

بررسی تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین در مدل‌های رفتاری مختلف خاک با استفاده از روش تفاضل محدود سه بعدی (مطالعه موردی: خط A مترو قم)

پژوهشی

عارف جابری^{۱*}؛ شکراله زارع^۲

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Jaberi@shahroodut.ac.ir

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، zare@shahroodut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

شماره صفحات: ۹۵ تا ۱۱۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.11907.1454

واژگان کلیدی	چکیده
معیار موهر کولمب دراگر پراگر مدل سخت‌شونده فشار جبهه‌کار روش تفاضل محدود	در تونل‌های شهری که بیش‌تر در عمق کم و در بستر خاکی حفر می‌شوند، فشار جبهه کار می‌تواند یکی از عوامل پیشگیری کننده نشست سطح زمین باشد. از بین روش‌های مختلف تعیین فشار جبهه کار، روش عددی بهترین روش است. انتخاب مدل رفتاری مناسب یکی از اساسی‌ترین مراحل در تحلیل عددی است. در اکثر مدل‌سازی‌های عددی حفر تونل از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده می‌شود این مدل رفتاری غالباً منجر به پیش‌بینی نشست کمتر سطح زمین نسبت به نتایج ابزاربندی می‌شود. در این تحقیق تاثیر شش حالت فشار جبهه کار در مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک شامل مدل رفتاری موهر کولمب، مدل رفتاری سخت‌شونده و مدل رفتاری دراگر پراگر بررسی شده است. در راستای این تحقیق، مترو خط A قم به کمک روش تفاضل محدود مدل‌سازی شده است. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل عددی با استفاده از نتایج رفتارسنجی و مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشست سطح زمین، اعتبارسنجی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر با افزایش فشار جبهه کار مقدار نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند. در مدل رفتاری سخت‌شونده، نتایج اندکی پیچیده‌تر بوده و با افزایش فشار جبهه کار تا دو برابر مقدار فشار اولیه میزان نشست سطح زمین کاهش و با افزایش بیشتر فشار جبهه کار این مقدار نشست افزایش یافته است. نتایج مدل‌سازی با مقادیر ابزاربندی مقایسه و نشان از اختلاف کمتر مدل رفتاری سخت‌شونده با نتایج ابزاربندی نسبت به دو مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر دارد.

وجود سازه‌های سطحی که به نشست‌های ناشی از تونل سازی حساس هستند، کار را پیچیده‌تر می‌نماید (Sebastianelli, et al., 2013).

تعیین فشار جبهه کار موردنیاز برای پایداری جبهه کار از مهم‌ترین پارامترها هم در مرحله طراحی و هم در حین اجرا برای یک تونل به‌وسیله سپرها است. چراکه جلوگیری از ناپایداری جبهه کار تونل هم از نظر ایجاد شرایط لازم جهت

۱- پیش‌گفتار

نیاز روزافزون به سیستم حمل‌ونقل عمومی و پایدار در مناطق شلوغ شهری توسعه هرچه بیشتر مترو را در این نواحی می‌طلبد. عملیات حفاری و ساخت مترو با چالش‌هایی مانند هزینه بالا و زمان طولانی تکمیل عملیات روبه‌رو است. این چالش‌ها در مناطق پرتراکم شهری شدیدتر است. چراکه

در طول دهه‌های اخیر افزایش استفاده از روش‌های عددی برای تخمین و پیش‌بینی نشست در سطح زمین ناشی از تونل‌سازی سپری قابل‌مشاهده است. این تخمین در ابتدا به کمک مدل‌سازی‌های دو بعدی صورت گرفت و در سال‌های اخیر با توجه به گسترش مدل‌های عددی سه بعدی به‌طور دقیق‌تر گسترش یافت.

فینو و کلاف اثر فشار نگهدارنده جبهه‌کار در روش EPB و لایه‌بندی زمین بر روی تغییر شکل‌های سطحی به‌طور دوبعدی مورد بررسی قرار دادند (Finno & Clough, 1985).

حیدری و همکاران تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونل‌سازی مکانیزه در تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران مورد بررسی قرار دادند (Heidari, et al., 2012). ابو فرسخ و تومای نیز به صوت دو بعدی مطالعاتی را برای تعیین اثر فشار نگهدارنده جبهه‌کار، نرخ تحکیم یافتن زمین و عمق تونل کاری بر تغییر شکل‌های سطحی زمین و افزایش فشار منفذی انجام دادند (Abu-Farsakh & Tumay, 1999). منصور اثرات فشار نگهداری جبهه‌کار، فشار تزریق و مشخصات خاک را بر نشست در سطح زمین با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی بررسی کردند (Mansour, 1996). از مهم‌ترین کارهای انجام‌شده می‌توان به مدل سه‌بعدی اجزا محدود کسپر و مسک و مسک و همکاران اشاره کرد. آن‌ها مدل‌سازی سه‌بعدی را برای تونل‌سازی سپری در خاک‌های نرم و اشباع انجام دادند (Kasper & Meschke, 2006). روش‌های عددی دیگری نیز در مورد فشار جبهه‌کار وجود دارد (Mollon, et al., 2009), (Eisenstein, (Sun, et al., 2006), (Ohta, et al., 2000), (Vermeer, et al., 2002), & Ezzeldine, 1995). بحث تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف در برآورد میزان تغییر شکل‌ها نیز تحقیقات متعددی انجام شده است. حجازی و همکاران در پژوهشی با عنوان تاثیر مدل‌های رفتاری بر تحلیل عددی سازه‌های زیرزمینی، به بررسی سه مدل رفتاری موهر کولمب، خاک سخت‌شونده و خاک سخت‌شونده با کرنش‌های کوچک پرداخته است (Hejazi, et al., 2008). لامبروگی و همکاران با مدل عددی سه بعدی و به کمک سه مدل رفتاری الاستیک خطی، موهر

برش و پیشروی و هم از نظر کنترل جابجایی‌های افقی و عمودی در سطح زمین حایز اهمیت است. اعمال فشار کمتر و یا بیشتر از حد تعادلی به جبهه‌کار به ترتیب باعث فرونشست و بالازدگی در جبهه‌کار و سطح زمین می‌شود. بنابراین برآورد مناسب فشار جبهه‌کار، برای دستیابی به شرایط جبهه‌کار پایدار و رعایت الزامات تونل‌زنی در محیط شهری که شامل کنترل نشست سطحی هست، ضروری است و هرگونه اشتباه در این امر چه در مرحله طراحی و چه در مرحله اجرا می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری شود (Kim & Tonon, 2010). تعیین دقیق مقدار فشار جبهه‌کار برای جلوگیری از ناپایداری به عوامل مختلفی از جمله چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، میزان نفوذپذیری زمین، نوع دستگاه TBM، سرعت پیشروی، وزن مخصوص دوغاب یا خاک بهسازی شده، قطر تونل، میزان روباره و سطح ایستایی بستگی دارد (Guglielmetti, et al., 2008). جهت پیش‌بینی فشار مورد نیاز جهت نگهداری جبهه‌کار تونل از روش‌های مختلف تجربی، تحلیلی، فیزیکی و عددی استفاده می‌شود. در روش‌های تجربی بر اساس مشاهدات انجام‌شده در حین حفاری تونل، رابطه‌ی تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار جبهه‌کار برقرار می‌شود (Kanayasu, et al., (Guglielmetti, et al., 2008), (Mori, et al., (German Standard, 2007), 1995). در روش‌های تحلیلی پارامترهای متعددی در تعیین فشار جبهه‌کار لحاظ می‌شود و روابطی بر پایه این پارامترها از طریق معادلات تئوری ارائه می‌شود که به دو دسته روش‌های تعادل حدی کلی و آنالیز حدی تنش تقسیم می‌شوند (Leca & Dormieux, (Broere, 2001), (1990), (Mollon, et al., 2009). روش مدل‌سازی فیزیکی حاصل آزمون‌های آزمایشگاهی است. در مطالعات انجام‌شده در مدل‌سازی فیزیکی بیشتر از تست سانتریفیوژ استفاده شده است (Ahmed, (Broms & Bennermark, 1967), (Chapman, et al., (Kimura, 1981), & Iskander, 2012), (Kirsch, (Chambon & Corte, 1994), al., 2017). روش‌های عددی با توسعه سریع ابزار محاسباتی و توانایی این روش در حل مسائل پیچیده به روشی محبوب تبدیل شده‌اند. با استفاده از روش عددی می‌توان بر بسیاری از محدودیت‌های روش تجربی و روش‌های تحلیلی فائق آمد.

تغییر صلبیت آن در مقادیر کرنش‌های مختلف، مدول‌های متفاوتی برای آن قابل تعریف است. به همین دلیل استفاده از مدل‌هایی که خواص غیرخطی قبل از شکست و همچنین تغییرات سختی خاک را در نظر می‌گیرند، می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری از جابه‌جایی‌ها داشته باشد. وجود پدیده‌های شاخص از جمله رفتار بازگشت‌ناپذیر، شکست و اتساع در مصالح خاکی، اهمیت مدل رفتاری خاک را در مسائل مهندسی نشان می‌دهد و این پدیده‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های رفتاری ساده و یا مدل‌های الاستوپلاستیک کامل توانایی لازم برای بررسی مسایل مهندسی مرتبط با اندرکنش زمین و تونل را ندارند (Obrzud, 2010).

مطالعات عددی متعددی در زمینه مدل‌سازی تونل‌های شهری انجام شده است. مدل‌سازی مرتبط با این پژوهش به دو دسته تقسیم می‌شوند در دسته اول، پژوهش‌های مرتبط با تاثیر فشار جبهه‌کار با در نظر گرفتن یک مدل رفتاری مدنظر قرار گرفته است. در دسته دوم مدل‌سازی‌ها مدل‌های رفتاری مختلف با در نظر گرفتن تنها یک فشار جبهه‌کار مورد بررسی قرار گرفته است و فشارهای جبهه‌کار مختلف در آن مدنظر نبوده است؛ بنابراین در این مقاله فشارهای جبهه‌کار مختلف و مدل‌های رفتاری سخت‌شونده، درآگر پراگر و موهر کولمب به طور همزمان برای تعیین فشار بهینه جبهه‌کار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- ویژگی مدل‌های رفتاری اعمالی

۲-۱- مدل رفتاری موهر کولمب

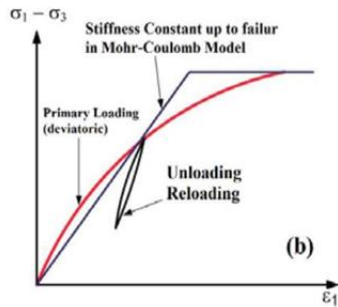
مدل موهر کولمب یک مدل الاستیک - پلاستیک کامل و رایج‌ترین مدل برای نمایش شکست‌های برشی در خاک و سنگ است. معیار تسلیم موهر کولمب بر اساس تنش‌های اصلی یک شش‌وجهی نامنظم است و محور اصلی آن مکان هندسی سطح تسلیم را نمایش می‌دهد. برای نشان دادن رفتار تنش کرنش در این مدل رفتاری نیاز به پنج پارامتر ورودی می‌باشد. این پارامترها شامل دو پارامتر الاستیک از قانون هوک شامل مدول یانگ و نسبت پواسون، دو پارامتر از معیار شکست کولمب شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی و یک پارامتر از قانون جریان شامل زاویه اتساع است. در میان مدل‌های رفتاری مختلف، این مدل رفتاری به دلیل سادگی و داده‌های ورودی کمتر کاربرد بیشتری نسبت

