

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته عمران گرایش خاک و پی

عنوان: تاثیر پارامترهای مقاومتی خاک در طراحی تونل ها

استاد راهنما

دکتر حسن قاسم زاده

نگارش

محمد حسین حسین زاده

زمستان ۱۳۹۱

چکیده

طرح تونل مترو صدر- نیایش در مسیری به طول ۱۰ کیلومتر در حال احداث است. در این تحقیق قطعه‌ای از مسیر که به صورت دو خطه در تونل شمالی و جنوبی قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته‌است. بررسی‌ها و مطالعات ژئوتکنیک در این بخش از مسیر به طور کامل انجام شده‌است. این بررسی‌ها نشان دهنده قرارگیری این مسیر در سازند A و B می‌باشد. جهت رسیدن به پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مناسب در این مطالعات مجموعه‌ای از آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی انجام گرفته‌است. تونل مذکور به روش جدید اتریشی در چهار مرحله حفاری شده است و جهت نگهداری و مراقبت تونل در برابر نیروهای وارده پس از حفاری از ۳۵ سانتی‌متر شاتکریت به همراه لیس استفاده شده‌است. تونل مترو صدر- نیایش جز تونل‌های کم عمق به شمار می‌آید که میانگین سربار موجود در این محدوده ۲۰ متر می‌باشد. این قسمت از مسیر از زیر خیابان عبور می‌کند و در محدوده شهری قرار دارد. بنابراین دو فاکتور مهم در این پروژه بررسی تغییرشکل لایه‌های خاک که منجر به نشست‌های زمین، همگرایی تونل شده و همچنین میزان نیروهای وارد بر پوشش در لحظات مختلف قبل، در حین حفاری و پس از اتمام کار مورد نظر قرار گرفته‌است. جهت کنترل موارد فوق یکسری ابزارهای همگرایی سنج، کشیدگی سنج و نشست سنج در تونل و بالای سر آن نصب گردیده و قرائت‌های لازم نیز انجام گرفته است. همان‌طور که می‌دانیم اطمینان از صحت مدل رفتاری خاک و انتخاب پارامترهای مقاومتی خاک بدست‌آمده از مطالعات ژئوتکنیکی و تغییرات آن یکی از موضوعات مهم در طرح‌های عمرانی بخصوص در مقوله تونل‌سازی می‌باشد. همچنین بررسی صحت مدل‌سازی و آنالیزهای عددی و مقایسه آن با شرایط واقعی جهت بهینه‌سازی طرح دارای اهمیت زیادی می‌باشد. بنابراین از مقایسه نتایج آنالیز عددی و تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده نتایج بسیار مهمی بدست‌آورده شده است و با انجام تحلیل برگشتی به نتایج مهمی در مورد پارامترهای مقاومتی خواهیم رسید.

کلمات کلیدی: تونل، ابزار دقیق، آنالیز عددی، همگرایی، شاتکریت، آنالیز برگشتی

فهرست

۲	۱- فصل اول: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۶	۲-۱ تعریف مسئله و اهمیت موضوع
۷	۳-۱ هدف تحقیق
۸	۴-۱ سوالات تحقیق
۸	۵-۱ روش تحقیق
۹	۶-۱ تقسیم‌بندی پایان‌نامه و تعریف فصول
۱۲	۲- فصل دوم: مبانی نظری و پیشینه تحقیق
۱۲	۱-۲ مقدمه
۱۲	۲-۲ تونل‌سازی در محیط‌های شهری
۱۴	۳-۲ جابه‌جایی زمین ناشی از حفر تونل
۱۶	۱-۳-۲ پایداری جبهه کار
۱۷	۲-۳-۲ گسترش جابه‌جایی به سمت سطح
۱۸	۴-۲ تعیین رفتار خاک در دیواره با منحنی FEENER - PACHER
۲۰	۵-۲ روش‌های تخمین جابه‌جایی ناشی از تونل‌سازی
۲۱	۱-۵-۲ روش‌های تجربی
۲۱	۲-۵-۲ روش‌های تحلیلی
۲۲	۳-۵-۲ روش‌های عددی
۲۸	۴-۵-۲ روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی
۳۰	۶-۲ انواع روش‌های عددی
۳۲	۷-۲ آشنایی با نرم‌افزار مورد استفاده
۳۳	۸-۲ مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار
۳۵	۹-۲ اهمیت رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی
۳۸	۱-۹-۲ روش‌های مشاهده‌ای طراحی فضاهای زیرزمینی
۳۸	۲-۹-۲ رفتارسنجی توده خاک در فضای زیرزمینی
۴۲	۳-۹-۲ همگرایی سنجی در فضاهای زیرزمینی
۴۵	۴-۹-۲ تحلیل و تفسیر داده‌های رفتارسنجی
۴۹	۱۰-۲ تحلیل برگشتی ایستگاه‌های رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی
۵۰	۱-۱۰-۲ تحلیل برگشتی و تحلیل عادی
۵۳	۲-۱۰-۲ روش‌های تحلیل برگشتی
۵۵	۳-۱۰-۲ روش تحلیل برگشتی مستقیم

