بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشکده مهندسی عمران**

**پایان‌نامه کارشناسی ارشد**

**رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی**

# عنوان: بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف خاک در طراحی تونل‌ها

**استاد راهنما**

**دکتر حسن قاسم زاده**

**نگارش**

**محمد حسین حسین زاده**

**تابستان ۱۳۹۲**

## چکیده

با افزایش روز افزون جمعیت و توسعه شهرها، سیستم حمل و نقل مناسب و حفاری تونل‌های شهری جهت کاهش ترافیک و آلودگی هوا از اهمیت بسزایی برخوردار است. که این امر دقت در طراحی و حفاری تونل را موجب می‌گردد. محدوده مورد مطالعه این پژوهش پروژه تونل صدر-نیایش بوده که از محدود تونل‌های با ابعاد دهانه‌های بزرگ و روباره کم است که به علت بزرگی دهانه، حفاری هرکدام از تونل‌ها در چندین مرحله و به روش اتریشی اجرا شده است. در این پژوهش به بررسی سه فاکتور مهم نشست لایه‌های خاک، همگرایی دیواره‌های تونل و همچنین میزان نیروهای وارد بر پوشش در زمان‌های قبل، در حین حفاری و در زمان بهره‌برداری از سازه مورد نظر قرار گرفته‌است. از عوامل تاثیرگذار بر این سه فاکتور، مشخصات هندسی تونل، روش‌های اجرا و پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشد. که در این پژوهش به بررسی مدل رفتاری خاک و تاثیر پارامترهای مقاومتی خاک از قبیل مدول الاستیسیته، چسبندگی، اصطکاک داخلی، وزن مخصوص و فشار جانبی خاک پرداخته شده است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری پارامترهای ژئوتکنیکی آبرفت درشت دانه مانند ضریب فشار جانبی خاک و تا حدی مدول ارتجاعی از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی رایج مکانیک خاک و آزمون‌های برجا در خاک شهر تهران مشکل و بعضا غیر ممکن است، یکی از بهترین راهکارهای ارزیابی این پارامترها انجام تحلیل برگشتی بر اساس نتایج ابزار دقیق است. در این پژوهش با مدل‌سازی روند حفاری تونل صدر-نیایش توسط نرم افزار عددی Plaxis بر مبنای اجزا محدود و انجام تحلیل برگشتی پرداخته شده است. همچنین برای بررسی صحت مدل‌سازی حفاری تونل و آنالیزهای عددی و مقایسه نتایج آن‌ها با پایش‌های میدانی که جهت بهینه‌سازی طرح دارای اهمیت زیادی می‌باشد، از حساسیت‌سنجی استفاده گردیده است. از نتایج پژوهش حاضر می‌توان از تاثیر زیاد پارامترهای مدول الاستیسیته و ضریب فشار جانبی و تاثیر ناچیز پارامترهای اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بر میزان جابه‌جایی‌ها در دیواره و سقف تونل، همچنین نشست سطح زمین و میزان نیروهای پوشش نام برد.



**کلمات کلیدی**: تونل، ابزار دقیق، آنالیز عددی، آنالیز برگشتی، حساسیت سنجی، نشست، همگرایی

## فهرست


**۱- فصل اول: کلیّات ..... ۲**

۱-۱ مقدمه ..... ۲

۱-۲ تعریف مسئله و اهمیت موضوع ..... ۶

۱-۳ هدف تحقیق ..... ۶

۱-۴ سوالات تحقیق ..... ۷

۱-۵ روش تحقیق ..... ۸

۱-۶ تقسیم‌بندی پایان‌نامه و تعریف فصول ..... ۹

**۲- فصل دوم: مبانی نظری و پیشینه تحقیق ..... ۱۱**

۲-۱ مقدمه ..... ۱۱

۲-۲ تونل‌سازی در محیط‌های شهری ..... ۱۱

۲-۳ مفاهیم پایه در روش نوین تونل‌سازی ..... ۱۳

۲-۴ جابه‌جایی زمین ناشی از حفر تونل ..... ۱۵

۲-۵ طبقه بندی عوامل تاثیرگذار در طراحی تونل‌ها ..... ۱۶

۲-۶ گام های مدل‌سازی تونل ..... ۱۸

۲-۶-۱ انتخاب روش تحلیل ..... ۱۸

۲-۶-۱ -۱ روش‌های تجربی ..... ۱۹

۲-۶-۲ انتخاب روش عددی ..... ۲۲

۲-۶-۳ انتخاب قانون رفتاری ..... ۲۴

۲-۶-۴ انتخاب مدل محاسباتی ..... ۲۴

۲-۶-۵ انتخاب نرم افزار عددی ..... ۲۶

۲-۷ اهمیت رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی ..... ۳۰

۲-۷-۱ اهداف رفتارسنجی توده خاک در فضاهای زیرزمینی ..... ۳۰

۲-۷-۲ پارامترهای موردسنجش در رفتارسنجی فضاهای زیرزمینی ..... ۳۲

۲-۷-۳ همگرایی‌سنجی در فضاهای زیرزمینی ..... ۳۳

۲-۷-۴ تحلیل و تفسیر داده‌های رفتارسنجی ..... ۳۵

۲-۸ تحلیل برگشتی ایستگاه‌های رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی ..... ۳۸