کولمب و کم کلی اصلاحی جنبه‌های ساخت حفاری مکانیزه و تاثیر آن‌ها بر جابجایی زمین را مورد بررسی قرار داده است (Lambrugh, et al., 2012). دو و همکاران به بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری موهر کولمب و پوش تسلیم در حفاری مکانیزه تونل پرداختند. نتایج نشان داده است که به طور کلی مدل پوش تسلیم نیروی سازه‌ای و نشست سطح زمین بیشتری را به نسبت مدل موهر کولمب ارائه می‌دهد (Do, 2014). وکیلی و همکاران در پژوهشی به بررسی تاثیر سه مدل موهر کولمب، سخت‌شونده و مدل سخت‌شونده کرنش کوچک پرداخته است (Vakili, et al., 2014). صیادی به بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف در جابجایی تونل در روش حفاری متوالی پرداخته و نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌های پیشرفته که خواص غیرخطی قبل از شکست و سختی بالای خاک در کرنش‌های کوچک را در نظر می‌گیرد، نتایج بهتری ارائه می‌دهد (Sayadi, 2015). لیتساس و همکاران به کمک روش عددی المان محدود به بررسی تاثیر مدل‌های موهر کولمب و کم کلی اصلاح شده پرداخته است (Litsas, et al., 2018). زاکم و ال ناگار به بررسی تاثیر مدل رفتاری سخت‌شونده، سخت‌شونده با کرنش کوچک، مدل کم کلی اصلاحی و مدل نرم شونده در تونلی در شانگ‌های چین پرداخته است (Zakhem & El Naggar, 2019). نعمت الهی و دیاس به بررسی تاثیر مدل رفتاری موهر کولمب و مدل رفتاری پوش تسلیم در خط دو مترو شیراز پرداخته است (Nematollahi & Dias, 2019). اسلامی و همکاران تاثیر مدل‌های رفتاری موهر کولمب و کم کلی اصلاح شده را بر میزان نشست سطح زمین در خط دو مترو مشهد مورد بررسی قرار دادند (Eslami, et al., 2020).

یکی از اساسی‌ترین مراحل تحلیل‌های عددی برای توصیف رفتار مکانیکی خاک، انتخاب مدل رفتاری مناسب است. انتخاب مدل رفتاری مناسب نقش بسیار کلیدی در صحت و دقت نتایج مدل عددی به‌ویژه در مسائل غیرخطی با اندرکنش تونل و زمین درون‌گیر خواهد داشت (Gulvanessian, et al., 2002).

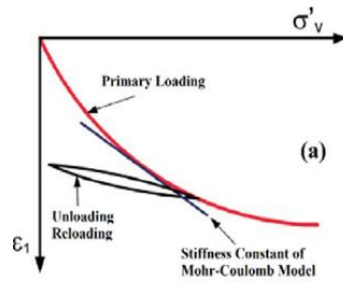
یکی از مشکل‌ترین پارامترها برای تخمین، به‌منظور توصیف رفتار مکانیکی خاک، مدول تغییر شکل خاک است که به‌واسطه رفتار غیرخطی خاک در منحنی تنش-کرنش و

باربرداری مواد به‌ویژه در خاک قایل نمی‌شود (CELİK, 2017). تفاوت بین پیش‌بینی صلبیت در مدل موهر کلمب و آزمایش‌های واقعی مانند آزمایش سه محوری روی نمونه خاک در شکل ۱، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت قابل توجهی بین رفتار واقعی مواد و مدل پیش‌بینی موهر کولمب وجود دارد.



(b) سه محوری

به سایر مدل‌ها دارد. از این مدل رفتاری می‌توان در مسائلی مانند ظرفیت باربری خاک یا پایداری شیب استفاده کرد. در مقابل این مدل رفتاری نقص‌های اساسی در تجزیه و تحلیل مسائل تغییر شکل مانند تونل زنی و حفاری دارد. یکی از نقاط ضعف این مدل در مورد مسائل مربوط به حفاری است که در آن صلبیت ثابت بوده و تمایزی بین بارگذاری و



(a) تک‌محوری

شکل ۱- نمایی شماتیک از نتایج آزمایش فشاری (ÇELİK, 2017)

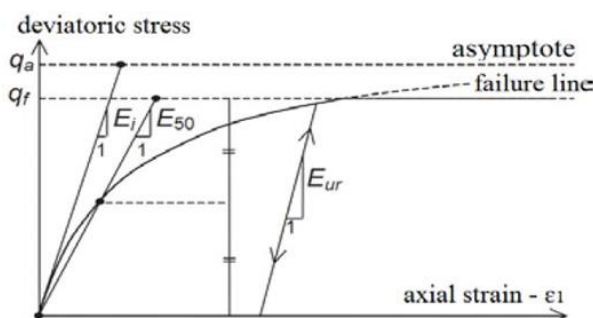
(E_{50}^{ref}) ، مدول باربرداری و بارگذاری (E_{ur}^{ref}) ، مدول بارگذاری اذئومتری (E_{50}^{oed}) توصیف می‌شود. رفتار خاک در مدل سخت‌شونده پس از شکست، بر اساس پارامترهای مقاومت موهر کولمب (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) تعیین می‌شود. این مدل رفتاری در بردارنده دو مکانیزم سخت‌شوندگی شامل مکانیزم برشی برای مدل‌سازی کرنش‌های برشی برگشت‌ناپذیر تحت بارگذاری تفاضلی و مکانیزم سخت‌شوندگی تراکمی به منظور مدل‌سازی کرنش‌های حجمی بازگشت‌ناپذیر در اثر بارگذاری فشاری اولیه است. سخت‌شوندگی برشی، تابعی از صلبیت بارگذاری سه محوری (E_{50}^{ref}) بوده و سخت‌شوندگی تراکمی نیز برای تعیین کرنش پلاستیک ناشی از بارگذاری فشاری اولیه، توسط صلبیت اذئومتری (E_{50}^{oed}) کنترل می‌شود.

رفتار کلی تنش کرنش، همراه با مدول‌های تغییر شکل مختلف برای مدل رفتاری سخت‌شونده در شکل ۲، نشان داده شده است. مدل رفتاری سخت‌شونده به دلیل استفاده از مدول‌های تغییر شکل (صلبیت) وابسته به سطح تنش، رفتار تنش کرنش به‌ویژه کرنش‌های الاستیک و پلاستیک را با سطح قابل‌قبول‌تری نسبت به مدول الاستوپلاستیک پیش‌بینی می‌کند (ÇELİK, 2017).

۲-۲- مدل رفتاری سخت‌شونده

مدل رفتاری سخت‌شونده یکی از مدل‌هایی است که بر مبنای مکانیک خاک حالت بحرانی توسعه داده شده است. این مدل شامل دو حالت استاندارد و کرنش‌های کوچک است. در مدل رفتاری سخت‌شونده، کرنش کلی بر اساس مقدار تنش وابسته به سختی محاسبه می‌شود که مقدار آن در بارگذاری و باربرداری متفاوت بوده و فرض بر این است که شرایط ایزوتروپیک بر توده خاک حاکم است. از این مدل می‌توان برای بررسی رفتار سیلت‌های رسی، خاک‌های شنی و ماسه‌ای و خاک‌های رسی با نسبت پیش‌تحکیمی پایین استفاده کرد. بیشترین کاربرد این مدل در بحث باربرداری و بارگذاری مجدد در خاک مانند رفتار خاک در گودبرداری‌ها و تونل‌ها می‌باشد.

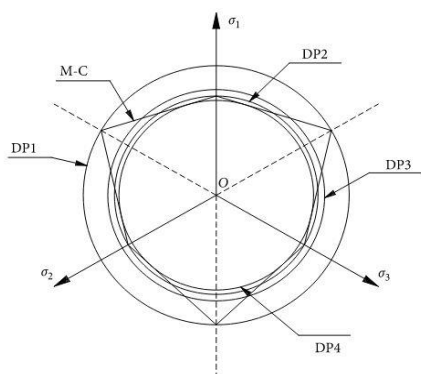
این مدل با هدف بازتولید پدیده‌های ماکروسکوپی موجود در خاک طراحی شده است. سطح تسلیم در مدل‌های با مکانیزم سخت‌شونده در فضای تنش‌های اصلی موقعیت ثابتی نداشته (امکان توسعه سطح تسلیم در اثر تغییر شکل پلاستیک) و امکان بازتولید حالت‌های پس از شکست به‌صورت واقع‌بینانه‌تری فراهم می‌شود. در این مدل، رفتار خاک پیش از شکست غیرخطی بوده و با استفاده از سه پارامتر مدول صلبیت شامل مدول بارگذاری سه محوره



شکل ۲- رابطه تنش کرنش هذلولی استفاده در مدل خاک سخت‌شونده (ÇELİK, 2017)

اصلی است. در صفحه π ، سطح تسلیم یک دایره است (Pan, et al., 2012).

بر اساس چگونگی ارتباط بین معیار دراگر پراگر و معیار موهر کولمب در صفحه π (شکل ۳)، روابط متعددی برای محاسبه K و a_φ وجود دارد که در جدول ۱، مشاهده می‌شود (Yang, et al., 2018).



