‌بینی شده است. خط ۲ قطار شهری تبریز به‌طول تقریبی ۲۲ کیلومتر منطقه قراملک در غرب تبریز را به نمایشگاه بین‌المللی تبریز در شرق آن متصل می‌کند. با توجه به عبور تونل از سازندهای مختلف، شرایط ژئوتکنیکی در طول مسیر متفاوت است ولی لایه‌های زیرسطحی مسیر پروژه عمدتاً تناوبی از رسوبات ماسه‌ای و لایه‌های ریزدانه است. در بخش مرکزی مسیر، تونل در رسوبات آبرفتی درشت دانه حفاری می‌شود که این شرایط ژئوتکنیکی به‌عنوان حالت مرجع در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. شکل ۱ پروفیل ژئوتکنیکی بخش مرکزی مسیر تونل مابین ایستگاه‌های S08 و S09 (کیلومتراژ ۱۵۰+۱۰ الی ۵۵۰+۱۰) را که در در مجاورت مهران‌رود است را نشان می‌دهد. مشخصات ژئوتکنیکی انتخاب شده برای خاک دانه‌ای محیط اطراف تونل در مدل مرجع که بر اساس پژوهش‌های ژئوتکنیک فاز یک پروژه انتخاب شده است؛ در جدول ۱ ارائه شده است [۱٦]. لازم به ذکر است قطر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری تبریز ۹/٤۹ متر، طول سپر ماشین حفاری ۹ متر، قطر خارجی سپر در جلوی آن ۹/٤٦ متر و در عقب آن برابر ۹/٤٤ متر (۲ سانتی متر مخروطی) است.



شکل ۱. پروفیل ژئوتکنیکی انتخاب شده برای مدل مرجع

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی محیط اطراف تونل [۱٦]

طبقه بندی خاک	SM
دانسیته خشک (کیلونیوتن بر مترمکعب)	۱٦/۲٥
دانسیته اشباع (کیلونیوتن بر مترمکعب)	۲۰
چسبندگی (کیلوپاسکال)	٥
نفوذپذیری (سانتی متر بر ثانیه)	$۱۰^{-٦}$
ضریب پواسون	۰/۳
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳٤

جزئیات مدل‌های 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 به‌علت رفتار بسیار پیچیدهٔ تونل‌سازی سپری، تعداد کمی از مدل‌سازی‌های عددی کامل برای این منظور وجود دارد [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]. با توجه به عملکرد سه‌بعدی در رفتار تنش-کرنش زمین در جبهه حفاری تونل و تأثیرات مربوط به قوسی شدن زمین، در تحقیق حاضر برای بررسی دقیق‌تر از مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند تونل‌سازی مکانیزه به‌صورت کامل و گام به گام استفاده شده است. مدل ساخته شده شامل مؤلفه‌های تأثیرگذار در فرآیند حفاری مکانیزه از جمله سپر ماشین، فشار جبهه کار و فشار تزریق دوغاب بوده است و حفاری و ساخت تونل به‌طول ۲٤ متر در ۲۷ گام شبیه‌سازی شده است. رفتار مکانیکی توده خاک محیط اطراف تونل الاستیک-پلاستیک کامل با معیار 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 (چسبندگی، زاویهٔ اصطکاک داخلی، زاویهٔ اتساع) است. هم‌چنین در این پژوهش برای محاسبهٔ زاویهٔ اتساع از رابطهٔ (۱) استفاده شده است.

$$\psi = \phi - 30 \qquad (۱)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

که ψ زاویهٔ اتساع و ϕ 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 به‌منظور ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل‌های مکانیزه انجام گرفته قابل دسترسی است [۱۷].

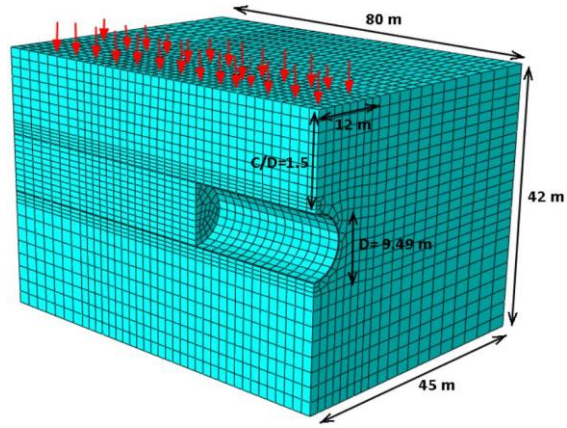
مشخصات هندسی و مرزهای جانبی

فاصلهٔ مرزهای جانبی، ابعاد هندسی مدل، شرایط مرزی، نوع و تراکم المان‌ها بر اساس نتایج تحلیل حساسیت انتخاب شده است. به‌عبارت دیگر این مشخصات به‌نوعی انتخاب شده‌اند که نتایج حاصل تحت تأثیر تغییر پارامترهای مذکور قرار نگرفته و موقعیت مرزهای جانبی طوری باشد که وجود مرزهای مصنوعی تأثیر چشم‌گیری در میدان تنش-کرنش- فشار منفذی نداشته باشد. در شکل ۲ نمونه‌ای از مدل سه‌بعدی ساخته شده به‌همراه مش‌بندی استفاده شده نشان داده شده است. به‌دلیل تقارن موجود در مسئله، به‌منظور کاهش زمان تحلیل نصف محیط مدل‌سازی و تحلیل شده است. ابعاد مدل در راستای قائم، جانبی و طولی به‌ترتیب ۲، ۵ و ۸ برابر قطر تونل انتخاب شده است که با پیشنهادهای محققان قبلی نیز دارای تطابق خوبی است [۲۰].

