

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی ژئوتکنیک - راه و نقشه برداری

بررسی تأثیر حفر تونل بر روی رفتار پی‌های سطحی

مستوره دادار

استاد راهنما :

دکتر سید مهدی حسینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهر ۹۴

## دانشگاه صنعتی شاهرود

### دانشکده مهندسی عمران

#### گروه مهندسی ژئوتکنیک - راه و نقشه برداری

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مستوره دادار به شماره دانشجویی: ۹۱۰۲۸۷۴

تحت عنوان: بررسی تأثیر حفر تونل بر روی رفتار پی‌های سطحی

در تاریخ ۹۴/۴/۱۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		دکتر سید مهدی حسینی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر مهدی عجمی		دکتر رضا نادری
			دکتر امیر بذرافشان مقدم
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

## تعهد نامه

اینجانب مستوره دادار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " بررسی تأثیر حفر تونل بر روی رفتار پی‌های سطحی" تحت راهنمایی دکتر سید مهدی حسینی متعهد می شوم.

- 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 می باشد 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 می گردد.
- 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: ۹۴/۴/۱۵

امضای دانشجو:

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نم، باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده

از ابتدای شکل‌گیری شهرهای بزرگ، همواره مسأله‌ی حمل و نقل و جابه‌جایی شهروندان در سطح شهر از دغدغه‌های اصلی مدیران شهری بوده است. از طرفی محدودیت ظرفیت ترافیکی خیابان‌ها، برنامه‌ریزی‌های شهری را به سمت استفاده از فضای موجود در زیر سطح شهرها سوق داده است. این در حالی است که تنها زمانی می‌توان گفت که استفاده از وسایل حمل و نقل زیرزمینی مانند مترو، راه حل مناسبی برای حل مشکل ترافیک و آلودگی هوای شهرهای بزرگ است که از جنبه‌ی ایمنی نیز بتوان به آن اطمینان کرد. مهمترین بخش در مورد ایمنی این قبیل وسایل، مسأله‌ی ایمنی تونل‌ها است. اطمینان از عدم ریزش تونل در حین و بعد از اجرا و همچنین عدم ایجاد تغییر شکل‌های نامناسب در سازه‌های سطحی، از جمله‌ی اهداف اصلی طراحان تونل‌ها به حساب می‌آیند. از این رو شناخت و بررسی رفتارهای متقابل تونل، خاک و سازه‌ی سطحی، اهمیت زیادی دارد و باید مورد بررسی قرار گیرد.

از این رو، در پژوهش حاضر به مطالعه این رفتارها و شناسایی تعدادی از پارامترهای تأثیرگذار در آنها پرداخته‌ایم. هدف این پژوهش بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی‌های نواری است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا تحقیق‌های انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران در این زمینه را بررسی کرده‌ایم. اکثر این مطالعات با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی و با استفاده از نرم افزارهای اجزا محدود انجام شده‌اند. در موارد معدودی نیز، صحت سنجی مدل عددی به روش مقایسه نتایج مدل با نتایج ابزارنگاری تونل حفاری شده‌ی واقعی انجام گرفته است. از آنجایی که مطالعات گذشته صرفاً به بررسی نشست پی‌های گسترده و یا نواری با تنها یک نوار پرداخته و مقایسه‌ای بین مدل‌های رفتاری خاک انجام نداده‌اند، لذا در این پژوهش نشست پی‌های نواری شامل سه نوار، نشست نسبی بین نوارها و مقادیر و نرخ تغییرات این نشست‌ها در دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت شونده بررسی شده است. همچنین با توجه به نکات مثبت و منفی شیوه‌های متفاوت و امکانات موجود، روش شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS 2D ver. 8.5 را برای انجام این پژوهش انتخاب کرده‌ایم. با کمک مدل عددی ساخته شده، تغییرات ویژگی‌های متفاوتی مربوط به تونل، خاک اطراف تونل و پی، مورد بررسی قرار گرفتند. پژوهش حاضر شش پارامتر مهم "مدل رفتاری خاک، عمق قرارگیری تونل، قطر تونل، فاصله نوارها در پی نواری، عرض نوارها و بار وارد بر پی" را مورد بررسی قرار داده و تأثیر آن بر رفتار پی نواری و تونل را در دو خاک ماسه‌ای و رسی، بررسی و مقایسه نموده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که، افزایش عرض نوارها و فاصله بین آنها باعث افزایش نشست نسبی بین نوارهای پی می‌شود. همچنین افزایش عمق تونل، تنها تا عمق مشخصی بر روی مقادیر نشست تأثیر گذاشته و پس از آن نشست زیر پی به مقدار ثابتی می‌رسد.

کلمات کلیدی: تونل، پی نواری، نشست نسبی، PLAXIS 2D، مدل رفتاری خاک

## لیست مقالات مستخرج

(۱)

عنوان: مقایسه اثر حفر تونل در خاک ماسه‌ای بر نشست پی نواری در دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت شونده

عنوان لاتین: Evaluation of Tunnel Excavation in Sand, on the Footing's Settlement in  
Mohr-Coulomb & Hardening Soil Models

دومین همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری

کد: HN10103950141

نحوه ارائه: ارائه مجازی

## فهرست مطالب

۱	فصل اول مقدمه.....
۲	۱-۱ مقدمه .....
۲	۲-۱ زمینه ی تحقیق.....
۳	۳-۱ ضرورت و هدف انجام پژوهش .....
۳	۴-۱ فرض های پژوهش و شیوه ی تحقیق .....
۴	۵-۱ محدودیت ها.....
۵	۶-۱ ساختار پایان نامه .....
۶	۷-۱ خلاصه و جمع بندی.....
۷	فصل دوم روش های حفاری و کاربرد روش اجزا محدود در حفاری تونل.....
۸	۱-۲ مقدمه .....
۸	۲-۲ روش های حفاری تونل .....
۸	۱-۲-۲ حفرتونل به روش سنتی (آتشباری).....
۹	۲-۲-۲ حفرتونل به وسیله ماشین های بازویی.....
۹	۳-۲-۲ حفرتونل به کمک ماشین های تمام مقطع .....
۱۰	۴-۲-۲ حفرتونل به کمک کند و پوش .....
۱۱	۵-۲-۲ حفرتونل به روش نوین اتریشی .....
۱۲	۳-۲ مدل های رفتاری خاک .....
۱۳	۱-۳-۲ مدل های ارتجاعی - خمیری کامل.....
۱۵	۲-۳-۲ مدل های ارتجاعی - خمیری با قابلیت سخت شوندگی .....
۱۹	۳-۳-۲ مدل مور-کولمب (MC).....
۲۱	۴-۳-۲ مدل خاک سخت شونده (همسان) (HS).....
۲۲	۵-۳-۲ محدودیت ها .....
۲۵	فصل سوم بررسی اثر حفاری تونل بر نشست پی ها در تحقیقات گذشته .....
۲۶	۱-۳ مقدمه .....
۲۶	۲-۳ آزمایش های بزرگ مقیاس.....
۲۷	۳-۳ آزمایش های کوچک مقیاس.....

۲۷	۴-۳ شبیه سازی های عددی.....
۲۸	۵-۳ تحقیقات انجام شده در دانشگاه ایالت پنسیلوانیا، آمریکا.....
۳۳	۶-۳ بررسی عملکرد پی نواری روی خاک لایه بندی شده با حفره و بدون حفره.....
۳۴	۷-۳ بررسی عددی تأثیر عرض پی در تحلیل برهم کنش تونل- پی سطحی.....
۳۷	۸-۳ مطالعه تأثیر حفاری تونل های شهری بر سازه های سطحی.....
۳۹	۹-۳ بررسی تأثیر حفاری تونل های کم عمق شهری بر ظرفیت باربری پی های سطحی.....
۴۰	۱۰-۳ تحلیل و بررسی تأثیر حفاری تونل های شهری به روش NATM بر سازه های اطراف (مطالعه موردی تونل امداد مشهد).....
۴۲	۱۱-۳ بررسی اندرکنش خاک- سازه در اثر حفر تونل و باربرداری.....
۴۳	۱۲-۳ جمع بندی و خلاصه.....
۴۵	فصل چهارم مدل سازی عددی تونل.....
۴۶	۱-۴ مقدمه.....
۴۶	۲-۴ روش انجام کار.....
۴۷	۳-۴ خاک.....
۴۸	۴-۴ تونل.....
۴۹	۱-۴-۴ پوشش تونل.....
۵۰	۵-۴ پی.....
۵۰	۱-۵-۴ بارگذاری پی (فشار وارد بر پی).....
۵۰	۶-۴ روش عددی اجزا محدود.....
۵۲	۷-۴ نرم افزار Plaxis.....
۵۲	۸-۴ شبیه سازی مدل های عددی.....
۵۴	۱-۸-۴ ابعاد مدل عددی.....
۵۵	۲-۸-۴ شرایط مرزی مدل عددی.....
۵۶	۳-۸-۴ شبکه ی اجزا محدود.....
۵۷	۴-۸-۴ ایجاد تنش های اولیه.....
۵۸	۵-۸-۴ مدل سازی اجزا فصل مشترک.....
۵۹	۹-۴ بررسی دقت مدل عددی.....
۶۱	۱۰-۴ چگونگی بررسی اثر فشار وارد بر پی.....



۶۱	۱۱-۴ چگونگی بررسی اثر عمق تونل
۶۲	۱۲-۴ چگونگی بررسی اثر قطر تونل
۶۲	۱۳-۴ چگونگی بررسی اثر فاصله بین نوارهای پی
۶۳	۱۴-۴ چگونگی بررسی اثر عرض نوارهای پی
۶۳	۱۵-۴ خلاصه و جمع بندی
۶۵	فصل پنجم ارائه و بررسی نتایج پژوهش
۶۶	۱-۵ مقدمه
۶۶	۲-۵ بررسی اثر فشار وارد بر پی
۶۹	۳-۵ بررسی اثر عمق قرارگیری تونل
۷۱	۴-۵ بررسی اثر قطر تونل
۷۴	۵-۵ بررسی اثر فاصله نوارها از یکدیگر
۷۶	۶-۵ بررسی اثر عرض نوارهای پی
۷۹	۷-۵ خلاصه و جمع بندی
۸۱	فصل ششم نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها
۸۲	۱-۶ مقدمه
۸۲	۲-۶ نتیجه گیری
۸۳	۳-۶ پیشنهادهایی برای ادامه پژوهش ها در آینده
۸۴	۴-۶ خلاصه و جمع بندی
۸۶	مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲-۱- سطح تسلیم مدل‌های مور- کلمب و دراگر- پراگر..... ۱۶
- شکل ۲-۲-۲- سطح تسلیم مدل سخت شونده در فضای تنش‌های اصلی در خاک غیر چسبنده..... ۱۹
- شکل ۳-۲-۳- جابه‌جای سطح تسلیم در سخت شوندگی سینماتیک..... ۲۰
- شکل ۴-۲-۴- جابه‌جای سطح تسلیم در سخت شوندگی همسان..... ۲۰
- شکل ۵-۲-۵- نمودار تنش- کرنش در حالت سخت‌شوندگی سینماتیک..... ۲۱
- شکل ۶-۲-۶- نمودار تنش- کرنش در حالت سخت‌شوندگی همسان..... ۲۲
- شکل ۷-۲-۷- تعیین رابطه مدل مور- کولمب بر اساس روش ترسیمی..... ۲۳
- شکل ۸-۲-۸- سطح تسلیم مور- کولمب در فضای تنش‌های اصلی و صفحه اکتاهدرال..... ۲۴
- شکل ۱-۳-۱- تصویر شماتیک سیستم پی- خاک- حفره..... ۳۵
- شکل ۲-۳-۲- منحنی فشار- جابه‌جایی پی نواری سطحی در دو حالت عمود و موازی با حفره دایره‌ای پیوسته..... ۳۶
- شکل ۳-۳-۳- عمق بحرانی حفره پیوسته در زیر پی نواری..... ۳۷
- شکل ۴-۳-۴- تصویری شماتیک از نمونه آزمایشگاهی..... ۴۰
- شکل ۵-۳-۵- ابعاد مدل عددی..... ۴۱
- شکل ۶-۳-۶- نمودار نشست پی در مقابل فشار وارد بر پی..... ۴۲
- شکل ۷-۳-۷- منحنی گودی نشست در اثر حفر تونل..... ۴۳
- شکل ۸-۳-۸- هندسه، مش‌بندی و شرایط تکیه‌گاهی مدل عددی تونل امداد و سازه‌های اطراف..... ۴۷
- شکل ۹-۳-۹- مراحل اجرای تونل امداد به روش NATM..... ۴۷
- شکل ۱-۴-۱- نمایی از تونل شبیه‌سازی شده..... ۵۵
- شکل ۲-۴-۲- ابعاد مدل عددی..... ۶۱
- شکل ۳-۴-۳- شبکه‌بندی اجزا محدود پی نواری قرار گرفته روی تونل به قطر ۸ متر..... ۶۳
- شکل ۴-۴-۴- مثال‌هایی از سطوح غیر افقی و لایه‌بندی وزنی غیر افقی [۱۳]..... ۶۴
- شکل ۵-۴-۵- تغییرات منحنی گودی نشست با تراکم خاک..... ۶۸
- شکل ۱-۵-۱- الف) نشست در خاک ماسه‌ای، ب) نشست در خاک رسی، ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، د) نشست نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر افزایش بار..... ۷۵
- شکل ۲-۵-۲- الف) نشست در خاک ماسه‌ای، ب) نشست در خاک رسی، ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، د) نشست نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات عمق..... ۷۷
- شکل ۳-۵-۳- الف) نشست در خاک ماسه‌ای، ب) نشست در خاک رسی، ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، د) نشست نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات قطر تونل..... ۸۰
- شکل ۴-۵-۴- الف) نشست در خاک ماسه‌ای، ب) نشست در خاک رسی، ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، د) نشست نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات فاصله نوارها..... ۸۳
- شکل ۵-۵-۵- الف) نشست در خاک ماسه‌ای، ب) نشست در خاک رسی، ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، د) نشست نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات عرض نوارها..... ۸۶

## فهرست جدول‌ها

۴۴	جدول ۳-۱- مشخصات خاک ماسه‌ای با سه تراکم متفاوت [۶] .....
۵۴	جدول ۴-۱- مشخصات خاک‌های بکار رفته در شبیه‌سازی‌ها.....
۵۶	جدول ۴-۲- مشخصات مکانیکی پوشش تونل.....
۵۶	جدول ۴-۳- مشخصات مکانیکی پی.....
۶۰	جدول ۴-۴- میزان کاهش حجم برای انواع خاک و روش حفاری [۱۲] .....
۶۶	جدول ۴-۵- مشخصات هندسی و مکانیکی تونل [۶] .....
۶۷	جدول ۴-۶- مشخصات خاک ماسه‌ای با سه تراکم متفاوت [۶] .....

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

امروزه با گسترش شهرنشینی و سیر صعودی افزایش جمعیت شهرها، مشکلات و معضلات ترافیکی، بیش از هر زمان دیگری در جوامع شهری قابل مشاهده‌اند. در حال حاضر توسعه‌ی حمل و نقل عمومی جزء اولویت‌های اصلی بوده و بهترین گزینه برای حل مشکلات ترافیکی در شهرهای بزرگ به شمار می‌آید.

با توجه به نزدیک شدن ظرفیت ترافیکی شهرهای بزرگ به حد اشباع، وسایل حمل و نقل عمومی مانند مترو، که قابلیت عبور از زیر سطح خیابان‌ها را دارند، اهمیت دوچندانی پیدا کرده‌اند. بهره‌گیری از این تکنولوژی مستلزم حفر شبکه‌ای از تونل‌های زیرزمینی است. بنابراین بررسی رفتار متقابل این سازه‌های زیرزمینی (تونل‌ها) با سازه‌های سطحی و خاک از اهمیت زیادی برخوردار است، که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این فصل زمینه‌ی این تحقیق و ضرورت‌های آن با ذکر جزئیات مورد بررسی قرار می‌گیرد. شیوه‌ی انجام پژوهش، فرض‌ها و محدودیت‌های آن مشخص می‌شود. در نهایت در ارتباط با ساختار پایان‌نامه و بخش‌های متفاوت آن توضیح‌هایی ارائه می‌گردد.

## ۱-۲ زمینه‌ی تحقیق

از ابتدای شکل‌گیری شهرهای بزرگ، همواره مسأله‌ی حمل و نقل و جابه‌جایی شهروندان در سطح شهر از دغدغه‌های اصلی مدیران شهری بوده است. از طرفی محدودیت ظرفیت ترافیکی خیابان‌ها، برنامه‌ریزی‌های شهری را به سمت استفاده از فضای موجود در زیر سطح شهرها سوق داده است. مسأله‌ی بعدی چگونگی استفاده از این فضاها بدون وارد آمدن خسارت به سازه‌های سطحی و همچنین تأمین ایمنی آنها است. تونل‌های حفر شده به این منظور ممکن است در یکی از این شرایط باشند: از زیر ساختمان‌های از پیش ساخته عبور کنند، پس از مدتی ساختمانی بر روی آنها یا در

نزدیکی آنها ساخته شود و یا ساختمانی که قبلاً در آن محل بوده، تخریب شود. تعیین چگونگی رفتار متقابل تونل و سازه‌ی سطحی در هر کدام از موارد فوق نیاز به بررسی دقیق و جداگانه دارد. تحقیقات انجام شده برای مطالعه رفتار متقابل تونل و سازه‌های سطحی موجود به دو بخش شامل: بررسی رفتار تونل تحت بار ناشی از سازه سطحی و بررسی رفتار سازه سطحی (پی) در اثر حفر تونل، تقسیم می‌شوند.

### ۳-۱ ضرورت و هدف انجام پژوهش

تنها در زمانی می‌توان گفت که استفاده از وسایل حمل و نقل زیرزمینی مانند مترو، راه حل مناسبی برای حل مشکل ترافیک و آلودگی هوای شهرهای بزرگ است که از جنبه‌ی ایمنی نیز بتوان به آن اطمینان کرد. مهمترین بخش در مورد ایمنی این قبیل وسایل، مسأله‌ی ایمنی تونل‌ها است. اطمینان از عدم ریزش تونل در حین و بعد از اجرا و همچنین عدم ایجاد تغییر شکل‌های نامناسب در سازه‌های سطحی، از جمله‌ی اهداف اصلی طراحان تونل‌ها به حساب می‌آیند. از این رو شناخت و بررسی رفتارهای متقابل تونل، خاک و سازه‌ی سطحی، اهمیت زیادی دارد و باید مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش این رفتارها بررسی و تعدادی از پارامترهای تأثیرگذار در آنها شناسایی می‌شوند.

### ۴-۱ فرض‌های پژوهش و شیوه‌ی تحقیق

هدف این پژوهش بررسی اثر حفر تونل بر نشست‌های پی‌های نواری است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا تحقیق‌های انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران در این زمینه بررسی گردید. اکثر این مطالعات با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی و با استفاده از نرم افزارهای اجزا محدود انجام شده‌اند. در موارد معدودی نیز، صحت سنجی مدل عددی به روش مقایسه نتایج مدل با نتایج ابزارنگاری تونل حفاری شده‌ی واقعی انجام گرفته است. با توجه به نکات مثبت و منفی شیوه‌های متفاوت و امکانات موجود،

روش شبیه‌سازی عددی<sup>۱</sup> به کمک نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS 2D ver. 8.5 برای انجام این پژوهش انتخاب گردید. مدل عددی به صورت دو بعدی، با در نظر گرفتن شرایط کرنش مستوی و مدل‌های رفتاری ارتجاعی-خمیری<sup>۲</sup> مور-کلمب<sup>۳</sup> و خاک سخت‌شونده<sup>۴</sup> در خاک‌های دانه‌ای و چسبیده ساخته شده است. تونل شبیه‌سازی شده مشابه تونل‌های حفاری شده با دستگاه‌های TBM/EPB در نظر گرفته شده است. پوشش این تونل‌ها با استفاده از المان‌های مخصوص نرم افزار Plaxis شبیه‌سازی گردیده است.

با کمک مدل عددی ساخته شده، تغییرات ویژگی‌های متفاوتی مربوط به تونل، خاک اطراف تونل و پی، مورد بررسی قرار گرفتند. در پژوهش حاضر پنج پارامتر مهم "عمق قرارگیری تونل، قطر تونل، فاصله نوارها در پی نواری، عرض نوارها و بار وارد بر پی" در دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی و با دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت‌شونده مطالعه و نحوی تأثیر آن‌ها بر رفتار پی نواری مورد بررسی قرار گرفت.

## ۱-۵ محدودیت‌ها

در قسمت قبل فرضیه‌ها و روش انجام پژوهش به صورت مختصر بیان شد. این شیوه‌ی تحقیق دارای دو محدودیت اساسی ساخت مدل به صورت دو بعدی و در دسترس نبودن نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس برای کنترل نتایج حاصل از مدل است.

ساخته شدن مدل عددی به صورت دو بعدی و در نظر گرفتن شرایط کرنش مستوی در ساخت مدل، اولین محدودیت اساسی روش انجام پژوهش است. این کاستی باعث محدود شدن بررسی تغییر شکل-ها در دو جهت شده و تأثیر پیشرفت تونل در حین ساخت بر روی تغییر شکل‌ها و سایر پارامترها قابل بررسی نیست. همچنین صحت نتایج برای مقاطع قرار گرفته در پیچ‌ها با توجه به اینکه در آن مقاطع

---

<sup>1</sup> Numerical Simulation

<sup>2</sup> Elastic-Plastic

<sup>3</sup> Mohr-Coulomb

<sup>4</sup> Hardening Soil

نمی‌توان تونل را با طول زیاد در نظر گرفت با تردید همراه است. با این حال ساخت مدل عددی سه-بعدی پیچیدگی‌ها و دشواری‌های زیادی دارد. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت که استفاده از مدل‌سازی دوبعدی برای بررسی‌ها و برآوردهای اولیه و مدل‌سازی سه‌بعدی برای انجام تحلیل‌ها و طراحی‌های دقیق‌تر مناسب است.

انجام نشدن ابزارنگاری‌ها، کنترل‌ها و آزمایش‌های بزرگ مقیاس در اکثر پروژه‌ها و یا عدم امکان دسترسی به نتایج این قبیل آزمایش‌ها برای عموم (به دلیل مسائل مرتبط با حفاظت اطلاعات و قوانین سازمانی)، دومین محدودیت در انجام این پژوهش است. بنابراین تنها راه صحت‌سنجی مدل، کنترل آن با مدل‌سازی‌های انجام شده در تحقیقات گذشته است، که در فصل سوم به طور کامل شرح داده می‌شود.

## ۱-۶ ساختار پایان نامه

این پایان‌نامه دارای ۶ فصل است. در ادامه خلاصه‌ای از فصل‌های بعدی ارائه می‌گردد.

عنوان فصل دوم روش‌های حفاری و کاربرد روش اجزا محدود در حفاری تونل است. در این فصل انواع روش‌های حفاری تونل و همچنین مدل‌های رفتاری خاک، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است را، بررسی کرده‌ایم. فصل سوم به بررسی اثر حفاری تونل بر نشست پی‌ها در تحقیقات گذشته اختصاص داده شده است. در این فصل ابتدا روش شبیه‌سازی عددی مورد استفاده در این پژوهش و علت انتخاب آن، معرفی می‌گردد. در ادامه پژوهش‌های متفاوت انجام شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای بررسی رفتار خاک و پی در اثر حفر تونل، بررسی می‌گردد. همچنین مرور کوتاهی بر نتایج حاصل از این پژوهش‌ها انجام می‌شود.

فصل چهارم پایان‌نامه به بررسی شیوه‌ی انجام پژوهش می‌پردازد. در این فصل چگونگی مدل‌سازی خاک و تونل و برخی مشخصه‌های بررسی مانند مدل رفتاری خاک و پارامترهای تونل و پی مشخص می‌گردند، در ادامه مراحل شبیه‌سازی و دقت مدل عددی بررسی می‌گردد.



در فصل پنجم پایان نامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی ارائه می‌گردد. در ابتدای این فصل نتایج حاصل از بررسی تأثیر تغییرات بار روی پی، بر روی مقادیر نشست‌های نسبی و کلی ارائه می‌شود. در قسمت بعدی اثرات حاصل از عمق‌ها و قطرهای مختلف تونل بررسی می‌شود. در آخرین بخش فاصله‌های متفاوت نوارها از یکدیگر در پی نواری و عرض نوارها مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

فصل ششم پایان نامه به نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی اختصاص یافته است. در این فصل با توجه به نتایج به دست آمده در فصل پنج راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی حفر تونل بر سازه‌های سطحی مشخص می‌گردد. سپس پیشنهادهایی برای ادامه‌ی پژوهش در زمینه‌ی این موضوع ارائه می‌شوند.

## ۱-۷ خلاصه و جمع بندی

در این فصل اهمیت و ضرورت بررسی رفتار متقابل سازه‌های سطحی و تونل و چگونگی اندرکنش این دو، مورد بررسی قرار گرفت. افزایش جمعیت شهرها ما را ناگزیر به استفاده از مترو کرده است. تأمین ایمنی تونل‌های مترو اهمیت قابل توجهی دارد و تنها در این صورت استفاده از مترو موجه خواهد بود. برای بررسی این موضوع از مدل عددی اجزا محدود دو بعدی استفاده شده است. با کمک این مدل پارامترهای گوناگون تونل، خاک و پی مورد بررسی قرار گرفته است.

## فصل دوم

روش های حفاری و کاربرد روش اجزا محدود در حفاری تونل

## ۱-۲ مقدمه

تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی برای مقاصد متنوعی ایجاد می‌شود که تونل‌های حمل و نقل از آن جمله‌اند. طراحی هر تونل مستلزم دسترسی به داده‌های مناسب و به کارگیری تمهیدات ویژه است. در هر مورد طراح باید با آگاهی دقیق از شرایط زمین و امکانات موجود، اقدام به انتخاب روش حفاری مناسب نماید. در این فصل قصد داریم تعدادی از روش‌های حفاری مرسوم را معرفی و مرور کنیم. همچنین به مرور مدل‌های رفتاری خاک که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، خواهیم پرداخت.