۲-۸-۱ روش‌های تحلیل برگشتی مستقیم ..... ۴۱
**۳- فصل سوم: روش تحقیق ..... ۴۷**
۳-۱ مقدمه ..... ۴۷
۳-۲ معرفی پروژه مورد مطالعه ..... ۴۷
۳-۳ ابزاردقیق بکاررفته در پروژه تونل صدر- نیایش ..... ۵۱
۳-۳-۱ همگراسنجی ..... ۵۲
۳-۳-۲ نشست‌سنج ..... ۵۳
۳-۳-۳ کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری ..... ۵۵
۳-۳-۴ مشکلات موجود در رفتارسنجی پروژه تونل نیایش ..... ۵۵
۳-۴ مشخصات فنی محدوده مورد بررسی ..... ۵۶
۳-۵ روش شبیه‌سازی اجرای تونل ..... ۶۳
۳-۶ روند مدل‌سازی محدوده مورد نظر ..... ۶۵
**۴- فصل چهارم: تجزیه و تحلیل داده‌ها ..... ۷۱**
۴-۱ مقدمه ..... ۷۱
۴-۲ انتخاب مدل رفتاری مناسب خاک ..... ۷۱
۴-۳ مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی شده و نتایج محدوده موردنظر ..... ۷۳
۴-۴ آنالیز حساسیت پارامترهای مقاومتی خاک ..... ۷۷
۴-۴-۱ زاویه اصطکاک خاک ..... ۷۹
۴-۴-۲ چسبندگی خاک ..... ۸۲
۴-۴-۵ وزن مخصوص خاک ..... ۸۵
۴-۴-۳ مدول الاستیسیته ..... ۸۸
۴-۴-۶ ضریب فشار جانبی خاک ..... ۹۲
۴-۵ آنالیز برگشتی ..... ۹۷
۴-۶ حساسیت سنجی گام حفاری و ضخامت لاینینگ ..... ۱۰۷
**۵- فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها ..... ۱۱۱**
۵-۱ نتایج ..... ۱۱۱
۵-۲ پیشنهاد جهت پژوهش‌های آتی ..... ۱۱۴

## فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ مشخصات کلی پروژه نیایش ..... ۴۹
جدول ۳-۲ ابعاد حفاری مسیرهای دو و سه خطه ..... ۴۹
جدول ۳-۳ ابعاد سواره‌رو مسیرهای دو و سه خطه ..... ۴۹
جدول ۳-۴ موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی ..... ۵۶
جدول ۳-۵ مشخصات ابزارهای مورد استفاده در ایستگاه‌ها ..... ۶۲
جدول ۳-۶ مشخصات هندسی مدل شبیه‌سازی شده ..... ۶۷
جدول ۳-۷ مشخصات ژئوتکنیکی مدل شبیه‌سازی شده در محدوده مورد مطالعه ..... ۶۹
جدول ۴-۱ حساسیت سنجی مدل رفتاری خاک ..... ۷۲
جدول ۴-۲ آنالیز حساسیت اصطکاک داخلی ..... ۷۹
جدول ۴-۳ آنالیز حساسیت چسبندگی خاک ..... ۸۲
جدول ۴-۴ آنالیز حساسیت وزن مخصوص خاک ..... ۸۵
جدول ۴-۵ آنالیز حساسیت مدول الاستیسیته ..... ۸۸
جدول ۴-۶ آنالیز حساسیت ضریب فشار جانبی خاک ..... ۹۲
جدول ۴-۷ نتایج مدل شبیه سازی شده و ابزار سنجی ایستگاه ۱۷۰۰ ..... ۹۸
جدول ۴-۸ پارامترهای ژئوتکنیکی بعد از آنالیز برگشتی ایستگاه ۱۷۰۰ ..... ۹۹
جدول ۴-۹ نتایج مدل شبیه سازی شده و پایش‌های میدانی ایستگاه ۱۸۰۵ ..... ۱۰۰
جدول ۴-۱۰ پارامترهای ژئوتکنیکی بعد از آنالیز برگشتی ایستگاه ۱۸۰۵ ..... ۱۰۰
جدول ۴-۱۱ نتایج مدل شبیه سازی شده و پایش‌های میدانی ایستگاه ۱۶۵۰ ..... ۱۰۲
جدول ۴-۱۲ پارامتر ژئوتکنیکی بعد از آنالیز برگشتی ایستگاه ۱۶۵۰ ..... ۱۰۲
جدول ۴-۱۳ نتایج مدل شبیه سازی شده و پایش‌های میدانی ایستگاه ۱۷۲۵ ..... ۱۰۴
جدول ۴-۱۴ پارامتر ژئوتکنیکی پس از آنالیز برگشتی ایستگاه ۱۷۲۵ ..... ۱۰۴
جدول ۴-۱۵ مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی خاک ناشی از تحلیل برگشتی ..... ۱۰۶

