

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

## برآورد فشار سینه کار تونل خط ۳ متروی تهران با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

آرش اشراقی

استاد راهنما:

دکتر شکراله زارع

زمستان ۹۲

شماره: ۳۴۹۳۱۲۴۹  
تاریخ: ۹۳/۱/۲۵  
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

### فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای آرشد اشراقی رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان برآورد فشار سینه کار تونل خط ۳ متروی تهران با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی که در تاریخ ۹۲/۱۱/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

|                                |                                    |  |
|--------------------------------|------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> مردود | <input type="checkbox"/> دفاع مجدد | <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: <u>قابل تمیز امتیاز (۱۵/۷۵)</u> ) |
|--------------------------------|------------------------------------|--|

۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹-۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

| امضاء | مرتبه علمی  | نام و نام خانوادگی     | عضو هیأت داوران                 |
|-------|-------------|------------------------|---------------------------------|
|       | دکتری تخصصی | شکراله زارع            | ۱- استاد راهنما                 |
|       | -           | -                      | ۲- استاد مشاور                  |
|       | دکتری تخصصی | محمد کارآموزیان        | ۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی |
|       | دکتری تخصصی | احمد رمضانزاده         | ۴- استاد ممتحن                  |
|       | دکتری تخصصی | سید محمد اسماعیل جلالی | ۵- استاد ممتحن                  |

رئیس دانشکده:



تقدیم به پدر و مادر عزیزم

## تعهد نامه

اینجانب **آرش اشراقی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: برآورد فشار سینه کار تونل خط ۳ متروی تهران با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی تحت راهنمایی آقای **دکتر شکراله زارع** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

افزایش تمرکز جمعیت شهری و کمبود فضای سطحی برای گسترش معابر، تمایل برای استفاده از فضاهای زیرزمینی را افزایش داده است. با توجه به اینکه بیشتر شهرهای بزرگ بر بستری نامطلوب از نظر زمین-شناسی بنا شده‌اند، حفاری زیرزمینی (تونل) در این مناطق با مخاطراتی همراه است. شرایط پایداری سینه‌کار پیشروی در هر دو روش سنتی و مکانیزه تمام مقطع (TBM) از اهمیت زیادی برخوردار است. ناکافی بودن فشار نگهداری ریزش سینه کار و نشست سطح زمین را به همراه دارد و مقدار زیاد آن باعث بالازدگی (blowout) می‌شود در حالیکه دومی فقط در موارد استفاده از سپرهای تحت فشار و حفاری مکانیزه تمام مقطع اتفاق می‌افتد.

در این تحقیق مقدار فشار نگهداری سینه کار برای دستگاه متعادل کننده فشار زمین (EPB) مورد استفاده در خط ۳ متروی تهران برآورد می‌شود. این عمل با استفاده از شبیه‌سازی با تکنیک مونت-کارلو و روش عددی صورت می‌پذیرد. در فرآیند شبیه‌سازی داده‌های تصادفی بر اساس تابع توزیع تجمعی هر پارامتر تولید شده و در قالب روابط تحلیلی و تجربی قرار می‌گیرد سپس احتمال فاکتور ایمنی برای هر فشار نگهداری بدست آمده، محاسبه می‌شود. برای انجام محاسبات با استفاده از روش عددی، PLAXIS<sup>3D</sup> Tunnel که یک نرم‌افزار المان محدود است بکار گرفته شد.

مقادیر بدست آمده برای فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. با قرار دادن پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی در روابط بروئر نزدیکترین نتایج به مقادیر واقعی حاصل شد. در نبود مقادیر واقعی، مقادیر بدست آمده از روش‌های مذکور برای فشار نگهداری در برابر بالازدگی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل از روش بالتائوس و روش عددی با یکدیگر تطابق بهتری داشتند.

