

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاها‌ی زیرزمینی

بررسی عددی تاثیر مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین در

تونل‌سازی مکانیزه - مطالعه موردی: خط A مترو قم

نگارنده: مهدی حاصلی

استاد راهنما:

دکتر شکراله زارع

تیر ماه ۱۳۹۸

تقدیم به

پدر و مادرم

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است.

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهمان به شجاعت می گراید.
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

به روح پاک مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

به پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه کنم

سپاسگزاری

با سپاس از سه وجود مقدس :

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ...

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم ...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند ...

صمیمانه از زحمتهای بی دریغ استاد عزیز آقای دکتر زارع و آقای دکتر جوادی که در انجام این پژوهش بنده را یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

هم چنین از شرکت مشاور ساحل که اطلاعات انجام این پژوهش را در اختیار بنده قرار داد، سپاسگزارم.

از تمامی دوستان عزیزی که در مراحل مختلف این پایان نامه به بنده کمک کردند نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهدنامه

اینجانب مهدی حاصلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **بررسی عددی تاثیر مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین در تونل‌سازی مکانیزه- مطالعه موردی: خط A مترو قم** تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در سال‌های گذشته به دلیل افزایش جمعیت در مناطق شهری و مسایلی مانند تراکم سازه‌های سطحی و استفاده بهینه از آن، ترافیک، آلودگی هوا و ... استفاده از فضاهای زیرزمینی را به راه حلی برای رفع این مشکلات تبدیل کرده است. در این میان استفاده از تونل‌های مترو برای بهبود حمل و نقل شهری به طور گسترده افزایش پیدا کرده است. امروزه به دلیل پیشرفت چشمگیر تکنولوژی در زمینه تونلسازی و مزایای آن‌ها استفاده از انواع ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل به ویژه EPB افزایش پیدا کرده است. از مهم‌ترین چالش‌های حفر تونل، نشست سطح زمین است که در محیط‌های شهری به دلیل وجود سازه‌های سطحی، سست بودن زمین و کم عمق بودن سازه بسیار مهم است. بنابراین پیش‌بینی نشست سطح زمین امری ضروری بوده و مورد بررسی پژوهش‌گران بسیاری قرار گرفته است. در این پژوهش از مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود استفاده شده است و سعی شده تا اندازه ممکن مطابق با شرایط واقعی ساخت تونل باشد. یکی از اساسی‌ترین مراحل تحلیل عددی در پروژه‌های ژئوتکنیکی، انتخاب مدل رفتاری مناسب است. این مساله به عنوان موضوع این پژوهش در نظر گرفته شده است. در این پژوهش به مقایسه میزان نشست سطح زمین با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری الاستیک، موهر-کولمب، خاک سخت‌شونده با نتایج مانیتورینگ پرداخته و بهترین مدل رفتاری برای توصیف رفتار نشست سطح زمین در خط A مترو قم ارزیابی شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان پیش‌بینی نشست مربوط به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده و کم‌ترین مربوط به الاستیک است. بیش‌ترین هم‌خوانی با نتایج مانیتورینگ مربوط به مدل خاک سخت‌شونده بوده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته که عوامل متعددی را در برآورد نشست اعمال می‌کنند، نتایج را تا حد قابل قبولی بهبود می‌بخشد. نتایج تحلیل پارامتریک نشان داد، با افزایش میزان مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک و نسبت تنش‌های برجا، میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند. همچنین، بیش‌ترین تاثیر در تغییر

میزان نشست به ترتیب مربوط به نسبت تنش‌های برجا، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته و چسبندگی بوده است.

کلمات کلیدی: تونل‌سازی مکانیزه، مدل‌سازی عددی، نشست زمین، قطار شهری قم، مدل‌های رفتاری.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

حاصلی. مهدی ، شکراله. زارع، جوادی اصطهباناتی. مرتضی، (۱۳۹۸)، "برآورد نشست سطح زمین در اثر تونل سازی مکانیزه با در نظر گرفتن مدل های رفتاری مختلف مطالعه موردی: خط A قطار شهری قم"، سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف

فهرست

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ مشخصات عمومی طرح
۴	۳-۱ ضرورت و هدف تحقیق
۵	۴-۱ روش انجام تحقیق
۵	۵-۱ ساختار پایان نامه
۹	فصل دوم: پیشینه مطالعات
۱۰	۱-۲ مقدمه
۱۰	۲-۲ روش های پیش بینی جابجایی های سطحی در اثر حفر تونل
۱۱	۱-۲-۲ روش های تجربی
۱۳	۲-۲-۲ روش های تحلیلی
۱۶	۳-۲-۲ روش های عددی
۲۵	فصل سوم: رفتار خاک
۲۶	۱-۳ مقدمه
۲۶	۲-۳ رفتار خاک در ساخت های مختلف
۲۸	۳-۳ ویژگی های رفتاری خاک
۳۱	۴-۳ مدل های رفتاری خاک

۳۳	 مدل الاستیک ۱-۴-۳
۳۴	 مدل الاستوپلاستیک ۲-۴-۳
۳۷	 مدل موهر- کولمب ۳-۴-۳
۳۹	 مدل خاک سخت شونده ۴-۴-۳
۴۴	 جمع بندی ۵-۴-۳
۴۵	 فصل چهارم: مورد مطالعاتی ۴-۴-۳
۴۶	 ۱-۴ شرح پروژه ۴-۴-۳
۴۷	 ۲-۴ زمین شناسی عمومی گستره طرح ۴-۴-۳
۴۹	 ۳-۴ تفکیک و توصیف واحدهای زمین شناسی ۴-۴-۳
۵۱	 ۱-۳-۴ واحد خاکی Qf-1 ۴-۴-۳
۵۱	 ۲-۳-۴ واحد خاکی Qf-2 ۴-۴-۳
۵۲	 ۳-۳-۴ واحد خاکی Qc-1 ۴-۴-۳
۵۲	 ۴-۳-۴ واحد خاکی Qc-2 ۴-۴-۳
۵۲	 ۴-۴ زمین شناسی مهندسی جبهه کار تونل ۴-۴-۳
۵۴	 ۵-۴ وضعیت آب زیرزمینی در مسیر تونل ۴-۴-۳
۵۶	 ۱-۵-۴ نوسان سطح آب زیرزمینی ۴-۴-۳
۶۰	 ۶-۴ روش حفر ۴-۴-۳
۶۶	 ۷-۴ دستگاه حفاری پروژه خط A قطار شهری قم ۴-۴-۳
۶۷	 ۸-۴ اسپر فشار تعادلی زمین ۴-۴-۳

۶۹	۹-۴ روش نگهداری
۷۱	۱۰-۴ جمع بندی
۷۳	۵ فصل پنجم: مدل سازی و تحلیل عددی
۷۴	۱-۵ مقدمه
۷۴	۲-۵ روش های عددی
۷۵	۱-۲-۵ روش المان محدود
۷۷	۲-۲-۵ روش المان مرزی
۷۸	۳-۲-۵ روش المان مجزا
۷۹	۴-۲-۵ روش تفاضل محدود
۸۰	۳-۵ معرفی نرم افزار FLAC 3D
۸۱	۴-۵ مدل سازی محدوده مورد بررسی
۸۳	۵-۵ انتخاب مدل های رفتاری
۸۵	۶-۵ شرایط مرزی
۸۶	۷-۵ تعیین شرایط اولیه
۸۷	۸-۵ به تعادل رسیدن مدل تا قبل از حفاری
۹۰	۹-۵ مدل سازی سپر ماشین
۹۰	۱۰-۵ مدل سازی فشار جبهه کار و تزریق
۹۲	۱۱-۵ مدل سازی پوشش سگمنتی
۹۲	۱۲-۵ مدل سازی دوغاب پشت سگمنت

۱۳-۵	مدل سازی روند حفاری تونل	۹۶
۱۴-۵	جمع بندی	۹۸
۶	فصل ششم: بررسی تاثیر مدل های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین	۹۹
۱-۶	مقدمه	۱۰۰
۲-۶	تاثیر مدل های رفتاری مختلف بر میزان نشست سطح زمین	۱۰۰
۳-۶	تحلیل پارامتریک	۱۰۸
۱-۳-۶	تاثیر مدول تغییر شکل پذیری مدل های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین	۱۰۹
۲-۳-۶	تاثیر چسبندگی خاک در مدل های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین	۱۱۱
۳-۳-۶	تاثیر زاویه اصطکاک مدل های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین	۱۱۲
۴-۳-۶	تاثیر نسبت تنش های برجا بر نشست سطح زمین در مدل های رفتاری	۱۱۵
۵-۳-۶	مقایسه تاثیر پارامترهای رفتاری و مقاومتی خاک و نسبت تنش های برجا بر	
	اساس میزان تاثیر بر نشست سطح زمین	۱۱۶
۴-۶	مقایسه نتایج نشست عرضی حاصل از مدل سازی عددی و روابط تحلیلی	۱۱۹
۵-۶	جمع بندی	۱۲۱
۷	فصل هفتم: نتایج و پیشنهادها	۱۲۳
۱-۷	نتایج	۱۲۴
۲-۷	پیشنهادها	۱۲۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ساختار پایان‌نامه ۳۵
- شکل ۱-۳: شکل منحنی تنش-کرنش مواد الاستوپلاستیک ۳۵
- شکل ۲-۳: رابطه هایپربولیک در بارگذاری اولیه میان تنش انحرافی و کرنش محوری ۴۰
- شکل ۱-۴: مسیر خط A قطار شهری قم ۴۷
- شکل ۲-۴: سطح آب زیرزمینی در پیژومترهای شهر قم ۵۵
- شکل ۳-۴: تغییرات سطح آب در پیژومترهای شهر قم ۵۶
- شکل ۴-۴: وضعیت تغییرات سطح آب در پیژومترهای شهر قم به همراه موقعیت آن‌ها ۵۷
- شکل ۵-۴: بیشینه نوسان پیژومترها در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۶ ساله ۵۸
- شکل ۶-۴: تقسیم‌بندی کلی ماشین‌های حفر تونل ۶۲
- شکل ۷-۴: ماشین‌های حفر تونل بر اساس نوع سپر و مکانیزم نگهداری جبهه کار ۶۳
- شکل ۸-۴: مدل توز برای استفاده از ماشین EPB در شرایط دانه‌بندی مختلف ۶۵
- شکل ۹-۴: نمایی از دستگاه حفاری پروژه قطار شهری قم ۶۷
- شکل ۱۰-۴: نمایی از قسمت‌های مختلف دستگاه حفاری پروژه قطار شهری قم ۶۷
- شکل ۱۱-۴: نمایی از چیدمان قطعات پیش‌ساخته بتنی پروژه قطار شهری قم ۷۱
- شکل ۱-۵: مقطع طولی زمین‌شناسی از محدوده کیلومتر ۱۳ ۸۲
- شکل ۲-۵: مدل ساخته شده به همراه لایه‌بندی خاک‌ها ۸۲
- شکل ۳-۵: نمایی از مشخص کردن محدوده نهایی زون‌ها با اعمال مرزهای مصنوعی ۸۵
- شکل ۴-۵: شرایط مرزی مدل ساخته شده ۸۶
- شکل ۵-۵: به تعادل رسیدن مدل تا قبل از حفاری ۸۸

- شکل ۵-۶: به تعادل رسیدن مدل بعد از حفاری ۸۸
- شکل ۵-۷: تنش قائم در مدل عددی بعد از به تعادل رسیدن ۸۹
- شکل ۵-۸: جابجایی قائم در مدل عددی بعد از به تعادل رسیدن ۸۹
- شکل ۵-۹: نمایی از تی‌بی‌ام و جزییات سیستم تزریق دوغاب ۹۴
- شکل ۵-۱۰: نمایی از مدل عددی ساخته شده از سپر و لاینینگ ۹۵
- شکل ۵-۱۱: موقعیت دوغاب، لاینینگ و سپر نسبت به هم در مدل عددی ساخته شده ۹۶
- شکل ۶-۱: جابجایی قائم در مدل عددی ۱۰۱
- شکل ۶-۲: تنش قائم در مدل عددی ۱۰۲
- شکل ۶-۳: گسترش ناحیه پلاستیک در مدل عددی ۱۰۳
- شکل ۶-۴: نمودار نشست عرضی ۱۰۴
- شکل ۶-۵: نمودار نشست طولی ۱۰۶
- شکل ۶-۶: تاثیر مدول تغییرشکل پذیری بر میزان نشست سطح زمین ۱۱۰
- شکل ۶-۷: تاثیر چسبندگی خاک بر میزان نشست سطح زمین ۱۱۱
- شکل ۶-۸: تاثیر زاویه اصطکاک خاک بر میزان نشست سطح زمین ۱۱۲
- شکل ۶-۹: مقایسه کانتور جابجایی‌های قائم در فاصله‌های مشخص از جبهه کار ۱۱۳
- شکل ۶-۱۰: تاثیر نسبت تنش‌های برجا بر میزان نشست سطح زمین ۱۱۵
- شکل ۶-۱۱: مقایسه تغییرات بیشینه نشست سطح زمین با تغییر پارامترهای رفتاری ۱۱۷
- شکل ۶-۱۲: مقایسه نشست حاصل از مدل عددی و روابط تحلیلی ۱۱۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از روابط ارائه شده برای محاسبه میزان نشست سطح زمین ۱۵
- جدول ۲-۲: خلاصه‌ای از پژوهش‌های عددی انجام شده ۲۲
- جدول ۱-۴: واحدهای خاکی مسیر خط A قطار شهری قم ۵۰
- جدول ۲-۴: توصیف زمین‌شناسی جبهه کار تونل در مسیر خط A قطار شهری قم ۵۳
- جدول ۳-۴: مقادیر پیشنهادی پارامترهای مهندسی لایه‌های مختلف خاکی ۵۴
- جدول ۴-۴: مقایسه ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین و دوغابی ۶۴
- جدول ۵-۴: سیستم‌های چیدمان پوشش بتنی ۶۹
- جدول ۱-۵: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری الاستیک ۸۴
- جدول ۲-۵: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری موهر-کولمب ۸۴
- جدول ۳-۵: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری خاک سخت‌شونده ۸۴
- جدول ۴-۵: مشخصات سپر ماشین حفار ۹۰
- جدول ۵-۵: مشخصات فشار جبهه کار و تزریق دوغاب ۹۲
- جدول ۶-۵: مشخصات پوشش سگمنتی ۹۲
- جدول ۷-۵: مشخصات دوغاب تزریق شده ۹۴
- جدول ۱-۶: بیشینه نشست عرضی در فاصله ۵۰ متری از ابتدای تونل ۱۰۵
- جدول ۲-۶: فاصله ای که مقدار نشست عرضی در آن تقریباً به صفر می‌رسد ۱۰۵
- جدول ۳-۶: نسبت نشست در جبهه کار به بیشینه نشست در ۵۰ متری تونل ۱۰۷
- جدول ۴-۶: میزان خطا بیشینه نشست طولی محاسبه شده به روش عددی ۱۰۸
- جدول ۵-۶: تاثیر نسبت تنش‌های برجا بر میزان نشست سطح زمین ۱۱۶

- جدول ۶-۶: بیشینه نشست عرضی با تغییر مدول الاستیسیته ۱۱۸
- جدول ۶-۷: بیشینه نشست عرضی با تغییر چسبندگی ۱۱۸
- جدول ۶-۸: بیشینه نشست عرضی با تغییر زاویه اصطکاک ۱۱۹
- جدول ۶-۹: مقایسه بیشینه تغییر نشست با تغییر پارامترهای رفتاری و مقاومتی خاک ۱۱۹
- جدول ۶-۱۰: مقادیر نشست حاصل از مدل عددی و روابط تحلیلی ۱۲۰

۱ فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه استفاده از فضاهای زیرزمینی به دلیل ویژگی‌های خاصی که دارند امری اجتناب ناپذیر شده است. به طور کلی می‌توان اینگونه گفت که سازه‌های زیرزمینی در مقایسه با سازه‌های سطحی از برتری‌های نسبی برخوردار هستند که در زیر خلاصه‌ای از این موارد آورده شده است:

۱- صرفه جویی در تهیه زمین و بهره‌گیری بیشتر از فضاهای سطحی به ویژه در مناطق

شهری

۲- حفظ محیط زیست

۳- ایمنی بالا در برابر تهاجم نیروهای بیگانه و عملیات‌های خرابکارانه از دیدگاه پدافند

غیرعامل

۴- ایمنی و پایداری بالا در مقابل حوادث طبیعی مثل زلزله، گردباد و صاعقه

در سال‌های گذشته به دلیل افزایش جمعیت در مناطق شهری و مسایلی مانند تراکم سازه‌های سطحی و استفاده بهینه از آن، ترافیک، آلودگی هوا و ... استفاده از فضاهای زیرزمینی را به عنوان راه حلی برای رفع این مشکلات به امری اجتناب ناپذیر تبدیل کرده است. در این میان می‌توان به ساخت ورزشگاه‌های زیرزمینی، ساخت بیمارستان‌ها، اقامتگاه‌های زیرزمینی، منابع آب مدفون، مخازن زیرزمینی انواع سوخت‌ها در مناطق شهری، تونل‌های راه، راه آهن، مترو، انتقال آب و تونل‌های ترافیکی اشاره کرد.

از میان انواع فضاهای زیرزمینی، به کارگیری تونل‌ها به ویژه با کاربری ترافیکی در مناطق شهری یکی از جنبه‌های گریزناپذیر توسعه مناطق شهری به حساب می‌آید و با توجه به تراکم سازه‌های سطحی از جمله ساختمان‌های مسکونی، تامین ایمنی و پایداری تونل و کنترل جابجایی‌های ناشی از ساخت آن به ویژه نشست و جابجایی در سطح زمین از جمله چالش‌های مهم تونل‌سازی در

محیط شهری است.

در یک تقسیم‌بندی کلی روش‌های ساخت تونل را می‌توان در سه دسته کلی تونل‌سازی به روش سنتی، نیمه مکانیزه و مکانیزه قرار داد. انتخاب روش ساخت یک تونل دارای جنبه‌های مختلفی است که بررسی‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و ... در نهایت منجر به انتخاب یک یا چند روش برای ساخت یک تونل می‌شود. هر یک از این روش‌ها ویژگی‌ها و شرایطی بر اساس قابلیت به کارگیری دارند.

از جمله مهم‌ترین مزایای حفاری مکانیزه به شکل تمام مقطع دقیق بودن، سرعت و راندمان حفاری بالا، ایمنی بیش‌تر، بالا بودن راندمان پوشش نهایی، آسیب رساندن کم‌تر به زمین است. اگر چه این روش معایبی از جمله هزینه سرمایه‌گذاری بالا، صرف زمان اولیه زیاد برای سفارش، ساخت، حمل، مونتاژ و راه اندازی دستگاه، حمل و نقل سخت، عدم امکان اجرای مقطع تونل به صورت غیر دایره ای، محدودیت در به کارگیری در خاک‌های نامناسب نیز دارد. با وجود مزایا و معایبی که این روش دارد، ویژگی که باعث گستردگی استفاده به ویژه در محیط های شهری شده است، کنترل تغییرشکل محیط اطراف تونل است.

از آن‌جا که بیشتر شهرها در اطراف بستر رودخانه‌ها ساخته شده‌اند، بر روی لایه‌های مختلفی از انواع خاک‌ها قرار گرفته‌اند و تونل‌سازی در چنین شرایطی به اصطلاح تونل‌سازی در زمین‌های نرم گفته می‌شود. از مهم‌ترین روش‌های حفاری در زمین‌های نرم استفاده از انواع ماشین‌های حفاری تونل دارای سپر است. طی یک تقسیم‌بندی کلی ماشین‌های سپری به دو دسته کلی ماشین‌های سپری تمام مقطع و ماشین‌های سپری با پیشروی بخشی تقسیم می‌شوند که استفاده از هر یک مربوط به شرایط خاصی است.

۲-۱ مشخصات عمومی طرح

خط A قطار شهری قم با طول حدود ۱۴۷۰۰ متر و با قطر حدود ۹ متر از مسجد مقدس جمکران شروع شده و با عبور از ۱۴ ایستگاه تا قلعه کامکار ادامه می‌یابد. اجرای تونل‌های موجود در این پروژه به دو روش مکانیزه با طول بیش از ۱۰ کیلومتر و سنتی (NATM) با طول بیش از ۳ کیلومتر در نظر گرفته شده است. برای حفر بخش مکانیزه این طرح استفاده از ماشین TBM از نوع فشار تعادلی زمین (EPB) در نظر گرفته شده است [1].

۳-۱ ضرورت و هدف تحقیق

با توجه به افزایش جمعیت و تراکم آن در شهرها لذا استفاده از فضاهای زیرزمینی امری اجتناب ناپذیر است، اما لازمه آن آگاهی از مسائل و مشکلات سازه‌های زیرزمینی و راه حل‌های آن‌ها است. یکی از مشکلات رایج که در اثر حفر یک سازه زیرزمینی وجود دارد پدیده نشست است که با توجه به اینکه عوارض آن بر روی سطح زمین می‌تواند شامل خرابی ساختمان‌ها و سازه‌های سطحی باشد، بنابراین کنترل و مدیریت آن در مرحله اجرا و حتی بهره‌برداری بسیار ضروری خواهد بود. در زمان طراحی نیز آگاهی از میزان نشست در اثر حفاری سازه مد نظر اهمیت دارد. آگاهی از روش یا رابطه‌ای که تقریب خوبی از نشست به ما ارائه دهد می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

با توجه به روش‌هایی که برای تخمین میزان نشست استفاده می‌شوند و دقت آن‌ها می‌توان گفت روش‌های عددی به دلیل ویژگی‌هایی که دارند بسیار پر کاربرد هستند. اما نکته مهم در استفاده از مدل‌سازی عددی این است که از مدل رفتاری استفاده کرد که با محیط هم‌خوانی داشته باشد، پاسخ به این سوال که آیا مدل‌های رفتاری مختلف بر اندازه نتایج خروجی مدل‌های عددی به ویژه نشست چگونه تأثیری دارد، ضروری است، به عبارتی آیا استفاده از مدل رفتاری نامناسب منجر به نتایجی دور از واقعیت خواهد شد؟ در حقیقت هدف اصلی از این پژوهش بررسی این موضوع است که در منطقه مورد مطالعه کدام مدل رفتاری با رفتار خاک هم‌خوانی بیش‌تری دارد.

از این رو بررسی انتخاب مدل رفتاری مناسب می‌تواند یکی از ضرورت‌های هر پروژه‌ای باشد که در این پژوهش با عنوان بررسی عددی تاثیر مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین در تونل‌سازی مکانیزه برای خط A مترو قم، بررسی می‌شود.

۴-۱ روش انجام تحقیق

به دلیل ماهیت سه‌بعدی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل، مدل‌سازی عددی به عنوان ابزار مناسبی برای تحلیل این‌گونه مسایل پیچیده به شمار می‌رود. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D، ابتدا محیط زمینی که تونل در آن واقع است ساخته شده، سپس ویژگی‌ها و خواص مواد و لایه‌ها به آن‌ها نسبت داده شده و بعد از برقراری شرایط مرزی و تنش‌های اولیه با انتخاب یک مدل رفتاری، فرایند حفاری تونل آغاز شده و اندازه‌گیری نشست نیز همزمان با پیش‌روی انجام می‌شود. در نهایت با مقایسه نتایج نشست سطح زمین برای مدل‌های رفتاری مختلف سعی می‌شود رابطه‌ای میان مدل‌های رفتاری و میزان نشست سطح زمین در اثر تونل‌سازی مکانیزه ارائه داد.

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۷ فصل است که به شرح زیر توضیح داده می‌شود و در شکل (۱-۱) توضیح داده شده است:

فصل اول با عنوان کلیات، کلیاتی از موضوع پژوهش، ضرورت و روش انجام پژوهش ارائه شده است.

فصل دوم با عنوان پیشینه مطالعات انجام شده است. در این فصل ابتدا کلیاتی درباره جابجایی‌های اطراف تونل، نشست، روش‌های پیش‌بینی تغییرشکل زمین در اثر حفر تونل ارائه شده است. سپس به چندین مورد از بررسی‌های انجام گرفته در این زمینه به طور مختصر پرداخته شده

است.

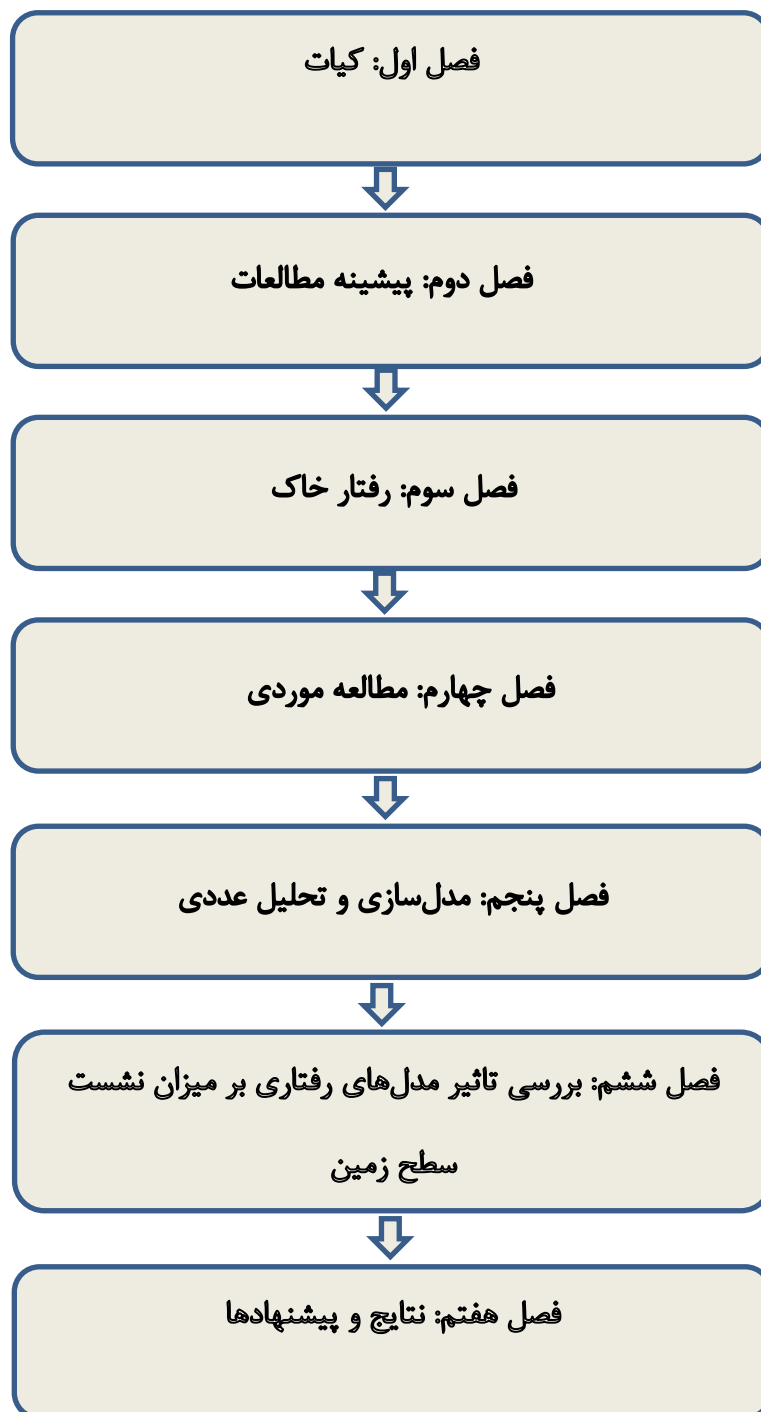
فصل سوم با عنوان رفتار خاک انجام شده است. در این فصل به معرفی جنبه‌های رفتاری خاک، رفتار خاک در ساخت‌های مختلف و مدل‌های رفتاری پرداخته شده است.

فصل چهارم با عنوان مطالعه موردی انجام شده است. در این فصل به معرفی پروژه خط A قطار شهری قم پرداخته شده است. در ادامه مشخصات تونل، نتایج آزمایش‌های انجام شده در قالب مقادیر پیشنهادی پارامترهای مهندسی خاک، سیستم رفتارسنجی و نتایج آن ارایه شده است.

در فصل پنجم با عنوان مدل‌سازی و تحلیل عددی، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D مدل مورد نظر ساخته شده و مراحل مختلف حفاری و ساخت تونل به مدل اعمال شده است. در ادامه با اعمال مدل‌های رفتاری مورد نظر به بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین در اثر تونل‌سازی مکانیزه برای خط A پروژه قطار شهری قم پرداخته شده است.

در فصل ششم با عنوان بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین، نتایج حاصل از مدل‌سازی ارایه شده است. در ادامه، این نتایج با استفاده از نتایج حاصل از رفتارسنجی تونل مقایسه و اعتبارسنجی انجام شده است. سپس به تحلیل تاثیر پارامترهای رفتاری مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین و مقایسه برآورد نشست سطح زمین در مدل‌های عددی و تحلیلی پرداخته شده است.

در فصل هفتم نیز جمع‌بندی، نتایج و پیشنهادها ارایه شده است.



شکل ۱-۱: ساختار پایان نامه

۲ فصل دوم: پیشینه مطالعات

۱-۲ مقدمه

در اثر حفاری و ساخت یک تونل در خاک تغییری در توزیع تنش‌ها و شرایط برجا رخ می‌دهد. به طور کلی این تغییر در شرایط تنش‌ها باعث ایجاد جابجایی در محیط اطراف تونل خواهد شد، که این جابجایی‌ها می‌توانند به شکل‌های مختلفی مانند همگرایی تونل، حرکت جبهه کار به سمت داخل تونل و هم‌چنین جابجایی‌هایی در سطح زمین بروز پیدا کنند. اهمیت و کنترل این جابجایی‌ها در محیط‌های شهری که سازه‌های متراکم سطحی وجود دارند و عمق سازه کم است، بیش‌تر است.

کنترل جابجایی‌ها نیاز به آگاهی از چگونگی توزیع و میزان جابجایی‌ها دارد که در این زمینه آگاهی از چگونگی رفتار زمین در برابر الگوی تنش - تغییر شکل کمک زیادی می‌کند. چگونگی توزیع و میزان جابجایی‌هایی که در اثر تونل‌سازی القا شده است توسط عواملی مانند پارامترهای اجرایی روش اجرا و رفتار خاک کنترل می‌شود.

از آن‌جا که پیش‌بینی جابجایی‌ها به‌ویژه جابجایی‌های سطحی در اثر حفر تونل بخش مهمی از مطالعات یک پروژه را شامل می‌شود، از گذشته تا به امروز به عنوان یک چالش به روش‌های مختلف توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان آن‌ها را در قالب روش‌های تجربی، تحلیلی، مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی تقسیم بندی کرد.

۲-۲ روش‌های پیش‌بینی جابجایی‌های سطحی در اثر حفر تونل

شرایط اجرای یک پروژه تونل‌سازی شرایطی پیچیده است، به عبارتی عوامل متعددی بر یکدیگر اثر می‌کنند. از طرف دیگر، بیش‌تر راه حل‌های تجربی و تحلیلی همراه با ساده‌سازی‌ها و یا محدودیت‌هایی هستند. از این‌رو نمی‌توان در یک رابطه تمامی عوامل موثر بر هم را اثر داد. به عبارتی راه حل‌ها جدا از هم هستند. به عنوان مثال، در روش‌های تجربی یا تحلیلی رابطه‌ای واحدی بین

تنش‌های زمین، خواص سیستم نگهداری، فشار جبهه‌کار، عوارض سطحی و نشست زمین وجود ندارد. بنابراین این روش‌ها خیلی دقیق نبوده و بیش‌تر برای اعتبار سنجی، برآوردهای اولیه و راهنمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های تجربی و تحلیلی، روش‌هایی جامع‌تر هستند. چرا که در روش‌های عددی می‌توان جنبه‌های مختلف و هم‌چنین عوامل متعدد تاثیرگذار بر اجرای یک پروژه تونل‌سازی را اثر داد. از این‌رو روش‌های عددی به عنوان ابزار اصلی برای مدل‌سازی یک پروژه، شبیه‌سازی رفتار و برهم‌کنش زمین و تونل در مراحل مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مدل‌سازی‌های عددی، دقت نتایج وابسته به میزان آگاهی از شرایط برجا و چگونگی رفتار محیط درونگیر است. از طرفی خاک‌ها با توجه به ساختار مواد تشکیل دهنده خود دامنه وسیعی از رفتارها را از خود نشان می‌دهند که امکان اعمال همه آن‌ها در یک مدل رفتاری واحد وجود ندارد، بنابراین بررسی ویژگی‌های رفتاری خاک در شرایط مختلف مانند، شرایط بارگذاری و باربرداری گوناگون و میدان‌های تنش مختلف امری اجتناب ناپذیر است و این کار در انتخاب مدل رفتاری مناسب برای محیط درونگیر موثر خواهد بود.

۱-۲-۲ روش‌های تجربی

به طور کلی روابط تجربی برای تخمین حرکت خاک در زمین‌هایی است که بر روی آن‌ها ساخت و ساز صورت نگرفته، بنابراین برای بررسی رفتار سازه‌های اطراف تونل کاربرد ندارند. روش‌های تجربی از جمله اولین روش‌ها هستند. می‌توان از اولین روابط ارائه شده برای پیش‌بینی نشست سطح زمین به مدل ریاضی لیتوینیسزین^۱ (۱۹۵۶) اشاره کرد [1]. در این روش اجزای تشکیل دهنده زمین کره‌های هم اندازه سه بعدی یا دیسک‌های دو بعدی فرض شده‌اند که با برداشتن یک کره، مجموعه‌ای از حرکات در کره‌های به هم چسبیده ایجاد می‌شود که حرکت این کره‌ها به داخل زمین معادل

¹ Litwinski

نشست در نظر گرفته شده است. از آن جا که جابجایی ها بر اساس قوانین احتمال بوده و تنها نیروی اثر گذار جاذبه است، بنابراین شکل گودی نشست مشابه یک منحنی احتمالاتی نرمال خواهد بود [2].

ات^۱ (۱۹۷۹) رابطه ای برای برآورد نشست عرضی ارایه کرد که در اصل اصلاح شده روش پک بوده است (در ادامه به روش پک پرداخته شده است) و در آن پارامترهای بیشتری را از محیط دربرگیرنده و تونل اعمال کرد. قابل ذکر است که این روش تنها روشی است که به طور مستقیم مدول دگرشکلی را نیز اعمال کرده و از این جهت نسبت به سایر روش ها دقیق تر است [3]، [4]. پک و اشمیت^۲ (۱۹۶۹) اطلاعات گسترده ای از عملیات اجرای تونل در زمین های نرم و بکر تهیه کرده و آن را گزارش کردند. آن ها به وسیله ارزیابی آماری داده های صحرایی جمع آوری شده نشان دادند که توزیع نشست عرضی زمین در اثر حفر تونل می تواند با استفاده از منحنی احتمالاتی نرمال یا منحنی گوس با دقت خوبی برآورد شود. همچنین مشاهدات اجرایی آن ها نشان داد که نشست عرضی در زمین بکر را می توان با یک منحنی توزیع نرمال گوسی با دو پارامتر نشست در محور تونل (نشست حداکثر) و فاصله نقطه عطف منحنی نشست تا محور تونل برآورد کرد. با این روش می توان برآوردی از نشست سطح زمین را در فاصله های مختلف از محور تونل و در مقطع عرضی آن به دست آورد [5]. این روند توسط اوریلی و نیو^۳ (۱۹۸۲) پیگیری و کامل تر شد به طوریکه در بیش تر مطالعات در نظر گرفتن منحنی گوسی برای نشست پذیرفته شد. آن ها با بررسی آماری مشاهدات برجها نشست در بالای حفریه های معدنی مستطیلی رابطه خود را که مشابه رابطه پک بود ارایه کرده و این فرضیه را پیشنهاد کردند که این جابجایی های سطحی به سمت مرکز تونل هدایت می شوند و پهنای منحنی می تواند با یک پارامتر تجربی مانند K که تابع شرایط زمین است، ارزیابی شود. هر چند پژوهشگران زیادی از جمله گلسپ^۴ (۱۹۷۸)، اری اقلو^۵ (۱۹۹۲)، لی^۶ (۱۹۹۹) و ... برای تعیین مختصات نقطه عطف در منحنی گودی

¹ Oteo

² Peck & Schmidt

³ O'reilly & New

⁴ Glossop

⁵ Arioglu

⁶ Lee

نشست فعالیت کردند اما این دو پژوهشگر فعالیت شاخصی در این زمینه انجام دادند. آن‌ها بعدها با اثر دادن داده‌های بیش‌تر رابطه اولیه خود را اصلاح کرده و رابطه نهایی خود را ارایه کردند که بر اساس آن این نتیجه گرفته شد که گودی نشست در زمین‌های غیرچسبنده دارای پهنای کم‌تر و بیشینه نشست بیش‌تر است. بنابراین در چنین زمین‌هایی منحنی گوس همواره با منحنی نشست هم‌خوانی نخواهد داشت و به همین دلیل آن‌ها یک منحنی دیگر برای برآورد نشست در چنین زمین‌هایی ارایه کردند [2]، [6]. این موضوع توسط پژوهشگران دیگری از جمله میر و تیلر^۱ (۱۹۹۷) پرداخته شد و براساس مشاهدات متعدد مقادیری برای مقدار K در نظر گرفته شد، مثلاً مقدار عددی این پارامتر برای شن و ماسه بین ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ و برای رس‌ها در شرایط نشست کوتاه مدت نزدیک به ۰/۵ خواهد بود [7]. آتول و وودمن^۲ (۱۹۸۲) نیز با بهره‌گیری از تیوری احتمالات، نشست طولی را در امتداد محور تونل برآورد کردند. با توجه به مطالعات انجام شده تا آن زمان، این یکی از معدود روابطی بود که امکان پیش‌بینی نشست طولی را دارا بود. چرا که مطالعات انجام شده تا آن زمان مربوط به برآورد نشست عرضی بود [8]، [9].

