

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک

عنوان

بررسی تقاطع تونل‌های غیرهمسطح شهری

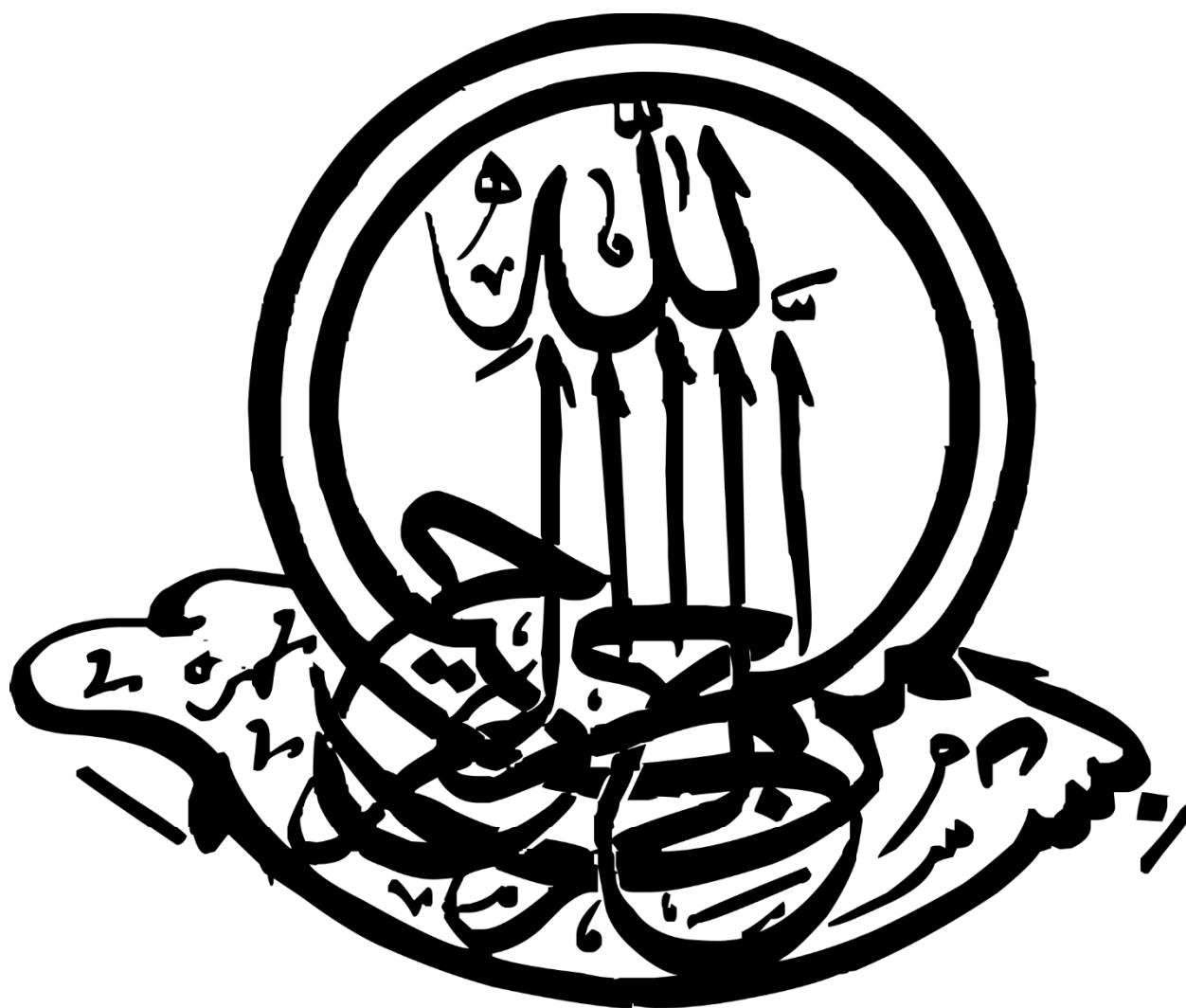
استاد راهنما

دکتر حسن قاسم‌زاده

نگارش

مرتضی شکیبا

زمستان ۱۳۹۶



تقدیم

به پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یآوری دلسوز

و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

استاد ارجمند جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده که در تمامی مراحل انجام و تدوین پایان‌نامه از راهنمایی‌ها و تجربیات علمی و مساعدت ایشان بهره‌مند گشته و نصایح ایشان همواره فرا راه دانش‌اندوزی من بوده است.

چکیده

با افزایش روز به روز جمعیت و توسعه فضاهای زیرزمینی در کلان شهرها، احتمال طراحی و ساخت تونل‌های جدید به شکل موازی و غیرهمسطح، با فاصله کم نسبت به تونل‌های قدیمی وجود خواهد داشت. از کاربری فضاهای زیرزمینی می‌توان به تونل‌های راه آهن، جاده، خطوط انتقال آب، خطوط فاضلاب، مخابرات و شریان‌های حیاتی اشاره نمود. با عنایت به شرایط فوق احتمال احداث تونل‌های جدید در مجاورت تونل‌های قدیمی در کلان شهرها زیاد می‌باشد.

در تحقیق پیش‌رو، به بررسی تقاطع سه تونل غیرهمسطح شهری، که به وسیله ماشین حفار تونل (TBM Tunnel Boring Machine) حفاری می‌گردند پرداخته می‌شود. از میان این سه تونل یک تونل به عنوان تونل قدیمی و دو تونل دیگر به عنوان تونل جدید در نظر گرفته شده است. سه حالت قرارگیری مختلف تونل‌ها شامل، حالت اول: در این حالت ابتدا تونل قدیمی سپس دو تونل جدید در بالا و پایین تونل قدیمی و به صورت عمود بر آن حفاری می‌گردد. حالت دوم: در این حالت ابتدا تونل قدیمی و سپس دو تونل جدید در یک تراز و عمود بر تونل قدیمی حفاری می‌گردد. حالت سوم: در این حالت ابتدا تونل قدیمی و سپس دو تونل جدید در دو تراز مختلف عمود بر تونل قدیمی به گونه‌ای که در زیر هم نباشند، حفاری می‌گردد. در ابتدا فشار اعمالی توسط ماشین حفار تونل و نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های جدید بررسی می‌گردد. محل قرائت ممان خمشی، نیروی مماسی و جابجایی پوشش تونل قدیمی در تقاطع تونل‌های جدید و قدیمی در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی و مقایسه نتایج از یک لایه خاک همگن، یک نوع پوشش بتنی، ارتفاع سربار خاکی ثابت بر روی تونل قدیمی و بار زنده یکسان استفاده شده است. نرم افزار مورد استفاده Flac^{3D} است.

برطبق نتایج مدلسازی، کمترین نشست نهایی سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های غیرهمسطح در حالت دوم و در فاصله قرارگیری چهار برابر قطر تونل اتفاق افتاده است. در حالت سوم، نشست نهایی سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های غیرهمسطح نامتقارن شده است. کمترین تاثیر حفاری تونل‌های غیرهمسطح بر ممان خمشی در حالت دوم و سوم در فاصله قرارگیری چهار برابر قطر تونل اتفاق افتاده است. با حفاری یک تونل غیرهمسطح ممان خمشی پوشش تونل قدیمی در حال کاهش می‌باشد. تغییرات جابجایی پوشش تونل قدیمی در حالت دوم و سوم نسبت به حالت اول کمتر می‌باشد. در نتیجه مناسب‌ترین حالت قرارگیری دو تونل غیرهمسطح جدید نسبت به یک تونل قدیمی در حالت دوم اتفاق افتاده است.