کلمات کلیدی: فشار سینه‌کار، شبیه‌سازی، تکنیک مونت‌کارلو، روش‌های عددی، نرم افزار PLAXIS<sup>3D</sup>

Tunnel

## فهرست مطالب

|   |    |
|---|----|
| فصل اول: تونلسازی مکانیزه در محیط شهری.....                     | ۱  |
| ۱-۱- مقدمه .....  | ۲  |
| ۲-۱- حفاری مکانیزه در محیط شهری .....                           | ۶  |
| ۱-۲-۱- سپر اسلاری .....   | ۷  |
| ۲-۲-۱- سپر فشار تعادلی زمین .....                               | ۸  |
| ۳-۱- طراحی فشار نگهداری سینه کار .....                          | ۱۱ |
| ۱-۳-۱- بررسی روش‌های تحلیل پایداری سینه کار تونل .....          | ۱۱ |
| ۲-۳-۱- ملاحظات مربوط به انتخاب فشار پایداری .....               | ۱۳ |
| ۴-۱- نتیجه گیری .....   | ۱۵ |
| فصل دوم: روش‌های تحلیلی برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل ..... | ۱۷ |
| ۱-۲- مقدمه .....  | ۱۸ |
| ۲-۲- روش‌های تعادل حدی .....                                    | ۱۸ |
| ۱-۲-۲- روش کراس (۱۹۸۷) .....                                    | ۱۹ |
| ۲-۲-۲- روش ینسز و استینر .....                                  | ۲۰ |
| ۳-۲-۲- روش آناگنوستو و کواری (۱۹۹۴) .....                       | ۲۴ |
| ۴-۲-۲- روش بروئر (۲۰۰۱) .....                                   | ۲۸ |
| ۵-۲-۲- روش کارانزا - تورس (۲۰۰۴) .....                          | ۳۷ |
| ۶-۲-۲- روش بالتائوس .....                                       | ۳۹ |
| ۳-۲- روش‌های تحلیل حدی .....                                    | ۴۰ |
| ۱-۳-۲- روش اتکینسون و پاتس (۱۹۷۷) .....                         | ۴۱ |



|    |   |
|----|---|
| ۴۱ | ۲-۳-۲- روش دیویس و همکاران (۱۹۸۰).....  |
| ۴۴ | ۴-۲- نتیجه گیری .....   |
| ۴۶ | فصل سوم: روش‌های تجربی و آزمایشگاهی برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل .....               |
| ۴۶ | ۱-۳- مقدمه .....  |
| ۴۷ | ۲-۳- روش برومز و بنرمارک (۱۹۶۷) .....   |
| ۴۸ | ۳-۳- روش اتکینسون و پاتس (۱۹۷۷).....  |
| ۴۸ | ۴-۳- روش کاسارین (۱۹۷۷) - میر و کاسارین (۱۹۸۱) .....                                      |
| ۴۹ | ۵-۳- روش میر (۱۹۷۹) - میر و کیمورا (۱۹۸۱).....  |
| ۵۱ | ۶-۳- روش اتکینسون و میر برای خاک درشتدانه .....   |
| ۵۲ | ۷-۳- روش چامبون و کورته (۱۹۹۴).....   |
| ۵۴ | ۸-۳- روش پیشنهادی توسط مرکز زیرزمینی بوون (COB) .....                                     |
| ۵۴ | ۹-۳- نتیجه گیری .....   |
|    | فصل چهارم: برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل در حفاری با دستگاه متعادل کننده فشار زمین با |
| ۵۶ | استفاده از روش مونت کارلو.....  |
| ۵۷ | ۱-۴- مقدمه .....  |
| ۵۸ | ۲-۴- زمین شناسی مهندسی گستره تهران و محل مورد مطالعه .....                                |
| ۵۸ | ۱-۲-۴- زمین ساخت گستره تهران.....   |
| ۵۹ | ۲-۲-۴- ویژگی‌های نهشته‌های دشت تهران .....  |
| ۶۳ | ۳-۲-۴- تهیه مدل ژئوتکنیکی مسیر تونل .....   |
| ۷۴ | ۳-۴- شبیه‌سازی با استفاده از تکنیک مونت کارلو .....                                       |
| ۷۶ | ۱-۳-۴- اعداد تصادفی.....  |
| ۷۷ | ۱-۱-۳-۴- تولید متغیرهای تصادفی.....   |