شکل ۳- حالت‌های مختلف قرارگیری دو معیار شکست در صفحه (Yang, et al., 2018)

۲-۳- مدل رفتاری دراگر - پراگر

معیار دراگر پراگر مشابه معیار موهر کولمب می‌باشد. این معیار شکست مخروطی را به‌عنوان پوش شکست در فضای سه بعدی به جای یک هرم شش وجهی که مربوط به معیار موهر کولمب می‌باشد ایجاد می‌کند (Konietzky & Ismael, 2017). معیار موهر کولمب را برای توصیف مکانیزم تسلیم و شکست مواد می‌توان به کار برد. در این معیار وقتی جریان پلاستیک در گوشه‌های سطح تسلیم وجود داشته باشد باعث مشکلاتی می‌شود. معیار دراگر پراگر از پایای سوم تنش انحرافی در سطح تسلیم صرف نظر میکند و آن را می‌توان به عنوان یک تلاش اولیه برای تخمین معیار موهر کولمب توسط تابع مسطح در نظر گرفت. این معیار به‌صورت زیر است:

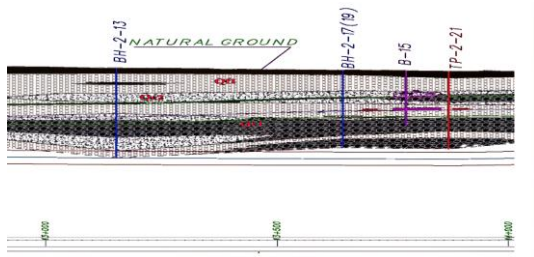
$$F = a_\varphi I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (1)$$

K و a_φ ثابت‌های مواد هستند که هر دو به چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مرتبط هستند. سطح تسلیم این معیار یک مخروط راست دایره‌ای در فضای تنش

جدول ۱- نحوه محاسبه پارامترهای معیار دراگر پراگر (Yang, et al., 2018)

شماره	نوع معیار	a_φ	K
DP1	معیار موهر کولمب از گوشه‌های بیرونی محدود شده، یک معیار تسلیم دایره‌ای است	$(2 \sin \varphi) / (\sqrt{3}(3 - \sin \varphi))$	$(6c \cos \varphi) / (\sqrt{3}(3 - \sin \varphi))$
DP2	معیار موهر کولمب از گوشه‌های درونی محدود شده، یک معیار تسلیم دایره‌ای است	$(2 \sin \varphi) / (\sqrt{3}(3 + \sin \varphi))$	$(6c \cos \varphi) / (\sqrt{3}(3 + \sin \varphi))$
DP3	معیار موهر کولمب بر اساس مساحت معادل، یک معیار تسلیم دایره‌ای است	$(2\sqrt{3} \sin \varphi) / (\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \varphi)})$	$(6\sqrt{3}c \cos \varphi) / (\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \varphi)})$
DP4	معیار موهر کولمب با دوایر منطبق، برای مسائل کرنش مسطح با قوانین جریان مرتبط	$(\sin \varphi) / (\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin \varphi})$	$(\sqrt{3}c \cos \varphi) / (\sqrt{3 + \sin \varphi})$

بینی و انجام شده‌اند. در دو مرحله مطالعات ژئوتکنیکی صورت گرفته در این آزمون‌های صحرایی از قبیل آزمون نفوذ استاندارد ۲۹۷ مورد، آزمون پرسیومتر ۶۹ عدد و آزمون لوفران در گمانه‌های ماشینی ۲۹ عدد و آزمون بارگذاری صفحه‌ای ۱۹ عدد، برش برجا ۸ عدد انجام شده است (Sahel Consulting Engineers, 2011).



شکل ۴- بخشی از مقطع زمین‌شناسی مورد بررسی
کیلومتر ۱۳ تا ۱۴ (Sahel Consulting Engineers, 2011)

حفاری بخش عمده تونل مترو قم (بیش از ۱۰ کیلومتر) به روش مکانیزه و با استفاده از یک دستگاه ماشین حفار EPB انجام شده است که قطر تونل برابر ۹/۴ متر و سیستم نگهداری آن از نوع قطعات پیش‌ساخته بتنی بوده است (Sahel Consulting Engineers, 2011). از آنجاکه سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از عمق اجرای پروژه است، محیط مدل‌سازی بدون حضور آب در نظر گرفته شد.

۴- مدل‌سازی عددی سه بعدی به روش تفاضل محدود

مدل‌سازی بخشی از کیلومتر ۱۳ تا ۱۴+۰۰۰ خط A مترو قم با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D که یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم‌افزارهای شرکت ITASCA است و برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود انجام شده است. دلیل انتخاب این بخش از تونل مترو در دست بودن اطلاعات مدل رفتاری سخت‌شونده آن می باشد.

۴-۱- هندسه و ابعاد مدل

در مدل‌سازی‌های عددی، انتخاب اندازه‌ی مش و فواصل بین گره‌ها، هم از نظر دقت پاسخ‌های به‌دست‌آمده و هم از نقطه‌نظر مدت‌زمان لازم برای حل مساله دارای اهمیت است. در این تحقیق به‌منظور دستیابی به یک حالت بهینه ابعاد مش‌بندی مختلف ساخته و زمان اجرای آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت برای دستیابی به دقت مناسب

۳- زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی خط A مترو قم

پروژه مترو خط A شهر قم با طولی حدود ۱۴/۷ کیلومتر به‌صورت زیرزمینی می‌باشد. بخش زیرزمینی از محله قلعه کامکار در تقاطع کمربندی آغاز شده و با عبور از خیابان قلعه کامکار، میدان کشاورز، خیابان امامزاده ابراهیم، میدان معصومیه و میدان سعیدی، خیابان هدف، میدان مطهری، پل علیخانی، خیابان شهید دل آذر به میدان ولیعصر می‌رسد. در ادامه، مسیر مترو در امتداد بلوار خلیج‌فارس ادامه یافته و در محل میدان بقیه ... با یک قوس به سمت میدان انتظار تغییر مسیر داده و به مسیر مسجد جمکران می‌پیوندد. در مسیر خط A، ۱۶ ایستگاه در تقاطع‌ها و میدان‌های مهم در نظر گرفته شده که با نام‌های A1 تا A16 نام‌گذاری شده‌اند.

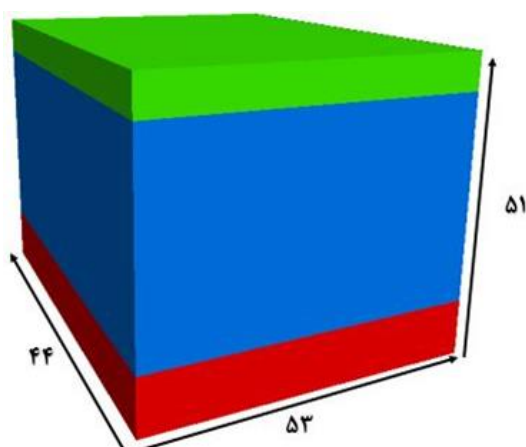
در مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته در دو مرحله از مطالعات این پروژه، لایه‌های خاکی مسیر مترو به چهار گونه زمین‌شناسی (دو واحد خاکی ریزدانه و دو واحد خاکی درشت‌دانه) تفکیک شده‌اند. دو واحد خاکی درشت‌دانه QC-1 و QC-2 گسترش نسبتاً زیادی داشته و به‌صورت لایه‌هایی نسبتاً ضخیم و بعضاً به‌صورت لنزهای نسبتاً گسترده و ضخیم در میان واحدهای خاکی ریزدانه Qf-1 و Qf-2 قابل مشاهده هستند (جدول ۲).

جدول ۲- طبقه‌بندی واحدهای خاک در مسیر تونل (Sahel Consulting Engineers, 2011)

واحد خاکی	توصیف ژئوتکنیکی
QC-1	شن ماسه‌ای و ماسه شن دار با مقداری ریزدانه
QC-2	ماسه رسی - سیلیتی همراه با شن
Qf-1	سیلیت رسی با کمی ماسه
Qf-2	رس لایه دار با کمی ماسه

در شکل ۴، پروفیل طولی مسیر و مقطع زمین‌شناسی کیلومتر ۱۳ تا ۱۴ مشاهده می‌شود. آزمون‌های صحرایی به دلیل شرایط واقعی تر آزمایش و حذف اثر دست خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی و همچنین به دلیل ابعاد بزرگتر نمونه‌ها و محیط آزمایش، نتایج واقعی‌تری را از پارامترهای خاک به دست می‌دهند. بنابراین در این پروژه به این‌گونه آزمون‌ها اهمیت بیشتری داده شده است و به تعداد کافی این آزمون‌ها در مراحل اول و دوم مطالعات ژئوتکنیکی پیش

پلاستیک طبقه‌بندی می‌شوند. این مدل‌های رفتاری عبارت‌اند از: مدل تهی (حفاری)، الاستیک همسانگرد، الاستیک ارتوتروپیک، الاستیک همسانگرد اریب، مدل دراگر پراگر، موهر کولمب، درزه‌های فراگیر، موهر کولمب نرم شونده و سخت‌شونده، درزه‌های فراگیر نرم شونده و سخت‌شونده، رفتار پلاستیک دوگانه، مدل *Cam-Clay* اصلاح‌شده، هوک و براون، هوک و براون اصلاح‌شده، مدل پوش تسلیم و مدل ساده‌شده پوش تسلیم است (*Itasca Consulting Group, 2012*)



شکل ۵- هندسه مدل سه‌بعدی ایجادشده برای مترو قم

هر یک از مدل‌های رفتاری عنوان‌شده با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و یکسری از آزمایش‌های شاخص برای شناسایی پارامترهای لازم در مدل رفتاری انتخاب می‌شود. در این پژوهش از مدل رفتاری سخت‌شونده، مدل موهر کولمب و مدل دراگر پراگر برای تحلیل استفاده‌شده است. در جدول ۳، پارامترهای ژئوتکنیکی مدل آورده شده است.

جدول ۳- پارامترهای ژئوتکنیکی لایه موردنظر مسیر تونل (*Sahel Consulting Engineers, 2011*)

پارامترها ژئوتکنیکی	واحد	لایه فوقانی	لایه میانی	لایه تحتانی
مدول الاستیسیته	KPa	۳۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰
چسبندگی	KPa	۳۱	۳۰	۳۰
زاویه اصطکاک	درجه	۲۸	۳۳	۳۳
نسبت پواسون	-	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۲
وزن مخصوص خشک	KN/m ³	۱۷	۱۸	۱۹

در تحلیل‌ها، در اطراف مناطق حفاری به دلیل آشفتگی در میدان‌های برجای تنش و همین‌طور جابجایی بزرگ‌تر، ابعاد مش‌ها نسبت به سایر نقاط در مقاطع عرضی کوچک‌تر انتخاب شده است. در امتداد طولی بلوک نیز بافاصله گرفتن از طول مورد بررسی فاصله بین گره‌ها تا انتهای بلوک به‌تدریج بزرگ‌تر انتخاب می‌شود تا در زمان کوتاه‌تری حل مساله ممکن شود.

برای تعیین ابعاد بلوک باید در نظر داشت که در مقطع عرضی و عمود بر محور تونل، عرض بلوک باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که موقعیت تنش‌ها در اطراف مرز بلوک مستقل از آشفتگی میدان تنش در اطراف حفاری باشند و مقدار آن‌ها با تنش‌های اولیه قبل از حفاری برابر باشد. به‌منظور ایجاد چنین مدلی حداقل ابعاد مدل بر اساس قوانین زیر انتخاب شده است (*Nematollahi & Molladavoodi, 2018*):

$(H+4D)$ ، برای ارتفاع مدل

$(H+3D)$ ، برای طول مدل

$(3H)$ ، برای نصف عرض مدل

H عمق تونل و D قطر تونل است

در شکل ۵، هندسه مدل ایجادشده تونل مترو قم با نرم‌افزار *FLAC3D* نشان داده‌شده است با توجه به متقارن بودن نصف مدل برای تحلیل ایجادشده است.