۲-۲-۲ روش‌های تحلیلی

در زمینه به کارگیری راه حل فرم بسته برای برآورد میزان نشست سطحی محققین زیادی فعالیت کرده و روش‌های متعددی را نیز منتشر کرده‌اند. ساگاستا^۳ (۱۹۸۹) یک رابطه تحلیلی دو بعدی از تغییر شکل زمین برای به دست آوردن میدان کرنش در یک محیط همگن، ایزوتروپ و تراکم ناپذیر ارایه کرد. وی با در نظر گرفتن معادلات کرنش، از معادلات تنش صرف نظر کرد [3]، [10]، [11]. ورویت و بوکر^۴ (۱۹۹۸) در این زمینه کار کرده و با تعمیم این روش، بر خلاف روش ساگاستا توانستند جابجایی قائم و افقی سطح مقطع تونل را در اعماق مختلف سطح زمین برای محیط

¹ Mair & Taylor

² Attewell & Woodman

³ sagaseta

⁴ Verruijt A, Booker

تراکم‌پذیر با نسبت پواسن‌های متفاوت ارایه دهند [11]، [12]. در سال (۱۹۹۸) لگاناتان و پولوس^۱ روش ورویت و بوکر را به گونه‌ای تصحیح کردند که پارامتر افت زمین (ϵ_0) که جدید مشخص شده بود و حرکات غیرخطی زمین پیرامون فصل مشترک تونل را در نظر می‌گرفت، را نیز دربر گیرد. به طور کلی آن‌ها شرایط واقعی‌تری از تغییر شکل تونل را در رابطه خود اعمال کردند. افت زمین در این روش واقعی‌تر بود بطوریکه جابجایی در امتداد دیواره‌ها یکنواخت‌تر و در امتداد تاج بیش‌تر فرض شد. قابل ذکر است این روش برای شرایط زه‌کشی نشده است [11]. پینتو و ویتل^۲ (۲۰۰۱) برای برآورد جابجایی قائم و افقی زمین در عمق‌های مختلف رابطه‌ی خود را به گونه‌ای ارایه کردند که در این روش جابجایی زمین به همگرایی یکنواخت، بیضوی شدگی و حرکت یکنواخت به سمت پایین مرتبط شد [13]. پارک^۳ (۲۰۰۵) درباره برآورد تغییرشکل‌های القایی در اثر تونل‌سازی در زمین‌های نرم رسی پژوهش کرد. در این بررسی الگوی تغییرشکل بیضوی به عنوان شرایط مرزی به مرزهای حفیره اعمال شد تا الگوی تغییرشکل غیر یکنواخت زمین در دهانه در نظر گرفته شود. او برای بررسی کارا بودن راه حل خود پنج مطالعه موردی را بررسی کرد که در چهار مورد از آن‌ها شرایط مرزی ساده بود به طوریکه در یک مورد الگوی تغییرشکل شعاعی یکنواخت و در سه مورد دیگر الگوی تغییرشکل بیضوی برای دهانه‌ها در نظر گرفته شد [14]. علاوه بر موارد ذکر شده پژوهشگران دیگری از جمله اشمیت^۴ (۱۹۶۹)، اوتیو و مایا^۵ (۱۹۷۹) و چو^۶ (۱۹۹۴) نیز در این زمینه فعالیت کرده‌اند که در این میان به دلیل اهمیت موارد ذکر شده، به آن‌ها پرداخته شد.

در جدول (۱-۲) خلاصه‌ای از روابط تجربی و تحلیلی آورده شده‌اند.

¹ Loganathan & Poulos

² Pinto & Whittle

³ Park

⁴ Schmidt

⁵ Oteo & Moya

⁶ Chou

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از روابط ارائه شده برای محاسبه میزان نشست سطح زمین

ارایه دهنده	روابط و پارامترها
لیتونیسیزن (1956)	$\delta_v(y,z) = \frac{0.8t}{K_a} \left(\frac{z_0-z}{2a}\right)^{-n} \text{EXP}[-0.5\left(\frac{y}{aK_a}\right)^2 \left(\frac{z_0-z}{2a}\right)^{-2n}]$ δ_v نشست قائم، $2a$ عرض حفیره و t ضخامت بسته‌شدگی در عمق z_0، K_a و n ضرایب تجربی
پک و اشمیت (1969)	$S_v = S_{v,max} \text{EXP}\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \quad S_{v,max} = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi} \cdot i_x}$ S_v مقدار نشست سطحی در مقطع عرضی تونل، $S_{v,max}$ مقدار نشست بیشینه، y فاصله از محور تونل و i مختصات نقطه عطف منحنی نسبت به محور تونل، V_l همگرایی زمین به سمت تونل (حجم از دست رفته)
اتا (1979)	$w(y) = \Psi \frac{\gamma(2a_0)i}{E} (0.85 - \nu) e^{\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right)} \quad i = a_0 \eta (1.05 \frac{z_0}{a_0} - 0.42)$ E مدول یانگ خاک، a_0 شعاع تونل، z_0 عمق تونل، ν ضریب پواسون، Ψ ثابت تجربی، i موقعیت نقطه عطف منحنی گودی نشست، η ثابت تجربی، $w(y)$ نشست عرضی
اوریلی و نیو (1982)	$i = kz \quad i = 0.43Z + 1.1$ i نقطه عطف منحنی (پارامتر پهنای گودی نشست) در ارتفاع Z، بالای محور تونل، K ضریب تجربی ثابت
آتول و وودمن (1982)	$S = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot e^{\frac{-y^2}{2i^2}} \cdot \{G[\frac{X-X_i}{i}] - G[\frac{X-X_f}{i}]\} \quad G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\alpha} e^{\frac{-\alpha^2}{2}} d\alpha$ $\alpha = (X-X_i)/i$ S نشست، x, y طول و عرض نقطه مورد نظر، V_s حجم نشست در هر متر پیشروی، X_i ابتدا تونل، X_f جبهه کار
هرزوگ (1985)	$S_{max} = 0.785(\gamma \cdot Z_0 + \sigma_s) \cdot \left(\frac{D^2}{i \cdot E}\right)$ γ دانسیته، Z_0 عمق محور تونل از سطح زمین، σ_s بار اضافی ناشی از بار خیابان، D قطر تونل، i نقطه عطف منحنی نشست، E مدول الاستیسیته
ساگاستا (1989)	$w(y) = \frac{V_s}{\pi} \frac{Z_0}{y^2 + Z_0^2} \quad w(x) = \frac{V_s}{2\pi Z_0} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + Z_0^2}}\right)$ نشست عرضی $w(y)$، نشست طولی $w(x)$، V_s حجم از دست رفته و Z_0 عمق محور تونل از سطح زمین

$w(y) = 4\varepsilon \cdot a_0^2 (1 - \nu) \frac{z_0}{y^2 + z_0^2} - 2\delta \cdot a_0^2 z_0 \frac{y^2 - z_0^2}{(y^2 + z_0^2)^2}$ $\varepsilon = \frac{u_0}{a_0}$ و u_0 تغییر شکل یکنواخت دیواره تونل، a_0 شعاع تونل، ν ضریب پواسون و δ نسبت جابجایی بیشینه دیواره تونل به شعاع تونل	ورویت و بوکر (1998)
$w(y) = 4(1 - \nu) a_0^2 \frac{z_0}{z_0 + y^2} \frac{4ga_0 + g^2}{4a_0^2} \exp\left(-\frac{1.38y^2}{(z_0 + a_0)^2}\right)$ $g = G_p + u_{3D} + w$ $\varepsilon_0 = \frac{\pi\left(a_0 + \frac{g}{2}\right) - \pi \cdot a_0^2}{\pi \cdot a_0^2} 100\%$ u_p فاصله بین سیستم نگهداری و دیواره تونل، u_{3D} میزان تغییر شکل پلاستیک و الاستیک در راستای شعاع تونل در جبهه کار، w پارامتر مربوط به مهارت	لگاناتان و پولس (1998)

۳-۲-۲ روش‌های عددی

در گذشته به دلیل هزینه و صرف زمان زیاد در استفاده از رایانه‌ها، محققین استفاده از روابط تجربی را ترجیح می‌دادند. امروزه با توسعه و پیشرفت رایانه‌ها محققین به دلیل سرعت و دقت بالای رایانه‌ها در تجزیه و تحلیل مسایل از روش‌های عددی استفاده می‌کنند. در استفاده از روش‌های تجربی باید بر این نکته توجه داشت که این روش‌ها به دلیل ساده سازی‌ها و جدا از هم بودن روابط، جواب دقیقی از مساله را نمی‌توانند بیان کنند. این در حالی است که روش‌های عددی توانایی اعمال شرایط و ویژگی‌های بسیاری از پروژه واقعی را در مدل عددی امکان‌پذیر می‌کنند. همچنین هر چه مدل ساخته شده با شرایط واقعی هم‌خوانی بیش‌تری داشته باشد انتظار می‌رود جوابی دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت داشته باشد.

به طور کلی با روی کار آمدن روش‌های عددی پیشرفت زیادی در علوم مهندسی از جمله تونل‌سازی انجام شد که در اصل ویژگی‌هایی از جمله موارد زیر باعث این پیشرفت بوده‌اند.

- امکان بررسی سه بعدی
- توانایی اعمال شرایط پیچیده خاک

- ساخت هندسه‌های مختلف، مانند تونل با دهانه غیر دایره‌ای

- اعمال مدل‌های رفتاری مختلف

- در نظر گرفتن تاثیر چندین سازه بر هم

- روش‌های ساخت مرحله‌ای

- توانایی تحلیل دینامیکی و هیدرومکانیکی

حجازی و همکاران (۲۰۰۸) 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 پرداختند. در این پژوهش آن‌ها با ساخت یک مدل عددی دو بعدی از تونل کم عمق با استفاده از نرم افزار المان محدود PLAXIS به بررسی میزان جابجایی‌ها در مدل ساخته شده پرداختند. آن‌ها با تحلیل پارامتریک، تاثیر مدل‌های رفتاری را بر مدل‌سازی عددی نشان دادند. آن‌ها این‌گونه نتیجه گرفتند که استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر که شامل غیرخطی بودن پیش از شکست و صلبیت بالا در کرنش‌های بسیار کوچک است، به طور قابل ملاحظه‌ای برآورد جابجایی‌ها را بهبود می‌بخشد. هم‌چنین پیشنهاد کردند که مطالعات تکمیلی بیش‌تری برای بررسی مدل‌های رفتاری به دست آمده از مدل کم-کلی نیز انجام شود. به عنوان نکته آخر ارایه کردند که، باید مقایسه‌هایی با حفاری واقعی تونل‌ها انجام شود که کیفیت مدل‌سازی عددی بهتر شود [15].

فرچنیا (۱۳۸۸) مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و خاک سخت‌شونده را برای تخمین نشست سطح زمین و پایداری فضا‌های زیرزمینی کم عمق بررسی کرده است. وی با ساخت یک مدل عددی دو بعدی از تونل با استفاده از نرم افزار المان محدود PLAXIS به مقایسه این دو مدل رفتاری پرداخت. وی نتایج پژوهش خود را اینگونه بیان کرد که در مدل رفتاری موهر-کولمب، میزان بیشینه

نشست سطح زمین با افزایش عمق حفاری تونل، افزایش و ضریب اطمینان پایداری تونل حفر شده کاهش می‌یابد که اغلب در عمل قابل قبول نیست. اما در مدل رفتاری پیشرفته خاک سخت شونده با افزایش عمق حفاری تونل میزان نشست بیشینه سطح زمین کاهش و ضریب اطمینان پایداری تونل افزایش می‌یابد که این روند در عمل قابل قبول است. با توجه به این موضوع، وی برای استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب به دلیل برخورداری از پارامترهای ورودی ساده نسبت به مدل‌های رفتاری پیشرفته خاک سخت‌شونده پیشنهاد داد که می‌توان پارامترهای مقاومتی خاک را متناسب با عمق افزایش داد که این مدل به عنوان مدل رفتاری جایگزین و مناسب برای تعیین بیشینه نشست سطح زمین در خاک‌های همگن پیشنهاد شده است [16].

دو^۱ و همکاران (۲۰۱۳) در یک مدل‌سازی عددی به بررسی سه بعدی تاثیر مدل‌های رفتاری در حفاری مکانیزه تونل پرداختند. آن‌ها برای مطالعه، یکی از تونل‌های شبکه راه آهن ایتالیا را در نظر گرفتند. مدل عددی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D ساخته شده است. آن‌ها از دو مدل موهر-کولمب و پوش تسلیم برای مقایسه تاثیر این دو مدل در پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین و نیروهای سازه‌ای القا شده در پوشش تونل استفاده کردند. آن‌ها برای بررسی خود یک مدل عددی سه‌بعدی از تونل ساخته شده را به طول ۹۰ متر ساخته و در آن شرایط و مراحل ساخت تونل مورد نظر را شبیه‌سازی کردند. با اعمال شرایط پروژه بر مدل ساخته شده در نهایت میزان نشست عرضی سطح زمین، نشست طولی نرمالایز شده بر اساس قطر تونل در سطح زمین، نشست طولی و عرضی تاج تونل و میزان نیروی سازه‌ای القایی وارد بر پوشش تونل را با دو مدل گفته شده اندازه‌گیری کردند. در نهایت آنها نتیجه پژوهش خود را این‌گونه بیان کردند که نتایج، اهمیت تاثیر مهم مدل رفتاری زمین را بر رفتار تونل و جابجایی زمین نشان داده است. به‌طور کلی، مدل پوش تسلیم نیروی سازه‌ای و نشست سطح زمین بیش‌تری را به نسبت مدل موهر-کولمب ارائه می‌دهد. این نتایج اهمیت استفاده از یک مدل رفتاری به اندازه پیچیده را برای رسیدن به رفتار واقعی خاک در مهندسی تونل‌سازی

¹ Do

نشان می‌دهد [17].

لامبروگی^۱ و همکاران (۲۰۱۳) با ساخت یک مدل عددی سه بعدی حفاری کامل تونل را به وسیله ماشین تعادلی فشار زمین توسعه داده و اعتبار سنجی کردند. آن‌ها تمام جنبه‌های ساخت حفاری مکانیزه را مدل کرده و تاثیر آن‌ها بر جابجایی زمین را به منظور تحلیل پارامتریک بررسی کردند. در مرحله اعتبار سنجی از اطلاعات ۲۵ مقطع پروژه مترو مادرید استفاده کردند که با تنوع ساختار تشکیل دهنده، از ماسه لومی تا رس صلب، رو به رو شدند. در هر کدام از مدل‌های ساخته شده از سه مدل رفتاری الاستیک خطی، موهر-کولمب و کم-کلی اصلاح شده استفاده شد. به عنوان یک نتیجه کلی، نتایجی که از مدل رفتاری کم-کلی اصلاح شده به دست آمد نسبت به دو مدل رفتاری دیگر هم‌خوانی بیشتری با نتایج جابجایی قایم که برجا اندازه‌گیری شده بود، داشته است. علاوه بر این، زمانی که از دو مدل الاستیک خطی و موهر-کولمب استفاده می‌شود، تغییرات زیادی اطراف اطلاعات اندازه‌گیری شده برجا مشاهده می‌شود و نتایج به دست آمده به راحتی خلاصه نمی‌شوند. هم‌چنین آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که شبیه‌سازی‌ها با مدل رفتاری کم-کلی اصلاح شده به ویژه زمانی که توزیع جابجایی‌های افقی در عمق در نظر گرفته شود، هم‌خوانی بهتری نشان می‌دهد [18].

وکیلی و همکاران (۲۰۱۴) تاثیر مدل‌های رفتاری خاک را بر ارزیابی عددی تونل‌سازی مکانیزه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با ساخت یک مدل عددی سه بعدی با نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 3D و اعمال مدل‌های رفتاری موهر-کولمب، خاک سخت‌شونده همسانگرد و خاک سخت‌شونده همسانگرد با کرنش‌های کوچک به بررسی میزان جابجایی قایم و میزان تنش در نقاط مختلف مدل مانند روی سطح زمین، تاج و کف تونل در دو حالت تونل کم عمق و عمیق پرداختند. آن‌ها نتیجه پژوهش خود را این‌گونه ارایه کردند که جابجایی‌های به دست آمده از مدل خاک سخت

¹ Lambrugh

شونده همسانگرد با کرنش‌های کوچک در مقایسه با مدل خاک سخت شونده همسانگرد، کوچک‌تر هستند. زیرا در مدل خاک سخت شونده همسانگرد با کرنش‌های کوچک، کرنش‌های کوچک در مدل در نظر گرفته می‌شوند. هم‌چنین از دیگر نتایج آن‌ها این بود که بر خلاف مدل‌های پیشرفته، جابجایی قائم به دست آمده از مدل موهر-کولمب با مقادیر مدول‌های الاستیک مختلف در نقاط روی سطح زمین برای تونل کم عمق، بالازدگی در طول فرایند حفاری نشان می‌دهد که هم‌خوانی با آن‌چه در واقعیت اندازه‌گیری شده است ندارد. هم‌چنین دو مدل سخت‌شونده، سه مدول الاستیک را در خود دارند ولی مدل موهر-کولمب تنها یک مدول الاستیک دارد که کاهش آن بالازدگی را کاهش می‌دهد و این موضوع اهمیت انتخاب مدول الاستیک را برای این مدل مشخص می‌کند. به عنوان نتیجه آخر آن‌ها این‌گونه بیان کردند که با شرط این که $E_{MC} = E_{0,HSS}^{ref}$ باشد، مدل موهر کولمب در نقاط مورد بررسی مقادیر جابجایی را نزدیک به مقادیر جابجایی در همان نقاط در حالت مدل رفتاری خاک سخت شونده همسانگرد با کرنش‌های کوچک نشان می‌دهد [19].

صیادی و همکاران (۱۳۹۴) پژوهشی پیرامون انتخاب مدل رفتاری مناسب برای مدل‌سازی نشست ناشی از حفر تونل در محیط‌های شهری انجام داد. او با ساخت یک مدل عددی دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS به بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری موهر-کولمب، خاک سخت‌شونده و خاک سخت‌شونده با کرنش‌های کوچک بر میزان جابجایی نقاط مورد نظر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده پرداخت. در این پژوهش بخشی از تونل امیرکبیر به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. این تونل به روش حفاری مقطعی حفاری شده و بخشی از پروژه که برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده است، دارای سطح مقطع ۱۳۷ متر مربع است که به سه بخش مجزای تاق، پله و کف برای حفاری تقسیم می‌شود. در این پژوهش نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده و یک تحلیل پارامتریک نیز بر روی پارامترهای رفتاری اصلی خاک انجام شده است. آن‌ها نتایج خود را اینگونه بیان کردند که مقادیر نشست حاصل از تحلیل عددی برای بیش‌تر مراحل حفر و نگهداری تونل در محدوده بین کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر اندازه‌گیری شده قرار دارد، هم‌چنین

مدل‌های سخت‌شونده بیش‌ترین هم‌خوانی را با نتایج رفتار سنجی حاصل از ابزار دقیق دارد و به عنوان نتیجه گیری کلی آن‌ها استفاده از مدل‌های پیشرفته که خواص غیرخطی قبل از شکست و سختی بالای خاک در کرنش‌های کوچک را در نظر می‌گیرد را به عنوان راه حلی برای بهبود بخشیدن پیش‌بینی جابجایی‌ها ارایه کردند. نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک نیز به‌طور خلاصه اینگونه ارایه شده است که با تغییرات پارامترهای اصلی خاک که مدول تغییرشکل‌پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک در نظر گرفته شده‌اند، میزان جابجایی قائم نیز تغییر می‌کند و افزایش هر یک از این پارامترها باعث کاهش میزان جابجایی قائم خواهد شد که این میزان کاهش در هر یک از مدل‌ها متفاوت است [20].

بهنام طلب و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی موضوع اثر مدل‌های رفتاری در پیش‌بینی تغییر شکل‌های سطح زمین ناشی از حفر تونل پرداختند. آن‌ها با ساخت یک مدل عددی دو بعدی از تونل مورد نظر که به روش NATM ساخته شده است، با استفاده از روش‌های المان محدود و تفاضل محدود توسط دو نرم‌افزار PLAXIS و FLAC و اعمال مدل‌های رفتاری موهر-کولمب، الاستیک، دراکر-پراگر و خاک سخت‌شونده، به بررسی این موضوع پرداختند. به‌طور خلاصه آن‌ها اینگونه نتیجه گرفتند که مدل موهر-کولمب به دلیل سادگی، یک مدل رایج در کارهای تحقیقاتی است. این در حالی است که مدل خاک سخت‌شونده یک مدل با دقت مناسب و نزدیک به واقعیت است و بر خلاف موهر-کولمب، این مدل توانایی تمایز بین رفتار بارگذاری و باربرداری دارد که این موضوع در مسایل گودبرداری و تونل که به‌طور کلی ماهیت مساله باربرداری است، مطلوب‌تر خواهد بود. هم‌چنین مدل دراکر-پراگر به دلیل این‌که تغییرشکل در ناحیه بالای تونل را نسبت به مدل خاک سخت‌شونده بیش‌تر برآورد می‌کند و با دور شدن از تونل رفتار دفعی دارد نمی‌توان به عنوان مدلی کارا انتخاب کرد و دیگر این‌که واقعیت رفتار خاک به موهر-کولمب به نسبت مدل دراکر-پراگر نزدیک‌تر است [21].

کامکار و حسینی (۱۳۹۷) به بررسی کارایی مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و خاک

سخت‌شونده در پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل در خاک‌های درشت دانه پرداختند. آن‌ها با ساخت یک مدل عددی دو بعدی از تونل مورد نظر که به روش NATM ساخته شده است، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS که به روش المان محدود تحلیل می‌کند، به بررسی این موضوع پرداختند. آن‌ها نتیجه بررسی خود را اینگونه ارایه کردند که انتخاب مدل رفتاری خاک سخت‌شونده منجر به نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مدل موهر-کولمب شده است. هم‌چنین، این نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین جابجایی قائم خاک در تاج تونل، بیش‌ترین جابجایی افقی ایجاد شده در سطح زمین و بیشینه نشست سطح زمین در مدل رفتاری موهر-کولمب بیش‌تر از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به دست آمده است [22].

در جدول (۲-۲) خلاصه‌ای از مطالعات عددی انجام شده آورده شده است.

جدول ۲-۲: خلاصه‌ای از پژوهش‌های عددی انجام شده

ارایه دهنده	نرم‌افزار و روش حفر	مدل‌های رفتاری	نتایج
حجازی (2008)	PLAXIS 2D Mechanized full face	موهر-کولمب، خاک سخت‌شونده، خاک سخت‌شونده در کرنش‌های کوچک	استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته، برآورد جابجایی‌ها را بهبود می‌بخشد.
فرچ‌نیا (2009)	PLAXIS 2D Mechanized full face	موهر-کولمب، خاک سخت‌شونده،	مدل رفتاری خاک سخت‌شونده با افزایش حفاری نتایج قابل قبول‌تری به نسبت مدل موهر-کولمب ارایه داده است. به دلیل وجود پارامترهای ساده و ثابت در مدل موهر-کولمب، می‌توان میزان پارامترها را متناسب با عمق افزایش داد تا نتایج نتایج بیشینه نشست بهبود یابد.
دو (2013)	FLAC 3D Mechanized full face	پوش تسلیم، موهر-کولمب	مدل پوش تسلیم نیروهای سازه‌ای و نشست بیشتری را پیش‌بینی کرده است. هم‌چنین استفاده از مدل رفتاری به اندازه پیچیده برای رسیدن به رفتار واقعی تونل ضروری است.
لامبروگی (2013)	FLAC 3D Mechanized full face	الاستیک خطی، موهر-کولمب، کم-کلی اصلاح شده	نتایج مدل رفتاری کم-کلی اصلاح شده، همخوانی بیش‌تری با نتایج اندازه‌گیری داشته است.
وکیلی (2014)	PLAXIS 3D Mechanized full face	موهر-کولمب، خاک سخت‌شونده، خاک سخت‌شونده در کرنش‌های کوچک	مدل خاک سخت‌شونده در کرنش‌های کوچک جابجایی بیش‌تری ارایه می‌دهد. نتایج مدل موهر-کولمب با نتایج واقعی همخوانی ندارد.
صیادی (2015)	PLAXIS 2D NATM	موهر-کولمب، خاک سخت‌شونده، خاک سخت‌شونده در کرنش‌های کوچک	مدل سخت‌شونده بیش‌ترین همخوانی را با نتایج ابزار دقیق دارد. استفاده از مدل‌های پیشرفته که سختی بالای خاک در کرنش‌های کوچک و خواص غیرخطی قبل از شکست را در نظر می‌گیرند، نتایج را بهبود می‌بخشند.

مدل خاک سخت‌شونده به عنوان مدلی با دقت مناسب و موهر- کولمب به عنوان مدلی پرکاربرد به دلیل پارامترهای ساده این مدل است. مدل دراگر- پراگر تغییرشکل بالای تونل را بیش‌تر از مدل خاک سخت‌شونده برآورد می‌کند و با دور شدن از تونل رفتار دفعی دارد و مدلی کارآمد نیست. مدل الاستیک نیز جابجایی‌ها را کم‌تر و بالازدگی زیادی را برآورد می‌کند که با واقعیت هم‌خوانی ندارد.	موهر- کولمب، الاستیک، خاک سخت‌شونده، دراگر- پراگر	FLAC 2D PLAXIS 2D NATM	بهنام طلب (2017)
مدل رفتاری خاک سخت‌شونده منجر به نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مدل موهر- کولمب شده است.	موهر- کولمب، خاک سخت‌شونده	PLAXIS 2D NATM	کامکار و حسینی (2018)

۳ فصل سوم: رفتار خاک

۳-۱ مقدمه

مطالعه ویژگی‌های رفتاری خاک در میدان‌های تنش و بارگذاری‌های مختلف و مدل‌سازی رفتار خاک در بسیاری از اهداف مهندسی مانند تونل‌سازی اهمیت بسیاری دارد. به طور کلی، خاک‌ها دارای طبیعت چندفازی (جامد، مایع و گاز)، ناهمگن، ناهمسانگرد و رفتار وابسته به زمان بوده که به دلیل نوع ساختار مواد تشکیل دهنده، ویژگی‌های رفتاری خاصی را در میدان تنش از خود نشان می‌دهند. این ساختار ناهمگن خاک باعث بروز رفتارهای مختلف و پیچیده شده که برای مثال می‌توان به خواص غیرخطی و رفتار وابسته به تنش (در اثر بارگذاری نرمال و برشی) اشاره کرد. چنین رفتارهایی باعث تمایز خاک‌ها از دیگر مواد جامد می‌شود. از طرف دیگر، شرایط ساختگاهی موادی مانند خاک نیز متغیر بوده و این مساله باعث افزایش پیچیدگی رفتار (یا واکنش) خاک‌ها در مقابل عوامل موثر محیطی (بارها و تنش‌های اعمالی) می‌شود. علاوه بر این، ویژگی‌های رفتاری خاک نسبت به فشار، دما، آب و شرایط شیمیایی و بیولوژیکی حساس است. بنابراین، بروز رفتارهای متفاوت در خاک در اثر شرایط محیطی و داخلی متفاوت اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این بخش، ضمن معرفی پیچیدگی‌های رفتار خاک، الزامات اساسی برای تشکیل مدل الاستوپلاستیک خاک مورد بررسی و مدل‌های رفتاری ارائه شده برای شرایط مختلف خاک به همراه محدودیت‌ها و گستره کاربرد هر یک تشریح شده است.

۳-۲ رفتار خاک در ساخت‌های مختلف

امروزه پروژه‌ها و سازه‌های مهندسی مختلفی در اندرکنش با محیط خاکی ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر یک از این پروژه‌های مهندسی بسته به شرایط خود دارای ویژگی‌های منحصر به فردی بوده که در اندرکنش با محیط خاکی درونگیر آن‌ها، رفتارهای مختلفی را از خود نشان می‌دهند. بنابراین، تحلیل این رفتارها به ویژه اندرکنش بین سازه و محیط خاکی درون‌گیر برای بهره‌برداری مناسب و طراحی اصولی این گونه پروژه‌ها ضروری خواهد بود. به طور کلی، به دلیل

ویژگی‌های خاصی مانند ویژگی‌های وابسته به زمان مواد، خواص متغیر و مشخص نبودن دقیق مرزها که خاک‌ها در رفتار از خود نشان می‌دهند، همواره تهیه اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل و طراحی در محیط‌های خاکی در مقایسه با سایر محیط‌ها مشکل‌تر بوده و با عدم قطعیت‌های بیش‌تری همراه خواهد بود.

به دلیل این‌که سازه‌های مختلف دارای کاربری و شرایط اعمالی مختلفی هستند، بنابراین بر اساس شرایط مختلف، هر یک از جنبه‌های رفتار مکانیکی خاک‌ها دارای سطح اهمیت مختلفی خواهد بود. در ادامه خلاصه‌ای از مهم‌ترین جنبه‌های رفتاری خاک در ارتباط با نوع کاربری و ویژگی‌های پروژه‌های مهندسی ارائه شده است.

- خاک‌ریز: احداث خاک‌ریز شامل بارگذاری اولیه است و در چنین مواردی عمدتاً سطوح تغییرشکل تقریباً بالا خواهد بود. در شرایطی که محیط خاک نرم باشد جنبه‌های خزش، تحکیم و رفتار غیرهمسانگرد مهم بوده و بررسی می‌شوند. [23]
- تونل‌سازی: به طور کلی فرایند تونل‌سازی شامل باربرداری است. در چنین مواردی بررسی رفتار تغییر شکل در نواحی مختلف تونل اهمیت پیدا کرده و مقاومت خاک نقش مهمی ایفا می‌کند.
- پی‌ها: این دسته شامل بارگذاری اولیه هستند. در مواردی که تحلیل تغییر شکل مورد بررسی است جنبه‌های صلبیت اهمیت پیدا می‌کند و در مواردی که تحلیل ظرفیت باربری مورد بررسی است، جنبه‌های مقاومتی اهمیت پیدا می‌کند. [23]
- حفاری و دیوار حایل: به طور کلی، این فرایندها شامل باربرداری هستند. قوسی شدگی در پشت دیواره‌ها نقش مهمی را ایفا نموده و می‌تواند توزیع بار متفاوتی را در دیوار ایجاد کند.
- پایداری شیب: در این دسته بیش‌ترین تأکید بر مقاومت خاک بوده و عوامل موثر بر

آن نیز بررسی می‌شوند. هم‌چنین رفتار وابسته به زمان نقش مهمی در این زمینه دارد.

۳-۳ ویژگی‌های رفتاری خاک

خاک‌ها در مقایسه با سایر مواد ویژگی‌های رفتاری منحصر به خود را دارند که وجود چنین ویژگی‌های ذاتی باعث بروز رفتارهای پیچیده و متنوع از خاک در مقابل بارهای اعمالی شده است. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های آشکار انواع خاک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ناهمگنی و ناهمسانگردی
 - چندفازی بودن (جامد، مایع و گاز)
 - طبیعت دانه‌ای (ذرات جدا از هم و با شکل و اندازه‌های مختلف در کنار هم هستند)
- به طور کلی می‌توان مهم‌ترین جنبه‌های رفتار مکانیکی خاک را در قالب موارد زیر دسته‌بندی کرد. در ادامه هر یک از این جنبه‌ها مختصر توضیح داده شده است.
- وابستگی به حضور آب
 - وابستگی به سطح تنش و رفتار غیرخطی (بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد)
 - بازگشت‌ناپذیری (ایجاد تغییر شکل‌های باقی‌مانده در یک چرخه تنش)
 - وابستگی به زمان

درباره رابطه بین رفتار مکانیکی خاک و تاثیر حضور آب بر این رفتار می‌توان گفت که این تاثیر را می‌توان به دو دسته تنش موثر و تاثیر رطوبت بر پارامترهای مقاومتی و مکانیکی خاک تقسیم کرد. اولین جنبه تاثیر آب بر رفتار مکانیکی خاک را می‌توان به اثر فشار منفذی و تنش موثر نسبت

داد. تنش‌های خاک به دو دسته کلی تنش موثر و فشار منفذی تقسیم می‌شود. از آن‌جا که رفتار مکانیکی خاک بیش‌تر به وسیله تنش موثر کنترل می‌شود، بنابراین آگاهی از توزیع فشار منفذی علاوه بر حالت تنش کلی در خاک برای دستیابی به تنش موثر ضروری خواهد بود. از طرف دیگر، رطوبت موجود در خاک تاثیرهای متفاوتی بر پارامترهای مقاومتی (مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک) و مدول دگرشکلی خاک دارد. تاثیر رطوبت بر پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی خاک به بافت، ابعاد و توزیع دانه‌های تشکیل دهنده خاک وابسته است که این مساله باعث بروز اثرهای مختلف در انواع خاک‌ها می‌شود. به‌طور کلی، تاثیرگذاری رطوبت بر پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی خاک به شکل دو مرحله‌ای نمود پیدا می‌کند. به گونه‌ای که با افزایش اولیه رطوبت، پارامترهای مقاومتی و مدول افزایش یافته و با ادامه افزایش رطوبت تا حد خاصی، پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی خاک روند کاهشی از خود نشان می‌دهند.

دومین جنبه رفتار مکانیکی خاک را می‌توان وابستگی به سطح تنش اعمالی دانست. این مساله بیش‌تر به شکل وابستگی صلبیت خاک (مدول دگرشکلی) به سطح تنش مورد بررسی قرار می‌گیرد. عوامل اصلی تاثیرگذار بر این جنبه رفتار مکانیکی خاک در ادامه آورده شده است:

- سطح تنش: به طور کلی با افزایش سطح تنش محصور کننده، صلبیت افزایش می‌یابد. بنابراین به هر اندازه که عمق خاک افزایش پیدا کند، صلبیت خاک افزایش می‌یابد.
- چگالی: با افزایش چگالی صلبیت خاک افزایش می‌یابد.
- زمان (سرعت بارگذاری): هر اندازه زمان بارگذاری کوتاه‌تر باشد، صلبیت بیش‌تر خواهد شد.
- مسیر تنش: فرایند باربرداری صلبیت بیش‌تری نسبت به بارگذاری ابتدایی دارد.
- آب و نفوذپذیری: خاک‌های اشباع زه‌کشی نشده از خاک‌های زه‌کشی شده و غیراشباع،

صلب تر خواهد شد.

- سطح کرنش: به هر اندازه سطح کرنش کوچک تر باشد، سطح صلبیت بزرگ تر خواهد شد.