- ۷۷..... ۱-۱-۱-۳-۴ روش تبدیل معکوس
- ۷۷..... ۲-۱-۱-۳-۴ روش نام مستعار
- ۷۸..... ۳-۱-۱-۳-۴ روش ترکیب
- ۷۹..... ۴-۱-۱-۳-۴ روش پذیرش و رد کردن
- ۸۰..... ۲-۳-۴ تعیین مقدار کافی تکرار برای روش مونت کارلو
- ۸۰..... ۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای مربوط به محاسبه فشار نگهداری
- ۸۱..... ۱-۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه رسی
- ۸۴..... ۲-۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه ماسه‌ای
- ۸۵..... ۳-۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه شنی
- ۸۶..... ۵-۴ برآورد فشار نگهداری با استفاده از برنامه‌های نوشته شده در MATLAB
- ۸۷..... ۱-۵-۴ فشار نگهداری در برابر ریزش
- ۸۷..... ۱-۱-۵-۴ روش بروئر
- ۸۸..... ۱-۱-۱-۵-۴ محاسبه بار سطحی
- ۹۰..... ۲-۱-۵-۴ روش COB
- ۹۱..... ۲-۵-۴ فشار نگهداری برای بالازدگی
- ۹۱..... ۱-۲-۵-۴ روش بالتائوس
- ۹۱..... ۲-۲-۵-۴ روش پیشنهادی بر اساس روش تجربی COB
- ۹۲..... ۳-۵-۴ فاکتور ایمنی
- ۹۴..... ۴-۵-۴ مقاطع مورد مطالعه
- ۹۵..... ۱-۴-۵-۴ مقطع ۱
- ۱۰۰..... ۲-۴-۵-۴ مقطع ۲
- ۱۰۳..... ۳-۴-۵-۴ مقطع ۳

|     |   |
|-----|---|
| ۱۰۶ | ..... ۴-۴-۵-۴ مقطع ۴  |
| ۱۰۹ | ..... ۵-۴-۵-۴ مقطع ۵  |
| ۱۱۲ | ..... ۶-۴-۵-۴ مقطع ۶  |
| ۱۱۵ | ..... ۷-۴-۵-۴ مقطع ۷  |
| ۱۱۸ | ..... ۸-۴-۵-۴ مقطع ۸  |
| ۱۲۱ | ..... ۹-۴-۵-۴ مقطع ۹  |
| ۱۲۴ | ..... ۶-۴ نتیجه‌گیری  |
| ۱۲۶ | ..... فصل پنجم: برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل با استفاده از روش عددی              |
| ۱۲۷ | ..... ۱-۵-۱ مقدمه   |
| ۱۲۷ | ..... ۲-۵-۲ تعیین فشار نگهداری سینه‌کار تونل با نرم افزار PLAXIS <sup>3D</sup> Tunnel |
| ۱۲۹ | ..... ۱-۲-۵-۱ تشکیل هندسه مدل   |
| ۱۳۱ | ..... ۲-۲-۵-۲ شرایط اولیه   |
| ۱۳۲ | ..... ۳-۲-۵-۳ روند محاسبات  |
| ۱۳۷ | ..... ۳-۵-۳ مقاطع مورد مطالعه   |
| ۱۳۷ | ..... ۱-۳-۵-۱ مقطع ۱  |
| ۱۴۰ | ..... ۲-۳-۵-۲ مقطع ۲  |
| ۱۴۱ | ..... ۳-۳-۵-۳ مقطع ۳  |
| ۱۴۳ | ..... ۴-۳-۵-۴ مقطع ۴  |
| ۱۴۴ | ..... ۵-۳-۵-۵ مقطع ۵  |
| ۱۴۶ | ..... ۶-۳-۵-۶ مقطع ۶  |
| ۱۴۷ | ..... ۷-۳-۵-۷ مقطع ۷  |
| ۱۴۸ | ..... ۸-۳-۵-۸ مقطع ۸  |