۶۱	۳- فصل سوم: روش تحقیق.....
۶۱	۳-۱ مقدمه
۶۱	۳-۲ معرفی پروژه مورد مطالعه.....
۶۶	۳-۳ ابزار دقیق بکاررفته در پروژه تونل صدر- نیایش.....
۶۶	۳-۳-۱ همگراسنجی
۶۸	۳-۳-۲ نشست سنج
۶۹	۳-۳-۳ کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری.....
۶۹	۳-۳-۴ مشکلات موجود در رفتارسنجی پروژه تونل نیایش.....
۷۰	۴-۳ مشخصات فنی محدوده مورد بررسی:.....
۷۸	۳-۵ روش شبیه‌سازی اجرای تونل.....
۸۰	۳-۶ روند مدل‌سازی با نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel.....
۸۵	۴- فصل چهارم: تجزیه و تحلیل داده‌ها.....
۸۵	۴-۱ مقدمه
۸۵	۴-۲ انتخاب مدل رفتاری مناسب خاک.....
۸۷	۴-۳ مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی شده و نتایج محدوده موردنظر.....
۹۰	۴-۴ آنالیز حساسیت پارامترهای مقاومتی خاک.....
۹۲	۴-۴-۱ زاویه اصطکاک خاک.....
۹۵	۴-۴-۲ چسبندگی خاک
۹۷	۴-۴-۳ مدول الاستیسیته
۱۰۱	۴-۴-۵ وزن مخصوص خاک.....
۱۰۳	۴-۴-۶ ضریب فشار جانبی خاک
۱۰۸	۴-۵ آنالیز برگشتی
۱۲۰	۴-۶ حساسیت سنجی گام حفاری و ضخامت لاینینگ
۱۲۴	۵- فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها.....
۱۲۴	۵-۱ نتایج.....
۱۲۷	۵-۲ پیشنهاد جهت پژوهش‌های آتی.....