## فهرست شکل‌ها


شکل ۲-۱ بیان شماتیک مفاهیم پایه تونل‌سازی ..... ۱۴
شکل ۲-۲ پروفیل جابه‌جایی حفاری برای مقطع اصلی تونل ..... ۱۵
شکل ۲-۳ زون تسلیم در اطراف تونل ..... ۱۶
شکل ۲-۴ مقایسه همگرایی برای تونل‌ها با پوشش داخلی و بدون پوشش داخلی ..... ۳۴
شکل ۲-۵ حالت‌های مختلف همگرایی ..... ۳۷
شکل ۲-۶ مراحل جستجوی نقطه بهینه ..... ۴۱
شکل ۲-۷ طرح کلی بهینه سازی تکراری ..... ۴۲
شکل ۲-۸ تحلیل برگشتی مستقیم بر اساس روش تک متغیره ..... ۴۳
شکل ۲-۹ تحلیل برگشتی مستقیم بر اساس روش تک‌متغیره متناوب ..... ۴۴
شکل ۲-۱۰ طراحی مقدماتی از روش جستجوی الگویی ..... ۴۵
شکل ۳-۱ مسیر کلی پروژه نیایش ..... ۴۹
شکل ۳-۲ ستون چینه‌شناسی آبرفت‌های تهران ..... ۵۱
شکل ۳-۳ ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی ۳ و ۵ نقطه ای ..... ۵۲
شکل ۳-۴ نمونه ای از انواع مترهای همگرایی سنجی به همراه به همراه پین های همگرایی سنجی .. ۵۳
شکل ۳-۵ چگونگی(موقعیت) نصب ایستگاه نشست سنجی و جزئیات چگونگی نصب گل‌میخ‌ها ..... ۵۴
شکل ۳-۶ پروفیل طولی لایه‌های زیرزمینی مسیر مورد بررسی تونل شمالی ..... ۵۷
شکل ۳-۷ پروفیل طولی لایه‌های زیرزمینی مسیر مورد بررسی تونل جنوبی ..... ۵۷
شکل ۳-۸ پروفیل طولی مسیر تونل شمالی به همراه ایستگاه‌های مورد بررسی ..... ۵۸
شکل ۳-۹ پروفیل طولی مسیر تونل جنوبی به همراه ایستگاه‌های مورد بررسی ..... ۵۸
شکل ۳-۱۰ گام‌های حفاری اجرای تونل در کل مناطق مورد بررسی ..... ۵۹
شکل ۳-۱۱ اندازه و فاصله گام‌های حفاری نسبت به هم ..... ۶۰
شکل ۳-۱۲ شکل مقطع تونل در حال اجرا در کل مناطق مورد مطالعه ..... ۶۱
شکل ۳-۱۳ مقاطع دو خطه ..... ۶۲
شکل ۳-۱۴ نمایی از لتیس بکاررفته در دیواره تونل و نحوه اجرای شاتکریت ..... ۶۲
شکل ۳-۱۵ مدل سازی دوبعدی و سه بعدی ایجاد شده در نرم افزار plaxis 3D ..... ۶۶
شکل ۳-۱۶ موقعیت مقطع مورد بررسی در مدل شبیه سازی شده ..... ۶۸
شکل ۴-۱ نمودار نشست سطح زمین ناشی از حفاری طولی ..... ۷۳
شکل ۴-۲ نمودار همگرایی ناشی از حفاری طولی ..... ۷۴
شکل ۴-۳ نمودار نیروی محوری نسبت به فاصله از مقطع مورد بررسی ..... ۷۴
شکل ۴-۴ نمودار لنگر خمشی نسبت به فاصله از مقطع مورد بررسی ..... ۷۵
شکل ۴-۵ نمودار نشست زمین نسبت به فاصله از مقطع مورد بررسی ..... ۷۵
شکل ۴-۶ جهات نیرو و لنگر در نرم افزار مورد استفاده ..... ۷۸