|     |  |
|-----|--|
| ۱۵۰ | ..... ۹-۳-۵- مقطع ۹  |
| ۱۵۱ | ..... ۴-۵- نتیجه‌گیری  |
| ۱۵۲ | ..... فصل ششم: مقایسه نتایج روش‌های عددی و شبیه‌سازی مونت کارلو برای برآورد فشار نگهداری     |
| ۱۵۳ | ..... ۱-۶- مقدمه   |
| ۱۵۳ | ..... ۲-۶- مقایسه نتایج بدست آمده برای فشار نگهداری سینه‌کار در مقابل ریزش                   |
| ۱۵۵ | ..... ۳-۶- مقایسه نتایج بدست آمده برای فشار نگهداری سینه‌کار در مقابل بالازدگی               |
| ۱۵۶ | ..... ۴-۶-مقایسه کلی   |
| ۱۵۸ | ..... ۵-۶- نتیجه‌گیری  |
| ۱۶۰ | ..... فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد   |
| ۱۶۳ | ..... مراجع  |
| ۱۶۶ | ..... پیوست ۱: پروفایل طولی مسیر تونل در قطعه مورد مطالعه                                    |
| ۱۷۰ | ..... پیوست ۲: داده‌های پارامترهای خاک و منحنی‌های توابع توزیع احتمال تطبیق داده شده بر آنها |
| ۱۷۱ | ..... ۱- داده‌های پارامترهای خاک   |
| ۱۷۷ | ..... ۲- توابع توزیع احتمال  |
| ۱۸۴ | ..... پیوست ۳: متن برنامه‌های اجرا شده در نرم‌افزار MATLAB                                   |
| ۱۸۵ | ..... ۱- روند اجرای برنامه‌ها  |
| ۱۸۶ | ..... ۲- متن برنامه‌ها   |

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ اصول عملکرد یک سپر آبی ..... ۸
- شکل ۱-۲ اصول عملکرد سپر فشار تعادلی زمین ..... ۹
- شکل ۱-۳ رابطه بین فشار زمین و جابجایی ..... ۱۵
- شکل ۱-۲ مکانیزم‌های ناپایداری دایره‌ای و کروی ..... ۱۹
- شکل ۲-۲ مدل سه بعدی سیلو و گوه ..... ۲۱
- شکل ۲-۳ مدل گوه و منشور ..... ۲۵
- شکل ۲-۴ نیروهای وارد بر گوه در مقابل سینه‌کار ..... ۲۵
- شکل ۲-۵ منحنی‌های مربوط به ضرایب بدون بعد ..... ۲۷
- شکل ۲-۷ گوه بارگذاری شده توسط سیلوی خاکی ..... ۲۹
- شکل ۲-۸ تشریح نمادها در مدل گوه‌ای چندلایه ..... ۳۰
- شکل ۲-۹ نیروهای نگهداری در سینه‌کار (دستگاه اسلاری) ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۰ روش‌های مختلف توزیع تنش افقی در صفحات جانبی گوه ..... ۳۵
- شکل ۲-۱۱ مدل ککت ..... ۳۸
- شکل ۲-۱۲ شعاع تصحیح شده تونل برای نگهداری (کارانزا - تورس) ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۳ مدل بالازدگی شامل تنش برشی در مرز صفحات ..... ۴۰
- شکل ۲-۱۴ حد بالا و پایین نسبت پایداری برای تونل بدون نگهداری ..... ۴۲
- شکل ۲-۱۵ مکانیزم ناپایداری در حد بالا ..... ۴۳
- شکل ۲-۱۶ عدد پایداری حد بالا و پایین برای تونل با نگهداری کامل ..... ۴۴
- شکل ۳-۱ مدل پایداری سینه‌کار تونل برومز و بنرمارک ..... ۴۸
- شکل ۳-۲ تاثیر نسبت روباره به قطر بر عدد پایداری سینه‌کار با نگهداری کامل و فشار سطحی ..... ۴۹