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲	روش‌های عددی در مهندسی مکانیک سنک	۳۰
جدول ۲-۲	فازهای مطالعاتی ژئوتکنیکی تونل‌ها	۳۶
جدول ۳-۲	میزان کاربرد روش‌های مطالعاتی در مراحل مختلف مطالعاتی	۳۷
جدول ۴-۲	ابزارهای مورد نیاز در عملیات رفتارسنجی تونل‌ها	۴۱
جدول ۵-۲	رابطه بین بار وارده بر نگهداری، نرخ جابجایی و جابجایی	۴۹
جدول ۱-۳	مشخصات کلی پروژه نیایش	۶۳
جدول ۲-۳	ابعاد حفاری مسیرهای دو و سه خطه	۶۳
جدول ۳-۳	ابعاد سواره‌رو مسیرهای دو و سه خطه	۶۴
جدول ۴-۳	موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی	۷۱
جدول ۵-۳	مشخصات ابزارهای مورد استفاده در ایستگاه‌ها	۷۴
جدول ۶-۳	مشخصات هندسی مدل شبیه‌سازی شده	۸۱
جدول ۷-۳	مشخصات ژئوتکنیکی مدل شبیه‌سازی شده در محدوده مورد مطالعه	۸۳
جدول ۱-۴	تاثیر پذیری مدل رفتاری خاک	۸۶
جدول ۲-۴	آنالیز حساسیت اصطحکاک داخلی	۹۲
جدول ۳-۴	آنالیز حساسیت چسبندگی خاک	۹۵
جدول ۴-۴	آنالیز حساسیت مدول الاستیسیته	۹۸
جدول ۵-۴	آنالیز حساسیت وزن مخصوص خاک	۱۰۱
جدول ۶-۴	آنالیز حساسیت ضریب فشار جانبی خاک	۱۰۴
جدول ۷-۴	پارامترهای ژئوتکنیکی بعد از آنالیز برگشتی ۱۷۰۰	۱۱۱
جدول ۸-۴	پارامترهای ژئوتکنیکی بعد از آنالیز برگشتی ایستگاه ۱۸۰۵	۱۱۴
جدول ۹-۴	پارامتر ژئوتکنیکی بعد از آنالیز برگشتی ایستگاه ۱۶۵۰	۱۱۶
جدول ۱۰-۴	پارامتر ژئوتکنیکی پس از آنالیز برگشتی ایستگاه ۱۷۲۵	۱۱۹
جدول ۱۱-۴	مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی خاک ناشی از تحلیل برگشتی	۱۱۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ پروفیل جابه‌جایی حفاری برای مقطع اصلی تونل ۱۵
- شکل ۲-۲ a: زون تسلیم در عقب جبهه کار b: زون تسلیم در جلوی جبهه کار ۱۵
- شکل ۳-۲ ریزش جبهه کار در زمین‌هایی با خاک چسبنده ۱۶
- شکل ۴-۲ ریزش جبهه کار در خاکهای دانه‌ای ۱۶
- شکل ۵-۲ نوع اولیه: مقاطع عرضی ۱۷
- شکل ۶-۲ نوع ثانویه: مقاطع عرضی ۱۸
- شکل ۷-۲ بیان شماتیک مفاهیم پایه تونل‌سازی ۲۰
- شکل ۸-۲ جابه‌جایی زمین در شرایط مدل‌سازی به روش کنترل نیرو ۲۴
- شکل ۹-۲ تغییرات پارامتر و نقطه همگرایی نسبت به عمق ۲۵
- شکل ۱۰-۲ مکانیزم جابه‌جایی پیشنهادی در اطراف تونل ۲۷
- شکل ۱۳-۲ مقایسه همگرایی برای تونل‌ها با پوشش داخلی و بدون پوشش داخلی ۴۵
- شکل ۱۴-۲ حالت‌های مختلف همگرایی ۴۸
- شکل ۱۵-۲ مقایسه میان (الف) تحلیل عادی و (ب) تحلیل برگشتی ۵۲
- شکل ۱۶-۲ مراحل بررسی پایداری سازه‌ها و کفایت روش‌های طراحی و ساخت ۵۳
- شکل ۱۷-۲ مراحل جستجوی نقطه بهینه ۵۵
- شکل ۱۸-۲ طرح کلی بهینه سازی تکراری ۵۶
- شکل ۱۹-۲ تحلیل برگشتی مستقیم بر اساس روش تک متغیره ۵۷
- شکل ۲۰-۲ تحلیل برگشتی مستقیم بر اساس روش تک‌متغیره متناوب ۵۸
- شکل ۲۱-۲ طراحی مقدماتی از روش جستجوی الگویی ۵۸
- شکل ۱-۳ مسیر کلی پروژه نیایش ۶۳
- شکل ۲-۳ ستون چینه‌شناسی آبرفت‌های تهران ۶۵
- شکل ۳-۳ ایستگاه‌های همگرایی سنجی ۳ و ۵ نقطه ای ۶۷
- شکل ۴-۳ نمونه ای از انواع مترهای همگرایی سنجی به همراه به همراه پین های همگرایی سنجی ... ۶۷
- شکل ۵-۳ چگونگی (موقعیت) نصب ایستگاه نشست سنجی و جزئیات چگونگی نصب گل‌میخها ۶۸
- شکل ۶-۳ مقاطع دو خطه ۷۲
- شکل ۷-۳ مقطع طولی مراحل حفاری ۷۳
- شکل ۸-۳ نمایی از لیس بکاررفته در دیواره تونل و نحوه اجرای شاتکریت ۷۳
- شکل ۹-۳ نمودار نشست ایستگاه ۱۷۰۰ تونل شمالی ۷۴
- شکل ۱۰-۳ نمودار همگرایی ایستگاه ۱۷۰۰ تونل شمالی ۷۵
- شکل ۱۱-۳ نمودار نشست ایستگاه ۱۸۰۵ تونل شمالی ۷۵
- شکل ۱۲-۳ نمودار همگرایی ایستگاه ۱۸۰۵ تونل شمالی ۷۶