تخمین فشار اولیه نگه‌داری جبهه کار

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 به‌طورکلی از دو روش تحلیلی و عددی استفاده می‌شود. یکی از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]



شکل ۲. تصویر شماتیک از ابعاد و هندسه مدل

رایج‌ترین روش‌ها 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].

$$\sigma_T = k_a\sqrt{\sigma_v'} - 2c\sqrt{k_a} + k_a.q + u + 20kPa \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲) σ_v' تنش مؤثر قائم، c چسبندگی، q بار سطحی، u فشار آب حفره‌ای و k_a فشار فعال زمین است. به‌دلیل سادگی و دقت زیاد، نتایج حاصل از این روش به‌عنوان فشار مبنا در این پژوهش در نظر گرفته شده است. سپس با افزایش یا کاهش مقدار فشار جبهه کار و اندازه‌گیری 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 می‌شود. در کنار روش تجربی، روابط تحلیلی متعددی نیز برای تعیین فشار جبهه کار ارائه شده است. فشار جبهه‌کار به‌طورکلی تابعی از عمق تونل، قطر تونل، میزان بار سطحی، سطح آب، مشخصات مهندسی خاک و تنش مؤثر است. برای این منظور و با توجه به نوع خاک و شرایط ژئوتکنیکی در نظر گرفته از روش‌های تحلیلی جانکسز–استاینر، آنگونستا–کواری و روش فشار فعال زمین استفاده شده است. در روش جانکسز–استاینر [۳] حداقل فشار جبهه نگه‌داری از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید:

$$\sigma_T = K_{a3}\sigma_v' + p \qquad (۳)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

که K_{a3} ضریب فشار فعال سه‌بعدی زمین، σ_v' تنش مؤثر قائم و p فشار آب حفره‌ای است. میزان فشار پیشنهادی آنگونستا-کواری [٤] از رابطهٔ (٤) محاسبه می‌شود:

$$s' = F_0\gamma' D - F_1 c + F_2\gamma'\Delta h - F_3 c\frac{\Delta h}{D} \qquad (٤)$$

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، γ' وزن مخصوص مستغرق و Δh 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 سانتی‌متر منظور شده است. برای مدل‌سازی سپر ماشین حفار نیز از المان‌های پوسته‌ای با رفتار الاستیک خطی استفاده شده است. به‌منظور ساده‌سازی مدل، سپر ماشین حفار به‌صورت یک استوانه با قطر ثابت که مقدار آن برابر با متوسط قطر سپر جلویی و انتهایی دستگاه است، مدل‌سازی شده است. اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر و سرمته 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 به‌دست می‌آید [۱۷]. میزان گام پیش‌روی در هر مرحله حفاری تونل نیز به‌میزان ۱/۵ متر برابر با عرض سگمنت انتخاب شده است. به‌منظور 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 الاستیسیته و ضریب پواسون وابسته به زمان مدل شده است. در مدل ساخته شده هم‌زمان با فعال‌سازی لایه گروت پشت سگمنت مشخصات

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

این لایه نیز به مشخصات گروت (سخت شده) تغییر داده می‌شود. جمع‌بندی مشخصات انتخاب شده برای بخش‌های مختلف مدل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح در مدل‌سازی عددی [۱۷]

مصالح	وزن واحد (کیلونیوتن بر متر مکعب)	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	ضریب پواسون	ضخامت (متر)
پوشش تونل	۲۵	٤۰	۲۵۲۰۰	۰/۲	–
گروت (سیال)	۱۸	۰	۵	۰/٤۷	–
گروت (سخت شده)	۱۸	۳	۲۰	۰/۳	–
لایه اضافه حفاری	–	–	۰/۱۲	۰/۲	۰/۰۲
سپر ماشین	–	–	۲۱۰۰۰۰	۰/۲۵	۰/۳۵