شکل ۴-۷ میزان نشست ناشی از تغییرات پارامتر اصطکاک ..... ۸۰
شکل ۴-۸ میزان همگرایی ناشی از تغییرات پارامتر اصطکاک ..... ۸۰
شکل ۴-۹ میزان نیروی محوری ناشی از تغییرات پارامتر اصطکاک ..... ۸۱
شکل ۴-۱۰ میزان لنگر خمشی ناشی از تغییرات پارامتر اصطکاک ..... ۸۱
شکل ۴-۱۱ میزان نشست ناشی از تغییرات پارامتر چسبندگی ..... ۸۳
شکل ۴-۱۲ میزان همگرایی ناشی از تغییرات پارامتر چسبندگی ..... ۸۳
شکل ۴-۱۳ میزان نیروی محوری ناشی از تغییرات پارامتر چسبندگی ..... ۸۴
شکل ۴-۱۴ میزان لنگر خمشی ناشی از تغییرات پارامتر چسبندگی ..... ۸۴
شکل ۴-۱۵ میزان نشست شطح زمین ناشی از تغییرات پارامتر وزن مخصوص ..... ۸۶
شکل ۴-۱۶ میزان همگرایی ناشی از تغییرات پارامتر وزن مخصوص ..... ۸۶
شکل ۴-۱۷ میزان نیروی محوری ناشی از تغییرات پارامتر وزن مخصوص ..... ۸۷
شکل ۴-۱۸ میزان لنگر خمشی ناشی از تغییرات پارامتر وزن مخصوص ..... ۸۷
شکل ۴-۱۹ میزان نشست طولی ناشی از تغییرات پارامتر مدول الاستیسیته ..... ۸۹
شکل ۴-۲۰ میزان همگرایی طولی 1M-2L ناشی از تغییرات پارامتر مدول الاستیسیته ..... ۹۰
شکل ۴-۲۱ میزان همگرایی 1M-2R ناشی از تغییرات پارامتر مدول الاستیسیته ..... ۹۰
شکل ۴-۲۲ میزان همگرایی طولی 2L-2R ناشی از تغییرات پارامتر مدول الاستیسیته ..... ۹۱
شکل ۴-۲۳ میزان نیروی محوری ناشی از تغییرات پارامتر مدول الاستیسیته ..... ۹۱
شکل ۴-۲۴ میزان لنگر خمشی ناشی از تغییرات پارامتر مدول الاستیسیته ..... ۹۲
شکل ۴-۲۵ میزان نشست ناشی از تغییرات پارامتر $K_0$ ..... ۹۳
شکل ۴-۲۶ میزان همگرایی طولی 1M-2L ناشی از تغییرات پارامتر $K_0$ ..... ۹۴
شکل ۴-۲۷ میزان همگرایی طولی 1M-2R ناشی از تغییرات پارامتر $K_0$ ..... ۹۴
شکل ۴-۲۸ میزان همگرایی طولی 2L-2R ناشی از تغییرات پارامتر $K_0$ ..... ۹۵
شکل ۴-۲۹ میزان نیروی محوری ناشی از تغییرات پارامتر $K_0$ ..... ۹۵
شکل ۴-۳۰ میزان لنگر خمشی ناشی از تغییرات پارامتر $K_0$ ..... ۹۶
شکل ۴-۳۱ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۷۰۰ ..... ۹۹
شکل ۴-۳۲ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۷۰۰ ..... ۹۹
شکل ۴-۳۳ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۸۰۵ ..... ۱۰۱
شکل ۴-۳۴ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۸۰۵ ..... ۱۰۱
شکل ۴-۳۵ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۶۵۰ ..... ۱۰۳
شکل ۴-۳۶ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۶۵۰ ..... ۱۰۳
شکل ۴-۳۷ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۷۲۵ ..... ۱۰۵
شکل ۴-۳۸ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۷۲۵ ..... ۱۰۵
شکل ۴-۳۹ میزان جابه‌جایی تاج تونل نسبت به تغییرات ضخامت پوشش و گام حفاری ..... ۱۰۷

شکل ۴-۴۰ میزان نیروی محوری N11 نسبت به تغییرات ضخامت پوشش و گام حفاری .....۱۰۸
شکل ۴-۴۱ میزان نیروی محوری N22 نسبت به تغییرات ضخامت پوشش و گام حفاری .....۱۰۸
شکل ۴-۴۲ میزان لنگر خمشی M11 نسبت به تغییرات ضخامت پوشش و گام حفاری .....۱۰۹
شکل ۴-۴۳ میزان لنگر خمشی M22 نسبت به تغییرات ضخامت پوشش و گام حفاری .....۱۰۹

# فصل اول

# کلیات

# ۱. فصل اول: کلیّات

## ۱-۱ مقدمه

از اوایل قرن نوزدهم با توجه به سیر صعودی افزایش جمعیت کره زمین و تراکم جمعیت در شهرها از یک‌سو و پیشرفت در تمامی زمینه‌های علمی و در نتیجه بالارفتن سطح استاندارد زندگی از سوی دیگر، لزوم تحول و گسترش امکانات جهت تامین نیازهای عمومی مورد توجه بیشتری قرارگرفت.

در این زمینه تامین و توزیع آب قابل‌شرب از طریق احداث سدها و انتقال آب بوسیله تونل‌های آبرسانی، جمع‌آوری فاضلاب ساختمان‌ها، احداث متروهای زیرزمینی به منظور رفت و آمد سریع شهری و حفر تونل‌ها برای توسعه راه‌های شهری و بین‌شهری جهت تسریع در رفت و آمد و توزیع و حمل کالا از مراکز تولید به مصرف از اولویت خاصی برخوردار گردید. اهمیت اجرای پروژه‌های از این قبیل باعث شد که در اکثر قریب به اتفاق کشورها فناوری تونل‌سازی مورد توجه روزافزون قرار گیرد.