کلید واژه: TBM، تونل شهری، تونل غیرهمسطح، نشست، نیروهای پوشش تونل

فهرست مطالب

۱	فصل ۱ - مقدمه
۱	۱-۱ پیشگفتار
۱	۲-۱ طرح مسئله
۳	۳-۱ موضوع تحقیق
۳	۴-۱ اهمیت موضوع
۳	۵-۱ هدف تحقیق
۳	۶-۱ سوالات تحقیق
۴	۷-۱ روش تحقیق
۴	۸-۱ ساختار پایان نامه
۶	فصل ۲ - مبانی نظری و ادبیات موضوع
۶	۱-۲ مقدمه
۶	۲-۲ مروری بر فعالیت‌های پیشین در زمینه نشست سطح زمین
۹	۳-۲ مروری بر فعالیت‌های پیشین محاسبه فشار وارده بر پیشانی تونل
۱۰	۱-۳-۲ محاسبه فشار وارده بر پیشانی تونل
۲۸	۲-۳-۲ جمع بندی روش‌های محاسبه فشار پیشانی تونل
۲۸	۳-۳-۲ فشار ماکزیمم پیشانی تونل
۳۰	۴-۳-۲ ضریب اطمینان فشار پیشانی تونل
۳۰	۴-۲ روش تحلیلی پیش بینی نیروهای داخلی سیستم نگهدارنده تونل
۳۳	۵-۲ فعالیت‌های پیشین در مدلسازی‌های عددی تونل‌ها
۳۵	۶-۲ جمع بندی
۳۶	فصل ۳ - روش تحقیق و مشخصات مدل
۳۶	۱-۳ مقدمه

۳۶	۲-۳ معرفی نرم افزار مورد استفاده
۳۷	۳-۳ مشخصات ژئوتکنیکی مسیر
۳۷	۴-۳ معیار گسیختگی خاک
۳۷	۵-۳ مشخصات هندسی تونل ها
۳۷	۱-۵-۳ بررسی فاصله مرزهای جانبی تا مرکز تونل
۴۱	۲-۵-۳ بررسی نشست سطح زمین
۴۱	۳-۵-۳ ابعاد مدل تونل های غیرهمسطح
۴۲	۴-۵-۳ مقطع برداشت داده ها
۴۳	۶-۳ حالت های مختلف قرارگیری تونل های غیرهمسطح
۴۴	۷-۳ فاصله مرکز تا مرکز تونل های غیرهمسطح
۴۴	۸-۳ قطر تونل های غیرهمسطح
۴۵	۹-۳ مش بندی مدل تونل های غیرهمسطح
۴۷	۱۰-۳ تنش در پوسته ها
۴۹	۱۱-۳ مشخصات المان های به کار رفته به عنوان سپر ماشین
۴۹	۱۲-۳ مشخصات المان های به کار رفته به عنوان سگمنت بتنی
۵۳	۱۳-۳ فشار اعمالی بر پیشانی تونل های غیرهمسطح توسط ماشین حفار تونل
۵۴	۱۴-۳ فشار دوغاب اعمالی در پشت سگمنت ها
۵۶	۱۵-۳ گام های حفاری ماشین حفار تونل TBM
۵۷	۱۶-۳ خلاصه مشخصات تونل ها
۵۸	۱۷-۳ صحت سنجی نرم افزار با استفاده از روش تحلیلی انیشتن و شوارتز
۶۰	۱۸-۳ جمع بندی

فصل ۴ - شرح و نتایج پژوهش

۶۱	۱-۴ مقدمه
۶۱	۲-۴ جابجایی سطح زمین
۶۱	۱-۲-۴ جابجایی سطح زمین، حالت اول
۶۵	۲-۲-۴ جابجایی سطح زمین، حالت دوم
۶۹	۳-۲-۴ جابجایی سطح زمین، حالت سوم

۷۲	۳-۴ نیروهای پوشش تونل قدیمی
۷۲	۱-۳-۴ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت اول
۷۷	۲-۳-۴ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت دوم
۸۲	۳-۳-۴ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت سوم
۸۷	۴-۳-۴ نیروی مماسی پوشش تونل قدیمی، حالت اول
۹۲	۵-۳-۴ نیروی مماسی پوشش تونل قدیمی، حالت دوم
۹۶	۶-۳-۴ نیروی مماسی پوشش تونل قدیمی، حالت سوم
۱۰۱	۷-۳-۴ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت اول
۱۰۵	۱-۳-۴ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت دوم
۱۱۰	۲-۳-۴ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت سوم
۱۱۴	۴-۴ جمع بندی

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۷

۱۱۷	۵-۱ مقدمه
۱۱۷	۵-۲ نتیجه گیری
۱۱۹	۵-۳ پیشنهادها برای ادامه تحقیق
۱۲۰	فهرست مراجع

فصل ۶- پیوست ۱۲۲

۱۲۲	۶-۱ تنش در پوسته‌ها
۱۲۳	۶-۲ تغییرات فشار پیشانی تک تونل بر جابجایی سطح زمین
۱۳۱	۶-۳ بررسی تونل‌های دوقلو
۱۳۳	۶-۳-۱ بررسی نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل دوقلو
۱۳۴	۶-۳-۲ ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی
۱۳۵	۶-۳-۳ نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی
۱۳۷	۶-۴ بررسی تونل‌های غیرهمسطح
۱۳۸	۶-۵ بررسی جابجایی سطح زمین در اثر حفاری تونل غیرهمسطح

۱۳۹	۱-۵-۶ ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیم در محل تقاطع دو تونل غیرهمسطح
۱۴۳	۶-۶ فشارهای وارده بر پیشانی تونل‌های غیرهمسطح
۱۵۲	۶-۷ جابجایی سطح زمین، حالت اول، قطر ۵/۸ متر
۱۵۴	۶-۸ جابجایی سطح زمین، حالت اول، قطر ۷/۶ متر
۱۵۷	۶-۹ جابجایی سطح زمین، حالت دوم، قطر ۵/۸ متر
۱۵۹	۶-۱۰ جابجایی سطح زمین، حالت دوم، قطر ۷/۶ متر
۱۶۲	۶-۱۱ جابجایی سطح زمین، حالت سوم، قطر ۵/۸ متر
۱۶۴	۶-۱۲ جابجایی سطح زمین، حالت سوم، قطر ۷/۶ متر
۱۶۷	۶-۱۳ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۵/۸ متر
۱۶۸	۶-۱۴ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۷/۶ متر
۱۶۹	۶-۱۵ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۵/۸ متر
۱۷۱	۶-۱۶ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۷/۶ متر
۱۷۲	۶-۱۷ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۵/۸ متر
۱۷۳	۶-۱۸ ممان خمشی پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۷/۶ متر
۱۷۴	۶-۱۹ نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۵/۸ متر
۱۷۸	۶-۲۰ نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۵/۸ متر
۱۷۹	۶-۲۱ نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۷/۶ متر
۱۸۰	۶-۲۲ نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۵/۸ متر
۱۸۱	۶-۲۳ نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۷/۶ متر
۱۸۳	۶-۲۴ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۵/۸ متر
۱۸۴	۶-۲۵ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۷/۶ متر
۱۸۵	۶-۲۶ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۵/۸ متر
۱۸۶	۶-۲۷ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۷/۶ متر
۱۸۸	۶-۲۸ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۵/۸ متر
۱۸۹	۶-۲۹ جابجایی پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۷/۶ متر