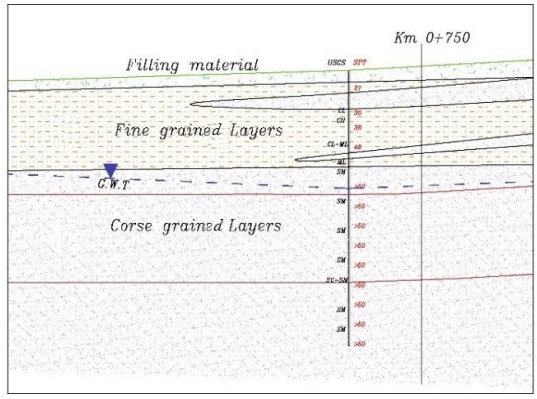
برای مدل‌سازی حفاری تونل از یک روش گام به گام استفاده شده است. در اولین گام تعادل ژئواستاتیکی مدل با در نظر گرفتن میدان تنش‌های اولیه بر اساس لایه‌بندی و تراز آب زیرزمینی متناظر هر مدل برقرار شده و گام دوم بار ترافیک ۲۰ کیلوپاسکال به عرض ۱۲ متر به سطح زمین اعمال می‌شود. پس از تعادل تنشهای اولیه، در هر مرحلهٔ حفاری تمام سطح مقطع تونل با گام ۱/۵ متری حفاری شده، سپر دستگاه هم‌زمان با اعمال فشار به سطح جبهه کار فعال می‌شود. پس از مدل‌سازی حفاری 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 می‌شود. در ادامه به‌ازای هر مرحله حفاری در سینه تونل، یک مرحله نصب پوشش در انتهای سپری انجام شده و این عملیات به‌طور متوالی تکرار می شود. میزان فشار تزریق گروت پشت سگمنت ۰/۵ بار بیش‌تر از فشار جبهه کار انتخاب شده است [۲۱]. 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 می‌شود. بر اساس پروفیل مسیر و مقادیر متداول در پروژه‌های مترویی مشابه، نسبت سربار به قطر تونل برابر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

۱/۵ انتخاب شده و مشخصات هندسی تونل نیز برابر مشخصات پروژه خط ۲ مترو تبریز انتخاب شده است.

اعتبارسنجی نتایج

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام گرفته در تحقیق حاضر از نتایج اندازه‌گیری‌های 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 به‌عنوان محیط اطراف تونل ارائه شده است.



شکل ۳. پروفیل ژئوتکنیکی متراژ ۷۵۰ [۱۶]

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 به‌همراه نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق مقطع مورد نظر ارائه شده است. با توجه به انطباق بالای نتایج می‌توان با دقت مناسب از مدل رفتاری و الگوی مدل‌سازی انجام گرفته استفاده کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

جدول ۳. خصوصیات ژئومکانیکی خاک اطراف تونل در متراژ ۷۵۳ خط ۲ قطار شهری تبریز [۱۶]

طبقه بندی خاک	SP-SM
عمق مرکز تونل (متر)	۱۸
عمق تراز آب (متر)	۱۲/٤
وزن مخصوص اشباع (کیلونیوتن برمترمکعب)	۱۹/٦٥
وزن مخصوص خشک (کیلونیوتن بر مترمکعب)	۱۷/۲٥
چسبندگی (کیلوپاسکال)	٥
مدول یانگ (مگاپاسکال)	۳۸
زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)	۳٤

جدول ٤. مقایسهٔ نتایج ابزاربندی و مدل‌سازی عددی

کیلومتراژ حفاری	کیلومتراژ نصب پین نشست‌سنجی	نشست قرائت شده از ابزاربندی (متر)	نشست حاصل از مدل‌سازی عددی (متر)
	۰+۷۳۲/٦٦	۰/۰۱۷	۰/۰۱٥
۷٥۳/۲٦	۰+۷٤۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸
	۰+۷٥۳	۰	۰/۰۰۲

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 ۳٦ 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

تحلیل‌ها استفاده شده است. U_{Xavg} مطابق رابطهٔ (۵) به‌صورت ناحیهٔ احاطه شده به‌وسیلهٔ پروفیل تغییرشکل یافته جبهه کار تونل و پروفیل اولیه آن تقسیم بر قطر تونل تعریف می‌شود:

$$U_{X\,avg} = \frac{1}{2D}\sum_{i=1}^{n}((u_X)_{(i+1)} + (u_X)_i)((z)_{(i+1)} - (z)_i) \qquad (۵)$$

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

جدول ۵. معرفی پارامترها و مقادیر به‌کار رفته در پژوهش

پارامتر	شرح	مقادیر انتخاب شده
h_w	تراز سطح آب زیرزمینی (متر)	۰، ۹ و۲۷
fi	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۵، ۳۰ و ۳۵
E	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰

جدول ٦. مشخصات و شمارهٔ مدل‌ها

شمارهٔ مدل	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	تراز سطح آب (متر)	شماره مدل	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	تراز سطح آب (متر)	شماره مدل	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	تراز سطح آب (متر)	شماره مدل	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	تراز سطح آب (متر)
۱	۱۰	۲۵	۰	۱۰	۲۰	۳۵	۰	۱۹	۳۰	۳۰	۹	۲۸	۴۰	۲۵	۲۷
۲	۲۰	۲۵	۰	۱۱	۳۰	۳۵	۰	۲۰	۴۰	۳۰	۹	۲۹	۱۰	۳۰	۲۷
۳	۳۰	۲۵	۰	۱۲	۴۰	۳۵	۰	۲۱	۱۰	۳۵	۹	۳۰	۲۰	۳۰	۲۷
٤	٤۰	۲۵	۰	۱۳	۱۰	۲۵	۹	۲۲	۲۰	۳۵	۹	۳۱	۳۰	۳۰	۲۷
٥	۱۰	۳۰	۰	۱٤	۲۰	۲۵	۹	۲۳	۳۰	۳۵	۹	۳۲	٤۰	۳۰	۲۷
٦	۲۰	۳۰	۰	۱۵	۳۰	۲۵	۹	۲٤	٤۰	۳۵	۹	۳۳	۱۰	۳۵	۲۷
۷	۳۰	۳۰	۰	۱٦	٤۰	۲۵	۹	۲۵	۱۰	۲۵	۲۷	۳٤	۲۰	۳۵	۲۷
۸	٤۰	۳۰	۰	۱۷	۱۰	۳۰	۹	۲٦	۲۰	۲۵	۲۷	۳۵	۳۰	۳۵	۲۷
۹	۱۰	۳۵	۰	۱۸	۲۰	۳۰	۹	۲۷	۳۰	۲۵	۲۷	۳٦	٤۰	۳۵	۲۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

نتایج

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 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 به‌طبع آن کم‌ترین نشست یا بالازدگی در سطح زمین مشاهده گردد. در شکل ٤ فشار جبهه کار اعمالی به جبهه کار تونل در مقابل جابه‌جایی میانگین برای مدل‌ها با مشخصات مختلف رسم شده است.

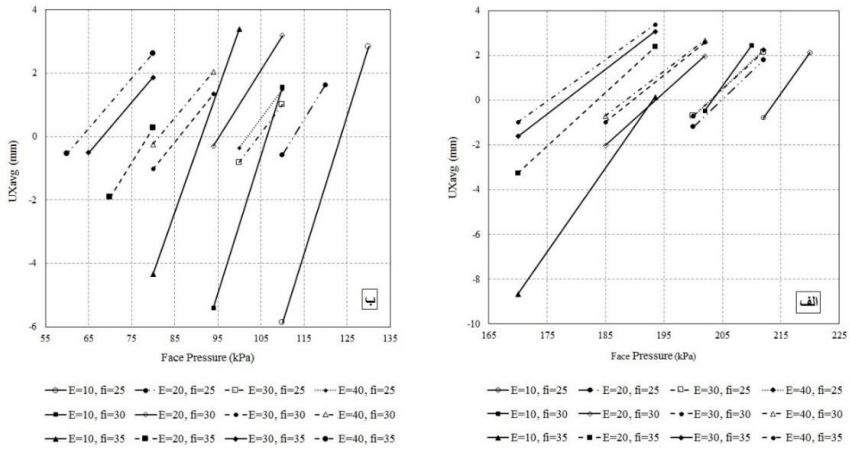
در شکل ۵ و به‌عنوان نمونه جابه‌جایی جبهه کار مربوط به فشار حاصل از رابطهٔ COB به‌همراه جابه‌جایی حاصل از فشار مناسب جبهه کار به‌دست آمده برای تراز آب زیرزمینی ۲۷ متری از سطح زمین در دو حالت مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال، زاویهٔ اصطکاک ۲۵ درجه و مدول الاستیسیته ٤۰ مگاپاسکال، زاویهٔ اصطکاک درجه ۳۵ ترسیم 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.

تأثیر مدول الاستیسیته

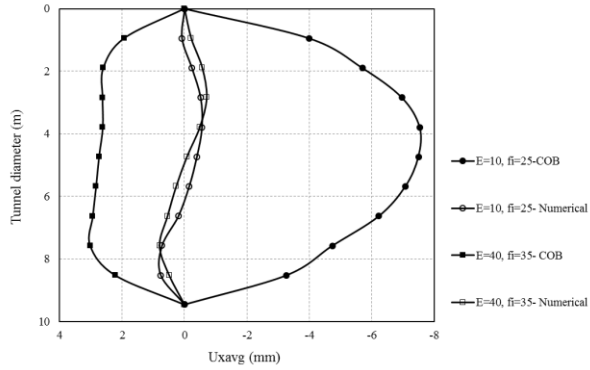
در شکل ۷ نمودار فشار جبهه کار در مقابل مدول الاستیسیته نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که رابطهٔ COB برای مدول الاستیسیته‌های متفاوت، فشار جبهه کار یک‌سانی را در نظر می‌گیرد. در حالی‌که، فشارهای جبهه کار مناسب نشان می‌دهند که با افزایش مدول الاستیسیته به مقدار فشار جبهه کار کم‌تری نیاز است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

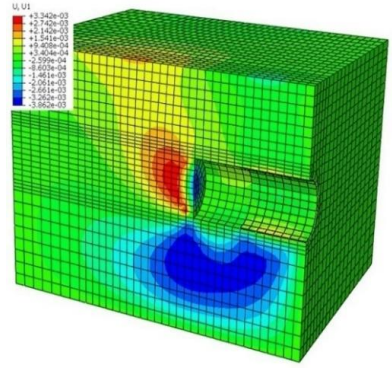
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]