- شکل ۳-۱۳ نمودار نشست ایستگاه ۱۶۵۰ تونل جنوبی ۷۶
- شکل ۳-۱۴ نمودار همگرایی ایستگاه ۱۶۵۰ تونل جنوبی ۷۷
- شکل ۳-۱۵ نمودار نشست ایستگاه ۱۷۲۵ تونل جنوبی ۷۷
- شکل ۳-۱۶ نمودار همگرایی ایستگاه ۱۷۲۵ تونل جنوبی ۷۸
- شکل ۳-۱۸ مدل سازی دوبعدی و سه بعدی ایجاد شده در نرم افزار plaxis 3D ۸۲
- شکل ۴-۱ نمودار نشست سطح زمین ناشی از حفاری طولی ۸۷
- شکل ۴-۲ نمودار همگرایی ناشی از حفاری طولی ۸۷
- شکل ۴-۳ نمودار نیروی محوری نسبت به فاصله از مقطع مورد بررسی ۸۸
- شکل ۴-۴ نمودار لنگر خمشی نسبت به فاصله از مقطع مورد بررسی ۸۸
- شکل ۴-۵ نمودار نشست زمین نسبت به فاصله از مقطع مورد بررسی ۸۸
- شکل ۴-۶ جهات نیرو و لنگر در نرم افزار مورد استفاده ۹۱
- شکل ۴-۷ میزان نشست ناشی از حساسیت سنجی پارامتر اصطکاک ۹۳
- شکل ۴-۸ میزان همگرایی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر اصطکاک ۹۳
- شکل ۴-۹ میزان نیروی محوری ناشی از حساسیت سنجی پارامتر اصطکاک ۹۴
- شکل ۴-۱۰ میزان لنگر خمشی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر اصطکاک ۹۴
- شکل ۴-۱۱ میزان نشست ناشی از حساسیت سنجی پارامتر چسبندگی ۹۶
- شکل ۴-۱۲ میزان همگرایی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر چسبندگی ۹۶
- شکل ۴-۱۳ میزان نیروی محوری ناشی از حساسیت سنجی پارامتر چسبندگی ۹۷
- شکل ۴-۱۴ میزان لنگر خمشی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر چسبندگی ۹۷
- شکل ۴-۱۵ میزان همگرایی طولی 1M-2L ناشی از حساسیت سنجی پارامتر مدول الاستیسیته ۹۸
- شکل ۴-۱۶ میزان همگرایی 1M-2R ناشی از حساسیت سنجی پارامتر مدول الاستیسیته ۹۹
- شکل ۴-۱۷ میزان همگرایی طولی 2L-2R ناشی از حساسیت سنجی پارامتر مدول الاستیسیته ۹۹
- شکل ۴-۱۸ میزان نشست طولی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر مدول الاستیسیته ۱۰۰
- شکل ۴-۱۹ میزان نیروی محوری ناشی از حساسیت سنجی پارامتر مدول الاستیسیته ۱۰۰
- شکل ۴-۲۰ میزان لنگر خمشی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر مدول الاستیسیته ۱۰۱
- شکل ۴-۲۱ میزان نشست شطح زمین ناشی از حساسیت سنجی پارامتر وزن مخصوص ۱۰۲
- شکل ۴-۲۲ میزان همگرایی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر وزن مخصوص ۱۰۲
- شکل ۴-۲۳ میزان نیروی محوری ناشی از حساسیت سنجی پارامتر وزن مخصوص ۱۰۳
- شکل ۴-۲۴ میزان لنگر خمشی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر وزن مخصوص ۱۰۳
- شکل ۴-۲۵ میزان همگرایی طولی 1M-2L ناشی از حساسیت سنجی پارامتر K_0 ۱۰۴
- شکل ۴-۲۶ میزان همگرایی طولی 1M-2R ناشی از حساسیت سنجی پارامتر K_0 ۱۰۵
- شکل ۴-۲۷ میزان همگرایی طولی 2L-2R ناشی از حساسیت سنجی پارامتر K_0 ۱۰۵
- شکل ۴-۲۸ میزان نشست ناشی از حساسیت سنجی پارامتر K_0 ۱۰۶

- شکل ۴-۲۹ میزان نیروی محوری ناشی از حساسیت سنجی پارامتر K_0 ۱۰۶
- شکل ۴-۳۰ میزان لنگر خمشی ناشی از حساسیت سنجی پارامتر K_0 ۱۰۷
- شکل ۴-۳۱ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۷۰۰..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۲ نمودار نشست سطح زمین پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۳ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۷۰۰..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۴ نمودار همگرایی پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۵ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۸۰۵..... ۱۱۲
- شکل ۴-۳۶ نمودار نشست سطح زمین پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۳
- شکل ۴-۳۷ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۸۰۵..... ۱۱۳
- شکل ۴-۳۸ نمودار همگرایی پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۴
- شکل ۴-۳۹ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۶۵۰..... ۱۱۵
- شکل ۴-۴۰ نمودار نشست سطح زمین پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۵
- شکل ۴-۴۱ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۶۵۰..... ۱۱۶
- شکل ۴-۴۲ نمودار همگرایی پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۶
- شکل ۴-۴۳ نمودار نشست سطح زمین مربوط به ایستگاه ۱۷۲۵..... ۱۱۷
- شکل ۴-۴۴ نمودار نشست سطح زمین پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۸
- شکل ۴-۴۵ نمودار همگرایی مربوط به ایستگاه ۱۷۲۵..... ۱۱۸
- شکل ۴-۴۶ نمودار همگرایی پس از آنالیز برگشتی..... ۱۱۹
- شکل ۴-۴۷ میزان جابجایی تاج تونل نسبت به حساسیت سنجی ضخامت پوشش و گام حفاری..... ۱۲۰
- شکل ۴-۴۸ میزان نیروی محوری $N11$ نسبت به حساسیت سنجی ضخامت پوشش و گام حفاری..... ۱۲۱
- شکل ۴-۴۹ میزان نیروی محوری $N22$ نسبت به حساسیت سنجی ضخامت پوشش و گام حفاری..... ۱۲۱
- شکل ۴-۵۰ میزان لنگر خمشی $M11$ نسبت به حساسیت سنجی ضخامت پوشش و گام حفاری..... ۱۲۲
- شکل ۴-۵۱ میزان لنگر خمشی $M22$ نسبت به حساسیت سنجی ضخامت پوشش و گام حفاری..... ۱۲۲