## ۲-۲ روش‌های حفاری تونل

امروزه روش‌های مختلفی جهت حفر انواع تونل وجود دارد. عوامل زیادی اعم از زمین شناسی، نوع کاربری تونل، سطح مقطع تونل، میزان پیشروی، میزان سرمایه مورد نیاز، مدت انجام پروژه و مهمتر از همه نوع سنگ و یا خاک در انتخاب روش حفاری موثر است. انواع روش حفر تونل عبارتند از:

- حفر تونل به روش سنتی یا آتشباری (Blasting)

- حفر تونل به کمک ماشینهای بازویی (Road Header)

- حفر تونل به کمک ماشینهای تمام مقطع (TBM)

- حفر تونل به کمک کند و پوش (Cut & Cover)

- حفر تونل به روش نوین اتریشی (NATM)

## ۱-۲-۲ حفر تونل به روش سنتی (آتشباری)

در روش آتشباری سینه کار تونل و فضاهای زیرزمینی، بعد از مشخص شدن آکس تونل و با توجه به شکل هندسی فضای زیرزمینی محل چال‌ها مشخص می‌شود و بعد از حفاری توسط دستگاه‌های

حفاری از جمله چکش دستی و یا دریل واگن و یا جامبو و دریل، توسط چاشنی و دینامیت خرج گذاری و منفجر می‌گردد. این روش بیشتر در فضاهای بزرگ کاربرد دارد.

## ۲-۲-۲ حفار تونل به وسیله ماشین‌های بازویی

در ماشین‌های بازویی، یک یا چند بازوی حفار وجود دارد که سطح مقطع آن به مراتب کمتر از سطح مقطع تونل است و با جابه‌جا کردن آن در نقاط مختلف مقطع، تونل را حفاری می‌کنند. حفر سنگ به وسیله ماشین بازویی طی یکی از دو مکانیسم پودر کردن و تراشه کردن انجام می‌گیرد. در شیوه حفاری به روش پودر کردن، محور دوران سرتمه در امتداد محور بازوی دستگاه است. سر مته نیز حالت مخروطی دارد و به تدریج با نفوذ سرتمه به داخل سنگ، تعداد بیشتری از ناخن‌ها در حفر درگیر می‌شوند و بدین ترتیب، سنگ تا عمق مورد نظر حفر می‌شود و با تغییر موقعیت سر مته، این عمل در نقاط مختلف مقطع تونل انجام می‌شود. این شیوه حفر سبب می‌شود که دستگاه برای حفار سنگ‌های محکم و نیز حفاری در شرایط دشوار زمین‌شناختی، مناسب باشد. حفاری به روش تراشه کردن عمدتاً در ماشین‌های حفار پیوسته و برای حفر سنگ‌های نرم و ضعیف به کار می‌رود و یکی از موارد کاربرد آن، حفر لایه‌های زغال و سنگ‌های رسوبی اطراف آن است.

## ۲-۲-۳ حفار تونل به کمک ماشین‌های تمام مقطع

در این روش حفاری به وسیله دستگاه‌های حفاری تونل (Tunnel Boring Machine) یا تی‌بی‌ام، انجام می‌شود. این دستگاه با استفاده از یک سطح مقطع مدور، قادر است در قشرهای خاکی و سنگی زمین حفاری کند. این دستگاه در ضمن حرکت دورانی، به وسیله جک‌ها با فشار زیاد به جلو رانده می‌شود. نتیجه این دو حرکت، کندن خاک از سینه تونل است. خاک و مواد حفاری شده از سینه تونل، از طریق دریچه‌های کنترلی که در کنار سر مته‌های حفاری تعبیه شده‌اند به نوار نقاله هدایت

می‌شوند و بعد به واگن‌های حمل خاک ریخته می‌شوند. این نوع از ماشین‌آلات توانایی ایجاد حفره در هر نوع زمینی، از سنگ سخت گرفته تا ماسه را دارد. تی‌بی‌ام‌ها مزایایی همچون کاهش تعرض به زمین‌های مجاور و ایجاد دیوارهای نرم در تونل را دارند. این دستگاه‌ها یکی از مهمترین ماشین‌آلات حفر تونل می‌باشند که قادرند تونل را به صورت تمام مقطع حفر کنند. EPB نوع خاصی از دستگاه‌های TBM است. در این دستگاه‌ها، جهت حفاظت از جبهه کار، از مخلوط خاک حفاری شده، آب، فوم و در صورت نیاز مواد افزودنی دیگر استفاده می‌شود. حفاظت از جبهه کار به دلیل متعادل کردن فشار لایه‌های فوقانی خاک و همچنین فشار آب زیرزمینی الزامی است. اگر در خاک‌های سست فشار متعادل کننده به جبهه حفاری وارد نشود، فروریزش زمین بالای تونل و وقوع نشست‌های بزرگ، اجتناب ناپذیر است.

## ۲-۲-۴ حفر تونل به کمک کند و پوش

این روش در مواردی امکان‌پذیر است که در محل مورد نظر، سازه‌های سطحی وجود نداشته باشد و یا تخریب آنها امکان‌پذیر باشد. بسته به وضعیت زمین و شرایط موجود در محل، از روش‌های اجرایی مختلفی برای این کار استفاده می‌شود که تعدادی از آنها عبارتند از:

- روش گود برداری با دیواره شیروانی، که در این روش دیوارهای ترانشه به صورت شیروانی یعنی با دیواره‌های کم شیب احداث می‌شود و نیازی به سیستم نگهداری ندارد.
- روش میخ‌کوبی دیواره که در آن دیواره پر شیب ترانشه را بوسیله میله‌های فولادی به طول چندین متر، میخ‌کوبی می‌کنند.
- روش استفاده از پایه‌های فولادی

- روش دیوار سازی بتنی که در این روش، قبل از عملیات گودبرداری، دیوار قائمی به ضخامت ۵۰ تا ۸۰ سانتی‌متر در دو طرف دیواره ترانشه مورد نظر احداث می‌شود که نقش دیواره حائل و پرده آب‌بندی را بر عهده دارد.

## ۲-۲-۵ حفر تونل به روش نوین اتریشی

روش تونل‌سازی اتریشی (NATM)، در فاصله سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۵ در اتریش ابداع گردید. اساس این روش استفاده بهینه از تنش‌های ژئوتکنیکی خاک یا سنگ‌های پیرامونی برای پایداری تونل است. در واقع اساس این روش بر اتصال پوسته محافظ به بخشی از خاک است که دیگر تغییر شکل ندارد. به عبارت دیگر استفاده از مقاومت خود خاک برای پایداری تونل.

ناتم روشی است مبتنی بر تابع نگاری رفتار توده‌های سنگ تحت بار و مونتورینگ عملیات ساختمان زیرزمینی سنگ. این متد بر مقاومت ذاتی توده سنگ پیرامون به عنوان یک جز اصلی نگهداری شده در تونل، تکیه می‌کند. تکیه‌گاه اولیه طوری هدایت می‌شود که سنگ را قادر سازد تا بر خودش تکیه کند.

هرگونه تغییر شکل ناشی از حفاری در این روش باید اندازه گرفته شود. ناتم به نصب تجهیزات اندازه‌گیری در سطح بالایی نیاز دارد. این تجهیزات در آستر، زمین و گمانه‌ها جاسازی می‌شود. تونل‌زنی به روش جدید اتریشی در خاک‌های سست تا سنگ‌های سخت و مقاوم و در اعماق کم (در جهت به حداقل رساندن نشست سطح) تا اعماق زیاد و بیش از ۱۰۰۰ متر تحت میدان‌های تنش ناشی از عملیات معدن‌کاری انجام گرفته است. در حال حاضر برای ساخت تونل‌های مترو از این روش به شکل زیر استفاده می‌شود:

۱- حفاری مقطع فوقانی تونل

۲- حفاظت موقت مقطع فوقانی با نصب فریم و شاتکریت

۳- حفاری مقاطع تحتانی تونل

فصل دوم: روش‌های حفاری و کاربرد روش اجرا محدود در حفاری تونل

۴- حفاظت موقت مقاطع تحتانی، با نصب فریم و شاتکریت

۵- اجرای رادیه کف (بتن ریزی فونداسیون)

۶- اجرای دیواره و تاج تونل (نصب قالب و بتن ریزی سازه اصلی دیواره و تاج)

ناتم روند و دستور کاری نیست که با دنبال کردن آن به نتیجه مورد نظر رسید بلکه عبارت است از مجموعه ای از ایده ها که به ویژگی های زمین شناسی منطقه توجه ویژه ای دارد. این روش در نتیجه تجربیات متعدد در کار تونل‌زنی به دست آمده است و برای به دست آوردن هر یک از این ایده ها و نیز جمع‌بندی آنها به عنوان یک روش سال‌های زیادی وقت صرف شده است.

## ۲-۳ مدل های رفتاری خاک

طراحی دقیق تونل‌ها نیازمند پیش‌بینی مناسب رفتار آن‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف است و تعیین مناسب‌ترین مدل رفتاری خاک برای این نوع سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انتخاب یک مدل رفتاری در تحلیل تونل‌ها، در درجه‌ی اول به نوع مسأله‌ی مورد نظر بستگی دارد. علاوه بر آن، میدان تنش و تغییر شکل هر سازه‌ی ژئوتکنیکی، مختص به آن سازه بوده و ممکن است یک مدل رفتاری، رفتار یک سازه را به خوبی ارزیابی نماید در حالی که کارایی لازم را برای سازه‌های مشابه دیگر نداشته باشد. عامل مهم دیگر در انتخاب یک مدل رفتاری، در دسترس بودن اطلاعات برای تعیین پارامترهای مدل است. به همین علت، انتخاب یک مدل رفتاری مؤثر و مفید که دارای پارامترهای کم و قابل دسترس باشد، برای بررسی رفتار خاک در اولویت است، زیرا که می‌تواند همچون یک ابزار آسان و مطمئن برای آنالیز حفاری تونل و اثرات ناشی از حفر تونل به کار رود. شایان ذکر است که اصولاً مدل‌های پیچیده دارای تعداد پارامترهای بیشتری هستند که تعیین این پارامترها نیاز به انجام آزمایش‌های دقیق صحرایی و یا آزمایشگاهی دارد. در این نوع مدل‌ها بعضاً عدم مشخص بودن مفهوم فیزیکی و حدود مقادیر پارامترها، خود از انعطاف‌پذیری و به کارگیری ساده آنها می‌کاهد

[۱۴].

در سال‌های اخیر مدل‌های رفتاری زیادی برای بررسی رفتار تنش-کرنش محیط خاکی ارائه شده است. همه‌ی این مدل‌ها مزایا و محدودیت‌های مخصوصی دارند که تا حد زیادی به کاربرد ویژه‌ی آنها وابسته است. البته امروزه سعی می‌شود که در آنالیزهای عددی، از مدل‌های رفتاری ارتجاعی-خمیری (الاستو پلاستیک) برای مدل کردن رفتار غیر خطی خاک‌ها استفاده شود. از سوی دیگر، به دلیل بروز تغییر شکل‌های بزرگ در حین حفاری، استفاده از مدل‌های رفتاری ارتجاعی-خمیری برای بررسی رفتار کوتاه مدت تونل‌ها امری ضروری است [۱۴].

به طور کلی مدل‌های ارتجاعی-خمیری به دو دسته‌ی مدل‌های ارتجاعی-خمیری کامل و مدل‌های ارتجاعی-خمیری با قابلیت سخت‌شوندگی تقسیم می‌شوند. هر یک از این مدل‌ها ویژگی‌ها و کاربرد-های ویژه‌ای دارند که در زیر به اختصار شرح داده می‌شوند [۱۴].

## ۲-۳-۱ مدل‌های ارتجاعی-خمیری کامل

در مدل‌های ارتجاعی-خمیری کامل، سطح تسلیم بر معیار گسیختگی منطبق است. در داخل این سطح، جواب مدل کاملاً ارتجاعی خواهد بود و هنگامی که وضعیت تنش روی این سطح قرار گیرد حالت خمیری کامل برای مصالح به وجود خواهد آمد. در این حالت، تنش به میزان حداکثر خود رسیده و دیگر امکان افزایش آن وجود نخواهد داشت. با توجه به اینکه مکانیزم خمیری این نوع مدل-ها بسیار ساده است، لذا دارای تعداد پارامترهای کمتری برای شبیه‌سازی رفتار خاک‌ها هستند و این امر باعث افزایش انعطاف‌پذیری و سهولت استفاده از آنها می‌شود. مدل‌های مور-کلمب و دراگر-پراگر معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های ارتجاعی-خمیری کامل در مکانیک خاک هستند که در اکثر کدهای محاسباتی گنجانده شده‌اند. در شکل ۲-۱ سطح تسلیم این مدل‌ها در پلان تنش‌های اصلی نشان داده شده است. مدل‌های ارتجاعی-خمیری کامل دیگری نیز ارائه شده‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مدل‌های ون-مایسز، ترسکا، لد و ماتسوکا اشاره کرد [۱۴].





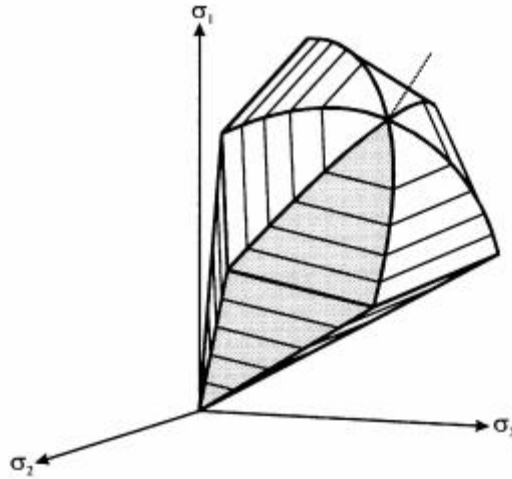
شکل ۲-۱- سطح تسلیم مدل‌های مور- کلمب و دراگر- پراگر [۱۴]

کلیه‌ی مدل‌های ارتجاعی- خمیری کامل از یک مکانیزم خمیری مشابه استفاده می‌کنند، با این وجود به دلیل بهره‌گیری مدل مور-کلمب از پارامترهای مناسب‌تر (از لحاظ دسترسی و مفهوم فیزیکی)، استفاده از این نوع مدل در شبیه‌سازی رفتار خاک بیشتر از سایر مدل‌های ارتجاعی- خمیری کامل است. تحقیقات انجام شده در گذشته حاکی از عدم انطباق نه چندان مناسب نتایج این مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از ابزارنگاری تونل‌ها است. این عدم انطباق کامل با نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از ابزارنگاری را می‌توان ناشی از دو عامل اساسی دانست. اولین عامل به ساختار مدل‌های ارتجاعی- خمیری کامل باز می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، سطح تسلیم این نوع مدل‌ها از نوع سطح باز حول محور هیدرواستاتیک است. این امر به این معنا است که هنگامی که وضعیت تنش در امتداد محور هیدرواستاتیک باشد، به این دلیل که سطح تسلیم در این حالت قطع نمی‌شود، هیچ‌گونه جریان خمیری رخ نخواهد داد و این موضوع منطبق بر رفتار واقعی خاک‌ها نیست. دومین عاملی که در محاسبات عددی با استفاده از مدل‌های ارتجاعی- خمیری کامل باعث بروز خطا می‌شود این است که در این مدل‌ها، سطح تسلیم منطبق بر معیار گسیختگی است. یعنی در داخل این سطح جواب مدل کاملاً ارتجاعی است و وقتی وضعیت تنش روی این سطح قرار گیرد، حالت خمیری کامل اتفاق می‌افتد و مقدار تنش دیگر افزایش نمی‌یابد. به عبارت دیگر تا قبل از رسیدن وضعیت تنش به سطح گسیختگی، جواب مدل کاملاً ارتجاعی خطی و همسان است و این موضوع در انطباق با مشاهدات تجربی رفتار خاک‌ها نیست (چرا که نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر

روی نمونه‌های خاک نشان می‌دهند که مصالح خاکی پس از مرحله ارتجاعی به خرابی کامل نمی‌رسند و تنش افزایش می‌یابد. در مجموع می‌توان بیان کرد که با توجه به مکانیزم خمیری ساده‌ی این نوع مدل‌ها (عدم در نظرگیری پارامتر سخت‌شوندگی و ثابت بودن مدول‌های الاستیسیته و برشی در کرنش‌های خمیری)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های فوق با رفتار واقعی مصالح خاکی در اکثر موارد منطبق نیست. با این وجود، استفاده از مدل‌های ارتجاعی - خمیری کامل (مور-کلمب) علیرغم محدودیت‌های اساسی که دارند برای پیش‌بینی‌های اولیه و ارائه‌ی پیش‌زمینه‌ی لازم نسبت به آنالیز مسأله توصیه می‌شود [۱۴].

## ۲-۳-۲ مدل‌های ارتجاعی - خمیری با قابلیت سخت‌شوندگی

همان‌طور که بیان شد، استفاده از مدل‌های ارتجاعی - خمیری کامل در آنالیز عددی تونل‌ها، به علت در نظرگیری سطح تسلیم باز و منطبق بر سطح گسیختگی، منجر به نتایج غیر واقع‌گرایانه‌ای می‌شود. به همین دلیل تلاش‌های بسیاری برای رفع نواقص موجود در این نوع مدل‌ها صورت گرفته است. در چارچوب تئوری ارتجاعی - خمیری، برای رفع نواقص مدل‌های ارتجاعی - خمیری کامل و خطای ناشی از سطح تسلیم باز، محققین مدلهایی با سطوح تسلیم بسته (شکل ۲-۲) و یا کاربرد مدل‌های رفتاری با مکانیزم خمیری چندگانه را پیشنهاد نموده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از این مدل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این نوع مدل‌ها باعث بهبود نتایج می‌شوند، لیکن هنوز با نتایج حاصل از ابزارنگاری تونل متفاوت می‌باشند. به همین دلیل، با مشخص شدن اینکه ضعف اساسی مدل‌های ارتجاعی - خمیری کامل ناشی از در نظرگیری سطح تسلیمی منطبق بر سطح گسیختگی است، محققین تلاش‌های بسیاری را برای رفع این نقیصه انجام دادند و این امر منجر به ارائه‌ی مفهوم سخت‌شوندگی شد.



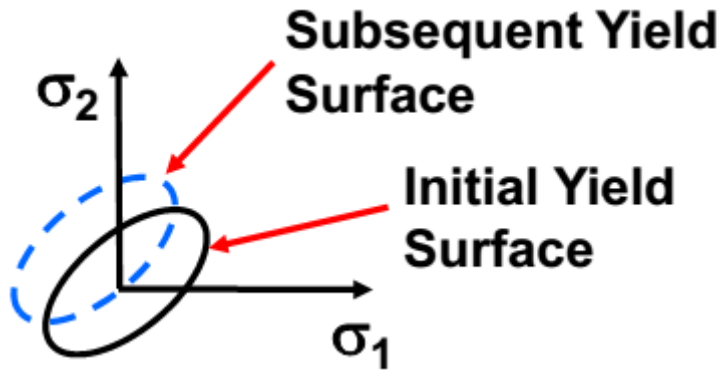
شکل ۲-۲- سطح تسلیم مدل سخت شونده در فضای تنش‌های اصلی در خاک غیر چسبنده

در واقع، استفاده از یک قانون سخت‌شوندگی، امکان مدل کردن جریان خمیری را به صورت غیر خطی فراهم خواهد ساخت. این میزان توسعه در مدل‌های رفتاری ارتجاعی-خمیری کامل، پیش‌بینی رفتاری خاک‌ها را در حد قابل‌قبولی ارتقا می‌بخشد، در صورتی که برای مدل کردن رفتار خاک‌ها تحت اثر بارگذاری‌های پیچیده استفاده از مفاهیم پیشرفته‌تری لازم است [۱۴]. قانون سخت‌شوندگی چگونگی تغییر (در اندازه، مرکز و شکل) سطح تسلیم را تعیین می‌کند. این قانون زمانی را که در آن مواد مجدداً جاری خواهند شد، اگر بارگذاری ادامه پیدا کند یا تغییر جهت بدهد، را تعیین می‌کند. این در تضاد با رفتار مواد با خاصیت ارتجاعی-خمیری کامل قرار دارد که هیچ نوع سخت‌شوندگی‌ای از خود نشان نمی‌دهند و سطح تسلیم ثابت باقی می‌ماند.

دو قانون بنیادی سخت‌شوندگی وجود دارد که نحوه‌ی تغییرات سطح تسلیم را توصیف و دو نوع سخت‌شوندگی را از یکدیگر متمایز می‌کنند:

- سخت‌شوندگی سینماتیک (Kinematic hardening):

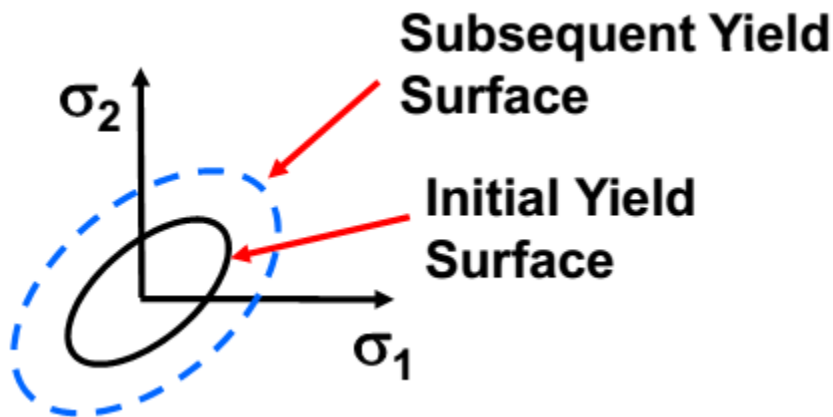
در این حالت اندازه سطح تسلیم ثابت باقی می‌ماند و این سطح تنها جا به جا می‌شود.



شکل ۲-۳- جابه‌جای سطح تسلیم در سخت شونده‌گی سینماتیک

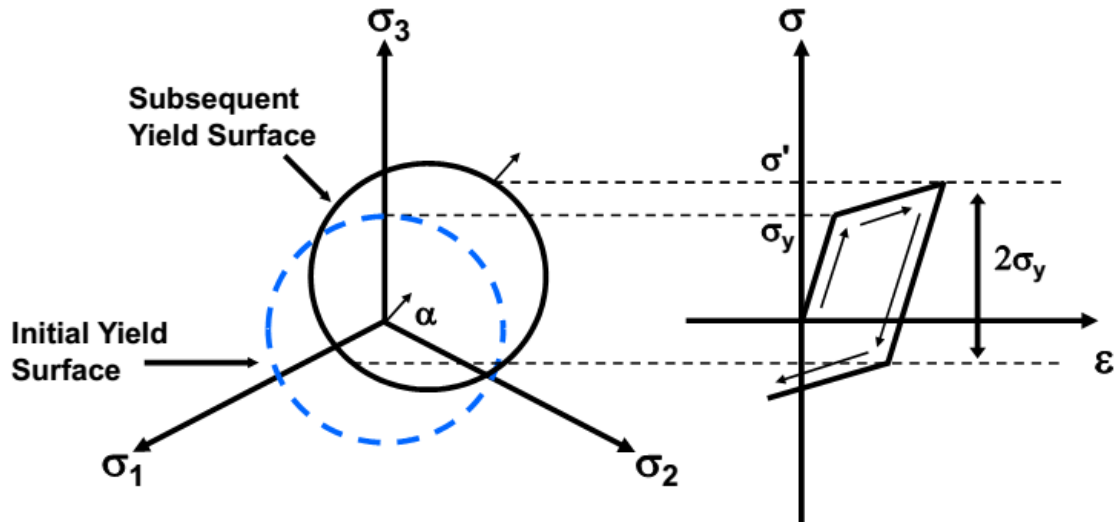
- سخت شونده‌گی همسان (Isotropic hardening):

در این حالت سطح تسلیم به صورت یکنواخت در تمام جهات گسترش می‌یابد.



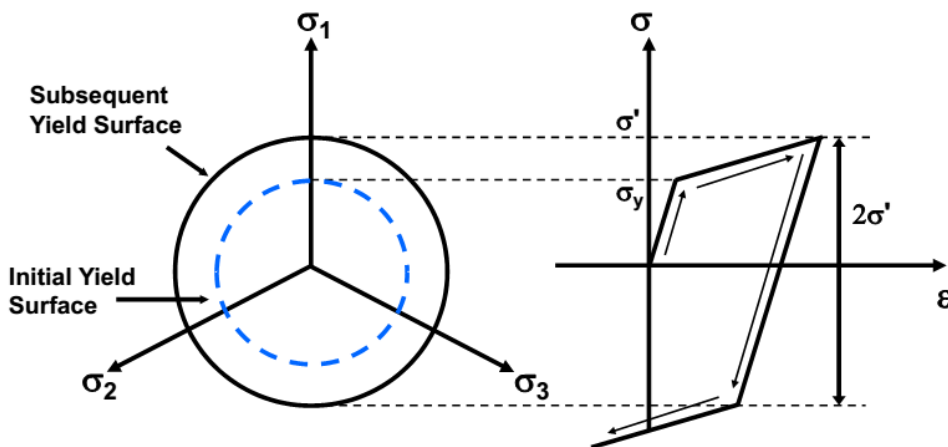
شکل ۲-۴- جابه‌جای سطح تسلیم در سخت شونده‌گی همسان

بسیاری از مواد در کرنش‌های کوچک یا بارگذاری‌های تناوبی، رفتار سخت شونده‌گی سینماتیک از خود نشان می‌دهند. سخت شونده‌گی سینماتیک خطی برای شبیه‌سازی کرنش‌های بزرگ، چندان مناسب نیست. نمودار تنش-کرنش برای حالت سخت شونده‌گی سینماتیک خطی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵- نمودار تنش-کرنش در حالت سخت‌شوندگی سینماتیک

در حالت سخت‌شوندگی همسان، سطح تسلیم به شکل یکنواختی در حین جریان پلاستیک گسترش می‌یابد. واژه "همسان" به انبساط یکنواخت سطح تسلیم اشاره دارد. مدل سخت‌شوندگی سینماتیک دارای تعداد پارامترهای زیادی (۱۲ پارامتر) نسبت به مدل سخت‌شوندگی همسان است و این موضوع استفاده از این مدل را بسیار سخت و پیچیده کرده است. با توجه به این موضوع و دقت قابل قبول مدل همسان، در این پژوهش از مدل سخت‌شوندگی همسان استفاده شده است. نمودار تنش-کرنش برای حالت سخت‌شوندگی همسان در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- نمودار تنش-کرنش در حالت سخت‌شوندگی همسان

## ۳-۳-۲ مدل مور-کولمب (MC)

در نیمی از مدل‌های عددی این پژوهش از مدل رفتاری مور-کولمب برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده شده است. شکل اولیه مدل مور-کولمب توسط کولمب در سال ۱۷۷۳ بر اساس قانون شکست اصطکاک ارائه گردید. روش ترسیمی این مدل در ۱۸۸۲ توسط مور ارائه شد. ایده اصلی این روش وجود ارتباط خطی بین تنش برشی و تنش عمود بر سطح در یک صفحه ماده در لحظه آغاز تغییر-شکل‌های خمیری آن است.

