دانشگاه یزد
دانشکده علوم
گروه زمین‌شناسی

پایان‌نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
زمین‌شناسی مهندسی

برآورد فشار جبهه‌کار در تونل‌سازی با ماشین فشار تعادلی زمین و مقایسه آن با مقادیر واقعی حفاری (مطالعه موردی: خط هفت متروی تهران، قطعه شرقی‌غربی)

اساتید راهنما :
دکتر حمید مهرنهاد
دکتر کاظم برخورداری

استاد مشاور: **مهندس صادق طریق‌ازلی**

پژوهش و نگارش: **جلیل قلیچ‌زاده**

اسفند ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين الرحمن الرحيم مالك يوم الدين
اهدنا الصراط المستقيم صراط الذين انعمت عليهم
غير المغضوب عليهم ولا الضالين

با سپاس و قدردانی از برترین های زندگیم

پدر بزرگوارم

که لحظه لحظه زیستنم را در سایه بزرگواری و دانایی‌اش آسودم و وجود پر افتخارش سایه‌ایست جاودانه بر فراز سربلندی‌های من

و

مادر مهربانم

که مفهوم بی دریغ مهربانی و صداقت است. او که دلخوشی‌های امروزم را مدیون دلواپسی‌های همیشگی‌اش هستم.

تقدیم به آن دو عزیز

از اساتید بزرگوارم، جناب آقای **دکتر حمید مهر نهاد**، جناب آقای **دکتر کاظم برخورداری** و جناب آقای **مهندس صادق طریق‌ازلی** که در مراحل انجام پژوهش از راهنمایی‌های ارزنده این عزیزان برخوردار بوده‌ام، کمال تشکر و سپاس را دارم.

از آقایان مهندسین غلامرضا شمسی، جلال قلیچ زاده، محمد فروغی، حمید قریان و همه عزیزانی که ذکر نامشان مقدور نیست، جهت همکاری بی‌دریغ‌شان در پیشبرد این پایان‌نامه سپاس‌گذارم.

چکیده:

یک عامل مشترک در هر پروژه تونل‌سازی خطرات عمومی (جانی و مالی) آن است که برای تمامی تونل‌ها چه در زیر یک دشت، چه در زیر یک منطقه شهری و یا زیر بزرگراه صدق می‌کند. مسئله مهم در ایمنی یک پروژه، امکان ایجاد تعادل کامل فشار خاک جهت به حداقل رساندن تغییرات در سطح زمین بالادست تونل است. تونل‌سازی با استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع نوع متعادل-کننده فشار زمین به منظور کاهش هر چه بیشتر ریزش خاک و کنترل و محدود کردن نشست‌های سطحی زمین توسعه یافته است. همراه با کنترل حجم خاک حفاری‌شده، مدیریت فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه کار تونل از مهمترین عوامل تضمین‌کننده بهره‌برداری و عملکرد موفقیت‌آمیز ماشین حفاری تمام مقطع نوع متعادل کننده فشار زمین می‌باشد. محاسبه فشار مناسب جبهه‌کار تونل هنگام پیشروی، جهت جلوگیری از ناپایداری یک اصل اساسی است. این مسئله می‌بایست با پایش دقیق شرایط واقعی زمین همراه شود. بنابراین با توجه به افزایش اجرای تونل‌های شهری در کشور و لزوم تعیین فشار مناسب جبهه‌کار برای این گونه تونل‌ها، به عنوان مطالعه موردی بخشی از خط هفت متروی تهران (قطعه شرقی- غربی) مورد توجه قرار گرفته است. در این پروژه بر اساس روش‌های تحلیلی و روش عددی، محاسبات انجام شده و نتایج حاصل از روش‌های مختلف با مقادیر واقعی ماشین که از پایش داده‌های اپراتوری بدست آمده مقایسه شده و نزدیکترین مقادیر پیش بینی شده به مقادیر واقعی، تعیین و در نهایت روشی که بیشترین تطابق را با مقادیر واقعی حفاری شده دارد، ارائه گردیده است.