علاوه بر تاثیر سطح تنش اعمالی بر صلبیت خاک، موارد زیر نیز از مهم ترین جنبه های رفتار مکانیکی خاک وابسته به تنش اعمالی هستند:

- فشردگی و اتساع: خاک های سست و متراکم رفتارهای متفاوتی در برابر برش از خود نشان می دهند. به طوری که، خاک های سست در اثر برش فشرده می شوند در حالی که خاک های متراکم در اثر برش اتساع پیدا می کنند. این مقدار از فشردگی و اتساع تا زمانی ادامه پیدا می کند که چگالی به مقدار بحرانی برسد. به طور کلی، رس ها قابلیت تراکم پذیری بیش تری نسبت به ماسه ها داشته و به ندرت اتساع پیدا می کنند مگر در حالت تحکیم یافتگی بالا.

- مقاومت خاک: این پارامتر در مورد خاک ها بیش تر به صورت مقاومت برشی بیان می شود. از آن جا که خاک از جمله مصالح اصطکاکی است، مقاومت برشی آن وابسته به سطح تنش موثر است. عوامل دیگری مانند چگالی، زمان، جهت، سرعت بارگذاری و تحکیم یافتگی بر مقاومت خاک اثرگذار هستند.

- تاریخچه تنش پیش تحکیم یافتگی: در این مورد می توان گفت هنگامی که خاک ها پیش بارگذاری می شوند، سطح تنش پیش تحکیم را بازیابی می کنند. رفتار خاک در تغییرات تنش کم تر از تنش پیش تحکیم سخت تر است در حالی که در سطوح تنش پس از پیش تحکیم، رفتاری نرم تر خواهد داشت.

سومین جنبه از رفتارهای مکانیکی خاک درباره تغییر شکل های غیر قابل برگشت ناشی از بارگذاری است. بیش تر خاک ها ناحیه الاستیک کوچکی دارند و تقریباً از شروع بارگذاری

تغییر شکل‌های برگشت ناپذیری را از خود نشان می‌دهند. همین موضوع باعث ایجاد مشکلاتی در مدل‌سازی رفتار خاک شده است. قابل ذکر است که شکست و تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر دو موضوع جدا از هم هستند. برای روشن شدن تفاوت این دو می‌توان نمونه خاکی که در تست آدیومتری مورد فشار تک محوری قرار گرفته شده است را مثال زد که در این شرایط نمونه دچار تغییر شکل‌های غیرقابل برگشت شده اما هرگز دچار شکست نخواهد شد.

چهارمین جنبه از رفتارهای مکانیکی خاک، رفتار وابسته به زمان است. پیش‌تر اشاره شد که

سختی

خاک و مقاومت هر دو وابسته به زمان هستند. در مواقعی که شرایط بارگذاری بدون تغییر باشد، زمان نقش بسیار مهمی در رفتار مکانیکی خاک خواهد داشت. در خاک‌های نرم زمانی که فشار منفذی زیادی ناشی از بارگذاری غیرزه‌کش رخ می‌دهد، تحکیم باعث تاخیر می‌شود. علاوه بر این، با از بین رفتن منافذ اضافی، فرایند جابجایی طی زمان به دلیل خزش ادامه می‌یابد. گونه دیگر از رفتار وابسته به زمان در خاک، متورم‌شوندگی است که به شکل تحکیم عکس دیده می‌شود (همان انبساط وابسته به زمان خاک در اثر افت تنش‌های کششی منفذی در اثر حذف بار است). [23]

۳-۴ مدل‌های رفتاری خاک

همان‌طور که رفتار سنگ‌ها تابع مقیاس است و در مقیاس‌های متفاوت با اهداف متفاوت بررسی می‌شوند، خاک‌ها نیز رفتاری تابع مقیاس داشته و برای درک بهتر رفتار آن‌ها بررسی در مقیاس‌های مختلف ضروری خواهد بود. به عنوان مثال برای بررسی رفتار خاک‌ها در مقیاس سانتی‌متر تا میکرومتر، می‌توان رفتار یک تا چند دانه و عوامل مجزایی را که حاکم بر فصل مشترک دانه‌ها بوده و با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی توصیف می‌شوند را مورد بررسی قرار داد یا در یک مقیاس بزرگ‌تر از اندازه نمونه‌ها این بررسی را انجام داد که در این حالت بررسی رفتار خاک نیاز به چشم‌پوشی از اثر مقیاس در معادلات پایه مدل‌سازی و از استفاده از مفاهیم مکانیک محیط‌های

پیوسته خواهد بود.

به طور کلی سه نوع معادلات شامل معادلات عمومی، قوانین رفتاری و شرایط مرزی در مسایل مکانیک محیط‌های پیوسته وجود دارد که قوانین رفتاری مشکل‌ترین آن‌ها به حساب می‌آید. در این میان، به دلیل پیچیدگی که قوانین رفتاری دارند، رفتارهای محیط مورد بررسی با استفاده از چارچوب‌های ریاضیاتی به نسبت ساده با عنوان مدل‌های رفتاری بیان می‌شوند که همانطور که گفته شد منظور از آن نسبت دهی چارچوب‌های ریاضیاتی به ویژگی‌ها و رفتار مکانیکی موادی است که پیچیدگی‌های آن‌ها توسط نتایج تجربی گوناگون شرح داده شده است. در حقیقت این پیچیدگی در قوانین رفتاری از این رو است که قالب اصلی که قوانین رفتاری ثبت می‌کنند دارای جنبه عددی مبهم است و این به معنی این است که قوانین فیزیکی در این حیطه غایب بوده و به همین دلیل نقش قوانین رفتاری با گذشت زمان به مدل‌های رفتاری تبدیل شده است.

یک مدل رفتاری کامل باید توانایی پیش‌بینی ویژگی‌های رفتاری خاک را که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، در شرایط بارگذاری متفاوت داشته باشد. اما از آن‌جا که جنبه‌های رفتاری خاک بسیار پیچیده است و امکان این که تمامی آن‌ها در یک مدل رفتاری واحد اعمال شوند وجود ندارد و از طرفی شرایط ساختگاهی خاک‌ها متفاوت است، بنابراین می‌توان گفت مدل رفتاری واحدی که توانایی اعمال گونه‌های رفتاری متفاوت یک نوع خاک را داشته باشد وجود ندارد و هر یک از مدل‌های رفتاری جنبه‌های خاصی از رفتار خاک را مورد بررسی قرار می‌دهند. بنابراین برای انتخاب اولیه یک مدل رفتاری باید شناخت کافی از ساختار مدل رفتاری و پارامترهای مورد نیاز وجود داشته باشد.

محققین بسیاری از سال‌های گذشته پیرامون مطالعه رفتار مکانیکی جامدات و توصیف آن‌ها در قالب مدل‌های رفتاری تحقیق کرده‌اند. اما با توسعه روش‌های عددی امکان بررسی مدل‌های رفتاری پیچیده‌تر امکان‌پذیر شد، به طوری که در سال‌های گذشته مدل‌های رفتاری مختلف توسط محققین توسعه داده شده است. به طور کلی، مدل‌های رفتاری که رفتار ماکروسکوپی را بررسی می‌کنند

به دو دسته تقسیم می‌شوند، دسته اول برای بررسی رفتار شکل‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند که مربوط به خاک‌های ماسه‌ای تا رسی و سنگ‌های نرم است و دسته دوم برای بررسی رفتار شکننده مورد استفاده قرار می‌گیرند که مربوط به حیطه خاک‌ها، رس‌های پیش‌تحکیم یافته و در سنگ‌ها به سنگ‌های سخت و گروه خاصی از سنگ‌های نرم است. در مواد شکل‌پذیر، رفتار غیرخطی ناشی از جابجایی‌های غیرقابل بازگشت دانه‌ها است، که به سخت‌شوندگی و تغییر حجم منافذی که در مقیاس نمونه تغییرات حجم را القا می‌کند، منجر می‌شود. در مواد شکننده رفتار غیرخطی ناشی از توسعه ترک‌ها است.

۳-۴-۱ مدل الاستیک

مدل رفتاری الاستیک ساده‌ترین رفتار مواد را ارائه می‌دهد. این مدل دارای دو نوع خطی (مورد نظر در این پژوهش) و غیرخطی است. مدل الاستیک خطی بر پایه قانون تنش- تغییرشکل خطی، هوک است که میزان تنش کلی یا تنش موثر را با تغییرشکل مرتبط می‌کند. در مدل الاستیک خطی پارامترهایی که نقش اساسی بازی می‌کنند مدول الاستیک E (مدول بالک K و مدول برشی G) هستند.

در مدل الاستیک خطی رفتار تنش- تغییرشکل به صورت خطی تغییر می‌کند و مسیر بارگذاری و باربرداری بر یکدیگر منطبق هستند. در مدل الاستیک غیر خطی رفتار تنش- تغییرشکل به شکل غیر خطی تغییر کرده و ثابت‌های ماده در این حالت به شکل توابعی از تنش- تغییرشکل در نظر گرفته می‌شوند. به عبارتی الاستیک غیرخطی بستی از مدل الاستیک خطی با در نظر گرفتن فاصله‌های خطی بی‌نهایت کوچک است، در این مدل مسیر بارگذاری و باربرداری می‌توانند بر هم منطبق (هیپرالاستیک) یا غیر منطبق (هیپوالاستیک) باشند.

۳-۴-۲ مدل الاستوپلاستیک

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، خاک‌ها بسیار متنوع بوده و ممکن است رفتارهای مختلفی را در شرایط گوناگون از خود نشان دهند. از آن‌جا که گستردگی و پیچیدگی رفتار خاک‌ها این امکان را نمی‌دهد که تمامی جنبه‌های رفتاری خاک‌ها در یک مدل رفتاری گنجانده شوند. بنابراین، ارایه مدل‌های رفتاری برای طیف گسترده خاک‌ها و مصالح طبیعی ضروری خواهد بود.

شاخه‌ی علمی مکانیک محیط‌های پیوسته زمینه‌ای است که در آن رفتار مکانیکی خاک‌ها در شرایط مختلف با روابط ریاضی انطباق داده می‌شود. به طور کلی شاخه مکانیک خاک، مدل موهر-کولمب را به عنوان یک مدل الاستوپلاستیک کامل می‌شناسد و مدل‌های الاستوپلاستیک متنوعی برای بررسی رفتار غیرخطی خاک توسعه داده شده است. [24]

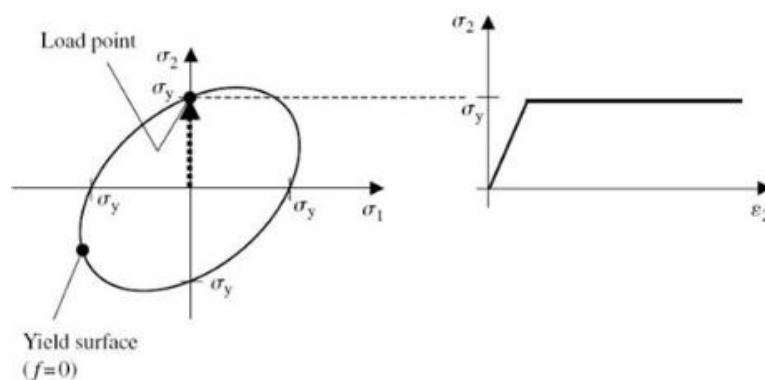
قوانین و به عبارتی مدل‌های رفتاری شکل‌های گوناگونی دارند. در این میان، مدل الاستوپلاستیک دارای ساده‌ترین و مناسب‌ترین قالب است. این مدل‌ها را می‌توان به گروه‌های زیر تقسیم کرد:

- مدل‌های بدون سخت‌شوندگی تغییر شکل، به وسیله یک تابع تسلیم، یک پتانسیل پلاستیک (با قانون جریان همراه یا غیرهمراه) و یک رابطه الاستیک که می‌تواند به شکل خطی یا غیرخطی باشد.
- مدل‌های با یک مکانیزم سخت‌شوندگی پلاستیک و قانون الاستیک، که می‌تواند همسانگرد یا ناهمسانگرد، خطی یا غیرخطی باشد.
- مدل‌های با چندین مکانیزم پلاستیک و الاستیک غیرخطی. [25]

اصول تنش موثری که ترزاقی ارایه کرده است، ترکیبی از قانون جریان سیال داری در مواد جامد، معادلات توازن جرم فازها و قانون رفتاری حالت جامد است که در قالب رابطه‌ای بین تنش موثر

و تغییرشکل بیان شده است. این نکته را باید دانست که خاک ماده‌ای متخلخل و متشکل از فازهای مایع، اجزای ارگانیک و کانی‌ها است. اصول تنش موثری که ترزاقی بیان کرده است، شرح مناسبی از رفتار فازهای متفاوت و برهم‌کنش آن‌ها ارائه کرده است. [24]

در این نوع مدل‌های رفتاری، رفتار مصالح در ابتدا به طور کامل الاستیک بوده و پس از رسیدن به تسلیم، به طور کامل پلاستیک می‌شود. بدین ترتیب مانند شکل (۵-۱) منحنی تنش- کرنش این مواد به صورت دوخطی خواهد بود قسمت اول بیان‌گر ناحیه الاستیک و ناحیه دوم بیان‌گر ناحیه پلاستیک است. هم‌چنین معیار تسلیم در این مدل همان معیار گسیختگی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱: شکل منحنی تنش-کرنش مواد الاستوپلاستیک

از جمله مهم‌ترین مفاهیمی که در مدل الاستوپلاستیک کاربرد دارند در زیر به همراه تعریف به طور خلاصه آورده شده‌اند [24]:

- تغییرشکل‌های مجزا، تانسور تغییرشکل کل به دو قسمت مجموع تغییرشکل‌های الاستیک و مجموع تغییرشکل‌های پلاستیک تقسیم شده است.
- ناحیه الاستیک، که ناحیه‌ای از فضای تنش داخل سطح تسلیم است، که در آن تغییرشکل‌ها به شکل بازگشت‌پذیر باقی می‌ماند.

- سطح تسلیم، مرز را در نزدیکی فضای تنش که رفتار ماده به شکل پلاستیک (بازگشت ناپذیر) تبدیل می شود تعریف می کند.
- قانون جریان پلاستیک، که سیر تغییر شکل های پلاستیک را توصیف می کند.
- سخت شوندگی، تغییرات اندازه و موقعیت سطح تسلیم در فضای تنش وابسته با بارهای اعمالی را نشان می دهد.
- معیار پلاستیسیته یا معیار شکست، که حالت تنشی که شکست در آن رخ می دهد را توصیف می کند. در حالت پلاستیسیته کامل، سخت شوندگی وجود ندارد بنابراین معیار شکست مشابه سطح تسلیم خواهد بود.

الگوهای ریاضی بسیاری در سال های گذشته برای امکان پیش بینی رفتار خاک ارایه شده است، اما به دلایلی از جمله دانه بندی، جنس دانه ها، شرایط جوی، چگونگی اعمال تنش بر آن ها و بسیاری موارد دیگر، این الگوها به طور جامع و کامل قادر به ارایه کلیه خصوصیات ویژگی های خاک ها نبوده و یا استفاده از برخی از این الگوها به قدری دشوار و دور از امکان استفاده مهندسی است که کاربرد آن ها را در صنعت منتفی ساخته است. [26]

امروزه استفاده از مدل های رفتاری الاستوپلاستیک گسترده تر و زیادی نسبت به گذشته پیدا کرده است. از این مدل در تحلیل های اولیه بسیاری از سازه های مهندسی و ژئوتکنیکی استفاده می شود. به طور کلی همانطور که پیش تر گفته شد، انتخاب مدل های رفتاری از مهم ترین مراحل تحلیل های عددی به شمار می آید. بنابراین مدل رفتاری که پارامترهای کمی داشته باشد، تعیین این پارامترها نیاز به هزینه و زمان کمی داشته باشد و نتایج نزدیک به واقعیت ارایه دهد، طبیعی است که بسیار پر کاربرد خواهد بود.

۳-۴-۳ مدل موهر - کولمب

مدل موهر-کولمب یک مدل الاستوپلاستیک کامل از رفتار خاک را ارائه می‌دهد به طوری که قسمت الاستیک آن به شکل خطی و پلاستیک آن به گونه پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که در این مدل رفتاری نقش اساسی بازی می‌کنند مدول یانگ، دانسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع، نسبت پواسن، مدول برشی هستند. در بارگذاری اولیه در این مدل، نمودار تنش-کرنش به شکل الاستیک، با صلبیت ثابت و تا سطح معینی از تنش تسلیم خواهد بود. هم‌چنین در ادامه رفتار الاستیک، رفتار پلاستیک نمود پیدا کرده و برای بررسی این رفتار از تابع تسلیم استفاده می‌شود. در مدل رفتاری موهر-کولمب در حالت تنش کلی می‌توان شکست خاک را در فضای سه بعدی از تنش‌های اصلی با یک سطح شکست شش‌وجهی نمایش داد.

پیرامون سطح تسلیم شش‌وجهی می‌توان با استفاده از بسط قانون کولمب معادلات این سطح تسلیم را به طور خلاصه همانگونه که در زیر آورده شده است، ارائه نمود. σ'_1 ، σ'_2 و σ'_3 مقادیر تنش‌های اصلی، C' چسبندگی و φ' زاویه اصطکاک داخلی هستند.

$$f_1 = 0 ; f_1 = \frac{1}{2}|\sigma'_2 - \sigma'_3| - \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\varphi' - C'\cos\varphi' \leq 0 \quad (1-3)$$

$$f_2 = 0 ; f_2 = \frac{1}{2}|\sigma'_3 - \sigma'_1| - \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\varphi' - C'\cos\varphi' \leq 0 \quad (2-3)$$

$$f_3 = 0 ; f_3 = \frac{1}{2}|\sigma'_1 - \sigma'_2| - \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\varphi' - C'\cos\varphi' \leq 0 \quad (3-3)$$

از طرفی بنابر قانون هوک می‌توان رابطه تنش-کرنش را برای حالت الاستیک به شکل رابطه

(۴-۳) نوشت.

$$\dot{\sigma}' = D^e \dot{\varepsilon}^e \quad (۴-۳)$$

که در این رابطه پارامترهای $\dot{\sigma}$ نرخ تنش، $\dot{\varepsilon}^e$ کرنش الاستیک متناظر و D^e ماتریس صلبیت الاستیک مواد هستند.

همان طور که در رابطه (۵-۳) آمده است، نرخ کرنش در پلاستیک کامل دو بخش الاستیک و پلاستیک را در خود جای می دهد که در آن $\dot{\varepsilon}^p$ نرخ کرنش پلاستیک و $\dot{\varepsilon}^e$ نرخ کرنش الاستیک است.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p \quad (۵-۳)$$

نرخ کرنش های پلاستیک با استفاده از تابع پتانسیل به شکل رابطه (۶-۳) تعیین می شود که در آن λ_1, λ_2 و λ_3 ضرایب پلاستیک هستند.

$$\dot{\varepsilon}^p = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \sigma'} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \sigma'} + \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial \sigma'} \quad (۶-۳)$$

توابع پتانسیل پلاستیک به شکل روابط زیر تعریف می شوند:

$$g_1 = \frac{1}{2} |\sigma'_2 - \sigma'_3| - \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \psi \quad (۷-۳)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} |\sigma'_3 - \sigma'_1| - \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \psi \quad (۸-۳)$$

$$g_3 = \frac{1}{2} |\sigma'_1 - \sigma'_2| - \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \psi \quad (9-3)$$

زاویه اتساع ψ برای مدل سازی تغییرات کرنش حجمی پلاستیک مثبت در حالت تسلیم پلاستیک مورد استفاده قرار می گیرد.

با استفاده از شرایط سازگاری و روابط ذکر شده می توان ضرایب پلاستیک $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ را از معادله (3-11) به دست آورد.

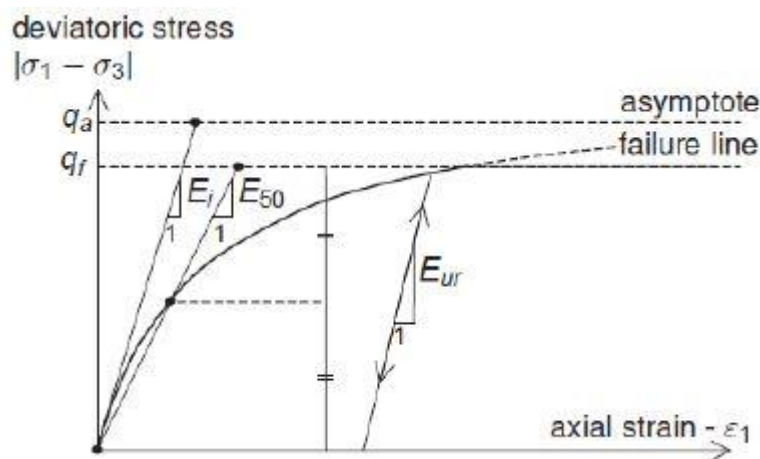
$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \dot{\sigma}' = 0 \quad (10-3)$$

$$\dot{f}_i = \frac{\partial f_i}{\partial \sigma'} D^e (\dot{\epsilon} - \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \sigma'} - \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \sigma'} - \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial \sigma'}) = 0 \quad (11-3)$$

به دلیل گستردگی مطالب، در این قسمت سعی شد خلاصه ای از روابط و فرمولاسیون مدل موهر-کولمب را ارائه کرد. برای جزییات بیش تر پیرامون این موضوع به منابع [26] و [27] مراجعه شود.

۴-۴-۳ مدل خاک سخت شونده

این مدل بر اساس مدل موهر-کولمب ساخته شده است، با این تفاوت که امکان تغییر چسبندگی و زاویه اصطکاک در این مدل در نظر گرفته شده است. در مدل موهر-کولمب با استفاده از پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک و زاویه اتساع حالت تنش حدی بیان شده است. این در حالی است که رفتار پیش از شکست خاک توسط سه پارامتر مدول صلبیت می تواند بهتر توصیف شود که این سه پارامتر در شکل (3-2) نشان داده شده اند و شامل مدول بارگذاری سه محوره E_{50}^{ref} ، مدول باربرداری E_{ur}^{ref} و مدول ادیومتری E_{50}^{oed} هستند.



شکل ۲-۳: رابطه هایپربولیک در بارگذاری اولیه میان تنش انحرافی و کرنش محوری [28]

نکته قابل توجه در مدل خاک سخت شونده این است که خلاف مدل موهر-کولمب که مدول تغییرشکل ثابت بود، در این مدل با تغییرات فشار، مدول تغییرشکل نیز تغییر می کند.

همان طور که پیش تر اشاره شد مدل های رفتاری مختلف به دلیل گستردگی رفتار خاک در شرایط مختلف ارایه شده اند. این مدل رفتاری نیز برای بررسی جنبه های خاصی از رفتار خاک طراحی شده است که در زیر نمونه هایی از آن ها آورده شده اند.

- توسعه کرنش های بازگشتناپذیر با رسیدن به سطح تسلیم (تسلیم پلاستیک)
- افزایش مدول صلبیت با افزایش فشار محصور کننده (صلبیت وابسته به تنش)
- ظهور کرنش های حجمی منفی در هنگام برش
- اعمال تاثیر مربوط به پیش تحکیم یافتگی (تاریخچه تنش خاک)
- کاهش حجم منافذ خاک ناشی از تغییرشکل های پلاستیک (متراکم شدگی)

ذکر این نکته اساسی بسیار اهمیت دارد که با بارگذاری انحرافی اولیه خاک، صلبیت آن کاهش پیدا می کند و کرنش های پلاستیک بازگشتناپذیر در آن گسترش پیدا می کنند. ایده اولیه این

مدل از دندان و چانگ^۱ بوده است که در سال (۱۹۶۳) ارایه کردند که بعدها مدل خاک سخت‌شونده جایگزین این مدل شد [29]. اما با این وجود یکی از فرضیات اساسی این مدل وجود رابطه هذلولی به شکل زیر است.

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \cdot \frac{q}{q_a - q} \quad (۱۲-۳)$$

که در این رابطه q_a ، تنش شکست مجانب است و به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} = (Cc \cot \varphi' + \sigma'_3) \cdot \frac{2 \sin \varphi'}{R_f (1 - \sin \varphi')} \quad (۱۳-۳)$$

در این رابطه R_f (نسبت شکست) برای بیش‌تر خاک‌ها برابر ۰/۹ است.

در این مدل رفتاری مدول وابسته به تنش (E_{50}) به شکل رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \cdot \left(\frac{C' \cot \varphi' + \sigma'_3}{C' \cot \varphi' + p^{ref}} \right)^m \quad (۱۴-۳)$$

در این رابطه E_{50}^{ref} مدول صلبیت مرجع در فشار محصورکننده مرجع (P^{ref}) است. پارامتر

m میزان وابستگی به تنش را کنترل می‌کند. E_{ur} یک مدول الاستیک حقیقی است و در ارتباط با

ضریب پواسن (ν_{ur})، رفتار زمین را در شرایط بارگذاری و باربرداری تعیین می‌کند اما E_{50}

دربردارنده مقادیر کرنش‌های الاستیک و پلاستیک است.

مانند مدول میانگین بارگذاری اولیه (E_{50})، مدول بارگذاری-باربرداری (E_{ur}) نیز وابسته به

سطح تنش است و به شکل زیر تعریف می‌شود.

¹ Duncan & Chang

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot \left(\frac{C' \cdot \cot \varphi' + \sigma_3'}{C' \cdot \cot \varphi' + p^{ref}} \right)^m \quad (۱۵-۳)$$

که در این رابطه E_{ur}^{ref} مدول تغییرشکل در فشار مرجع P_{ref} است.

علاوه بر این دو مدول، مدول ادیومتری (E_{50}^{oed})، نیز در این مدل رفتاری وجود دارد که برای تعیین کرنش پلاستیک ناشی از بارگذاری فشاری اولیه مورد استفاده قرار می گیرد و رابطه آن به شکل زیر است.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{C' \cot \varphi' + \sigma_1'}{C' \cot \varphi' + p^{ref}} \right)^m \quad (۱۶-۳)$$

که در این رابطه E_{oed}^{ref} مدول ادیومتری مرجع برای فشار مرجع P_{ref} است.

یکی از مهم ترین تفاوت های مدل رفتاری خاک سخت شونده با مدل موهر- کولمب ، این است که در مدل رفتاری خاک سخت شونده امکان تشکیل کرنش های پلاستیک قبل از رسیدن به حد تنش موهر- کولمب وجود دارد. بنابراین موضوع، می توان گفت در مدل خاک سخت شونده سطح تسلیم دیگری وجود دارد که در فضای تنش اصلی ثابت نبوده و می تواند گسترش پیدا کند.

تابع تسلیم f^s به شکل زیر تعریف می شود.

$$f^s = \bar{f} - \gamma^p \quad (۱۷-۳)$$

در این رابطه $\bar{f}$ تابعی از تنش و پارامتر سخت شوندگی، و γ^p تابعی از کرنش های پلاستیک است.

$$\bar{f} = \frac{1}{E_{50}^{ref}} \cdot \left(\frac{C' \cot \varphi' + \sigma_3'}{C' \cot \varphi' + p^{ref}} \right)^m \cdot \frac{q}{1 - \frac{q}{qa}} - \frac{2q}{E_{ur}^{ref}} \cdot \left(\frac{C' \cot \varphi' + \sigma_3'}{C' \cot \varphi' + p^{ref}} \right)^m \quad (۱۸-۳)$$

$$\gamma^p = \varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p = 2\varepsilon_1^p \quad (۱۹-۳)$$

در مدل سخت‌شونده، از تابع پتانسیل به شکل زیر استفاده می‌شود.

$$g^s = (3 - \sin \psi_m) \cdot q - 6 \sin \psi_m \cdot p \quad (۲۰-۳)$$

$$p = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (۲۱-۳)$$

زاویه اتساع بسیج شده^۱ طبق رابطه تنش-اتساع راو^۲ (۱۹۶۲) به شکل رابطه (۲۲-۳) است.

زاویه اصطکاک بسیج شده به شکل رابطه (۲۳-۳) و زاویه حجم ثابت نیز به شکل رابطه (۲۴-۳) است.

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cv}}{1 - \sin \varphi_m \cdot \sin \varphi_{cv}} \quad (۲۲-۳)$$

$$\sin \varphi_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2C \cot \varphi} \quad (۲۳-۳)$$

$$\sin \varphi_{cv} = \frac{\sin \varphi - \sin \psi}{1 - \sin \varphi \cdot \sin \psi} \quad (۲۴-۳)$$

مانند تابع تسلیم سخت‌شوندگی برشی، خلاصه روابط تابع تسلیم سخت‌شوندگی تراکمی نیز

در زیر آورده شده است.

^۱ Mobilized

^۲ Rowe

$$f^c = \frac{q^2}{M^2} + (p + C \cdot \cot \varphi)^2 - (p_p + C \cdot \cot \varphi)^2 \quad (25-3)$$

در این رابطه پارامتر M به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (26-3)$$

نرخ کرنش در مدل خاک سخت شونده مانند رابطه (3-27) به سه قسمت الاستیک ($\dot{\epsilon}^e$)،

سخت‌شوندگی برشی پلاستیک ($\dot{\epsilon}^{ps}$) و سخت‌شوندگی حجمی ($\dot{\epsilon}^{pc}$) تقسیم می‌شود.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{ps} + \dot{\epsilon}^{pc} \quad (27-3)$$

از حل معادلات $\dot{f}^s = 0$ و $\dot{f}^c = 0$ مقادیر λ^s و λ^c (ضرایب پلاستیک) نتیجه می‌شوند.

به دلیل گستردگی مطالب، در این قسمت سعی شد خلاصه‌ای از روابط و فرمولاسیون مدل

خاک سخت‌شونده را ارائه کرد. برای جزییات بیشتر پیرامون این موضوع به [26]، [30] و [31] مراجعه شود.

۵-۴-۳ جمع‌بندی

در این فصل به بررسی رفتار خاک در انواع ساخت‌های مختلف و جنبه‌های رفتاری مختلف

خاک پرداخته شده است. در ادامه به بررسی کلی و ارائه بخشی از روابط ارائه شده برای سه مدل

رفتاری الاستیک، موهر-کولمب و خاک سخت‌شونده پرداخته شده است.

۴ فصل چهارم: مورد مطالعاتی

۱-۴ شرح پروژه

خط A قطار شهری قم با طول حدود ۱۴۷۰۰ متر و تعداد ۱۴ ایستگاه از مسجد مقدس جمکران شروع شده و با طی مسیر میدان انتظار، میدان بقیه ا...، بلوار خلیج فارس، میدان ولیعصر، خیابان شهید دل آذر، میدان پلیس، میدان میرزای قمی، تقاطع خیابان عمار یاسر، عبور از زیر رودخانه، میدان مطهری، میدان سعیدی، میدان معصومیه، خیابان امامزاده ابراهیم و میدان کشاورز، به قلعه کامکار ختم می‌شود. در مسیر خط A، 14 ایستگاه در تقاطع ها و میدان های مهم در نظر گرفته شده که با نام‌های A1 تا A14 نام‌گذاری شده اند. در شکل (۱-۴) نمایی از مسیر تونل و موقعیت ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود.

حفاری بخش عمده تونل مترو (بیش از ۱۰ کیلومتر) به روش مکانیزه و با استفاده از یک دستگاه ماشین حفار EPB انجام شده است. ماشین حفار از کارگاه قلعه کامکار حفاری و سگمنت‌گذاری را آغاز کرده است و با حرکت به سمت شرق در نهایت در ایستگاه A5 کار حفاری را به پایان رسانده است.

در مطالعات اولیه تعداد ۹ چاهک دستی و ۱۸ گمانه ماشینی حفر شده‌اند طوری که مجموع مترآژ گمانه‌های ماشینی ۶۳۰ و چاهک‌های دستی ۲۰۰ متر بوده است. سپس در مرحله دوم مطالعات تعداد ۱۹ گمانه ماشینی حفر شده و مجموع مترآژ آن‌ها ۶۷۹ متر بوده است، همچنین تعداد ۲۲ چاهک دستی نیز حفر شده که مجموع مترآژ آن‌ها به ۶۴۵ متر می‌رسد [32].



شکل ۴-۱: مسیر خط A قطار شهری قم [32]

۴-۲ زمین‌شناسی عمومی گستره طرح

شهر قم، از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری، در پهنه زمین ساختی ایران مرکزی جای گرفته است. شهر قم در دشتی وسیع با راستای شمال غرب-جنوب شرق و عرضی مابین 4 تا 10 کیلومتر قرار گرفته است. جنوب غربی این دشت رشته کوهی با راستای شمال غرب-جنوب شرق است که عمدتاً از توالی‌های رسوبی الیگوسن و میوسن، معروف به سازند قرمز تحتانی، سازند قم و سازند قرمز فوقانی تشکیل شده است. در شمال غرب دشت قم تاقدیس البرز قرار گرفته است که در شمال شهر قم تشکیل

ارتفاعاتی داده است، ولی در شمال شرق قم ارتفاعی ندارد. رودخانه قم به عنوان رودخانه‌ای با راستای جنوب غرب- شمال شرق از این دشت عبور می‌کند و جهت جریان آن به سمت شمال شرق است.

مسیر خط A متروی قم در میان نهشته‌های دشت آبرفتی جانمایی شده است. در کف دشت قم در مسیر مترو در چند نقطه رسوبات آبرفتی دشت آبرفتی قابل مشاهده است. در شمال غرب مسیر مترو و در مسیر جاده جعفریه، رسوبات به صورت ذرات به ابعاد سیلت و رس تا قلوه‌هایی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر، دیده می‌شود. دانه‌های درشت گرد شده و دارای جنس متنوع از سنگ‌های رسوبی تا سنگ‌های آذرین و دگرگونی پهنه سنندج- سیرجان هستند. این در حالی است که در خاکبرداری‌هایی که در مجاورت مسجد جمکران انجام شده است، جنس رسوبات بیش‌تر سیلت و رس هستند. با توجه به شیب به سمت جنوب شرق دشت قم این مطلب قابل استدلال است که در واقع سیلاب‌های رودخانه قم به سمت جنوب شرق تا فواصل دور از رودخانه ادامه یافته‌اند و سبب رسوبگذاری ضخیم رس در نواحی جنوب شرقی شده‌اند.

رودخانه قمرود رودخانه‌ای دایمی و اصلی‌ترین رودخانه استان قم است که از به هم پیوستن رودخانه‌های گلپایگان و خوانسار (واقع در پهنه سنندج - سیرجان) سرچشمه گرفته و با عبور از پهنه‌های سیرجان- سنندج و ایران مرکزی ذرات آواری با جنس‌های مختلف را از این دو پهنه زمین شناسی به سمت قم آورده است و در نهایت به دریاچه نمک می‌ریزد. ذراتی با جنس مختلف در ابعاد سیلت و ماسه تا قلوه سنگ با بلوغ بافتی و کانی شناسی خوب و گرد شدگی زیاد در بستر رودخانه قم نهشته شده‌اند که با آنچه که از چنین رودخانه بلندی انتظار می‌رود سازگاری دارد.

شکل‌گیری ساختاری کنونی نهشته‌های حوضه قم، نتیجه ساز و کار حرکت برشی راستگرد همراه با فشردگی بوده است. تاثیر قابل توجه حرکات زمین ساختی به چین خوردگی و گسلش در سنگ بستر گستره منجر شده است. اما قرار گرفتن بیشتر طول تونل مترو قم در رسوبات دشت آبرفتی قم عملاً از اهمیت بحث در خصوص ساختارهای زمین‌شناسی موجود در سنگ بستر می‌کاهد.

گسل‌های گسترده مورد بررسی را می‌توان در سه دسته سیستم گسله قم-زفره، گسل‌های راندگی دارای امتداد شمال غرب- جنوب شرق و گسل‌های دارای امتداد شمال شرق- جنوب غرب قرار دارد. شواهدی دال بر این که قطعه یا قطعاتی از این سیستم‌های گسله مسیر مترو را قطع می‌کنند وجود ندارد [32].

۴-۳ تفکیک و توصیف واحدهای زمین‌شناسی

یکی از مهم‌ترین فعالیت‌هایی که در مطالعات ژئوتکنیکی تونل‌های مکانیزه در خاک باید مورد توجه قرار گیرد، تفکیک مناسب واحدهای خاکی است به طوری که سعی شود هر یک از واحدها از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی و هم‌چنین الگوی رفتاری در بخش‌های مختلف پروژه، دارای ویژگی‌های تقریباً یکسانی باشند. این تفکیک از این نظر قابل توجه است که، این واحدها مبنای مطالعات دیگر بوده و تاثیر قابل توجهی بر نتایج برآورد پارامترهایی مانند فشار جبهه کار، مخاطرات محتمل، نشست، بهسازی خاک و ... دارد. از مهم‌ترین عامل‌هایی که بر تفکیک واحدهای خاکی، انتخاب و عملکرد ماشین موثر هستند دانه‌بندی و ویژگی‌های زمین‌شناسی خاک‌ها هستند. پارامترهای دیگری که می‌توانند بر عملکرد ماشین اثر بگذارند نیز به عنوان اولویت‌های دیگر به حساب آمده و به طور جداگانه بررسی می‌شوند که از جمله آن‌ها می‌توان به ویژگی‌های مکانیکی، چسبندگی (برای خاک‌های ریزدانه) و نفوذپذیری (برای خاک‌های دانه‌ای) اشاره کرد. داده‌های اولیه مورد نیاز برای شناسایی این ویژگی‌ها از طریق لاگ چاهک‌ها و گمانه‌های حفر شده در مسیر پروژه و انجام بازدیدهای صحرایی از رخنمون خاک‌ها به دست آمده است.