۴-۲- تعیین مدل رفتاری و خصوصیات مواد

گام بعدی، در انجام مدل‌سازی عددی اعمال مدل رفتاری متناسب با رفتار محیط است. در نرم‌افزار *FLAC3D V5* امکان مدل‌سازی ۱۵ نوع مدل رفتاری مصالح سنگی و خاکی وجود دارد که در سه گروه مدل‌های تهی، الاستیک و

جدول ۵- مشخصات پوشش بتنی (Sahel Consulting Engineers, 2011)

مدل رفتاری	واحد	الاستیک خطی
مدول الاستیسیته	GPa	۳۱
دانسیته	kg/m ³	۲۴۰۰
ضخامت	m	۰/۳۲
نسبت پواسون	-	۰/۲

تزریق دوغاب در پشت انتهای سپر با روش بسیار ساده‌ای با اعمال توزیع فشار مرزی در زمان تزریق شبیه‌سازی شده است (Nematollahi & Dias, 2019). برای سادگی کار، توزیع فشار تزریق در انتهای سپر به‌طور خطی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد تا تأثیر دانسیته دوغاب نیز در نظر گرفته شود. در این مدل، بر اساس داده‌های مانیتورینگ دستگاه، میانگین فشار تزریق دوغاب در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال برابر با ۱۵۰ کیلوپاسکال در کف و بالای مدل تعیین شده است.

روند کلی مدل‌سازی حفاری مترو به شرح زیر است

(شکل ۶):

- به تعادل رسیدن مدل تحت اثر وزن خود
- حفر ۱/۵ متر از تونل متناسب با طول سگمنت
- اعمال فشار جبهه‌کار در متر ۱/۵
- اعمال شرایط سپر از متر ۱/۵ تا صفر تا ۱/۵
- حل مدل برای رسیدن به تعادل
- تکرار مراحل بالا تا طول ۹ متر از مسیر برای وارد شدن کل دستگاه به تونل
- حذف کردن قسمت انتهایی سپر به اندازه یک گام حفاری
- اعمال فشار تزریق در قسمت حذف شده سپر
- سگمنت گذاری
- حل مدل برای رسیدن به تعادل
- تکرار مراحل فوق به تناسب پیشرفت حفاری تونل تا رسیدن به تعادل نهایی

۴-۳- اعمال شرایط مرزی و اولیه

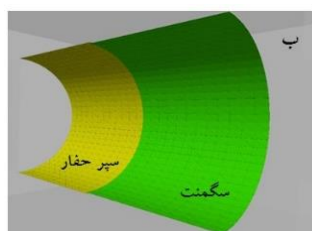
برای اعمال شرایط مرزی، ابتدا و انتهای مدل در امتداد محور X و Y با استفاده از دستور Fix ثابت شده، همچنین قسمت پایین مدل در امتداد Z نیز ثابت شد. در قسمت بالای مدل بار ناشی از ترافیک به صورت گسترده که برابر ۲۰ کیلوپاسکال بود به مدل اعمال شده است. تنش‌های برجای قائم در مدل به صورت ثقلی و نسبت تنش افقی به قائم برابر با ضریب فشار خاک در حالت سکون $K_0 = 1 - \sin\phi$ در نظر گرفته شده است، بنابراین تنش افقی به صورت $\sigma_h = (1 - \sin\phi)\sigma_v$ استفاده شده است.

۴-۴- فرایند حفاری تونل و تزریق دوغاب

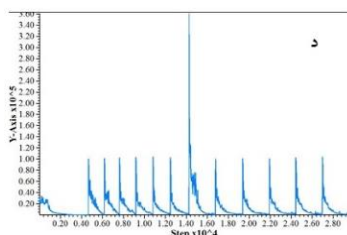
برای تطبیق هر چه بیشتر شرایط حفاری با واقعیت، مدل‌سازی عملیات حفاری به صورت مرحله‌به‌مرحله و در گام‌های ۱/۵ متری (معادل طول سگمنت) و با اعمال شرایط سپر تا متر ۹ متری (طول سپر) حفاری می‌شود، سپس با عبور متر ۹ متری از ۹ متر و حرکت دستگاه حفاری به سمت جلو در هر گام حفاری، هم‌زمان با مدل‌سازی سپر در قسمت حفاری شده یک گام حفاری از قسمت ابتدایی سپر حذف شده و المان پوسته‌ای پوشش بتنی و تزریق پشت سگمنت هم‌زمان در قسمت حذف شده سپر انجام می‌شود و تا انتهای متر ۹ متری حفاری این روند ادامه می‌یابد. مشخصات و اطلاعات مربوط به سپر ماشین حفار و مشخصات پوش سگمنتی در جدول ۴ و جدول ۵، مشاهده می‌شود.

جدول ۴- مشخصات سپر ماشین حفار (Sahel Consulting Engineers, 2011)

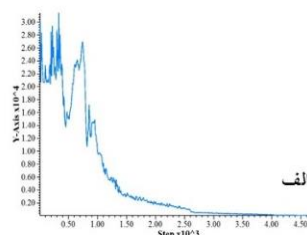
پارامترها	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته	Gpa	۲۱۰
وزن	KN/m/m	۴۸/۸
نسبت پواسون	-	۰/۲
صلبیت محوری	MN/m	۱۰۰۰۰
صلبیت خمشی	MNm ² /m	۵۰
ضخامت	m	۰/۱
طول سپر	m	۹



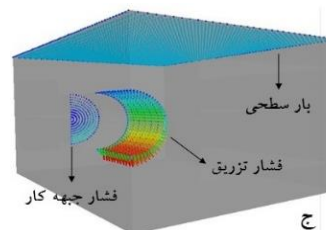
ب) مدل‌سازی سپر حفار و سگمنت‌گذاری نهایی



د) به تعادل رسیدن مدل تا مرحله نهایی



الف) به تعادل رسیدن مدل تحت وزن خود



ج) بار سطحی، فشار تزریق و فشار جبهه‌کار اعمالی در مدل‌سازی

شکل ۶- روند مدل‌سازی حفاری مترو

جدول ۶، مشاهده می‌شود در نظر گرفته شده است. فشار اولیه ۸۰ کیلوپاسکال بوده و فشار عملیاتی استفاده شده در حفاری مترو قم ۱۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد و سایر فشارهای جبهه‌کار انتخابی به ترتیب ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۳۲۰ کیلوپاسکال است.

۵- بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست

سطح زمین در مدل‌های رفتاری مختلف

به منظور بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار مختلف در نشست سطح زمین و نقش مدل‌های رفتاری مختلف در برآورده این نشست، شش فشار جبهه‌کار مختلف که اطلاعات آن در

جدول ۶- مشخصات فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در حالت‌های مختلف (Sahel Consulting Engineers, 2011)

حالت ۶	حالت ۵	حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	واحد	مشخصات فشار
۳۲۰	۲۰۰	۱۶۰	۱۲۰	۱۰۰	۸۰	KPa	فشار جبهه‌کار
۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	KPa/m	گرادبان فشار جبهه‌کار
۳۷۰	۲۵۰	۲۱۰	۱۷۰	۱۵۰	۱۳۰	KPa	فشار تزریق
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	KPa/m	گرادبان فشار تزریق

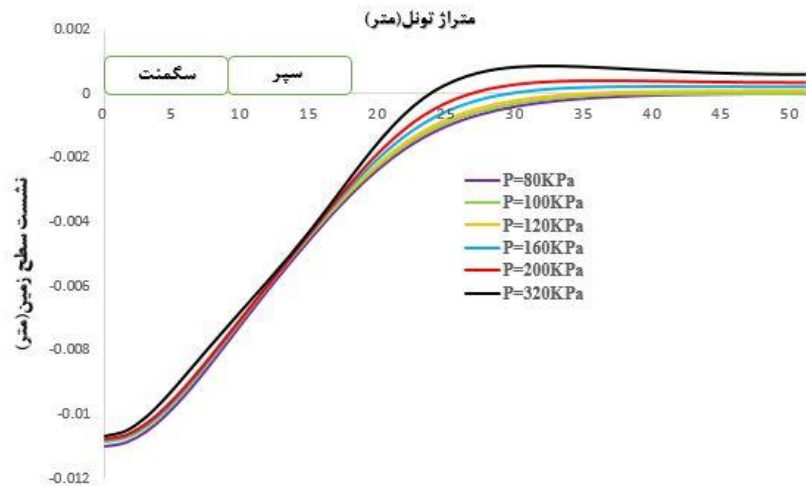
نشست سطح زمین صورت نمی‌گیرد اما باعث بالازدگی سطح زمین می‌شود که این بالازدگی با افزایش فشار جبهه‌کار تا ۴ برابر مقدار اولیه افزایش می‌یابد. درصد نشست سطح زمین از تقسیم نشست هر مقطع به بیشترین نشست رخ داده به دست می‌آید. با توجه به این موضوع، در مدل رفتاری موهر کولمب کمتر از ۲۲ درصد نشست در جلو جبهه‌کار رخ می‌دهد که با افزایش فشار جبهه‌کار تا ۴ برابر مقدار اولیه این نشست به کمتر از ۱۶ درصد در جلو جبهه‌کار می‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که

۵-۱- بررسی نتایج مدل‌سازی رفتار موهر کولمب

میزان نشست سطح در فشارهای جبهه‌کار مختلف در مدل رفتاری موهر کولمب در شکل ۷، نشان داده شده است. براساس بررسی‌ها با افزایش فشار جبهه‌کار میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند و این کاهش در میزان نشست با افزایش فشار جبهه‌کار تا ۳۲۰ کیلوپاسکال بیشتر می‌شود. حداکثر میزان نشست رخ داده در مدل رفتاری موهر کولمب برابر ۱۰/۹ میلی‌متر می‌باشد. با افزایش فشار جبهه‌کار تا ۱/۵ برابر مقدار اولیه، کاهش قابل توجهی در

نشست رخ داده در بالای سپر ۷۰ درصد می‌باشد و بیشترین درصد نشست رخ داده پس از عبور سپر حاصل شده که بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد کل نشست می‌باشد.

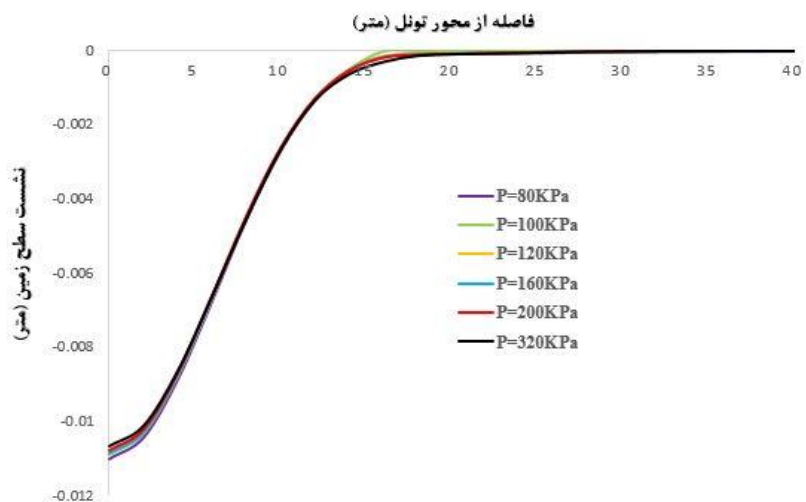
درصد نشست رخ داد در سطح زمین در این مدل رفتاری در مقطع جبهه کار برای فشارهای مختلف بین ۲۳ تا ۲۸ درصد کل نشست رخ داده در سطح زمین می‌باشد. حداکثر درصد



شکل ۷- پروفیل طولی نشست سطح زمین در مدل رفتاری موهر کولمب

ثابت کاهش یافته و با رسیدن به نقطه عطف نرخ تغییرات نشست با برعکس شدن تقعر پروفیل نشست، کاهش می‌یابد. افزایش فشار جبهه کار تاثیری در عرض گودی نشست سطح زمین نداشته و نشست سطح زمین در فاصله مشخصی از محور تونل برای فشارهای جبهه کار مختلف صفر می‌شود.