فصل اول

کلیات

۱. فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

از اوایل قرن نوزدهم با توجه به سیر صعودی افزایش جمعیت کره زمین و تراکم جمعیت در شهرها از یک سو 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 قرار گرفت.

در این زمینه تامین و توزیع آب قابل شرب 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 فن 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 نسبتاً مدرن جلو باز 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

^۱ Cut and cover

^۲ Conventional open face

^۳ Austrian

^۴ Belgian

^۵ Shield tunneling

شهری (کابل‌های انتقال برق، لوله‌های گاز، کابل‌های مخابراتی، لوله‌کشی آب و ...)، بخشی از محدودیت‌ها و مشکلات این‌گونه حفاری‌ها می‌باشد.

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^۶ 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 جابجایی 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 خواهد رسید. تغییرشکل‌های ناشی از تونل‌سازی در دیواره تونل به نام همگرایی دیواره تونل^۷ و در سطح زمین به نام فرونشست سطح زمین^۸ شناخته می‌شوند.

^۶ Safty factor

^۷ Tunnel wall convergence

^۸ Surface subsidence

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 پارامترهای ژئوتکنیک خاک بر میزان نشست و طراحی پوشش تونل معمولاً کاری پرهزینه و غیرممکن است.

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 قدر 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 مهندسين 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 می‌باشد 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 نسبتاً 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 کامپیوترها، حل می‌شوند. نتایج حاصل از این روش، شامل توزیع تنش و الگوی تغییر مکان در داخل سازه می‌باشد.

در اکثر موارد طراحی‌های انجام‌شده اولیه با روند واقعی در ساختگاه متفاوت می‌باشد. 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 کرده و به اجرای اقتصادی فضای زیرزمینی کمک نمود. رفتارسنجی فضای زیرزمینی ممکن است در سه مرحله انجام گیرد:

- رفتارسنجی قبل از اجرای طرح جهت بدست آوردن 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 نموده و با استفاده از نتایج حاصل، طرح حفاری‌ها و یا سیستم‌های نگهداری موقت و دائم را طراحی مجدد و بهینه‌سازی نمود. استفاده صحیح از این کار معمولاً به غیر از حفظ سلامتی و ایمنی کار باعث بهینه‌سازی اقتصادی و کاهش چشمگیر هزینه‌ها خواهد بود.

۱-۲ تعریف مسئله و اهمیت موضوع

همان‌طور که ذکر گردید، پروژه‌های تامین و توزیع آب قابل شرب 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 رفت‌وآمد و توزیع و حمل کالا از مراکز تولید به مصرف از اولویت خاصی برخوردار است. اهمیت اجرای پروژه‌های از این قبیل باعث شد که در اکثر قریب به اتفاق کشورها فن تونل‌سازی مورد توجه روزافزون قرار گیرد.

عوامل زیادی در جابجایی‌های 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. لذا به منظور کنترل این مشخصات و علاوه بر آن کنترل رفتار زمین در برابر حفاری‌ها امروزه 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 درون‌گمانه‌ای، 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 ارزیابی کرده 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 تونل‌های در حال ساخت استفاده شده است. هدف اصلی از ارائه داده‌های ابزارسنجی، تدقیق شبیه‌سازی انجام شده با رفتار واقعی خاک پیرامون تونل می‌باشد. همچنین از تکنیک تحلیل برگشتی جهت یکسان‌سازی مدل شبیه‌سازی شده با داده‌های ابزارسنجی استفاده می‌شود. شاید بتوان گفت جزئیات ساختاری پژوهش حاضر در چند مورد زیر خلاصه می‌شود؛ تاثیر مدل رفتاری خاک بر میزان جابجایی 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 هریک، 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 شبیه‌سازی شده 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 جابجایی ایجاد شده در اثر حفاری و مقایسه نتایج برآوردها با مشاهدات واقعی به منظور تحلیل پایداری تونل در حین انجام کار می‌باشد. نهایتاً حساسیت سنجی 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.