شکل ٤. فشار جبهه کار- جابه‌جایی میانگین برای تراز آب الف) ۰، ب) ۲۷ متری از سطح زمین

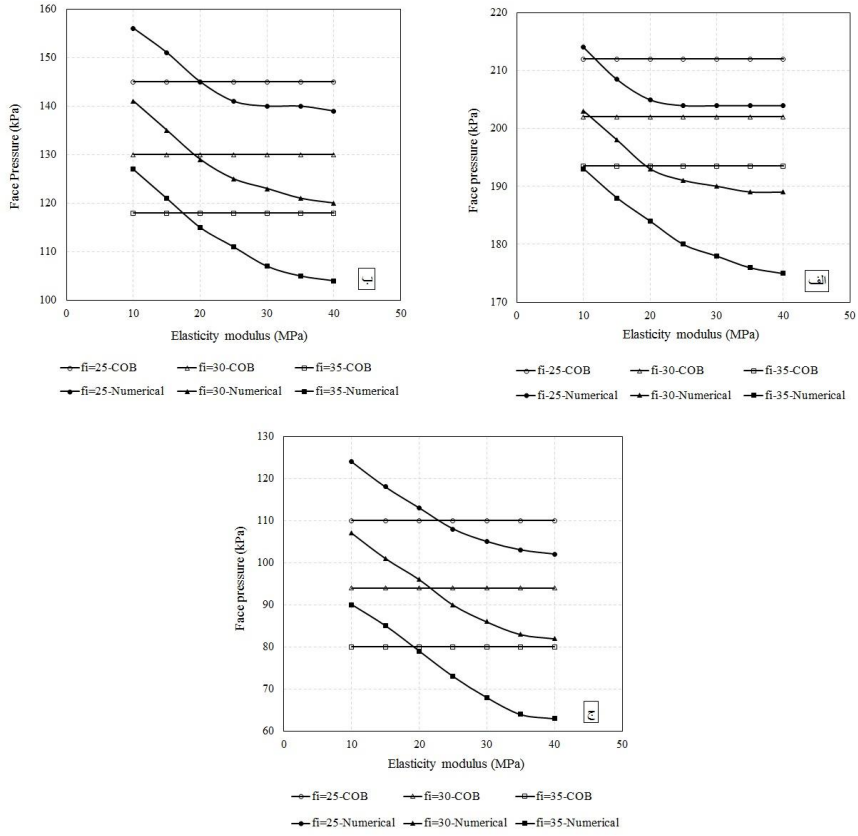


شکل۵. جابه‌جایی افقی جبهه کار تونل



شکل ٦. کانتور جابه‌جایی افقی در مدل‌سازی عددی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]



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

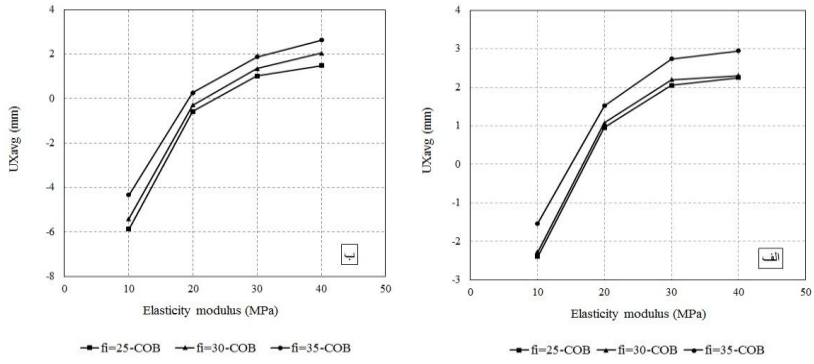
مطابق شکل ۷ در خاک‌های با مدول الاستیسیته کم، رابطهٔ COB مقدار فشار جبهه کار کم‌تری نسبت به‌حالت مناسب ارائه می‌دهد. هم‌چنین، با افزایش مدول الاستیسیته فشار جبهه کار به‌دست آمده از این رابطه نسبت به‌حالت مناسب افزایش می‌یابد که به‌دلیل در نظر نگرفتن تأثیر مدول الاستیسیته خاک در رابطهٔ تجربی COB است. به‌عبارت دیگر، با افزایش مدول الاستیسیته به مقدار فشار مناسب جبهه کار کم‌تری مورد نیاز است که اهمیت پارامتر مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، با پایین رفتن تراز سطح آب زیرزمینی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

مدول الاستیسیته تأثیر خود را بیش‌تر نشان می‌دهد و در مدول الاستیسیته کم فشار جبهه کار بیش‌تری نسبت به حالت COB نیاز است.

تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی

در شکل ۸ نمودار مدول الاستیسیته- جابه‌جایی میانگین با زاویهٔ اصطکاک داخلی‌های مختلف برای فشارهای جبهه کار حاصل از رابطهٔ COB نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در تمامی حالات تراز آب و با ثابت در نظر گرفتن مدول الاستیسیته، با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک مقدار جابه‌جایی میانگین روند صعودی دارد. هم‌چنین تفاوت قابل توجه در مقادیر جابه‌جایی جبهه کار در یک زاویهٔ اصطکاک داخلی ثابت و مدول‌های مختلف قابل مشاهده است. مطابق شکل ۸ در مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال مقدار جابه‌جایی میانگین تقریباً در اکثر حالات منفی است که نشان‌دهندهٔ مقدار فشار جبهه کار کم و در نتیجه جابه‌جایی جبهه کار به‌سمت داخل تونل است. این روند با کاهش سطح آب زیرزمینی تشدید می‌شود.

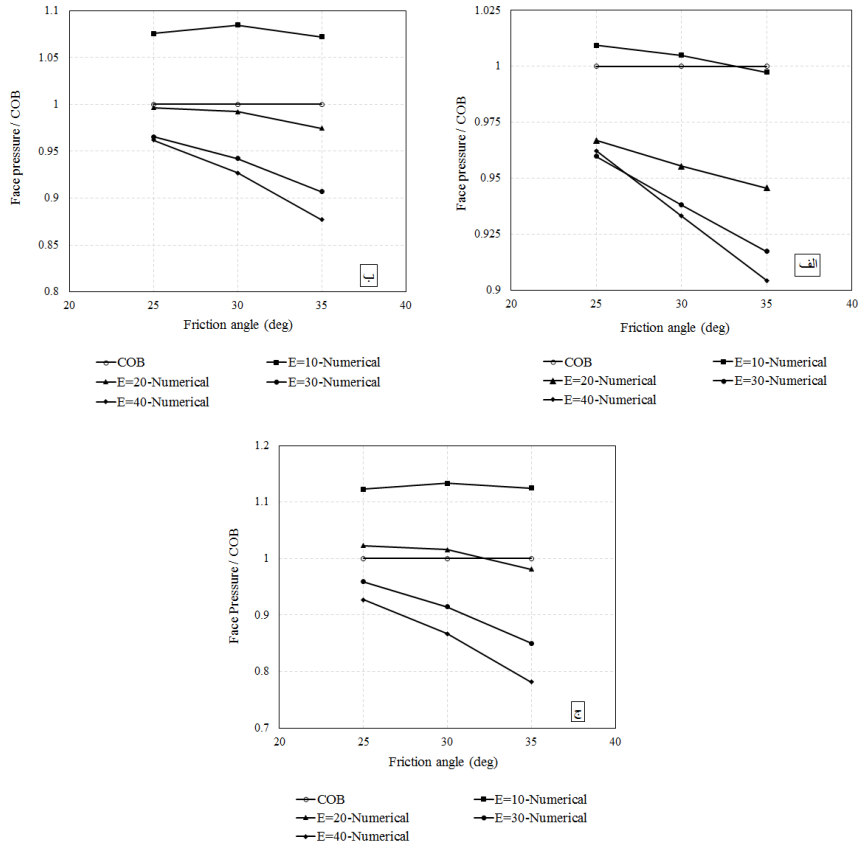


شکل ۸. مدول الاستیسیته- جابه‌جایی میانگین برای تراز آب الف) ۰، ب) ۲۷ متری از سطح زمین

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

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



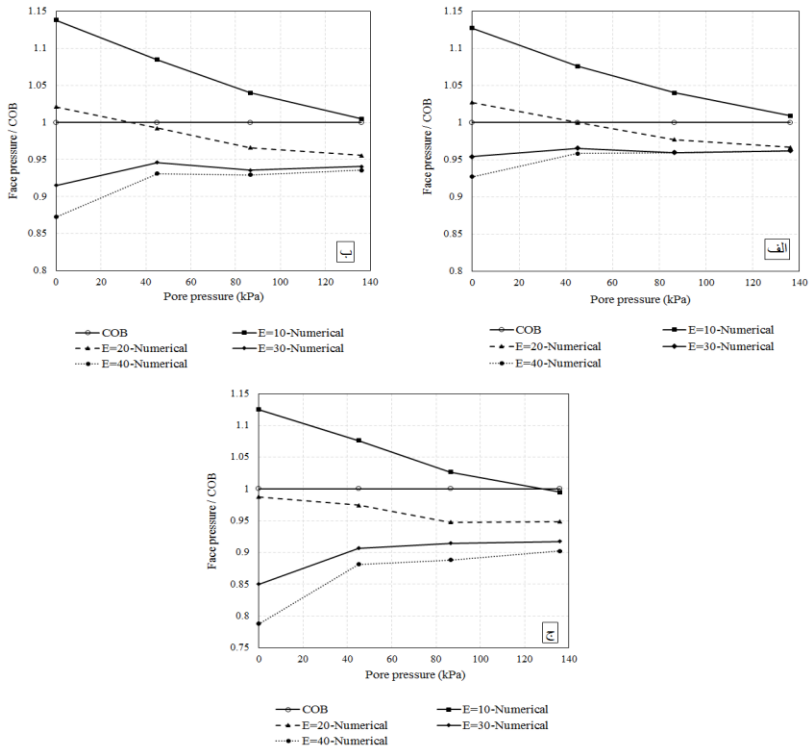
شکل **۹. زاویهٔ اصطکاک داخلی- فشارجبهه کار نرمالیز شده برای تراز آب الف) ۰، ب) ۹، ج) ۲۷ متری از سطح زمین**