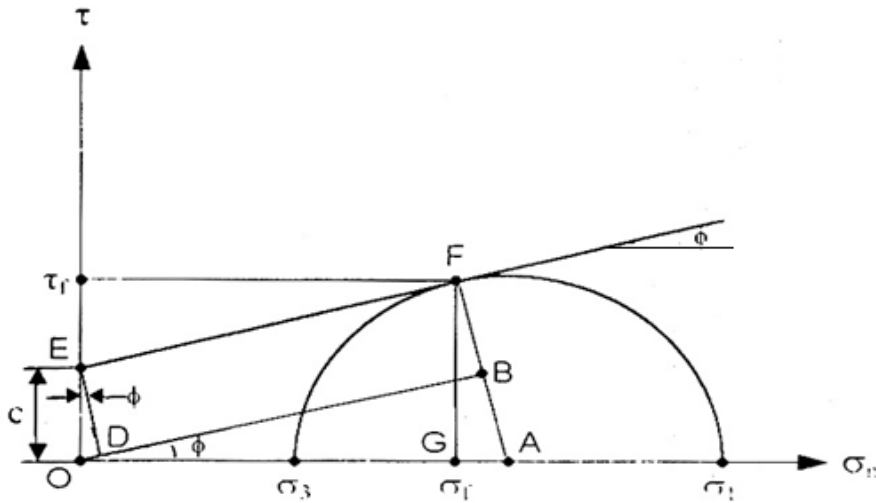
مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب شامل پنج پارامتر ورودی است. یعنی  $E$  و  $\nu$  برای الاستیسیته‌ی خاک،  $c$  و  $\phi$  برای پلاستیسیته‌ی خاک و  $\Psi$  به عنوان زاویه‌ی اتساع‌پذیری می‌باشند. مدل مور-کولمب یک تقریب (درجه‌ی اول) از رفتار خاک یا سنگ را ارائه می‌دهد. استفاده از این مدل برای تحلیل اولیه‌ی مسأله موردنظر توصیه می‌شود. برای هر لایه سختی متوسط ثابتی در نظر گرفته می‌شود. به علت این سختی ثابت، محاسبات نسبتاً سریع انجام می‌شود و درک اولیه‌ی از تغییر شکل‌ها بدست می‌دهد. علاوه بر پنج پارامتر فوق‌الذکر، شرایط اولیه خاک نیز در اغلب مسایل مربوط به تغییر شکل خاک، نقش اساسی ایفا می‌کند. تنش‌های افقی اولیه خاک باید با انتخاب مقادیر مناسب  $k_0$  ایجاد شوند [۱۴].

بر اساس مدل رفتاری مور-کولمب یک ماده پیش از آغاز تغییر شکل‌های خمیری، رفتار ارتجاعی دارد. در این زمان تغییر شکل‌ها و تنش‌های ایجاد شده در ماده تحت تأثیر دو پارامتر مدول الاستیسیته ( $E$ ) و نسبت پواسون ( $\nu$ ) است. با بالا رفتن تنش‌ها و زیاد شدن تغییرشکل‌ها، ماده به محدوده رابطه مور-کولمب می‌رسد. معادله ۱-۲ بیانگر این رابطه است.

$$\tau_n = c + \sigma_n \tan(\phi) \quad \text{رابطه ۱-۲}$$

در این رابطه  $\tau_n$  تنش برشی در صفحه مورد نظر،  $\sigma_n$  تنش عمودی وارد بر آن صفحه،  $c$  چسبندگی خاک و  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک است. بر اساس این مدل با رسیدن وضعیت تنش یک ماده به

محدوده رابطه مور-کولمب، تغییر شکل‌های خمیری در آن آغاز می‌گردد. این مدل بر حسب تنش‌های اصلی و به صورت ترسیمی مطابق شکل ۷-۲ تعریف می‌گردد.



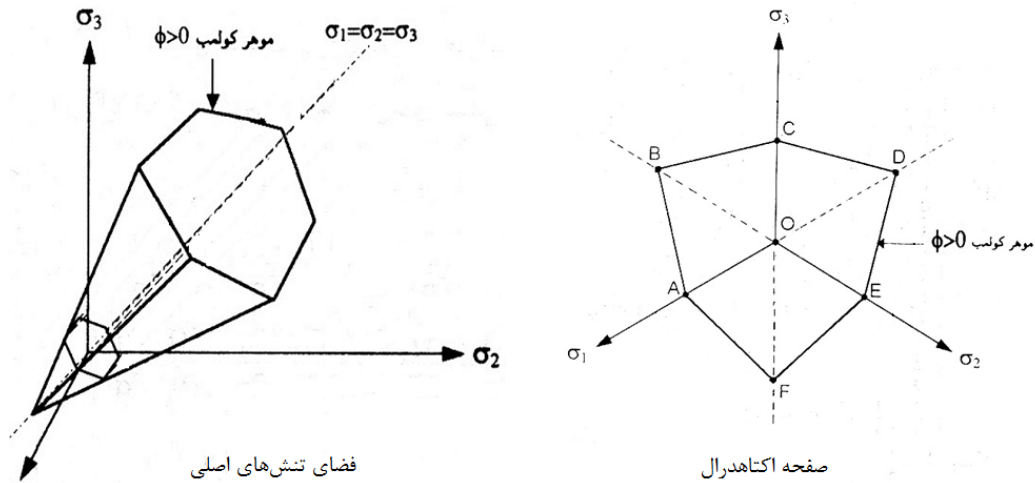
شکل ۷-۲- تعیین رابطه مدل مور-کولمب بر اساس روش ترسیمی

در شکل ۷-۲،  $\sigma_1$  بزرگ‌ترین و  $\sigma_3$  کوچک‌ترین تنش اصلی ماده در حالت گسیختگی است. با توجه به این شکل مدل مور-کولمب بر اساس تنش‌های اصلی به صورت رابطه ۲-۲ به دست می‌آید.

$$\sigma_1 (1 - \sin \phi) - \sigma_3 (1 + \sin \phi) = 2.c.\cos \phi \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

مدل مور-کولمب بر اساس تنش‌های اصلی یک شش وجهی نامنظم است که محور اصلی آن مکان هندسی تنش‌های همه جانبه است. شکل ۸-۲ سطح تسلیم مور-کولمب را در فضای تنش‌های اصلی و صفحه اکتاهدرال<sup>۱</sup> نمایش می‌دهد.

<sup>1</sup> Octahedral Plane



شکل ۲-۸- سطح تسلیم مور-کولمب در فضای تنش‌های اصلی و صفحه اکتاهدرال

در تغییر شکل‌های خمیری خاک رابطه تعامد (عمود بودن بردارهای نمو کرنش بر سطح تسلیم) بر اساس مدل مور-کولمب برقرار نیست. بنابراین برای پیش‌بینی دقیق‌تر تغییر حجم خاک در حالت‌های خمیری، تابع سطح پتانسیل تعریف می‌گردد. ویژگی این تابع برقراری تعامد در آن در زمان تغییر شکل‌های خمیری خاک است. رابطه ۲-۳ بیانگر تابع سطح پتانسیل خاک است.

$$g = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin\Psi + cte \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

در این رابطه  $\Psi$  زاویه اتساع<sup>۱</sup> خاک است. زاویه اتساع یکی از پارامترهای خاک در زمان شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل مور-کولمب است.

### ۲-۳-۴ مدل خاک سخت شونده<sup>۲</sup> (همسان) (HS)

مدل HS مدلی پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار خاک است. مشابه مدل مور-کولمب حالت‌های حدی تنش به وسیله زاویه‌ی اصطکاک  $\phi$ ، چسبندگی  $c$  و زاویه اتساع‌پذیری  $\Psi$  بیان می‌شوند. با وجود این، سختی خاک با استفاده از سه سختی مختلف با دقت خیلی بیشتری بیان می‌شود. این سختی‌ها

<sup>1</sup> Dilatation

<sup>2</sup> Hardening Soil Model



عبارتند از: سختی بارگذاری سه محوری  $E_{50}$ ، سختی باربرداری سه محوری  $E_{ur}$  و سختی بارگذاری ادئومتر  $E_{oed}$ . با مقایسه مقادیر متوسط سختی در خاک‌های گوناگون داریم:  $E_{ur} \approx 3E_{50}$  و  $E_{oed} \approx E_{50}$ . با وجود این، هر دو خاک‌های خیلی نرم و خیلی سخت نسبت‌های دیگری از  $E_{oed}/E_{50}$  را نشان می‌دهند [۱۵].

مزیت مدل خاک سخت‌شونده نسبت به مدل مور-کلمب تنها در استفاده از منحنی تنش-کرنش هایپربولیک به جای منحنی دوخطی نیست، بلکه در کنترل وابستگی به تراز تنش است. بر خلاف مدل MC، مدل HS بستگی مدول سختی به تنش را به حساب می‌آورد. این بدان معنی است که تمام سختی‌ها با فشار افزایش می‌یابند. بنابراین، هر سه سختی ورودی نسبت به تنش مبنا معمولاً برابر  $100 \text{ kPa}$  در نظر گرفته می‌شوند [۱۵]. در حین استفاده از مدل مور-کلمب، کاربر مجبور به تعیین یک مقدار ثابت برای مدول یانگ (سختی) است، در حالیکه در خاک‌های واقعی این مقدار وابسته به تراز تنش است.

## ۲-۳-۵ محدودیت‌ها

مدل‌های خاکی را می‌توان یک معرف از حالت کیفی خاک دانست، در صورتی که پارامترهای مدل جهت تعیین رفتار خاک به کار برده می‌شوند. اگرچه برای توسعه‌ی دستورالعمل‌های پلکسیس و مدل‌های خاکی آن دقت زیادی اتخاذ شده است، با وجود این، شبیه‌سازی حقیقی در حد تقریبی باقی مانده است، که به‌طور ضمنی شامل برخی خطاهای عددی غیرقابل اجتناب و مدل‌سازی می‌باشد. به علاوه، دقت در هر واقعیتی به میزان زیادی به دقت فنی کاربر راجع به مدل‌سازی مسأله و درک مدل‌های خاکی و محدودیت‌های آنها، انتخاب پارامترهای مدل و توانایی تشخیص قابلیت اعتبار نتایج محاسباتی بستگی دارد. برخی از محدودیت‌های موجود در زیر آورده شده:

### ۲-۳-۵-۱ مدل HS

مدل HS، مدل سخت شده‌ای است که نرمی ناشی از اتساع‌پذیری خاک و اثرات پیوندزدایی را در نظر نمی‌گیرد. در واقع این یک مدل سخت‌شده‌ی همسانگرد است به‌طوری‌که نه بارگذاری هیسترتیک (پس‌ماند) و دوره‌ای و نه تغییرات دوره‌ای را مدل‌سازی نمی‌کند. برای بارگذاری دوره‌ای مدل با دقت خوب، فرد به مدل پیچیده‌تری نیاز خواهد داشت. در نهایت، استفاده از مدل HS عموماً منجر به طولانی شدن زمان محاسبه می‌شود زیرا ماتریس سختی مصالح در هر مرحله از محاسبه تشکیل و تجزیه می‌شود [۱۵].

### ۲-۳-۵-۲ سطوح مشترک

اجزا سطح مشترک عموماً به وسیله‌ی مدل مور-کلمب دو خطی، مدل‌سازی می‌شوند. هنگامی که مدل پیشرفته‌تری برای مجموعه داده‌های گروه مصالح متناظر به‌کار برده می‌شود، عنصر سطح مشترک فقط اطلاعات مربوط به مدل MC ( $\nu, \phi, \Psi, E, c$ ) را انتخاب می‌کند. در این‌گونه موارد، سختی سطح مشترک، سختی خاک ارتجاعی در نظر گرفته می‌شود [۱۵].



## فصل سوم

بررسی اثر حفاری تونل بر نشست پی ها در تحقیقات گذشته

### ۱-۳ مقدمه

مطالعه حفر تونل و اثرات آن بر پی‌های سطحی به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. این روش‌ها به سه دسته کلی آزمایش‌های بزرگ مقیاس، آزمایش‌های کوچک مقیاس و شبیه‌سازی‌های عددی تقسیم می‌شوند. هر یک از این روش‌ها برتری‌ها و ایرادات مربوط به خود را دارد. در این فصل این روش‌ها و ایرادهای آن‌ها معرفی می‌شود. روش مورد استفاده برای انجام پژوهش انتخاب می‌گردد. سپس پژوهش‌های انجام شده با استفاده از روش‌های مختلف برای بررسی اثر حفر تونل بر پی‌های سطحی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. پژوهش‌های مرور شده بر اساس سال انتشار، از گذشته تا حال، آورده شده‌اند.

### ۲-۳ آزمایش‌های بزرگ مقیاس

در رابطه با موضوع حفر تونل، عموماً از برداشتها و اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل پروژه‌های مختلف حفاری، به عنوان آزمایش‌های بزرگ مقیاس یا مشاهدات تجربی نام برده می‌شود. با انجام این اندازه‌گیری‌ها مجموعه‌ای از اطلاعات فراهم می‌شود که با استفاده از آن‌ها روابط تجربی حاکم بر شرایط آزمایش بدست می‌آیند و یا تنها برای کنترل مقادیر مجاز جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌ها به کار می‌روند. این اطلاعات با استفاده از ابزارنگاری‌های دقیق و گسترده به دست می‌آیند. استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس و اندازه‌گیری‌های در محل، با توجه به نیاز به امکانات و هزینه بالا، در تعداد کمی از پروژه‌های حفاری تونل انجام می‌شود که عموماً نیز توسط سازمان‌های بزرگ دولتی و خصوصی اجرا شده و نتایج حاصل از آنها به راحتی در اختیار پژوهشگران قرار نمی‌گیرد.

### ۳-۳ آزمایش های کوچک مقیاس

در آزمایش های کوچک مقیاس از مدل های ساده سازی شده استفاده می شود. با استفاده از این آزمایش ها می توان داده هایی برای بدست آوردن روابط تحلیلی فراهم ساخت. آزمایش های زیادی برای بررسی اندرکنش تونل و خاک و یا پی های سطحی به این شیوه انجام شده و مدل های متفاوتی در مراکز مختلف تحقیقاتی ساخته شده است. ساخت این قبیل مدل های آزمایشگاهی گاهی بسیار زمان بر بوده و نیاز به دقت زیادی دارند تا بتوان نتایج حاصل از این آزمایشات را منطبق بر واقعیت دانست.

### ۴-۳ شبیه سازی های عددی

شبیه سازی های عددی بر روابط ریاضی استواراند و قوانین فیزیکی حاکم بر رفتار تونل و خاک اطراف آن را توصیف می کنند. این روش ها در شبیه سازی مدل های رفتاری گوناگون خاک و ویژگی های هر مدل توانمنداند. در آن ها رفتار هر جزء مسأله و ویژگی های مواد سازنده اش در نظر گرفته می شوند. شبیه سازی عددی در دهه های گذشته مورد استفاده بوده است اما در سال های اخیر با گسترش رایانه ها و در دسترس قرار گرفتن برنامه های شبیه سازی کاربرد بیشتری پیدا کرده است. استفاده از رایانه در شبیه سازی عددی، انجام محاسبه های پیچیده و طولانی آن را ممکن کرده و دقت آن ها را بالا برده است.

مزیت اصلی شبیه سازی های عددی پایین بودن هزینه انجام پژوهش ها با استفاده از این روش است. همچنین انجام آزمایش های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس در برخی زمینه ها (مانند تونل سازی) به سادگی و در نبود حمایت سازمان های بزرگ قابل انجام نیست. مجموعه این عوامل استفاده از شبیه سازی های عددی در بررسی پدیده ای مانند اندرکنش تونل - پی را به بهترین گزینه تبدیل می کند. بر این اساس در پژوهش حاضر از مدل سازی های عددی برای بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی نواری سطحی استفاده کرده ایم. در ادامه این فصل به مرور تعدادی از پژوهش های انجام شده در این زمینه می پردازیم.

### ۳-۵ تحقیقات انجام شده در دانشگاه ایالت پنسیلوانیا، آمریکا

تحقیقات انجام شده در حدود سال‌های ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۴، در دانشگاه ایالت پنسیلوانیا را می‌توان به عنوان اولین پژوهش‌ها در زمینه تأثیر حفر تونل بر رفتار پی‌ها معرفی کرد. دو پژوهش مهم در این دانشگاه، اولی در سال ۱۹۸۳ [۱] و بعدی در سال ۱۹۸۴ [۲] توسط وانگ و بدیع<sup>۱</sup> انجام شده است. در مقاله حاصل از پژوهش اول (۱۹۸۳)، خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در گذشته توسط سایر محققین آورده شده است. این تحقیق مروری بر کارهای اتکینسون<sup>۲</sup> و همکارانش (۱۹۷۳ تا ۱۹۷۷) داشته که در آن‌ها پایداری تونل سطحی دایره‌ای در خاک غیرچسبنده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین دیویس<sup>۳</sup> و همکارانش (۱۹۸۰) به بررسی پایداری تونل‌های سطحی در خاک چسبنده پرداخته‌اند. تحقیقات مذکور تأثیر تغییر شکل خاک بر پایداری تونل را بررسی نکرده‌اند. با استفاده از روش اجزا محدود می‌توان این اثر را در تحلیل اعمال کرد. این روش به وسیله قابوسی<sup>۴</sup> و همکارانش برای آنالیز نشست بالای تونل‌های قرار گرفته در خاک نرم (۱۹۷۹) و همچنین برای شبیه‌سازی اجرای یک تونل فاضلاب بر روی یک تونل متروی از قبل احداث شده (۱۹۸۳)، مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان یک مرجع در تحقیق در این زمینه، به پژوهش باس<sup>۵</sup> (۱۹۷۸) در پایداری پی نواری قرار گرفته روی حفره زیرزمینی پیوسته و هم‌مرکز با آن، با روش اجزا محدود اشاره شده است. در تحقیق مذکور از مقایسه نتایج برنامه کامپیوتری اجزا محدود و مدل آزمایشگاهی، برای صحت سنجی برنامه کامپیوتری استفاده شده است. بر اساس نتایج باس، وانگ و باس<sup>۶</sup> (۱۹۸۰) رفتار نشست پی نواری قرار گرفته روی یک حفره پیوسته را آنالیز کردند. آنها روابط بین ظرفیت باربری، اندازه و موقعیت حفره را گسترش دادند. پس از آن باس و وانگ (۱۹۸۳) در تحقیق دیگری، رفتار ظرفیت باربری پی نواری را ارائه کردند. در مقاله آنها تأثیر پارامترهای مختلفی بر روی ظرفیت باربری مورد آزمایش قرار گرفته بود. آنها نتیجه گرفتند که یک عمق بحرانی وجود دارد که در زیر آن، تأثیر وجود

<sup>1</sup> Wang & Badie

<sup>2</sup> Atkinson

<sup>3</sup> Davis

<sup>4</sup> Ghaboussi

<sup>5</sup> Baus

<sup>6</sup> Wang & Baus

حفره بر ظرفیت باربری ناچیز و قابل چشم‌پوشی است، و در صورت قرار گرفتن حفره در بالای این عمق بحرانی، مقدار ظرفیت باربری به اندازه و عمق پی و موقعیت قرارگیری حفره وابسته خواهد بود. شرایطی که آنالیزهای قبلی در آنها انجام شده‌اند تنها شامل پی نواری هم‌مرکز با حفره پیوسته و در خاک رس سیلتی متراکم بوده‌اند. در اینجا لازم است یادآوری کنیم که علاوه بر تحقیقات مذکور، که همگی با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری و روش اجزا محدود بوده، تحقیقاتی نیز توسط سایر محققین از جمله پک<sup>۱</sup> (۱۹۶۹)، کلود و اسمیت<sup>۲</sup> (۱۹۸۱) و یانگ<sup>۳</sup> و همکارانش (۱۹۹۵)، با استفاده از روش‌های تحلیلی و مشاهدات تجربی انجام و منجر به ارائه روابطی تجربی، به منظور پیش‌بینی تغییر شکل زمین در اثر حفر تونل شده است [۳]. به عنوان بخشی از ادامه‌ی مطالعه و تحقیق در این موضوع، در پژوهش‌های انجام شده توسط وانگ و بدیع، اثر حفره‌ی زیر زمینی بر پایداری پی‌های سطحی بر روی زمین متراکم مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. این بررسی در شرایط مختلف از جمله شکل پی (پی نواری و مستطیلی<sup>۴</sup>)، شکل حفره (دایره‌ای پیوسته و مکعبی<sup>۵</sup>)، جهت گیری حفره در مقایسه با محور پی نواری (موازی و عمود) و محل قرار گیری حفره، انجام گرفت. در هر دو پژوهش، خاک در نظر گرفته شده یک نوع کائولین است که به نام EPK<sup>۶</sup> شناخته می‌شود. این خاک براساس طبقه‌بندی‌های یونیفاید و آشتو<sup>۷</sup> به ترتیب از نوع MH و A-7-5 است. همچنین رفتار خاک به صورت ارتجاعی-خمیری کامل<sup>۸</sup> و منطبق بر معیار گسیختگی دراگر-پراگر<sup>۹</sup> در نظر گرفته شده است. این پژوهش‌ها شامل یک تحلیل تئوری و یک مدل آزمایشگاهی بوده‌اند. تحلیل تئوری با استفاده از یک برنامه کامپیوتری سه‌بعدی اجزا محدود انجام گرفته است. از نمونه آزمایشگاهی برای صحت سنجی و اعتبار بخشی به برنامه کامپیوتری استفاده شده است. به منظور اعمال رفتار غیر

---

<sup>1</sup> Peck

<sup>2</sup> Cloud & Schmidt

<sup>3</sup> Yang

<sup>4</sup> Square & strip footings

<sup>5</sup> continuous circular & cubic voids

<sup>6</sup> Edgar Plastic Kaolin

<sup>7</sup> Unified & AASHTO

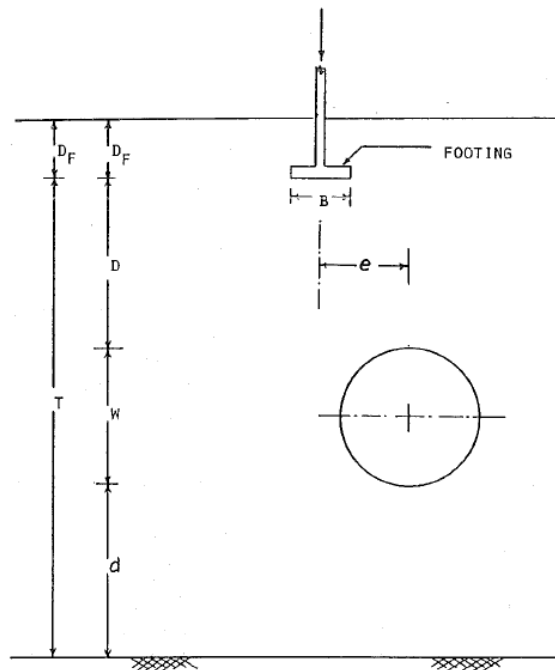
<sup>8</sup> elastic perfectly plastic

<sup>9</sup> Drucker and Prager



خطی<sup>۱</sup> خاک زیر پی، در آنالیز کامپیوتری، ابتدا یک افزایش بار ۲۰ درصدی از بار کل بر روی پی وارد شده است. در گام‌های بعدی افزایش بار به مقدار ۱۰٪ بار کل کاهش یافته و زمانی که خاک به شرایط گسیختگی رسیده، این کاهش به ۲٪ بار کل رسیده است. علاوه بر این در هر افزایش بار، پروسه‌های تکرار در محاسبات انجام می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، پی سطحی تحلیل شده بر روی یک حفره<sup>۲</sup> قرار گرفته و تحت یک بار استاتیکی که در مرکز آن وارد می‌شود قرار دارد.  $T, d, w, e, D, D_f, B$  به ترتیب عرض پی، عمق پی، عمق حفره، خروج از مرکزیت حفره نسبت به محور پی، قطر حفره (یا عرض حفره مکعبی)، عمق سنگ بستر از زیر حفره و عمق سنگ بستر از زیر پی هستند.



شکل ۱-۳- تصویر شماتیک سیستم پی- خاک- حفره [۲]

<sup>1</sup> nonlinear

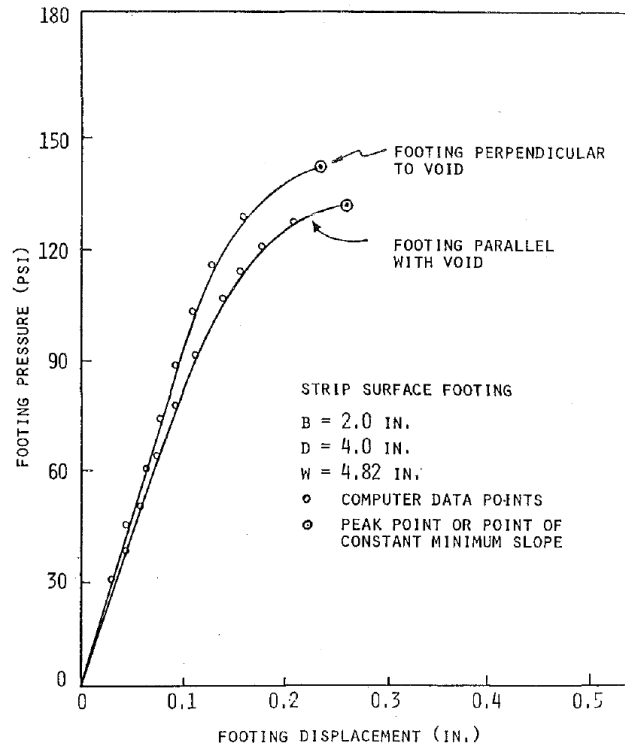
<sup>2</sup> void

موارد بررسی شده در این پژوهش شامل: (۱) پی نواری موازی با حفره دایره‌ای پیوسته و در دو حالت هم محور و خارج از محور حفره، (۲) پی نواری عمود بر محور حفره دایره‌ای پیوسته، (۳) پی مربعی هم مرکز با حفره مکعبی و (۴) پی نواری و مربعی بدون حفره است.