- شکل ۳-۳. عدد پایداری حاصل از آزمایش سانتریفوژ..... ۵۰
- شکل ۳-۴. مکانیزم شکست برای تونل‌های با عمق کم..... ۵۱
- شکل ۳-۵. تعیین پارامترهای  $T_s$  و  $T_\gamma$  بر حسب زاویه اصطکاک داخلی طبق روش اتکینسون و میر..... ۵۲
- شکل ۲-۶. مقاطع تخریب برای نسبت‌های مختلف روباره به قطر..... ۵۳
- شکل ۴-۱. نقشه حدود مرزبندی نهشته‌های تهران و منطقه مورد مطالعه (قطعه چهارم)..... ۶۱
- شکل ۴-۲. وارد کردن اطلاعات مربوط به هر گمانه در RockWorks..... ۶۳
- شکل ۴-۳. مقطع درونبایی شده توسط RockWorks..... ۶۴
- شکل ۴-۴. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های B.3-0-2 و BH-C2..... ۶۵
- شکل ۴-۵. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C2 و BH-C4..... ۶۶
- شکل ۴-۶. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C2 و B.3-1-2..... ۶۷
- شکل ۴-۷. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های B.3-1-2 و BH-C9..... ۶۷
- شکل ۴-۸. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C9 و BH-C12..... ۶۸
- شکل ۴-۹. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C12 و C.3-0-3..... ۶۸
- شکل ۴-۱۰. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های C.3-0-3 و D.3-0-1..... ۶۹
- شکل ۴-۱۱. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های D.3-0-1 و BH-C14..... ۷۰
- شکل ۴-۱۲. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C14 و E.3-0-1..... ۷۱
- شکل ۴-۱۳. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های E.3-0-1 و BH7M..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH7M و BH8M..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH8M و BH9M..... ۷۲
- شکل ۴-۱۶. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH9M و BH10M..... ۷۳
- شکل ۴-۱۷. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH10M و BH11M..... ۷۳
- شکل ۴-۱۸. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH11M و BH12M..... ۷۴

- شکل ۴-۲۱. تطبیق توزیع چگالی احتمال بر داده‌های ورودی در Easyfit ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۲. میانگین احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از مقادیر متناظر به ازای فشار نگهداری واقعی در مقاطع طبق روش بروئر ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش جدید ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری ۱۸۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری ۱۸۷ کیلوپاسکال برای روش جدید ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۳۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۰ کیلوپاسکال برای روش COB ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ ..... ۱۰۴

- شکل ۴-۳۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش جدید ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۳۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۲۰۹ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۴۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۱۸۵ کیلوپاسکال برای روش جدید ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۴۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۴۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۴۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۴۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۳۶ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۴۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش جدید ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۴۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ ..... ۱۱۲
- شکل ۴-۴۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB ..... ۱۱۳



- شکل ۴-۵۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶..... ۱۱۳
- شکل ۴-۵۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری ۱۹۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس..... ۱۱۴
- شکل ۴-۵۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری ۲۲۰ کیلوپاسکال برای روش جدید..... ۱۱۴
- شکل ۴-۵۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷..... ۱۱۵
- شکل ۴-۵۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB..... ۱۱۶
- شکل ۴-۵۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷..... ۱۱۶
- شکل ۴-۵۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۳۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس..... ۱۱۷
- شکل ۴-۵۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۳۰ کیلوپاسکال برای روش جدید..... ۱۱۷
- شکل ۴-۵۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸..... ۱۱۸
- شکل ۴-۵۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB..... ۱۱۹
- شکل ۴-۶۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸..... ۱۱۹
- شکل ۴-۶۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۱۸۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس..... ۱۲۰
- شکل ۴-۶۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۲۱۰ کیلوپاسکال برای روش جدید..... ۱۲۰
- شکل ۴-۶۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹..... ۱۲۱

- شکل ۴-۶۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB  
 ۱۲۲ .....
- شکل ۴-۶۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹..... ۱۲۲
- شکل ۴-۶۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۲۹۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس  
 ۱۲۳ .....
- شکل ۴-۶۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش جدید  
 ۱۲۳ .....
- شکل ۵-۱. مراحل احداث تونل با سپر ..... ۱۲۸
- شکل ۵-۲. المان حجمی در نرم افزار PLAXIS<sup>3D</sup> Tunnel (الف) گوه ۱۵ گره‌ای (ب) نقاط تنش در گوه  
 ۱۲۹ .....
- شکل ۵-۳. هندسه مدل در نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> Tunnel ..... ۱۳۰
- شکل ۵-۴. مدل دوبعدی و سه بعدی در PLAXIS<sup>3D</sup> Tunnel ..... ۱۳۱
- شکل ۵-۵. فشار منفذی فعال ..... ۱۳۳
- شکل ۵-۶. تنش‌های میانگین موثر ..... ۱۳۳
- شکل ۵-۷. فشار منفذی فعال در فاز ۱ ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۸. توقف فاز ۲ بعلا ریزش سینه‌کار ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۹. فرایند تخریب در سینه‌کار و بالازدگی در اثر کاهش و افزایش فشار نگهداری ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۱۰. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۱ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۳ و ۶ متر) ..... ۱۳۹
- شکل ۵-۱۱. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۲ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۶ و ۱۰ متر) ..... ۱۴۱
- شکل ۵-۱۲. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۳ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۶ و ۱۰ متر) ..... ۱۴۲