تأثیر تراز آب زیرزمینی

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

ارائه می‌دهد که با افزایش تراز آب زیرزمینی این اختلاف کم‌تر می‌شود. هم‌چنین، در تمامی حالت با افزایش تراز سطح آب زیرزمینی اختلاف مقادیر فشار جبهه کار به‌دست آمده از رابطهٔ COB و فشار مناسب جبهه کار کم‌تر می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود در تمامی زاویه‌های اصطکاک داخلی، در مقادیر مدول الاستیسیته کم (برای تحقیق حاضر ۲۰ مگاپاسکال و کم‌تر) به مقدار فشار جبهه کار بیش‌تری نسبت به مقدار محاسبه شده به‌وسیلهٔ رابطهٔ COB نیاز است که نشان‌دهندهٔ ضرورت اعمال پارامتر مدول الاستیسیته در تعیین فشار مناسب جبهه کار است.



شکل ۱۰. فشار آب حفره‌ای- فشار جبهه کار نرمالیز شده برای زاویهٔ اصطکاک داخلی الف) ۲۵، ب) ۳۰ ، ج) ۳۵ درجه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

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-سازی‌های عددی برای به‌دست آوردن فشار مناسب جبهه کار را پررنگ‌تر می‌کند.

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 بیش‌تر 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.

جدول ۷. مقایسهٔ مقادیر فشار جبهه کار (کیلوپاسکال)

شماره مدل	COB		K_{active}	Jancsecz & Kovari		Anagnostou & Kovari		نتایج عددی
۱	۲۱۲	L	L	۱۹۲	۱۷۲	L	۱۶۹	L	۲۱۴
۲	۲۱۲	H	L	۱۹۲	۱۷۲	L	۱۶۹	L	۲۰۵
۳	۲۱۲	H	L	۱۹۲	۱۷۲	L	۱۶۹	L	۲۰۴
٤	۲۱۲	H	L	۱۹۲	۱۷۲	L	۱۶۹	L	۲۰۴
۵	۲۰۲	L	L	۱۸۲	۱۶۵	L	۱۵۸	L	۲۰۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

شماره مدل	COB		K_{active}		Jancsecz & Kovari		Anagnostou & Kovari		نتایج عددی
٦	٢٠٢	H	L	١٨٢	L	١٦٥	L	١٥٨	١٩٣
٧	٢٠٢	H	L	١٨٢	L	١٦٥	L	١٥٨	١٩٠
٨	٢٠٢	H	L	١٨٢	L	١٦٥	L	١٥٨	١٨٩
٩	١٩٤	H	L	١٧٤	L	١٦٠	L	١٥١	١٩٣
١٠	١٩٤	H	L	١٧٤	L	١٦٠	L	١٥١	١٨٤
١١	١٩٤	H	L	١٧٤	L	١٦٠	L	١٥١	١٧٨
١٢	١٩٤	H	L	١٧٤	L	١٦٠	L	١٥١	١٧٥
١٣	١٤٥	L	L	١٢٥	L	٩٧	L	٧٥	١٥٦
١٤	١٤٥	-	L	١٢٥	L	٩٧	L	٧٥	١٤٥
١٥	١٤٥	H	L	١٢٥	L	٩٧	L	٧٥	١٤٠
١٦	١٤٥	H	L	١٢٥	L	٩٧	L	٧٥	١٣٩
١٧	١٣٠	L	L	١١٠	L	٨٧	L	٦٧	١٤١
١٨	١٣٠	H	L	١١٠	L	٨٧	L	٦٧	١٢٩

شماره مدل	COB		K_{active}		Jancsecz & Kovari		Anagnostou & Kovari		نتایج عددی
١٩	١٣٠	H	L	١١٠	L	٨٧	L	٦٧	١٢٣
٢٠	١٣٠	H	L	١١٠	L	٨٧	L	٦٧	١٢١
٢١	١١٨	L	L	٩٨	L	٨٠	L	٦١	١٢٧
٢٢	١١٨	H	L	٩٨	L	٨٠	L	٦١	١١٥
٢٣	١١٨	H	L	٩٨	L	٨٠	L	٦١	١٠٧
٢٤	١١٨	H	L	٩٨	L	٨٠	L	٦١	١٠٤
٢٥	١١٠	L	L	٩٠	L	٥٨	L	٤٧	١٢٤
٢٦	١١٠	L	L	٩٠	L	٥٨	L	٤٧	١١٣
٢٧	١١٠	H	L	٩٠	L	٥٨	L	٤٧	١٠٥
٢٨	١١٠	H	L	٩٠	L	٥٨	L	٤٧	١٠٢
٢٩	٩٤	L	L	٧٤	L	٤٧	L	٣٤	١٠٧
٣٠	٩٤	L	L	٧٤	L	٤٧	L	٣٤	٩٦
٣١	٩٤	H	L	٧٤	L	٤٧	L	٣٤	٨٦
٣٢	٩٤	H	L	٧٤	L	٤٧	L	٣٤	٨٢
٣٣	٨٠	L	L	٦٠	L	٣٩	L	٢٤	٩٠
٣٤	٨٠	H	L	٦٠	L	٣٩	L	٢٤	٧٩
٣٥	٨٠	H	L	٦٠	L	٣٩	L	٢٤	٦٨
٣٦	٨٠	H	L	٦٠	L	٣٩	L	٢٤	٦٣