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ کاهش حجم V_L بر حسب درصد برای خاک‌های و روش‌های حفاری مختلف _____ ۷
- جدول ۲-۲ ارتباط بین تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک اطراف پیشانی تونل و نرخ پایداری تونل [۱۳] ۱۲
- جدول ۳-۲ مقادیر زاویه لغزش _____ ۱۷
- جدول ۴-۲ ضریب فشار جانبی سه بعدی زمین _____ ۱۸
- جدول ۵-۲ جمع بندی روش‌های محاسبه فشار پیشانی تونل _____ ۲۸
- جدول ۶-۲ ضرائب ارائه شده برای فشار پیشانی تونل [۴] _____ ۳۰
- جدول ۱-۳ اطلاعات ژئوتکنیکی خاک مسیر تونل [۲۹] _____ ۳۷
- جدول ۲-۳ جابجایی سطح زمین - فواصل مرزهای مختلف _____ ۳۹
- جدول ۳-۳ قطر خارجی، داخلی پوشش تونل و قطر ماشین حفار تونل _____ ۴۴
- جدول ۴-۳ خلاصه مدل‌های ساخته شده _____ ۴۵
- جدول ۵-۳ مشخصات پوشش ماشین حفار _____ ۴۹
- جدول ۶-۳ مشخصات سگمنت بتنی [۳۱] _____ ۵۰
- جدول ۷-۳ فراسنج‌های فصل مشترک Liner _____ ۵۳
- جدول ۸-۳ خصوصیات دوغاب تر و خشک _____ ۵۵
- جدول ۹-۳ مشخصات خاک روش تحلیلی انیشتن و شوارتز _____ ۵۹
- جدول ۱۰-۳ مشخصات سگمنت بتنی روش تحلیلی انیشتن و شوارتز _____ ۵۹
- جدول ۱-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۳/۸ متر _____ ۷۵
- جدول ۲-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۵/۸ متر _____ ۷۵
- جدول ۳-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۷/۶ متر _____ ۷۶
- جدول ۴-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۳/۸ متر _____ ۷۹
- جدول ۵-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۵/۸ متر _____ ۸۰
- جدول ۶-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۷/۶ متر _____ ۸۰
- جدول ۷-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۳/۸ متر _____ ۸۴
- جدول ۸-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۵/۸ متر _____ ۸۴
- جدول ۹-۴ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۷/۶ متر _____ ۸۵

- جدول ۴-۱۰ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۳/۸ متر _____ ۸۹
- جدول ۴-۱۱ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۵/۸ متر _____ ۸۹
- جدول ۴-۱۲ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت اول، قطر ۷/۶ متر _____ ۹۰
- جدول ۴-۱۳ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۳/۸ متر _____ ۹۳
- جدول ۴-۱۴ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۵/۸ متر _____ ۹۴
- جدول ۴-۱۵ درصد تغییر نیروی محوری وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت دوم، قطر ۷/۶ متر _____ ۹۴
- جدول ۴-۱۶ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۳/۸ متر _____ ۹۸
- جدول ۴-۱۷ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۵/۸ متر _____ ۹۸
- جدول ۴-۱۸ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، حالت سوم، قطر ۷/۶ متر _____ ۹۹
- جدول ۴-۱۹ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت اول، قطر ۳/۸ متر _____ ۱۰۲
- جدول ۴-۲۰ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت اول، قطر ۵/۸ متر _____ ۱۰۳
- جدول ۴-۲۱ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت اول، قطر ۷/۶ متر _____ ۱۰۳
- جدول ۴-۲۲ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت دوم، قطر ۳/۸ متر _____ ۱۰۷
- جدول ۴-۲۳ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت دوم، قطر ۵/۸ متر _____ ۱۰۷
- جدول ۴-۲۴ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت دوم، قطر ۷/۶ متر _____ ۱۰۸
- جدول ۴-۲۵ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت سوم، قطر ۳/۸ متر _____ ۱۱۱
- جدول ۴-۲۶ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت سوم، قطر ۵/۸ متر _____ ۱۱۲
- جدول ۴-۲۷ درصد تغییر جابجایی پوشش تونل-۱، حالت سوم، قطر ۷/۶ متر _____ ۱۱۲
- جدول ۶-۱ فشار وارده بر پیشانی تونل با روش‌های تحلیلی _____ ۱۲۵
- جدول ۶-۲ فشار وارده بر پیشانی تونل‌های دوقلو _____ ۱۳۲
- جدول ۶-۳ درصد تغییر ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیمی، قطر ۵/۸ متر _____ ۱۳۵
- جدول ۶-۴ درصد تغییر نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی، قطر ۵/۸ متر _____ ۱۳۶
- جدول ۶-۵ فشار وارده بر پوشش تونل‌های غیرهمسطح _____ ۱۳۸
- جدول ۶-۶ مقایسه ممان خمشی وارده بر پوشش تونل قدیم قبل و بعد از حفاری تونل جدید در محل تقاطع تونل‌ها _____ ۱۴۰
- جدول ۶-۷ مقایسه نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیم قبل و بعد از حفاری تونل جدید در محل تقاطع تونل‌ها _____ ۱۴۲
- جدول ۶-۸ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، در حالت اول، $D=3.8$ _____ ۱۴۳