در شکل ۸، پروفیل عرضی نشست سطح زمین مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه مساله مورد بررسی دارای تقارن است تنها نیمی از پروفیل عرضی نشست سطح زمین ترسیم شده است. بیشترین نشست رخ داده در شکل ۸ در محل محور تقارن تونل رخ داده و با افزایش فاصله عرضی از محور تونل به تدریج مقادیر نشست سطحی کاهش می‌یابد. با فاصله گرفتن از محور تونل مقدار نشست با یک شیب



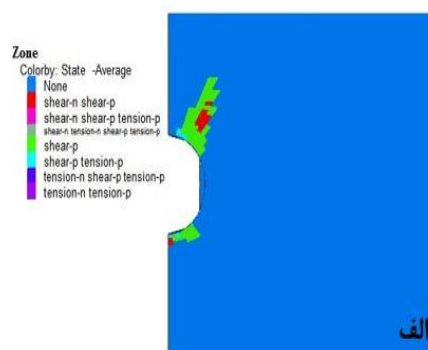
شکل ۸- پروفیل عرضی نشست سطح زمین در مدل رفتاری موهر کولمب

در شکل ۹، میزان گسترش زون پلاستیک در مدل رفتاری موهر کولمب در فشارهای ۸۰ و ۳۲۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. بررسی زون پلاستیک رخ داده در فشارهای جبهه‌کار مختلف بیان‌کننده آن است که افزایش فشار جبهه‌کار نه تنها باعث کاهش نشست قابل توجهی در سطح زمین نمی‌شود بلکه باعث گسترش شکست برشی و گسترش زون پلاستیک اطراف منطقه حفاری می‌شود. بزرگی جابجایی قائم مربوط به نشست تاج تونل و بالا آمدگی کف تونل در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است بیشترین مقدار نشست در تاج تونل حدود

۱۹/۴ میلی‌متر است که در فشار سینه کار ۸۰ کیلوپاسکال رخ می‌دهد و با افزایش فشار جبهه‌کار تا ۳۲۰ کیلوپاسکال این میزان نشست ناچ تونل کاهش می‌یابد. بیش‌ترین میزان بالا آمدگی در مدل‌سازی مترو قم با استفاده از مدل رفتاری موهر کولمب برابر ۱۴/۷۷ میلی‌متر است که در فشار ۸۰ کیلوپاسکال رخ می‌دهد و با افزایش فشار جبهه‌کار این میزان بالا آمدگی نیز کاهش می‌یابد. این میزان بالا آمدگی کف در انتهای سیر ماشین حفاری رخ داده و با سگمنت‌گذاری این بالا آمدگی کاهش می‌یابد.

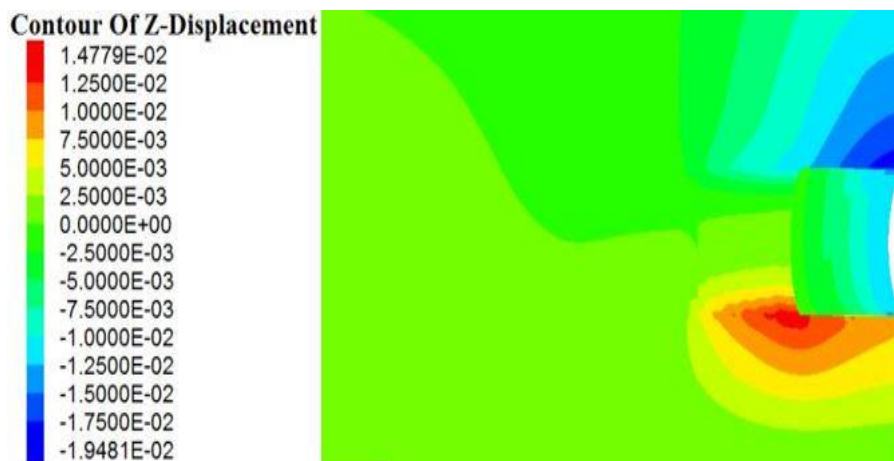


شکل ۹-ب) ۳۲۰ کیلوپاسکال



شکل ۹-الف) ۸۰ کیلوپاسکال

شکل ۹- گسترش زون پلاستیک در مدل رفتاری موهر کولمب در فشار جبهه‌کار



شکل ۱۰- میزان نشست تاج تونل و بالا آمدگی کف تونل در مدل رفتاری موهر کولمب

می‌شود. همچنین تغییرات مقاومت کششی نیز برحسب کرنش کششی پلاستیک به صورت جدولی در نرم‌افزار *FLAC3D* وارد می‌شود. مقادیر مورد استفاده برای این مدل‌سازی به شرح جدول ۷، است. سایر پارامترهای مورد نیاز

۵-۲- بررسی نتایج مدل‌سازی رفتار سخت‌شونده مدل رفتاری سخت‌شونده توسط تغییرات زاویه اصطکاک، چسبندگی و اتساع به‌عنوان تابعی از کرنش برشی کنترل

فشار جبهه کار ۱۶۰ کیلوپاسکال حادث می‌شود و در فشار جبهه کار ۳۲۰ کیلوپاسکال این میزان بالازدگی به حدود یک میلی‌متر می‌رسد.

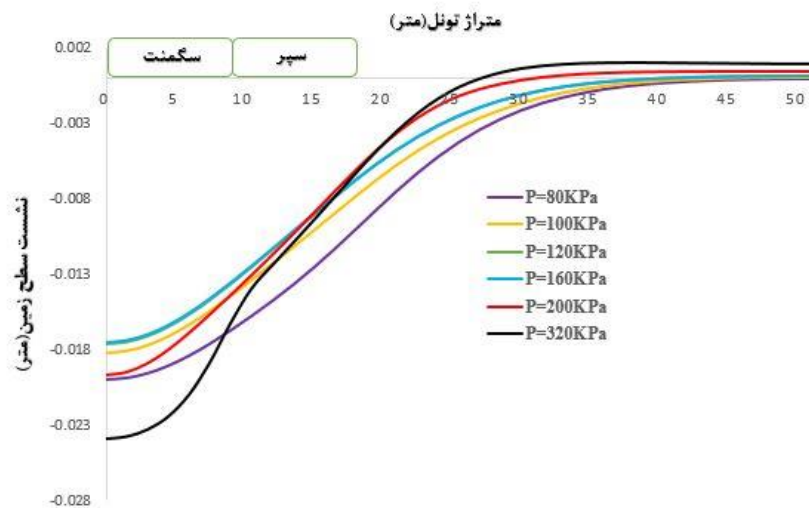
در مدل رفتاری سخت‌شونده کمتر از ۴۳ درصد نشست در جلو جبهه کار رخ می‌دهد که با افزایش فشار جبهه کار تا ۴ برابر مقدار اولیه این نشست به کمتر از ۲۰ درصد در جلو جبهه کار می‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که درصد نشست رخ داد در سطح زمین در این مدل رفتاری در مقطع جبهه کار برای فشارهای مختلف بین ۲۶ تا ۵۰ درصد کل نشست رخ داده می‌باشد. حداکثر درصد نشست رخ داده در بالای سپر ۸۳ درصد می‌باشد که این درصد نشست در فشار ۳۲۰ کیلوپاسکال ۶۷ درصد کل نشست است. بیشترین درصد نشست رخ داده نیز پس از عبور سپر حاصل می‌شود.

در مدل رفتاری سخت‌شونده مشابه مدل رفتاری موهر-کولمب است.

بر اساس بررسی انجام‌شده در مدل رفتاری سخت‌شونده مشخص شد که حداکثر میزان نشست سطح زمین در فشار ۳۲۰ کیلوپاسکال رخ می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، با افزایش فشار جبهه کار از ۸۰ کیلوپاسکال تا ۱۶۰ کیلوپاسکال مقدار نشست مقدار کاهش پیدا کرده؛ حداکثر مقدار نشست رخ داده در فشار ۳۲۰ کیلوپاسکال برابر ۲۳/۸ میلی‌متر می‌باشد. در فشار جبهه کار ۲۰۰ کیلوپاسکال مقدار نشست رخ داده در سطح زمین افزایش پیدا می‌کند و این افزایش نشست در سطح زمین در فشار ۳۲۰ کیلوپاسکال به حدود ۲۳/۸ میلی‌متر می‌رسد. مقدار بالازدگی نشست سطح زمین در جلو جبهه حفاری در مدل رفتاری سخت‌شونده در

جدول ۷- پارامترهای مدل رفتاری سخت‌شونده مسیر تونل (Sahel Consulting Engineers, 2011)

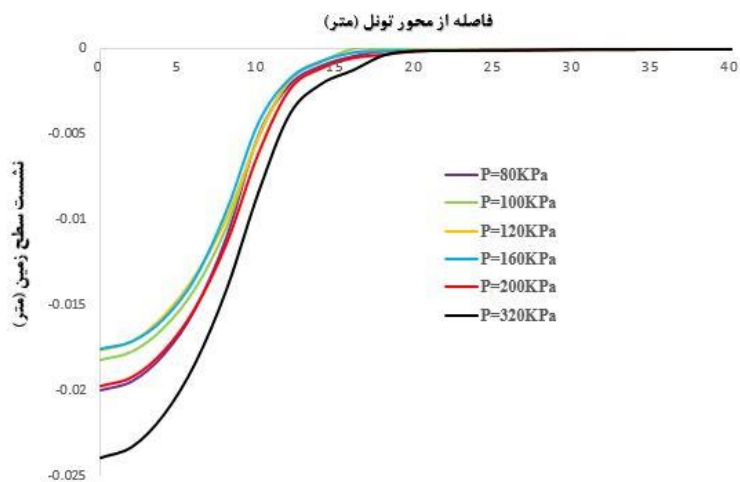
مشخصات مدل رفتاری	واحد	لایه فوقانی	لایه میانی	لایه تحتانی
کرنش برشی	%	۰	۰	۰
چسبندگی	Mpa	۰/۰۱۸	۰/۰۳	۰/۰۲۲
زاویه اصطکاک	درجه	۲۰	۲۵	۲۵



شکل ۱۱- پروفایل طولی نشست سطح زمین در مدل رفتاری سخت‌شونده

اطراف تونل افزایش می‌یابد. بررسی بالآمدگی کف و نشست تاج تونل در مدل رفتاری سخت‌شونده نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان بالا آمدگی کف تونل ۱۶/۸ میلی‌متر است که در فشار ۸۰ کیلوپاسکال رخ می‌دهد. بیش‌ترین میزان نشست تاج تونل نیز ۲۹/۲ میلی‌متر است. با افزایش فشار جبهه‌کار تا ۴ برابر مقدار اولیه خود میزان بالا آمدگی کف تونل کاهش می‌یابد. بررسی نشست تاج تونل نشان می‌دهد که تا فشار ۱۶۰ کیلوپاسکال میزان نشست در تاج تونل کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر فشار سینه کار، نشست تاج تونل روند افزایشی خواهد داشت. در شکل ۱۴، میزان بالآمدگی و نشست در کف و تاج تونل مشاهده می‌شود.