فهرست مطالب

فصل اول- کلیات ۱
۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- تاریخچه مختصر تونل‌سازی با سپر ۲
۱-۳ انواع ماشین‌آلات حفاری تونل ۵
۱-۳-۱- تقسیم‌بندی بر اساس پوشش جبهه‌کار توسط دستگاه حفار ۵
۱-۳-۱-۱- دستگاه‌های حفاری تمام مقطع ۵
۱-۳-۱-۲- ماشین‌آلات حفاری جزء مقطع ۶
۱-۳-۲- تقسیم‌بندی بر مبنای وضعیت زمین ۶
۱-۳-۲-۱- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های نرم ۶
۱-۳-۲-۲- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های سخت ۷
۱-۳-۳- تقسیم‌بندی سپرها بر مبنای نوع نگهداری جبهه‌کار: ۸
۱-۳-۳-۱- نگهداری طبیعی ۹
۱-۳-۳-۲- نگهداری جبهه‌کار به کمک هوای فشرده ۹
۱-۳-۳-۳- نگهداری جبهه کار بوسیله فشار دوغاب ۱۰
۱-۳-۳-۴- نگهداری به کمک تعادل فشار خاک در اطاقک حفاری ۱۰
۱-۳-۴- مبانی تونل‌سازی با TBM نوع متعادل‌کننده فشار زمین ۱۱
۱-۴- معرفی پروژه ۱۳
۱-۴-۱- بخش‌های اصلی ماشین EPB خط هفت ۱۴
۱-۴-۲- مشخصات ماشین حفار و سیستم نگهداری ۱۵
۱-۴-۲-۱- مشخصات ماشین حفار قطعه شرقی- غربی خط هفت ۱۵
۱-۴-۲-۲- پوشش تونل ۱۶
۱-۵- ضرورت و هدف تحقیق: ۱۸
فصل دوم- مروری بر روش‌های آنالیز پایداری جبهه‌کار تونل ۲۱
۲-۱- مقدمه ۲۱
۲-۲- روش‌های تحلیلی ۲۲
۲-۲-۱- روش‌های تعادل حدی کلی(LEM): ۲۲
۲-۲-۱-۱ تئوری سیلوی ترزاقی (۱۹۴۳) ۲۲
۲-۲-۱-۲- هورن (۱۹۶۱) ۲۵
۲-۲-۱-۳ روش موراياما (۱۹۶۶) ۲۵
۲-۲-۱-۴- روش برومز و بنمارک (۱۹۶۷) ۲۶
۲-۲-۱-۵- روش کراس (۱۹۸۷) ۲۷

۲-۲-۱-۶- روش محکم و همکاران (۱۹۸۹) ۲۸
۲-۲-۱-۷- روش جانسز و استاینر(۱۹۹۴) ۳۰
۲-۲-۱-۸- روش آناگنوستو و کواری (۱۹۹۶) ۳۳
۲-۲-۱-۹- روش بروئر (۲۰۰۱) ۳۷
۲-۲-۲- روش‌های تحلیل حدی تنش (LASM): ۴۱
۲-۲-۲-۱- راه‌حل کران (مرز) پایین: ۴۱
۲-۲-۲-۲- راه‌حل کران (مرز) بالا: ۴۱
۲-۲-۲-۳- روش آتکینسون و پوتس ۴۲
۲-۲-۲-۴- روش دیویس و همکاران ۴۳
۲-۲-۲-۵- روش لکا و دورمیکس (۱۹۹۰) ۴۶
۲-۲-۲-۶- روش کارنزا و تورس (۲۰۰۴) ۵۱
۲-۳- روش‌های تجربی ۵۳
۲-۴- روش‌های عددی ۵۷
۲-۴-۱- روش‌های دوبعدی: ۵۷
۲-۴-۲- روش های سه‌بعدی: ۶۱
فصل سوم- مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل ۶۸
۳-۱- مقدمه ۶۸
۳-۱-۱- مطالعات شناسایی زمین ۶۸
۳-۱-۱-۱- حفاری اکتشافی ۶۸
۳-۱-۱-۲- آزمایش‌های برجا (صحرایی) ۶۹
۳-۱-۱-۳ آزمون‌های آزمایشگاهی ۷۰
۳-۱-۲- زمین‌شناسی مسیر تونل ۷۰
۳-۱-۳- گسل‌های محدوده مورد مطالعه ۷۱
۳-۱-۴- تفکیک و توصیف واحدهای زمین‌شناسی مهندسی ۷۴
۳-۱-۴-۱- واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-1 ..... ۷۵
۳-۱-۴-۲- واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-2 ..... ۷۶
۳-۱-۴-۳- واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-3 ..... ۷۷
۳-۱-۴-۴- واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-4 ..... ۷۸
۳-۱-۴-۵- واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-5 ..... ۷۹
۳-۱-۴-۶- واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-6 ..... ۷۹
۳-۱-۵- گسترش و موقعیت واحدهای خاکی در مسیر تونل ۸۰
۳-۱-۶- تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاک ۸۴
۳-۱-۷- وضعیت آب زیرزمینی و ارتفاع روباره در مسیر تونل ۸۴
فصل چهارم- محاسبه فشار نگهدارنده جبهه‌کار به روش‌های تحلیلی و تجربی ۸۷