نتایج حاصل از آنالیزها، روابط بین فشار روی پی و جابه‌جایی قائم را بدست می‌دهند. ظرفیت باربری خاک برای هر کدام از شرایط آنالیز شده، از نقطه‌ای که در آن شیب منحنی‌های فشار- جابه‌جایی کمترین مقدار را دارد، به دست آمده است. مقادیر ظرفیت باربری در پی‌های همراه با حفره، به صورت درصدی از شرایط بدون حفره بیان شده است. همچنین اندازه و موقعیت حفره و ضخامت لایه‌ی خاک، در ترکیب با عرض پی به صورت ضرایب بدون بعد در آمده‌اند. نتایج بررسی نشان داد که، برای یک پی مربعی یا نواری قرار گرفته بالای یک حفره دایره‌ای پیوسته که محور طولی آن موازی محور پی است، ظرفیت باربری، با تغییر موقعیت حفره تغییر می‌کند.

همچنین برای یک نسبت ثابت خروج از مرکزیت به عرض پی ( $e/B$ )، ظرفیت باربری با کاهش نسبت عمق حفره به عرض پی ( $D/B$ ) کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود ظرفیت باربری با افزایش عمق فونداسیون، افزایش می‌یابد. برای یک نسبت  $D/B$  ثابت، ظرفیت باربری همراه با کاهش  $e/B$ ، کم می‌شود و در  $e/B=0$  به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین نشان می‌دهد که تأثیر حفره دایره‌ای پیوسته بر ظرفیت باربری در پی‌های نواری بیشتر از پی‌های مربعی است.

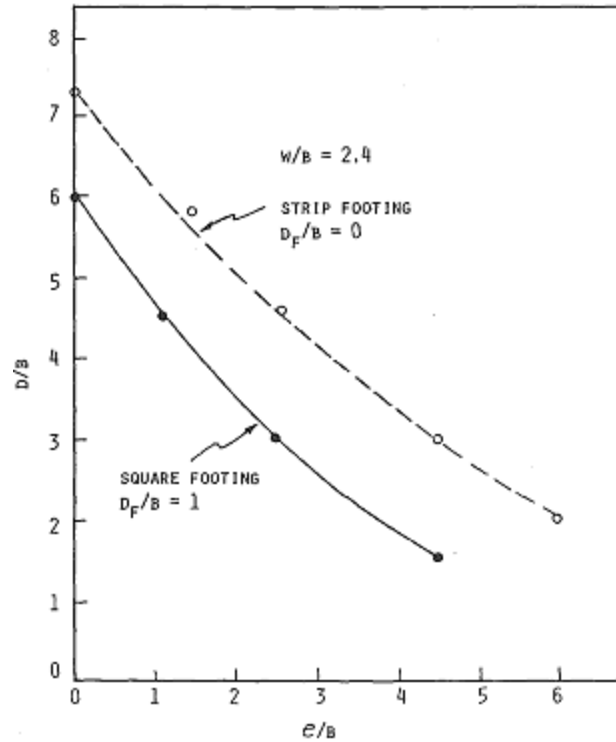
تأثیر جهت حفره پیوسته نسبت به محور پی نواری در دو حالت موازی و عمود بر هم مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شده در حالتی که حفره عمود بر محور پی است، منحنی فشار- جابه‌جایی دارای شیب تندتر بوده و ظرفیت باربری در این حالت بیشتر است. شکل ۲-۳ منحنی فشار- جابه‌جایی را برای پی نواری سطحی در دو حالت عمود و موازی با محور حفره دایره‌ای پیوسته نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲ منحنی فشار-جابجایی پی نواری سطحی در دو حالت عمود و موازی با حفره دایره‌ای پیوسته [۲]

نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که یک عمق بحرانی<sup>۱</sup> وجود دارد و تنها زمانی که حفره زیرزمینی بالاتر از این عمق قرار گیرد، بر پایداری پی تأثیر خواهد گذاشت. عمق بحرانی به عوامل زیادی از جمله شکل پی، شکل حفره، جهت‌گیری حفره، اندازه حفره و نوع خاک بستگی دارد. شکل ۳-۳ نمودار این عمق بحرانی را برای پی‌های نواری نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> critical depth



شکل ۳-۳- عمق بحرانی حفره پیوسته در زیر پی نواری [۲]

### ۳-۶ بررسی عملکرد پی نواری روی خاک لایه بندی شده<sup>۱</sup> با حفره و بدون

#### حفره

در این پژوهش عملکرد پی نواری بر روی خاک لایه بندی شده (دولایه ای) و خاک همگن، در هر دو حالت با حفره و بدون حفره، توسط اعظم<sup>۲</sup> و همکارانش (۱۹۸۹) مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]. این مطالعه بر اساس مفهوم روش اجزا محدود و استفاده از یک برنامه کامپیوتری دوبعدی انجام شده است. خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر، مشابه دو پژوهش قبلی ([۱] و [۲])، EPK است و ظاهراً از برنامه کامپیوتری بکار رفته در همان تحقیقات استفاده شده است. این مطالعه سه موضوع را مورد بررسی قرار داده است: (۱) پی نواری قرار گرفته روی حفره مستطیلی و هم مرکز با آن در یک سیستم خاک-سنگ بستر، (۲) پی نواری قرار گرفته روی حفره دایره ای و هم مرکز با آن در یک سیستم خاک

<sup>1</sup> Stratified

<sup>2</sup> Azam

لایه‌ای که لایه بالا نرم‌تر از لایه زیرین است و ۳) پی نواری قرار گرفته روی حفره دایره‌ای و هم‌مرکز با آن در یک سیستم خاک لایه‌ای که لایه بالا سخت‌تر از لایه زیرین است. تأثیر پارامترهای مختلفی بر عملکرد پی مورد بررسی قرار گرفته، از جمله، عمق سنگ بستر، ضخامت لایه خاک، نسبت مقاومت دو لایه خاک به یکدیگر و شرایط حفره شامل اندازه و موقعیت قرار گیری آن. بخشی از نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد در صورتی که سنگ بستر در فاصله نزدیکی از پی قرار گیرد، موقعیت قرار گیری آن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد پی خواهد داشت و با افزایش این فاصله، از تأثیر آن بر پی کاسته خواهد شد. تا جایی که در فاصله حدود ۶ برابر عرض پی، این تأثیر ناچیز و قابل چشم‌پوشی خواهد بود.

### ۳-۷ بررسی عددی تأثیر عرض پی در تحلیل برهم کنش<sup>۱</sup> تونل- پی سطحی

نبیل نقی<sup>۲</sup> در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ برهم کنش تونل- پی سطحی و تأثیر آن از تغییرات عرض پی را مورد بررسی قرار داده است [۵]. در این پژوهش، سیستم پی- خاک- تونل به کمک نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور صحت سنجی پروسه عددی و مدل‌سازی مصالح، یک مقایسه بین مدل و نمونه‌ی نسبتاً کوچک آزمایشگاهی انجام شده است.

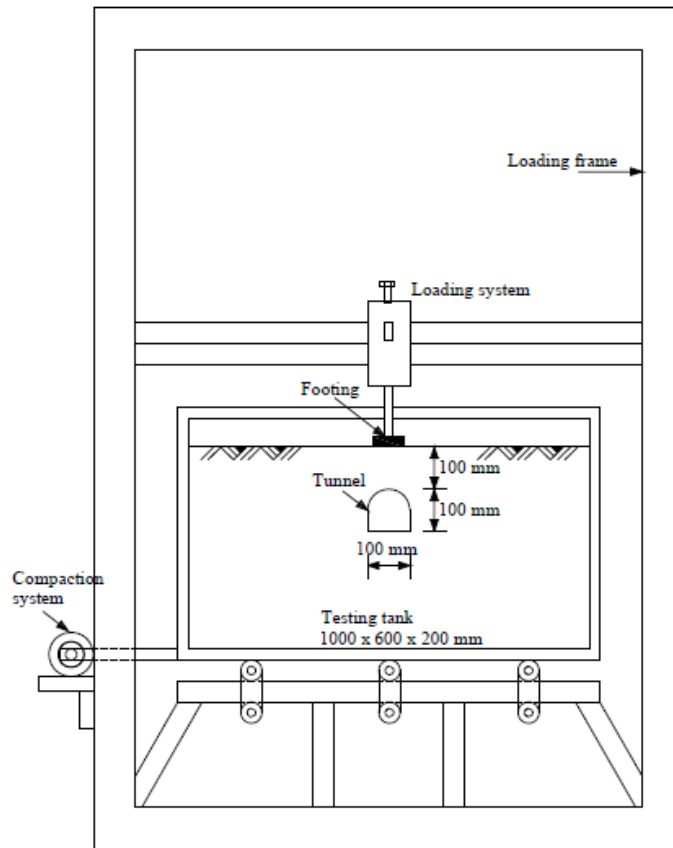
تئوری ظرفیت باربری خاک در اساس برای پی نواری روی خاک هموزن ماسه‌ای و رسی ارائه شده و سپس به منظور وارد کردن تأثیر پارامترهای دیگر از جمله شکل پی و شرایط بارگذاری، گسترش داده شده است. با توجه به این موضوع، قابل ذکر است که این تئوری را نمی‌توان در شرایطی که خاک دارای حفره یا تونل است به کار برد.

نمونه آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش، شامل یک تانک به ابعاد داخلی ۱۰۵۰mm (طول)، ۲۰۰mm (عرض) و ۶۰۰mm (عمق) است. شکل ۳-۴ تصویری از این تانک و سیستم بارگذاری مورد

<sup>1</sup> Interaction

<sup>2</sup> Nabil M. Nagy

استفاده را نشان می‌دهد. بار استاتیکی به وسیله‌ی یک دستگاه بارگذاری با تقویت ۱:۱۰، اعمال می‌شود. تغییر شکل و کرنش در تاج و دیواره‌های تونل اندازه‌گیری می‌شوند. اندازه‌گیری‌ها در وسط پوشش تونل انجام می‌شوند. همچنین سه گیج کرنش سنج درست در همان نقاط اما بیرون از تونل، برای اندازه‌گیری کرنش نصب شده‌اند. گیج‌ها قبل از جاگذاری تونل داخل تانک، روی آن نصب شده و قرائت اولیه آنها ثبت می‌شود. در هر افزایش بار، تغییر شکل و کرنش قرائت می‌شوند. بارگذاری به صورت گام به گام است و تا زمانی که خاک یا تونل دچار گسیختگی شوند ادامه می‌یابد.



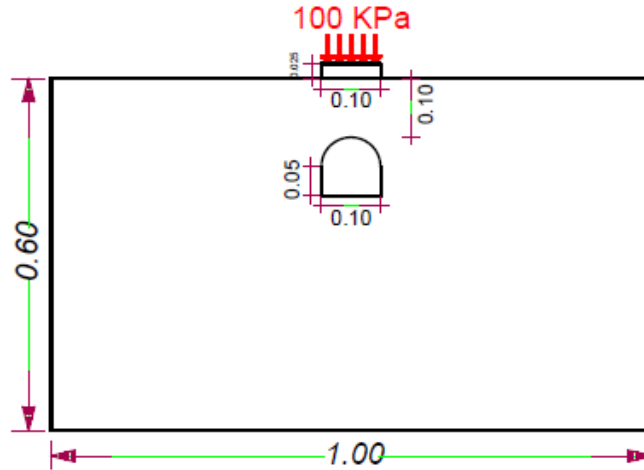
شکل ۳-۴- تصویری شماتیک از نمونه آزمایشگاهی [۵]

در این پژوهش همچنین از یک مدل عددی نعل اسبی<sup>۱</sup> که درست مانند نمونه‌ی آزمایشگاهی در خاک ماسه‌ای قرار گرفته است، برای مدل‌سازی تونل استفاده شده است. در این برنامه خاک به صورت

<sup>1</sup> Horseshoe-shaped

فصل سوم: بررسی اثر حفاری تونل بر نشست پی ها در تحقیقات گذشته

غیر کشسان<sup>۱</sup> مور-کلمب و پوشش تونل و پی به صورت الاستیک خطی<sup>۲</sup> مدل شده است. ابعاد مدل مطابق شکل ۳-۵ است.

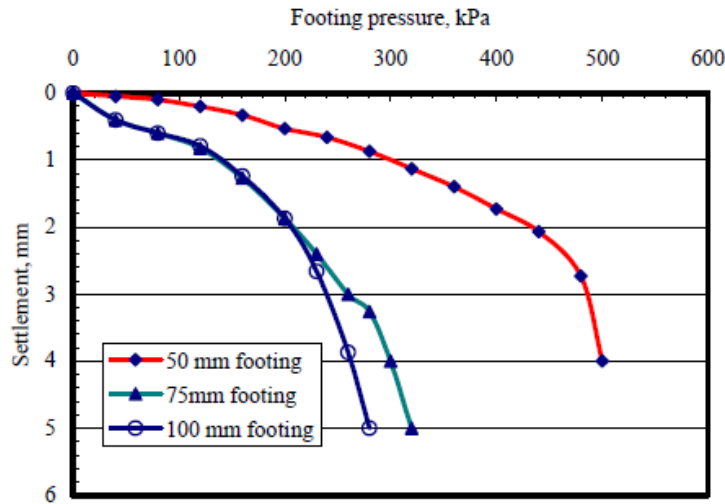


شکل ۳-۵- ابعاد مدل عددی [۵]

در این مدل یک بار خارجی افزایشی بر روی پی اعمال می‌شود. فشار از صفر تا  $500 \text{ kPa}$  و با گام‌های  $100$  کیلو پاسکالی افزایش می‌یابد. پوشش تونل به صورت استیل گالوانیزه و با ضخامت  $3.5 \text{ mm}$  (t) مدل شده است. ارتفاع داخلی و عرض تونل هر دو  $100 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش عرض تونل ثابت در نظر گرفته شده و سه مدل عددی برای عرض‌های  $50$ ،  $75$  و  $100 \text{ mm}$  پی ساخته شده است. به دلیل تقارن و هم مرکز بودن پی و تونل، اندازه‌گیری‌ها در تاج و یکی از دیوارهای تونل انجام شده است. شکل ۳-۶ نشست پی را به صورت تابعی از فشار اعمال شده بر پی و در سه عرض متفاوت نشان می‌دهد. بر اساس شکل در یک عرض و عمق ثابت برای تونل، هر افزایشی در عرض پی، باعث افزایش نشست پی خواهد شد.

<sup>1</sup> inelastic

<sup>2</sup> Linear elastic



شکل ۳-۶- نمودار نشست پی در مقابل فشار وارد بر پی [۵]

### ۳-۸ مطالعه تأثیر حفاری تونل های شهری بر سازه های سطحی

محمد صالح صالحی و سعید ابریشمی در پژوهشی (۱۳۹۰)، مسأله‌ی اندرکنش تونل- خاک- سازه‌های سطحی را در شرایط استاتیکی به صورت عددی، با روش اجزا محدود و با استفاده از نرم افزار Plaxis مدل سازی کرده‌اند [۶]. آنها تأثیر عواملی نظیر تراکم خاک، عمق، قطر و ضخامت پوشش تونل و میزان سربار سطحی بر مسأله را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در نهایت و بر اساس تحلیل نتایج بدست آمده و پردازش این نتایج، ثوابت رابطه‌ی پیشنهادی پک<sup>۱</sup> را که یکی از مهمترین و پرکاربردترین رابطه‌ها در این زمینه می‌باشد، بدست آورده‌اند.

بسیاری از محققین از این تابع نمائی ارائه شده توسط پک (۱۹۶۹)، (رابطه ۳-۱) که یک رابطه تجربی است، برای تعیین منحنی گودی نشست ناشی از حفاری تونل (شکل ۳-۷) استفاده می‌نمایند.

$$S_x = S_{max} \cdot \exp\left(\frac{x^2}{2l^2}\right) \quad \text{رابطه ۳-۱ [۶]}$$

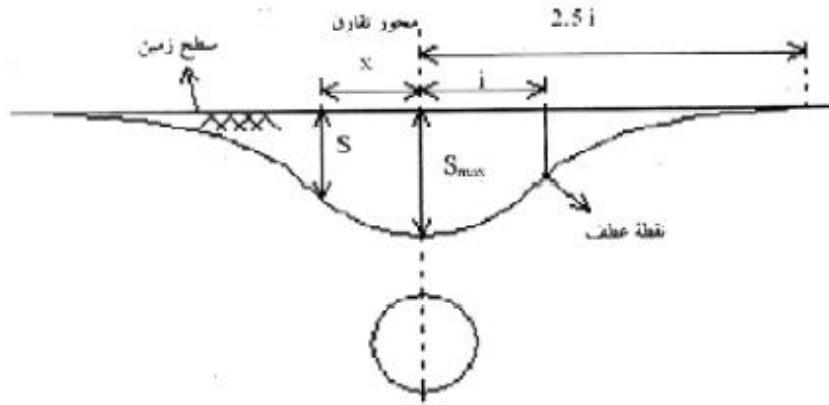
در این رابطه،  $S_x$  نشست در فاصله‌ی  $x$  از محور تقارن مسأله،  $S_{max}$  حداکثر نشست در محور تونل و  $l$  فاصله نقطه‌ی عطف گودی نشست تا خط مرکزی تونل است. تحقیقات متفاوتی جهت تعیین

<sup>1</sup> Peck



فصل سوم: بررسی اثر حفاری تونل بر نشست پی ها در تحقیقات گذشته

پارامترهای این رابطه صورت گرفته است. در این تحقیق [۶] با استفاده از نرم افزار Matlab و برازش منحنی، مقدار ثوابت این رابطه برای شرایط مختلف محاسبه گردیده است.



شکل ۳-۷- منحنی گودی نشست در اثر حفر تونل [۶]

شرایط کرنش مسطح در این تحلیل فرض شده که امکان مدلسازی و تحلیل دوبعدی را فراهم می-سازد. از المانهای ۱۵ گرهی برای مش بندی استفاده شده است. با توجه به قرارگیری دو نوع مصالح متفاوت در کنار یکدیگر، المانهای سطح مشترک با مشخصات مقاومتی ۰,۶۶ مشخصات خاک، در مرز بتن پوشش تونل و خاک استفاده شده است.

جنس مصالح خاکی، دانه‌ای و رفتار آنها الاستو پلاستیک مور- کلمب فرض شده است. جهت بررسی تأثیر مشخصات خاک بر مسأله، سه تراکم مختلف سست، متوسط و متراکم با مشخصات ذکر شده در جدول ۳-۱ برای خاک انتخاب شده است. همچنین چسبندگی خاک‌های دانه‌ای با توصیه راهنمای نرم افزار Plaxis 2D برابر ۰,۲kPa در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۱- مشخصات خاک ماسه‌ای با سه تراکم متفاوت [۶]

تراکم خاک			واحد	مشخصات خاک	
مقاوم	متوسط	سست		شناسه	نام
۱۸	۱۶/۵	۱۵	kN/m <sup>3</sup>		وزن مخصوص مرطوب
۲۰	۱۸/۵	۱۷	kN/m <sup>3</sup>		وزن مخصوص اشباع
۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۰	-		ضریب پواسون
۵۰۰۰۰	۳۴۰۰۰	۱۸۰۰۰	kPa	E	مدول الاستیسیته
۰/۲	۰/۲	۰/۲	kPa	C	چسبندگی
۳۶	۳۲	۲۸	درجه		زاویه اصطکاک داخلی
۶	۰	۰	درجه		زاویه اتساع
۰/۵	۱/۰	۱/۳	%	V <sub>1</sub>	نسبت انقباض حجمی

یکی از موارد اصلی مورد بررسی در این پژوهش "نشست سطح زمین" است. پژوهش حاضر به بررسی نتایج نشست سطح زمین تحت تأثیر تغییر پارامترهایی از جمله تراکم خاک، قطر تونل، عمق قرار-گیری تونل و غیره و تحلیل این نتایج پرداخته است.

### ۳-۹ بررسی تأثیر حفاری تونل های کم عمق شهری بر ظرفیت باربری پی های

#### سطحی

همایون جهانیان (۱۳۹۱)، مراحل مختلف حفاری تونل‌های کم عمق را با استفاده از روش المان‌های محدود مدل سازی و توزیع تنش در خاک و تأثیر آن بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی را مورد بررسی قرارداد [۷]. در این تحلیل شالوده‌ی نواری با عمق مدفون صفر مفروض است. تونل‌های ایجاد شده بدون پوشش بتنی می‌باشند. تحلیل‌ها به صورت سه بعدی و در شرایط اعمال جابه‌جایی به کمک نرم-افزار اجزا محدود Plaxis 3D انجام گرفته است. مرزهای قائم محیط توسط تکیه‌گاه غلتکی و مرز افقی

تحتانی محیط توسط تکیه‌گاه مفصلی بسته شده است. در این مدل‌سازی خاک به صورت همگن فرض شده است و کل خاک از یک جنس در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق مدل رفتاری خاک مور-کلمب می‌باشد. مدل سازی به صورت گام به گام انجام شده است. در این مدل نگهداری جبهه‌ی حفاری با شبیه سازی رفتار مکانیکی بنتونیت انجام شده است. برای این منظور فشار بنتونیت از بالای جبهه‌ی حفاری تا پایین به صورت خطی افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت وجود حفرات زیرزمینی، با افزایش عرض شالوده، ظرفیت باربری نهایی پی کاهش می‌یابد و علت آن است که با افزایش عرض شالوده عمق گوه گسیختگی بیشتر شده و به حفره نزدیکتر می‌گردد و تداخل منطقه تحت تأثیر تنش ناشی از بارگذاری پی و تنش‌های ناشی از تغییر شکل‌های ایجاد شده در اثر حفاری تونل بیشتر خواهد شد و این تداخل محدوده تنش‌ها ظرفیت باربری شالوده را کاهش خواهد داد. همچنین با افزایش قطر تونل به شرط ثابت بودن عمق استقرار تاج تونل، ظرفیت باربری شالوده واقع بر آن کاهش می‌یابد. علاوه بر آن مشاهده شد که با کاهش قطر تونل، منحنی تغییرات ظرفیت باربری بر حسب نشست به سمت حالت بدون حفره میل خواهد کرد. در این تحلیل به دلیل اینکه تونل ایجاد شده بدون پوشش بتنی می‌باشد، افزایش قطر تونل با محدودیت همراه خواهد بود، زیرا با افزایش قطر تونل ممکن است پایداری آن به خطر افتد و عملاً میزان کارایی شالوده را کاهش داده یا از بین ببرد.

### ۳-۱۰ تحلیل و بررسی تأثیر حفاری تونل‌های شهری به روش NATM<sup>۱</sup> بر

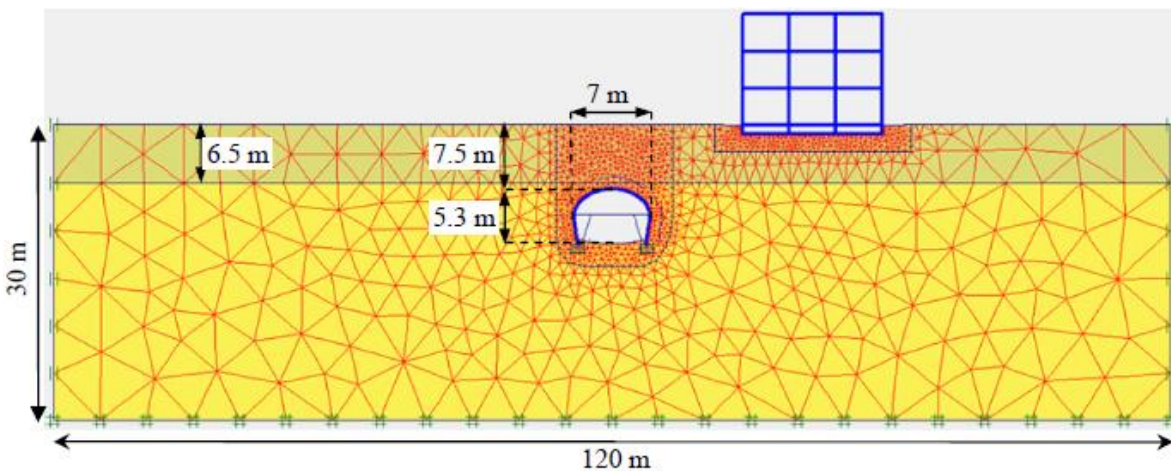
#### سازه‌های اطراف (مطالعه موردی تونل امداد مشهد)

تونل امداد مشهد در حد فاصل بیمارستان امام رضا (ع) و بیمارستان قائم (عج) طراحی و اجرا گردیده است. این تونل در عمق ۷,۵ متری از سطح و در زمین نرم اجرا شده است. حفر تونل در خاک نرم و در مناطق شهری با مشکلات تأمین پایداری تونل و ساختمان‌های مجاور در زمان حفاری و بهره

<sup>۱</sup> New Austrian Tunneling Method

برداری روبرو است. لذا علی غفاری سرجامی و سعید ابریشمی (۱۳۹۱) در پژوهشی به بررسی اثرات حفاری تونل امداد به روش NATM و اندرکنش بین سازه‌های سطحی و تونل، به کمک مدل‌سازی عددی، پرداخته‌اند [۸]. بدین منظور تأثیر تقدم و تأخر در احداث تونل و سازه‌های سطحی و فاصله سازه‌ها از تونل بر نشست حداکثر زمین و نیروهای پوشش تونل مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور بخشی از تونل امداد مشهد که به روش NATM حفر گردیده و سازه‌های اطراف آن شبیه سازی گردیده است. ابتدا مدل عددی با فرض عدم وجود سازه‌های اطراف مورد تحلیل و مقایسه با طرح اصلی تونل قرار گرفته است که نتایج حاصله مؤید صحت و دقت مدل می‌باشد. سپس تأثیر ساختمان‌های اطراف بر تونل با تغییر فاصله سازه از تونل در دو حالت وجود ساختمان‌ها قبل از حفر تونل و احداث ساختمان‌ها بعد از حفر تونل مورد مطالعه قرار گرفته است.

نرم‌افزار اجزا محدود Plaxis 2D برای ساخت مدل عددی انتخاب شده است. تونل امداد مشهد با مقطع نعل اسبی به عرض دهانه ۷ متر و ارتفاع ۵٫۳ متر در عمق ۷٫۵ متر از سطح زمین شبیه سازی شده است (شکل ۲-۸).