پروفایل نشست عرضی در مدل رفتاری سخت‌شونده در شکل ۱۲، نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان نشست رخ‌داده در محور تونل مربوط به فشار ۳۲۰ کیلوپاسکال است و با افزایش فاصله از محور به تدریج مقادیر نشست سطحی کاهش می‌یابد. بیش‌ترین شیب تغییرات منحنی نشست با فاصله گرفتن از محور تونل مربوط به فشار ۳۲۰ کیلوپاسکال است. عرض گودی نشست سطح زمین در فشار جبهه‌کار ۳۲۰ کیلوپاسکال نسبت به سایر فشارهای جبهه‌کار بیشتر است و نشست سطح زمین در فاصله دورتری از محور تونل صفر می‌شود. زون پلاستیک رخ داده در مدل رفتاری سخت‌شونده در شکل ۱۳، نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش فشار سینه کار تا ۳۲۰ کیلوپاسکال میزان شکست برشی و گسترش زون پلاستیک



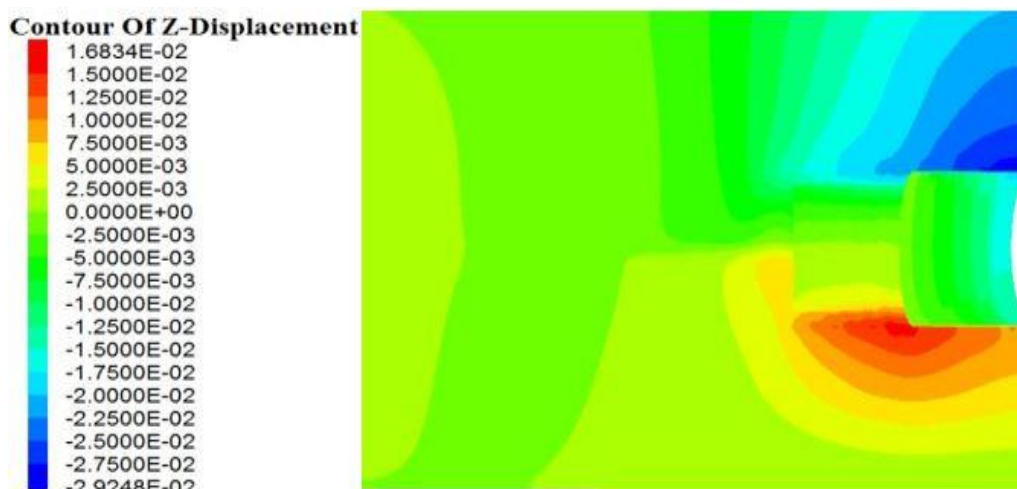
شکل ۱۲- پروفایل عرضی نشست سطح زمین در مدل رفتاری سخت‌شونده



ب) ۳۲۰ کیلوپاسکال

الف) ۸۰ کیلوپاسکال

شکل ۱۳- گسترش زون پلاستیک در مدل رفتاری سخت‌شونده در فشار سینه کار



شکل ۱۴- میزان نشست تاج تونل و بالا آمدگی کف تونل در مدل رفتاری سخت‌شونده

دراگر پراگر در مقطع جبهه کار برای فشارهای مختلف بین ۲۲ تا ۲۸ درصد کل نشست رخ داده می‌باشد. حداکثر درصد نشست رخ داده در بالای سپر ۷۰ درصد است که این درصد نشست در فشار ۳۲۰ کیلوپاسکال ۶۷ درصد کل نشست می‌باشد.

پروفیل عرضی نشست در مدل دراگر پراگر در شکل ۱۶، نشان داده شده است. در این مدل رفتاری نیز با فاصله گرفتن از محور تونل نشست‌های سطح زمین کمتر می‌شود. در مدل رفتاری دراگر پراگر افزایش فشار جبهه کار تاثیری در عرض گودی نشست سطح زمین نداشته و نشست سطح زمین در فاصله مشخصی از محور تونل برای فشارهای جبهه کار مختلف صفر می‌شود. زون پلاستیک رخ داده در مدل رفتاری دراگر پراگر در شکل ۱۷، نشان‌دهنده افزایش میزان شکست برشی اطراف تونل با افزایش فشار سینه کار می‌باشد.

بیشترین میزان بالا آمدگی کف و نشست تاج تونل به ترتیب ۱۴/۵ و ۱۸/۵ میلی‌متر بوده که در فشار اولیه رخ می‌دهد و با افزایش فشار جبهه کار تا ۴ برابر مقدار اولیه خود میزان بالا آمدگی کف و تاج تونل کاهش می‌یابد. در شکل ۱۸، میزان بالا آمدگی و نشست در کف و تاج تونل مشاهده می‌شود.

۵-۳- بررسی نتایج مدل‌سازی رفتار دراگر پراگر

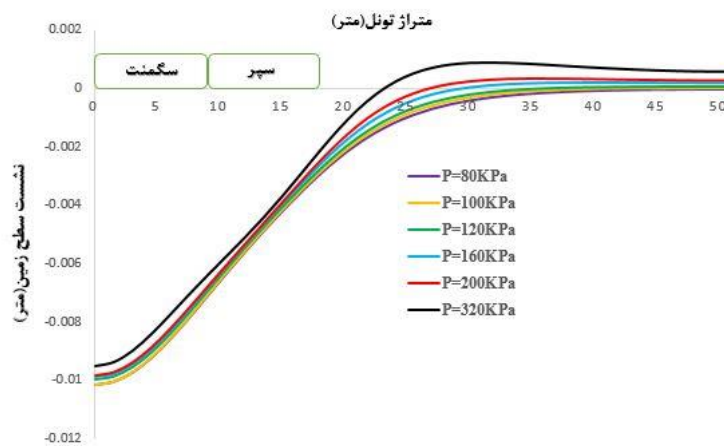
پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی با مدل رفتاری دراگر پراگر، مدول حجمی الاستیک، دانسیته، پارامترهای ماده، مدول برشی الاستیک و مقاومت کششی می‌باشد که در جدول ۸، مشاهده می‌شود.

بررسی نتایج در مدل رفتاری دراگر پراگر نشان می‌دهد که افزایش فشار جبهه کار میزان نشست سطح زمین را کاهش می‌دهد و این کاهش در میزان نشست تا حداکثر فشار جبهه کار انتخابی ادامه دارد. حداکثر میزان نشست رخ داده در مدل رفتاری دراگر پراگر ۱۰/۱ میلی‌متر است. در این مدل رفتاری نیز با افزایش فشار جبهه کار کاهش قابل توجهی در نشست صورت نمی‌گیرد؛ اما باعث بالازدگی سطح زمین در حدود ۱ میلی‌متر می‌شود. در مدل رفتاری دراگر پراگر بالازدگی سطح زمین در فشار ۱۲۰ کیلوپاسکال شروع و در فشار جبهه کار ۳۲۰ کیلوپاسکال به حداکثر میزان خود می‌رسد. شکل ۱۵، تاثیر فشارهای مختلف جبهه کار در نشست سطح زمین نشان را می‌دهد.

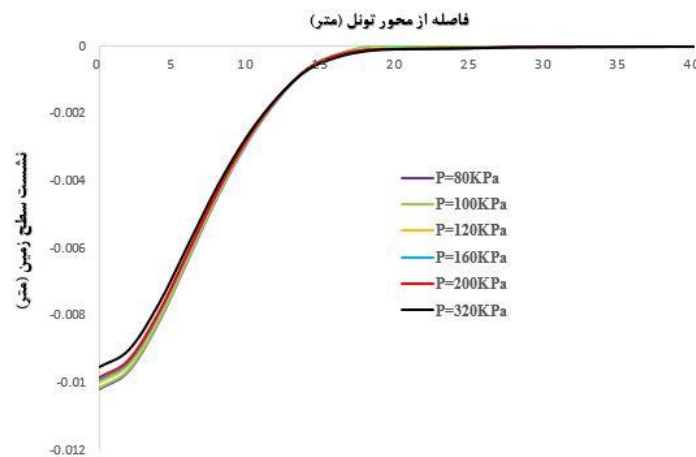
مدل رفتاری دراگر پراگر کمتر از ۲۳ درصد نشست سطح زمین را در جلو جبهه کار نشان می‌دهد که با افزایش فشار جبهه کار تا ۴ برابر مقدار اولیه این نشست به کمتر از ۱۴ درصد در جلو جبهه کار می‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که درصد نشست رخ داده در سطح زمین در مدل رفتاری

جدول ۸- پارامترهای مدل رفتاری دراگر پراگر مسیر تونل (Sahel Consulting Engineers, 2011)

مشخصات لایه مدل‌سازی	واحد	لایه فوقانی	لایه میانی	لایه تحتانی
مدول بالک	KPa	۰/۰۳۸۸	۰/۰۶۲۵	۰/۰۴۶۲
پارامتر ماده (k_{ϕ})	KPa	۳۷/۴۶	۳۵/۴۹	۳۵/۴۹
پارامتر ماده (q_{ϕ})	-	۰/۶۴۲۶	۰/۷۶۸۳	۰/۷۶۸۳
مدول برشی	KPa	۰/۰۱۲۹	۰/۰۲۸۸	۰/۰۱۸۹
مقاومت کششی	KPa	۵۸/۲۹	۴۶/۱۹	۴۶/۱۹
وزن مخصوص خشک	KN/m ³	۱۷	۱۸	۱۹