تونل‌سازی از پرکاربردترین و روبه‌رشدترین صنایع در زمینه فعالیت‌های ژئوتکنیکی است. این صنعت در قالب روش‌ها و فرآیندهای اجرایی متعددی طی سالیان متمادی ظهور کرده است. از آن جمله می‌توان به روش قدیمی کندوپوش[۱]، روش نسبتا مدرن جلوباز سنتی[۲]، روش‌های حفاری اتریشی[۳] و بلژیکی[۴] و بسیاری روش‌های مدرن رایج دهه‌های اخیر نظیر حفاری با تجهیزات و ماشین‌های حفار تحت عنوان تونل‌سازی به روش سپری[۵] اشاره کرد.

حفاری تونل در محیط‌های شهری محدودیت‌ها و مشکلات خاص خود را دارا می‌باشد. عبور از نزدیکی مناطق شهری و سازه‌های بلند، برخورد به کانال‌های عبور آب (قنات، مسیل و ...)، برخورد به تجهیزات شهری (کابل‌های انتقال برق، لوله‌های گاز، کابل‌های مخابراتی، لوله‌کشی آب و ...)، بخشی از محدودیت‌ها و مشکلات این‌گونه حفاری‌ها می‌باشد.

---

[1] Cut and cuver
[2] Conventional open face
[3] Austrian
[4] Belgian
[5] Shield tunneling

روش تونل‌زنی اتریشی یکی از پرکاربردترین روش‌های اجرای تونل در محیط‌های شهری و در مناطق کم عمق می‌باشد. میل به ساخت تونل از این روش نسبت به حفاری‌های مکانیزه به دلایل انعطاف‌پذیری بالای آن در هر محیط خاکی، اجرای مرحله‌ای، سرمایه اولیه کم، حفاری در طول‌های کوتاه می‌باشد.

یک تیم مهندسی تونل جهت اطمینان از دستیابی به یک سطح مناسب از ضریب اطمینان[1] پایداری تونل و خاک یا سنگ اطراف آن، نقطه نظرات مختلفی را باید مدنظر قرار دهد. شاید بتوان گفت محور اصلی فرآیند طراحی یک تونل شامل برآورد دو پارامتر اصلی یکی فشار وارد بر پوشش محافظ داخلی تونل (اعم از موقت و دائمی) و دیگری جابه‌جایی و تغییرشکل‌های ایجادشده در محیط اطراف تونل، از دیواره تونل تا سطح زمین، به خصوص در مناطق شهری است. در این راستا، به دو دلیل عمده و موثر، یکی پایداری خود تونل حین و پس از اجرای تونل و دوم کنترل اثرات تونل موردنظر بر سازه‌های همجوار (راه، پل، غالب سازه‌های عمرانی روبنایی نظیر ساختمان‌ها، سازه‌های زیربنایی نظیر و در نهایت سازه‌های طبیعی نظیر گسل‌ها) پارامتر نشست ناشی از تونل‌سازی و نیروهای وارد بر پوشش به دو مولفه کلیدی و تعیین‌کننده تبدیل خواهد شد که بررسی، برآورد و ارزیابی نتایج مطالعات قبل از احداث تونل در حین انجام تونل‌سازی و بعضاً پس از انجام عملیات، امری ضروری به نظر می‌رسد.

به طور کلی پس از حفاری و خاک‌برداری مقطع تونل، خاک فوقانی در جهت پرکردن حفره ایجادشده تغییرشکل‌هایی خواهد داشت که اثرات آنها در اغلب موارد به سطح زمین نیز خواهدرسید. تغییرشکل‌های ناشی از تونل‌سازی در دیواره تونل به نام همگرایی دیواره تونل[2] و در سطح زمین به نام فرونشست سطح زمین[3] شناخته می‌شوند.

عوامل زیادی در چگونگی روند این تغییرشکل‌ها تاثیرگذار می‌باشند که از آن جمله می‌توان مشخصات هندسی تونل، پارامترهای ژئوتکنیک خاک، روش‌های اجرای تونل را نام برد. تعیین دقیق تاثیر پارامترهای ژئوتکنیک خاک بر میزان نشست و طراحی پوشش تونل معمولاً کاری پرهزینه و غیرممکن است.

---

[1] Safty factor
[2] Tunnel wall convergence
[3] Surface subsidence

بنابراین از اهم وظایف طراح تعیین پارامترهای موثر بر طراحی تونل و میزان اهمیت و تاثیر آنهاست. این کار از دو جنبه اهمیت دارد؛ نخست آنکه با بودجه محدود شناسایی‌های ژئوتکنیکی طراح با توجه به درجه اهمیت هر پارامتر، تعداد و نوع آزمایش‌های تعیین آن پارامتر را تعیین می‌کند. دوم آنکه هر اندازه شناسایی‌های ژئوتکنیکی دقیق و کامل انجام شود، باز هم عواملی مانند تغییر نوع خاک یا شرایط خاک که حین اجرا در مسیر حفر تونل ممکن است با آن مواجه شد، این الزام را پدید می‌آورد که برای جلوگیری از وقفه کار برای محاسبات کنترلی در مرحله مطالعات اثرات تغییر پارامترهای موثر برای فرونشست سطح زمین و طراحی پوشش هرچه بیشتر تعیین شوند تا آنالیزها و محاسبات کنترلی حین اجرا به حداقل برسد.