۴-۱- مقدمه ۸۷
۴-۱-۱ شرایط تعادل ۸۹
۴-۱-۲- ضریب اطمینان ۹۰
۴-۱-۳- مقاطع مورد بررسی ۹۱
۴-۲- روش‌های محاسبه فشار خاک ۹۵
۴-۲-۱- روش ترزاقی ۹۷
۴-۲-۲- روش لکا و دورمیکس ۹۹
۴-۲-۳- روش جانسز و استاینر ۱۰۲
۴-۲-۴- روش آناگنوستو وکواری ۱۰۶
۴-۲-۵- روش بروئر ۱۱۱
۴-۲-۶- روش تجربی COB ۱۱۵
۴-۳- مقایسه روش‌های مختلف محاسبه فشار ۱۱۷
فصل پنجم- محاسبه فشار نگهدارنده جبهه‌کار تونل به کمک مدل‌سازی عددی ۱۱۹
۵-۱- مقدمه ۱۱۹
۵-۲- اعتبارسنجی نرم افزار ۱۲۰
۵-۳- اطلاعات ورودی نرم افزار ۱۲۲
۵-۳-۱- هندسه ۱۲۲
۵-۳-۲- شرایط مرزی ۱۲۳
۵-۳-۳- خصوصیات مواد ۱۲۳
۵-۳-۴- مش‌بندی ۱۲۴
۵-۳-۵- شرایط اولیه ۱۲۶
۵-۳-۶- محاسبات ۱۲۷
۵-۳-۷- نتایج خروجی ۱۳۰
۵-۳-۸- منحنی‌های بار- جابجایی و ضریب ایمنی- جابجایی ۱۳۲
۵-۳-۹- شکل کلی مدل‌ها ۱۳۲
۵-۳-۱۰- مقایسه روش‌های تحلیلی و عددی ۱۳۵
۵-۴- مقایسه مقادیر فشار جبهه‌کار با مقادیر اعمال شده در پروژه ۱۳۶
۵-۴-۱- ابزار بندی ۱۴۰
۵-۴-۱-۱ مقدمه ۱۴۰
۵-۴-۱-۲- اهداف ابزاربندی در پروژه خط ۷ متروی تهران ۱۴۰
۵-۴-۱-۳- نشست سنجی سطحی توسط نقاط ترازیابی ۱۴۱
۵-۴-۱-۴- اعتبارسنجی مقادیر فشار محاسبه شده ۱۴۳
۵-۴-۱-۵- مقایسه روش‌های تحلیلی و عددی با مقادیر واقعی ۱۴۶
فصل ششم- نتایج و پیشنهادات ۱۴۷

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۴۷
۶-۲- پیشنهادات ۱۴۹
منابع ۱۵۱