با توجه به مطالب بالا، نتایج حاصل از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و مقیاس نقشه، در نهایت واحدهای خاکی دربرگیرنده مسیر مترو به چهار گونه زمین‌شناسی (دو واحد خاکی ریزدانه و دو واحد خاکی درشت دانه) تفکیک شده اند. دو واحد خاکی درشت دانه Qc-1 و Qc-2 گسترش نسبتاً زیادی داشته و به شکل لایه‌های نسبتاً گسترده و ضخیم در میان واحدهای خاکی ریزدانه Qf-1

و Qf-2 قابل مشاهده هستند.

در جدول (۴-۱) واحدهای خاکی مسیر تونل نشان داده شده‌اند.

جدول ۴-۱: واحدهای خاکی مسیر خط A قطار شهری قم [32]

واحد خاکی	توصیف ژیوتکنیکی	عکس	موقعیت عکس
Qc-1	شن ماسه‌ای و ماسه شن دار همراه با مقداری ریزدانه		دیواره چاهک TP2-21 عمق ۲۲,۵ متری
Qc-2	ماسه رسی- سیلتی همراه با شن		دیواره چاهک TP2-A2 عمق ۱,۵ متری

دیواره چاهک TP2-2 عمق ۱۱ متری		سیلت رسی با کمی ماسه	Qf-1
دیواره چاهک TP2-5 عمق ۸ متری		رس لای دار با کمی ماسه	Qf-2

۱-۳-۴ واحد خاکی Qf-1

ذرات تشکیل دهنده این واحد خاکی به طور کلی شامل سیلت رسی همراه مقدار اندکی ماسه است. درصد رد شده از الک ۲۰۰ در این واحد بیش تر از ۵۰ درصد و مقدار شاخص خمیری (PI) آن کم تر از ۷ است. بخش های مختلف این واحد مطابق با طبقه بندی USCS در رده خاک های ML و CL-ML قرار داده می شود.

۲-۳-۴ واحد خاکی Qf-2

این واحد بیش تر از رس لای دار به همراه مقدار اندکی ماسه تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در این واحد بیش تر از ۵۰ درصد بوده و مقدار شاخص خمیری

آن بیش‌تر از واحد قبلی است. بخش‌های مختلف این واحد بر اساس طبقه‌بندی USCS بیش‌تر در رده خاک‌های CL قرار داده می‌شود.

۳-۳-۴ واحد خاکی Qc-1

واحد خاکی Qc-1 بیش‌تر از گراول ماسه‌ای و در بعضی از محدوده‌ها از ماسه گراولی تشکیل شده است. درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در این واحد کم‌تر از ۳۵ درصد است. این واحد خاکی بر اساس روش USCS در گروه خاک‌های GP-GC، GW-GM و GW قرار داده می‌شود. گسترش این واحد در مسیر پروژه، نسبت به سایر واحدهای خاکی شناخته شده، کم‌تر است.

۴-۳-۴ واحد خاکی Qc-2

ذرات تشکیل دهنده واحد خاکی Qc-2 بیش‌تر از ماسه رسی همراه گراول و به ندرت از رس ماسه‌ای تشکیل شده است. درصد رد شده از الک ۲۰۰ در این واحد نسبت به واحد قبلی بیش‌تر بوده و تا ۵۰ درصد افزایش نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی است. بخش‌های مختلف این واحد طبق استاندارد USCS در گروه خاک‌های SC-SM و SC قابل طبقه‌بندی است.

با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی انجام شده در منطقه، می‌توان چنین برداشت کرد که این واحدهای خاکی در سرتاسر مسیر پروژه، دارای ویژگی‌های کم و بیش ثابت بوده و می‌توان با دقت مناسب، دامنه‌ای مشخص از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی را به آن‌ها اختصاص داد [32].

۴-۴ زمین‌شناسی مهندسی جبهه‌کار تونل

در این قسمت، گسترش هر یک از واحدهای خاکی در جبهه‌کار تونل مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر بر اساس این که جبهه‌کار تونل از چه واحدهای خاکی تشکیل شده باشد، مسیر تونل به ۱۷ ناحیه تقسیم شده است ناحیه‌بندی شده است. از آن‌جا که واحدهای خاکی یاد شده بر

اساس پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تفکیک شده‌اند، بنابراین، این ناحیه‌بندی نیز خاستگاه زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی دارد. کیلومتر از شروع و پایان هر ناحیه به همراه واحدهای تشکیل دهنده آن در جدول (۴-۲) ارایه شده است [32].

جدول ۴-۲: توصیف زمین‌شناسی جبهه کار تونل در مسیر خط A قطار شهری قم [32]

ردیف	کیلومتر از (m)		توصیف زمین‌شناسی جبهه کار تونل	واحدهای خاکی تشکیل دهنده جبهه کار			
	شروع	پایان		Qc-1	Qc-2	Qf-1	Qf-2
۱	۰	۷۸۰	بیش تر Qf-1، Qf-2 در کف تونل			✓	✓
۲	۷۸۰	۱۲۵۰	بیش تر Qf-1، Qf-2 در سقف تونل			✓	✓
۳	۱۲۵۰	۲۴۳۰	بیش تر Qc-2، Qf-1 و Qf-2 در کف تونل، شرایط جبهه کار مختلط		✓	✓	✓
۴	۲۴۳۰	۳۲۰۰	بیش تر Qf-1 و Qf-2، و لنزهای Qc-2		✓	✓	✓
۵	۳۲۰۰	۴۵۰۰	بیش تر Qf-1، به ندرت Qf-2			✓	
۶	۴۵۰۰	۵۲۵۰	جبهه کار مختلط درشت‌دانه (Qc-2)، و ریزدانه (Qf-1)		✓	✓	
۷	۵۲۵۰	۵۷۲۰	جبهه کار مختلط درشت‌دانه (Qc-1) و ریزدانه (Qf-1)	✓		✓	
۸	۵۷۲۰	۶۶۲۰	بیش تر Qc-1، Qf-1، جبهه کار مختلط	✓		✓	
۹	۶۶۲۰	۸۴۸۰	بیش تر Qc-2، با Qf-1 جبهه کار مختلط		✓	✓	
۱۰	۸۴۸۰	۸۷۵۰	بیش تر Qc-1، با Qf-1، جبهه کار مختلط	✓		✓	
۱۱	۸۷۵۰	۹۵۹۰	بیش تر درشت‌دانه‌های Qc-1 و Qc-2	✓	✓		
۱۲	۹۵۹۰	۹۸۸۰	بیش تر Qf-1، Qc-1 در کف تونل	✓		✓	
۱۳	۹۸۸۰	۱۰۹۰۰	جبهه کار مختلط ریزدانه (Qf-1) با درشت‌دانه (Qc-2)		✓	✓	
۱۴	۱۰۹۰۰	۱۲۳۰۰	جبهه کار مختلط ریزدانه (Qf-1) با درشت‌دانه (Qc-2) و (Qc-1)	✓	✓	✓	
۱۵	۱۲۳۰۰	۱۲۸۴۰	بیش تر Qf-1، جبهه کار مختلط با Qc-2		✓	✓	
۱۶	۱۲۸۴۰	۱۳۴۶۰	بیش تر درشت‌دانه‌های Qc-1 و Qc-2	✓	✓		
۱۷	۱۳۴۶۰	۱۴۲۰۰	بیش تر Qf-1، جبهه کار مختلط با Qc-1 و Qc-2	✓	✓	✓	

هدف از انجام مطالعات ژئوتکنیک دستیابی به پارامترهای مهندسی مصالح زیرسطحی با انجام حفاری‌های اکتشافی، آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی به منظور احداث خط A قطار شهری قم است. در جدول (۳-۴) اطلاعات پارامترهای مهندسی برای لایه‌های مختلف خاکی در مسیر پروژه آورده شده است [32],[33].

جدول ۳-۴: مقادیر پیشنهادی پارامترهای مهندسی لایه‌های مختلف خاکی در مسیر خط A قطار شهری قم [32]

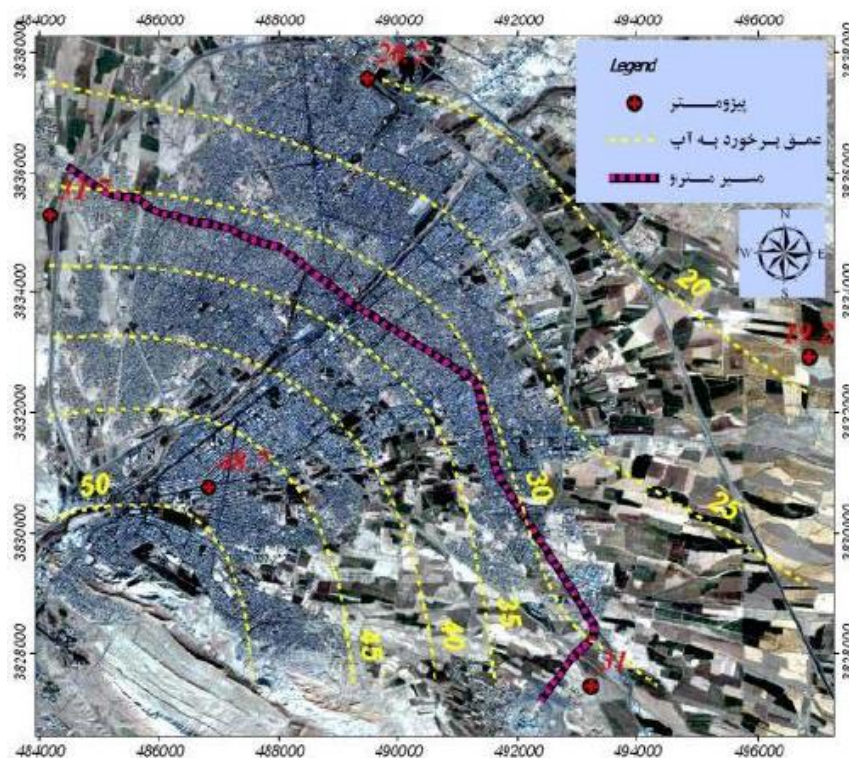
موقعیت	واحد خاکی	طبقه بندی خاک	دانسیته (gr/cm^3)	پارامترهای مقاومت برشی				مدول الاستیک بارگذاری اولیه (kg/cm^2)
				C' (kg/cm^2)	ϕ' (deg)	C_{cu} (kg/cm^2)	ϕ_{cu} (deg)	
منطقه غیر اشباع	Qf-1	CL-ML, ML	۱/۶۸	۰/۳۷-۰/۴۰	۳۰-۳۲	—	—	۲۰۰-۲۵۰
	Qf-2	CL	۱/۷۲	۰/۴۲-۰/۴۵	۳۰-۳۲	—	—	۲۰۰-۲۵۰
	Qc-1	GP-GC, GW-GM, GW	۱/۷۶	۰/۲۵-۰/۳۰	۳۲-۳۵	—	—	۲۵۰-۳۰۰
	Qc-2	SC, SC-SM	۱/۷۲	۰/۲۸-۰/۳۳	۳۲-۳۵	—	—	۲۵۰-۳۰۰
منطقه اشباع	Qf-1	CL-ML, ML	۱/۶۸	۰/۲۰-۰/۲۳	۲۲-۲۴	۰/۲۸-۰/۳۰	۱۷-۱۹	—
	Qf-2	CL	۱/۷۲	۰/۱۳-۰/۱۷	۲۲-۲۴	۰/۲۰-۰/۲۳	۱۷-۱۹	—
	Qc-1	GP-GC, GW-GM, GW	۱/۷۶	۰/۲۰-۰/۲۲	۲۵-۲۸	۰/۲۸-۰/۳۲	۱۸-۲۰	—
	Qc-2	SC, SC-SM	۱/۷۲	۰/۱۳-۰/۱۷	۲۵-۲۸	۰/۲۵-۰/۲۸	۱۸-۲۰	—

۴-۵ وضعیت آب زیرزمینی در مسیر تونل

یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعات اولیه، بررسی حضور یا عدم حضور آب در محل ساخت سازه

مورد نظر است. از آن جا که مدل سازی عددی پروژه مورد نظر در حضور یا عدم حضور آب تفاوت ایجاد خواهد کرد، بنابراین در این پژوهش برای اطمینان از حضور یا عدم حضور آب در مسیر حفر مترو به بررسی اطلاعات پیزومترهای سطح شهر پرداخته شده است.

نقشه هم عمق آب زیرزمینی در محدوده مسیر خط A قطار شهری قم که بر اساس اندازه گیری عمق سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای شهر قم ترسیم شده است در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. عمق برخورد به آب زیرزمینی در مسیر پروژه بین ۳۰ تا ۳۵ متر اندازه گیری شده است [32].

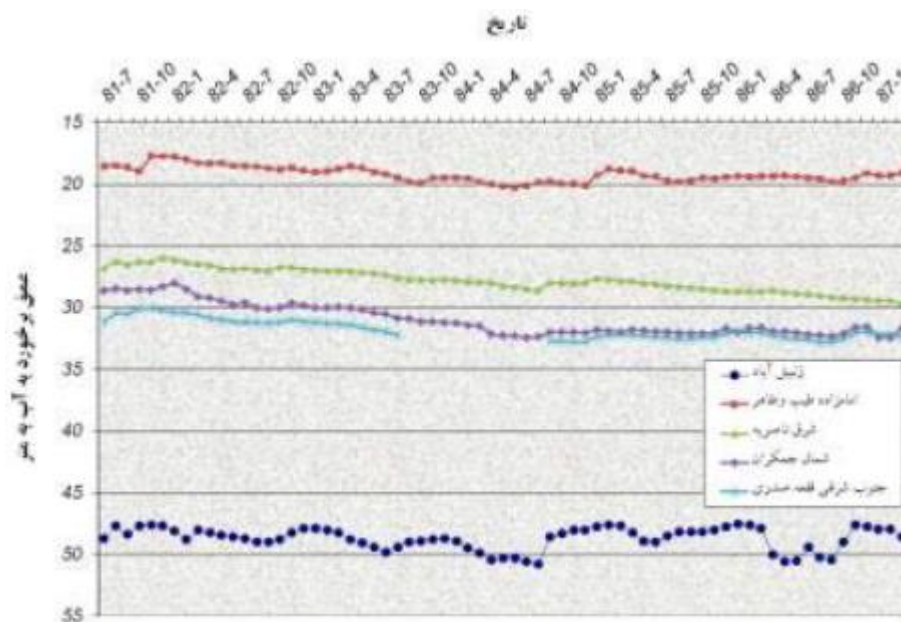


شکل ۴-۲: سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای شهر قم [32]

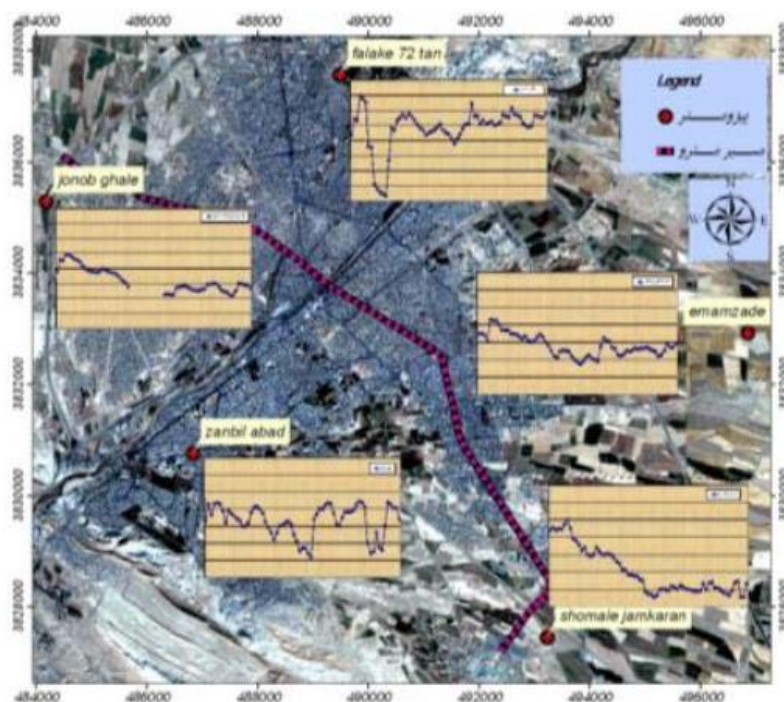
در این مطالعات، عمق آب با استفاده از گمانه های ژئوتکنیکی حفر شده در مسیر پروژه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات مرحله اول و دوم نیز به طور جداگانه با استفاده از اندازه گیری سطح آب در گمانه های مسیر، عمق آب در مسیر پروژه تعیین شده است [32].

۴-۵-۱ نوسان سطح آب زیرزمینی

نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی نمایان گر تغییرات تغذیه و تخلیه آبخوان است. با استفاده از بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی روند نزولی یا صعودی آن به دست می‌آید. در شکل (۳-۴) تغییرات سطح آب در پیزومترها در یک شکل برای مقایسه آورده شده است. در شکل (۴-۴) نیز وضعیت تغییرات سطح آب در پیزومترهای ذکر شده به همراه موقعیت آن‌ها و مسیر تونل نشان داده شده است.

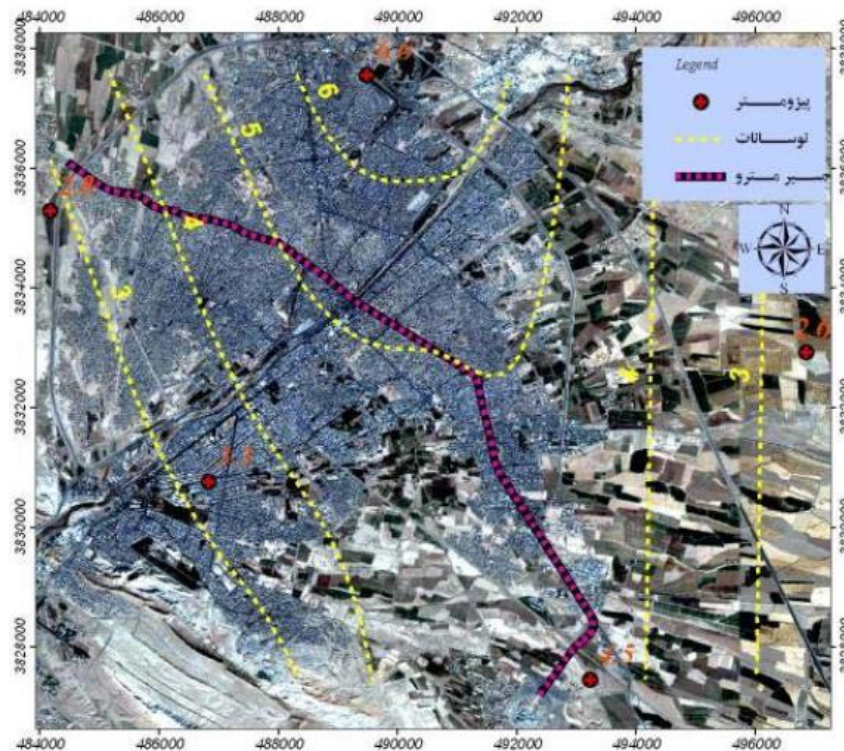


شکل ۳-۴: تغییرات سطح آب در پیزومترهای شهر قم [32]



شکل ۴-۴: وضعیت تغییرات سطح آب در پیزومترهای شهر قم به همراه موقعیت آن‌ها [32]
همان‌طور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، سطح آب در بیش‌تر پیزومترها در حال افت است.

در شکل (۴-۵) نیز بیشینه نوسانات در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۶ ساله نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به طور کلی تغییرات در محدوده مرکزی مسیر پروژه بیش از ابتدا و انتهای مسیر است.



شکل ۴-۵: بیشینه نوسان پیزومترهای شهر قم در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۶ ساله [32]

برای بررسی دقیق وضعیت نوسانات سطح آب زیرزمینی به بررسی پنج پیزومتر موجود در اطراف مسیر مترو قم پرداخته می‌شود [32]:

در ابتدای مسیر مترو در حوالی جمکران، پیزومتر جمکران قرار دارد. فاصله این پیزومتر با مسیر مترو کم‌تر از یک کیلومتر است. عمق آب زیرزمینی در پیزومتر شمال جمکران از ۲۸ متر در اوایل سال ۸۲ به بیش از ۳۲ متر در سال ۸۴ رسیده است. در واقع چهار متر افت در طی دو سال در پیزومتر جمکران مشاهده می‌شود. از سال ۸۴ تا ۸۷ تغییرات چندانی در تراز آب زیرزمینی این پیزومتر رخ نداده است.

پیزومتر زنبیل آباد در حاشیه شرقی رودخانه قمرود در ورودی جنوب شهر قم و در فاصله ای کم‌تر از ۴ کیلومتر با مسیر مترو روی مخروط افکنه حاصل از قمرود واقع شده است. این پیزومتر برخلاف سایر پیزومترها افت چندانی را در سطح آب زیرزمینی نشان نمی‌دهد. اما چنانکه در نمودار این پیزومتر مشاهده می‌شود، سطح آب زیرزمینی نوسانی حدود سه متر در فاصله زمانی کم‌تر از پنج ماه

دارد. به عنوان مثال سطح آب زیرزمینی در این پیزومتر از آذر تا بهمن ۸۶ حدود ۲,۸ متر بالا آمده است. این اندازه بالا آمدگی در طول دو ماه با توجه به شرایط کلی آبخوان قم، غیر طبیعی است. بنابراین می‌تواند عامل غیر طبیعی موثر بوده باشد. یکی از عوامل می‌تواند نفوذ فاضلاب‌های شهری به آب‌های زیرزمینی باشد. با توجه به شهری بودن منطقه، فاضلاب‌های خانگی تاثیر قابل توجهی بر کمیت و کیفیت آبخوان دارند. با توجه به این که پیزومتر زنبیل آباد در مجاورت قمرود قرار دارد، تغییرات تراز آب در این پیزومتر نشان‌گر آن است که سطح آب زیرزمینی در محدوده بستر رودخانه قمرود نسبت به سایر نواحی آبخوان از تغییرات بیش‌تری برخوردار است.

پیزومتر فلکه ۷۲ تن در فاصله دو کیلومتری شمال مسیر مترو در حاشیه شمالی شهر قم قرار گرفته است. نمودار تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در این پیزومتر نمایانگر تغییرات شدید سطح آب در طی سالهای ۸۱ تا ۸۳ است. تغییرات پس از این دوره به نسبت کم است.

پیزومتر جنوب شرقی قلعه صفدری در فاصله حدود ۵۰۰ متری انتهای مسیر مترو و در حاشیه کمربندی غربی قم قرار گرفته است. روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در این پیزومتر به طور کلی رو به افت است. در واقع از اواخر سال ۸۱ تا اواخر سال ۸۳ سطح آب زیرزمینی افت کرده است ولی از اوایل سال ۸۴ تا اوایل سال ۸۷ تراز سطح آب به نسبت ثابت مانده است. تغییرات سطح آب زیرزمینی در این پیزومتر تقریباً مشابه با تغییرات سطح آب در پیزومترهای امامزاده طیب و طاهر و جمکران است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به عمق قرارگیری تونل و سطح آب زیرزمینی در مسیر پروژه که از متوسط سطح آب اندازه‌گیری شده در گمانه‌ها و پیزومترها به دست آمده است، تمامی مسیر پروژه و ایستگاه‌ها بالاتر از سطح ایستابی قرار دارند، ولی ممکن است آب‌های منطقه غیراشباع، فاضلاب و یا قنات‌های احتمالی به طور مقطعی در مسیر حفاری وجود داشته باشد [32].

۴-۶ روش حفر

در گذشته تونل‌سازی در زمین‌های نرم با روش‌های سنتی و حفاری دستی انجام می‌شده است. با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌های مختلف، تونل‌سازی نیز پیشرفت کرده و تحولات زیادی در آن به وجود آمده است، اگرچه هنوز استفاده از روش‌های سنتی کاربرد وسیعی دارند اما هر جا که امکان استفاده از ماشین‌های حفاری وجود داشته باشد از آن‌ها کمک گرفته می‌شود. از جمله ماشین‌های حفاری که در این نوع زمین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، ماشین‌های حفاری تمام مقطع هستند. در کنار استفاده از این ماشین، برای جلوگیری از نشست زمین و ورود جریان آب به داخل تونل حفر شده، نگهداری ماشین و تجهیزات مربوط به آن و تسریع در انجام پروژه، حین حفاری از پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته به نام سگمنت استفاده می‌شود [34].

از آن‌جا که استفاده از ماشین‌های حفاری TBM باعث کاهش در زمان ساخت و در نتیجه کاهش در هزینه اجرا می‌شود، استفاده از این دستگاه‌ها روز به روز در حال گسترش است. از انواع دستگاه‌های تمام مقطع نوع (TBM-EPB (Tunnel Boring Machine-Earth Pressure Balance است (فشار تعادلی زمین)، اما استفاده از این نوع ماشین‌های حفار دارای محدودیت‌هایی از جمله ناتوانی اجرا در خاک‌های نامناسب است که ممکن است اجرای پروژه را با مشکلات زیادی مواجه کرده یا ادامه آن را غیر ممکن کند، اما آن‌چه که استفاده از این دستگاه‌ها را در محیط شهری ضروری می‌کند این است که، این دستگاه‌ها توانایی بیشتری در کنترل تغییر شکل محیط اطراف تونل در اثر حفاری دارند. برای مثال در مناطق شهری محدودیت‌های زیادی برای میزان نشست بعد از ساخت تونل به دلیل وجود سازه‌های گوناگون و تراکم آن‌ها وجود دارد، بنابراین برای کنترل تغییر شکل‌های قائم و افقی ناشی از تونل‌سازی در یک محدوده معین باید میزان فشار افقی و قائم که با انجام حفاری از روی جبهه کار برداشته می‌شود دوباره به جبهه‌گار برگردانده شود که این کار در دستگاه‌های حفاری فشار تعادلی زمین با استفاده از مواد حفاری شده انجام می‌شود. به این شکل که در ابتدا با چرخش

کله حفار، جبهه کار تونل حفاری شده و فشار از جبهه کار برداشته می شود. در مرحله بعد خاک حفاری شده به اتاقک حفاری منتقل می شود، سپس با استفاده از نیروی جک های پیشروی خاک حفاری شده به منظور برقراری تعادل نیرو فشرده شده و این فشار دوباره به جبهه کار اعمال می شود. کنترل میزان فشار در اتاقک حفاری نیز با برقراری تعادل بین کنترل سرعت پیشروی و مقدار خاک حفاری شده و مقدار خاک خارج شده از نقاله مارپیچی به شکل تعادل حجمی انجام می شود، این تعادل با تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچ انجام می شود و مواد انباشته شده در Chamber برای ایجاد فشار نگهداری و پایداری جبهه کار استفاده می شود [35]، [36].

آنچه که در درون محفظه ماشین قرار دارد و عامل فشار جبهه کار است می تواند هوای فشرده یا خود مواد حاصل از حفاری به همراه دوغاب بنتونیت باشد. اگر ملاتی از مواد حفاری، آب و بنتونیت برای این هدف استفاده شوند سیستم را TBM با سپر گل حفاری یا اسلاری شیلد می نامند و اگر مواد حاصل از حفاری خود عامل فشار بر جبهه کار باشند آن گاه سیستم را EPB می نامند [37].

به طور کلی تونل سازی در زمین های سست از پیچیدگی و حساسیت خاصی برخوردار است. در واقع تونل سازی در زمین های نرم یک هنر است. طبیعت عملیات تونل سازی در زمین های سست شامل حفاری با نیروی زیاد، نصب سریع سیستم نگهداری و اجرای عملیات در شرایط ویژه است. در مقایسه با تونل سازی در محیط سنگی، تونل های موجود در زمین های نرم برای حفظ فضای ایجاد شده کم یا زیاد به نگهداری آنی نیاز دارند [34].

طی یک تقسیم بندی کلی، ماشین های حفر تونل در دو دسته کلی ماشین های دارای سپر (Shielded Machines) و ماشین های باز (Open Machines) قرار می گیرند. از طرفی می توان این ماشین ها را به دو دسته کلی ماشین های حفاری تمام مقطع در محیط های سنگی و ماشین های حفاری تمام مقطع در محیط های خاکی تقسیم بندی کرد. اما از آن جا که تونل های حفر شده در مناطق شهری و کم عمق بیش تر در محیط های خاکی و سست ساخته می شوند، بنابراین برای ساخت

تونل در این مناطق از ماشین‌هایی استفاده می‌شود که برای این نوع شرایط کارای دارند.

در شکل (۴-۶) تقسیم‌بندی ماشین‌های حفر تونل به صورت کلی آمده است [38].



شکل ۴-۶: تقسیم‌بندی کلی ماشین‌های حفر تونل [38]

هم‌چنین طی یک تقسیم‌بندی، ماشین‌های حفر تونل که به سپر مجهز هستند به دو دسته ماشین‌های سپری با حفاری تمام مقطع و مقطعی تقسیم می‌شوند که در ادامه، این تقسیم‌بندی به صورت کلی آمده است.

از آن‌جا که موضوع چالش بر انگیز در حفاری در محیط‌های نرم و سست به ویژه محیط‌های شهری کنترل جبهه کار است، بنابراین در این شرایط استفاده از ماشین‌های سپری دوغابی و متعادل کننده فشار زمین به دلیل این که اساس کار آن‌ها کنترل فشار جبهه کار به منظور پایداری جبهه کار

تونل است، بسیار رایج است.

در شکل (۷-۴) تقسیم‌بندی ماشین‌های حفر تونل بر اساس نوع سپر و مکانیزم نگهداری جبهه‌کار آورده شده است.



شکل ۷-۴: تقسیم‌بندی ماشین‌های حفر تونل بر اساس نوع سپر و مکانیزم نگهداری جبهه‌کار [38]

تفاوت مهم و اساسی بین این دو نوع ماشین در کنترل جبهه‌کار وجود دارد. در نوع دوغابی، دوغاب در خاک جبهه‌کار نفوذ کرده و باعث ایجاد یک ناحیه در اطراف جبهه‌کار می‌شود که باعث تحمل فشار وارد بر آن می‌شود. اما در نوع متعادل کننده فشار زمین، نگهداری فشار جبهه‌کار تونل از طریق ایجاد تعادل فشار خارجی زمین و فشار آب در مقابل نیروی فشاری ماشین و نرخ خروج مواد حفاری شده از اتاقک حفاری، انجام می‌شود [39].

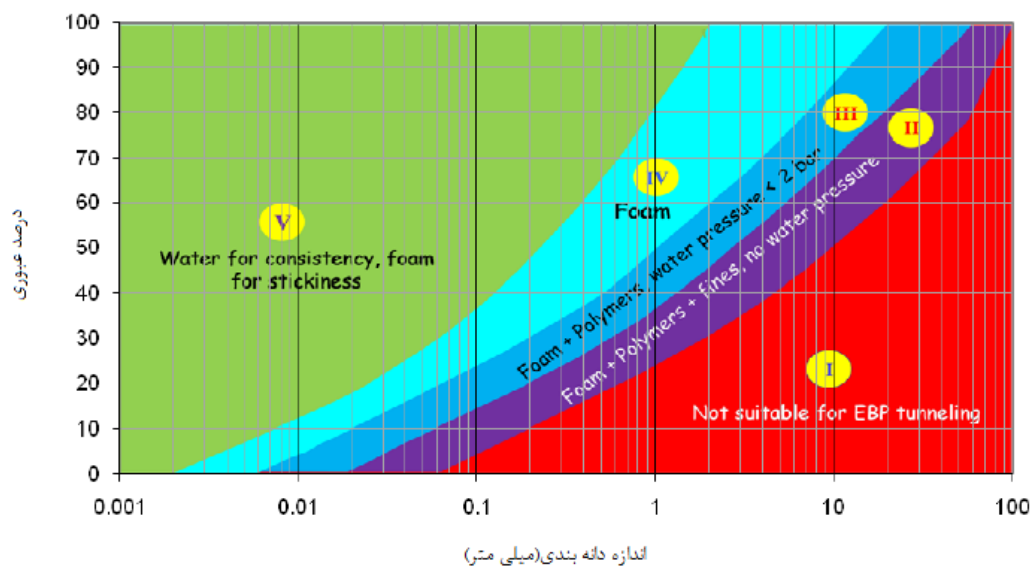
در جدول (۴-۴) مقایسه‌ای بین ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین و ماشین‌های دوغابی آورده شده است [40].

جدول ۴-۴: مقایسه ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین و دوغابی [40]

Slurry	EPB	معیارها
پایین	بالا	گشتاور و قدرت کله حفار
بالا	متوسط	انرژی مورد نیاز در محل کارگاه
مورد نیاز	مورد نیاز	استفاده از مواد افزودنی
بالا	پایین	هزینه
بزرگ	متوسط	اندازه کارگاه مورد نیاز
پیچیده	آسان	دفع مصالح حفاری
متوسط	سریع	سرعت حفاری
خوب	ضعیف	نظافت تونل
خودکار	قبلا مشخص شده است	محاسبه فشار مورد نیاز جبهه کار

یکی از راه‌های شناسایی رفتار خاک بررسی توزیع دانه بندی آن است. این اطلاعات در انتخاب روش حفاری و آگاهی از رفتار حفرپذیری خاک در مواجهه با ماشین به ما کمک می‌کنند. دانه بندی محیط حفاری یکی از عواملی است که بر عملکرد ماشین حفاری EPB اثر می‌گذارد. توزیع^۱ در سال ۲۰۰۷ مدلی برای استفاده از ماشین EPB ارائه داده است.

¹ Thewes



شکل ۴-۸: مدل توز برای استفاده از ماشین EPB در شرایط دانه بندی مختلف [38]

توضیح ناحیه های مشخص شده در این مدل به شرح زیر است.

ناحیه ۱: در این ناحیه استفاده از دستگاه حفاری از نوع EPB مناسب نیست.

ناحیه ۲: در شرایطی که فشار آب وجود نداشته باشد، ماشین EPB با استفاده از فوم، پلیمر و ریزدانه استفاده شود.

ناحیه ۳: برای استفاده از ماشین EPB اگر فشار آب کم تر از ۲ بار باشد، نیازی به فوم و پلیمر نیست.

ناحیه ۴: در این شرایط خاک به بهسازی نیاز دارد.

ناحیه ۵: در این شرایط برای این که از ماشین EPB استفاده شود، باید برای روان کردن خاک، آب اضافه شود و برای سفت کردن و چسبندگی خاک مواد افزودنی با توجه به جنس زمین اضافه کرد [38].