- شکل ۵-۱۳. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۴ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۳ و ۶ متر) ..... ۱۴۴
- شکل ۵-۱۴. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۵ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۶ و ۲۰ متر) ..... ۱۴۵
- شکل ۵-۱۵. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۶ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۳ و ۶ متر) ..... ۱۴۷
- شکل ۵-۱۶. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۷ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۱۰ و ۱۵ متر) ..... ۱۴۸
- شکل ۵-۱۷. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۸ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۳ و ۱۰ متر) ..... ۱۴۹
- شکل ۵-۱۸. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۹ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۶ و ۲۰ متر) ..... ۱۵۰
- شکل ۶-۱. مقایسه نتایج روش عددی (فاکتور ایمنی=۲) و بروئر (فاکتور ایمنی ۱/۱ با احتمال ۰/۱۵) با مقادیر واقعی در محور تونل در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۴
- شکل ۶-۲. مقایسه نتایج روش عددی (فاکتور ایمنی=۲) و COB (فاکتور ایمنی ۱/۱، اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند) در تاج تونل با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۴
- شکل ۶-۳. مقایسه نتایج روش عددی و بالتائوس (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال ۰/۱ است) در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۵
- شکل ۶-۴. مقایسه نتایج روش‌های عددی و جدید (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال ۰/۱ است) در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۵
- شکل ۶-۵. مقایسه نتایج روش بروئر و روش جدید (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال ۰/۱ است) با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۷
- شکل ۶-۶. مقایسه نتایج روش بروئر و بالتائوس (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال ۰/۱ است) با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۷

- شکل ۶-۷. مقایسه نتایج روش عددی (فاکتور ایمنی=۲) برای ریزش و بالازدگی با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۷
- شکل ۶-۸. مقایسه نتایج روش بروئر برای ریزش بدون فاکتور ایمنی (احتمال ۰/۱۵ فاکتور ایمنی ۱) با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۸
- شکل ۶-۹. استفاده از روش جدید (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال ۰/۱ است) و عددی (محور تونل) به عنوان حدود بالا و پایین فشار نگهداری در مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۵۹
- شکل پیوست ۱-۱. مسیر خط ۳ متروی تهران و محدوده قطعه چهارم (قسمتی که EPBS در آن استفاده می شود) ..... ۱۶۷
- شکل پیوست ۱-۲. پهنه بندی ژئوتکنیکی مسیر تونل در قطعه چهارم خط ۳ متروی تهران- مکان گمانه ها و مقاطع مورد مطالعه ..... ۱۶۷
- شکل پیوست ۲-۱. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده های چسبندگی زهکشی نشده خاک ناحیه رسی ..... ۱۷۷
- شکل پیوست ۲-۲. توزیع احتمال ویکبای تطبیق داده شده بر داده های زاویه اصطکاک زهکشی نشده خاک ناحیه رسی ..... ۱۷۸
- شکل پیوست ۲-۳. توزیع احتمال ۴-پارامتری بار تطبیق داده شده بر داده های وزن مخصوص خشک خاک ناحیه رسی ..... ۱۷۸
- شکل پیوست ۲-۴. توزیع احتمال ویکبای تطبیق داده شده بر داده های چسبندگی موثر خاک ناحیه رسی ..... ۱۷۹
- شکل پیوست ۲-۵. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده های زاویه اصطکاک موثر خاک ناحیه رسی ..... ۱۷۹
- شکل پیوست ۲-۶. توزیع احتمال کمینه گامبل تطبیق داده شده بر داده های چسبندگی خاک ناحیه ماسه ای ..... ۱۸۰