- جدول ۹-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت اول، $D=5.8$ _____ ۱۴۴
- جدول ۱۰-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت اول، $D=7.6$ _____ ۱۴۵
- جدول ۱۱-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت دوم، $D=3.8$ _____ ۱۴۶
- جدول ۱۲-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت دوم، $D=5.8$ _____ ۱۴۷
- جدول ۱۳-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت دوم، $D=7.6$ _____ ۱۴۸
- جدول ۱۴-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت سوم، $D=3.8$ _____ ۱۴۹
- جدول ۱۵-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت سوم، $D=5.8$ _____ ۱۵۰
- جدول ۱۶-۶ فشار وارده بر پیشانی تونل به روش (Broere (2001 ، حالت سوم، $D=7.6$ _____ ۱۵۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ ماشین حفار تونل TBM..... ۲
- شکل ۱-۲ الگوی گسیختگی پیشانی تونل (a) ماسه (b) رس..... ۱۰
- شکل ۲-۲ فراسنج‌های روش Borms & Bennermark..... ۱۱
- شکل ۳-۲ فشار پایداری تونل به روش Atkinson & potts..... ۱۲
- شکل ۴-۲ فشار پایداری به روش Davis..... ۱۳
- شکل ۵-۲ مکانیزم گسیختگی دایره‌ای و کروی [۱۵]..... ۱۳
- شکل ۶-۲ تعادل حدی گوه ربع دایره [۱۳]..... ۱۴
- شکل ۷-۲ مکانیزم دو مخروطی Chambonand and Corte..... ۱۵
- شکل ۸-۲ مدل سیلو گوه در روش Jancsecz & steiner..... ۱۶
- شکل ۹-۲ مدل تعادل سه بعدی [۲۰]..... ۱۸
- شکل ۱۰-۲ ضرایب F_0 تا F_3 کمیت بدون بعد [۲۰]..... ۱۹
- شکل ۱۱-۲ مدل سیلو و گوه Broere..... ۲۰
- شکل ۱۲-۲ نیروهای وارده بر لایه شماره i [۱۶]..... ۲۰
- شکل ۱۳-۲ مدل روش Carranza-Torres..... ۲۲
- شکل ۱۴-۲ مدل گسیختگی Tang et al..... ۲۳
- شکل ۱۵-۲ مکانیزم گسیختگی Han et al..... ۲۵
- شکل ۱۶-۲ توزیع نیروی قائم بروی تاج تونل به روش تزراقی [۱۷]..... ۲۷
- شکل ۱۷-۲ فشارهای اعمالی در پیشانی تونل در تونل‌های ساخته شده در ژاپن (ردیف اول EPB و ردیف دوم Slurry) [۴]..... ۲۹
- شکل ۱۸-۲ نمادهای به کار رفته در روش تحلیلی انیشتن و شوارتز..... ۳۱
- شکل ۱-۳ فاصله مرزهای جانبی تا مرکز تونل بر حسب قطر تونل، $C/D = 1.77$ m..... ۳۸
- شکل ۲-۳ کانتور تنش قائم در اثر حفاری تونل در فواصل قرارگیری مختلف مرزهای جانبی..... ۴۰
- شکل ۳-۳ جهات در نظر گرفته شده در مدل..... ۴۲
- شکل ۴-۳ مقطع برداشت داده در راستای طولی تونل قدیمی (تونل-۱)..... ۴۳
- شکل ۵-۳ فواصل قرارگیری تونل‌های غیرهمسطح (مرکز به مرکز)..... ۴۴
- شکل ۶-۳ مش‌بندی و موقعیت تونل‌ها در مدل ساخته شده..... ۴۵
- شکل ۷-۳ مش‌بندی اطراف تونل‌ها..... ۴۶

شکل ۳-۸	نحوه‌ی تعریف هندسه تونل در نرم افزار Flac3D	۴۶
شکل ۳-۹	نحوه‌ی تعریف هندسه بلوک در نرم افزار Flac3D	۴۷
شکل ۳-۱۰	رفتار خمش یک پوسته، الف) تنش‌های اعمالی به یک المان صفحه‌ای همگن و لاستیک خطی در اثر بار خمش صفحه‌ای ب) برآیند (برآیند تنش در حالت مثبت نشان داده شده است)	۴۸
شکل ۳-۱۱	رفتار غشایی یک پوسته، الف) تنش‌های اعمالی به یک المان صفحه‌ای همگن و لاستیک خطی در اثر بار تنش صفحه‌ای ب) برآیند تنش (برآیند تنش در حالت مثبت نشان داده شده است)	۴۸
شکل ۳-۱۲	قرارگیری فصل مشترک بین لاینر و زون‌ها مجاور لاینر و تنش‌های وارده بر فصل مشترک [۳۰]	۵۰
شکل ۳-۱۳	نمودار تغییر شکل نیرو برای المان liner در حالت نرمال [۳۰]	۵۱
شکل ۳-۱۴	رفتار فصل مشترک بین لاینر و زون‌ها برای المان liner در حالت برشی	۵۱
شکل ۳-۱۵	کوچکترین بعد زون در تماس با Liner	۵۳
شکل ۳-۱۶	اجزای مدلسازی شده ماشین حفار تونل TBM [۲۶]	۵۷
شکل ۴-۱	حالت اول - موقعیت قرارگیری تونل‌های جدید غیرهمسطح نسبت به تونل قدیمی	۶۲
شکل ۴-۲	نشست نهایی سطح زمین در محل تقاطع تونل‌های غیرهمسطح، $C/D = 12.5$	۶۴
شکل ۴-۳	حالت دوم - موقعیت تونل‌های جدید نسبت به تونل قدیمی	۶۵
شکل ۴-۴	نشست نهایی سطح زمین در محل تقاطع تونل‌های غیرهمسطح، $C/D = 12.5$	۶۸
شکل ۴-۵	حالت سوم - موقعیت تونل‌های جدید نسبت به تونل قدیمی	۶۹
شکل ۴-۶	نشست نهایی سطح زمین در محل تقاطع تونل‌های غیرهمسطح، $C/D = 12.5$	۷۱
شکل ۴-۷	محل برداشت نیروهای پوشش تونل-۱ در محل تقاطع تونل‌های غیرهمسطح، حالت اول	۷۳
شکل ۴-۸	محل برداشت نیروهای پوشش تونل-۱ در محل تقاطع تونل‌های غیرهمسطح، حالت دوم	۷۸
شکل ۴-۹	محل برداشت نیروهای پوشش تونل-۱، حالت سوم	۸۲
شکل ۴-۱۰	کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت اول، $C/D = 12.5$ ، $S/D = 2$	۱۰۲
شکل ۴-۱۱	کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت دوم، $C/D = 12.5$ ، $S/D = 4$	۱۰۶
شکل ۴-۱۲	کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت سوم، $C/D = 12.5$ ، $S/D = 4$	۱۱۱
شکل ۶-۱	فواصل قرارگیری تونل‌های غیرهمسطح و مقطع برداشت داده‌ها	۱۳۲
شکل ۶-۲	فواصل قرارگیری تونل‌ها نسبت به یکدیگر و مقطع برداشت داده	۱۳۷
شکل ۶-۳	کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت اول، $C/D = 8.18$ ، $S/D = 4$	۱۸۳
شکل ۶-۴	کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت اول، $C/D = 6.25$ ، $S/D = 3$	۱۸۵

- شکل ۵-۶ کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت دوم، $C/D = 8.18$ ، $S/D = 2$ ۱۸۶
- شکل ۶-۶ کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت دوم، $C/D = 6.25$ ، $S/D = 4$ ۱۸۷
- شکل ۷-۶ کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت سوم، $C/D = 8.18$ ، $S/D = 4$ ۱۸۹
- شکل ۸-۶ کانتور جابجایی پوشش تونل-۱، حالت سوم، $C/D = 6.25$ ، $S/D = 4$ ۱۹۰

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

با افزایش نیازهای بشر تقاضا برای ساخت سازه‌های زیرزمینی بزرگ همانند تونل‌های انتقال آب بین حوزه‌ای، تونل‌های جاده‌ای و ریلی طویل، تونل‌های مترو، تونل‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و ... رو به افزایش است. از وظایف مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی تونل‌ها فراهم نمودن زمینه لازم برای بهینه‌سازی اقتصادی ساخت تونل، با در نظر گرفتن شرایط زمین، مسائل ایمنی، پایداری دراز مدت و الزامات زیست محیطی می‌باشد. تونل‌ها را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم نمود :

۱- تونل‌های کوهستانی^۱: این دسته از تونل‌ها معمولاً در محیط‌های کوهستانی در سنگ‌های سخت رسوبی، آذرین یا دگرگونی، در ساختارهای چین و گسل خورده حفر شده و معمولاً هدف از اجرای این تونل‌ها برای انتقال آب‌های بین حوزه‌ای و ارتباط ریلی و جاده‌ای شهری می‌باشد.