۷-۴ دستگاه حفاری پروژه خط A قطار شهری قم

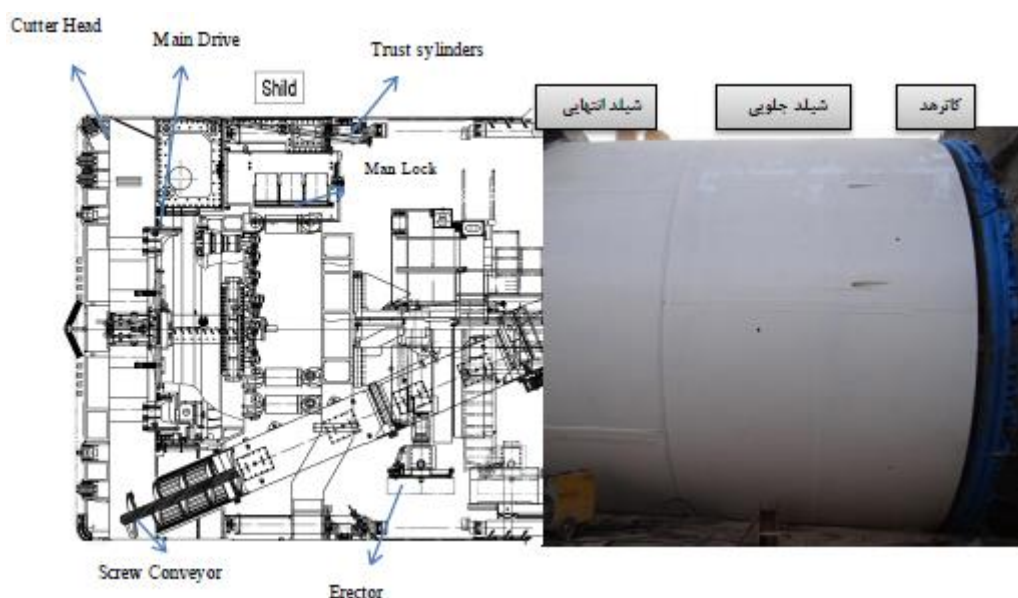
دستگاه مورد استفاده در این پروژه ساخت شرکت Herrenknecht آلمان از نوع متعادل کننده فشار زمین (Earth Pressure Balance Shield) است. این دستگاه دارای وزن تقریبی ۱۲۵۰ تن، طولی در حدود ۸۴ متر (که تقریباً ۹ متر از آن طول سپر است) و قطر تقریبی ۹ متر است که قابلیت حفاری در قوس تا شعاع ۲۰۰ متر در فشار ۴ bar را دارا است [41].

دستگاه حفاری از دو قسمت ماشین حفاری و سیستم پشتیبانی تشکیل شده است. ماشین حفاری شامل دو سپر انتهایی و جلویی است و در جلوی آن‌ها صفحه حفار قرار گرفته است که با جبهه کار در تماس است. ابزارهای برشی قابل تعویض بر روی صفحه حفار نصب شده اند که وظیفه کندن خاک را بر عهده دارند. در داخل سپرها، سیستم پیشروی، سیستم نصب پوشش نهایی، سیستم آب بندی، سیستم تزریق و ... قرار گرفته اند. سیستم پشتیبانی شامل ۵ گنتری (تریلر) است که پشت سر هم قرار گرفته و به سپر انتهایی متصل می شوند، کلیه لوازم و تجهیزات ماشین حفاری جهت کندن زمین و پیشروی در مسیر تونل از جمله سیستم آب، هیدرولیک، بهسازی خاک، کنترل و ایمنی، روشنایی و ... در این قسمت قرار گرفته اند [36].

در شکل های (۹-۴) و (۱۰-۴) نماهایی از دستگاه حفاری مترو قم و اجزا تشکیل دهنده آن آورده شده است.



شکل ۴-۹: نمایی از دستگاه حفاری پروژه قطار شهری قم [41]



شکل ۴-۱۰: نمایی از قسمت‌های مختلف دستگاه حفاری پروژه قطار شهری قم [41]

۴-۸ سپر فشار تعادلی زمین

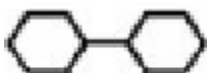
توسعه و ساخت سپرهای متعادل کننده فشار زمین در اوایل دهه هفتاد در ژاپن آغاز شد. اولین سپر فشار تعادلی در سال ۱۹۷۴ در توکیو مورد استفاده قرار گرفت که با قطر ۳/۷۲ متر برای حفر یک تونل جمع آوری فاضلاب به طول ۱۹۰۰ متر توسط یک شرکت ژاپنی به نام IHI طراحی شد

امروزه با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی و کامل تر شدن این نوع ماشین حفاری، ماشین حفاری متعادل کننده فشار زمین برای حفاری فضاهای زیرزمینی در نواحی شهری توسعه داده شده است. دامنه کاربرد سپر فشار تعادلی با افزایش مواد افزودنی در خاک‌های چسبنده تا خاک‌های دانه‌ای با چسبندگی کم و در زمین‌های غیرهمگن دارای سنگ و خاک به کار می‌رود. در حقیقت تکنولوژی EPB مبتنی بر استفاده از خاک حفاری شده موجود در اتاقک حفاری برای نگهداری جبهه کار است. فشار نگهداری جبهه کار به کمک فشار اعمالی بر خاک حفاری موجود در اتاقک حفاری فراهم می‌شود. حفاری در TBM به وسیله ابزارهای برشی روی کله حفر انجام می‌شود. خاک حفاری شده در اتاقک حفاری (شبیه اتاقک حفاری سپر دوغابی) انباشته می‌شود سپس به کمک نقاله مارپیچی با پیچ ارشمیدس به بیرون منتقل می‌شود. مقدار خاک خارج شده از اتاقک حفاری متناسب با سرعت گردش نقاله مارپیچی است. درحالی که مقدار خاک حفاری شده متناسب با نرخ نفوذ TBM است. بنابراین تعادل دینامیکی مبنی بر تعادل حجم خاک حفاری شده و حجم خاک خارج شده در اتاقک حفاری ایجاد می‌شود که تنظیم این تعادل به واسطه تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچ صورت می‌گیرد و مواد انباشته شده در اتاقک حفاری برای ایجاد فشار نگهداری، برای پایداری جبهه کار استفاده می‌شود. فشار جبهه کار با تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچ که خود تابعی از نرخ نفوذ TBM است، کنترل می‌شود. روی هم رفته توابع اساسی در حفاری با ماشین EPB، خروج خاک حفاری و کنترل فشار جبهه کار تونل است. نقاله مارپیچ امکان پراکندگی فشار در اتاقک حفاری را از مقدار بیشینه (تراز کف اتاقک حفاری) تا تراز جو (دریچه خروجی) فراهم می‌کند. جک‌های هیدرولیکی فشار طولی را روی سپر و دیواره‌ی تنظیم کننده اعمال می‌کنند. یعنی با باز و جمع شدن جک‌ها عمل پوشش بتنی گذاری در داخل سپر پشتی و حرکت رو به جلوی ماشین فراهم می‌شود، در این دستگاه همواره پوشش بتنی تا نیمی از سپر انتهایی ادامه دارد که از خطر ریزش جلوگیری می‌کند. فشار اعمالی ماشین باید به اندازه‌ای باشد که ضمن نگهداری جبهه کار تونل، سبب کاهش نیروهای اصطکاکی روی سپر شود [35]،[36].

۹-۴ روش نگهداری

از رایج‌ترین نگهداری‌هایی که به عنوان نگهداری دایمی در انواع تونل‌های شهری و غیرشهری به کار برده می‌شوند، نگهداری بتنی است. در حفاری مکانیزه این پوشش دایمی شامل قطعات پیش‌ساخته بتنی است که در شرایط خاصی تهیه شده (در اصطلاح پوشش سگمنتال نامیده شده) و به هر کدام از قطعات سگمنت گفته می‌شود. این قطعات از نظر هندسی، تعداد، نحوه کنار هم قرار گرفتن برای پروژه‌های مختلف متفاوت هستند به‌طوری‌که چگونگی کنار هم قرار گرفتن آن‌ها برای تشکیل یک حلقه کامل بتنی به چهار سیستم چیدمان مستطیلی، دوزنقه‌ای، لوزی شکل (متوازی الاضلاع) و شش ضلعی تقسیم می‌شود. جدول (۴-۵) چگونگی چیدمان سیستم‌های گفته شده را نشان می‌دهد. از میان این سیستم‌ها، سه سیستم اول به شکل حلقه به حلقه و سیستم آخر به شکل پیوسته اجرا می‌شود. برای این که حلقه بتنی ایجاد شده کامل شود، بین قطعات اتصال فشاری برقرار شود و سیستم چفت باشد از یک قطعه کامل کننده پوشش بتنی به نام کلید استفاده می‌شود [34].

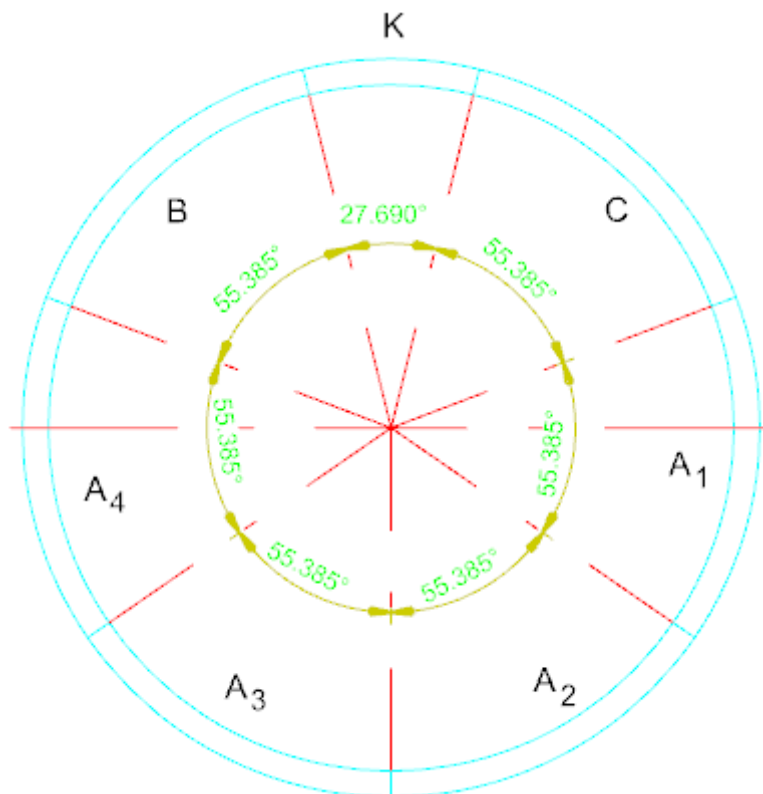
جدول ۴-۵: سیستم‌های چیدمان پوشش بتنی [43]

هندسه سگمنت	سیستم رایج مستطیلی (با کلید)	سیستم دوزنقه‌ای	سیستم لوزی شکل	سیستم شش ضلعی
هندسه				
مراحل نصب	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	پیوسته
سگمنت کلید	دارد	ندارد	دارد	ندارد
اجرای قوس و	به سگمنت‌های خاص یا دوزنقه‌ای	به سگمنت‌های خاص یا دوزنقه‌ای	به سگمنت‌های خاص یا دوزنقه‌ای	نیاز به المان‌های خاص نیست -

اصلاح مسیر	نیاز دارد) سیستم حلقه جهانی)	نیاز دارد) سیستم حلقه جهانی)	نیاز دارد) سیستم حلقه جهانی)	بازشدگی‌های درزهای کناری محدود می‌شود
آب بندی درز	درزهای باز با گسکت	درزهای باز با گسکت	درزهای باز با گسکت	درز باز

در ماشین‌های EPB مانند سایر ماشین‌های تک‌سپره، در زمان نصب پوشش بتنی، حفاری متوقف می‌شود. حلقه پوشش بتنی در داخل سپر انتهایی توسط نصاب سگمنت نصب می‌شود. اولین مرحله در نصب پوشش‌های بتنی، تعیین موقعیت کلید است. این کار توسط خود دستگاه و بر اساس موقعیت ماشین و مسیر پیش‌بینی شده تونل انجام شده و به وسیله اپراتور دستگاه به اپراتور نصاب پوشش بتنی اعلام می‌شود [36].

نگهداری بخش مکانیزه تونل خط A قطار شهری قم با قطعات پیش‌ساخته بتنی و تشکیل یک حلقه پوشش بتنی انجام می‌شود که برای تحکیم از تزریق دوغاب پشت آن‌ها استفاده می‌شود. ضخامت پوشش بتنی ۳۲ سانتی‌متر و طول آن ۱۵۰ سانتی‌متر است. یک حلقه کامل از ۷ سگمنت تشکیل شده است که یکی از آن‌ها قطعه کلید است که با (K) نشان داده می‌شود و بقیه آن‌ها پوشش بتنی یونیورسال شامل ۴ قطعه A، ۱ قطعه B و ۱ قطعه C هستند [44].



شکل ۴-۱۱: نمایی از چیدمان قطعات پیش‌ساخته بتنی پروژه قطار شهری قم [44]

ترتیب نصب قطعات پیش‌ساخته بتنی بدین شکل است که ابتدا پس از تعیین محل کلید، قطعه روبه‌روی کلید نصب می‌شود سپس قطعات کناری نصب می‌شوند و با نصب سایر قطعات نوبت به قطعات کناری کلید می‌رسد که پس از نصب آن‌ها، کلید نیز در محل خود قرار داده می‌شود.

ترتیب نصب سگمنت‌ها به ترتیب از چپ به راست $K - C - B - A_1 - A_4 - A_2 - A_3$ بوده است [36].

۴-۱۰ جمع‌بندی

خط A مترو قم با طول حدود ۱۴۷۰۰ متر و تعداد ۱۴ ایستگاه از مسجد مقدس جمکران شروع شده و به قلعه کامکار ختم می‌شود. بدون شک از مهم‌ترین اهداف ساخت این تونل، کنترل بار ترافیکی و استفاده از فضاهای زیرزمینی با هدف کاهش ترافیک معابر سطحی بوده است. این تونل در مسیری ساخته شده است که از ۴ واحد خاکی عبور کرده است. با کنترل سطح آب پیزومترهای نقاط

مختلف شهر می‌توان گفت در طول مسیر، تونل بالاتر از سطح ایستابی قرار دارد. حفاری بخش عمده این تونل (بیش از ۱۰ کیلومتر) به روش مکانیزه و تمام مقطع به وسیله دستگاه متعادل کننده فشار زمین (EPB) انجام شده است. برای نگهداری این تونل از نوع سیستم نگهداری دائمی با پوشش بتنی (شامل ۶ قطعه پیش ساخته بتنی و یک کلید) استفاده شده است.

۵ فصل پنجم: مدل سازی و تحلیل عددی

۵-۱ مقدمه

با حفر یک سازه زیرزمینی تغییراتی در وضعیت اولیه زمین ایجاد می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها تغییر در وضعیت اولیه تنش‌ها و جابجایی و نشست زمین در اطراف سازه هستند. بنابراین استفاده از روشی که بتواند میزان این تغییرات را به درستی بیان کند، ضروری خواهد بود. از بین روش‌های مختلف روش‌های عددی به دلیل توانایی‌های ویژه‌ای که دارند بسیار پر کاربرد هستند. یکی از مراحل مهم در مدل‌سازی عددی انتخاب مدل رفتاری مناسب است. در این پژوهش سعی شده است به این سوال پاسخ داده شود که تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف بر میزان نشست سطح زمین در اثر حفاری مکانیزه چگونه است.

۵-۲ روش‌های عددی

طی یک تقسیم‌بندی کلی روش‌های عددی بر اساس نوع محیط قابل استفاده، به دو دسته روش‌های محیط پیوسته و ناپیوسته تقسیم می‌شوند. در روش‌های عددی که مربوط به محیط پیوسته است، زمین محیطی پیوسته در نظر گرفته می‌شود که در آن ناپیوستگی وجود ندارد اما در روش محیط ناپیوسته، ناپیوستگی‌ها به طور مستقیم در نظر گرفته می‌شوند. از طرفی دیگر در شرایطی که محیط سنگی باشد می‌توان از روش محیط پیوسته با در نظر گرفتن محیط و خواص معادل برای توده سنگ بدون درزه یا با درزه‌های بسیار زیاد استفاده کرد.

برای حل مساله با روش‌های عددی نیاز به استفاده از معادلات درونیابی و چهارچوب تعیین مدل و محیط مساله است. معادلات درونیابی شامل معادلات ریاضی هستند که با استفاده از نقاط معلوم، جواب نقاط مجهول را پیدا می‌کنند. به این ترتیب مجهول‌های سیستم کاهش می‌یابد و محیط از بی‌نهایت درجه آزادی به درجه آزادی محدودی می‌رسد. از آن‌جا که روش‌های عددی برخلاف روش‌های تحلیلی جواب قطعی نمی‌دهند، می‌توان مساله را با توجه به اهمیت و دقت مورد نظر آن، با دقت متفاوتی حل کرد [45].

تحلیل در محیط پیوسته شامل روش‌های تفاضل محدود (FDM)، المان محدود (FEM) و روش المان مرزی (BEM) است. همچنین تحلیل در محیط ناپیوسته شامل روش المان مجزا (DEM) است. با وجود روش‌های گوناگون، انتخاب روش تحلیل در ابتدا براساس شرایط مساله و هم‌خوانی روش با مساله است، در مراحل بعد عواملی مانند آشنایی پژوهشگر با یک نرم‌افزار از بین چند نرم‌افزار یا قابلیت دسترسی به امکانات خاص یک روش تحلیل می‌توانند مطرح باشند. اما از آن‌جا که مدل‌سازی و تحلیل در روش‌های عددی بر اساس محاسبات ریاضی انجام می‌شود، نتایج تا حد قابل توجهی دقیق هستند و این نتیجه می‌دهد که ویژگی خاص هر روش، عامل اصلی انتخاب روش عددی متناسب با آن است که در نهایت بتوان نتیجه‌ای عاقلانه و بهینه به دست آورد [46].

یکی از مهم‌ترین عیب‌های روش‌های عددی با وجود تمام مزایای آن‌ها این است که اگر خواص فیزیکی و مکانیکی برجا مشخص نباشد، مدل‌سازی عددی نمی‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد. همچنین از آن‌جا که بعد از حفر یک فضای زیرزمینی خواص فیزیکی و مکانیکی محیط تغییر می‌کند، نمی‌توان به وسیله آزمایش‌های آزمایشگاهی رفتار زمین را به خوبی پیش‌بینی کرد. به دلیل عدم توانایی در شبیه‌سازی تمام زمین در روش عددی، بخشی از آن مدل شده و با توجه به مدل ساخته شده شرایط مرزی تعریف می‌شود که برای حذف تاثیر این مرزها، باید مرزها به اندازه کافی از فضای مورد بررسی دور باشند که این کار باعث افزایش تعداد المان‌ها و در نتیجه افزایش زمان حل مساله می‌شود.

۵-۲-۱ روش المان محدود^۱

پیدایش این روش به حل مسایل پیچیده الاستیسیته و تحلیل سازه‌ها در مهندسی عمران و هوافضا برمی‌گردد. این روش حاصل کار هرنیکوف^۲ در سال ۱۹۴۱ و کورانت^۳ در سال ۱۹۴۲ است. با

^۱ Finite Element Method

^۲ Hrennikoff

^۳ Courant

این که روش کار این دو دانشمند متفاوت بود، اما ویژگی مشترک آن‌ها در تقسیم دامنه پیوسته (ماده) به تعدادی زیردامنه به نام المان بود. این روش برای حل معادلات انتگرالی و دیفرانسیلی جزئی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس این روش با حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مانند اویلر حل می‌شوند، است. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مساله مهم این است که به معادله ساده‌ای که از نظر عددی پایدار است، کاهش پیدا کند. یعنی خطا در داده‌های اولیه و حین حل آن قدر نباشد که به نتایج نامفهوم منجر شود. اگرچه از این روش در ابتدا برای محاسبات ساده استفاده شده است اما امروزه در بسیاری از علوم مهندسی کاربرد دارد.

این روش برای حل مجموعه از معادلات حاکم بر سیستم‌های فیزیکی پیوسته است. برای این که هر جسم در این روش مورد بررسی قرار گیرد باید به اجزا کوچکتر به نام المان تقسیم شود. این اجزا در نقاط گره به هم متصل شده و معادلات حاکم برای حرکت هر یک گره‌ها به دست آمده و به طور همزمان حل می‌شود. در نهایت با تحلیل جواب‌های عددی معادلات، نتایج مورد نظر به دست می‌آید، با به دست آمدن حل عددی معادلات حاکم بر هر یک از گره‌های اطراف یک المان، رفتار آن المان به دست می‌آید و در آخر با کنار هم قرار دادن نتایج حاصل از همه المان‌ها، رفتار کلی یک سیستم فیزیکی در شرایط خاص به دست می‌آید.

از آن‌جا که سیستم فیزیکی به المان‌ها و گره‌ها تقسیم می‌شوند، شرایط مرزی (بارها و اثرات خارجی) نیز باید به مقادیر گره‌ای و المانی تبدیل شوند. نیروهای متمرکز مانند F بر یک گره و نیروهای فشاری مانند P به صورت مساوی به هر یک از گره‌های محدوده اثر، اعمال خواهند شد. از آن‌جا که این محاسبات عددی هستند و میزان خطای آن‌ها بسیار مهم است باید گفت تا این‌جا حداقل دو منبع برای خطا وجود دارد. اول این که حل در نظر گرفته شده با کمک المان‌ها با مقادیر واقعی آن دقیقاً مطابقت ندارد. اما هرچه المان در نظر گرفته شده مناسب‌تر باشد، میزان خطای

محاسبه کم‌تر خواهد بود. خوشبختانه در بسیاری از حل‌ها با کوچک‌تر کردن اندازه المان دقیق‌تر می‌شوند، اما همیشه این‌گونه نیست و همیشه ریزکردن المان‌ها تاثیری بر نتایج ندارد. خطای دوم، میزان دقت معادله جبری است که بر شرایط مساله حاکم فرض شده است. همواره با درنظر گرفتن فرضیاتی سعی می‌شود که معادله حاکم ساده‌تر شده و این خود مقداری خطا به وجود می‌آورد. حل المان‌های محدود به شدت وابسته به کامپوتر و برنامه نویسی رایانه‌ای وابسته است و نباید شرایط حاکم بر رایانه‌ها و روش‌های استفاده شده برای پردازش در آن‌ها را فراموش کرد.

اصطلاح اجزا محدود اولین بار توسط کلو^۱ در سال ۱۹۶۰ برای حل مسایل الاستیسیته دوبعدی استفاده شد، هرچند این روش ابتدا توسط کورانت در سال ۱۹۴۳ استفاده شده بود. از آن پس در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ برنامه‌های کامپیوتری گوناگونی که از این روش استفاده می‌کنند مانند ANSYS شکل گرفت.

از معایب این روش به بالا بودن میزان و حجم عملیات ریاضی و نیاز به کامپیوترهای پرسرعت و حافظه قوی، زیاد بودن اطلاعات خروجی و مشکل بودن تحلیل آن‌ها، وقت‌گیر بودن و پرهزینه بودن مدل‌سازی، مشکل بودن مدل کردن اثر زمان و شرایط ناپیوستگی اشاره کرد. در این روش، شرایط مرزی و وضعیت بارگذاری تاثیر زیادی بر نتایج خواهد داشت.

۵-۲-۲ روش المان مرزی^۲

در این روش محیط به صورت همگن در نظر گرفته شده و تنها مرزهای اطراف سازه، به المان‌های کوچک تقسیم می‌شوند، مگر در مواقعی که در محیط مورد نظر تغییراتی در مشخصات مواد وجود داشته باشد که در این صورت باید فصل مشترک این نواحی نیز به صورت المان‌های مرزی مدل شود. در این روش ابتدا واکنش المان‌ها نسبت به شرایط بارگذاری خارجی محاسبه شده و رفتار

^۱ Clough

^۲ Boundary Element Method

المان‌های مرزی بر اساس معادلات دیفرانسیل جزئی، شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. با انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل جزئی می‌توان مقادیر تنش‌ها و تغییرشکل‌ها را داخل محیط مورد نظر به دست آورد. از این روش می‌توان برای مدل‌سازی شرایط بسیار ساده شده دو بعدی مانند محیط‌های الاستیک خطی و یکنواخت استفاده کرد و برای مدل‌سازی نیازی به حجم و سرعت بالای پردازنده ندارد.

۵-۲-۳ روش المان مجزا^۱

در این روش مانند روش المان محدود، محدوده مساله به مجموعه‌ای از بلوک‌ها تقسیم می‌شود. تفاوت اساسی این روش با دیگر روش‌های عددی در ناپیوسته بودن محیط مدل‌سازی است. بنابراین در این روش امکان بررسی تاثیر عوارض ساختاری مانند درزه‌ها، ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها و لایه‌بندی‌ها به شکل سطوح تلاقی بین بلوک‌های مجزا وجود دارد. این روش در ابتدا برای تحلیل دو بعدی توده سنگ در نظر گرفته شده بود اما با گذشت زمان برای تحقیق درباره جریان یافتگی ذرات، مطالعه میکروسکوپی در مواد با ساختارهای دانه‌ای، همچنین بررسی چگونگی توسعه ترک‌ها در سنگ و بتن توسعه داده شده و مورد مطالعه قرار گرفت. از محاسبه اثر حرکت بلوک‌ها بر یکدیگر، نیروها و جابجایی‌ها در محل تماس به دست می‌آید. اغتشاش ایجاد شده به وسیله عامل‌های بیرونی در مرزها، به شکل حرکت بلوک‌ها در سیستم بلوکی گسترش یافته که این روند یک فرآیند دینامیکی بوده و سرعت توسعه آن تابعی از خواص فیزیکی سیستم بلوک‌های مجزا است. پارامترهای عددی متناظر با رفتار دینامیکی به وسیله الگوریتم گام زمانی توصیف می‌شود و اندازه گام زمانی طوری انتخاب می‌شود که بتوان در هر گام زمانی، سرعت و شتاب را فرض کرد. این روش بر این فرض استوار است که گام‌های زمانی به اندازه‌ای کوچک هستند که در هر گام زمانی منفرد، اغتشاش ایجاد شده فرصت لازم برای حرکت از یک المان مجزا به المان مجزای کنار آن را نداشته باشد. در این روش، روند

¹ Discretet Element Method

محاسبات به شکل ترکیبی از به کار بستن قوانین نیرو- جابجایی در محل تماس ها و قانون دوم نیوتن در بلوک ها است. با استفاده از قانون نیرو- جابجایی و با در دست داشتن جابجایی ها، میزان نیروها در محل تماس به دست می آید. با استفاده از قانون دوم نیوتن نیز می توان حرکت بلوک ها را که در اثر نیروها به وجود می آید، تعیین کرد. روش المان مجزا، روش قدرتمندی برای تحلیل مسایل در توده سنگ های ناپیوسته یا مواد سنگی با رفتار غیرخطی است. همچنین قابل ذکر است که روش تغییرشکل ناپیوسته نیز که توسط گودمن^۱ و شی^۲ در سال ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵ معرفی شد هم خانواده روش المان مجزا است. در روش تغییرشکل ناپیوسته، شکل گیری بلوک ها شبیه مش بندی در روش المان محدود است. این روش مخصوص محیط ناپیوسته توسعه داده شده است و المان ها یا بلوک های استفاده شده می توانند هر شکل محدب یا مقعری داشته باشند.

۴-۲-۵ روش تفاضل محدود^۳

این روش در حل مسایل مختلف مهندسی پر کاربرد است. از آن جا که با استفاده از این روش امکان مدل سازی تغییرمکان ها و کرنش های بزرگ وجود دارد، بنابراین کاربرد این روش در مهندسی مکانیک سنگ و تونل سازی یکی از روش های رایج است. در روش تفاضل محدود، ناحیه مورد مطالعه را به تعدادی منطقه چهار گوش تقسیم می کنند. در مورد هر ناحیه معادلات مربوطه نوشته می شود. سپس بخشی از محیط در نقاطی به نام گره که در اصل محل برخورد المان ها است از سایر مناطق مجزا شده و معادلات حرکت گره ها برای تمام مناطق نوشته می شود. تیوری واگرایی گوس مبنای روش محاسبه نیروهای گره ها را تشکیل می دهد [47].

روش تفاضل محدود از جمله روش های قدیمی در تحلیل های عددی است که برای حل معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و شرایط مرزی استفاده می شود. در ابتدای توسعه روش های

¹ Goodman

² Shi

³ Finite Difference Method

عددی، روش‌هایی مانند المان محدود کاربرد زیادی داشته‌اند. به طور کلی این روش‌ها ماتریس المان‌ها را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کلی را می‌سازند. این در حالی است که در روش تفاضل محدود این کار به طور معمول انجام نمی‌شود و قابلیت نسبی برای تولید مجدد معادله‌های تفاضل محدود در هر گام وجود دارد. از آن جا که لازم نیست یک ماتریس کلی تشکیل شود، تشکیل دوباره مختصات در وضعیت کرنش‌های بزرگ، مشکل نخواهد بود. تغییر مکان‌های جزیی گره‌ها به مختصات گره‌ها به گونه‌ای اضافه می‌شوند که شبکه با مصالح ارایه شده در آن حرکت می‌کند و تغییر مکان می‌دهد. در حقیقت به این کار فرمول‌بندی لاگرانژی گفته می‌شود. قابل ذکر است که روش تفاضل محدود به لطف پژوهش‌های محققى به نام ویلکینز^۱، علاوه بر شبکه‌های المانی چهار گوش توانایی ایجاد معادلات تفاضلی در شرایطی که المان‌ها دارای شکل دلخواه هستند را نیز دارا است [48]. یکی از معروف‌ترین نرم‌افزارهایی که به این روش کار می‌کنند FLAC است.

۵-۳ معرفی نرم‌افزار FLAC 3D

نرم‌افزار FLAC 3D از جمله محصولات شرکت ITASCA است. این نرم‌افزار دارای نسخه‌های مختلفی بوده و در این پژوهش از نسخه ۵ آن استفاده شده است. نرم‌افزار FLAC 3D یک برنامه تفاضل محدود است که اساس محاسبات آن را فرمول‌بندی لاگرانژی تشکیل می‌دهد. به طور کلی این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و تحلیل در محیط پیوسته طراحی شده است ولی این امکان نیز وجود دارد که تعداد محدودی از سطوح ناپیوستگی یا سطوح لغزش را نیز مدل‌سازی کرد. در این نرم‌افزار امکان مدل‌سازی سازه‌های تونلی، شمع‌ها، میل مهارها و به‌طور کلی سازه‌هایی که با محیط درونگیر خود در تماس هستند وجود دارد و علاوه بر این، امکان بررسی اثر آن‌ها بر یکدیگر و بررسی پایداری سازه‌های مدل‌سازی شده در سطح زمین و زیرزمین وجود دارد.

ویژگی‌هایی از این نرم‌افزار در زیر آورده شده است:

¹ Wilkins

- فرمان‌های ورودی برنامه و داده‌ها دارای آرایش خاصی نبوده و می‌توانند مستقیم یا از طریق یک فایل داده به برنامه وارد شوند. داده‌ها به راحتی قابل اصلاح بوده و چندین فایل داده را می‌توان به طور متوالی متصل کرده و یک سری تحلیل عددی انجام داد.
- وجود مدل‌های رفتاری مختلف در زمینه رفتار الاستیک و پلاستیک
- دارا بودن محیط کاربر پسند و رابط گرافیکی قوی
- استفاده بهینه از سخت افزار پردازنده به منظور کاهش زمان پردازش
- امکان تعریف روابط و حتی مدل‌های رفتاری جدید در قالب کد نویسی به زبان

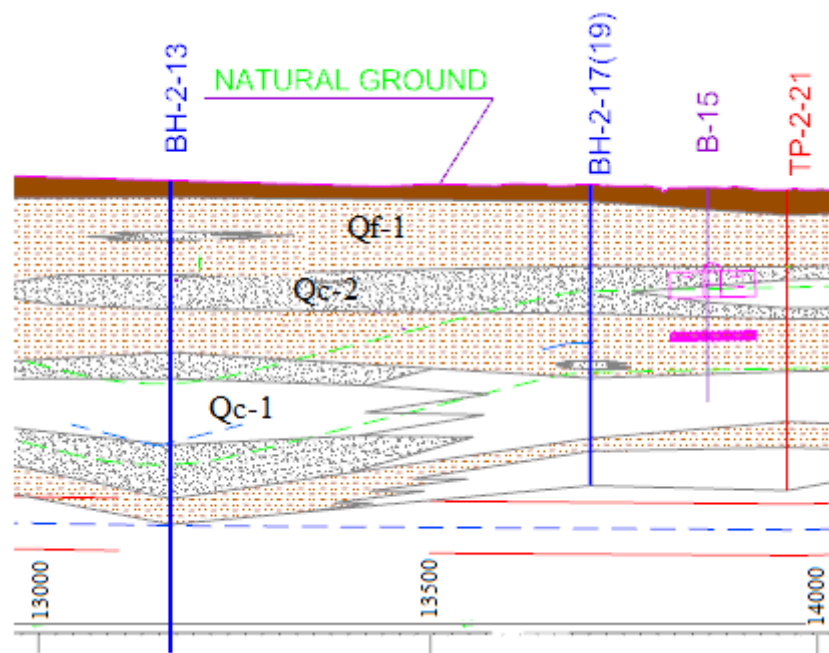
FISH

- قابلیت تحلیل استاتیک، دینامیکی و حرارتی سازه‌ای
- امکان تحلیل با اعمال خزش و سیال نیز در مدل وجود دارد
- امکان مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای و سیستم‌های نگهداری از جمله پیچ‌سنگ، قاب فولادی، شاتکریت، شمع و ...

۴-۵ مدل‌سازی محدوده مورد بررسی

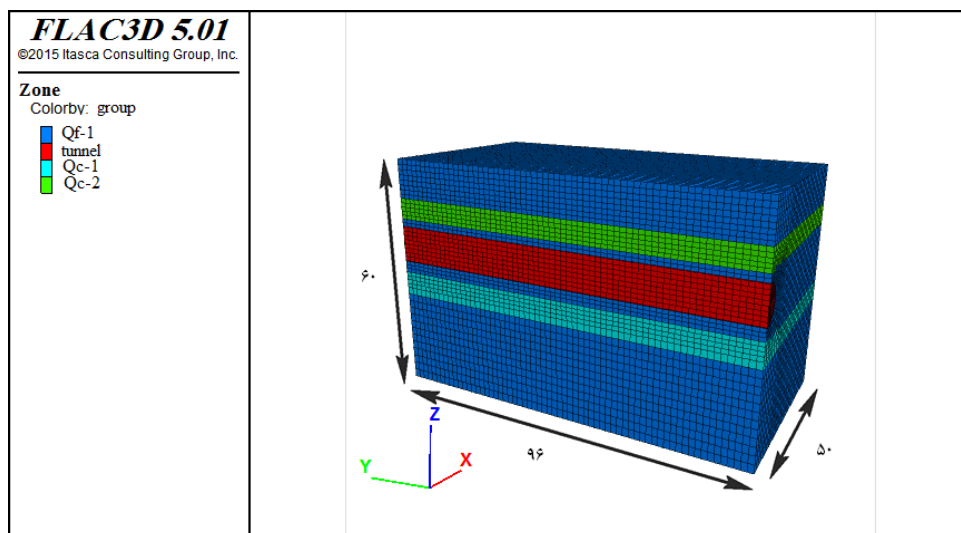
اولین گام در مدل‌سازی عددی ساخت هندسه مدل است. هندسه مدل باید به گونه‌ای باشد که با واقعیت مساله هم‌خوانی داشته باشد، مثلاً ساختارهای زمین‌شناسی و لایه بندی و ویژگی‌های آن‌ها به درستی اعمال شود و ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شود که شرایط مرزی بر نتایج پژوهش اثرگذار نباشد.

در شکل (۵-۱) شرایط لایه‌های مختلف در مقطع مورد مطالعه آورده شده است.



شکل ۱-۵: مقطع طولی زمین‌شناسی از محدوده کیلومتر ۱۳ که به عنوان محدوده مورد بررسی انتخاب شده است [32]

در شکل (۲-۵) نمایی از مدل ساخته شده به همراه لایه‌بندی آورده شده است.



شکل ۲-۵: مدل ساخته شده به همراه لایه‌بندی خاک‌ها

در زمینه مشخص کردن ابعاد مدل عددی پژوهش‌های زیادی انجام شده است و در بسیاری از منابع پژوهشگران به این نکته اشاره کرده اند که اگر ابعاد مدل حدود ۸ تا ۱۰ برابر ابعاد حفره باشد با شرایط مرزی متفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن (حدود ۰/۵ درصد) کاهش خواهد یافت (برای مثال فاتحی ۱۳۸۷) [49]. کرمی (۱۳۸۶) با ساخت مدل عددی با ابعاد و شرایط مرزی مختلف نتیجه گرفت اگر ابعاد مدل ۱۰ برابر ابعاد تونل باشد، آنگاه میزان خطا بسیار کم خواهد شد. لامبروگی (۲۰۱۲) نیز برای ابعاد مدل حداقل‌هایی را ارائه کرد که در این پژوهش از این مقادیر برای ساخت مدل عددی استفاده شده است [17].

لامبروگی ارتفاع مدل را $(H+4D)$ ، طول و عرض مدل را $2(H+4D)$ در نظر گرفت. H عمق محور تونل و D قطر تونل بوده است.