روش‌های عددی، گسترده‌ترین روش‌های محاسباتی برای کاربردهای مختلف مهندسی می‌باشند. اگر مسئله پیچیده‌ای قرار است حل شود، استفاده از روش‌های عددی مناسب‌ترین روش است. اما باید توجه داشت که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی تا حد زیادی وابسته به میزان دانش طراحان، هم در رابطه با مسائل کلی ژئومکانیکی و هم ماهیت روش‌های عددی می‌باشد. همچنین انتخاب مدل رفتاری مناسب یکی از ملزومات روش عددی است تا رفتار واقعی خاک را در هنگام بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد نشان دهد.

مشخصه اصلی روش‌های عددی این است که یک سازه بزرگ به المان‌های نسبتا کوچکی تقسیم می‌شود. سپس معادلات مشخصه المان‌های منفرد و اندرکنش آنها برقرار می‌شود. سرانجام این معادلات که از لحاظ عدد و رقم، بزرگ می‌باشند به طور همزمان و به طور اندرکنشی با استفاده از رایانه‌ها حل می‌شوند. نتایج حاصل از این روش شامل توزیع تنش و الگوی تغییرمکان در داخل سازه می‌باشد.

در اکثر موارد طراحی‌های انجام‌شده اولیه با روند واقعی در ساختگاه متفاوت بوده و در نتیجه نیاز به یک روش جهت کنترل همزمان با اجرا در طراحی‌ها لازم می‌باشد. با ارزیابی و تحلیل رفتار توده سنگی یا خاکی در ساختگاه پروژه، می‌توان پیش‌بینی‌های نظری را با واقعیت‌ها مقایسه نمود.

بر اساس نتایج برنامه رفتارسنجی می‌توان پایداری و ایمنی فضای زیرزمینی را تحلیل و ارزیابی و به اجرای اقتصادی فضای زیرزمینی کمک نمود. رفتارسنجی فضای زیرزمینی ممکن است در سه مرحله انجام‌گیرد:

- رفتارسنجی قبل از اجرای طرح جهت بدست‌آوردن پارامترهای مورد نیاز در طراحی.
- رفتارسنجی در حین اجرای طرح جهت بهینه‌سازی اجرای سیستم نگهداری و کنترل رفتار سازه زیرزمینی.
- رفتارسنجی پس از اجرا و در دوره بهره‌برداری در جهت کنترل مخاطرات احتمالی.

رفتارسنجی فضای زیرزمینی در حین اجرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و شامل موارد ذیل می‌گردد:

- انتخاب ابزارآلات مناسب.
- آرایش مناسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری.
- نصب و بکارگیری ابزار دقیق.
- قرائت دوره‌ای.
- پردازش، تفسیر و تحلیل داده‌ها.

با استفاده از نتایج این ابزارها علاوه بر کنترل پایداری تونل‌ها در زمان اجرا، با انجام تحلیل‌های مستقیم یا تحلیل‌های برگشتی می‌توان رفتار زمین و پارامترهای زمین را تعیین نمود و با استفاده از نتایج حاصل، طرح حفاری‌ها و یا سیستم‌های نگهداری موقت و دائم را طراحی مجدد و بهینه‌سازی کرد. استفاده صحیح از این‌کار معمولاً علاوه بر حفظ سلامتی و ایمنی کار، باعث بهینه‌سازی اقتصادی و کاهش چشمگیر هزینه‌ها نیز خواهد بود.

## ۱–۲ تعریف مسئله و اهمیت موضوع

همان‌طور که ذکر گردید عوامل بسیاری در جابه‌جایی‌های ناشی از حفاری تونل‌ها و میزان نیروی وارد بر پوشش تاثیرگذار هستند. یکی از این پارامترها خصوصیات ژئوتکنیکی خاک می‌باشند. شناخت این موارد، در محیط‌های شهری و انتخاب روش‌های اجرایی مناسب و اجرای روش‌های بهسازی زمین قبل از حفاری، پایه اصلی برای حفاری ایمن می‌باشد. بنابراین با توجه به طبیعت پیچیده توده‌های خاک، شرایط متغیر زمین‌شناسی و عدم آگاهی از تغییرات آن، شناخت پیوسته خاک قبل از انجام حفاری پرهزینه و سنگین خواهد بود و از طرفی پیش‌بینی و مدل‌سازی فضاهای زیرزمینی نیز مشکل می‌باشد. امروزه به منظور کنترل این مشخصات و تعیین رفتار خاک در برابر حفاری‌ها از ابزار دقیق استفاده می‌شود. ابزار دقیق یکی از مبانی پایه روش نوین حفاری اتریشی می‌باشد. ابزارهای مورد استفاده در تونل‌های شهری شامل همگرایی‌سنج‌ها، کشیدگی‌سنج‌های درون گمانه‌ای، نشست‌سنجی سطح زمین، انحراف‌سنجی ساختمان‌های مجاور و در مواردی تنش‌سنجی می‌باشد. بسته به شرایط تونل ترکیب خاص استفاده از آن مشخص خواهد شد. عوامل مختلف و متعدد موثر بر رفتار توده‌های سنگی یا خاکی و عدم شناخت کامل آن‌ها، لزوم اندازه‌گیری و تحلیل رفتار واقعی زمین را ایجاب می‌کند.