۲- تونل‌های شهری^۲: این دسته از تونل‌ها در محیط‌های شهری و با هدف عمده حمل و نقل ریلی درون شهری (مترو) و جمع‌آوری آب‌های سطحی و فاضلاب‌های شهری احداث می‌گردد. از آنجا که اغلب شهرها بر روی رسوبات آبرفتی بنا شده‌اند، این تونل‌ها نیز اغلب در زمین‌های نرم آبرفتی ساخته می‌شوند.

پدیده‌های مخاطره آمیز زمین شناسی بسته به شرایط زمین، آب زیرزمینی، تنش‌های برجا و ... در مسیر تونل‌ها می‌تواند بسیار متنوع و دارای مکانیسم‌های مختلفی باشند. از مهمترین مخاطراتی که در مسیر تونل‌های شهری در زمین‌های نرم احتمال وقوع آنها وجود دارد، می‌توان به نشست سطح زمین و پایداری سینه کار اشاره کرد، که با محاسبه نشست با استفاده از روش‌ها و معیارهای تجربی و تحلیلی با توجه به ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و مقاومتی خاک از آزمون‌های ژئوتکنیک شناسایی نمود. جهت کنترل و پیش‌گیری می‌توان از TBM اعمال فشار مناسب به سینه کار تونل جهت کنترل نشست و ناپایداری سینه کار استفاده نمود[۱].

۲-۱ طرح مسئله

تونل‌های مناطق شهری عمدتاً در خاک‌های آبرفتی احداث شده، مسئله اصلی حفاظت دیواره و سقف تونل است. به طور کلی حفاری سازه‌های زیرزمینی با حذف توده‌هایی از خاک محل باعث تغییرات قابل توجه در

^۱ Mountain tunnels

^۲ Urban tunnels

سیستم توزیع تنش اطراف تونل می‌گردد، لذا حرکات و تغییر شکل زمین از نتایج اجتناب ناپذیر حفاری و ساخت تونل می‌باشد. تنها بخش محدودی از این تغییر شکل‌ها توسط سیستم نگهداری تونل کنترل می‌گردد، در واقع ایجاد سریع یک فضای خالی و نصب بلافاصله پوشش بی‌نهایت صلب که بتواند دقیقاً توزیع مجدد تنش‌های برجا را جبران نماید و مانع از هر گونه تغییر شکل در مصالح در برگیرنده تونل شود ممکن نیست.

جابجایی سطح زمین در اثر حفاری تونل‌ها در مناطق شهری و مسکونی اهمیت بسزایی خواهد داشت. این اهمیت نه تنها به دلیل اختلاف در عمق وجود لایه‌های مختلف زمین شناسی است بلکه به دلیل حساسیت نسبت به میزان نشست و اثرات احتمالی بر دیگر سازه‌های موجود در سطح زمین می‌باشد. تغییرات تنش و حرکات موضعی در اثر حفاری تونل منجر به نشست سطح زمین و حرکت شعاعی خاک اطراف حفره و جابجایی پیشانی تونل می‌گردد. تعیین میزان دقیق این حرکات به سادگی امکان پذیر نیست و تخمین اثرات احتمالی آن در عمق معین با سرعت پیشرفت مشخص از اهمیت به سزایی برخوردار است. روش‌های عددی به عنوان ابزاری قدرتمند برای پیش بینی نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌ها در زمین‌های نرم شناخته می‌شوند. حفاری تونل‌های جدید در کنار تونل‌های قدیمی باعث بروز نشست‌های سطحی و جابجایی تونل‌های قدیمی، ایجاد تغییراتی در نیروهای پوشش تونل قدیمی و حتی عدم بهره‌برداری از تونل قدیمی در حین حفاری تونل‌های جدید می‌گردد.



شکل ۱-۱ ماشین حفار تونل TBM

بنابراین مسئله مطرح شده عبارت است از این که با تکیه بر مدل‌های سه‌بعدی جستجو شود که حفاری تونل‌های غیر همسطح جدید در کنار یک تونل قدیمی چه اثراتی بر یک تونل قدیمی خواهد داشت، همچنین نشست‌های سطحی در محل تقاطع این تونل‌ها به چه صورت خواهد بود.

۳-۱ موضوع تحقیق

در تحقیق پیش رو، موضوع اصلی مورد بررسی، تاثیرات حفاری تونل‌های جدید غیرهمسطح بر جابجایی سطح زمین، ممان خمشی، نیروی مماسی وارده بر پوشش تونل قدیمی در تقاطع تونل‌ها، جابجایی پوشش تونل قدیمی در اثر حفاری تونل‌های جدید با در نظر گرفتن فراسنج‌های متغیر می‌باشد.

۴-۱ اهمیت موضوع

با افزایش روز به روز جمعیت، توسعه فضاهای زیرزمینی در کلان شهرها در حال افزایش است همچنین با توجه به محدود بودن فضاهای کلان شهرها استفاده از فضای زیرزمینی به منظور ایجاد سازه‌های زیرزمینی گزینه مناسبی می‌باشد. بنابراین احتمال طراحی و ساخت تونل‌های جدید غیرهمسطح با فاصله کم نسبت به تونل قدیمی وجود خواهد داشت. از کاربری فضاهای زیرزمینی می‌توان به تونل‌های راه‌آهن، تونل جاده‌ها، خطوط انتقال آب، خطوط فاضلاب، مخابرات و ... اشاره نمود. مطالعات عددی از جنبه‌های مختلف می‌تواند آغازگر مناسبی برای بررسی‌های پروژه‌های عمرانی کشور و همچنین به کارگیری این مطالعات در شرایط واقعی و اجرایی باشد.

۵-۱ هدف تحقیق

هدف از تحقیق صورت گرفته، بررسی نشست سطح زمین، تغییرات ممان خمشی و نیروهای داخلی پوشش تونل قدیمی در اثر حفاری تونل‌های غیرهمسطح جدید می‌باشد.

۶-۱ سوالات تحقیق

مهمترین سوالاتی که در آغاز تحقیق وجود دارد عبارتست از :

نحوه قرارگیری تونل‌ها نسبت به یکدیگر چه اثری بر تونل قدیمی دارد. فاصله بهینه تونل‌های جدید با تونل قدیمی چه مقدار است. در طول تحقیق پیش‌رو، سعی می‌گردد تا این سوالات پوشش داده شود و با استناد به مدلسازی‌های عددی تاثیر حفاری تونل‌های غیرهمسطح شهری بر محیط پیرامونی بررسی گردد.