در این پژوهش برای این که مدت زمان اجرای نرم‌افزار کم شود و به دلیل این که مدل ساخته شده متقارن است، نیمی از مدل برای تحلیل استفاده شده است.

۵-۵ انتخاب مدل‌های رفتاری

از آن جا که هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری خاک بر میزان نشست سطح زمین در اثر تونل‌سازی مکانیزه است، با در نظر گرفتن سه مدل رفتاری الاستیک، موهر-کولمب و خاک سخت شونده سعی بر بررسی این موضوع شده است. این سه مدل رفتاری ارائه دهنده سه رفتار متفاوت از خاک هستند که به دلیل افزایش سطح پیچیدگی انتخاب شده‌اند. مدل الاستیک به عنوان ساده‌ترین مدل در بین این سه مدل، موهر-کولمب به عنوان یک مدل رفتاری رایج و کامل‌تر نسبت به الاستیک و مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به عنوان کامل‌ترین مدل در بین این سه مدل انتخاب شده‌اند.

در جدول‌های (۱-۵)، (۲-۵) و (۳-۵) مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل‌های رفتاری

آورده شده است.

مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک در کرنش بحرانی که در مدل خاک سخت‌شونده در

جدول (۳-۵) آورده شده است، به دلیل انجام نشدن آزمایش‌های لازم و عدم دسترسی به مقادیر

اندازه‌گیری شده آن به روش آنالیز برگشتی تعیین شده است.

جدول ۱-۵: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری الاستیک

لایه	مدول بالک (Mpa)	مدول برشی (Mpa)
Qf-1	62.5	28.85
Qc-1	60	27.69
Qc-2	60	27.69

جدول ۲-۵: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری موهر - کولمب

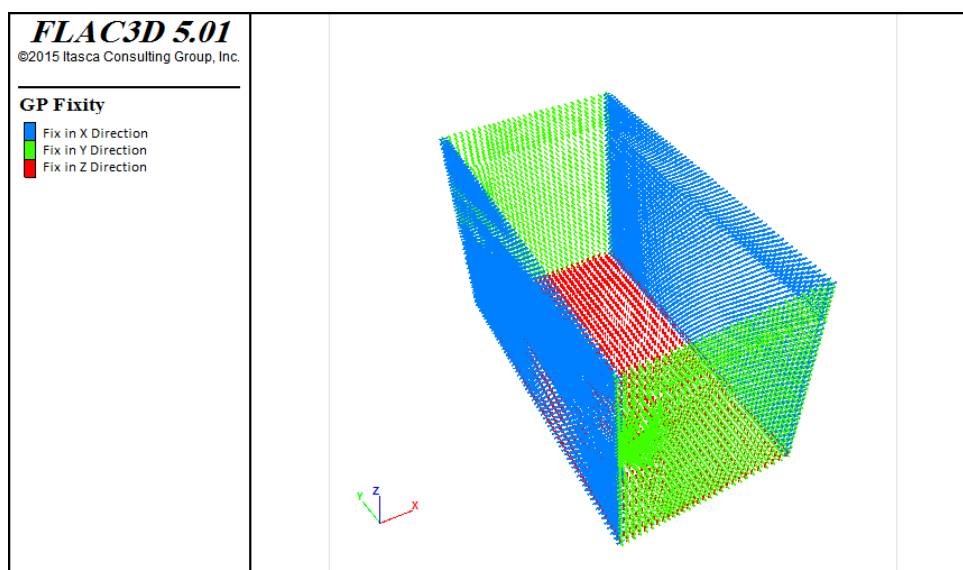
لایه	مدول بالک (Mpa)	مدول برشی (Mpa)	چسبندگی (Kpa)	زاویه اصطکاک (degree)
Qf-1	62.5	28.85	30	30
Qc-1	60	27.69	31	31
Qc-2	60	27.69	31	31

جدول ۳-۵: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری خاک سخت‌شونده

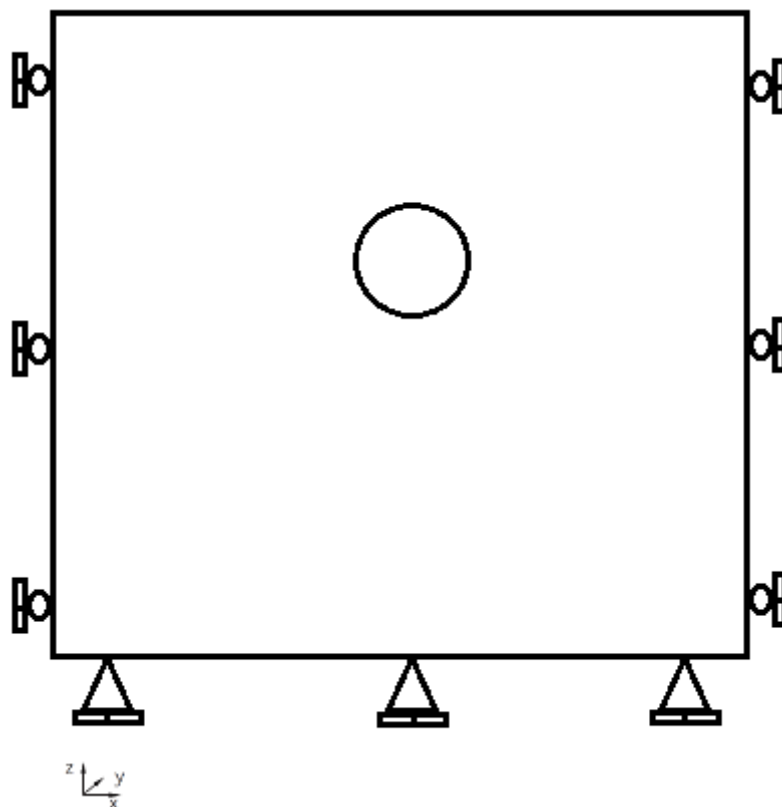
لایه	مدول بالک (Mpa)	مدول برشی (Mpa)	چسبندگی در کرنش صفر و 0.1% (Kpa)	زاویه اصطکاک در کرنش صفر و 0.1% (degree)
Qf-1	62.5	28.85	(1e-3,25) (0,30)	(1e-3,25) (0,30)
Qc-1	60	27.69	(1e-3,25) (0,31)	(1e-3,25) (0,31)
Qc-2	60	27.69	(1e-3,25) (0,31)	(1e-3,25) (0,31)

۵-۶ شرایط مرزی

در مدل سازی عددی برای مشخص کردن محدوده نهایی زون ها از مرزهای مصنوعی استفاده می شود. از آنجا که ابعاد این مدل در راستای محور X محدوده بازه $(0, 50)$ ، در راستای محور Y محدوده بازه $(0, 96)$ و در راستای محور Z محدوده بازه $(0, 60)$ است، برای ایجاد مرزهای مصنوعی در مدل ساخته شده در راستای محور X در صفحه YZ بازه های $(0, 1)$ و $(-0, 1)$ و $(49, 9)$ ، در راستای محور Y در صفحه XZ بازه های $(0, 1)$ و $(-0, 1)$ و $(95, 9)$ و $(96, 1)$ و در راستای محور Z بازه $(0, 1)$ و $(-0, 1)$ در جای خود ثابت در نظر گرفته شده اند. علاوه بر این، برای اعمال بار ناشی از ترافیک و سازه های سطحی در محل مورد نظر، در قسمت بالای مدل ($Z = 60$) که به عبارتی همان سطح زمین است، باری معادل ۲۰ کیلو پاسکال به طور گسترده، عمود بر سطح و در خلاف جهت محور Z وارد شده است.



شکل ۵-۳: نمایی از مشخص کردن محدوده نهایی زون ها با اعمال مرزهای مصنوعی



شکل ۵-۴: شرایط مرزی مدل ساخته شده

در شکل‌های (۵-۳) و (۵-۴) شرایط مرزهای مصنوعی اعمال شده به مدل دیده می‌شود.

۵-۷ تعیین شرایط اولیه

در بیش‌تر پروژه‌های مهندسی معدن و عمران، قبل از حفر و ایجاد سازه مورد نظر، تنش‌های برجا در عمق زمین وجود دارند. با اعمال شرایط اولیه در مدل ساخته شده سعی می‌شود تنش‌های برجا موجود در زمین قبل از حفاری شبیه‌سازی شود. زیرا اگر این کار انجام نشود ممکن است بر رفتارهای بعدی مدل و نتایج به دست آمده تاثیر منفی بگذارد و نتایج غیرواقعی شود. در حالت ایده‌آل اطلاعات این تنش‌ها به وسیله اندازه‌گیری برجا تعیین می‌شود، اما وقتی این امکان وجود نداشته باشد می‌توان به کمک پارامترهای ژئوتکنیکی زمین و عمق سازه، میزان تنش‌ها را برآورد کرد و به مدل اعمال نمود. به طور کلی، در لایه‌های یکنواخت با سطح آزاد، تنش‌های قائم معمولاً برابر با ρgh هستند که g شتاب جاذبه، ρ چگالی مواد و h عمق نقطه موردنظر است. برآورد تنش‌های افقی برجا

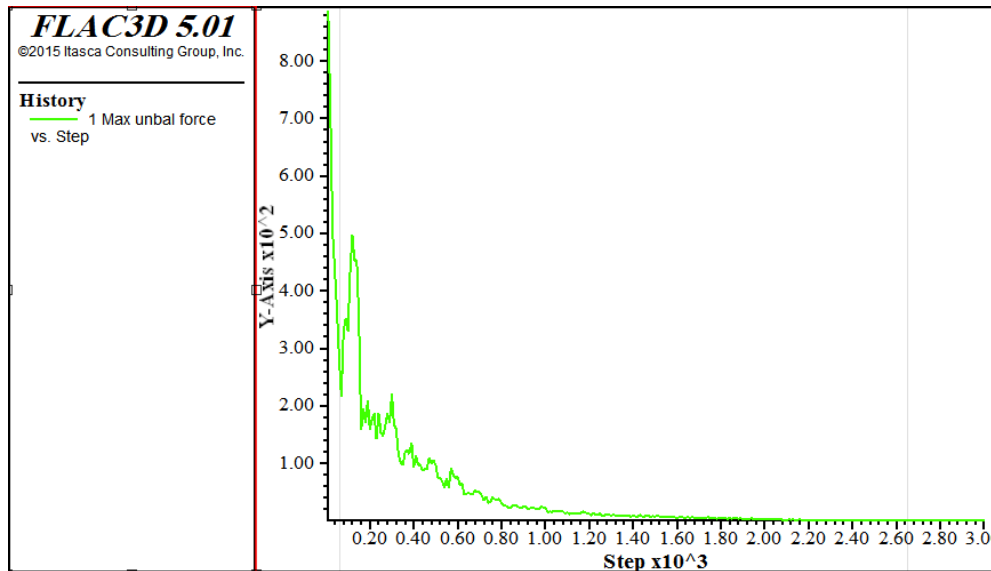
بسیار مشکل تر از تنش‌های قائم برجا است. بر اساس تیوری الاستیسیته نسبت بین تنش افقی و قائم در محیط‌هایی که سنگی هستند به صورت رابطه $\frac{\nu}{1-\nu}$ بیان می‌شود که در این رابطه ν نسبت پواسن است. این رابطه یک فرض در بر دارد که آن این است که وزن به صورت ناگهانی به جرم اجسام الاستیک وارد می‌شود، به‌طوری که امکان جابجایی جانبی وجود ندارد. اما این حالت به دلایلی مانند جابجایی تکتونیکی متناوب، شکست مواد و برداشتن روباره و تنش‌های محصورشده حاصل از چین‌خوردگی و شرایط موضعی، به ندرت در عمل پیش می‌آید. البته اگر درباره تاریخچه منطقه اطلاعات کافی موجود باشد، می‌توان آن را شبیه‌سازی کرده و شرایط اولیه را برای طرح مهندسی موردنظر، ایجاد کرد. در حالت کلی تنش‌هایی در شبکه اعمال می‌شود و سپس نرم‌افزار تا حد تعادل اجرا می‌شود [47].

در تحقیق حاضر تنش‌های قائم به‌صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم با توجه به جنس محیط برابر با ضریب فشار خاک در حالت سکون بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده (0.6) در واحدهای خاکی در نظر گرفته شده است.

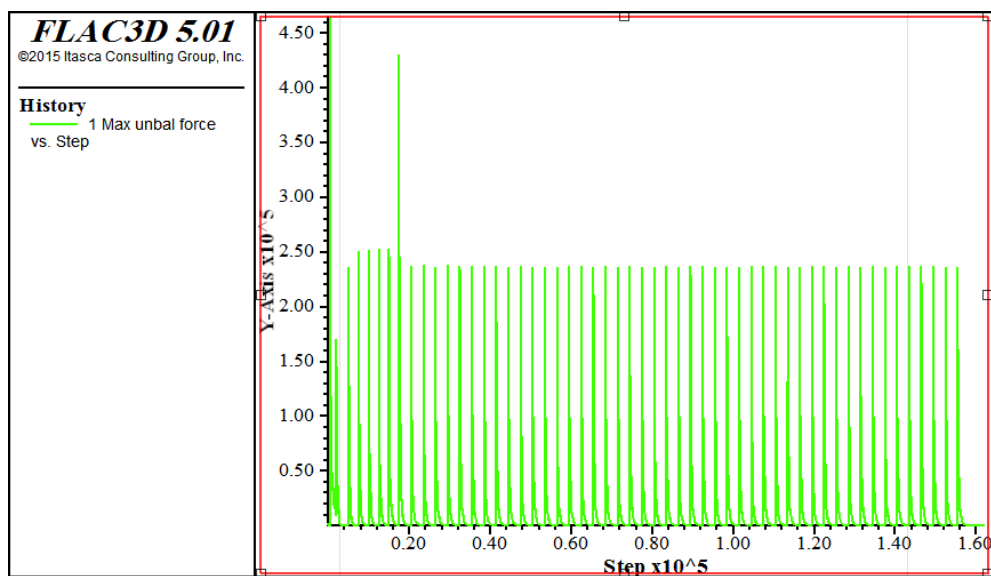
۵-۸ به تعادل رسیدن مدل تا قبل از حفاری

در مدل‌سازی عددی برای این که نتایج با واقعیت هم‌خوانی داشته باشد باید تا حد ممکن شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک کرد. در حقیقت، زمین قبل از حفر تونل در تعادل است و حفر تونل باعث به وجود آمدن اغتشاش‌هایی در وضعیت تنش‌ها و جابجایی‌ها خواهد شد. در این مرحله از مدل‌سازی ابتدا تنش‌های اولیه در مدل ایجاد شده و با توجه به شرایط مرزی، خواص ژئومکانیکی و تنش‌های برجای درنظر گرفته شده، مدل حل می‌شود تا به تعادل برسد که در این صورت مدل دارای شرایطی مطابق با واقعیت در زمین خواهد بود. در ادامه، پس از این که مدل به تعادل رسید باید جابجایی‌های ایجاد شده در مدل را صفر کرد تا با شرایط واقعی زمین قبل از حفاری هم‌خوانی پیدا کرده و برای حفاری آماده شود.

در شکل‌های (۵-۵) و (۶-۵) به تعادل رسیدن بیشینه نیروی نامتعادل بعد از اعمال شرایط اولیه و حفاری آورده شده است.

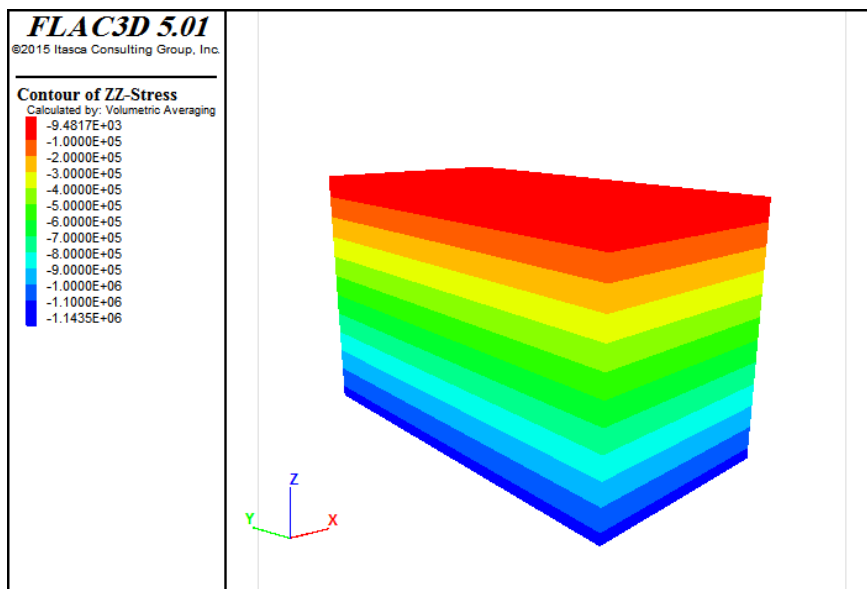


شکل ۵-۵: به تعادل رسیدن مدل تا قبل از حفاری



شکل ۶-۵: به تعادل رسیدن مدل بعد از حفاری

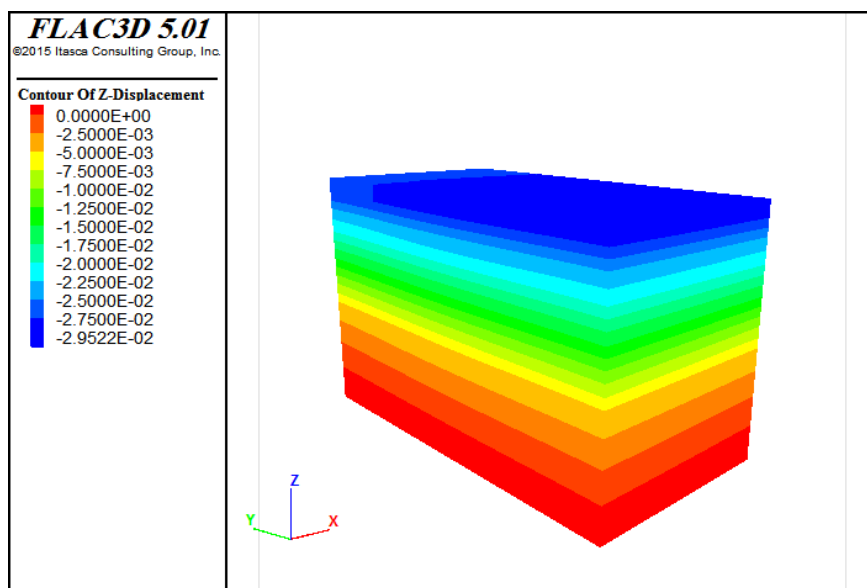
در شکل‌های (۷-۵) و (۸-۵) کانتور تنش و جابجایی قائم بعد از تعادل آورده شده است.



شکل ۷-۵: تنش قائم در مدل عددی بعد از به تعادل رسیدن

مطابقت مقدار تنش‌هایی که توسط وزن توده خاک در عمق‌های مختلف به وجود می‌آید با

کانتور تنش عمودی در مدل عددی، نشان دهنده تحلیل درست تنش‌های عمودی و ساخت محیطی نزدیک به شرایط واقعی زمین است.



شکل ۸-۵: جابجایی قائم در مدل عددی بعد از به تعادل رسیدن

۵-۹ مدل سازی سپر ماشین

برای ساخت سپر ماشین از المان پوسته‌ای استفاده شده است که رفتار آن نیز الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. از آن جا که این ماشین دارای دو سپر جلویی و انتهایی است که قطر سپر جلویی بیش تر از سپر انتهایی است، بنابراین برای مدل سازی سپر از متوسط قطر سپرها استفاده شده است. قطر حفاری و قطر خارجی سپر ۹/۴ متر در نظر گرفته شده است. در جدول (۴-۵) مشخصات اعمال شده برای سپر ساخته شده در مدل آورده شده است.

جدول ۴-۵: مشخصات سپر ماشین حفار [41]

مدول الاستیسیته (GPa)	دانسیته (kg/m ³)	نسبت پواسن	ضخامت (m)	طول سپر (m)
۲۱۰	۷۶۰۰	۰/۳	۰/۱	۹

۵-۱۰ مدل سازی فشار جبهه کار و تزریق

تامین مقدار فشار جبهه کار یکی از مهم ترین بخش های حفاری مکانیزه در محیط های شهری است. به طور کلی با انجام عملیات حفاری مقداری فشار از جبهه کار برداشته می شود که در نتیجه آن جابجایی های افقی و قائم در محدوده سازه اتفاق می افتد. بنابراین، برای کنترل این جابجایی ها باید مقدار باری که با انجام حفاری از جبهه کار برداشته می شود را دوباره به آن اعمال کرد که این کار در حفاری با ماشین های EPB امکان پذیر است. این کار به وسیله اتاقک اختلاط انجام می شود. این اتاقک که در اصطلاح چمبر نام دارد محفظه ای است که پشت کله حفار قرار دارد. مواد پس از حفر شدن به این اتاقک وارد شده و پس از مخلوط شدن با مواد افزودنی مناسب در اتاقک انباشته شده و به صورت کنترل شده توسط نوار نقاله مارپیچ خارج می شود. این تخلیه کنترل شده عاملی است که با آن فشار جبهه کار کنترل می شود.

به طور کلی در تعیین فشار جبهه کار عوامل متعددی تاثیرگذار هستند که از جمله مهم ترین آن ها عمق و قطر تونل، بار سطحی، تراز آب زیرزمینی، مشخصات خاک و تنش موثر است. برای برآورد فشار مناسب جبهه کار پژوهش های متعددی در قالب روش های مختلف تجربی، تحلیلی و عددی انجام گرفته است [37].

در این مرحله از مدل سازی به دلیل وجود اطلاعات عملیاتی از میزان فشار جبهه کار در محدوده مورد مطالعه، مقدار عددی آن به طور مستقیم به مدل اعمال شد.

در اتاقک اختلاط این دستگاه تعداد ۷ حسگر فشار در موقیتهای مختلف نصب شده است که میزان فشار چمبر را نشان می دهد. برای مدل سازی فشار جبهه کار از متوسط این فشارها استفاده شده است و این فشار به صورت بار گسترده به جبهه کار اعمال شده است.

در زمینه برآورد فشار مناسب تزریق دوغاب در پشت سگمنت ها نیز پژوهش های متعددی انجام شده است برای مثال حیدری و زارع (۱۳۹۱) نتیجه گرفتند که فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت به طور معمول ۰/۵ تا ۱/۲ بار بیش تر از فشار جبهه کار در نظر گرفته می شود [50]. در این پژوهش به دلیل وجود اطلاعات عملیاتی از میزان فشار تزریق دوغاب در محدوده مورد نظر، از مقدار عددی آن به صورت مستقیم برای اعمال فشار تزریق در مدل استفاده شده است.

در این دستگاه تعداد ۶ جفت مسیر تزریق دوغاب در نظر گرفته شده است که به کمک حسگرهای فشار سنج، فشار تزریقی دوغاب مشخص است. در این پژوهش برای مدل سازی فشار تزریق دوغاب از متوسط این مقادیر استفاده شده است که در حدود ۰/۵ بار بیش تر از فشار جبهه کار است.

در جدول (۵-۵) مشخصات فشار جبهه کار و تزریق دوغاب آورده شده است.

جدول ۵-۵: مشخصات فشار جبهه کار و تزریق دوغاب [51]

فشار تزریق (بار)	فشار جبهه کار (بار)
۱/۳	۰/۸

۵-۱۱ مدل سازی پوشش سگمنتی

برای ساخت پوشش سگمنتی از المان پوسته‌ای استفاده شده است. پوشش سگمنتی در این پروژه شامل ۷ قطعه سگمنت یونیورسال بوده است که ۴ قطعه نوع A، یک قطعه نوع B، ۱ قطعه C و یک کلید بوده است. برای ساده سازی مدل سازی پوشش بتنی از اتصالات قطعات پیش ساخته بتنی صرف نظر شده است و پوشش بتنی به صورت یک پوشش حلقوی پیوسته در نظر گرفته شده است.

در جدول (۵-۶) مشخصات پوشش سگمنتی آورده شده است.

جدول ۵-۶: مشخصات پوشش سگمنتی [44]

سیستم نگهداری	مدول الاستیسیته (Gpa)	دانشیه (Kg/m ³)	ضخامت (m)	نسبت پواسن
پوشش بتنی	۲۷	۲۵۰۰	۰/۳۵	۰/۲

۵-۱۲ مدل سازی دوغاب پشت سگمنت

به طور کلی در حفاری مکانیزه با استفاده از ماشین متعادل کننده فشار زمین، بین سیستم نگهداری نصب شده و زمین فضای خالی به وجود می آید که یکی از مهم ترین کارها، کنترل این فضای خالی ایجاد شده است. به طور خلاصه از مهم ترین مشکلاتی که این فضای خالی شده می تواند ایجاد کند نشست سطحی، ریزش مواد و آب به داخل تونل است. بنابراین این فضای خالی باید توسط ماده مناسبی پر شود. استفاده از دوغاب های تهیه شده از آب، سیمان، ماسه و ... برای پر کردن این فضای

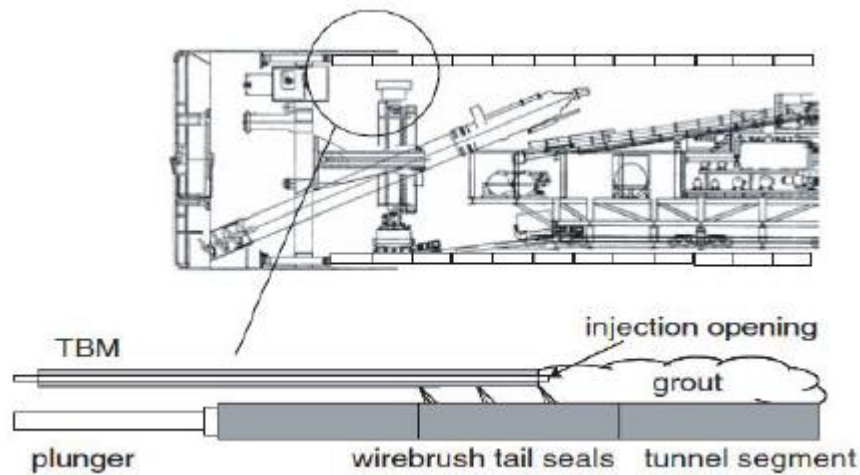
خالی بسیار رایج است. این مخلوط علاوه بر این که باید دارای غلظت مناسب و قابلیت پمپاژ خوب باشد، باید خاصیت آب بندی را نیز در کنار مقاومت بالا و پر کنندگی مناسب داشته باشد.

به طور کلی اهداف تزریق دوغاب پشت سگمنت شامل موارد زیر است:

- آب بندی و جلوگیری از ورود مواد به داخل تونل
 - امکان ایجاد تماس یکنواخت بین زمین و سگمنت
 - انتقال بارهای وارد شده و تحمل آن‌ها
 - به حداقل رساندن نشست
 - ثابت نگه داشتن حلقه پوشش بتنی و جلوگیری از خارج شدن حلقه‌های قطعات
- پیش ساخته بتنی از امتداد واقعی خود
- در این مدل سازی برای ساختن دوغاب پشت سگمنت از المان حجمی استفاده شده است که رفتار آن نیز الاستیک خطی در نظر گرفته شده است.

در شکل (۵-۹) چگونگی تزریق دوغاب و موقعیت نسبی آن نسبت به شیلد و سگمنت نشان

داده شده است.



شکل ۵-۹: نمایی از تی‌بی‌ام و جزئیات سیستم تزریق دوغاب [52]

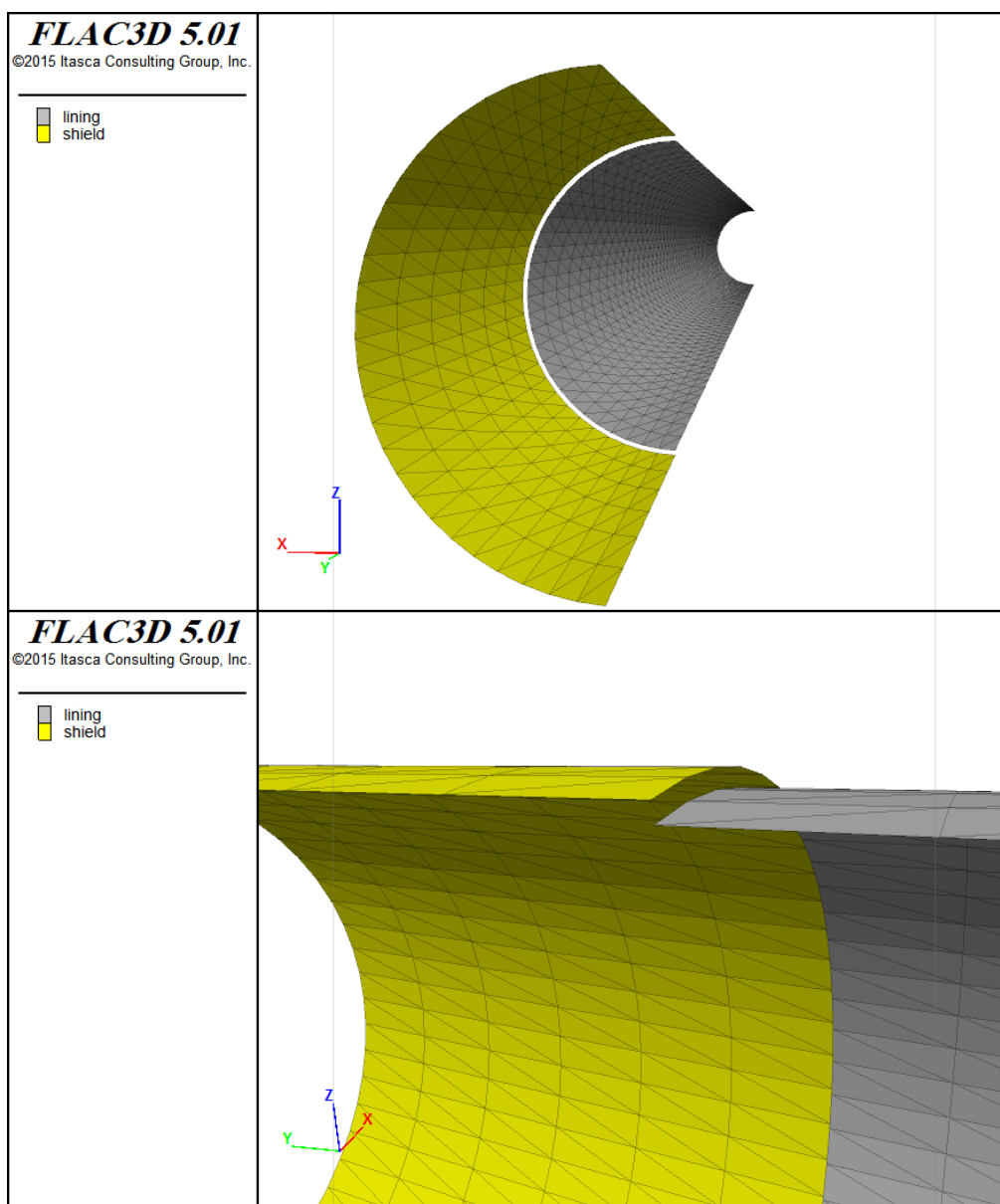
در جدول (۷-۵) مشخصات دوغاب تزریق شده آورده شده است.

جدول ۷-۵: مشخصات دوغاب تزریق شده [44]

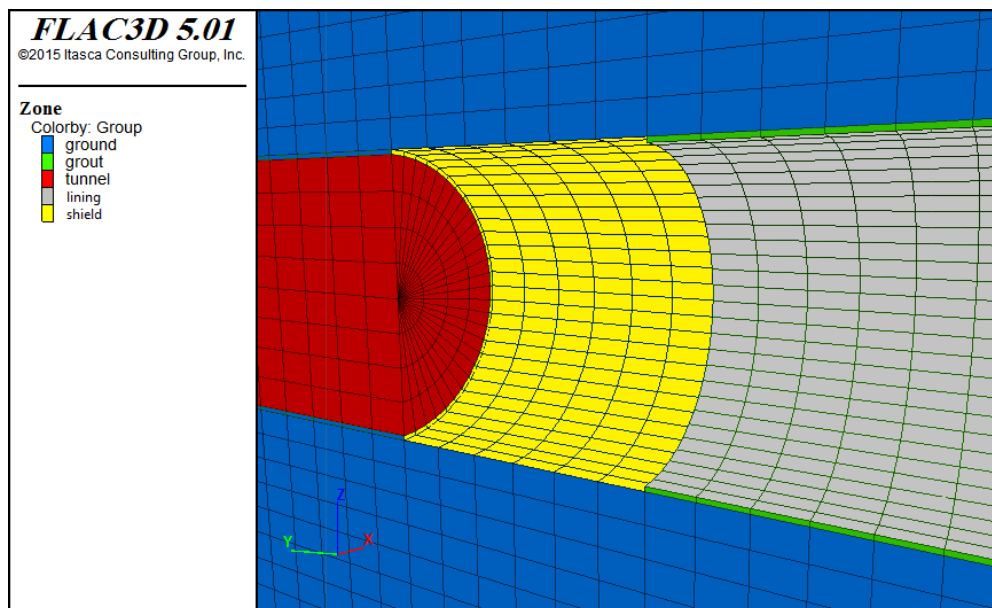
نوع مصالح پر کننده	مدول الاستیسیته (Mpa)	دانسیته (Kg/m^3)	ضخامت (m)	نسبت پواسن
دوغاب	۲۰	۱۵۰۰	۰/۱۵	۰/۳

در شکل (۱۰-۵) و (۱۱-۵) نیز نمایی از مدل عددی ساخته شده از سپر ، لاینینگ و دوغاب

ارایه شده است.



شکل ۵-۱۰: نمایی از مدل عددی ساخته شده از سپر و لاینینگ



شکل ۵-۱۱: موقعیت دوغاب، لاینینگ و سپر نسبت به هم در مدل عددی ساخته شده

۵-۱۳ مدل سازی روند حفاری تونل

پس از این که مدل به تعادل اولیه رسید، جابجایی‌ها و سرعت‌های گره‌ای ایجاد شده در مدل صفر شده تا فقط تاثیر حفاری بر مدل بررسی شود. سپس نوبت به حفاری تونل می‌رسد. با توجه به این که طول قطعات بتنی ۱/۵ متر بوده است، بنابراین طول حفاری در هر مرحله نیز به همین مقدار انتخاب شد. یعنی اندازه هر مرحله حفاری برابر ۱/۵ متر است. در ابتدای عملیات، ۶ مرحله حفاری انجام گرفته است (۹ متر معادل طول سپر). سپس با ادامه پیشروی به اندازه یک گام حفاری، سپر در ابتدای مدل حذف شده، در آن ناحیه ابتدا فشار تزریق اعمال شده، خواص دوغاب به المان دوغاب آن ناحیه اعمال می‌شود سپس پوشش بتنی نصب می‌شود. این مراحل تا پایان حفاری ادامه پیدا می‌کند.

در زیر خلاصه‌ای از روند حفاری آورده شده است.

۱- حفاری به اندازه یک گام (یک رینگ، ۱.۵ متر)

۲- اعمال فشار جبهه کار

۳- نصب سپر در ناحیه حفر شده

- ۴- حذف کردن قسمت انتهایی سپر به اندازه یک گام حفاری
- ۵- اعمال فشار تزریق در قسمتی که سپر در آن ناحیه حذف شده است
- ۶- حل کردن مدل تا به تعادل رسیدن
- ۷- حذف کردن فشار تزریق
- ۸- ساخت دوغاب و اعمال خواص دوغاب به المان دوغاب
- ۹- نصب پوشش بتنی
- ۱۰- اجرای مدل تا ایجاد تعادل

۵-۱۴ جمع‌بندی

در این فصل به صورت مختصر ابتدا به روش‌های عددی اشاره شد سپس به بررسی نوع روش عددی و نرم‌افزار استفاده شده برای این پژوهش پرداخته شد. در ادامه مراحل مدل ساخته شده از جمله هندسه سازی، انتخاب مدل‌های رفتاری، تعیین شرایط اولیه و مرزی حاکم منطقه به مدل، به تعادل رساندن مدل و ... بررسی شد. همچنین علاوه بر این، مقادیر مشخصات مختلف به کار رفته در مدل ساخته شده در جداول مختلفی آورده شده است. در آخر خلاصه‌ای از روند حفاری انجام شده آورده شده است.