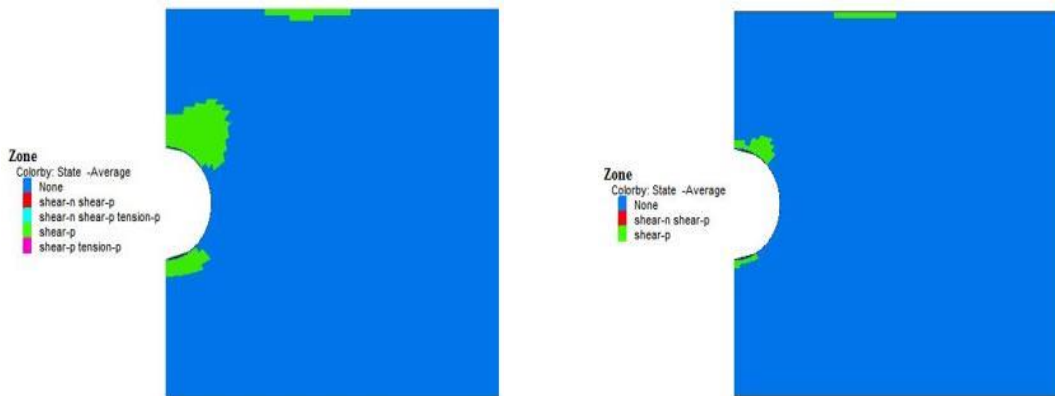


شکل ۱۵- پروفایل طولی نشست سطح زمین در مدل رفتاری دراگر پراگر



شکل ۱۶- پروفایل عرضی نشست سطح زمین در مدل رفتاری دراگر پراگر

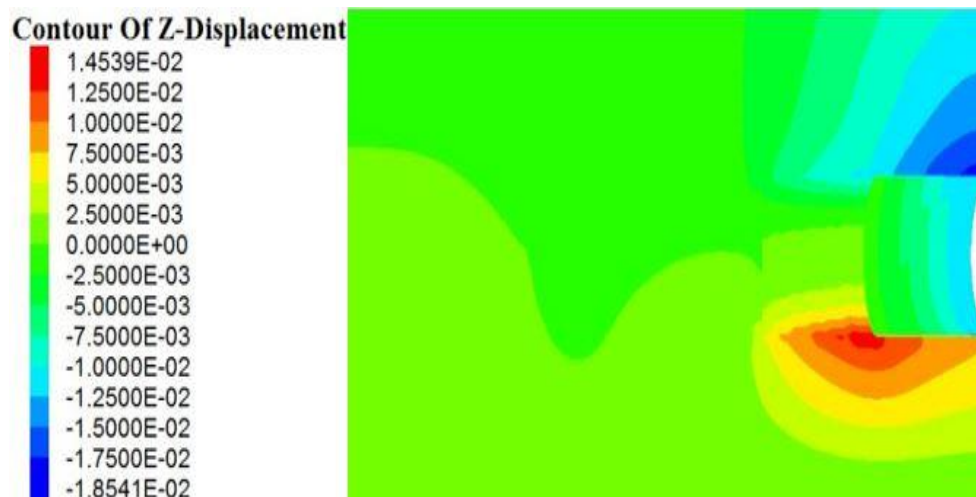
بررسی تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین در مدل های رفتاری مختلف خاک ... عارف جابری و ... ص ۹۵-۱۱۷



ب) ۳۲۰ کیلوپاسکال

الف) ۸۰ کیلوپاسکال

شکل ۱۷- گسترش زون پلاستیک در مدل رفتاری دراگر پراگر در فشار سینه کار



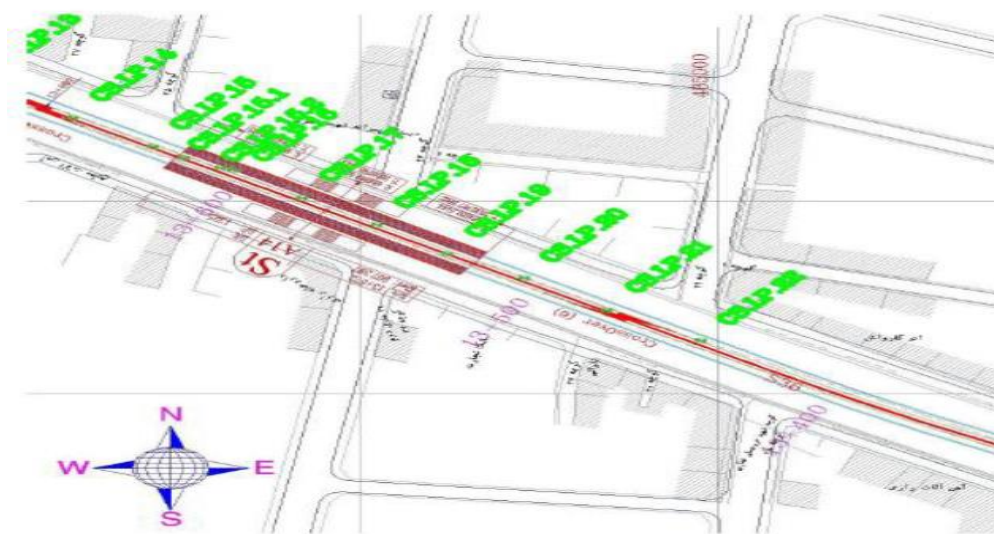
شکل ۱۸- میزان نشست تاج تونل و بالا آمدگی کف تونل در مدل رفتاری دراگر پراگر

(Sahel Consulting Engineers, 2011)

در جدول ۹، نتایج مدل سازی عددی با مدل های رفتاری مختلف و نتایج حاصل از ابزاربندی مشاهده می شود. با توجه به جدول، جابجایی ثبت شده توسط پین نشست سنجی مورد نظر ۱۵/۱ میلی متر است. میزان نشست در مدل سازی با فشار جبهه کار ۱۰۰ کیلوپاسکال با مدل رفتاری موهر کولمب برابر ۱۰/۸ میلی متر و برای مدل دارگر پراگر ۱۰/۱ میلی متر و برای مدل رفتاری سخت شونده این میزان جابجایی ۱۸/۱ میلی متر است.

۶- اعتبار سنجی نتایج مدل سازی عددی

به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل سازی عددی سه بعدی تفاضل محدود از گزارشها مربوط به ابزاربندی نشست سطح زمین که با استفاده از پین های نشست سنجی صورت گرفته، استفاده شده است. این پین ها در مقطع مورد بررسی نصب شده است و حداقل سه قرائت در زمان مختلف برای آنها صورت گرفته است تا نشست نهایی ثبت گردد. شکل ۱۹، موقعیت نصب پین سنجها را نشان می دهد؛ شماره پین مورد نظر CS.LP.22 است



شکل ۱۹- موقعیت نصب پین‌های نشست‌سنجی (Sahel Consulting Engineers, 2011)

جدول ۹- مقایسه‌ی نتایج حاصل از ابزاربندی و مدل‌سازی عددی

شماره پین	فشار جبهه‌کار (کیلوپاسکال)	بیشترین نشست سطح در ابزار بندی (میلی‌متر)	بیشترین نشست سطح در مدل‌سازی (میلی‌متر)
CS.LP.22	۱۰۰	۱۵/۱	سخت‌شونده ۱۸/۱ موهر کولمب ۱۰/۸ دارگر پراگر ۱۰/۱

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف و فشارهای جبهه‌کار مختلف بر نشست سطح زمین پرداخته شده است. به همین منظور، مدل‌سازی سه‌بعدی تفاضل محدود مترو خط A قم مطالعه و بررسی شده است. در راستای تحقیق از مدل رفتاری موهر کولمب، مدل سخت‌شونده و مدل دراگر پراگر استفاده شده است. به‌منظور بررسی تاثیر فشارهای جبهه‌کار مختلف، مقادیر شش حالت ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۳۲۰ کیلوپاسکال که به‌ترتیب برابر فشار اولیه، ۱/۲۵ برابر فشار اولیه، ۱/۵ برابر فشار اولیه، ۲ برابر فشار اولیه، ۲/۵ برابر فشار اولیه و ۴ برابر فشار اولیه بود، انتخاب و در مدل‌سازی اعمال شده است. گرادیان فشار اعمالی برای تمامی حالت‌ها برابر ۱۴ کیلوپاسکال بر متر لحاظ شده است، فشار تزریق پشت سگمنت نیز ۵۰ کیلوپاسکال بیش‌تر از فشار جبهه‌کار در تمامی حالت‌ها بوده و با گرادیان فشار ۲۰ کیلوپاسکال بر متر در نظر گرفته شده

است. پارامترهای مدل‌های رفتاری انتخاب شده از نتایج مطالعات برجا و آزمایشگاهی انتخاب و در مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC3D* اعمال شده است. صحت نتایج مدل‌سازی عددی در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال با استفاده از نتایج ابزاربندی نیز ارزیابی شده است.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که فشارهای جبهه‌کار بالا در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر باعث کنترل نشست سطح زمین می‌شود، اما اعمال فشارهای بالاتر به جبهه‌کار علاوه بر تخریب قسمت برش دستگاه حفار، بالادگی سطح زمین را سبب می‌شود. در مدل رفتاری سخت‌شونده رفتار اندکی پیچیده‌تر بوده و افزایش فشار جبهه‌کار نه‌تنها باعث کنترل نشست در مقادیر بالا نمی‌شود بلکه میزان افزایش نشست را به همراه خواهد داشت و اعمال فشار ۲، ۲/۵ و ۴ برابر فشار جبهه‌کار ۸۰ کیلوپاسکال باعث بالادگی سطح زمین در جلو جبهه‌کار می‌شود که این بالادگی در حالت دو برابر فشار اولیه بسیار ناچیز بوده اما با

هر سه مدل رفتاری نشان می‌دهد که مدل رفتاری سخت‌شونده نسبت به دو مدل دیگر گسترش زون پلاستیک بیشتری دارد و شکست برشی بیشتری اطراف منطقه حفاری حادث می‌شود. پروفیل نشست عرضی در مدل سخت‌شونده در تمام فشارها مقدار نشست بیشتری را نسبت به همان نقطه‌های شاهد در دو مدل دیگر ثبت می‌کند. میزان نشست پروفیل عرضی در مدل دراگر پراگر نیز بیشتر از مدل رفتاری موهر کولمب در نقاط مشابه می‌باشد.

در مدل‌های رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر بالازدگی سطح زمین در فشار جبهه کار کمتر، نسبت به مدل سخت‌شونده رخ می‌دهد.

صحت نتایج مدل‌سازی با نتایج ابرازبندی نشان از اختلاف کمتر مدل سخت‌شونده با نتایج ابرازبندی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دو مدل رفتاری موهر کولمب و مدل دراگر پراگر نتایج نزدیکی به هم دارند.

با جمع‌بندی نتایج فوق می‌توان اظهار داشت که مدل رفتاری سخت‌شونده نسبت به مدل‌های دیگر نتایج دقیق‌تری را برآورده می‌کند و اختلاف کم نتایج ابرازبندی با نتایج این مدل رفتاری نشان‌دهنده این موضوع است. این اختلاف کم نیز به دلیل آن است که مدل رفتاری سخت‌شونده مدول‌های تغییر شکل‌پذیری مرتبط با تغییرات سطح کرنش را نسبت به دو مدل دیگر بهتر نشان می‌دهد. پیش‌بینی نتایج در دو مدل رفتاری دراگر پراگر و موهر کولمب بسیار مشابه هم بوده و نشان‌دهنده شباهت این دو مدل رفتاری در برآورد نشست‌ها است.

افزایش تا ۴ برابر فشار اولیه این میزان بالازدگی در جلو جبهه کار به حدود یک میلی‌متر می‌رسد.