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

نتیجه‌گیری

به‌منظور تخمین فشار مناسب جبهه کار حفاری تونل‌های مکانیزه که در خاک‌های دانه‌ای حفاری می‌شوند، در این پژوهش مقادیر فشار مورد نیاز جبهه کار حفاری تونل از سه روش تحلیلی K_{active}، جانکسز - استاینر، آنگونستا - کواری و هم‌چنین روش تجربی COB محاسبه شده و مقادیر حاصل با نتایج مدل‌سازی عددی سه‌بعدی انجام یافته با نرم‌افزار ABAQUS مقایسه شده است. با انتخاب مقادیر مختلف برای زاویهٔ اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته خاک پیرامون تونل و هم‌چنین تراز ایستابی، تأثیر این پارامترها بر میزان فشار مورد نیاز جبهه کار تونل بررسی شده است. از مهم‌ترین نتایج حاصل می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- بر اساس نتایج حاصل برای مشخصات خاک بررسی شده روش تحلیلی آنگونستا - کواری کم‌ترین مقدار و روش K_{active} بیش‌ترین مقدار را برای فشار مورد نیاز جبهه کار حفاری تونل ارائه می‌دهد. به‌طورکلی مقادیر حاصل از روش‌های تحلیلی کم‌تر از مقادیر حاصل از روش تجربی و هم‌چنین نتایج مدل‌سازی عددی است. با توجه به این‌که مقادیر پیشنهادی روش‌های تحلیلی بر مبنای روش‌های حدی بوده و حداقل‌های لازم برای جلوگیری از ریزش جبهه کار تونل را ارائه می‌دهد این امر منطقی است.
- در مقایسه با روش‌های تحلیلی، نتایج حاصل از روش تجربی تخمین مناسب‌تری را از مقادیر فشار مناسب جبهه کار که بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی تعیین شده است، ارائه می‌دهد. چنان‌چه در جدول ۷ به‌طورکلی در مقادیر مدول الاستیسیته بالا (۳۰ و ٤۰ مگاپاسکال در پژوهش حاضر) روش تجربی مقادیر فشار جبهه کار بیش‌تری را نسبت به نتایج مدل‌سازی عددی ارائه می‌دهد، به‌طوری‌که میزان این تفاوت از حدود ٤ درصد (زاویهٔ اصطکاک داخلی ۲۵ و خاک اشباع) تا حدود ۲٤ درصد (زاویهٔ اصطکاک داخلی ۳۵ و خاک خشک) است. در مقادیر پایین مدول الاستیسیته، روش تجربی مقادیر کم‌تری ارائه می‌دهد که نیازمند توجه ویژه به این امر در پروژه‌های حفاری تونل است. این اختلاف با کاهش تراز آب زیرزمینی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که از حدود ۱ درصد در خاک اشباع به حدود ۱۲ درصد در خاک خشک می‌رسد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

- بر اساس نتایج جدول ۷، نتایج حاصل از روش تحلیلی K_{active} 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 روش‌های تحلیلی ارائه شده و هم‌چنین روش تجربی COB در نظر گرفته نشده است، در حالی‌که نمودارهای جابه-جایی جبهه کار تونل حاصل از مدل‌سازی عددی در مقادیر متفاوت مدول الاستیسیته کاملاً متفاوت است. به‌منظور 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 سه‌بعدی فرآیند حفاری تونل امکان‌پذیر است، ضروری به‌نظر می‌رسد.

منابع

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

5. Broere W., "Tunnel Face Stability & New CPT Applications", PhD Thesis, Delft University of Technology (2001).
6. Pan Q., Dias D., "Upper-bound analysis on the face stability of a non-circular tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, 62 (2017) 96-102.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
12. 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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

۱۳. خیراندیش ا.، فاروق حسینی م.، طالبی‌نژاد ع.، "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) ۳۷-۴۸.

۱٤. حیدریان پ.، فاطمی عقدا س م.، نورزاد ع.، "تحلیل پایداری جبهه تونل (مطالعهٔ موردی: خط ۲ متروی کرج"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، ۷، (۲) (۱۳۹۲).

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

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

17. 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.

18. 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 تونل‌های منفرد شهری در آبرفت درشت‌دانه با استفاده از روش اجزا مجزا"، مجلهٔ علمی پژوهشی عمران مدرس، ٤ (١٤) (۱۳۹۳) ۱۷۹-۱۸۸.

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

21. 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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]

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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.3.1]