۶ فصل ششم: بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین

۱-۶ مقدمه

از آن جا که در حفاری یک تونل به روش مکانیزه مجموعه‌ای از فرآیندها مانند حفاری، اعمال فشار جبهه کار، نصب سیستم نگهداری و ... اتفاق می‌افتد و بسیاری از این فرآیندها به طور مستقیم و غیرمستقیم بر هم اثر می‌گذارند، روش‌های عددی به دلیل این که توانایی در نظر گرفتن تعداد زیادی از این عوامل را دارند می‌توانند به شرایط واقعی زمین و اجرای پروژه نزدیک شده و تاثیر عوامل گوناگون را نسبت به هم بررسی کنند.

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی عددی انتخاب مدل رفتاری است. همانگونه که چگونگی رفتار سازه تونل در شرایط مختلف پیچیدگی‌هایی دارد، رفتار زمین نیز در شرایط مختلف متفاوت خواهد بود. در این فصل به بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری خاک بر میزان نشست سطح زمین در حفاری مکانیزه پرداخته شده است.

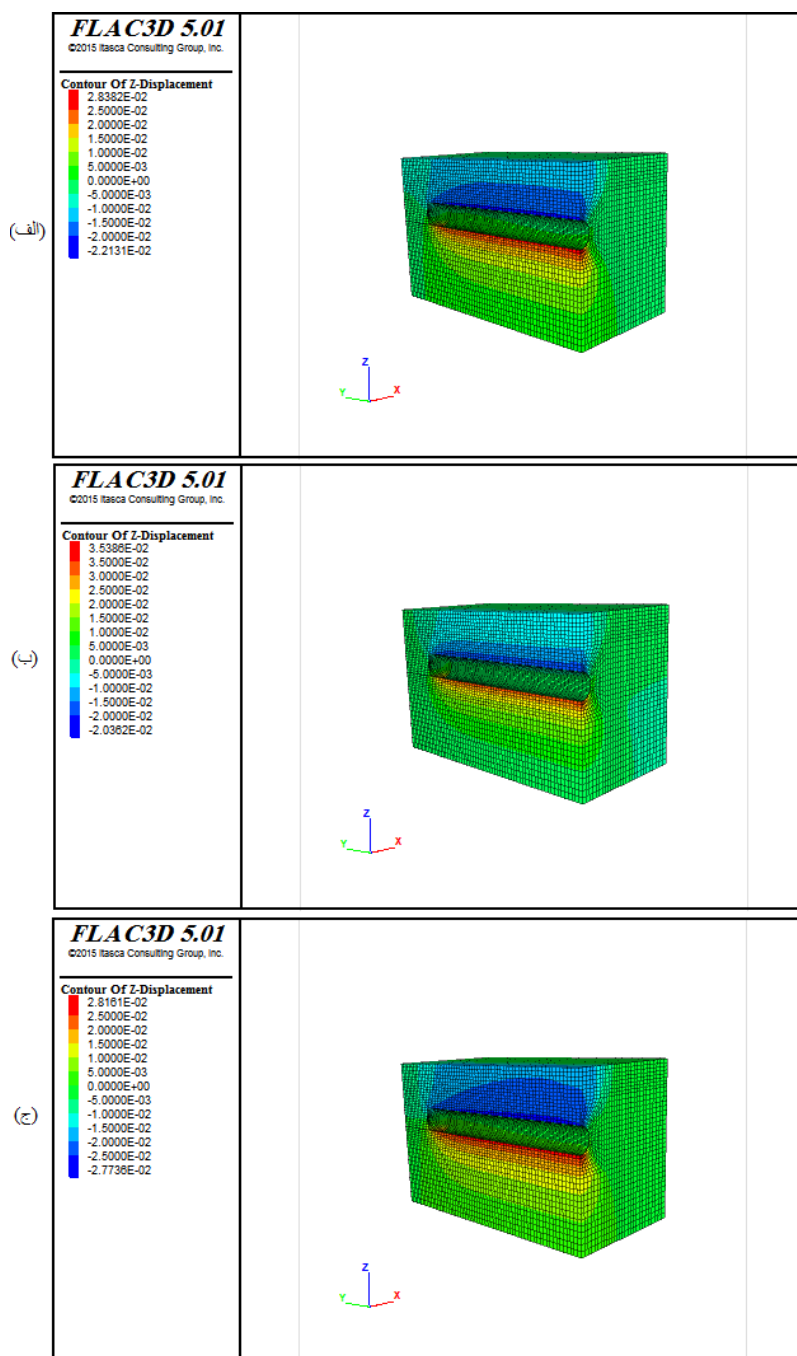
در این بخش با اعمال مدل‌های رفتاری مورد نظر به مدل عددی و حفاری به اندازه ۷۹٫۵ متر، شرایط مدل بررسی شده است. هم‌چنین پایش میزان نشست طولی در امتداد محور تونل و میزان نشست عرضی در فاصله ۵۰ متری از طول مدل انجام شده است.

۲-۶ تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف بر میزان نشست سطح زمین

برای بررسی میزان نشست سطح زمین از مدل‌سازی عددی استفاده شد. با اعمال سه مدل رفتاری موهر-کولمب، الاستیک و کرنش سخت‌شونده به مدل عددی و انجام حفاری، میزان نشست طولی سطح زمین در امتداد محور تونل و نشست عرضی سطح زمین اندازه‌گیری شد.

در ادامه، نتایج حاصل از اعمال مدل‌های رفتاری مورد نظر در قالب شکل (۱-۶) کانتور جابجایی قائم، شکل (۲-۶) کانتور تنش قائم، شکل (۳-۶) گسترش ناحیه پلاستیک، شکل (۴-۶) میزان نشست عرضی در راستای عمود بر محور تونل و شکل (۵-۶) میزان نشست طولی در امتداد

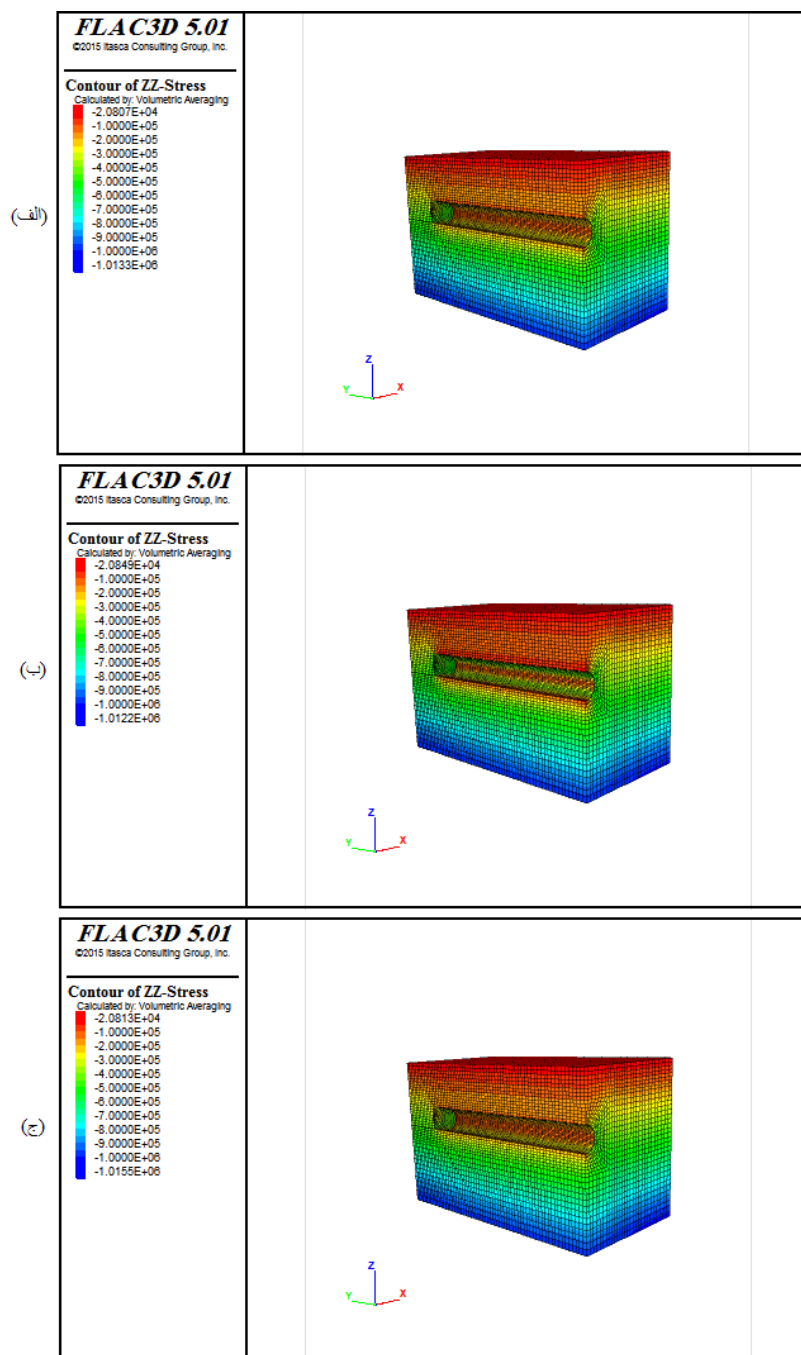
محور تونل با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۶-۱: جابجایی قائم در مدل عددی (الف) موهر-کولمب - (ب) الاستیک - (ج) خاک سخت‌شونده

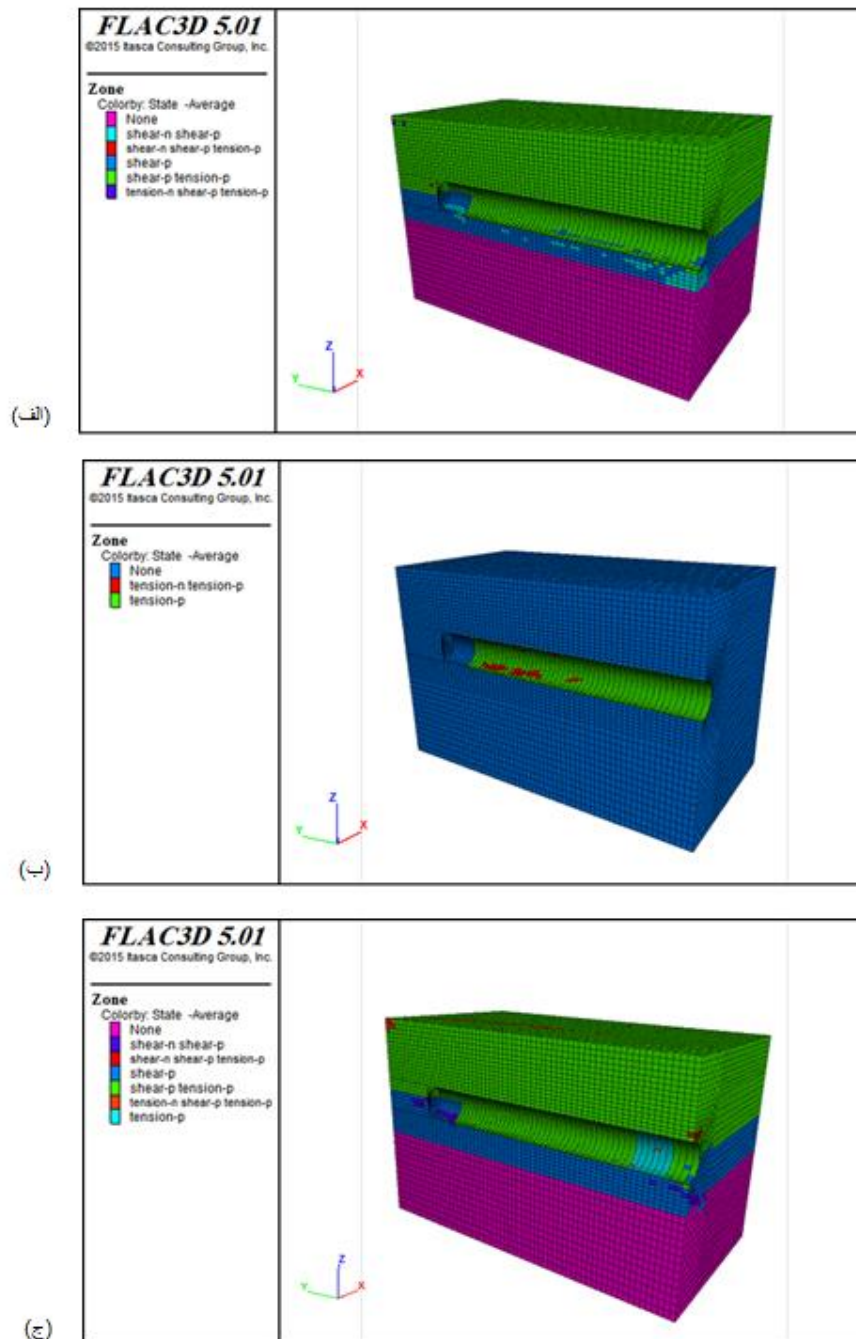
از مقایسه کانتورهای جابجایی قائم مدل‌های عددی ساخته شده می‌توان نتیجه گرفت بیش‌ترین جابجایی قائم در سطح زمین مربوط به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده بوده و بعد از آن به

ترتیب مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و الاستیک سبب بروز جابجایی قایم سطحی بیش‌تری در مدل‌ها شده‌اند. هم‌چنین بیشترین میزان جابجایی در اطراف تونل بوده و با فاصله گرفتن از آن جابجایی کم می‌شود.



شکل ۶-۲: تنش قایم در مدل عددی (الف) موهر-کولمب- (ب) الاستیک - (ج) خاک سخت‌شونده

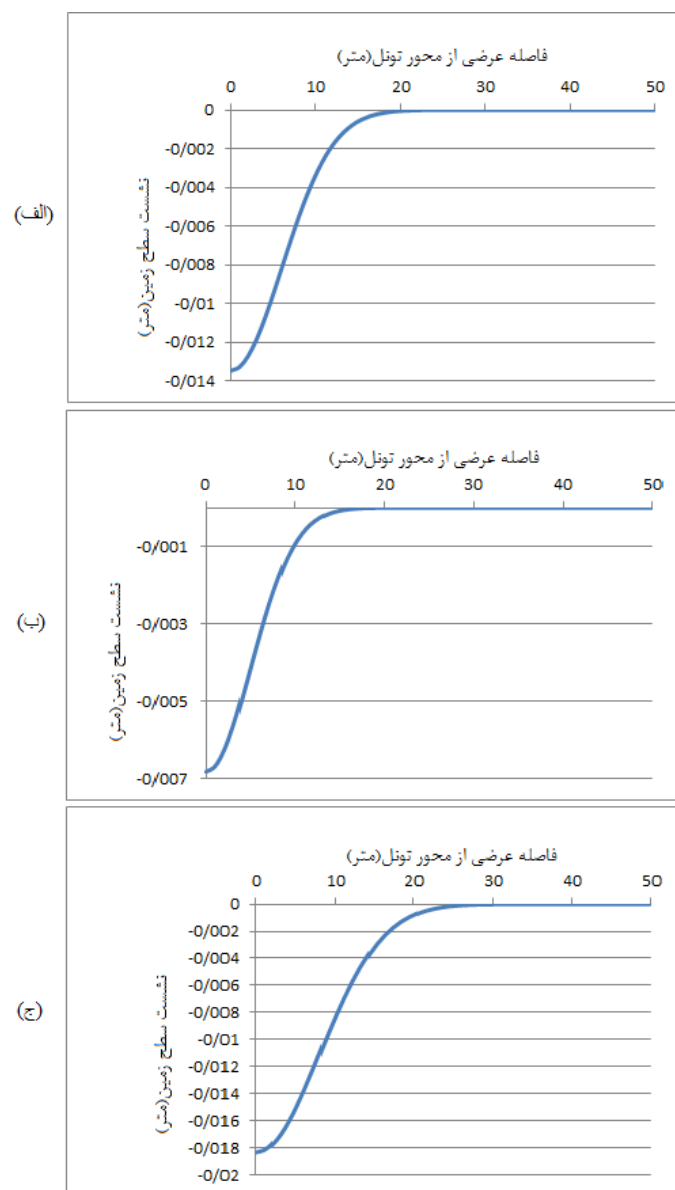
از مقایسه کانتورهای تنش می‌توان گفت الگوی تنش قایم بعد از حفاری در هر سه مدل شبیه به هم بوده و در اطراف تونل به هم ریختگی میدان تنش دیده می‌شود.



شکل ۳-۶: گسترش ناحیه پلاستیک در مدل عددی (الف) موهر-کولمب - (ب) الاستیک - (ج) خاک سخت‌شونده

از مقایسه قسمت‌های مختلف شکل (۳-۶) می‌توان گفت بیش‌ترین گسترش ناحیه پلاستیک

مربوط به مدل رفتاری کرنش سخت‌شونده و پس از آن موهر-کولمب و در نهایت الاستیک است.



شکل ۴-۶: نمودار نشست عرضی (الف) موهر - کولمب - (ب) الاستیک - (ج) خاک سخت‌شونده

جدول ۱-۶: بیشینه نشست عرضی در فاصله ۵۰ متری از ابتدای تونل به تفکیک مدل رفتاری

مدل رفتاری	موهر - کولمب	الاستیک	خاک سخت شونده
بیشینه نشست عرضی (متر)	-0.01348	-0.00682	-0.01833

جدول ۲-۶: فاصله ای که مقدار نشست عرضی در آن تقریباً به صفر می‌رسد به تفکیک مدل رفتاری

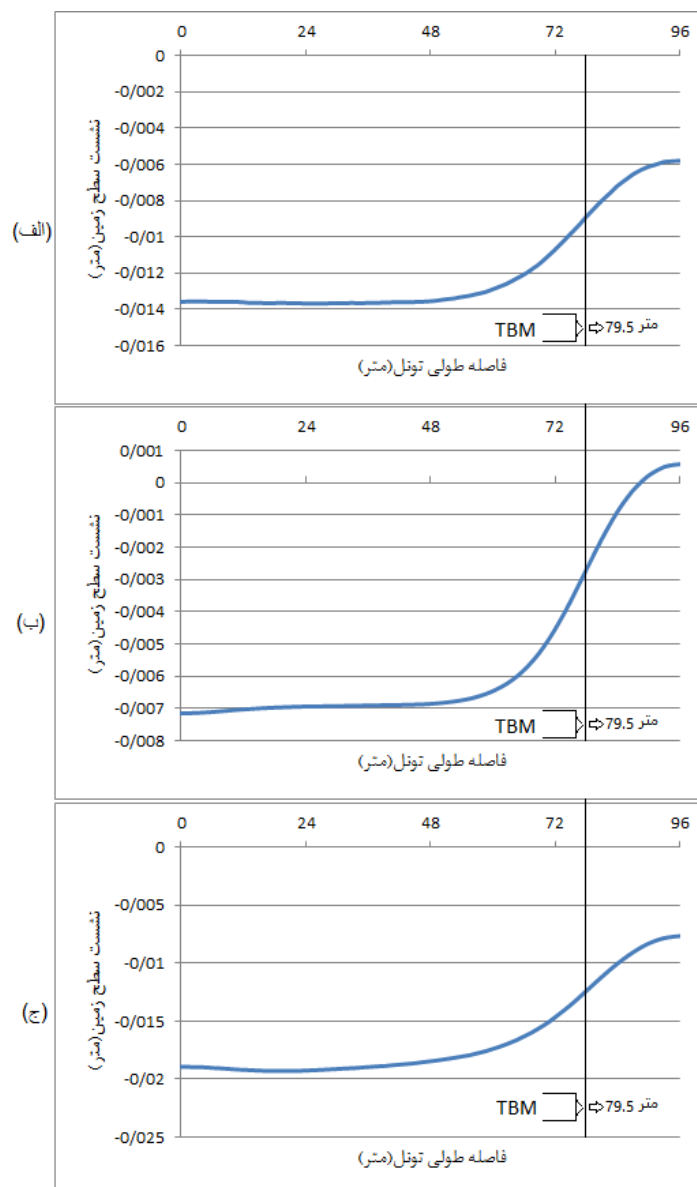
رفتاری

مدل رفتاری	موهر - کولمب	الاستیک	خاک سخت شونده
فاصله عرضی از محور تونل (متر)	19.39	15.31	26.53
مقدار نشست (متر)	-7.28e-5	-6.3e-5	-7.5e-5

قسمت‌های مختلف شکل (۴-۶)، جدول (۱-۶) و (۲-۶) نشان دهنده این هستند که بیش‌ترین نشست عرضی سطح زمین در ابتدا مربوط به مدلی است که مدل رفتاری آن کرنش سخت شونده بوده سپس، موهر - کولمب و در نهایت کم‌ترین میزان نشست سطح زمین مربوط به مدل رفتاری الاستیک است. همچنین گسترش جابجایی‌ها به ترتیب در مدل کرنش سخت شونده، موهر - کولمب و الاستیک بیش‌تر بوده است یا به عبارتی نرخ جابجایی‌ها با سرعت بیش‌تر و در فاصله کم‌تری زوال می‌یابد. همچنین در مورد فاصله محلی که در آن میزان نشست عرضی تقریباً صفر شده است می‌توان گفت، به دلیل گسترش بیش‌تر کانتور جابجایی‌ها به ترتیب در مدل‌های کرنش سخت شونده، موهر - کولمب و الاستیک انتظار می‌رود که فاصله محلی که نشست عرضی در آن تقریباً صفر شده است نیز به همین ترتیب باشد که از جدول (۲-۶) این نتیجه به دست آمده است.

آن‌جا که مدل رفتاری الاستیک تغییر شکل‌ها را تنها در محدوده الاستیک در نظر می‌گیرد و

اجازه بروز آن‌ها را در محدوده پلاستیک نمی‌دهد، نشست کم‌تری برآورد کرده است. مدل رفتاری موهر-کولمب نیز به دلیل ثابت در نظر گرفتن مدول الاستیک، در تمایز قایل شدن رفتار پس از تسلیم ناکارآمد شده که باعث ناتوانی این مدل در تحلیل‌های بلند مدت می‌شود. مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به دلیل در نظر گرفتن رفتار سخت‌شوندگی، رفتار واقعی‌تر و کامل‌تری از خاک را ارائه می‌دهد، به همین دلیل میزان نشست برآورد شده با این مدل رفتاری با میزان واقعی نشست هم‌خوانی بیشتری نسبت به دو مدل رفتاری دیگر دارد.



شکل ۵-۶: نمودار نشست طولی (الف) موهر-کولمب - (ب) الاستیک - (ج) خاک سخت‌شونده

شکل (۵-۶) نشان دهنده این است که میزان نشست طولی در امتداد محور تونل (مانند نشست عرضی) با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری مختلف، متفاوت است و این تفاوت به این صورت است که بیش‌ترین میزان نشست طولی مربوط به مدل رفتاری کرنش سخت شونده است سپس به ترتیب مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و الاستیک دارای بیش‌ترین میزان نشست طولی هستند. اما در هر سه مدل، میزان نشست در جلوی سپر کم‌تر از پشت آن بوده و به طور کلی با دور شدن سپر از یک ناحیه میزان نشست افزایش پیدا کرده و در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد.

جدول ۳-۶: نسبت نشست در جبهه کار به بیشینه نشست در ۵۰ متری تونل به تفکیک مدل

رفتاری

مدل رفتاری	موهر-کولمب	الاستیک	خاک سخت‌شونده
بیشینه نشست در ۵۰ متری تونل (متر)	-0.01348	-0.00682	-0.01833
نشست در محل جبهه کار (متر)	-0.00844	-0.00221	-0.01178
نسبت نشست در محل جبهه کار به بیشینه نشست طولی (درصد)	62.61	32.41	64.27

هم‌چنین در جدول (۳-۶) میزان بیشینه نشست در فاصله ۵۰ متری از تونل و نشست در محل جبهه کار اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که قابل ملاحظه است، مقدار بیشینه نشست در محل جبهه کار مربوط به مدل رفتاری خاک سخت شونده و کم‌ترین مقدار نیز مربوط به مدل رفتاری الاستیک بوده است. هم‌چنین نسبت این دو مقدار یعنی نسبت بیشینه نشست در ۵۰ متری از تونل به اندازه نشست در جبهه کار، برای مدل سخت‌شونده بیش‌ترین مقدار و برای مدل الاستیک کم‌ترین مقدار بوده است.

بر اساس گزارش ابزار دقیق، میزان واقعی بیشینه نشست در مقطع مورد نظر 0.0178 متر

بوده است. [53]

جدول ۴-۶: میزان خطا بیشینه نشست طولی محاسبه شده به روش عددی به تفکیک مدل رفتاری

مدل رفتاری	موهر-کولمب	الاستیک	خاک سخت‌شونده
بیشینه نشست طولی حاصل از مدل عددی (متر)	-0.01367	-0.00715	-0.01929
بیشینه نشست طولی حاصل از ابزار دقیق (متر)	-0.0178		
خطا (درصد)	23.20	59.83	8.37

با توجه به جدول (۴-۶) کم‌ترین میزان خطا مربوط به مدل خاک سخت‌شونده است. نکته قابل توجه این است که با وجود این که نتایج مدل رفتاری سخت‌شونده بیش‌ترین هم‌خوانی را با نتایج ابزار دقیق دارد، این مدل میزان نشست را بیش‌تر از نتایج ابزار دقیق برآورد کرده که اعتماد به آن محافظه کارانه‌تر است. این در حالی است که دو مدل رفتاری دیگر میزان نشست را کم‌تر از مدل خاک سخت‌شونده برآورد کرده‌اند.

۳-۶ تحلیل پارامتریک

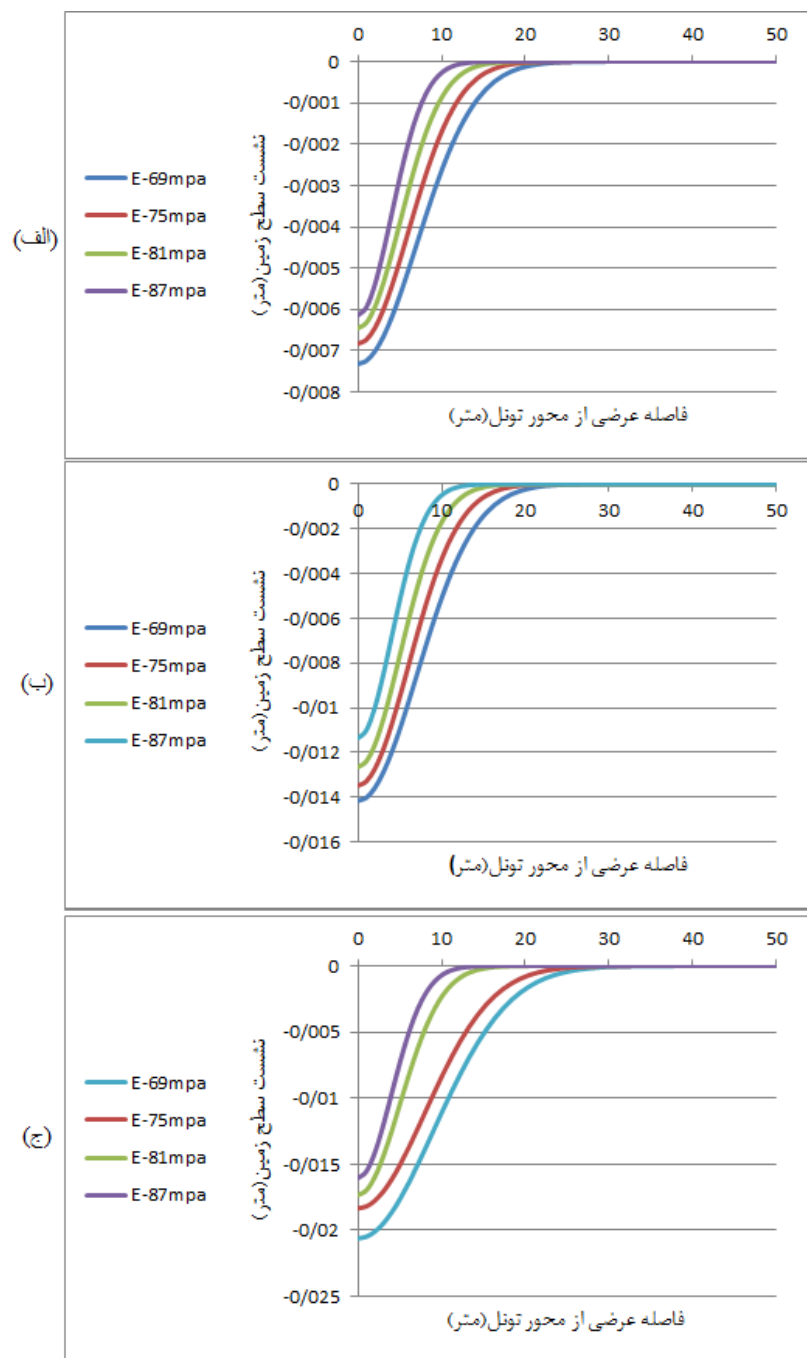
در این قسمت با تغییر یک پارامتر و ثابت بودن دیگر پارامترها، به بررسی چگونگی تاثیر پارامترهای رفتاری اصلی که در مدل‌های رفتاری به کار رفته وجود دارند، پرداخته شده است. در این میان، پارامترهای مدول تغییرشکل‌پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک برای بررسی انتخاب شده‌اند.

۱-۳-۶ تاثیر مدول تغییرشکل پذیری خاک در مدل های رفتاری بر میزان

نشست سطح زمین

تاثیر تغییرات مدول تغییرشکل پذیری بر میزان نشست سطح زمین در هر یک از مدل های رفتاری به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن در شکل (۶-۶) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارایه شده در شکل (۶-۶)، بطور کلی می توان این گونه نتیجه گیری کرد که با افزایش مدول تغییرشکل پذیری، میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا می کند.

به طور کلی می توان گفت افزایش مدول تغییرشکل پذیری سبب کاهش میزان نشست شده است. چرا که با افزایش آن مقدار نیرو (فشار) لازم برای تغییرشکل (یا همان جابجایی که در این جا منظور نشست است) افزایش پیدا می کند. یا به عبارتی با افزایش مدول تغییرشکل پذیری، محیط در برابر تغییرشکل مقاوم تر می شود.

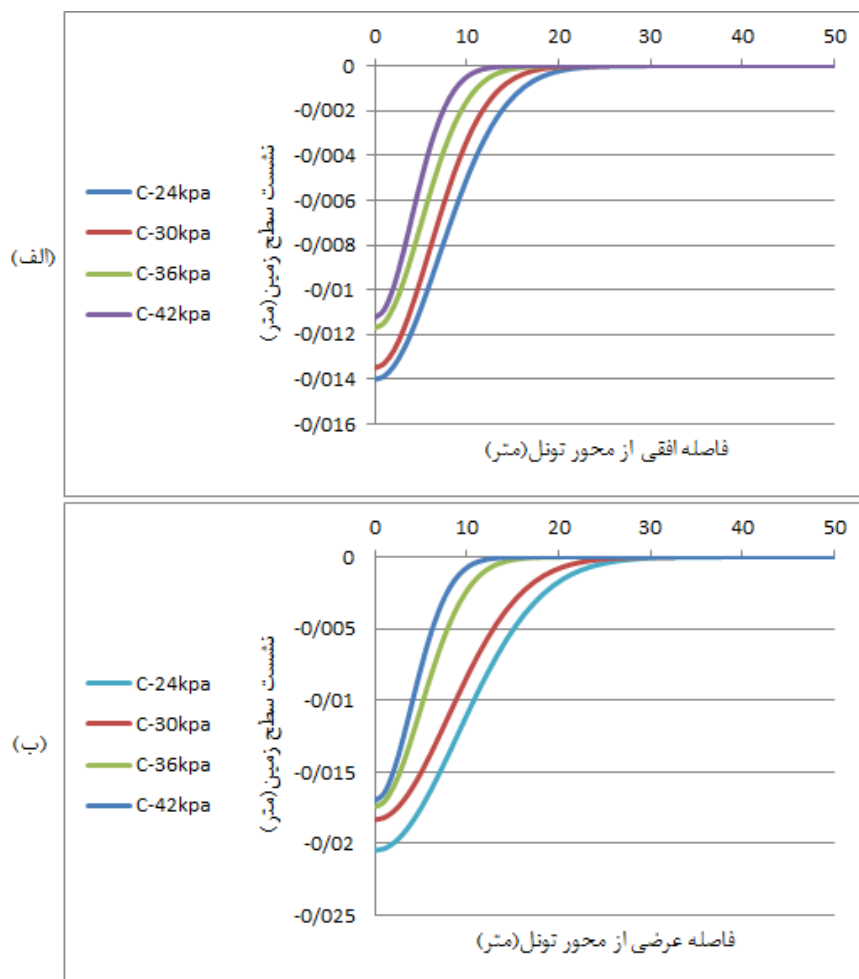


شکل ۶-۶: تاثیر مدول تغییر شکل پذیری بر میزان نشست سطح زمین در مدل های رفتاری مختلف (الف) الاستیک - (ب) موهر-کولمب - (ج) کرنش سخت شونده

۲-۳-۶ تاثیر چسبندگی خاک در مدل‌های رفتاری بر میزان نشست سطح

زمین

تاثیر تغییرات چسبندگی خاک بر میزان نشست سطح زمین در هر یک از مدل‌های رفتاری به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن در شکل (۷-۶) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارایه شده در شکل (۷-۶)، بطور کلی می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که با افزایش چسبندگی، میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند.