۴-۱ سوالات تحقیق

در راستای هدف اصلی پژوهش حاضر و مجموعه اهدافی که در ادامه هدف کلان دنبال خواهیم کرد، قصد داریم به سوالات زیر پاسخ دهیم:

- 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 خواهد کرد؟ همچنین انتخاب مدل رفتاری خاک تا چه حد در میزان جابجایی‌ها و نیروهای وارده تاثیرگذار هستند؟
- ۲- دقت و صحت روش‌های عددی تا چه حد 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 ابزار دقیق، از چه متدی می‌توان بهره جست؟ آیا روش‌های تحلیل برگشتی دارای کارایی لازم می‌باشند؟
- ۵- روند تحلیل برگشتی تا چه حد می‌تواند 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 جابجایی سقف و نیروهای وارد به پوشش نسبت به ضخامت و گام حفاری چگونه خواهد بود؟

۵-۱ روش تحقیق

با توجه به اهداف شرح داده‌شده، 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 نرم افزار
- وارد نمودن اطلاعات به نرم افزار Plaxis
- ایجاد مدل شبیه‌سازی شده 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، روش تحقیق و ارائه الگوریتم تحقیق می‌باشد.

در فصل دوم نیز به ارائه مفاهیم مرتبط با موضوع و بررسی مطالعات صورت گرفته در خصوص چگونگی رفتار خاک در حین حفاری تونل و انواع روش‌های طراحی تونل، پرداخته شده‌است. در ضمن به اهمیت رفتارسنجی در حفاری‌های زیرزمینی و کاربرد تحلیل برگشتی توضیحاتی 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 محدوده مورد مطالعه شرح داده شده‌است. لازم به ذکر است جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار Plaxis 3D استفاده شده‌است.

در فصل چهارم به مقایسه نتایج حاصل از روش عددی و نتایج رفتارسنجی پرداخته شده‌است. در ادامه به حساسیت‌سنجی پارامترهای مقاومتی بر میزان فرونشست و همگرایی‌های ایجادشده در دیواره تونل اختصاص داده شده‌است. لازم به ذکر است که در این تحقیق برای تدقیق نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی و نتایج ابزاردقیق از تکنیک تحلیل برگشتی استفاده گردیده‌است. 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 تحقیق 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 رفتار خاک در حین حفاری، انواع روش‌های طراحی تونل معرفی و روش مورد استفاده در این پژوهش و مزایا و کاربرد آن شرح داده می‌شود. سپس به اهمیت رفتارسنجی در فضاها و زیرزمینی پرداخته و کاربرد تحلیل برگشتی و انواع روش‌های آن در ارتباط با اهداف 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 (مثلاً 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 حد امکان 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
- در این صورت تکنیکی را برای حفاری باید در نظر نمود که از تغییر نیروها و تغییرشکل‌ها در اطراف تونل جلوگیری کند. این کار به یکی از روش‌های زیر صورت می‌پذیرد:
- افزایش پایداری سینه کار برای مقابله با نشست که در اثر تغییرشکل توده سنگ یا خاک قبل از پیشروی آن روی می‌دهد.

- پایداری سازه و کاهش تغییرشکل سیستم نگهداری

- مقاوم کردن زمین سست توسط روش‌های پیش نگهداری

باید گفت که امروزه مطالعات گسترده‌ای از سوی متخصصین علم مکانیک سنگ در ارائه طرحی مطمئن برای نگهداری فضا‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد که بتواند سیستم نگهداری را به گونه‌ای طراحی کند که علاوه بر ایمن بودن، از نظر اقتصادی نیز معقول باشد. نتایج این مطالعات بر ضرورت بکارگیری روش‌های مشاهده‌ای همچون ناتم^۹ در تونل‌سازی تاکید دارد.