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: سپر استفاده شده در ساخت تونل تایمز، انگلستان ۳
شکل ۱-۲: سپر گریت‌هد استفاده شده در پروژه رودخانه تایمز ۴
شکل ۱-۳: تقسیم بندی کلی انواع TBM ۸
شکل ۱-۴: انواع مختلف نگهداری جبهه‌کار تونل ۹
شکل ۱-۵: مبانی عملکرد ماشین حفاری نوع متعادل کننده فشار زمین ۱۳
شکل ۱-۶ موقعیت مسیر تونل بر روی نقشه تهران ۱۴
شکل ۱-۷: بخش‌های مختلف سپر EPB بر اساس طراحی اولیه ماشین قطعه شرقی-غربی ۱۵
شکل ۱-۸: موقعیت سگمنت کلید در یک رینگ بتنی ۱۷
شکل ۲-۱: ناحیه سست‌شدگی در تونل‌های کم عمق ۲۳
شکل ۲-۲: تشکیل قوس در تونل‌های عمیق [۲] ۲۳
شکل ۲-۳: مدل ارائه شده توسط هورن [۱۰] ۲۵
شکل ۲-۴: مدل پایداری سینه‌کار در روش موراياما [۱۰] ۲۶
شکل ۲-۵: باز شدگی قائم بدون نگهدارنده [۱۰] ۲۷
شکل ۲-۶: مکانیزم‌های گسیختگی دایره‌ای و کروی به روش کراس [۷] ۲۸
شکل ۲-۷: مدل ریاضی سه‌بعدی با گسیختگی گوه‌ای ۲۹
شکل ۲-۸: بارهای عمل‌کننده بر روی گوه [۱۱] ۳۰
شکل ۲-۹: مدل گوه و سیلو به همراه نیروهای عمل‌کننده بر روی آن [۱۲] ۳۱
شکل ۲-۱۰: نمودار محاسبه ضریب فشار جانبی سه‌بعدی خاک [۱۲] ۳۳
شکل ۲-۱۱: نمودار محاسبه زاویه گسیختگی گوه [۱۲] ۳۳
شکل ۲-۱۲: مکانیسم لغزش در مدل سیلو و گوه‌ی هورن [۱۳] ۳۴
شکل ۲-۱۳: نمودارهای تعیین ضرایب بدون بعد [۱۳] ۳۶
شکل ۲-۱۴: گوه بارگذاری‌شده توسط سیلوی خاک [۱۰] ۳۸
شکل ۲-۱۵: تعریف علائم در مدل گوه چند لایه [۱۰] ۳۹
شکل ۲-۱۶: مکانیزم ریزش برای یک راه حل مرز بالا [۱۵] ۴۳
شکل ۲-۱۷: طرح کلی بخشی از یک تونل فاقد لاینینگ [۱۶] ۴۴
شکل ۲-۱۸: گراف‌های بدست آمده بر اساس معادلات کران بالا و پایین ۴۵
شکل ۲-۱۹: نسبت پایداری برای تونل‌های با لاینینگ (P=0) در رس [۱۶] ۴۶
شکل ۲-۲۰: هندسه ساده شده برای پایداری سینه کار تونل‌های کم عمق [۱۴] ۴۷
شکل ۲-۲۱: مکانیسم‌های گسیختگی مخروطی [۱۴] ۴۸
شکل ۲-۲۲: مقادیر کران بالا $+ \mathbf{Nsc}$ و $+ \mathbf{N\gamma c}$ برای مکانیسم ریزش ۵۰
شکل ۲-۲۳: مقادیر کران پایین $- \mathbf{Nsc}$ و $- \mathbf{N\gamma c}$ برای مکانیسم ریزش ۵۰