نتایج نشان می‌دهد که در مدل رفتاری موهر-کولمب و مدل دراگر پراگر با افزایش فشار جبهه کار میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند و این تغییرات در کاهش نشست محسوس نبوده و بیش‌ترین مقدار نشست برابر $10/8$ میلی‌متر برای مدل موهر کولمب و $10/1$ میلی‌متر برای مدل دراگر پراگر است. در مدل رفتاری سخت‌شونده میزان نشست سطح زمین بیش‌تر از دو مدل دیگر بوده و برابر $18/1$ میلی‌متر می‌باشد. نشست حاصل‌شده از مدل سخت‌شونده تا ۲ برابر فشار اولیه روند کاهشی داشته و بعداز آن میزان نشست روند افزایشی پیدا می‌کند به‌طوری‌که مقدار نشست در سطح زمین در حالت فشار جبهه کار 320 کیلوپاسکال، بیش‌تر از مقدار نشست در فشار جبهه کار اولیه می‌باشد و این میزان نشست $1/19$ برابر نشست سطح زمین در حالت اولیه می‌باشد.

بررسی نتایج درصد نشست ایجاد شده در هر سه مدل رفتاری نشان می‌دهد که مدل رفتاری سخت‌شونده در همه فشارهای جبهه کار درصد نشست بیشتری را نسبت به دو مدل دیگر در جلو جبهه کار، در مقطع جبهه کار، در بالای سپر و پس از عبور سپر نشان می‌دهد. و دو مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر درصد نشست مشابهی را برای تمام موقعیت‌ها نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که بالآمدگی رخ داده در کف تونل و نشست تاج تونل در مدل سخت‌شونده از دو مدل دیگر بیشتر می‌باشد. بررسی نتایج زون پلاستیک ایجاد شده در

۸- مراجع

- Abu-Farsakh, M. Y., & Tumay, M. T. (1999). Finite element analysis of ground response due to tunnel excavation in soils. In *Geo-engineering for underground facilities* (pp. 514-525). ASCE.
- Ahmed, M., & Iskander, M. (2012). Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), 101-110.
- Broere, W. (2001). Tunnel face stability and new CPT application [Ph. D. thesis]. *Delft University of Technology, Delft University Press, Delft, The Netherlands*.
- Broms, B. B., & Bennermark, H. (1967). Stability of clay at vertical opening. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(1), 71-94.
- ÇELİK, S. (2017). Comparison of mohr-coulomb and hardening soil models' numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(4), 95-102.
- Chambon, P., & Corte, J. F. (1994). Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face. *Journal of geotechnical engineering*, 120(7), 1148-1165.
- Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2017). *Introduction to tunnel construction*. Crc Press.
- Do, N. A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2014). Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*, 9(4), 673-694.
- Eisenstein, Z., & Ezzeldine, O. (1995). The role of face pressure for shields with positive ground control. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 3, No. 32, p. 136A).
- Eslami, B., Golshani, A., & Arefizadeh, S. (2020). Evaluation of Constitutive Models in Prediction of Surface Settlements in Cohesive Soils—A Case Study: Mashhad Metro Line 2. *ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories*, 5(3), 182-198.
- Finno, R. J., & Clough, G. W. (1985). Evaluation of soil response to EPB shield tunneling. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(2), 155-173.
- German Standard DIN 4085 (Germany, 1987, 2007, Blatt 1 und 2), Calculation of earth-pressure, Normenausschuss Bauweisen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. CRC Press.
- Gulvanessian, H., Calgaro, J. A., & Holický, M. (2002). *Designer's guide to EN 1990: eurocode: basis of structural design*. Thomas Telford.
- Hejazi, Y., Dias, D., & Kastner, R. (2008). Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions. *Acta Geotechnica*, 3(4), 251-258.
- Heidari Sheibani, R., Zare, S., Mirzaei, H., & Foroughi, M. (2012). Numerical Study of Face Pressure

Effect on Surface Settlement in Soft Ground Mechanized Tunneling-A Case Study: Tehran Metro Line 7. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 1(1), 57-67.

- Itasca Consulting Group. (2012). FLAC fast Lagrangian analysis of continua, version 5.0. User's manual.
- Kanayasu, S., Kubota, I., & Shikubu, N. (1995). Stability of face during shield tunnelling-A survey on Japanese shield tunneling. In *Underground construction in soft ground* (pp. 337-343).
- Kasper, T., & Meschke, G. (2006). On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), 160-171.
- 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), 526-542.
- Kimura, T. (1981). Centrifugal testing of model tunnels in soft clay. In Proc. 10th Int. Conf. *Soil Mech. and Found. Engg* (Vol. 1, pp. 319-322).
- Kirsch, A. (2010). Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand. *Acta Geotechnica*, 5(1), 43-62.
- Konietzky, H., & Ismael, M. (2017). Failure Criteria for Rocks-an Introduction. *Introduction into geomechanics*.
- 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.
- Leca, E., & Dormieux, L. (1990). Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material. *Géotechnique*, 40(4), 581-606.
- Litsas, D., Sitarenios, P., & Kavvas, M. (2018, April). Advanced numerical analyses of EPB tunnelling using critical state plasticity. In *ITA-AITES World Tunnel Congress Proceedings, Dubai* (pp. 21-26).
- Mansour, M. A. M. (1996). *Three-dimensional numerical modelling of hydroshield tunnelling*. na.
- Mollon, G., Dias, D., & Soubra, A. H. (2009). Probabilistic analysis of circular tunnels in homogeneous soil using response surface methodology. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(9), 1314-1325.
- Mollon, G., Dias, D., & Soubra, A. H. (2010). Face stability analysis of circular tunnels driven by a pressurized shield. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(1), 215-229.
- Mori, A., Kurihara, K., & Mori, H. (1995). A study on face stability during slurry-type shield tunnelling. In *Underground construction in soft ground* (pp. 261-264).
- Nematollahi, M., & Dias, D. (2019). Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction-Case of the Shiraz subway line. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86, 75-88.
- Nematollahi, M., & Molladavoodi, H. (2018). Three-dimensional simulation of the influence of the

oblique segmental joints and of the lagging distance between twin tunnels' faces on the tunnel behavior-case study of the second line of Shiraz subway. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 6(2), 81-95.

Obrzud, R. (2010). *The hardening soil model: A practical guidebook*. Zace Services.

Ohta, T., Kiya, H., Esaki, T., & Jiang, Y. (2000, November). Experimental Study And Numerical Analysis On The Stability Of Tunnel Face In Sandy Ground. In *ISRM International Symposium*. OnePetro.

Pan, P. Z., Feng, X. T., & Hudson, J. A. (2012). The influence of the intermediate principal stress on rock failure behaviour: a numerical study. *Engineering Geology*, 124, 109-118.

Sahel Consulting Engineers. (2011). Geological and geotechnical studies of Qom city metro, Line A.

Sayadi, S. (2015). Assessment of tunnel induced displacement in sequential excavation method to develop soil constitutive model, MSc dissertation, *Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran*, (In Persian).

Sebastianelli, M., Felice, G., Malena, M., Amorosi, A., Boldini, D., & Di Mucci, G. (2013). A class C prediction of the settlements induced in a historical masonry structure by excavation of shallow twin tunnels. In *2nd International Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historical Sites, Naples, Italy* (pp. 649-655).

Sun, S., Pei, H., & Zhang, S. (2006). Analysis of face stability and ground settlement in EPB shield tunnelling for the Nanjing metro. *The Geological Society of London, IAEG, Paper*, (274).

ünther Meschke, G., Nagel, F., Stascheit, J., & Kasper, T. ADVANCED NUMERICAL SIMULATION OF SHIELD TUNNELLING AND ITS ROLE IN THE DESIGN PROCESS.

Vakili, K., Lavasan, A. A., Schanz, T., & Datcheva, M. (2014, June). The influence of the soil constitutive model on the numerical assessment of mechanized tunneling. In *Numerical Methods in Geotechnical Engineering contains the proceedings of the 8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2014), Delft, The Netherlands* (pp. 18-20).

Vermeer, P. A., Ruse, N., & Marcher, T. (2002). Tunnel heading stability in drained ground. *Felsbau*, 20(6), 8-18.

Yang, X., Yuan, H., Wu, J., & Li, S. (2018). Elastoplastic analysis of circular tunnel based on Drucker–Prager criterion. *Advances in Civil Engineering*, 2018.

Zakhem, A. M., & El Naggar, H. (2019). Effect of the constitutive material model employed on predictions of the behaviour of earth pressure balance (EPB) shield-driven tunnels. *Transportation Geotechnics*, 21, 100264.

Investigating the Effect of Face Pressure on Ground Surface Settlement in different soil behavior models using three-dimensional finite difference method (A case study: Line A of Qom metro)

A. Jaber^{1*}; S. Zare²

1- Ph. D Student; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Jaber@shahroodut.ac.ir

2- Associate Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, zare@shahroodut.ac.ir

Received: 9 May 2022; Accepted: 17 Oct 2022
DOI: 10.22044/tuse.2022.11907.1454

Keywords

Mohr–Coulomb Criterion
Drager- Prager
Hardening soil behavior model
Face pressure
Finite difference method

Extended Abstract

Summary

Among the various methods for determination of face pressure, the numerical method is the best method. Choosing an appropriate behavioral model is one of the most basic steps in numerical analysis. The aim of this research is to investigate the effect of six face pressure levels in the elastoplastic behavior model, regarding the Mohr–Coulomb (MC) behavior, the hardening soil behavior and Drucker- Prager (DP) behavior models. In this research, line A of Qom metro of has been modeled using finite difference method. The modeling outcomes indicate that the difference between the hardening soil model results and instrumentation results is less than that in the other two behavior models.

Introduction

In urban tunnels, which are mostly excavated at shallow depths and in the soil bed, the face pressure can be one of the factors preventing settlement. Choosing the Appropriate behavior model is one of the most basic steps in numerical analysis. Tunnel excavation frequently uses the Mohr–Coulomb behavior model in numerical models. This behavior model often leads to ground surface settlement that is predicted less than that of the instrumentation results. In this research, line A of Qom metro has been modeled using the finite difference method. In this research, different face pressures and hardening behavior model, and Drager-Prager and Mohr-Coulomb behavior models have been investigated simultaneously to determine the optimal face pressure.

Methodology and Approaches

In order to investigate the effect of different face pressures on ground surface settlement and the role of different behavior models in this settlement, six different face pressures of 80, 100, 120, 160, 200, 320 KPa have been entered into the FLAC3D software and for all three behavior models, these six face pressures have been investigated.

Results and Conclusions

The results show that in the Mohr-Coulomb and Drager-Prager behavior models, with an increase in the pressure of the face, the amount of ground surface settlement decreases although these changes in the reduction of settlement are not noticeable. Maximum amount of the settlement is 10.8 mm for the Mohr-Coulomb model and 10.1 mm for Drager Prager model. In the hardening behavior model, the amount of ground surface settlement is more than that of the other two models and is equal to 18.1 mm.

The results also indicate that the hardening behavior model produces more accurate results than those of the other two models, and the small difference between the results of instrumentation and the results of this behavior model confirms

its good accuracy. This small difference is also due to the fact that the hardening behavior model shows the deformation moduli associated with changes in the strain level better than the other two models.