روش تونل‌سازی اتریشی، در فاصله سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۵ در اتریش ابداع گردید. نام این روش در سال ۱۹۶۲ در سالزبورگ و جهت تمیز از روش قدیمی تونل‌سازی اتریشی اعطا گردید. ایده نخستین این روش عبارت است از استفاده از فشارهای زمین‌شناسی دربرگیرنده توده سنگ جهت مقاوم‌سازی و نگهداری تونل. در استفاده از روش ناتم و بکارگیری آن در صنعت تونل‌سازی، می‌توان مزایای استفاده از این الگو را به صورت موارد زیر شرح داد:

۱- انعطاف‌پذیر در ارائه الگوهای مختلف حفاری و ژئومتری تونل

۲- نیاز به ابزارآلات با هزینه کم

۳- انعطاف‌پذیر در نصب ساپورت‌های اضافه مثل میل‌مهار

۴- راحتی نصب ابزارآلات پشتیبان و زهکش

۵- انعطاف‌پذیر در مانیتورینگ استرس‌ها و تغییرشکل تونل

۶- برقراری ارتباط بهتر بین زمین و وسایل پشتیبان

۷- راحتی انجام شاتکریت

۸- درخیلی از شرایط زمین‌شناسی قابل انجام است.

^۹ NATM

۲-۳ جابه‌جایی زمین ناشی از حفر تونل

به طور کلی حفر تونل در هر عمق از خاک منجر به تغییر سیستم توزیع تنش‌ها و همگرایی دهانه تونل و بوجود آمدن تغییر شکل‌هایی در سطح زمین می‌شود. این همگرایی قبل از رسیدن جبهه کار به مقطع موردنظر آغاز می‌شود که شروع آن از فاصله‌ای در حدود شعاع تونل از جبهه کار می‌باشد و در فاصله‌ای در حدود دو برابر قطر تونل تأثیر محو می‌شود. پس از عبور از جبهه کار از مقطع موردنظر تغییر مکان زیاد می‌شود. از آنجا که حفر تونل در خاک معمولاً در اعماق کم صورت می‌گیرد، تأثیر آن می‌تواند تا سطح زمین گسترش یابد و یک فروروفتگی (گود) نشست را در سطح زمین ایجاد نماید. این نشست برای سازه‌های موجود در مجاورت تونل خطرانی را به همراه دارد. در محیط‌های شهری این حرکت بر روی سازه‌های سطحی یا زیرسطحی تأثیر می‌گذارد.

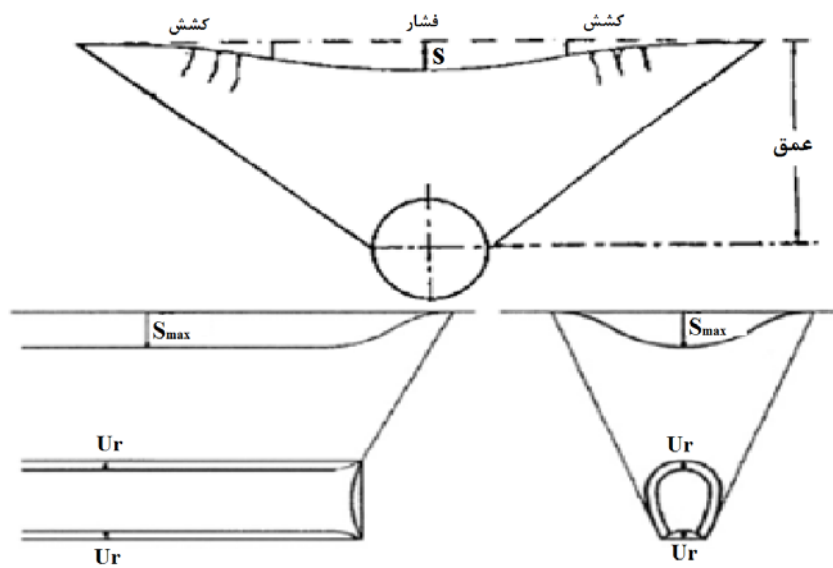
رابطه بین نشست سطح و عمق تونل یک رابطه خطی و ساده نیست. درحقیقت حرکت زمین بستگی به تعدادی عوامل نظیر شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، عمق و هندسه تونل، روش احداث تونل و کیفیت محیط کار و مدیریت دارد. با این حال روشن است که یک تونل کم‌عمق تمایل به تأثیر بیشتری بر روی سازه‌های سطحی نسبت به تونل‌های با عمق بیشتر دارد.

احداث یک تونل، خواه ناخواه بر روی تنش موجود زمین و شرایط آب زمین‌شناسی تأثیر می‌گذارد. این تعدیل شرایط تنش طبیعی به‌طور کلی با جابه‌جایی مداوم جبهه کار و همگرایی دیواره‌های تونل همراه می‌باشد که در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. در خاک‌های نرم چسبنده در اثر تونل‌کاری فشار آب حفره‌ای تغییر کرده و بنابراین در درازمدت موجب حرکت زمین می‌گردد [۷۲].