شکل ۲-۲۴: طرح اصلی کاکو– کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل [۱۷] ۵۱
شکل ۲-۲۵: محاسبه شعاع تونل اصلاح‌شده برای تجزیه وتحلیل پایداری سینه‌کار [۱۷] ۵۲
شکل ۲-۲۶: رابطه بین فشار زمین و جابجایی سینه‌کار [۱۸] ۵۴
شکل ۲-۲۷: نوسانات فشار اتاقک حفاری [۱۰] ۵۶
شکل ۲-۲۸: تغییرات N نسبت به C/D برای تونل با کرنش صفحه‌ای ۵۸
شکل ۲-۲۹: بردارهای جابه‌جایی و کرنش برشی ماکزیمم برای C/D=2 [۱۹] ۵۹
شکل ۲-۳۰: جابه‌جایی‌های کلی برای C/D=5 [۲۰] ۶۰
شکل ۲-۳۱: نمودارهای کران بالا و پایین بدست آمده با استفاده از روش‌های عددی [۲۰] ۶۱
شکل ۲-۳۲: توزیع تراز کلی آب اطراف سینه‌کار تونل (C/D=H/D=3) [۲۱] ۶۲
شکل ۲-۳۳: تنش‌های اصلی (a-c) و تغییر مکان‌های افزایشی (d-f)در لحظه گسیختگی ۶۴
شکل ۲-۳۴: تغییرشکل‌های پلاستیک رخ داده با اعمال فشارهای نگهدارنده ($\boldsymbol{\sigma t}$) مختلف ۶۵
شکل ۲-۳۵: مقایسه مکانیسم‌های گسیختگی در روش عددی و تحلیل حدی [۲۶] ۶۶
شکل ۲-۳۶: مدل‌های ارائه شده جهت توصیف ریزش (a وb) و بالازدگی ۶۷
شکل ۳-۱: موقعیت مسیر تونل بر روی نقشه زمین‌شناسی پژوهشگاه زلزله [۸] ۷۲
شکل ۳-۲: گسل‌های فعال مهم گستره اطراف بخش شرقی-غربی ۷۳
شکل ۳-۳: نمایی از خاک‌های تشکیل دهنده واحد ET-1 [۸] ۷۶
شکل ۳-۴: نمایی از خاک‌های تشکیل دهنده واحد ET-2 [۸] ۷۶
شکل ۳-۵: نمایی از خاک‌های تشکیل دهنده واحد ET-3 [۸] ۷۸
شکل ۳-۶: نمایی از خاک‌های تشکیل دهنده واحد ET-4 [۸] ۷۸
شکل ۳-۷: نمایی از خاک‌های تشکیل دهنده واحد ET-5 [۸] ۷۹
شکل ۳-۸ : نمایی از خاک‌های تشکیل دهنده واحد ET-6 [۸] ۸۰
شکل ۳-۹: برش زمین‌شناسی مهندسی بخش شرقی-غربی مسیر تونل خط هفت ۸۲
شکل ۳-۱۰: سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در مسیر تونل خط هفت [۸] ۸۵
شکل ۳-۱۱: تغییرات ارتفاع روباره در بخش شرقی-غربی مسیر تونل خط هفت [۸] ۸۶
شکل ۴-۱: گرادیان فشار در اتاقک حفاری و نوار نقاله مارپیچ (میدل و همکاران، ۲۰۰۳) ۸۸
شکل ۴-۲: لایه‌بندی خاک در برش عرضی برای مقاطع ۱ تا ۶ ..... ۹۳
شکل ۴-۳: لایه‌بندی خاک در برش عرضی برای مقاطع ۷ تا ۱۰ ..... ۹۴
شکل ۴-۴: نحوه محاسبه میانگین پارامترهای مقاومتی و فیزیکی خاک ۹۵
شکل ۴-۵: موقعیت قرارگیری سلول‌های فشار سنج بر روی دیوار جداکننده TBM خط هفت ... ۹۶
شکل ۴-۶: نمایش اختلاف فشارهای ثبت شده توسط سلول‌های فشار سنج ۹۶
شکل ۴-۷: نوسانات فشار ثبت شده توسط سلول‌های فشار سنج در طی حفاری ۹۷
شکل ۴-۸: حداقل فشار نگهدارنده محاسبه شده توسط روش ترزاقی ۹۹
شکل ۴-۹: مقادیر کران بالا + $\boldsymbol{Nsc}$ و + $\boldsymbol{N\gamma c}$ برای مکانیسم ریزش ۱۰۱
شکل ۴-۱۰: حداقل فشارنگهدارنده محاسبه شده توسط روش لکا و دورمیکس ۱۰۲