۷-۱ روش تحقیق

در این تحقیق تونل‌های غیرهمسطح در محیط شهری حفاری می‌گردد، همانطور که می‌دانیم خاک‌های آبرفتی به صورت لایه لایه و غیرهمگن می‌باشد. به علت مقایسه حالت‌های مختلف حفاری سه تونل غیرهمسطح می‌بایست از یک لایه خاک همگن استفاده نمایم، در نتیجه یک لایه خاک همگن دانه‌ای از اطلاعات ژئوتکنیکی خط ۷ مترو تهران استفاده شده است. بار زنده سطحی، خیابان‌ها، ساختمان‌ها و... ۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. مدلسازی با استفاده از نرم افزار $Flac^{3D}$ صورت گرفته است. مدلسازی سه بعدی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۲۰ متر و با لحاظ نمودن فاصله‌ی کافی مرزهای جانبی تا مرکز تونل به جهت عدم تاثیرگذاری مرزها در نتایج خروجی ساخته شده است. حفاری تونل توسط ماشین حفار تونل TBM و پوشش اولیه و نهایی تونل توسط سگمنت‌های بتنی پیش ساخته که در هرگام حفاری در محل نصب و فضای خالی پشت سگمنت‌ها توسط دوغاب پر می‌گردد. مهمترین فراسنج کنترلی در حین حفاری تونل‌های شهری توسط ماشین حفار تونل مقدار جابجایی پیشانی تونل بوده و مهمترین فراسنج برای تعیین فاصله بهینه و انتخاب مناسب‌ترین حالت قرارگیری تونل‌های غیرهمسطح، کمترین مقدار جابجایی سطح زمین می‌باشد.

۸-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۵ فصل به شرح ذیل تهیه و تدوین شده است :

در این فصل مقدمه‌ای بر آنچه که در هنگام حفاری تونل جدید غیرهمسطح با ماشین حفاری تونل در سطح زمین و تغییرات نیروهای پوشش تونل‌های موجود اتفاق می‌افتد به طور مختصر آورده شده است. در ادامه به طرح مسئله مورد بررسی، اهمیت موضوع، اهداف تحقیق و تاثیرات حفاری تونل‌های جدید غیرهمسطح بر محیط اطراف و رفتار سازه زیرزمینی موجود پرداخته شده است.

در فصل دوم مروری بر فعالیت‌های صورت گرفته توسط پیشینیان در زمینه مدلسازی عددی تونل در حالت دوبعدی و سه‌بعدی، مطالعات صورت گرفته در زمینه محاسبه ماکزیمم نشست سطح زمین و محاسبه فشار اعمالی بر پیشانی تونل‌های دایره‌ای پرداخته شده است.

در فصل سوم هندسه‌ی مدل، مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل، مشخصات المان‌های پوشش به کار رفته به عنوان سگمنت بتنی و سپر ماشین حفار تونل، معیار گسیختگی تونل، محاسبه فشار اعمالی پیشانی تونل‌های غیرهمسطح، فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت‌ها، گام‌های حفاری تونل توسط ماشین حفار تونل و سایر فرضیات به کار گرفته شده شرح داده شده است.

در فصل چهارم، به بررسی جابجایی سطح زمین در سه حالت مختلف قرارگیری دو تونل غیرهمسطح جدید در کنار یک تونل قدیمی با فواصل قرارگیری مختلف پرداخته شده است. موقعیت قرارگیری تونل‌های جدید با ثابت در نظر گرفتن تونل قدیمی می‌باشد و مناسبترین موقعیت و فاصله قرارگیری تونل‌های غیرهمسطح نسبت به تونل قدیمی با توجه به کمترین مقدار جابجایی سطح زمین در محل تقاطع تونل‌های انتخاب شده است. فراسنج‌های متغیر در این بررسی قطر، فاصله و موقعیت قرارگیری سه تونل غیرهمسطح می‌باشد. در ادامه به بررسی ممان خمشی، نیروی مماسی و جابجایی پوشش تونل قدیمی در اثر حفاری تونل‌های غیرهمسطح جدید در سه حالت قرارگیری مختلف می‌پردازیم. در این بخش به جهت مقایسه نتایج حاصله محل قرائت نیروی‌های پوشش تونل قدیمی برای هر سه حالت حفاری تونل جدید ثابت در نظر گرفته شده است.

در پایان و در فصل پنجم نیز نتیجه‌گیری در مورد نتایج به دست آمده از مدل‌های سه بعدی و پیشنهاداتی برای انجام مطالعات بیشتر بر روی این موضوع آورده شده است.

در پیوست بعضی از تعاریف و بررسی دو تونل موازی، غیرهمسطح و همچنین جداول محاسبه فشار وارده بر پیشانی تونل‌های غیرهمسطح آورده شده است.

فصل ۲ - مبانی نظری و ادبیات موضوع

۱-۲ مقدمه

در ابتدا این فصل مروری بر فعالیتهای پیشین مدلسازی عددی تونلها، نشست سطح زمین، فشار پیشانی تونل و همچنین به بررسی نیروهای وارده بر پوشش تونل می‌پردازیم.

۲-۲ مروری بر فعالیتهای پیشین در زمینه نشست سطح زمین

در این بخش به بررسی مطالعات صورت گرفته در زمینه نشست سطح زمین در اثر حفاری تک تونل می‌پردازیم. از جمله روشهای تجربی توسعه داده شده در این زمینه می‌توان به رابطه نمایی گوسی پیشنهادی توسط Peck (1969) که برای نتیجه بدست آمده از نشست ناشی از حفاری در زمینهای نرم ارائه شده است اشاره نمود [۲].

$$Sv_{(x)} = S_{(max)} \cdot \exp\left[\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)\right] \quad 1-2$$

$Sv_{(x)}$ نشست سطح زمین در هر نقطه از امتداد محور تونل، i مشخص کننده عرض فرونشست و نشان دهنده انحراف معیار در معادله گاوس و x فاصله افقی از محور مرکزی تونل تا نقطه مورد نظر می‌باشد [۲].

$$i = KZ \quad 2-2$$

در رابطه ۲-۲، K ، فراسنجی وابسته به نوع خاک می‌باشد. New & O'reilly در سال ۱۹۸۲ مقدار K برای خاکهای رسی مقدار ۰/۵ و برای خاکهای ماسه‌ای ۰/۲۵ پیشنهاد نمودند [۳]. Rankin در سال ۱۹۹۸ مطالعاتی بر روی اندازه‌گیریهای صورت گرفته در تونلهای در انگلستان و دیگر نقاط جهان انجام داده و با ترسیم مقدار i در مقابل Z به این نتیجه رسید که $K = 0.5$ برای اغلب اندازه‌گیریهای مذکور، مقداری مناسب می‌باشد [۲]. گویلیمتی و همکاران (۲۰۰۸) مقدار K برای خاکهای چسبنده در دامنه ۰/۴ تا ۰/۶ برای خاکهای دانه‌ای و غیرچسبنده در دامنه ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ پیشنهاد نمودند [۴]. Z عمق مرکز تونل تا سطح زمین که این رابطه در ابتدا برای نقاط روی زمین مطرح گردیده بود و بعداً تعمیم داده شده است. mair et al. در سال ۱۹۸۳ برای عمق Z نیز عرض فرونشست مطابق رابطه ۲-۳ ارائه کرده‌اند [۵].