شکل ۳-۸- هندسه، مش‌بندی و شرایط تکیه‌گاهی مدل عددی تونل امداد و سازه‌های اطراف [۸]



شکل ۳-۹- مراحل اجرای تونل امداد به روش NATM [۸]

در این پژوهش و با توجه به مطالعات انجام شده قبلی، تحلیل‌ها با دو مقدار  $\sum Mstage$  برابر ۰,۵ و ۰,۷ جهت ساخت مرحله‌ای انجام شده است. از مدل ساخته شده جهت مطالعه اندرکنش ساختمان‌های مجاور و تونل امداد در دو حالت زیر استفاده شده است:

الف) وجود ساختمان‌ها پیش از حفر تونل (شرایط A)

ب) احداث ساختمان‌ها پس از حفر تونل (شرایط B)

تغییرات نشست در برابر فاصله سازه از تونل و تغییرات نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی پوشش تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۱۱-۳ بررسی اندرکنش خاک- سازه در اثر حفر تونل و باربرداری

رولف کاتزنباخ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در مقاله‌ای [۹]، نتایج حاصل از مشاهدات و اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده در دو پروژه بزرگ در آلمان و اسپانیا را ارائه کردند. اولین مورد تونل قطار سریع‌السیری بود که از مرکز شهر بارسلونا می‌گذشت. این تونل با قطر ۱۱,۵۵m از نزدیکی دو ساختمان بزرگ و مهم که جز میراث جهانی یونسکو هستند، می‌گذرد. پروژه دوم مربوط به تخریب یک ساختمان ۱۴ طبقه در فرانکفورت آلمان است. در زیر این ساختمان یکی از ایستگاه‌های سیستم متروی شهر و تونل‌های منتهی به آن قرار دارد. این مقاله به بررسی اندازه‌گیری‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی<sup>۲</sup> انجام شده بر روی تأثیر پارامترهای هندسی مثل عمق قرارگیری تونل و پارامترهای

<sup>۱</sup> Rolf Katzenbach

<sup>۲</sup> Geotechnical & geodetic

اجرایی مثل سرعت پیشروی حفاری، پرداخته است. در طی این پژوهش اطلاعات جدیدی در مورد وابستگی ظرفیت باربری و تغییرشکل خاک به زمان بدست آمده، به ویژه اگر یک فاصله زمانی زیاد بین تخریب (باربرداری) و ساخت مجدد سازه‌ای دیگر (بارگذاری مجدد)، وجود داشته باشد.

### ۱۲-۳ جمع بندی و خلاصه

تحقیقات انجام شده پیشین در رابطه با موضوع تأثیر حفر تونل بر رفتار پی‌ها، عموماً به بررسی پی‌های گسترده و یا نواری (شامل تنها یک نوار) قرار گرفته بر روی خاک‌هایی با مدل رفتاری مور-کلمب پرداخته‌اند. به عنوان بخشی از مجموعه تحقیقات انجام شده در این زمینه، در ادامه و تکمیل تحقیقات پیشین، در این پژوهش رفتار پی‌های نواری (شامل سه نوار) تحت اثر حفر تونل و میزان نشست غیر یکنواخت در زیر پی‌ها، در خاک‌های ماسه‌ای و رسی با مدل‌های رفتاری مور-کلمب و سخت شونده بررسی می‌گردد.



فصل چهارم  
مدل سازی عددی تونل



## ۴-۱ مقدمه

در فصل قبل پژوهش‌های انجام شده برای بررسی رفتار متقابل پی‌ها و تونل‌ها مرور شدند. بیشتر این پژوهش‌ها به کمک شبیه سازی عددی و با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف عددی انجام شده‌اند. با توجه به مزایا و معایب و قابلیت‌های روش شبیه سازی عددی و نرم‌افزارهای مختلف، در این پژوهش از راهکار شبیه‌سازی عددی و نرم‌افزار اجزا محدود Plaxis 2D استفاده می‌شود. در ابتدای این فصل برخی مشخصه‌های بررسی، مانند نوع خاک و پارامترهای آن، مشخصات تونل، پوشش تونل و غیره شرح داده می‌شود. سپس روش عددی، نرم‌افزار Plaxis 2D، مدل عددی، المان-های پوشش، مدل‌های رفتاری خاک و غیره معین می‌گردند. در ادامه مراحل شبیه سازی و مشخصات هر مرحله و دقت مدل عددی بررسی می‌گردد.

## ۴-۲ روش انجام کار

هدف این پژوهش بررسی رفتار پی‌های نواری سطحی در اثر حفر تونل است. حفر یک تونل سطحی در خاک می‌تواند اثرات متفاوتی بر روی پی‌های قرار گرفته در محدوده اثر حفاری بگذارد. اثراتی مانند نشست و یا جابه‌جایی افقی سطح زمین از این جمله‌اند. در این پژوهش برای بررسی رفتار پی از مدل-های عددی استفاده می‌شود. مدل‌های عددی با شبیه‌سازی حفاری و پوشش گذاری تونل، تنش‌ها و جابه‌جایی‌های پی و تونل را محاسبه می‌کنند. این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 2D ساخته می‌شوند. این نرم‌افزار با استفاده از روش عددی اجزا محدود کار می‌کند.

برای ساخت مدل عددی ابتدا باید نوع خاک و ویژگی‌های تونل مشخص شوند. در این پژوهش دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی در نظر گرفته شده است که رفتار آن‌ها با دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت‌شونده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مشخصات تونل شامل عمق قرارگیری، قطر و ضخامت پوشش تونل است.

با ساخته شدن مدل عددی یک ابزار مناسب برای مطالعه رفتار پی و تونل در اثر اندرکنش با یکدیگر فراهم می‌گردد. از این ابزار برای بررسی اهمیت و تأثیر پارامترهای مختلف خاک، تونل و پی در اندرکنش مذکور استفاده می‌کنیم. در این گونه مطالعه‌ها یک ویژگی مشخص انتخاب و با ثابت نگه داشتن سایر متغیرها، شبیه‌سازی‌هایی با تغییر این پارامتر اجرا می‌گردد. به این صورت تأثیر این مشخصه بر رفتار پی و تونل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای مثال در بررسی عمق تونل شبیه‌سازی-هایی با عمق‌های متفاوت تونل اجرا می‌شوند. در این مدل‌سازی‌ها سایر پارامترها (قطر تونل، پوشش تونل، مشخصات پی و غیره) تغییر نمی‌کنند. نتایج شبیه‌سازی‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند و بر اساس تفاوت‌ها و شباهت‌های آنها اهمیت و نحوه تأثیرگذاری یک ویژگی، مشخص می‌گردد. پارامترهای مدل رفتاری خاک، قطر تونل و اندازه سربار پی از جمله ویژگی‌هایی هستند که به این شکل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

#### ۴-۳ خاک

در قسمت قبل گفته شد خاک مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها خاک ماسه‌ای (دانه‌ای) و رسی (چسبنده) است. با توجه به اثرپذیری احتمالی متغیرهایی از جمله نشست (کلی و نسبی) از مدل رفتاری خاک، در این پژوهش دو مدل مور-کلمب و خاک سخت‌شونده مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات خاک‌های بکار رفته در هر دو مدل رفتاری، در جداول ۴-۱ آورده شده است. در این پژوهش مقدار چسبندگی خاک‌های ماسه‌ای بنابر توصیه راهنمای نرم افزار پلکسیس، ۰,۲ در نظر گرفته شده است.

## جدول ۴-۱- مشخصات خاک‌های بکار رفته در شبیه‌سازی‌ها

## الف- مشخصات خاک ماسه‌ای

Soil model	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\Phi$ (Degree)	$\Psi$ (Degree)	$\nu$	C (kPa)	$E_{elastic}$ (MPa)	$E_{oed}$ (MPa)	$E_{50}$ (MPa)	$E_{ur}$ (MPa)	$p^{ref}$ (kPa)	Power coefficient (m)
MC	۱۶	۳۳	۳	۰,۳	۰,۲	۳۰	-	-	-	-	-
HS	۱۶	۳۳	۳	۰,۳	۰,۲	-	۳۰	۳۰	۹۰	۱۰۰	۰,۵

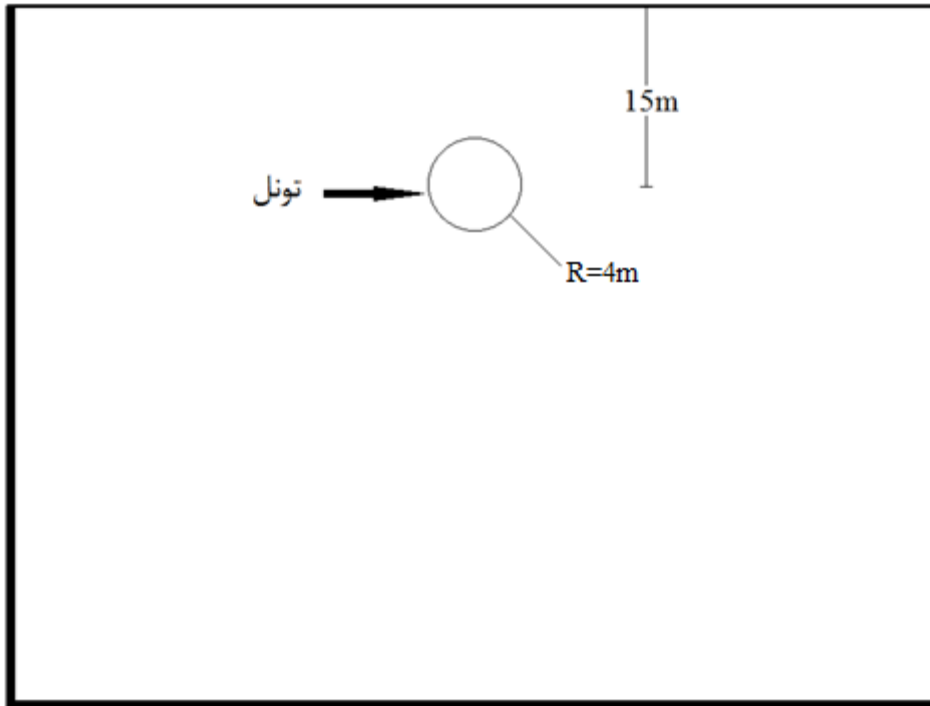
## ب- مشخصات خاک رسی

Soil model	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\Phi$ (Degree)	$\Psi$ (Degree)	$\nu$	C (kPa)	$E_{elastic}$ (MPa)	$E_{oed}$ (MPa)	$E_{50}$ (MPa)	$E_{ur}$ (MPa)	$p^{ref}$ (kPa)	Power coefficient (m)
MC	۱۶	۲۳	۰	۰,۳۵	۲۰	۱۵	-	-	-	-	-
HS	۱۶	۲۳	۰	۰,۳۵	۲۰	-	۱۵	۱۵	۴۵	۱۰۰	۰,۵

## ۴-۴ تونل

در این پژوهش مدل‌سازی تونل‌ها بر اساس شرایط حفاری و پوشش‌گذاری در تونل‌های حفر شده با دستگاه‌های TBM/EPB انجام شده است، بر همین اساس تونل‌های مورد بررسی دایره‌ای شکل هستند. قطر تونل‌های دایره‌ای از ۶ تا ۱۰ متر بوده که در حدود مقادیر معمول در این نوع ماشین‌های حفار می‌باشند و در عمق‌های متفاوتی از سطح زمین شبیه‌سازی شده‌اند. عمق تونل در این پژوهش متغیر و بین ۸ تا ۱۸ متر از سطح زمین انتخاب شده است (فاصله مرکز تونل تا سطح زمین). این محدوده یک عمق معمول برای تونل‌های مترو است. در اکثر مدل‌های این پژوهش، قطر تونل ۸m و حداکثر عمق قرارگیری تونل در مدل‌ها ۱۸m است. بر این اساس نسبت پوشش بالای تونل به قطر آن، در بیشترین حالت، معادل ۲,۲۵ است. با توجه به قرار گرفتن این مقدار در بازه صفر تا ۲,۵ این تونل از نوع تونل‌های سطحی است و حفر آن باعث ایجاد نشست سطحی و تغییر تنش‌هایی در سطح

زمین می‌گردد. شکل ۱-۴-۱ نمایی از یک تونل دایره‌ای به قطر ۸ متر را در عمق ۱۵ متری نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴-۱- نمایی از تونل شبیه‌سازی شده

#### ۱-۴-۴ پوشش تونل

مشخصات مکانیکی و هندسی پوشش تونل بر اساس مقادیر معمول و مورد استفاده در نمونه‌های واقعی و اجرایی انتخاب شده است. این پوشش از قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت<sup>۱</sup>) تشکیل شده است که توسط خود دستگاه حفار در دیواره تونل نصب می‌شوند. مدل رفتاری پوشش، الاستیک انتخاب شده است. جدول ۲-۴ مشخصات مکانیکی پوشش تونل را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴- مشخصات مکانیکی پوشش تونل

$T$ (cm)	$A$ ( $m^2/m$ )	$EA$ (MN/m)	$I$ ( $m^4$ )	$EI$ (MN. $m^2/m$ )	$\nu$	$W$ (kN/m/m)
۳۵	۰,۳۵	۸۷۵۰	۰,۰۰۳۵۷	۸۹,۳	۰,۱۵	۸,۴

<sup>1</sup> Segment

## ۴-۵ پی

پی در نظر گرفته شده در این تحقیق یک پی نواری سطحی است. این پی دارای سه نوار است که عرض نوارها بین ۲ تا ۳ متر و فاصله‌ی نوارها از یکدیگر بین ۵ تا ۷ متر متغیر است. هدف این پژوهش اندازه‌گیری و مقایسه نشست‌های نسبی بین نوارهای پی و همچنین نشست حداکثر نوار میانی در محور تونل در دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت‌شونده است. جدول ۴-۳ مشخصات مکانیکی هر نوار را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳- مشخصات مکانیکی پی

$W (kN/m^2)$	$EI (kN.m^2/m)$	$EA (kN/m)$	$T (m)$
۲۴	۱۰۸۳۰۰۰	۱۳۰۰۰۰۰۰	۱

## ۴-۵-۱ بارگذاری پی (فشار وارد بر پی)

بار وارد بر پی به صورت گسترده یکنواخت به هر سه نوار وارد می‌شود. بررسی تأثیر بزرگی سربار بر اندرکنش تونل و پی با اعمال بارهایی با چهار بزرگی  $150, 200, 250$  و  $300$   $kN/m^2$  بر نوارها انجام شده است. این مقادیر به صورت حدودی و به ترتیب معادل‌اند با بار وارد بر پی در ساختمان‌های ۱ یا ۲ طبقه، ۳ یا ۴ طبقه، ۵ یا ۶ طبقه و ۷ یا ۸ طبقه.

## ۴-۶ روش عددی اجزا محدود

پیدایش روش اجزا محدود<sup>۱</sup> به حل مسائل پیچیده‌ی الاستیسیته و تحلیل سازه‌ها در مهندسی عمران و هوا فضا برمی‌گردد. این روش حاصل کار الکساندر هرنیکوف<sup>۲</sup> (۱۹۴۱) و ریچارد کورانت<sup>۳</sup> (۱۹۴۲)

<sup>۱</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>۲</sup> A. Hrennikoff

<sup>۳</sup> R. Courant

می‌باشد. با اینکه روش کار این دو دانشمند کاملاً متفاوت بود، اما یک ویژگی مشترک داشت: تقسیم یک دامنه‌ی پیوسته (ماده) به یک سری زیردامنه (قطعات کوچکتر ماده) به نام المان (جزء).

روش اجزا محدود یا روش المان محدود که به اختصار (FEM) نامیده می‌شود، روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی. اساس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند، است. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسأله مهم این است که به معادله ساده‌ای که از نظر عددی پایدار است - به این معنا که خطا در داده‌های اولیه و در حین حل آنقدر نباشد که به نتایج نامفهوم منتهی شود- برسیم. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد که روش اجزا محدود یکی از بهترین آنهاست. این روش در حل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده (مانند وسایل نقلیه و لوله‌های انتقال نفت)، یا هنگامی که دامنه متغیر است، یا وقتی که دقت بالا در همه جای دامنه الزامی نیست و یا اگر نتایج همبستگی و یکنواختی کافی را ندارند، بسیار مفید می‌باشد. به عنوان مثال در شبیه‌سازی یک تصادف در قسمت جلوی ماشین، نیازی به دقت بالای نتایج در عقب ماشین نیست [۱۰].

بعضی فواید روش اجزای محدود به شرح زیر می‌باشد:

۱. قدرت روش اجزای محدود در انواع اندازه‌ها و مدل کردن سازه‌ها با هندسه دلخواه،
۲. قدرت روش در برخورد با بارگذاری دلخواه از جمله بارگذاری حرارتی،
۳. سازه اجزای محدود شبیه به سازه واقعی است و پدیده مجزا و غیر قابل تصور نیست.

روش‌های تقریبی مانند روش تفاضل محدود، تمام این ویژگی‌ها را ندارد و یا دارای ویژگی‌های محدودتری هستند.

## ۴-۷ نرم افزار Plaxis

پلکسیس نرم‌افزاری است که برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک‌ها بسته به هدف مورد نظر لازم است. با این نرم‌افزار می‌توان خاک برداری و خاک ریزی مرحله‌ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان‌های مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدل سازی نمود. اولین ویرایش این نرم‌افزار به منظور آنالیز سدهای خاکی احداث شده بر روی خاک‌های نرم در قسمت‌های کم ارتفاع و پست کشور هلند و به سفارش مدیریت منابع آب آن کشور در دانشگاه صنعتی Delft در سال ۱۹۸۷ تهیه و سپس در سال ۱۹۹۳ قابلیت‌های آن گسترش داده شده که توسط موسسه Center for Civil Engineering Research and Codes نیز مورد تأیید و پشتیبانی قرار گرفته است. در این نرم‌افزار مدل‌های رفتاری مور-کلمب، مدل سخت شونده‌گی هذلولی، مدل نرم شونده‌گی و مدل نرم شونده‌گی خزشی قابل به کارگیری است. همچنین با این نرم‌افزار می‌توان فرایند ساخت و حفاری را توسط فعال کردن و غیر فعال کردن المان‌ها در مرحله محاسبات مدل کرد. نمونه‌ای از کاربرد این قابلیت، انجام آنالیز لایه‌به‌لایه در پایداری شیب‌ها، سدها و تونل‌ها می‌باشد [۱۱].

## ۴-۸ شبیه سازی مدل های عددی

ابعاد محیط در تمام مدل‌های ساخته شده در این پژوهش  $80 \times 60$  m است. المان‌های مورد استفاده مثلثی و ۱۵ گره‌ای هستند. اولین گام در ساخت مدل، رسم هندسه کلی خاک، پی و تونل است. برای این منظور پس از رسم محیط خاک با ابعاد گفته شده، با استفاده از المان‌های صفحه‌ای (Plate) نوارهای پی رسم شده‌اند. با توجه به فرض استفاده از ماشین حفار TBM/EPB در این پژوهش، در ساخت مدل تونل، نوع تونل Bored Tunnel (تونل سپری) انتخاب شده و تونل در اعماق مورد نظر از سطح خاک، قرار داده شده است. با توجه به قرار گیری دو نوع مصالح متفاوت در کنار یکدیگر، در مرز بتن پوشش تونل و خاک، از المان سطح مشترک با مشخصات مقاومتی ۰,۶۶ خاک استفاده شده

است. سطح آب زیرزمینی در کف مدل و خاک خشک فرض شده است. از مش ریز برای مش بندی استفاده شده و در مرحله بعد، با انتخاب نوارهای پی، خاک اطراف آنها یک مرحله ریزتر شده است. تحلیل مدل در سه فاز انجام شده است. در فاز اول پی و بار روی پی فعال شده اند. با توجه به اینکه در این پژوهش صرفاً بررسی تغییر شکل های ناشی از حفر تونل مورد نظر است، در پایان فاز اول، با استفاده از گزینه Reset Displacements to Zero تمام تغییر مکان های حاصل از بارگذاری پی، صفر می شوند. در فاز دوم بر اساس فرض مسأله مبنی بر استفاده از دستگاه حفار EPB و شرایط سگمنت گذاری در این دستگاه، خاک داخل تونل غیر فعال و پوشش بتنی تونل فعال می شوند. در این نوع روش حفاری و پوشش گذاری عموماً بعد از نصب سگمنت ها، فاصله ای (گپ) بین سگمنت و خاک پشت آن باقی می ماند که با تزریق دوغاب سیمان پر می شود. در مدل سازی تونل ها تأثیر این موضوع با اعمال انقباض بر تونل در مدل وارد می شود. مقدار این انقباض که به صورت درصد بیان می شود بر اساس مطالعات میر و تیلور<sup>۱</sup> [۱۲]، برای تعدادی از انواع خاک ها و روش های حفاری در جدول ۳-۴ آورده شده است. بر این اساس مقدار انقباض در این پژوهش برای هر دو نوع خاک ماسه ای و رسی و با تراکم متوسط، ۰٫۵ درصد در نظر گرفته شده است. این انقباض در فاز سوم به مدل اعمال می شود.

جدول ۴-۴- میزان کاهش حجم برای انواع خاک و روش حفاری [۱۲]

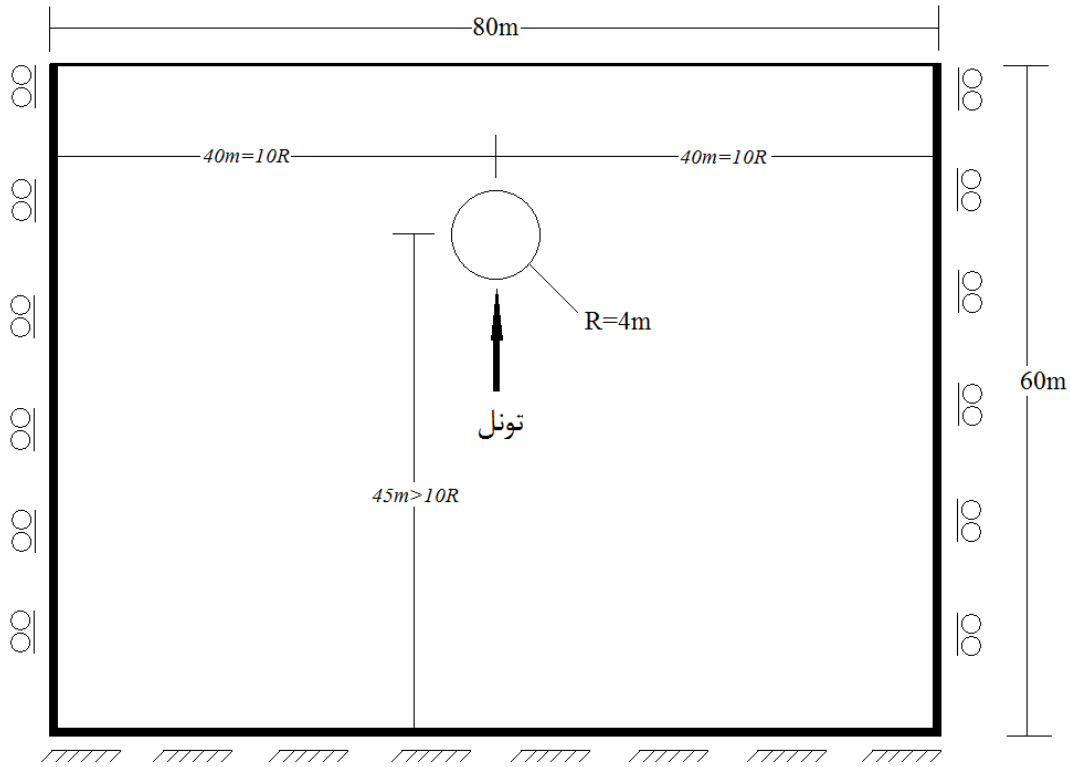
$V_I$		خاک	روش ساخت
حداکثر	حداقل		
۱/۳	۰/۲	ماسه نرم شل	EPB/ slurry TBM
۲	۱	رس نرم	
۱	۰/۰۳	رس ماسه دار سخت	
۱	۰/۲	ماسه شل	
۲	۱	رس سخت	TBM
۰/۵	۰/۵	رس لندن	NATM

<sup>1</sup> Mair & Tailor



#### ۴-۸-۱ ابعاد مدل عددی

ابعاد مدل عددی بر سرعت تحلیل و دقت نتایج آن اثر می‌گذارد. کوچک بودن ابعاد مدل باعث بالا رفتن سرعت تحلیل‌ها می‌شود. از طرفی در مدل‌های عددی کوچک تنش‌ها و جابه‌جایی‌های محاسبه شده واقعی نیستند و نتایج مدل دقت مناسبی ندارند. کم بودن زمان تحلیل در مدل‌های عددی کوچک به دلیل حجم کم محاسبه‌ها در این مدل‌ها است. دلیل پایین بودن دقت مدل‌های کوچک، رسیدن تغییر تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها به مرزهای این مدل‌ها و ادامه نیافتن محاسبه در این قسمت‌ها است. همچنین اختصاص ابعاد خیلی بزرگ به مدل، باعث ایجاد افزایش در وقت و هزینه خواهد شد. در ادبیات مهندسی ابعاد مدل‌های عددی مورد استفاده برای بررسی سازه‌های زیرزمینی معمولاً ۱۰ تا ۱۲ برابر شعاع سازه زیرزمینی در نظر گرفته می‌شوند. ابعاد مدل‌های عددی به گونه‌ای انتخاب می‌گردد تا در مرحله شبیه‌سازی‌های استاتیکی تنش‌های ایجاد شده به کناره‌های مدل نرسند، بخش‌های کناری خاک دست‌نخورده باقی بمانند و از دقت مدل کاسته نشود. بر این اساس طول مدل عددی ۸۰ و ارتفاع آن ۶۰ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۲ ابعاد مدل عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲- ابعاد مدل عددی

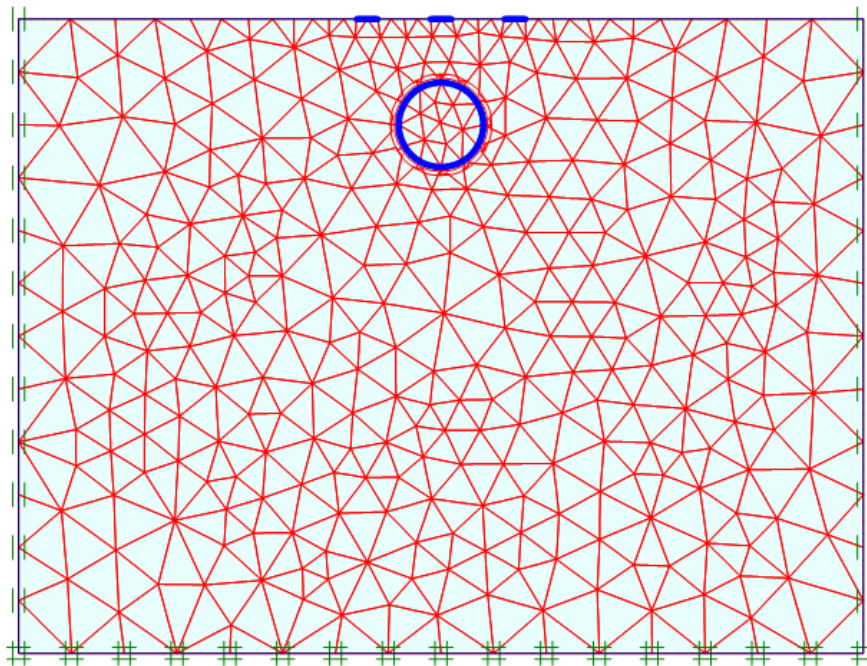
#### ۴-۸-۲ شرایط مرزی مدل عددی

در اکثر مدل‌های عددی شرایط مرزی یکسان و مطابق آنچه در ادامه می‌آید استفاده می‌گردد. بخش پایینی مدل عددی در دو جهت افق و قائم محدود می‌گردد و فقط چرخش در آن امکان پذیر است. مرزهای کناری مدل در جهت افقی محدود گردیده و حرکت در جهت محور قائم و چرخش در آنها آزاد است. با استفاده از این شرایط مرزی تنش‌ها و جابه‌جایی‌های واقعی در شبیه‌سازی‌های استاتیکی در مدل عددی ایجاد می‌شوند. این شرایط مرزی به کمک دستور Standard fixities اعمال می‌شوند. شکل ۴-۲ شرایط مرزی مدل‌های عددی را نشان می‌دهد.