شکل ۴-۱۱: مدل گوه و سیلو به همراه نیروهای عمل کننده بر روی آن [۱۲] ۱۰۳
شکل ۴-۱۲: حداقل فشارنگهداری محاسبه شده توسط روش جانسز و استاینر ۱۰۶
شکل ۴-۱۳: فشار نگهدارنده بدون نیروی نشت [۲۹] ۱۰۷
شکل ۴-۱۴: گراف‌های ارائه شده برای ضریب بدون بعد **F0** [۱۳] ۱۰۸
شکل ۴-۱۵: گراف‌های ارائه شده برای ضریب بدون بعد **F1** [۱۳] ۱۰۸
شکل ۴-۱۶: **F0** محاسبه شده توسط روش های مختلف [۲۷] ۱۰۹
شکل ۴-۱۷: **F1** محاسبه شده توسط روش های مختلف [۲۷] ۱۱۰
شکل ۴-۱۸: حداقل فشار نگهداری محاسبه شده توسط روش آناگنوستو وکواری ۱۱۱
شکل ۴-۱۹: تعریف علائم در مدل گوه چند لایه [۱۰] ۱۱۲
شکل ۴-۲۰: محاسبه عرض هر قطعه با توجه به ضخامت و عمق قرارگیری آن ۱۱۳
شکل ۴-۲۱: حداقل فشارنگهداری محاسبه شده توسط روش بروئر ۱۱۵
شکل ۴-۲۲: حداقل فشار نگهداری محاسبه شده توسط روش COB ۱۱۶
شکل ۴-۲۳: مقادیر حداقل فشارنگهداری جبهه‌کار تونل محاسبه شده به کمک روش‌های تحلیلی ۱۱۷
شکل ۴-۲۴: محاسبه حداقل فشار نگهدارنده با استفاده از روش‌های تحلیلی در تراز سلول فشارسنج شماره ۸ ..... ۱۱۸
شکل ۵-۱: هندسه مدل و موقعیت تونل بر اساس راهنمای اعتبار سنجی نرم افزار [۳۱] ۱۲۱
شکل ۵-۲: ضریب بار نهایی بدست آمده پس از محاسبات عددی نرم افزار ۱۲۱
شکل ۵-۳: مقادیر ضرایب بار در مقابل میزان جابه‌جایی جبهه‌کار تونل [۳۲] ۱۲۲
شکل ۵-۴: هندسه مدل در خط هفت متروی تهران در موقعیت ۷۰۰+۲۰- ۳۰۰+۲۱ ..... ۱۲۴
شکل ۵-۵: مش‌بندی دو بعدی در موقعیت ۷۰۰+۲۰- ۳۰۰+۲۱ ..... ۱۲۵
شکل ۵-۶: مش‌بندی سه بعدی در موقعیت ۷۰۰+۲۰- ۳۰۰+۲۱ ..... ۱۲۵
شکل ۵-۷: فشار منفذی آب (اولیه) ۱۲۶
شکل ۵-۸: تنش موثر خاک (اولیه) ۱۲۷
شکل ۵-۹: پایان فاز محاسباتی ۱۲۹
شکل ۵-۱۰: پنجره محاسبات جعبه Multipliers ۱۲۹
شکل ۵-۱۱: جابجایی کل در پایان فاز اول ۱۳۰
شکل ۵-۱۲: جابجایی عمودی در پایان فاز اول ۱۳۱
شکل ۵-۱۳: جابجایی کل در پایان فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار) ۱۳۱
شکل ۵-۱۴: رابطه بین ضریب بار با جابجایی کل (فاز دوم) ۱۳۲
شکل ۵-۱۵: نتایج مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار Plaxis برای ۱۰ مقطع موردی ۱۳۵
شکل ۵-۱۶: مقایسه مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش‌های تحلیلی و روش عددی ۱۳۶
شکل ۵-۱۷: مشخصات هندسی تونل انتقال آب رباط کریم ۱۳۸
شکل ۵-۱۸: مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده برای ۴ مقطع به منظور محاسبه فشار جبهه‌کار ۱۳۹