$$i = \left[0.0175 + 0.325 \left(1 - \frac{Z}{Z_0} \right) \right] Z \quad 3-2$$

z فاصله مرکز تونل تا نقطه مورد نظر در فاصله بین سطح زمین تا تاج تونل می‌باشد. مهمترین فراسنج در رابطه پیشنهادی پک $S_{(max)}$ که مطابق رابطه ۲-۴ محاسبه می‌گردد [۲]:

$$S_{(max)} = 1.252 \frac{v_L R^2}{i} \quad ۴-۲$$

V_L فراسنج بدون بعدی به نام افت زمین^۳ یا افت حجم^۴ می‌باشد. Shirlaw & Daron در سال ۱۹۹۵ افت زمین V_L در اثر حفاری تونل در رس‌های مارین در سنگاپور با ماشین‌های تونل‌زنی EPB و فشار هوا تونل‌زنی شده بیش از ۳٪ به ثبت رسیده است. Kanaysasuatall در تونل شهری توکیو که در شن اشباع با استفاده از ماشین تونل‌زنی EPB حفر شده مقدار افت زمین V_L در حدود ۲٪ به ثبت رسیده است. New & Bowrs در سال ۱۹۹۴ افت زمین در تونل‌های حفر شده در خاک رس با روش NATM، ۱-۱/۵٪ ثبت نموده‌اند. Mair & Taylor در سال ۱۹۹۸ دامنه‌ای از کاهش حجم v_L برای تکنیک‌های ساخت مختلف تونل‌زنی و انواع خاک‌ها در جدول ۲-۱ عنوان نمود. [۶]

جدول ۲-۱ کاهش حجم v_L بر حسب درصد برای خاک‌های و روش‌های حفاری مختلف

$V_L\%$		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

Schmit در سال ۱۹۶۹ بررسی ماکزیمم نشست سطح زمین در اثر حفاری تک تونل، در خاک رس زهکشی، با در نظر گرفتن فراسنج N (عدد پایداری تونل) پرداختند. در این رابطه فشار اعمالی به پیشانی تونل و سربار زنده وارده بر سطح زمین در نظر گرفته شده است [۶]. Herzog در سال ۱۹۸۵ به بررسی ماکزیمم نشست سطح زمین در اثر حفاری تک تونل با در نظر گرفتن سربار وارده بر سطح زمین پرداخت و در این رابطه تنها نشست ماکزیمم محاسبه می‌گردد و امکان ترسیم پروفیل عرضی مقطع وجود نخواهد داشت [۶]. Verruijt & Booker

^۳ Ground Loss

^۴ Volume Loss

در سال ۱۹۹۶ رابطه ساگاستا را برای محیط همگن الاستیک نیمه بی‌نهایت تعمیم دادند و راه حل فرم بسته را برای برآورد نشست سطحی ارائه نمودند. [۷] Loganathan & poulos در سال ۱۹۹۸ به اصلاح روابط Verruijt & Booker در سال ۱۹۹۶ با ترکیب مفهوم افت معادل زمین در حل تحلیلی تونل‌های احداث شده در خاک رس پرداختند، در این حل فراسنج افت معادل زهکشی نشده زمین بر اساس فراسنج گپ gap که توسط Lee at al. در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است در نظر گرفته‌اند. نتایج مطالعات عددی نشان می‌دهد که حل تحلیلی اصلاح شده تطابق خوبی برای تونل‌های حل شده در رس سخت خواهد داشت اما برای رس‌های نرم نتایج تحلیلی بیش از واقعیت خواهد بود [۸]. Wang در سال ۲۰۰۰ رابطه نشست ماکزیمم سطح زمین در خاک رس و ماسه‌ای ارائه نمود [۹]. Gonzalaz & Sagaseta در سال ۲۰۰۱، در رابطه ساگاستا (۱۹۸۷) تنها مد حرکت شعاعی یکنواخت در نظر گرفته شده بود و گنزالس و ساگاستا (۲۰۰۱) دو الگوی تغییر شکل مقطع تونل مورد بررسی قرار دادند و جابجایی کلی زمین را ناشی از این دو تغییر شکل می‌دانستند. میزان نشست دقیق در رابطه تحلیل گنزالس و ساگاستا (۲۰۰۱) مستلزم محاسبه دقیق دو فراسنج تغییر شکل شعاعی یکنواخت ϵ و بیضی شدگی تونل ρ می‌باشد [۱۰]. روش Bobet در سال ۲۰۰۱ برای محاسبه نشست سطح زمین تونل‌های کم عمق در خاک‌های اشباع استفاده می‌شود. اگر چه این روش بر اساس الاستیسیته بوده و نمی‌تواند برای بیان حالت واقعی رفتار خاک در نظر گرفت، اما نتایج محاسبات ارائه شده با این روش با اطلاعات بدست آمده از پروژه‌های مختلف همخوانی قابل قبولی دارد و می‌تواند به عنوان تخمینی برای طراحی‌های اولیه بکار برد. شرایط رفتاری خاک کرنش مسطح و سطح تماس بین پوشش تونل و زمین اصطکاکی در نظر گرفته شده است. ضخامت پوشش تونل کمتر از شعاع تونل و همچنین نفوذپذیری زمین به قدر کافی کم منظور شده است. بطوری که امکان حذف اضافه فشار آب حفره‌ای در حین ساخت وجود ندارد. در این روش با هدف مطالعه نشست در شرایط کوتاه مدت (بلافاصله بعد از ساخت)، حرکت زمین برای حالت تونل کم عمق در خاک اشباع محاسبه شده است. راه حل باید معادله تعادل، معادلات سازگاری کرنش و شرایط مرزی را ارضا کند [۱۱]. Chakeri در سال ۲۰۱۴ رابطه جدیدی برای محاسبه ماکزیمم نشست قائم سطح زمین در اثر حفاری تونل ارائه کردند که در رابطه ۲-۵ نشان داده شده است.

$$S_{\max} = A.S \quad 5-2$$

$$A = 1.8825 \left(\frac{D}{Z} \right) \quad 6-2$$

$$S = 1699.2 \left(\left(\frac{\gamma Z + \sigma_s - (c - 0.3\sigma_T)}{E} \right) (1 - \theta)(1 - \sin\phi) \right)^{0.8361} \quad 7-2$$

A فاکتور نسبت قطر تونل به عمق تونل، γ وزن مخصوص بر حسب $\frac{KN}{m^3}$ ، Z عمق تونل بر حسب متر، σ_s سربار سطح زمین kPa، c چسبندگی خاک بر حسب kPa، σ_T فشار صفحه حفر kPa، θ ضریب پواسون، ϕ زاویه

اصطکاک خاک بر حسب درجه، D قطر تونل بر حسب متر، مقدار نشست ماکزیمم نهایی بر حسب میلی متر می باشد. [۱۲]