#### ۳-۸-۴ شبکه ی اجزا محدود

ایجاد کننده ی شبکه بندی در نرم افزار پلکسیس، یک نسخه ویژه ایجاد کننده شبکه مثلثی می باشد که توسط سپرا<sup>۱</sup> توسعه داده شده است. این شبکه بندی نامنظم به نظر می رسد اما عملکرد بهتری نسبت به شبکه بندی منظم دارد. ایجاد شبکه ی اجزا محدود نخست نیاز به مشخص کردن پارامتر درشتی عمومی<sup>۲</sup> دارد. در این نرم افزار پنج سطح درشتی عمومی وجود دارد: بسیار درشت، درشت، متوسط، ریز، بسیار ریز. همچنین امکان اصلاح شبکه بندی فراهم شده است و می توان بر حسب نیاز شبکه اجزای محدود را به صورت عمومی یا موضعی در مناطق ویژه، ریزتر کرد [۱۳].

در این پژوهش، نخست شبکه اجزا محدود با استفاده از گزینه درشتی عمومی ریز<sup>۳</sup>، ایجاد شده و سپس برای بررسی بیشتر در نواحی زیر نوارهای پی، شبکه ریزتر<sup>۴</sup> شده است. شکل ۳-۴ نمونه ای از شبکه بندی اجزا محدود استفاده شده در مدل های این پژوهش را نشان می دهد.



شکل ۳-۴ شبکه بندی اجزا محدود پی نواری قرار گرفته روی تونل به قطر ۸ متر

<sup>1</sup> Sepra

<sup>2</sup> Global coarseness

<sup>3</sup> fine

<sup>4</sup> refine

#### ۴-۸-۴ ایجاد تنش های اولیه

بسیاری از مسائل تحلیلی در مهندسی ژئوتکنیک نیاز به معیارهایی برای تعیین تنش های اولیه دارند. این تنش ها که به وسیله نیروی گرانش ایجاد می شوند، نشان دهنده ی وضعیت تعادل خاک یا سنگ دست نخورده هستند.

در نرم افزار پلکسیس، تنش های اولیه به وسیله کاربر تعیین می شوند. دو روش برای تعیین این تنش ها وجود دارد:

روش  $K_0$  (K<sub>0</sub>-procedure)

بارگذاری وزنی (Gravity loading)

به عنوان یک قانون، در مواردی با سطح افقی و هر تعداد لایه خاک و خط تراز آب موازی با سطح، تنها باید از روش  $K_0$  استفاده کرد. برای بقیه موارد، کاربر باید از بارگذاری وزنی استفاده کند. شکل ۴-۴ مثال هایی از سطوح غیر افقی و لایه بندی وزنی غیر افقی را نشان می دهد که در آنها باید از بارگذاری گرانشی استفاده کرد.



شکل ۴-۴- مثال هایی از سطوح غیر افقی و لایه بندی وزنی غیر افقی [۱۳]

ضریب  $K_0$  معرف نسبت تنش مؤثر افقی به تنش مؤثر قائم است:

$$K_0 = \sigma'_{xx} / \sigma'_{yy}$$

رابطه ۴-۱

تجربه نشان می دهد، برای یک خاک عادی تحکیم یافته، مقدار  $K_0$  به وسیله رابطه تجربی زیر، به مقدار زاویه اصطکاک خاک ارتباط پیدا می کند [۱۳]:

$$K_0 = 1 - \sin \phi$$

رابطه ۴-۲

در این پژوهش با توجه به مقدار  $\phi$  ( $33^\circ$  برای ماسه و  $23^\circ$  برای رس) و رابطه‌ی تجربی بالا، مقدار  $K_0$  برای ماسه و رس به ترتیب برابر با  $0,455$  و  $0,609$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۸-۵ مدل سازی اجزا فصل مشترک<sup>۱</sup>

نرم افزار پلکسیس از مدل رفتاری ارتجاعی-خمیری مور-کلمب برای توضیح رفتار فصل مشترک در اندرکنش خاک-سازه استفاده می‌کند. برای سطح مشترکی که در حالت ارتجاعی است، تنش برشی مطابق رابطه ۴-۳ و برای حالت خمیری مطابق رابطه ۴-۴ است:

$$|T| < \sigma_n \tan\phi_i + c_i \quad \text{رابطه ۴-۳}$$

$$|T| = \sigma_n \tan\phi_i + c_i \quad \text{رابطه ۴-۴}$$

که در آن  $c_i$  و  $\phi_i$  چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح مشترک هستند. پارامترهای مقاومتی سطح مشترک با مشخصات مقاومتی خاک اطراف آن رابطه دارند. این رابطه از طریق ضریب  $R_{inter}$  و مطابق روابط ۴-۵، به صورت زیر برقرار می‌شود:

$$c_i = R_{inter} c_{soil} \quad \text{رابطه ۴-۵ الف}$$

$$\tan\phi_i = R_{inter} \tan\phi_{soil} \quad \text{رابطه ۴-۵ ب}$$

به طور کلی در اندرکنش خاک و سازه‌ی موجود در آن، سطح مشترک دارای مقاومت کمتری نسبت به لایه‌ی خاک اطراف آن است. این بدین معنی است که  $R_{inter}$  باید از یک، کمتر باشد. مقدار مناسب برای  $R_{inter}$  در حالت اندرکنش بین انواع مختلف خاک و سازه‌ها را می‌توان در متون فنی پیشین یافت. در صورت نبود اطلاعات کافی مقدار  $R_{inter}$ ،  $\frac{2}{3}$  در نظر گرفته می‌شود. مقدار بزرگ‌تر از یک برای  $R_{inter}$  استفاده نمی‌شود [۱۳].

<sup>1</sup> Interface

با توجه به نبود اطلاعات کافی و عدم دسترسی به همه منابع موجود، به پیشنهاد راهنمای نرم افزار و تحقیقات انجام شده پیشین، در این پژوهش مقدار  $R_{inter}$  برابر با ۰,۶۶ در نظر گرفته شد.

#### ۹-۴ بررسی دقت مدل عددی

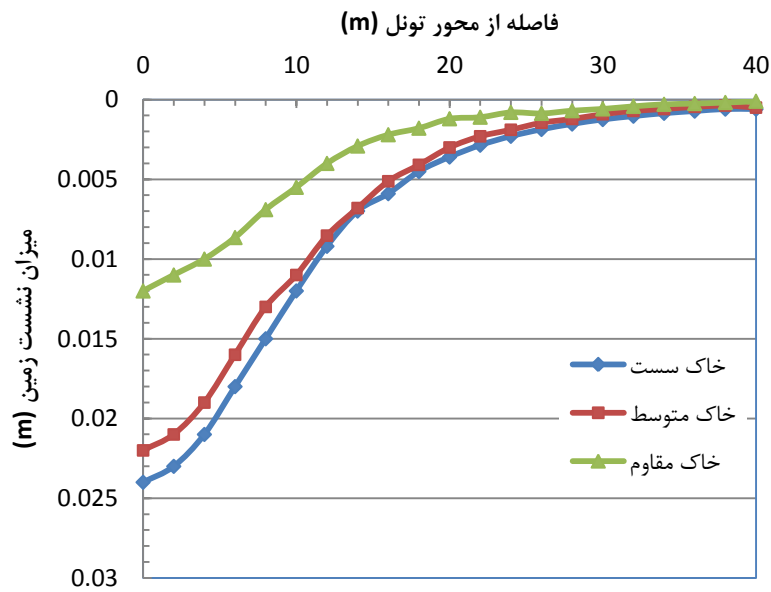
در این پژوهش به منظور بررسی دقت مدل عددی از مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج صالحی و ابریشمی [۶] استفاده شده است. برای این کار تونلی به قطر ۹ متر در عمق ۱۵ متری و در خاک ماسه‌ای با سه تراکم سست، متوسط و مقاوم شبیه‌سازی شده است. مشخصات تونل، پوشش تونل و خاک این مدل، در جداول ۴-۵ و ۴-۶ آورده شده است. این مدل مانند مدل ساخته شده در پژوهش صالحی [۶]، فاقد سربار است. مقادیر نشست حاصل از حفاری تونل در این شرایط، مطابق نمودار شکل ۴-۵ الف بدست آمده که تطابق قابل قبولی با نتایج صالحی داشته و نشان دهنده صحت مدل و روش مدل‌سازی عددی می‌باشد. مقادیر نشست در پژوهش صالحی در نمودار شکل ۳-۸ ب نشان داده شده است.

جدول ۴-۵- مشخصات هندسی و مکانیکی تونل [۶]

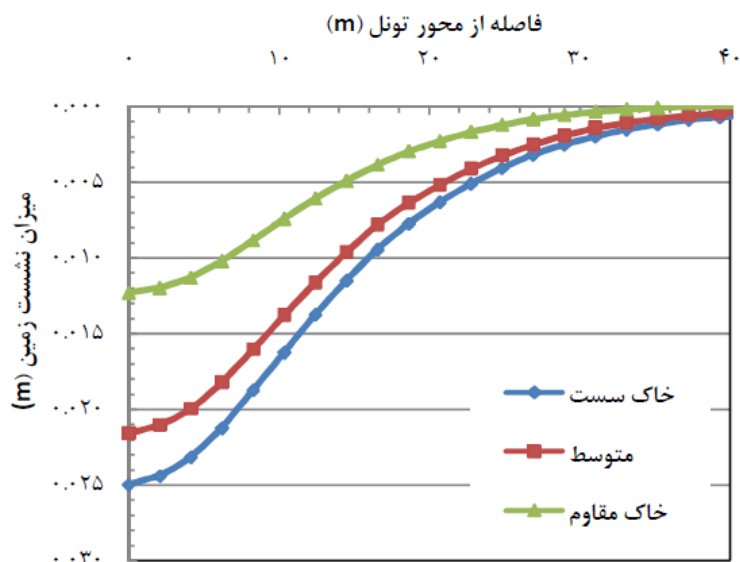
مقدار	واحد	علامت	نام مشخصه
۱۵	m		عمق از سطح زمین تا محور تونل
۹	m	D	قطر تونل
۰,۳۵	m	t	ضخامت پوشش
۲۵	GPa		مدول الاستیسیته پوشش
۰,۱۵	-		ضریب پواسون پوشش

جدول ۴-۶- مشخصات خاک ماسه‌ای با سه تراکم متفاوت [۶]

تراکم خاک			واحد	مشخصات خاک	
مقاوم	متوسط	سست		شناسه	نام
۱۸	۱۶/۵	۱۵	$\text{kN/m}^3$		وزن مخصوص مرطوب
۲۰	۱۸/۵	۱۷	$\text{kN/m}^3$		وزن مخصوص اشباع
۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۰	-		ضریب پواسون
۵۰۰۰۰	۳۴۰۰۰	۱۸۰۰۰	kPa	E	مدول الاستیسیته
۰/۲	۰/۲	۰/۲	kPa	C	چسبندگی
۳۶	۳۲	۲۸	درجه		زاویه اصطکاک داخلی
۶	۰	۰	درجه		زاویه اتساع
۰/۵	۱/۰	۱/۳	%	$V_1$	نسبت انقباض حجمی



(الف)



[ب] [۶]

شکل ۴-۵- تغییرات منحنی گودی نشست با تراکم خاک

#### ۴-۱۰ چگونگی بررسی اثر فشار وارد بر پی

جهت بررسی اثر تغییرات بزرگی سربار بر مقادیر نشست‌های کلی و نسبی پی، با ثابت نگه داشتن تمام مشخصات تونل، خاک و پی، سربارهای  $150$ ،  $200$ ،  $250$  و  $300$   $\text{kN/m}^2$  بر مدل اعمال شده است. بارهای وارده را به صورت تقریبی می‌توان به ترتیب معادل بار ساختمان‌های  $2$ ،  $4$ ،  $6$  و  $8$  طبقه در نظر گرفت. در این مدل‌ها از تونلی به قطر  $8$  متر، در عمق  $10$  متری و پوششی به ضخامت  $35\text{cm}$  استفاده شده است. تأثیر این تغییرات سربار بر مقادیر نشست، در هر دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت شونده مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱۱ چگونگی بررسی اثر عمق تونل

با قرار دادن تونل در عمق‌های بین  $8$  تا  $18$  متر از سطح زمین در یازده عمق، تأثیر این پارامتر بر نشست سطح زمین بررسی شده است. در تمام مدل‌ها قطر تونل  $8\text{m}$ ، ضخامت پوشش  $35\text{cm}$ ، بار وارد بر پی  $200\text{ kN/m}^2$  و عرض نوارهای پی  $2\text{m}$  بوده که در فاصله  $5$  متری از یکدیگر قرار گرفته‌اند. میزان



نشست سطح زمین در هر دو مدل رفتاری مور- کلمب و خاک سخت شونده، در مجموع در ۴۴ مدل مجزا (۱۱ مدل برای خاک ماسه‌ای و رفتار MC، ۱۱ مدل برای خاک ماسه‌ای و رفتار HS، ۱۱ مدل برای خاک رسی و رفتار MC و ۱۱ مدل برای خاک رسی و رفتار HS) بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است.

#### ۱۲-۴ چگونگی بررسی اثر قطر تونل

در بررسی اثر قطر تونل نیز مانند موارد قبل، سایر پارامترها ثابت بوده و نشست سطح زمین در قطرهای ۶ تا ۱۰ متر، در مدل‌های مجزا اندازه‌گیری شده است. پارامترهای ثابت در این مدل‌ها عبارت‌اند از: ضخامت پوشش ۳۵cm، بار وارد بر پی  $200 \text{ kN/m}^2$ ، عرض نوارهای پی ۲m، عمق قرار گیری تونل ۱۰m و فاصله نوارها از یکدیگر ۵m. تأثیر این پارامتر بر میزان نشست سطح زمین با دو مدل رفتاری MC و HS مورد مطالعه قرار گرفته است.

#### ۱۳-۴ چگونگی بررسی اثر فاصله بین نوارهای پی

با توجه به احتمال اثرپذیری مقادیر نشست، از فاصله بین نوارهای پی، عملکرد پی تحت تغییرات این پارامتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مدل‌هایی با قطر تونل ۸m و در عمق ۱۰ متری ساخته شده است. فاصله نوارهای پی در این مدل‌ها، به ترتیب ۵، ۶ و ۷m انتخاب شده است. نوارهای پی همچنین تحت بار  $200 \text{ kN/m}^2$  بوده‌اند. در این پژوهش عملکرد پی در مقابل تغییرات این پارامتر را در خاک‌های ماسه‌ای و رسی، با دو مدل رفتاری MC و HS بررسی و با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم.

#### ۴-۱۴ چگونگی بررسی اثر عرض نوارهای پی

با هدف بررسی تأثیر اندازه عرض نوارهای پی، مدل‌هایی با سه عرض ۲، ۲٫۵ و ۳ متر ساخته شده است. فاصله بین نوارها در تمام این مدل‌ها ۵m است. قطر تونل ۸m انتخاب شده و در عمق ۱۰ متری از سطح زمین قرار گرفته است. تأثیر این پارامتر بر میزان نشست سطح زمین در دو مدل رفتاری MC و HS مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

#### ۴-۱۵ خلاصه و جمع بندی

در این فصل چگونگی انجام پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سعی شد با ارائه توضیحات و همراه با جزئیات لازم، تمام زوایا و نکات مهم در رابطه با چگونگی انجام پژوهش و چرایی انتخاب مقادیر، مدل‌ها، پارامترها و غیره، برای خواننده روشن شود. در ابتدای فصل توضیحاتی در مورد پارامترهای مربوط به خاک، تونل و پی و مقادیر آن‌ها ارائه شد. سپس چگونگی ساخت مدل عددی و انتخاب گزینه‌های مختلف در این مسیر شرح داده شد. روش عددی مورد استفاده، نرم‌افزار و مدل‌های رفتاری خاک معرفی شدند. پس از آن ابعاد مدل‌های عددی و شرایط مرزی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با ساخته شدن مدل عددی، دقت آن مورد بررسی قرار گرفت. در انتها چگونگی انجام بررسی‌ها با تغییر هر یک از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد پی، شرح داده شد.



فصل پنجم  
ارائه و بررسی نتایج پژوهش

## ۱-۵ مقدمه

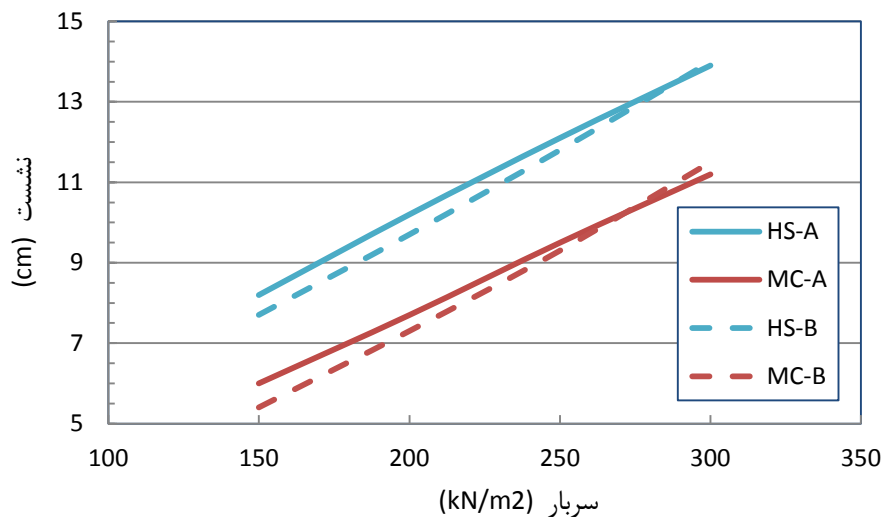
در فصل‌های قبل مطالعه‌های انجام شده در زمینه اندرکنش تونل و پی بررسی گردید و روش تحقیق در این پژوهش انتخاب شد. سپس مراحل ساخت مدل‌های عددی و چگونگی انجام بررسی‌ها مشخص شدند. در این پژوهش اثر قطر و عمق قرارگیری تونل، جنس خاک، مدل رفتاری خاک، عرض نوارهای پی، فاصله بین نوارها و بار وارد بر پی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این فصل نتایج بررسی‌های انجام شده ارائه می‌گردد. در ابتدای فصل نتایج حاصل از اعمال بارهای مختلف وارد بر پی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت بعدی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده با هدف مطالعه اثر عمق تونل، ارائه می‌شوند. در ادامه چگونگی عملکرد پی تحت اثر تغییر مقادیر قطر تونل، فاصله‌ی نوارهای پی از یکدیگر و عرض نوارها شرح داده شده است. تمام بررسی‌های مذکور، برای دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت‌شونده و در دو خاک ماسه‌ای و رسی انجام شده‌اند. مقادیر دقیق نشست‌های بدست آمده از تمام مدل‌ها، در پیوست الف آورده شده است.

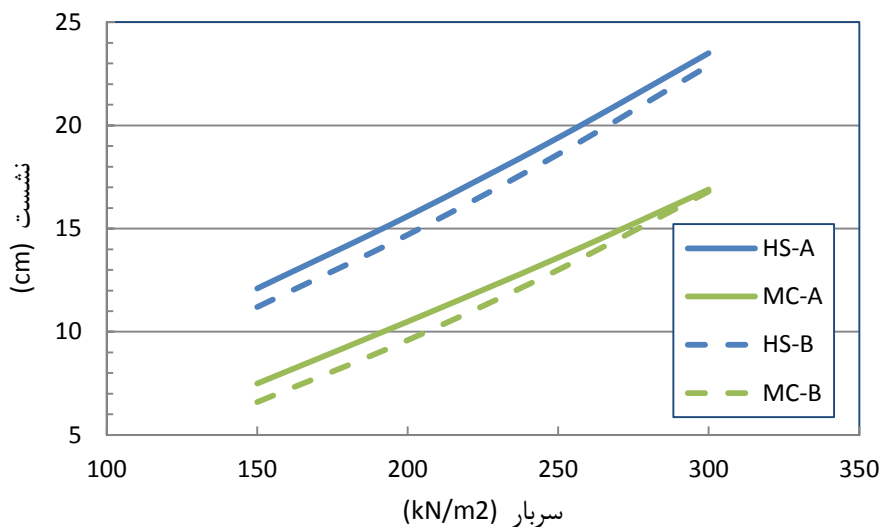
## ۲-۵ بررسی اثر فشار وارد بر پی

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده با اعمال چهار مقدار متفاوت بار بر روی پی، ارائه می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها با هدف بررسی اثر بزرگی بار بر مقدار نشست حداکثر و نسبی پی نواری، پس از حفر تونل، انجام گرفته‌اند. مرکز نوار میانی پی (نقطه A) برای تعیین مقدار حداکثر نشست و مرکز نوار کناری پی (نقطه B)، برای مقایسه و تعیین نشست نسبی بین نوارها، انتخاب شده است. مقادیر این دو نشست تحت تغییرات سربار محاسبه و در دو مدل رفتاری مور-کلمب و خاک سخت‌شونده و دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی، با یکدیگر مقایسه شده است. این نتایج در شکل ۱-۵ نشان داده شده‌اند. همانطور که از شکل دریافت می‌شود، نشست حداکثر سطح زمین با افزایش فشار، افزایش و نشست نسبی بین دو نوار، کاهش نشان می‌دهد. روند افزایش نشست در هر دو مدل رفتاری و هر دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی، خطی و دارای شیب تقریباً یکسان است. مقادیر نشست هر دو

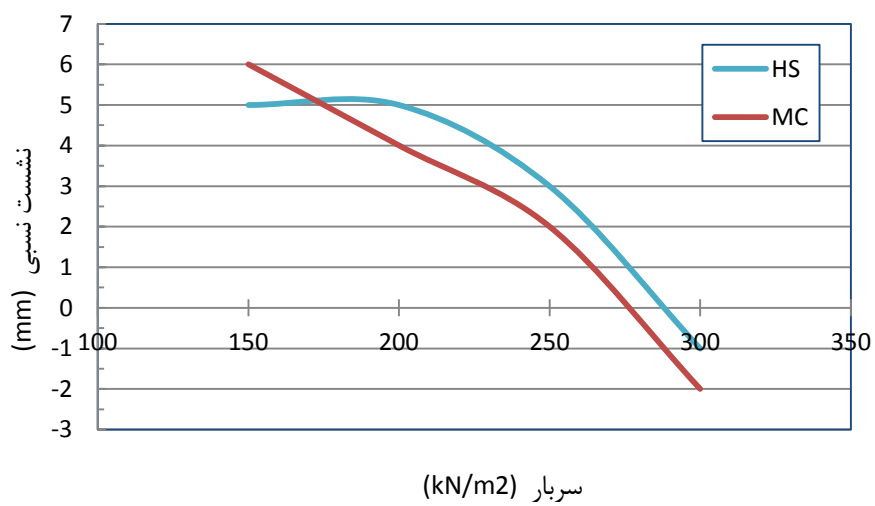
خاک ماسه‌ای و رسی، در مدل رفتاری سخت‌شونده بیشتر از مدل مور-کلمب است. همچنین در هر دو مدل، نشست در رس بیشتر از ماسه است. که این می‌تواند نشان‌دهنده عملکرد بهتر ماسه نسبت به رس در زیر پی باشد، که منطبق بر دانسته‌های پیشین از رفتار این دو نوع خاک نیز است. مقادیر نشست‌های نسبی در نمودارهای ۵-۱ ج و ۵-۱ د نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش سربار، مقادیر نشست در نقاط A و B به هم نزدیک شده (نشست نسبی کاهش یافته) و حتی در خاک ماسه‌ای در نقطه‌ای با یکدیگر برابر می‌شوند (نشست نسبی صفر می‌شود). مقادیر منفی در شکل ۵-۱ ج نشان‌دهنده تغییر تفرع منحنی گودی نشست مجموعه نوارهای پی است. مقادیر دقیق نشست‌ها (خروجی نرم‌افزار) در نوارهای مرکزی و کناری در پیوست الف آورده شده است.