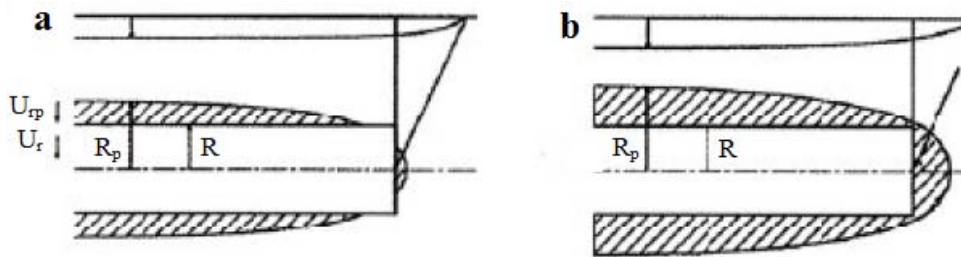
اندازه جهت و موقعیت حرکت زمین در اطراف فضای حفر شده بستگی به شرایط ژئوتکنیکی، تنش‌های ایستایی موجود و بارهای صفحه‌ای، شرایط آب زمین‌شناسی و همچنین تکنیک مورد استفاده در حفر تونل و نگهداری زمین دارد. زمانی که میزان تنش‌ها از مقاومت زمین تجاوز نماید، جابه‌جایی بوجود

می‌آید. این جابه‌جایی‌ها ممکن است منجر به تشکیل صفحات برشی در توده زمین گردد. وجود این صفحات باعث می‌شود که برای محدود کردن حرکت زمین نیاز به نگهداری تونل باشد.

مطابق شکل (۲-۲a) به طور کلی احداث یک تونل نگهداری نشده در زمین نرم جابه‌جایی‌های بزرگی را در زمین موجب می‌شود که این خود باعث تشکیل زون شکست در پشت جبهه کار می‌گردد. بر اساس شکل (۲-۲b) در زمین‌های ضعیف‌تر زون شکست ممکن است به سمت جلوی جبهه کار تونل پیشروی نماید.



شکل ۱-۲ پروفیل جابه‌جایی حفاری برای مقطع اصلی تونل



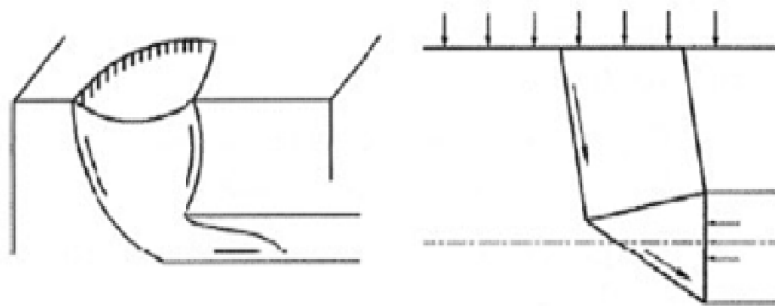
شکل ۲-۲a: زون تسلیم در عقب جبهه کار b: زون تسلیم در جلوی جبهه کار

۲-۳-۱ پایداری جبهه کار

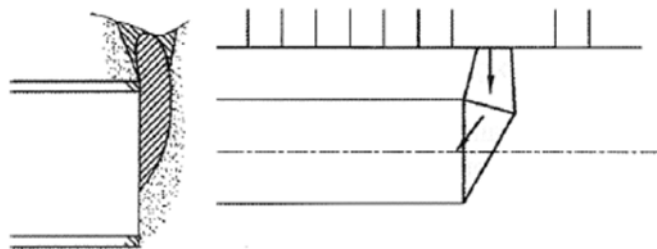
حرکت زمین در جبهه کار یکی از عوامل اصلی شکست می‌باشد. بنابراین یک ارزیابی خوب از ریسک شکست در جبهه کار تونل هم از نظر ایجاد یک محیط کاری ایمن و هم از نظر تخمین احتمال رخداد نشست‌های بزرگ، ضروری است.

بر اساس طبیعت زمین‌ها، دو نوع مکانیزم شکست در جبهه کار ممکن است مشاهده شود:

- در خاک‌های چسبنده، شکست جبهه کار شامل حجم بزرگی از زمین در جلوی جبهه کار می‌باشد. مطابق شکل (۲-۳) این مکانیزم منجر به تشکیل یک گودال در سطح زمین با عرضی بزرگتر از قطر تونل می‌شود.
- در خاک‌های غیرچسبنده، شکست تمایل دارد که از میان یک مکانیزم دودکش‌مانند در بالای جبهه کار تونل گسترش یابد، که در شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳ ریزش جبهه کار در زمین‌هایی با خاک چسبنده



شکل ۲-۴ ریزش جبهه کار در خاک‌های دانه‌ای