۳-۲ مروری بر فعالیت های پیشین محاسبه فشار وارده بر پیشانی تونل

یکی از اهداف اصلی در روند حفاری تونل نگهداری خاک اطراف و سینه کار تونل و همچنین داشتن کمترین تغییر مکان سینه کار تونل در حین حفاری و در زمان بهره برداری تونل ها می باشد. حفاری تونل های شهری از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا تاثیر فروریزش تونل ها و تغییر مکان های بیش از حد می تواند باعث فاجعه های بسیار بزرگ و آسیب رساندن به ساختمان های اطراف تونل شود. به منظور جلوگیری از این اتفاق می بایست در هنگام حفاری، توده خاک اطراف تونل با اعمال فشارهای داخلی کنترل و بلافاصله پس از اتمام حفاری هر بخش پوشش نهایی جایگزین فشار داخلی گردد. اگر سطح آب زیرزمینی بالاتر از محور مرکزی تونل باشد می بایست موانعی برای جلوگیری از ورود آب به پیشانی تونل فراهم گردد. وجود آب در پیشانی تونل باعث فرسایش پیشانی، که این مسئله باعث ناپایداری تونل خواهد شد. روش های نگهداری پیشانی تونل توسط ماشین حفار در زمین های آبرفتی، با توجه به نوع دانه بندی خاک شامل: روش تزریق دوغاب، روش هوای فشرده و روش فشار متعادل کننده زمین می باشد.

اگر فشار اعمالی بیش از فشار ماکزیمم باشد، سطح زمین دچار بالا آمدگی (uplift) و گسیختگی خواهد شد. اگر فشار اعمالی کمتر از فشار حداقل باشد، این فشار منجر به نشست سطحی و لغزش پیشانی تونل خواهد شد. احداث تونل در زمین های نرم در عمق کم می تواند سبب نشست سطح زمین گردد. بنابراین کاهش نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل و اعمال فشار پیشانی تونل از اهمیت ویژه ای برخوردار است. محدوده واقعی فشار اعمالی برای نگهداری و پایداری به عوامل گوناگونی بستگی دارد که شامل: خصوصیات توده خاک، شرایط آب های زیرزمینی، روش های حفاری، ارتفاع سربار خاکی روی تاج تونل، قطر تونل و ... می باشد. از جمله مطالعات صورت گرفته در مورد محاسبه فشار اعمالی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

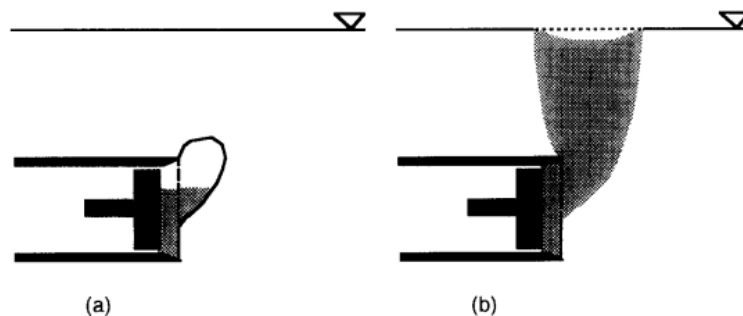
Borms & Bennermark در توده خاک چسبنده در شرایط عدم وجود آب زیرزمینی برای یک تونل دایره ای با تحلیل دو بعدی به بررسی فشار اعمالی در پیشانی تونل پرداختند [۱۳]. Atkinson & Patts در سال ۱۹۷۷ برای یک خاک دانه ای با سربار خاکی همگن، عدم وجود آب زیرزمینی، وجود سربار زنده روی سطح زمین و با سطح گسیختگی دایره ای به بررسی فشار اعمالی در پیشانی تونل پرداختند [۱۴] Davis در سال ۱۹۸۰ بررسی بر روی طول وجود و عدم وجود سپر در نزدیکی پیشانی تونل دایره ای برای یک خاک چسبنده با سربار زنده روی سطح زمین و همچنین محاسبه فشار اعمالی بروی پیشانی تونل پرداختند. Krause در سال ۱۹۸۷ با آنالیزهای تعادل حدی و با سطح گسیختگی دایره ای و کروی یک تونل دایره ای با سربار خاکی همگن و خاک چسبنده به بررسی فشار پیشانی تونل پرداختند. Leca & Dormieux در سال ۱۹۹۰ با استفاده از آنالیز تعادل حدی سه

بعدی برای یک خاک دانه‌ای با سربار خاکی همگن و عدم وجود آب زیرزمینی و مقطع دایره‌ای تونل به بررسی فشار پیشانی تونل پرداختند. Jancsecz & Steiner در سال ۱۹۹۴ با استفاده از مدل گوه و سیلو برای یک خاک چسبنده-اصطکاکی و مقطع دایره‌ای با وجود آب زیرزمینی در محل حفاری تونل و سربار خاکی همگن به بررسی فشار پیشانی تونل پرداختند. Kovari & Anagistou در سال ۱۹۹۶ با استفاده از مدل سیلو و گوه برای یک خاک دانه‌ای با مقطع دایره‌ای، وجود سطح آب زیرزمینی با سربار خاکی همگن به بررسی فشار پیشانی تونل پرداختند [۱۵]. Broere در سال ۲۰۰۱ با استفاده از مدل گوه و سیلو برای یک خاک چسبنده-اصطکاکی با روش تعادل حدی، مقطع دایره‌ای، سربار خاکی ناهمگن به بررسی فشار پیشانی تونل پرداختند [۱۶]. Carranza & Torres در سال ۲۰۰۴ با استفاده از شرایط تعادل حدی، یک خاک چسبنده-اصطکاکی، سربار زنده روی سطح زمین و عدم وجود آب زیرزمینی به بررسی فشار پیشانی تونل پرداختند [۱۶]. Tang در سال ۲۰۱۳ با در نظر گرفتن یک سربار خاکی چند لایه و با استفاده از روش کران بالا و وجود آب زیرزمینی و خاک چسبنده-اصطکاکی به محاسبه فشار پیشانی تونل پرداختند [۱۳]. Han et al. در سال ۲۰۱۶ با در نظر گرفتن یک سربار خاکی چند لایه روی تاج تونل برای یک خاک چسبنده-اصطکاکی با مقطع دایره‌ای و مکانیزم گسیختگی بلوک‌های مخروطی ناقص به بررسی فشار پیشانی تونل پرداختند [۱۷]. هدف از تحلیل پایداری پیشانی تونل، برآورد میزان ایمنی تونل در برابر فروریزش خاک در پیشانی و تغییر مکان‌های سطح زمین می‌باشد. به همین منظور در حفاری‌های مکانیزه تونل می‌بایست فشار حداقل و حداکثر اعمالی در پیشانی تونل در حین حفاری تونل مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲-۳-۱ محاسبه فشار وارده بر پیشانی تونل

۲-۳-۱-۱ فشار پیشانی تونل روش هورن (۱۹۶۰) Horn (1960)

تئوری نگهداری پیشانی تونل در حین حفاری تونل به صورت سه بعدی در حالت گسیختگی پیشانی تونل، اولین بار توسط هورن بررسی شده است. که در شکل ۲-۱ الگوهای گسیختگی پیشانی تونل نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۲-۱ الگوی گسیختگی پیشانی تونل (a) ماسه (b) رس