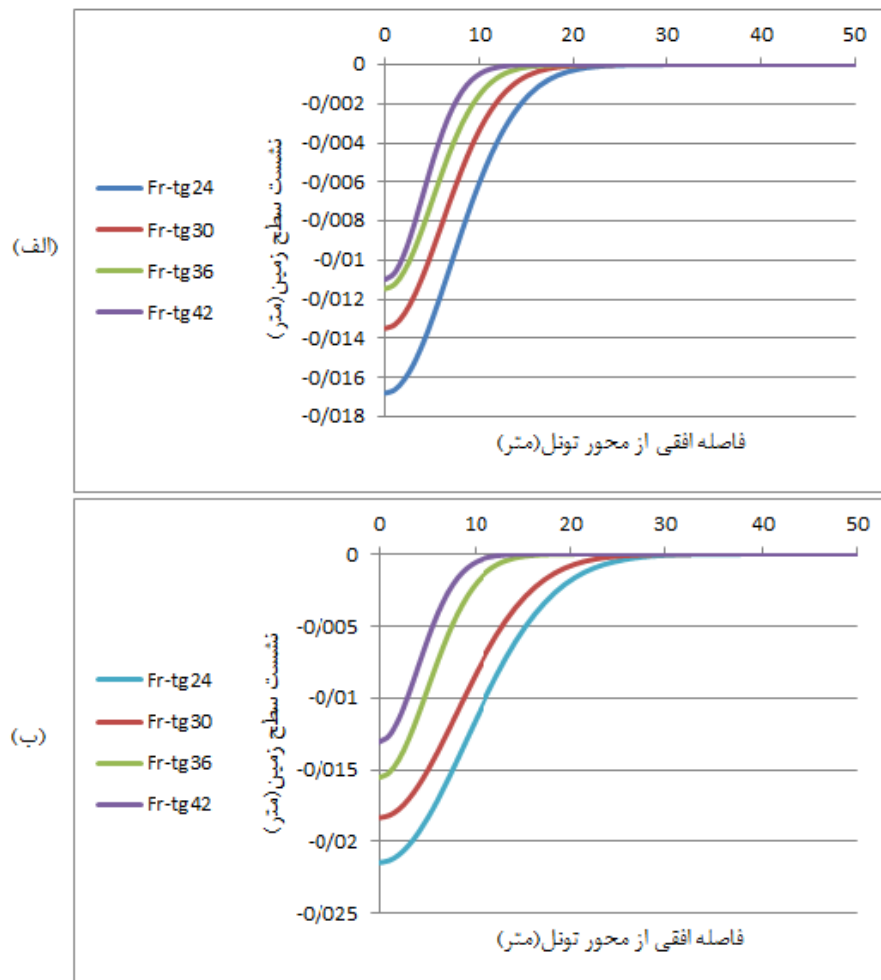


شکل ۷-۶: تاثیر چسبندگی خاک بر میزان نشست سطح زمین در مدل‌های رفتاری مختلف
(الف) موهر-کولمب - (ب) کرنش سخت‌شونده

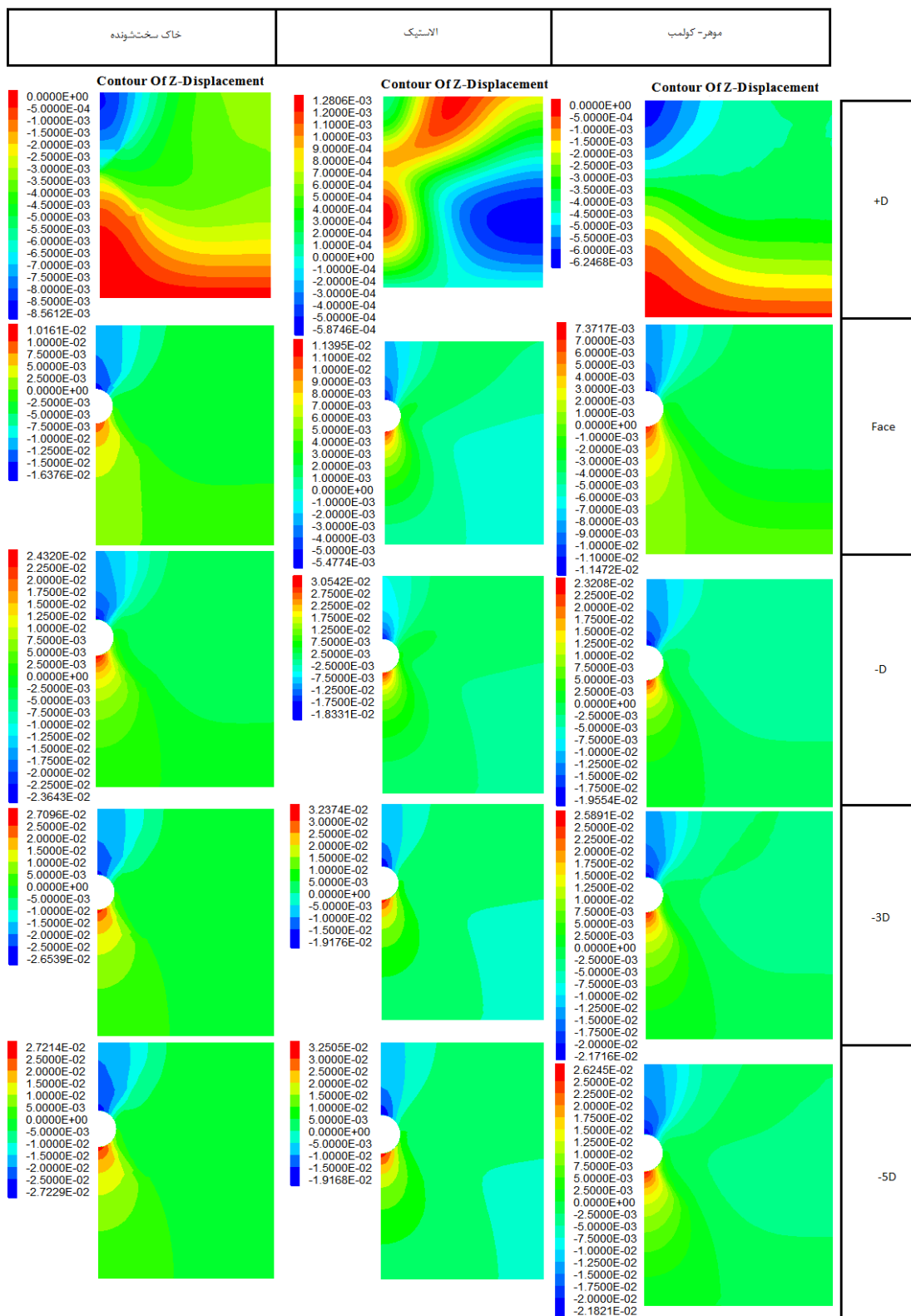
۳-۳-۶ تاثیر زاویه اصطکاک خاک در مدل‌های رفتاری بر میزان نشست

سطح زمین

تاثیر تغییرات زاویه اصطکاک خاک بر میزان نشست سطح زمین در هر یک از مدل‌های رفتاری به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن در شکل (۸-۶) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارایه شده در شکل (۸-۶)، بطور کلی می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که با افزایش زاویه اصطکاک، میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۸-۶: تاثیر زاویه اصطکاک خاک بر میزان نشست سطح زمین در مدل‌های رفتاری مختلف
(الف) موهر-کولمب - (ب) کرنش سخت‌شونده



شکل ۶-۹: مقایسه کانتور جابجایی‌های قائم در فاصله‌های مشخص از جبهه کار به تفکیک مدل رفتاری

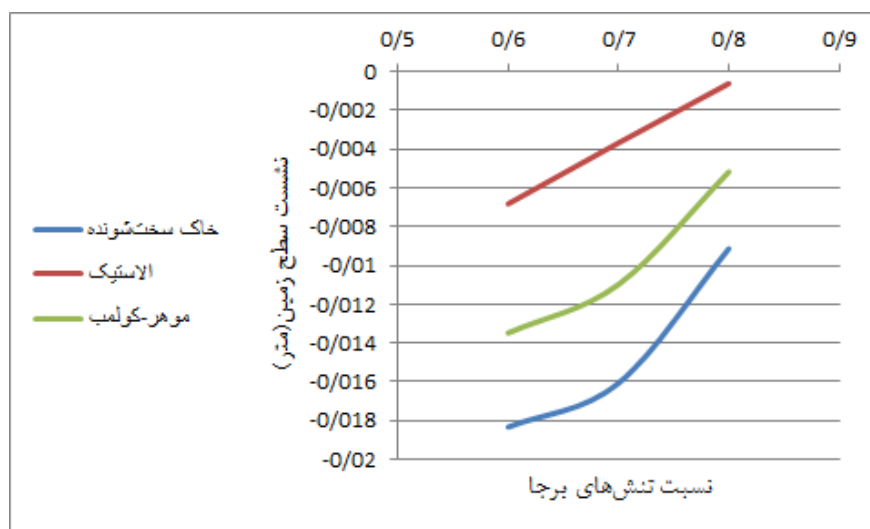
برای بررسی نقش مدل‌های رفتاری بر الگوی جابجایی اطراف تونل، کانتور جابجایی قائم برای هر سه مدل رفتاری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای این منظور هنگامی که جبهه کار در مترائ 79.5 متری تونل قرار دارد در فاصله‌های مشخصی از جبهه کار که ضرایبی از قطر تونل هستند، کانتورهای جابجایی قائم ثبت شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۶-۹) نشان داده شده است، می‌توان گفت به‌طور کلی بیش‌ترین جابجایی قائم پیش‌بینی شده مربوط به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده بوده است. این در حالی است که دو مدل رفتاری دیگر میزان نشست کم‌تری را نسبت به این مدل برآورد کرده‌اند. همچنین می‌توان گفت گسترش جابجایی‌ها به ترتیب برای مدل خاک سخت‌شونده، موهر-کولمب و الاستیک تا شعاع بیش‌تری از محور تونل ادامه پیدا کرده است که به عبارت دیگر می‌توان گفت، نرخ جابجایی‌ها به ترتیب برای مدل‌های الاستیک، موهر-کولمب و خاک سخت‌شونده در فاصله کم‌تر و با سرعت بیش‌تر از بین می‌رود. همچنین با دور شدن از موقعیت جبهه کار به سمت ابتدای تونل میزان جابجایی قائم برای هر سه مدل افزایش پیدا کرده است.

مدل الاستیک در مقایسه با مدل‌های موهر-کولمب و خاک سخت‌شونده بالازدگی بیش‌تری در تمام مراحل حفر در کف تونل نشان داده است. می‌توان گفت در مدل الاستیک از آن‌جا که تغییر شکل‌ها تنها در ناحیه الاستیک رخ داده و در ناحیه پلاستیک بروز نمی‌کنند و مدول صلبیت نیز ثابت است، میزان جابجایی کم‌تری را از خود نشان می‌دهد. اما به دلیل در نظر نگرفتن پارامترهایی مانند مدول باربرداری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ثابت بودن مدول الاستیک میزان بالازدگی بیش‌تری را نشان می‌دهد. این در حالی است که در مدل خاک سخت‌شونده به دلیل این‌که مدول صلبیت ثابت نبوده و پارامترهای بیش‌تری در مدل اثرگذار هستند، نتایج با واقعیت هم‌خوانی بیش‌تری دارد.

۴-۳-۶ تاثیر نسبت تنش‌های برجا بر میزان نشست سطح زمین در

مدل‌های رفتاری

تاثیر نسبت تنش‌های برجا (افقی به قائم) بر میزان بیشینه نشست سطح زمین در هر یک از مدل‌های رفتاری به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن در شکل (۶-۱۰) و جدول (۶-۵) نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت با افزایش نسبت تنش‌های برجا، میزان نشست سطح زمین کاهش یافته است. به طور کلی می‌توان گفت افزایش نسبت تنش‌های برجا سبب نگه داشتن توده خاک شده و از ریزش آن‌ها در اثر وزن خود جلوگیری می‌کند. در این میان، تغییرات نشست در اثر افزایش نسبت تنش‌های برجا در مدل الاستیک، تقریباً خطی و در دو مدل دیگر غیر خطی بوده است. همچنین مدل رفتاری خاک سخت‌شونده بیش‌ترین کاهش نشست و الاستیک کم‌ترین کاهش نشست را با افزایش نسبت تنش‌های برجا داشته است.



شکل ۶-۱۰: تاثیر نسبت تنش‌های برجا بر میزان نشست سطح زمین

جدول ۵-۶: تاثیر نسبت تنش‌های برجا بر میزان نشست سطح زمین

مدل رفتاری	موهر-کولمب	الاستیک	خاک سخت‌شونده
میزان نشست در نسبت تنش 0.6 (متر)	-0.01348	-0.00683	-0.01833
میزان نشست در نسبت تنش 0.7 (متر)	-0.01099	-0.00369	-0.01607
میزان نشست در نسبت تنش 0.8 (متر)	-0.00518	-0.00063	-0.00914
تغییر نشست سطح زمین (متر)	-0.0083	-0.0062	-0.00919

۵-۳-۶ مقایسه تاثیر پارامترهای رفتاری و مقاومتی خاک و نسبت

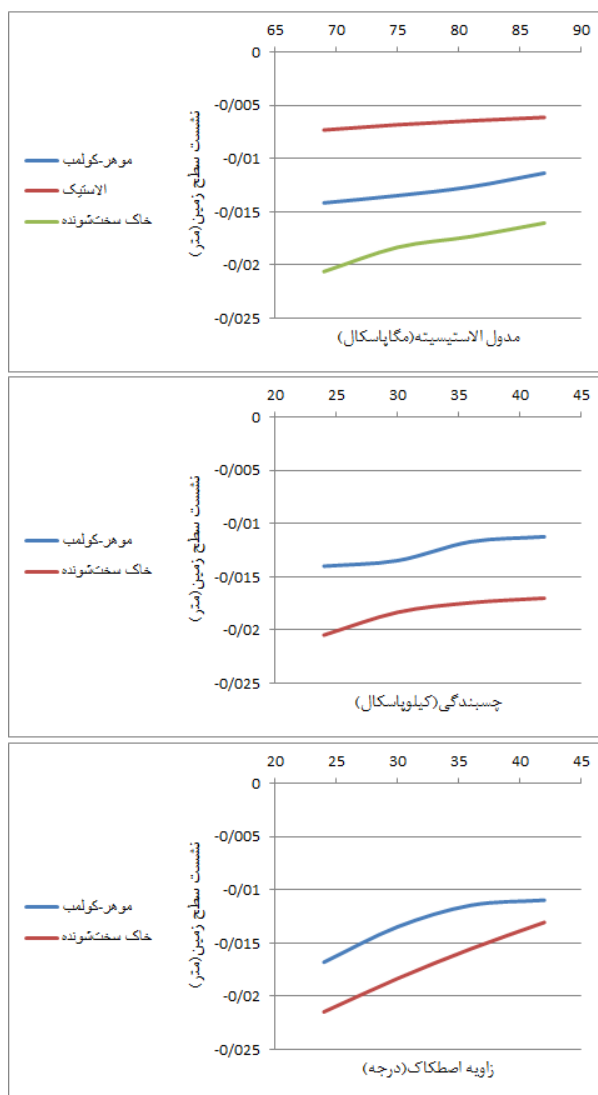
تنش‌های برجا بر اساس میزان تاثیر بر نشست سطح زمین

در این قسمت به مقایسه پارامترهای رفتاری و مقاومتی خاک و نسبت تنش‌های برجا بر اساس میزان تاثیر هر یک بر نشست سطح زمین پرداخته شده است. با تغییر مقادیر مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک و میزان تنش‌های برجا، میزان تغییر نشست سطح زمین برای هر کدام به طور جداگانه مشخص شده و بر اساس میزان تغییر نشست، کم‌ترین و بیش‌ترین تاثیر پارامترهای ذکر شده مشخص شده است.

مطابق شکل (۶-۱۰) و (۶-۱۱)، با افزایش مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک خاک و نسبت تنش‌های برجا میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا کرده است. در بررسی تاثیر مدول الاستیسیته، بیش‌ترین شیب برای مدل خاک سخت‌شونده و کم‌ترین شیب برای مدل الاستیک بوده است. در بررسی تاثیر چسبندگی و زاویه اصطکاک، شیب نمودار خاک سخت‌شونده بیش‌تر از موهر-کولمب بوده است. به عبارتی افزایش شیب نمودار به معنی تاثیر بیش‌تر پارامتر در کاهش نشست است.

میزان کاهش نشست با افزایش مقادیر مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک برای هر سه مدل رفتاری به صورت غیر خطی بوده است.

میزان کاهش نشست با افزایش مقادیر نسبت تنش‌های برجا برای دو مدل خاک سخت‌شونده و موهر-کولمب به صورت غیر خطی و با شیب بیش‌تر برای مدل خاک سخت‌شونده و برای مدل الاستیک به صورت تقریباً خطی بوده است.



شکل ۱۱-۶: مقایسه تغییرات بیشینه نشست سطح زمین با تغییر پارامترهای رفتاری و مقاومتی

از مقایسه جدول (۵-۶)، (۶-۶)، (۷-۶)، (۸-۶)، (۹-۶) و شکل (۱۰-۶) و (۱۱-۶) می‌توان

این گونه نتیجه گیری کرد که از بین پارامترهای رفتاری و مقاومتی بیشترین تاثیر به ترتیب مربوط به نسبت تنش های برجا، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته و در آخر چسبندگی بوده است.

جدول ۶-۶: بیشینه نشست عرضی با تغییر مدول الاستیسیته

مدل رفتاری	موهر-کولمب	الاستیک	خاک سخت شونده
نشست در مدول الاستیک 69mpa (متر)	-0.01416	-0.00731	-0.0206
نشست در مدول الاستیک 75mpa (متر)	-0.01348	-0.00683	-0.01833
نشست در مدول الاستیک 81mpa (متر)	-0.01264	-0.00645	-0.01732
نشست در مدول الاستیک 87mpa (متر)	-0.01136	-0.00614	-0.01604

جدول ۶-۷: بیشینه نشست عرضی با تغییر چسبندگی

مدل رفتاری	موهر-کولمب	خاک سخت شونده
نشست در چسبندگی 24kpa (متر)	-0.014	-0.02046
نشست در چسبندگی 30kpa (متر)	-0.01348	-0.01833
نشست در چسبندگی 36kpa (متر)	-0.0117	-0.01742
نشست در چسبندگی 42kpa (متر)	-0.01124	-0.017

جدول ۶-۸: بیشینه نشست عرضی با تغییر زاویه اصطکاک

مدل رفتاری	موهر-کولمب	خاک سخت شونده
نشست در زاویه اصطکاک 24 درجه (متر)	-0.01678	-0.02145
نشست در زاویه اصطکاک 30 درجه (متر)	-0.01348	-0.01833
نشست در زاویه اصطکاک 36 درجه (متر)	-0.01145	-0.01553
نشست در زاویه اصطکاک 42 درجه (متر)	-0.01097	-0.01306

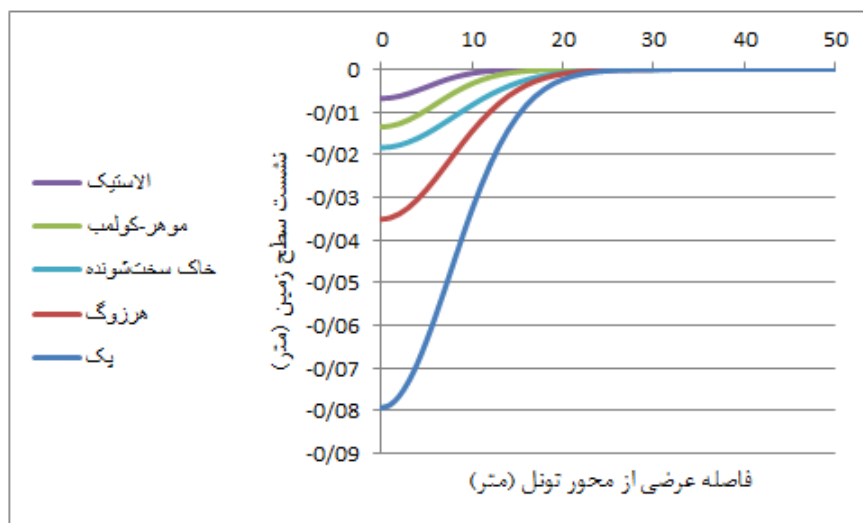
جدول ۶-۹: مقایسه بیشینه تغییر نشست با تغییر پارامترهای رفتاری و مقاومتی خاک

مدل رفتاری	موهر-کولمب	الاستیک	خاک سخت شونده
بیشینه تغییر نشست با تغییر مدول الاستیک (متر)	-0.0028	-0.00117	-0.00456
بیشینه تغییر نشست با تغییر چسبندگی (متر)	-0.00276	-----	-0.00346
بیشینه تغییر نشست با تغییر زاویه اصطکاک (متر)	-0.00581	-----	-0.00839
بیشینه تغییر نشست با تغییر نسبت تنش‌های برجا (متر)	-0.0083	-0.0062	-0.00919

۶-۴ مقایسه نتایج نشست عرضی حاصل از مدل سازی عددی و روابط تحلیلی

در این بخش به مقایسه میزان نشست عرضی حاصل از مدل سازی عددی با مدل های رفتاری مختلف و میزان نشست عرضی حاصل از روابط تحلیلی آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده که در شکل (۶-۱۲) و جدول (۶-۱۰) آورده شده‌اند، می‌توان گفت روش‌های تحلیلی مقدار نشست

بیش‌تری را نسبت به روش‌های عددی و مقدار واقعی نشست پیش‌بینی می‌کنند که این اختلاف در میزان برآورد می‌تواند به دلیل ساده‌سازی‌های انجام شده در روش‌های تحلیلی باشد. به طور کلی، روش‌های عددی به دلیل این‌که توانایی این را دارند که عوامل موثر بر نشست بیش‌تری را در نظر بگیرند و همچنین شرایط منطبق با واقعیت را به مدل ساخته شده اعمال کنند، نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به روش‌های تحلیلی ارائه می‌دهند.



شکل ۶-۱۲: مقایسه نشست حاصل از مدل عددی و روابط تحلیلی

جدول ۶-۱۰: مقادیر نشست حاصل از مدل عددی و روابط تحلیلی

روش	پک	هرزوگ	خاک سخت‌شونده	موهر-کولمب	الاستیک
بیشینه نشست (متر)	-0.079	-0.035	-0.01833	-0.01348	-0.00682

۵-۶ جمع بندی

در این فصل به بررسی تاثیر مدل های رفتاری موهر- کولمب، الاستیک و کرنش سخت شونده بر میزان نشست زمین پرداخته شد. کانتورهای جابجایی و تنش قائم و میزان نشست طولی و عرضی برای هر یک از مدل های رفتاری با یکدیگر مقایسه شدند. با مقایسه نتایج به دست آمده، تاثیر مدل های رفتاری بر میزان نشست سطح زمین به وضوح دیده می شود. به طور کلی، ساده ترین مدل از بین مدل های رفتاری استفاده شده (مدل الاستیک) به دلیل این که پارامترهای کمی از خاک را برای بررسی رفتار جابجایی خاک دخالت می دهد، میزان نشست کمتری را نسبت به دو مدل دیگر برآورد می کند. مدل رفتاری خاک سخت شونده، به دلیل این که پارامترهای بیشتری از خاک را در مقایسه با دو مدل رفتاری دیگر برای بررسی رفتار خاک دخالت می دهد، میزان نشست بیشتری را ارائه می دهد که این مقدار با میزان نشست اندازه گیری شده توسط ابزار نشست سنجی، بیشترین همخوانی را در مقایسه با دو مدل دیگر دارد.

در ادامه با تحلیل پارامترهای مختلف مدل های رفتاری به بررسی تاثیر آنها بر میزان نشست سطح زمین پرداخته شد. نتایج گویای این موضوع هستند که افزایش پارامترهای مدول الاستیک، چسبندگی، زاویه اصطکاک خاک و نسبت تنش های برجا، سبب کاهش میزان نشست سطحی زمین می شوند.

بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین تاثیرگذاری در تغییر نشست سطح زمین به ترتیب مربوط به پارامترهای نسبت تنش های برجا، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته و چسبندگی بوده است.

نتایج نشان دهنده این هستند که روش های عددی در مقایسه با روش های تحلیلی نتایج قابل قبولتری را از برآورد نشست ارائه می دهند. بنابراین، استفاده از مدل های عددی در مقایسه با روش های تحلیلی در بررسی های دقیق ترجیح داده می شود. البته نقش روابط تحلیلی در برآوردهای

اولیه را به دلیل سرعت و ساده بودن روابط نمی توان نادیده گرفت.

۷ فصل هفتم: نتایج و پیشنهادها

۷-۱ نتایج

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان دهنده این هستند که در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری مختلف در مدل‌سازی عددی حفاری مکانیزه تونل، سبب بروز نشست‌های سطحی مختلف می‌شوند. بنابراین به منظور برآورد صحیح اولیه از میزان نشست سطحی، انتخاب مدل رفتاری مناسب امری ضروری است.

همان‌گونه که نتایج نشان داده‌اند، مدل رفتاری الاستیک در مقایسه با سایر مدل‌ها نشست کم‌تری را نشان می‌دهد. دلیل این رفتار را می‌توان این‌گونه توضیح داد که مدل رفتاری الاستیک به دلیل این که تغییرشکلی در محدوده الاستیک داشته و اجازه بروز تغییرشکل در محدوده پلاستیک را نمی‌دهد، در نتیجه میزان نشست کم‌تری نسبت به دو مدل رفتاری دیگر پیش‌بینی می‌کند.

مدل رفتاری موهر-کولمب صلبیت را در مدل‌سازی ثابت در نظر می‌گیرد، این موضوع باعث ناتوانی این مدل در تمایز قایل شدن برای رفتار پس از سطح تسلیم می‌شود که همین امر باعث ناکارآمدی این مدل در تحلیل طراحی‌های بلند مدت که نیازمند بررسی رفتار بعد از شکست است، می‌شود. به عبارتی، در این مدل بحث سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی مطرح نبوده و بعد از رسیدن به مقدار تنش تسلیم، مقدار تنش با افزایش کرنش‌های پلاستیک ثابت مانده که این موضوع با رفتار واقعی اکثر مصالح خاکی مغایر است. هم‌چنین به دلیل تغییر مدول صلبیت در عمق‌های مختلف، مدل موهر-کولمب نتیجه‌ای دور از واقعیت را به دلیل ثابت در نظر گرفتن صلبیت در عمق‌های مختلف ارائه می‌دهد. در این زمینه پیشنهاد می‌شود در صورت استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب و آگاهی از تغییر مدول تغییرشکل‌پذیری در عمق، مقدار مدول الاستیک به صورت دستی برای عمق‌های مختلف اعمال شود.

نتایج حاصل از مدل رفتاری خاک سخت شونده بیش‌ترین هم‌خوانی را با نتایج ابزار دقیق داشته است. بنابراین این مدل رفتاری الگوی بهتری از رفتار خاک منطقه مورد مطالعه را ارائه می‌دهد

و استفاده از آن توصیه می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت تنش‌های برجا، مدول الاستیک، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک، میزان نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند. به عبارتی بین نشست و این پارامترها رابطه عکس برقرار است.

بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل پارامتریک، بیش‌ترین تاثیر در کاهش نشست سطح زمین به ترتیب مربوط به نسبت تنش‌های برجا، زاویه اصطکاک، مدول الاستیک و چسبندگی بوده است.

نتایج نشان دهنده این هستند که روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های تحلیلی نتایج قابل قبول‌تری را از برآورد نشست ارایه می‌دهند. بنابراین، استفاده از مدل‌های عددی در مقایسه با روش‌های تحلیلی در بررسی‌های دقیق ترجیح داده می‌شود. البته نقش روابط تحلیلی در برآوردهای اولیه را به دلیل سرعت و ساده بودن روابط نمی‌توان نادیده گرفت.

۲-۷ پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود موضوع مورد نظر همزمان به وسیله نرم‌افزارهایی که از روش المان محدود برای حل مسایل ژئوتکنیکی استفاده می‌کنند نیز، بررسی شود.

از آن‌جا که در این پژوهش به دلیل کمبود اطلاعات ابزار دقیق امکان بررسی موضوع مورد نظر برای مقاطع مختلف زمین‌شناسی وجود نداشته است، بنابراین پیشنهاد می‌شود موضوع مورد نظر در مقاطع مختلفی مورد بررسی قرار گیرد.

به دلیل این‌که امکان دسترسی به نمونه‌های میدانی برای انجام آزمایش با هدف به دست آوردن پارامترهای مدل‌های رفتاری دیگر وجود نداشته است، پیشنهاد می‌شود برای یک پروژه در حال اجرا که دسترسی به نمونه‌های میدانی وجود دارد، موضوع مورد نظر با دامنه وسیع‌تری از مدل‌های رفتاری بررسی شود.

منابع

- [1] J. Litwinski, 1956, Application of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies. Arch. Mech. Stosow, Vol. 8, pp. 396-411.
- [2] M.P. O'Reilly, B.M New. Settlement above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction, Proceedings of tunneling Symposium, 1982: pp 173-18.
- [3] Sagaseta C, Moya JF, Oteo C. Estimation of ground subsidence over urban tunnels. In: Proc. 2nd conference on ground movement and structure, Cardiff, 1982. pp 331 – 44.
- [4] Oteo C, Moya, JF. Estimation of the soil parameters of Madrid in relation to the tunnel construction. Proc. 7th Euro conf. on soil mechanics and foundation engineering, vol. 3, Brighton, 1979. pp 239 - 47.
- [5] R.B. Peck, 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. Proc. 7th Int. conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225 – 290.
- [6] B.M New, MP. O'Reilly. Tunneling induced ground movements, predicting their magnitude and effects. Proc 4th conf on ground movements and structure, Cardiff, 1991.
- [7] R.J. Mair, R.N. Taylor. 1997. "Bored tunneling in the urban environment", proceeding of the 14th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Hamburg, pp. 2353 – 2385.
- [8] P.B Attewell, J.P. Woodman. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil. Ground Engineering, Vol. 15. No 8, 1982. pp. 13 – 22, 36.
- [9] P.B Attewell. Ground movements caused by tunnelling in soil, Cardiff J.D. Geddes (Ed.), 1st Conf on Large Ground Movements and Structures, Pentech Press, London, 1977.
- [10] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss.

Géotechnique, 1987

[11] M. Migliazza, M. Chiorboli and G.P. Giani. , "Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground", Journal of Computers and Geotechnics. No 36, 2009 113 – 124.

[12] Verruijt A, Booker JR. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. Géotechnique, 1996.

[13] F. Pinto, A.J Whittle, 2011, "Ground Movements due to shallow tunnels in soft ground. I: Analytical solutions, "ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2011.

[14] K.H Park. 2005, "Analytical solution for tunnelling-induced Ground Movements in clays". Tunnelling and underground Space Technology. Vol. 20., pp. 249 – 261.

[15] Y. Hejazi, D. Dias, R. Kastner. "Impact of Constitutive models on the numerical analysis of underground constructions". Acta Geotechnica Journal, 3. 251-258. 2008.

[16] رسول فرج‌نیا "مقایسه مدل‌های رفتاری موهر کومب و خاک سخت‌شونده جهت تخمین نشست سطح زمین و پایداری فضا‌های زیرزمینی کم عمق". اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها. ۱۳۸۸.

[17] Ngoc-Anh. Do, Danial Dias, Pierpaolo. Oreste and Irini. Djeran-Maigre. "3D Modelling for Mechanized Tunnelling in Soft Ground-Influence of the Constitutive Model", American Journal of Applied sciences 10.8 (2013): 863 – 875.

[18] A. Lambrughi, L. Medina Rodriguez, R. Castellanza. "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB Mechanized excavations". Computers and Geotechnics

40. 97-113. 2012.

[19] K.N Vakili, A.A Lavasan, T. schanz. "The Influence of the soil constitutive model on the numerical assessment of mechanized tunneling". In proceeding of 8th European conference on numerical methods in Geotechnical Engineering.

[20] شهربانو صیادی ، مرتضی جوادى اصطهباناتی ، مصطفى شریف زاده ، کورش شهريار "انتخاب مدل رفتاری مناسب برای مدلسازی نشست ناشی از حفر تونل در محیط شهری با استفاده از نتایج رفتارسنجی". دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران. ۱۳۹۴.

[21] حسین بهنام طلب، احسان عسگريلو ، سيد نويد قائمی "بررسی اثر مدل های رفتاری مختلف در پیش بینی تغییرشکلهای سطح زمین ناشی از حفر تونل" سومین کنفرانس منطقه ای و دوازدهمین کنفرانس تونل ایران. ۱۳۹۶.

[22] فرزاد کامکار، مهدی حسینی "بررسی کارایی مدل‌های رفتاری متداول خاک در پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل در خاک‌های درشت دانه به روش اجزا محدود" نشریه مهندسی منابع معدنی. ۱۳۹۷.

[23] Brinkgreve, R.B.J. "Selection of soil Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application, engineering application". JA, Yamamuro and VN, Kaliakin editors. ACSE Geotech. Spec. Publ, 2005, PP 69- 98

[24] T. Tatsuoka, Inelastic deformation characteristics of geomaterial, soil stress-strain behavior, measurement, modeling and analysis geotechnical symposium, roma. 2006.

[25] H. Kempfert, Excavation and foundation in soft soils, springer. 2006.

[26] سيد اميرالدین صدرنژاد، "نظریه خمیری خاک و الگوسازی"، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. ۱۳۹۴.

[27] H. Van Langen, P.A. Vermeer, Automatic step size correction for nonassociated plasticity problems. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990. V 29, pp 579- 598.

[28] R.F Obzurd. 'The hardening soil model- a practical guidebook'. Technical report Z_soil. PC 100701, Zace services LtD, Lausanne, August 2010.

[29] M.J Duncan, C.Y Chang, Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Journal of

the soil mechanics and foundations division ASCE, 1963. pp 1629- 1653.

[30] J.H Atkinson, G Sallfors. Experimental determination of soil properties, In 10th Eur Conference on soil mechanics, Florence 1998. No 3, pp 915-956.

[31] J.A. Santos, A.G. Correia. Reference threshold shear strain of soil: Its application to obtain a unique strain dependent shear modulus curve for soil, In 15th International Conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Turkey 2001. V1, pp 267-270.

[32] شرکت مهندسين مشاور ساحل. "گزارش زمين شناسی و ژيوتكنيك مسير" ۱۳۹۱.

[33] شرکت مهندسين مشاور ساحل. "گزارش مطالعات ژيوتكنيك مقدماتی" ۱۳۸۹.

[34] Hoek, Evert, Terzaghi Lecture. ASCE Journal of Geotechnical and Environmental engineering. Vol. 121. No 9. Sept 2001. Pages 126 – 142.

[35] X.F Borghi. Phd Thesis "soil conditioning for pipe-Jacking and tunneling" university of Cambridge. Pp 22-23. 2006. 246 – 265.

[36] مهدی حاصلی "گزارش کارآموزی کارشناسی" دانشگاه سراسری ارومیه. ۱۳۹۵.

[37] Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu "Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control". 2007, Publishing Taylor & Francis e-library 89 – 100

[38] ITA AITES, WG Mechanized Tunnelling, Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs), 2000.

[39] D.N Toan, Master thesis "TBM and Lining Essestial Interfaces" Politecnico di torino. 2006.

[40] TBM design considerations for projects, utilization of underground space in urban areas, Sham EI-Shikh, Egypt-November 6-7, 2006.

[41] موسسه حرا "گزارش تجهيز تخصصی کارگاه و مونتاژ دستگاه حفاری TBM-EPB پروژه خط A

مترو قم". ۱۳۹۲.

[42] Y Takano " State of the Art on Shield Tunneling in Japan- Automation of Shield Tunneling" Chiyoda engineering consultants Co, LTD, Tokyo, Japan, pp 1-6.

[43] R.C.W Eves & D.J Curtis, Tunnel lining design and procurement. Proc, INST. Civ. Eng Channel tunnel Part 1.

[44] شرکت مهندسين مشاور ساحل "گزارش طراحی هندسی سگمنت خط A قطار شهری قم".

۱۳۹۱.

[45] E. Eberhardt, D. Stead, J.S Coggan "Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes – the 1991 Randa rockslide". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41. Issue 1, January 2004, Pages 69-87

[46] Duddeck, Heinz, and J. Erdmann. "Structural design models for tunnels in soft soil". Underground Space, United States 9, (1985).

[47] Itasca, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimension, Version 5.00- 261 User's manual, Itasca consulting Group, Inc. Minneapolis, MN, (1993-2002).

[48] L. Jing "A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering". International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, Vol. 40. pp 283 – 353

[49] سيد محمدعلی فاتحي "تحليل پايداری و طراحی سيستم نگهداری اوليه تونل‌های دوقلو مترو اصفهان - حدفاصل ايستگاه آزادی - شریعتی در مقطع آبرفتی". نشریه انجمن تونل ایران، شماره ۵، صفحه ۳۴ - ۲۹.

[50] رضا حیدری شیبانی، شکراله زارع "بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونل سازی مکانیزه در زمین نرم- مطالعه موردی: تونل قطعه شرقی- غربی خط ۷ مترو تهران".

فصل نامه علمی پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۶۷-۵۷.

[51] شرکت مهندسی مشاور ساحل "گزارش بررسی فشار جبهه کار خط A قطار شهری قم". ۱۳۹۱.

[52] A. Bezuijen, and A. M. Talmon. "Grout properties and their influence on back fill grouting". Proceedings of the 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. 2013.

[53] شرکت مهندسی مشاور ساحل "گزارش نشست سنجی خط A قطار شهری قم". ۱۳۹۱.

Abstract

In recent years, because of population increase in urban areas and problems like ground structures density and optimal use of it, traffic, air pollution and ... the use of underground spaces has turned in to a solution to this problems. Meanwhile, the use of metro tunnels has been widespread to improve urban transportation. Today, due to remarkable development of technology in tunneling and their advantages, the use of all types of mechanized tunneling machines specially EPB is increased. Ground settlement is one of the most important challenges of tunnel excavation that because of ground structures in urban areas, weak ground and shallowness of structure is very important. Therefore, it is essential to estimate the ground settlement and it is examined by many scholars. In this research numerical modeling by finite difference method is used and tried to be as much as possible similar to actual tunnel construction. One of the most basic stages of numerical analysis in geotechnical projects is choosing the appropriate constitutive model. This issue is considered as the subject of this research. In this research, comparison of the value of ground settlement and monitoring results is done by considering elastic, mohr-coulomb and strain hardening soil models, then the best constitutive model for describing the ground settlement behavior in metro Qom line-A is presented. The results of numerical analysis show that the most Estimated settlement is related to hardening soil model and the less is related to elastic model. The most matching with monitoring results has been related to hardening soil model. the results show that the use of advanced constitutive models that apply multiple factors to estimating settlement, improves the results to an acceptable level. The results of parametric analysis showed that by increasing in values of elastic modulus, cohesion, friction and insitu stresses ratio, the value of ground settlement decreases. Also, the most effect on settlement value has been related to insitu stresses ratio, friction, elastic modulus and cohesion, respectively.

Key words: mechanized tunneling, numerical modeling, ground settlement, metro Qom, constitutive models.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces

Numerical Investigating the effect of constitutive models on ground settlement in mechanized tunneling _ case study: metro Qom-line A

By: Mahdi Haseli

Supervisor:

Dr. Shokrollah Zare

July 2019