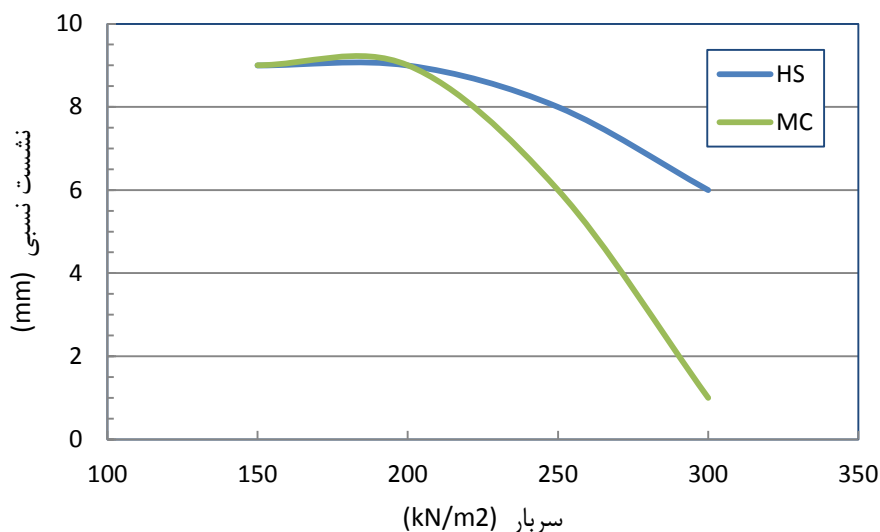
الف) نشست در خاک ماسه‌ای



ب) نشت در خاک رسی



ج) نشت نسبی در خاک ماسه‌ای



(د) نشست نسبی در خاک رسی

شکل ۵-۱ (الف) نشست در خاک ماسه‌ای، (ب) نشست در خاک رسی، (ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، (د) نشست

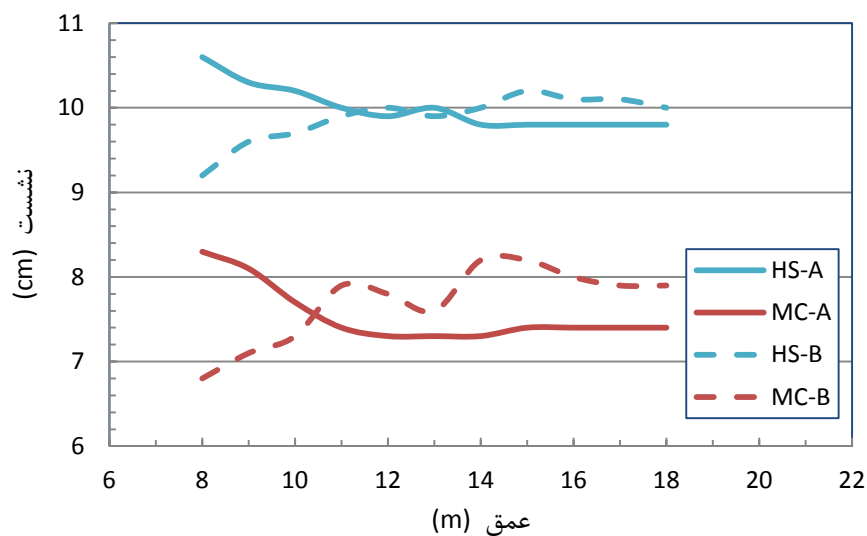
نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر افزایش بار

### ۳-۵ بررسی اثر عمق قرارگیری تونل

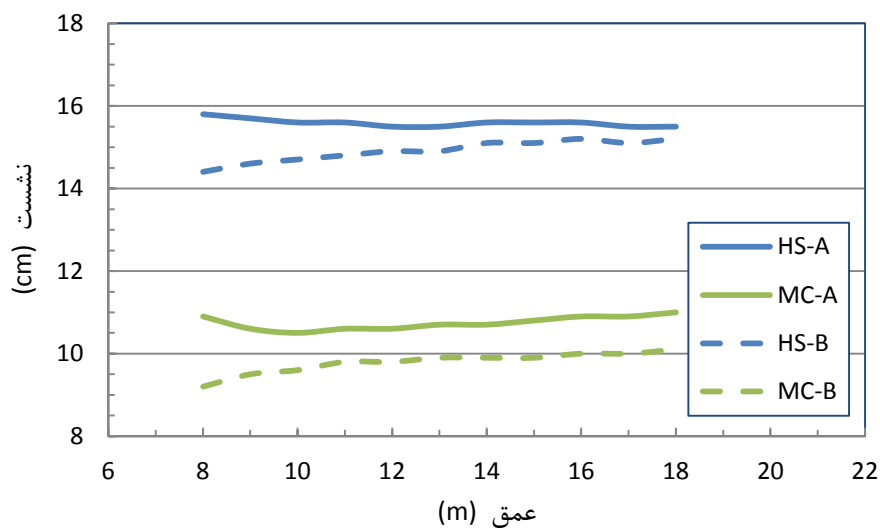
در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی تونل در اعماق بین ۸ تا ۱۸ متر بررسی می‌گردد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. افزایش عمق قرارگیری تونل تا حدود عمق ۱۱ متری از سطح زمین، با کاهش نشست حداکثر پی (نشست نقطه A) در خاک ماسه‌ای همراه است و از آن پس مقدار نشست تقریباً ثابت می‌ماند. ولی در خاک رسی مقادیر نشست حداکثر تقریباً ثابت بوده و از تغییرات عمق تونل اثر نمی‌پذیرد. این روند در هر دو مدل رفتاری MC و HS یکسان است. شدت تغییرات نشست نسبی نیز در هر دو خاک ماسه‌ای و رسی، در حدود عمق ۱۱ متری کاهش پیدا کرده و در حدود عمق ۱۵ متری به سمت مقدار ثابتی سوق پیدا می‌کند. این روند در شکل‌های ۲-۵ ج و ۲-۵ د قابل مشاهده است. مقادیر منفی در شکل ۲-۵ ج نشان دهنده محدب شدن منحنی گودی نشست در زیر مجموعه نوارهای پی است. این رفتار منطبق بر اصول رفتاری است که از خاک‌های



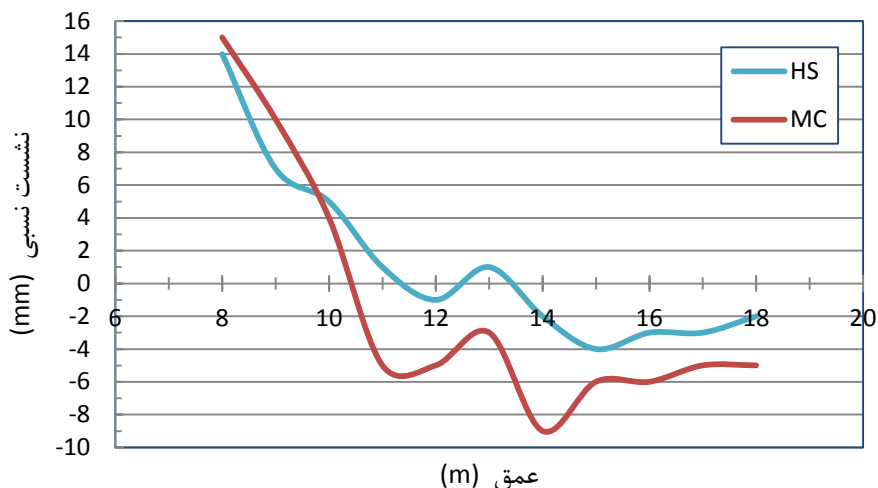
دانه‌ای سراغ داریم و ناشی از فرار ذرات ماسه از زیر گوشه‌های بیرونی پی انعطاف پذیر، تحت اثر بار یکنواخت، به اطراف است.



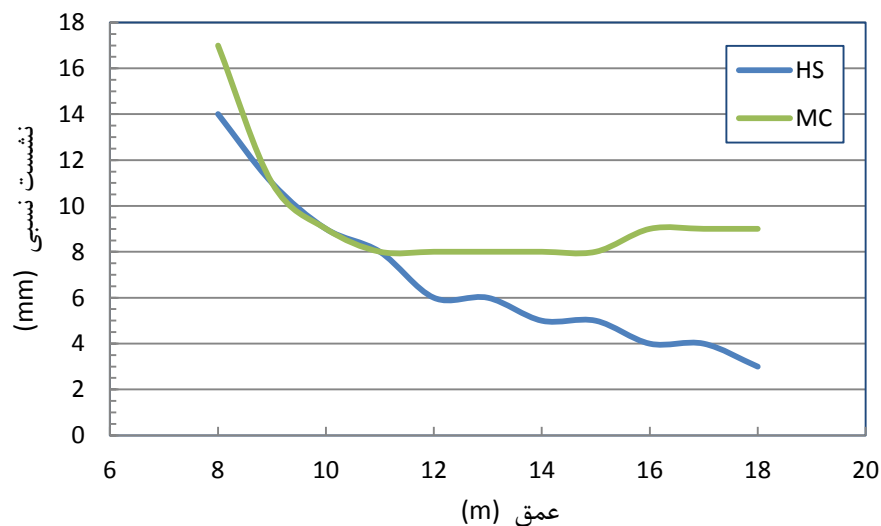
الف) نشست در خاک ماسه‌ای



ب) نشست در خاک رسی



ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای



د) نشست نسبی در خاک رسی

شکل ۲-۵ الف) نشست در خاک ماسه‌ای، ب) نشست در خاک رسی، ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، د) نشست

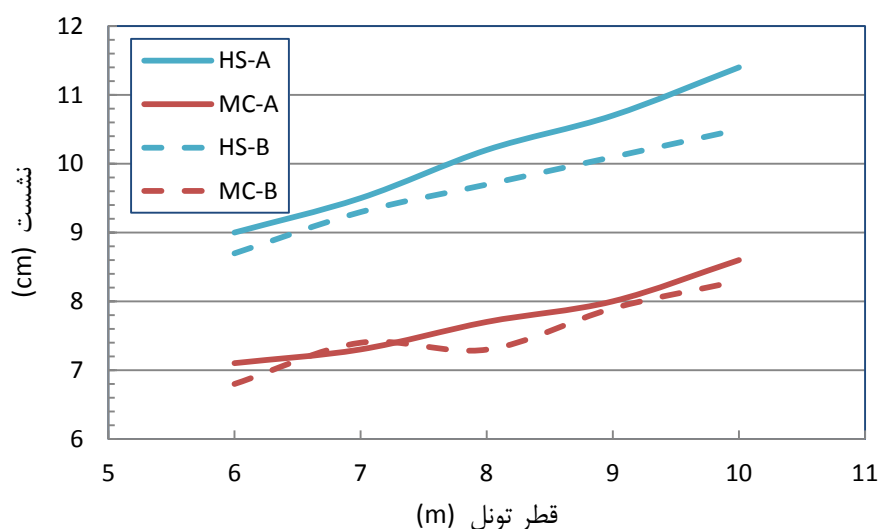
نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات عمق

#### ۴-۵ بررسی اثر قطر تونل

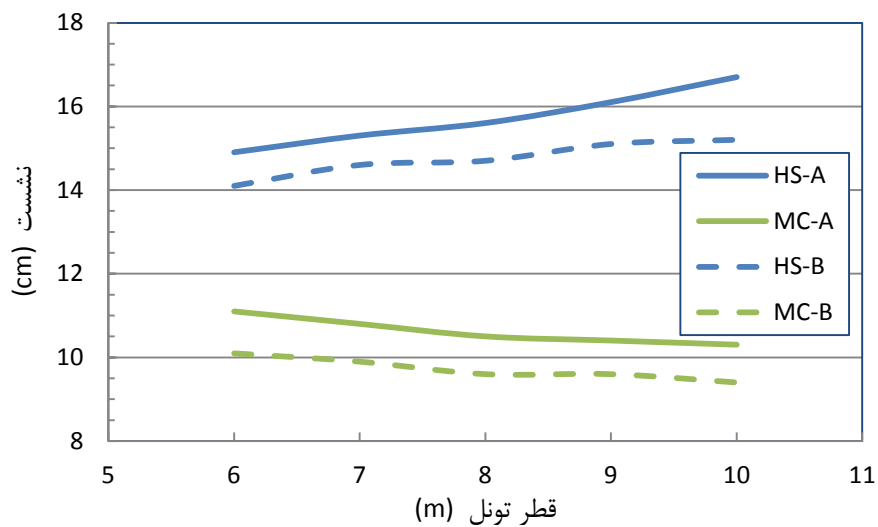
شکل ۳-۵ به بررسی مقادیر نشست حداکثر و نسبی پی نواری تحت اثر تغییرات قطر تونل می‌پردازد.

نمودار شکل ۳-۵ الف در فاصله تغییر قطر تونل از ۶ تا ۱۰ متر روند افزایشی را برای نشست حداکثر

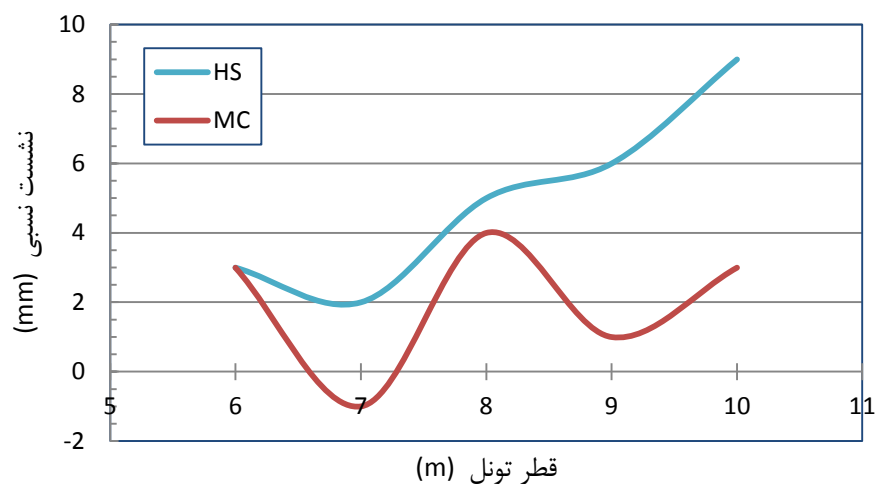
در خاک ماسه‌ای در هر دو مدل رفتاری خاک نشان می‌دهد. این روند نشان از تأثیر زیاد این پارامتر (قطر) بر مقادیر نشست دارد. روند این افزایش نشست تقریباً خطی بوده و در هر دو مدل رفتاری خاک با شیب تقریباً یکسان پیش می‌رود. این روند با شیب کمتری در خاک رسی نیز تکرار شده است. با بزرگ شدن قطر تونل، شعاع دامنه اثر تنش‌های ایجاد شده ناشی از حفاری تونل نیز افزایش می‌یابد و همین امر باعث ایجاد روند افزایشی نشست می‌شود که در بالا به آن اشاره شد. از طرفی با توجه به نشست نقاط B در شکل‌های ۵-۳ الف و ۵-۳ ب (منحنی‌های خط چین) مشاهده می‌شود که رفتار پی در این نقاط نیز مشابه نقاط A بوده و روند مشابهی را طی می‌کند. اختلاف مقادیر نشست-های نسبی در مدل MC تقریباً ثابت می‌ماند و یا تغییرات جزئی می‌کند ولی در مدل HS این اختلاف به ۷mm هم می‌رسد. نوسانات در حدود ۲ الی ۳ میلی‌متر در مقادیر نشست‌های حداکثر و نسبی را شاید بتوان ناشی از خطاهای مدل‌سازی و تحلیلی نرم‌افزار دانست.



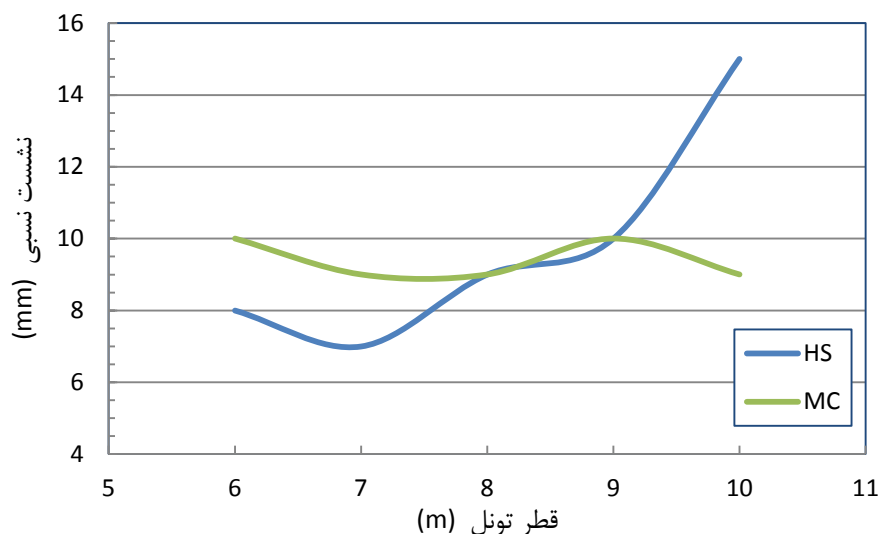
الف) نشست در خاک ماسه‌ای



ب) نشست در خاک رسی



ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای



(د) نشست نسبی در خاک رسی

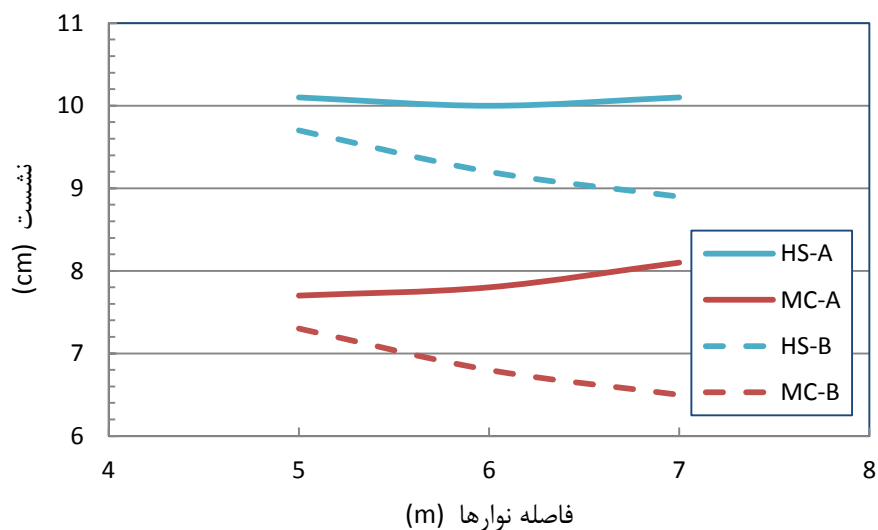
شکل ۵-۳ (الف) نشست در خاک ماسه‌ای، (ب) نشست در خاک رسی، (ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، (د) نشست

نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات قطر تونل

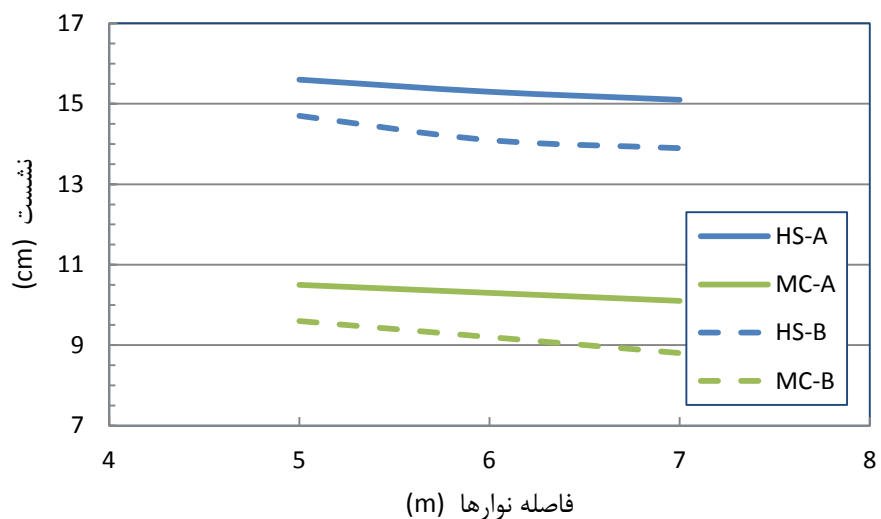
## ۵-۵ بررسی اثر فاصله نوارها از یکدیگر

پارامتر دیگری که مورد مطالعه قرار گرفته است، فاصله نوارهای پی نواری از یکدیگر است. تأثیر این پارامتر با قراردادن نوارها در فواصل ۵، ۶ و ۷ متری از یکدیگر بررسی شده است. نشست در مرکز نوار میانی به عنوان مقدار حداکثر نشست و اختلاف آن با مقدار نشست در مرکز نوار کناری، به عنوان نشست نسبی بین نوارها، معرفی شده است. اشکال ۵-۴الف و ۵-۴ب مقادیر نشست حداکثر و اشکال ۵-۴ج و ۵-۴د مقادیر نشست نسبی را برای هر دو مدل رفتاری MC و HS نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۵-۴الف می‌بینید، مقادیر نشست حداکثر در مدل رفتاری خاک سخت‌شونده حدود ۲cm بیشتر از مدل مور-کلمب است. در خاک ماسه‌ای با افزایش فاصله بین نوارها، در مدل MC شاهد افزایش جزئی مقدار نشست حداکثر هستیم، و در مدل HS تقریباً می‌توان گفت تغییری در مقدار نشست رخ نمی‌دهد. از طرفی مقادیر نشست‌های نسبی، در هر دو مدل رفتاری، با افزایش فاصله نوارها، افزایش پیدا کرده است. با توجه به ثبات تقریبی مقادیر نشست حداکثر، این موضوع نشان از تغییرات نشست در نوار کناری پی دارد. این روند کاهش نشست در نقاط B (نوارهای کناری) با خط

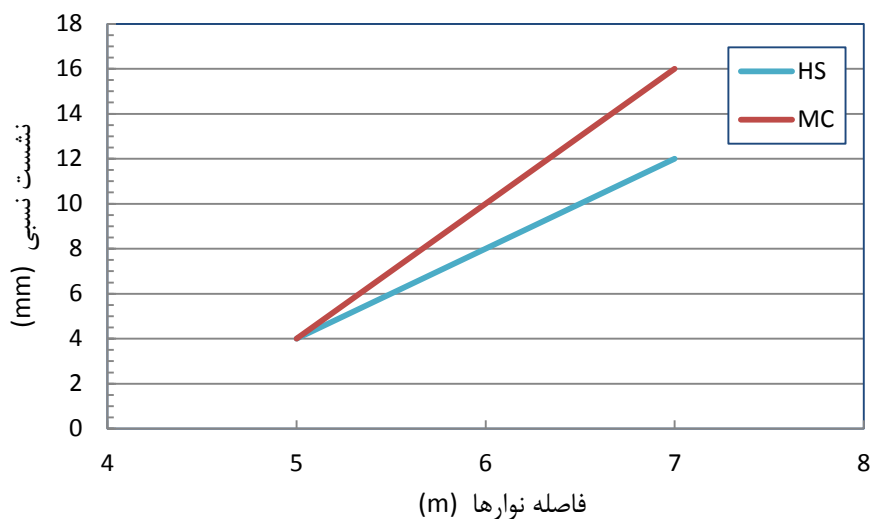
چین در شکل‌های ۴-۵ الف و ۴-۵ ب نشان داده شده است. هرچه نوارها به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند، رفتار مجموعه‌ی نوارها شباهت بیشتری با رفتار یک پی گسترده پیدا می‌کند و نشست‌های نسبی بین نوارها در آن کاهش می‌یابد.