با ارزیابی و تحلیل رفتار توده سنگی یا خاکی در ساختگاه پروژه، می‌توان پیش‌بینی‌های نظری را با واقعیت‌ها مقایسه نمود. بر اساس نتایج برنامه رفتارسنجی، می‌توان پایداری و ایمنی فضای زیرزمینی را تحلیل و حساسیت پارامترها را ارزیابی‌کرده و به اجرای اقتصادی فضای زیرزمینی کمک نمود.

## ۱–۳ هدف تحقیق

پژوهش حاضر با هدف اصلی تاثیرپذیری مدل رفتاری و پارامترهای مقاومتی خاک بر روی فاکتورهای اساسی در طراحی تونل انجام شده و نتایج آن نیز در رساله حاضر ارائه گردیده است. جهت مدل‌سازی پدیده فرونشست و همگرایی ایجاد شده در دیواره تونل از داده‌های ابزارسنجی کاربردی در تونل در حال ساخت استفاده شده است.

هدف اصلی از ارائه داده‌های ابزارسنجی، تدقیق شبیه‌سازی انجام شده با رفتار واقعی خاک پیرامون تونل می‌باشد. همچنین در این پژوهش از تکنیک تحلیل برگشتی جهت یکسان‌سازی مدل شبیه‌سازی‌شده با داده‌های ابزارسنجی استفاده گردید. شاید بتوان گفت جزئیات ساختاری پژوهش حاضر در چند مورد خلاصه می‌شود؛ تاثیر مدل رفتاری خاک بر میزان جابه‌جایی و نیروهای وارد بر پوشش، بررسی توانمندی روش‌های عددی در مدل‌سازی پدیده نشست و همگرایی، ارائه رویکردی در مورد شناسایی پارامترهای اثرگذار خاکی و بررسی حوزه اثرگذاری هرکدام، بررسی سهم هریک از پارامترهای مقاومتی در میزان و شکل نشست و همگرایی و نیروها، توانمندی هریک از ابزار مورد استفاده در راستای کمک به مدل‌سازی عددی، راهکاری مناسب جهت یکسان‌سازی مدل شبیه‌سازی‌شده با ابزارهای کاربردی. در نهایت و در یک جمع بندی کلی باید گفت، رویکرد اصلی پژوهش حاضر ارائه یک روش ساده و نسبتاً جامع در مدل‌سازی فرایند حفاری تونل و ارزیابی جابه‌جایی ایجاد شده در اثر حفاری و مقایسه نتایج برآوردها با مشاهدات واقعی به منظور تحلیل پایداری تونل در حین انجام کار می‌باشد. نهایتاً حساسیت‌سنجی نسبت به ضخامت پوشش و گام حفاری در میزان جابه‌جایی و نیروهای وارد به پوشش به عنوان دو پارامتر مهم در اجرای تونل انجام خواهد گرفت.

## ۱-۴ سوالات تحقیق

در پژوهش حاضر تلاش گردیده پاسخ مناسبی به سوالات زیر داده شود:

۱- آیا روش‌های عددی می‌توانند ابزار مناسبی جهت مدل‌سازی فرآیند حفاری تونل تلقی شوند؟ این روش‌ها تا چه حدی نیاز یک طراح را به شبیه‌سازی این فرایند برآورده خواهدکرد؟ همچنین انتخاب مدل رفتاری خاک تا چه حد در میزان جابه‌جایی‌ها و نیروهای وارده تاثیرگذار هستند؟

۲- دقت و صحت روش‌های عددی تا چه حد به به دقت پارامترهای اولیه مساله وابسته می‌باشند؟ آیا این روش می‌تواند ضعف‌های ناشی از نقصان اطلاعات را پوشش دهد؟

۳- میزان حساسیت پارامترهای مقاوتی خاک تا چه اندازه در روند طراحی تونل می‌تواند اثرگذار باشد؟ میزان این تغییرات بر نشست سطح زمین و همگرایی ایجاد شده، چگونه می‌باشد؟

۴- در صورت اختلاف قابل‌تامل در میزان نتایج خروجی با نتایج ابزاردقیق، از چه متدی می‌توان بهره جست؟ آیا روش‌های تحلیل برگشتی دارای کارایی لازم می‌باشند؟

۵- روند تحلیل برگشتی تا چه حد می‌توانند با استفاده از رفتارسنجی، کمبودهای ناشی از شناخت کامل پارامترهای مقاومتی خاک را برای یک طراح در زمینه تحلیل پایداری تونل یاری کند؟

۶- روند جابه‌جایی سقف و نیروهای وارد به پوشش نسبت به ضخامت و گام حفاری چگونه خواهد بود؟

## ۱–۵ روش تحقیق

با توجه به اهداف شرح داده شده، روش تحقیق و برنامه مطالعات به صورت زیر خواهد بود:

- مطالعه منابع داخلی و خارجی به منظور آشنایی و بررسی رفتار خاک در حین حفاری و مروری بر روش‌های مختلف طراحی تونل‌ها و آشنایی با تحلیل برگشتی
- تهیه و گردآوری اطلاعات و داده‌های مورد نیاز جهت شبیه‌سازی عددی
- انتخاب محدوده‌های مطالعاتی مناسب
- بررسی و پردازش داده‌های اخذ شده به منظور محاسبه پارامترهای ورودی نرم‌افزار
- وارد نمودن اطلاعات به نرم افزار Plaxis
- ایجاد مدل شبیه‌سازی‌شده حفاری تونل
- تجزیه و تحلیل خروجی‌های نرم‌افزار
- ارائه نتایج تحقیق و پیشنهادات

## ۱–۶ تقسیم‌بندی پایان‌نامه و تعریف فصول

این پایان‌نامه شامل پنج فصل به شرح زیر می‌باشد:

در فصل اول که به معرفی پایان‌نامه می‌پردازد، شامل بخش‌های مقدمه، تعریف مسئله و اهمیت موضوع، اهداف تحقیق، سوالات تحقیق و روش تحقیق می‌باشد.

در فصل دوم نیز به ارائه مفاهیم مرتبط با موضوع و بررسی مطالعات صورت‌گرفته در خصوص چگونگی رفتار خاک در حین حفاری تونل و عوامل تاثیرگذار بر طراحی تونل‌ها و گام‌های مدل‌سازی تونل پرداخته شده‌است. همچنین توضیحاتی درباره اهمیت رفتارسنجی در حفاری‌های زیرزمینی و کاربرد تحلیل برگشتی ارائه گردیده‌است.

در فصل سوم با توجه به مطالعات انجام گرفته، جهت بررسی پارامترهای مقاومتی خاک در طراحی تونل محل موردنظر انتخاب و داده‌های مورد نیاز مربوطه اخذ گردید. سپس روند شبیه‌سازی حفاری در محدوده‌های مورد مطالعه شرح داده شده است. لازم به ذکر است جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار Plaxis 3D استفاده شده است.

در فصل چهارم نیز به مقایسه نتایج حاصل از روش عددی و نتایج رفتارسنجی پرداخته شده‌است. در ادامه به حساسیت‌سنجی مدل رفتاری و پارامترهای مقاومتی بر میزان فرونشست و همگرایی‌های ایجادشده در دیواره تونل اختصاص داده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای تدقیق نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی و نتایج ابزاردقیق از تکنیک تحلیل برگشتی استفاده گردیده است. در قسمت پایانی به تاثیرپذیری پوشش بکاررفته و گام حفاری در میزان نیرو و لنگرهای ایجادشده در دیواره تونل پرداخته خواهد شد.

در فصل پنجم به ارائه نتایج بدست‌آمده از پژوهش حاضر پرداخته و در انتها نیز پیشنهادهایی در خصوص مطالعات تکمیلی آتی در راستای موضوع موردبحث عنوان نموده‌است.

# فصل دوم

# مبانی نظری و پیشینه

# تحقیق

# ۲. فصل دوم: مبانی نظری و پیشینه تحقیق

## ۲–۱ مقدمه

در این فصل، نخست به ارائه مفاهیم مرتبط با موضوع پرداخته خواهد شد. پس از آشنایی با روش تونل‌سازی مورد مطالعه پژوهش حاضر و رفتار خاک در حین حفاری، عوامل موثر در طراحی تونل‌ها معرفی می‌گردد. سپس گام‌های مدل‌سازی تونل شرح داده می‌شود. در ادامه به اهمیت رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی پرداخته و کاربرد تحلیل برگشتی و انواع روش‌های آن در راستای این پژوهش معرفی خواهد شد.

## ۲–۲ تونل‌سازی در محیط‌های شهری

تونل‌زنی در مناطق شهری تبعات خاص خود را دارد. عمق روباره کم بوده، زمین اغلب به صورت آبرفتی بوده و سیمانی نشده است و وجود ساختمان‌ها و پی‌های مجاور حساسیت زیادی بر نشست‌های حاصل از حفر تونل ایجاد می‌کنند و علاوه بر این امکان حفاری و یا تقویت را از طریق سطح زمین (مثلا روش کندن و پوشاندن) محدود می‌کند. با وجود چنین شرایطی تونل‌ها بایستی با روش‌هایی ایجاد شوند که کمترین خسارت را برای سازه‌های سطحی داشته باشند، یعنی تغییرشکل زمین را تا حدامکان کاهش دهند. ملاحظات عمده‌ای که در طراحی تونل‌های ساخته شده در خاک‌های نرم و دارای خصوصیات تغییرشکل‌پذیری بالا بایستی در نظر گرفته شود عبارتند از:

- تغییرشکل‌های مجاز برای دیواره‌ها و سینه کار ناشی از گسترش زون پلاستیک
- کاهش پارامترهای مقاومتی خاک اطراف تونل و در نتیجه افزایش نشست‌های موجود