شکل ۵-۱۹: چگونگی تعبیه نقاط نشانه در سطح زمین [۳۶,۳۵]..... ۱۴۲
شکل ۵-۲۰: روش نصب نقاط نشانه نقشه‌برداری سطحی در مسیر پروژه و نحوه قرائت آنها..... ۱۴۲
شکل ۵-۲۱: موقعیت قرارگیری نقاط ترازیابی سطحی نسبت به تونل..... ۱۴۳
شکل ۵-۲۲: میزان نشست‌های ثبت شده توسط نقطه ترازیاب نصب شده در کیلومتراژ ۱۱+۶۵۰ ..... ۱۴۴
شکل ۵-۲۳: میزان نشست‌های ثبت شده توسط نقطه ترازیاب نصب شده در کیلومتراژ ۱۱+۵۵۰ ..... ۱۴۴
شکل ۵-۲۴: میزان نشست‌های ثبت شده توسط نقطه ترازیاب نصب شده در کیلومتراژ ۱۱+۴۰۰ ..... ۱۴۵
شکل ۵-۲۵: میزان نشست‌های ثبت شده توسط نقطه ترازیاب نصب شده در کیلومتراژ۱۱+۳۰۰ ..... ۱۴۵
شکل ۵-۲۶: مقایسه حداقل فشار نگهداری جبهه‌کار تونل با استفاده از مقادیر تحلیلی، عددی و واقعی..... ۱۴۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱: مشخصات دستگاه حفاری استفاده‌شده در قطعه شرقی-غربی خط هفت ۱۶
جدول ۱-۲: مشخصات پوشش بتنی استفاده‌شده در پروژه خط هفت متروی تهران ۱۷
جدول ۲-۱: مقادیر ضریب فشار جانبی سه‌بعدی خاک ۳۲
جدول ۲-۲: مقادیر زاویه گسیختگی گوه ۳۲
جدول ۲-۳: فشار نگهداری استفاده شده در چندین پروژه تونل‌سازی ژاپن برای سپر EPB ۵۵
جدول ۳-۱: تعداد کل گمانه‌های حفاری‌شده در محدوده مورد بررسی ۶۹
جدول ۳-۲: فهرست آزمون‌های برجا (صحرایی) بخش شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران ۶۹
جدول ۳-۳: فهرست آزمون‌های برجا (صحرایی) بخش شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران ۷۰
جدول ۳-۴: مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل ۷۵
جدول ۳-۵: ناحیه بندی مسیر تونل بر اساس گسترش واحدهای خاکی دربرگیرنده سینه‌کار [۸] ۸۳
جدول ۳-۶: مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل [۸] ۸۴
جدول ۴-۱: ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب ۹۱
جدول ۴-۲: مقاطع انتخابی برای محاسبه فشار جبهه‌کار تونل ۹۲
جدول ۵-۱: پارامترهای طراحی خاک در خط هفت متروی تهران ۱۲۳
جدول ۵-۲: خصوصیات ماشین EPB خط هفت متروی تهران ۱۲۴
جدول ۵-۳: مقاطع انتخابی جهت محاسبه فشار نگهدارنده جبهه‌کار ۱۳۷
جدول ۵-۴: مقادیر فشار ثبت شده توسط سلول فشارسنج شماره ۸ به همراه شماره رینگ پیشرو ۱۳۷
جدول ۵-۵: مقادیر روباره و موقعیت قرارگیری محور تونل انتقال آب نسبت به تونل خط ۷ ..... ۱۳۸
جدول ۵-۶: مشخصات سیستم نگهداری تونل انتقال آب رباط کریم و تونل خط هفت مترو ۱۳۹