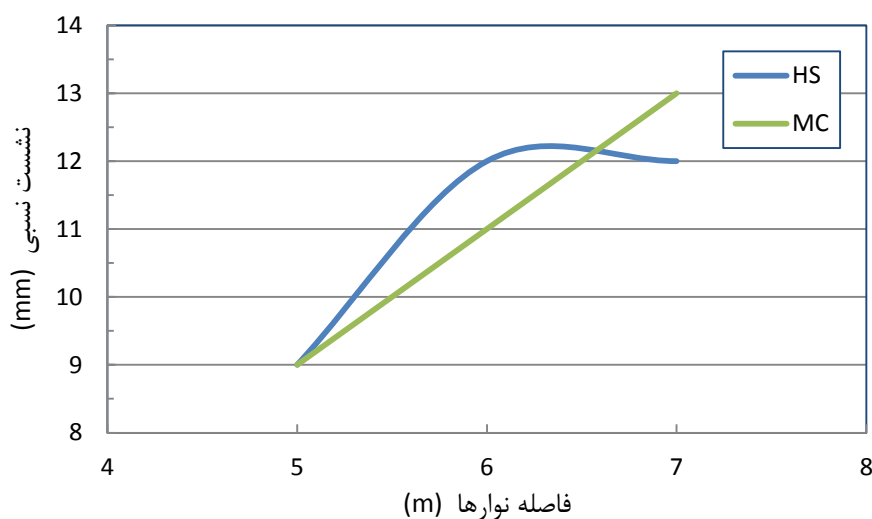
الف) نشست در خاک ماسه‌ای



ب) نشست در خاک رسی



ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای



د) نشست نسبی در خاک رسی

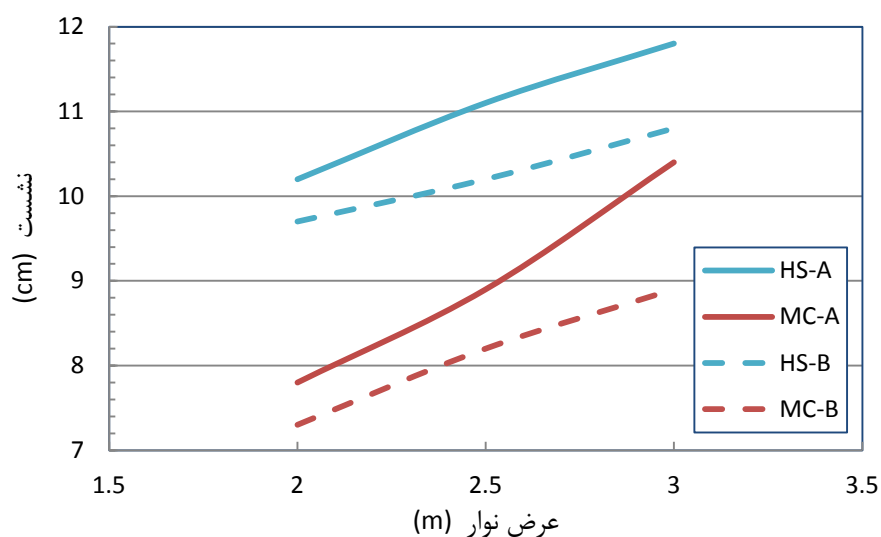
شکل ۴-۵ الف) نشست در خاک ماسه‌ای، ب) نشست در خاک رسی، ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، د) نشست

نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات فاصله نوارها

## ۵-۶ بررسی اثر عرض نوارهای پی

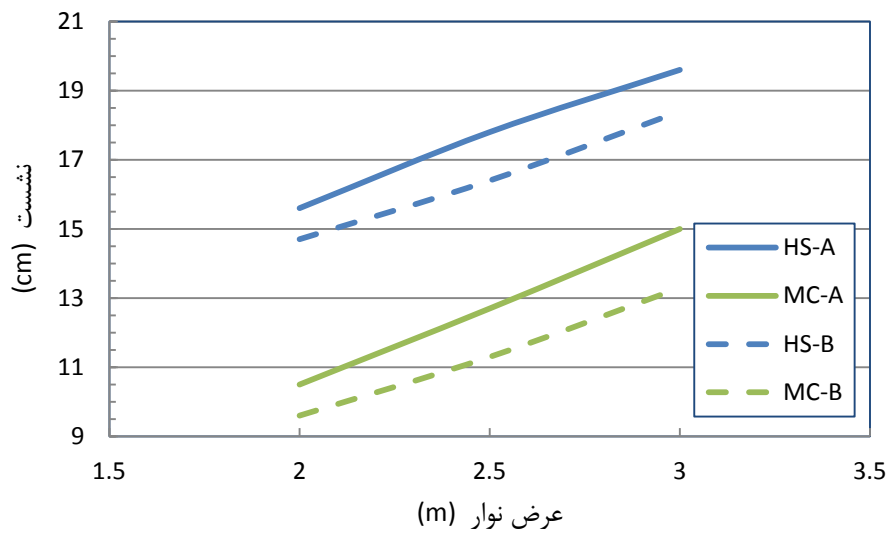
شکل ۵-۵ به بررسی مقادیر نشست حداکثر و نسبی پی نواری تحت اثر تغییرات عرض نوارهای پی می‌پردازد. همانطور که در نمودار شکل‌های ۵-۵ الف و ۵-۵ ب مشاهده می‌شود، در اثر تغییر عرض پی

از ۲ تا ۳ متر، نشست حداکثر در هر دو مدل رفتاری خاک افزایش می‌یابد. روند این افزایش نشست تقریباً خطی بوده و در هر دو مدل رفتاری خاک با شیب تقریباً یکسان پیش می‌رود. این روند افزایشی نشست ناشی از گسترش دامنه تنش‌های زیر پی بر اثر افزایش عرض نوارها و تداخل بیشتر آن با دامنه تنش‌های ناشی از حفاری تونل است. از طرفی با ثابت ماندن فاصله بین نوارها و افزایش عرض نوارها، فاصله نوارهای کناری از محور تونل به تدریج زیاد شده و این نوارها کمتر از نوار میانی تحت تأثیر حفاری تونل قرار می‌گیرند، در نتیجه روند افزایش نشست در آنها شیب کمتری نسبت به نوار میانی داشته و مقادیر نشست نسبی افزایش می‌یابد.

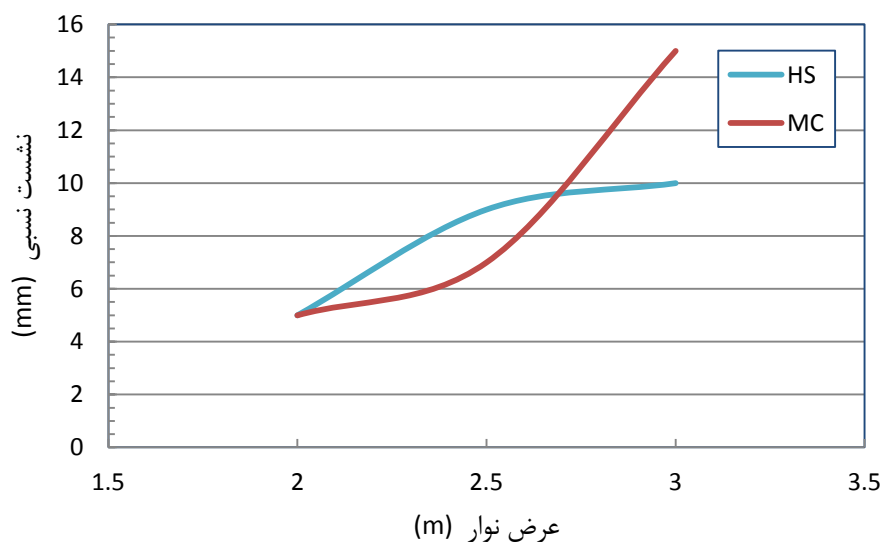


الف) نشست در خاک ماسه‌ای

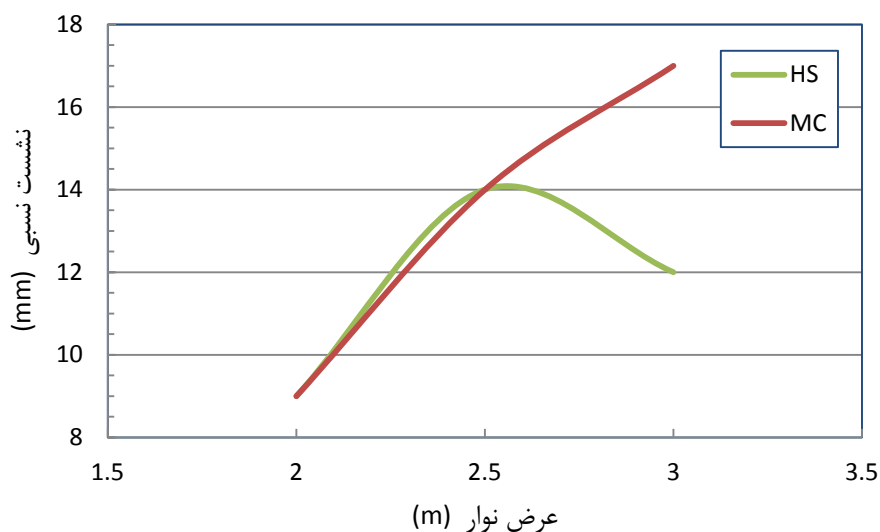




ب) نشست در خاک رسی



ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای



(د) نشست نسبی در خاک رسی

شکل ۵-۵ (الف) نشست در خاک ماسه‌ای، (ب) نشست در خاک رسی، (ج) نشست نسبی در خاک ماسه‌ای، (د) نشست

نسبی در خاک رسی پی نواری در اثر تغییرات عرض نوارها

## ۷-۵ خلاصه و جمع بندی

در این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه گردید. در بخش اول اثر مقادیر مختلف فشار وارد بر پی، روی نشست پی بررسی گردید. نتایج این بخش نشان دهنده رابطه خطی و مستقیم بین افزایش فشار و افزایش نشست حداکثر پی بود. در بخش دوم عمق‌های مختلف قرارگیری تونل مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که در هر شرایط مشخص، عمق خاصی (عمق بحرانی) از قرارگیری تونل وجود دارد که در اعماق بیشتر از آن مقادیر نشست از عمق تونل تأثیر نمی‌پذیرد و به مقدار ثابتی می‌رسد. تأثیر این پارامتر بر روی نشست نسبی نیز به صورتی مشابه بوده و پس از عمق مشخصی، نشست نسبی به سمت مقدار ثابتی سوق پیدا می‌کند. بخش سوم به بررسی اثر تغییرات قطر تونل اختصاص داده شد. افزایش قطر تونل باعث افزایش نشست در هر دو نوار میانی و کناری با روندی تقریباً خطی و مشابه شد و نشست نسبی تقریباً ثابت ماند. در بخش بعد اثر تغییر فاصله بین نوارهای پی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها در این بخش نشان داد که افزایش فاصله بین نوارهای پی تأثیری در نشست حداکثر پی در نوار میانی ندارد. اما با توجه به کاهش نشست در نوارهای کناری، باعث افزایش نشست نسبی بین نوار میانی و نوار کناری می‌شود. در پایان نیز اثر

تغییرات در عرض نوارها بررسی شده است. نتایج بررسی در این زمینه نشان داد که افزایش عرض نوارهای پی با افزایش تداخل دامنه‌های اثر تنش پی و تونل و در نتیجه افزایش نشست حداکثر پی همراه است.

## فصل ششم

### نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها

## ۱-۶ مقدمه

در فصل‌های قبل اهمیت بررسی اندرکنش تونل و پی در اثر حفاری تونل، پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه، روش انجام تحقیق و نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها ارائه گردید. در این فصل نتیجه‌گیری‌های حاصل از خروجی‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات در این زمینه ارائه می‌گردد.

## ۲-۶ نتیجه‌گیری

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش و خروجی‌های آن‌ها (که در فصل قبلی ارائه گردید) می‌توان نتیجه‌گیری‌های کلی زیر را در ارتباط با رفتار پی‌های نواری تحت اثر حفر تونل‌های سطحی، ارائه کرد:

- بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در تمام موارد و با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، مقادیر نشست حداکثر در خاک با مدل رفتاری سخت شونده، بیشتر از خاک با مدل رفتاری مور-کلمب است. این اختلاف چیزی در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد (۲ تا ۳ سانتی‌متر) است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل خاک سخت‌شونده در تحلیل‌های حساس و با اهمیت زیاد مناسب‌تر است و نتایج حاصل دارای ضریب اطمینان بالاتری خواهد بود، در حالی که مدل مور-کلمب نتایجی با ضریب اطمینان کمتر را ارائه می‌کند که برای استفاده در تحلیل‌های با اهمیت کمتر و البته اقتصادی‌تر مناسب است.
- افزایش قطر تونل باعث افزایش دامنه تأثیر تونل و تداخل بیشتر آن با دامنه تنش‌های زیر پی می‌شود. این تداخل باعث افزایش قابل توجه نشست حداکثر پی می‌شود. این روند افزایش نشست در هر دو مدل رفتاری مور-کلمب و سخت شونده مشابه هم و با شیب تقریباً یکسان رخ می‌دهد.

- افزایش عمق تونل با کاهش نشست حداکثر پی همراه است. این کاهش نشست تا عمق مشخصی ادامه پیدا می‌کند و پس از آن مقدار نشست ثابت می‌ماند. می‌توان گفت با توجه به وسعت دامنه تأثیر تونل و پی که به قطر تونل، عرض پی و احتمالاً بزرگی سربار وارد بر پی وابسته است، پی و تونل تنها تا عمق مشخصی بر روی یکدیگر اثر می‌گذارند. این عمق فارغ از مدل رفتاری خاک است و در شرایطی که تمام پارامترها ثابت بوده و تنها مدل رفتاری خاک تغییر می‌کند، نتیجه یکسانی به دست می‌آید. در شرایط مسأله حاضر این عمق در حدود ۱۱ متری سطح زمین است. در هر شرایطی و با توجه به مشخصات مسأله می‌توان به کمک مدل-سازی عددی این عمق را برای شرایط مورد نظر مسأله تعیین نمود.
- تغییرات فاصله بین نوارهای پی تأثیر چندانی بر مقدار نشست حداکثر در مرکز پی نواری میانی که هم‌مرکز با محور تونل قرار گرفته است، نمی‌گذارد. اما با افزایش فاصله نوارها از یکدیگر و دور شدن نوارهای کناری از میدان اثر تونل، نشست این نوارها کاهش می‌یابد. این امر باعث افزایش نشست نسبی بین نوارهای میانی و کناری می‌شود. کم کردن فاصله بین نوارها می‌تواند روش مؤثری برای کاهش نشست نسبی و نزدیک کردن عملکرد مجموعه نوارها در پی نواری به عملکرد یک پی گسترده باشد.
- با افزایش عرض نوارهای پی و در نتیجه آن افزایش دامنه تأثیر نوارها، نشست پی افزایش می‌یابد. این افزایش در هر دو مدل رفتاری با نرخ تقریباً یکسان رخ می‌دهد.

### ۳-۶ پیشنهادهایی برای ادامه پژوهش‌ها در آینده

در این پژوهش به بررسی اثر حفر تونل بر مقادیر نشست‌های حداکثر و نسبی پی نواری پرداخته شد. برای ادامه پژوهش‌ها در این زمینه پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

- بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی‌های نواری با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی
- بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی‌های نواری در خاک‌های لایه‌بندی شده

- بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی‌های نواری با استفاده از روش عددی اختلاف محدود
- بررسی اثر حفر تونل به روش NATM بر رفتار پی‌های نواری
- بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی‌های نواری در خاک‌های اشباع
- بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی‌های سطحی در شرایط بارگذاری دینامیکی

## ۴-۶ خلاصه و جمع بندی

در این فصل نتیجه‌گیری‌های حاصل از بررسی خروجی‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای ادامه آن در آینده ارائه گردید. با توجه به نتایج این فصل، نزدیک کردن نوارها به یکدیگر، تا حدی که شرایط مسأله اجازه دهد، می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش نشست‌های نسبی باشد. نشست نسبی در سازه‌ها از اهمیت بسیار بیشتری نسبت به نشست کلی سازه، برخوردار است و تأثیر زیادی بر بهره‌وری سازه دارد. همچنین امکان تعیین عمق بحرانی برای مسایلی با شرایط متفاوت از طریق مدل‌سازی وجود دارد و می‌توان در صورتی که شرایط مسأله اجازه دهد، تونل را در عمقی پایین‌تر از عمق بحرانی حفر کرد تا کم‌ترین اثر را بر روی نشست‌های کلی و نسبی پی بگذارد. پیشنهادهای ارائه شده برای ادامه پژوهش ساخت مدل‌های عددی سه بعدی، استفاده از روش‌های عددی متفاوت برای ساخت مدل‌ها، بررسی اثر لایه‌بندی خاک، مطالعه روش‌های دیگر حفاری تونل و در نهایت بررسی حفاری در خاک اشباع را شامل می‌شوند.

پیوست الف: نشست نوارهای میانی و کناری و نشست نسبی

رس							
مقادیر ثابت	متغیر	مدل خاک سخت شونده (HS)			مدل مور-کلمب (MC)		
		Z(m) (عمق تونل)	نشست نوار میانمی (cm)	نشست نوار کناری (cm)	نشست نسبی (cm)	نشست نوار میانمی (cm)	نشست نوار کناری (cm)
B=۲m D=۸m S=۵m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	۸	۱۵,۸	۱۴,۴	۱,۴	۱۰,۹	۹,۲	۱,۷
	۹	۱۵,۷	۱۴,۶	۱,۱	۱۰,۶	۹,۵	۱,۱
	۱۰	۱۵,۶	۱۴,۷	۰,۹	۱۰,۵	۹,۶	۰,۹
	۱۱	۱۵,۶	۱۴,۸	۰,۸	۱۰,۶	۹,۸	۰,۸
	۱۲	۱۵,۵	۱۴,۹	۰,۶	۱۰,۶	۹,۸	۰,۸
	۱۳	۱۵,۵	۱۴,۹	۰,۶	۱۰,۷	۹,۹	۰,۸
	۱۴	۱۵,۶	۱۵,۱	۰,۵	۱۰,۷	۹,۹	۰,۸
	۱۵	۱۵,۶	۱۵,۱	۰,۵	۱۰,۸	۹,۹	۰,۹
	۱۶	۱۵,۶	۱۵,۲	۰,۴	۱۰,۹	۱۰	۰,۹
	۱۷	۱۵,۵	۱۵,۱	۰,۴	۱۰,۹	۱۰	۰,۹
	۱۸	۱۵,۵	۱۵,۲	۰,۳	۱۱	۱۰,۱	۰,۹
B=۲m Z=۱۰m S=۵m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	D (m) (قطر)						
	۶	۱۴,۹	۱۴,۱	۰,۸	۱۱,۱	۱۰,۱	۱
	۷	۱۵,۳	۱۴,۶	۰,۷	۱۰,۸	۹,۹	۰,۹
	۸	۱۵,۶	۱۴,۷	۰,۹	۱۰,۵	۹,۶	۰,۹
	۹	۱۶,۱	۱۵,۱	۱	۱۰,۴	۹,۶	۱
۱۰	۱۶,۷	۱۵,۲	۱,۵	۱۰,۳	۹,۴	۰,۹	
B=۲m D=۸m Z=۱۰m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	S (m) (فاصله نوارها)						
	۵	۱۵,۶	۱۴,۷	۰,۹	۱۰,۵	۹,۶	۰,۹
	۶	۱۵,۳	۱۴,۱	۱,۲	۱۰,۳	۹,۲	۱,۱
B=۲m D=۸m S=۵m Z=۱۰m	L (kN/m <sup>2</sup> ) (سریار)						
	۱۵۰	۱۲,۱	۱۱,۲	۰,۹	۷,۵	۶,۶	۰,۹
	۲۰۰	۱۵,۶	۱۴,۷	۰,۹	۱۰,۵	۹,۶	۰,۹
	۲۵۰	۱۹,۴	۱۸,۶	۰,۸	۱۳,۶	۱۳	۰,۶
۳۰۰	۲۳,۵	۲۲,۹	۰,۶	۱۶,۹	۱۶,۸	۰,۱	
Z=۱۰m D=۸m S=۵m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	B(m) (عرض نوار)						
	۲	۱۰,۲	۹,۷	۰,۵	۷,۸	۷,۳	۰,۵
	۲,۵	۱۱,۱	۱۰,۲	۰,۹	۸,۹	۸,۲	۰,۷
۳	۱۱,۸	۱۰,۸	۱	۱۰,۴	۸,۹	۱,۵	



## ماسه

مقادیر ثابت	متغیر	مدل خاک سخت شونده (HS)			مدل مور-کلمب (MC)		
	Z(m) (عمق نازل)	نشست نوار میانی (cm)	نشست نوار کناری (cm)	نشست نسبی (cm)	نشست نوار میانی (cm)	نشست نوار کناری (cm)	نشست نسبی (cm)
B=۲m D=۸m S=۵m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	۸	۱۰٫۶	۹٫۲	۱٫۴	۸٫۳	۶٫۸	۱٫۵
	۹	۱۰٫۳	۹٫۶	۰٫۷	۸٫۱	۷٫۱	۱
	۱۰	۱۰٫۲	۹٫۷	۰٫۵	۷٫۷	۷٫۳	۰٫۴
	۱۱	۱۰	۹٫۹	۰٫۱	۷٫۴	۷٫۹	۰٫۵
	۱۲	۹٫۹	۱۰	۰٫۱	۷٫۳	۷٫۸	۰٫۵
	۱۳	۱۰	۹٫۹	۰٫۱	۷٫۳	۷٫۶	۰٫۳
	۱۴	۹٫۸	۱۰	۰٫۲	۷٫۳	۸٫۲	۰٫۹
	۱۵	۹٫۸	۱۰٫۲	۰٫۴	۷٫۴	۸٫۲	۰٫۸
	۱۶	۹٫۸	۱۰٫۱	۰٫۳	۷٫۴	۸	۰٫۶
	۱۷	۹٫۸	۱۰٫۱	۰٫۳	۷٫۴	۷٫۹	۰٫۵
۱۸	۹٫۸	۱۰	۰٫۲	۷٫۴	۷٫۹	۰٫۵	
B=۲m Z=۱۰m S=۵m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	D (m) (قطر)						
	۶	۹	۸٫۷	۰٫۳	۷٫۱	۶٫۸	۰٫۳
	۷	۹٫۵	۹٫۳	۰٫۲	۷٫۳	۷٫۴	۰٫۱
	۸	۱۰٫۱	۹٫۷	۰٫۴	۷٫۷	۷٫۳	۰٫۴
	۹	۱۰٫۷	۱۰٫۱	۰٫۶	۸	۷٫۹	۰٫۱
۱۰	۱۱٫۴	۱۰٫۵	۰٫۹	۸٫۶	۸٫۳	۰٫۳	
B=۲m D=۸m Z=۱۰m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	S (m) (فاصله نوارها)						
	۵	۱۰٫۱	۹٫۷	۰٫۴	۷٫۷	۷٫۳	۰٫۴
	۶	۱۰	۹٫۲	۰٫۸	۷٫۸	۶٫۸	۱
	۷	۱۰٫۱	۸٫۹	۱٫۲	۸٫۱	۶٫۵	۱٫۶
B=۲m D=۸m S=۵m Z=۱۰m	L (kN/m <sup>2</sup> ) (سربار)						
	۱۵۰	۸٫۲	۷٫۷	۰٫۵	۶	۵٫۴	۰٫۶
	۲۰۰	۱۰٫۲	۹٫۷	۰٫۵	۷٫۷	۷٫۳	۰٫۴
	۲۵۰	۱۲٫۱	۱۱٫۸	۰٫۳	۹٫۵	۹٫۳	۰٫۲
	۳۰۰	۱۳٫۹	۱۴	۰٫۱	۱۱٫۳	۱۱٫۵	۰٫۲
Z=۱۰m D=۸m S=۵m L=۲۰۰kN/m <sup>2</sup>	B(m) (عرض نوار)						
	۲	۱۰٫۲	۹٫۷	۰٫۵	۷٫۸	۷٫۳	۰٫۵
	۲٫۵	۱۱٫۱	۱۰٫۲	۰٫۹	۸٫۹	۸٫۲	۰٫۷
	۳	۱۱٫۸	۱۰٫۸	۱	۱۰٫۴	۸٫۹	۱٫۵

## مراجع

- 1- Badie A. and Wang M. C. (1983) "Stability of spread footing above void in clay" *Journal of Geotechnical engineering*, 110.
- 2- Wang M. C. and Badie A. (1984) "Effect of underground void on foundation stability" *Journal of Geotechnical engineering*, 111.
- 3- Chen S. Ho C. and Kuo Y. (2011) "Three-Dimensional Numerical Analysis of Ground Surface Settlement Induced by the Excavation of Shield Tunnels".
- 4- Azam G. and Hsieh C. W. (1991) "Performance of Strip Footing on Stratified Soil Deposit with Void" *Journal of Geotechnical engineering*.
- 5- Nagy N. M. (2009) "Numerical Investigations of Footing Width Influence on the Surface Footing-Tunnel Interaction" *13<sup>th</sup> International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology*.
- ۶- صالحی م. ص. و ابریشمی س. (۱۳۹۰) "مطالعه تأثیر حفاری تونل های شهری بر سازه های سطحی" ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.
- ۷- جهانیان ه. (۱۳۹۱) "بررسی تأثیر حفاری تونل های کم عمق شهری بر ظرفیت باربری پی های سطحی ساختمان ها" همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مشهد.
- ۸- غفاری سرجامی ع. و ابریشمی س. (۱۳۹۱) "تحلیل و بررسی تأثیر حفاری تونل های شهری به بر سازه های اطراف - مطالعه موردی تونل امداد مشهد" نهمین کنگره بین المللی NATM روش مهندسی عمران، اصفهان.
- 9- Katzenbach R. and Leppela S. (2013) "Soil-Structure-Interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time" *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*.
- 10- [http://fa.wikipedia.org/wiki/روش\\_اجزاء\\_محدود](http://fa.wikipedia.org/wiki/روش_اجزاء_محدود)
- 11- [http://fa.wikipedia.org/wiki/نرم افزارهای\\_رشته\\_مهندسی\\_عمران](http://fa.wikipedia.org/wiki/نرم افزارهای_رشته_مهندسی_عمران)
- ۱۲- پاکباز م. س. و حیدری زاده ی. (۱۳۸۷) "بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل شهری اهواز" چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

13- PLAXIS Reference Manual, 2D-Version8, (2002), *A.A.Balkema Publishers*, Lisse , Abingdon, Exton(pa), Tokyo.

۱۴- طلائی آ. و امین پور ح، (۱۳۹۰) " بررسی مدل های رفتاری ارتجاعی - خمیری در آنالیز عددی تونل ها " همایش ملی سازه، راه، معماری، چالوس.

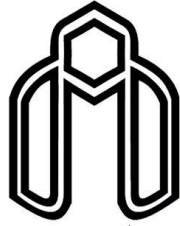
15- PLAXIS Material Model Manual, 2D-Version8, (2002), *A.A.Balkema Publishers*, Lisse Abingdon, Exton(pa), Tokyo.

## Abstract

Since the beginning of metropolitans' formation, the issue of transportation across the city has been a principal concern of municipal managers. On the other hand, limited traffic capacity of streets, has led urban planning to use the available space beneath urban areas. However, the underground transport system such as metro is the perfect solution for traffic and air pollution in the metropolitans, if we are sure about the safety aspects; and the most important part is the tunnel safety. Ensuring that no collapse during and after the construction of tunnel and inappropriate deformation of surface structures is among the main objectives of tunnel designers. Therefore, recognize the interaction between the tunnel, soil and surface structures is very important and should be considered.

In this survey, we study these behaviors and identify a number of impact factors. The purpose of this study is to evaluate the tunneling effect on the strip footings behavior. To achieve this objective, the research conducted by other researchers in the field was reviewed. Most of the studies have been performed using numerical simulations and finite element software. In a few cases, numerical model results were verified by comparing with actual results of drilled tunnel measurements. Previous studies only evaluate spread or single strip footings settlement and have not done a comparison between models of soil behaviors. Hence, in this study we evaluate three strips footings settlement, relative settlements between strips, amount and settlement change rate in two behavior models: Mohr-Coulomb & Hardening soil. Considering the pros and cons of different ways and available facilities, Numerical simulation method using finite element software PLAXIS 2D ver. 8.5 have selected for this study. With the help of numerical models, changes in various characteristics of the tunnel, the soil around the tunnel and footing examined. This study evaluates the effect of six important parameters on the strip footings and compares them in sandy and clay soils. These six parameters are: soil behavior model, position of the tunnel, tunnel diameter, distance between strips in the strip footings, strips width and load on the footing. The results show that increasing width of the strips and the distance between them, increase relative settlement between strips. Also increasing tunnel depth until the certain amount impact on the settlement quantities and after that the settlement beneath the footing reaches a constant value.

Key words: Tunnel, Strip footing, Relative settlement, Plaxis 2D, Soil behavior models



دانشگاه شاهرود

**Shahrood University**

**Faculty of Civil Engineering**

# **Evaluation of Tunnel Excavation on Behavior of Shallow Foundation**

**Mastooreh Dadar**

**Supervisor: Dr. Seyyed Mahdi Hoseyni**

**October 2015**