

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

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^{3D} 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 مونت کارلو، روش‌های عددی، نرم افزار PLAXIS^{3D}

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)	۴۰

۴۱	۲-۳-۲- روش دیویس و همکاران (۱۹۸۰).....
۴۳	۴-۲- نتیجه گیری
۴۵	فصل سوم: روش‌های تجربی و آزمایشگاهی برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل
۴۶	۱-۳- مقدمه
۴۶	۲-۳- روش برومز و بنرمارک (۱۹۶۷)
۴۷	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).....
۵۰	۶-۳- روش اتکینسون و میر برای خاک درشتدانه
۵۱	۷-۳- روش چامبون و کورته (۱۹۹۴).....
۵۳	۸-۳- روش پیشنهادی توسط مرکز زیرزمینی بوون (COB)
۵۳	۹-۳- نتیجه گیری
	فصل چهارم: برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل در حفاری با دستگاه متعادل کننده فشار زمین با
۵۵	استفاده از روش مونت کارلو.....
۵۶	۱-۴- مقدمه
۵۷	۲-۴- زمین شناسی مهندسی گستره تهران و محل مورد مطالعه
۵۷	۱-۲-۴- زمین ساخت گستره تهران.....
۵۸	۲-۲-۴- ویژگی‌های نهشته‌های دشت تهران
۶۲	۳-۲-۴- تهیه مدل ژئوتکنیکی مسیر تونل
۷۳	۳-۴- شبیه‌سازی با استفاده از تکنیک مونت کارلو
۷۵	۱-۳-۴- اعداد تصادفی.....
۷۶	۱-۱-۳-۴- تولید متغیرهای تصادفی.....

- ۷۶..... ۱-۱-۱-۳-۴ روش تبدیل معکوس
- ۷۶..... ۲-۱-۱-۳-۴ روش نام مستعار
- ۷۷..... ۳-۱-۱-۳-۴ روش ترکیب
- ۷۸..... ۴-۱-۱-۳-۴ روش پذیرش و رد کردن
- ۷۹..... ۲-۳-۴ تعیین مقدار کافی تکرار برای روش مونت کارلو
- ۷۹..... ۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای مربوط به محاسبه فشار نگهداری
- ۸۰..... ۱-۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه رسی
- ۸۳..... ۲-۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه ماسه‌ای
- ۸۴..... ۳-۴-۴ تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه شنی
- ۸۵..... ۵-۴ برآورد فشار نگهداری با استفاده از برنامه‌های نوشته شده در MATLAB
- ۸۶..... ۱-۵-۴ فشار نگهداری در برابر ریزش
- ۸۶..... ۱-۱-۵-۴ روش بروئر
- ۸۷..... ۱-۱-۱-۵-۴ محاسبه بار سطحی
- ۸۹..... ۲-۱-۵-۴ روش COB
- ۹۰..... ۲-۵-۴ فشار نگهداری برای بالازدگی
- ۹۰..... ۱-۲-۵-۴ روش بالتائوس
- ۹۰..... ۲-۲-۵-۴ روش پیشنهادی بر اساس روش تجربی COB
- ۹۱..... ۳-۵-۴ فاکتور ایمنی
- ۹۳..... ۴-۵-۴ مقاطع مورد مطالعه
- ۹۴..... ۱-۴-۵-۴ مقطع ۱
- ۹۹..... ۲-۴-۵-۴ مقطع ۲
- ۱۰۲..... ۳-۴-۵-۴ مقطع ۳

۱۰۵	.....	۴-۴-۵-۴	مقطع ۴
۱۰۸	.....	۵-۴-۵-۴	مقطع ۵
۱۱۱	.....	۶-۴-۵-۴	مقطع ۶
۱۱۴	.....	۷-۴-۵-۴	مقطع ۷
۱۱۷	.....	۸-۴-۵-۴	مقطع ۸
۱۲۰	.....	۹-۴-۵-۴	مقطع ۹
۱۲۳	.....	۶-۴	نتیجه‌گیری
۱۲۵	.....		فصل پنجم: برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل با استفاده از روش عددی
۱۲۶	.....	۱-۵	مقدمه
۱۲۶	.....	۲-۵	تعیین فشار نگهداری سینه‌کار تونل با نرم افزار PLAXIS ^{3D} Tunnel
۱۲۸	.....	۱-۲-۵	تشکیل هندسه مدل
۱۳۰	.....	۲-۲-۵	شرایط اولیه
۱۳۱	.....	۳-۲-۵	روند محاسبات
۱۳۶	.....	۳-۵	مقاطع مورد مطالعه
۱۳۶	.....	۱-۳-۵	مقطع ۱
۱۳۹	.....	۲-۳-۵	مقطع ۲
۱۴۰	.....	۳-۳-۵	مقطع ۳
۱۴۲	.....	۴-۳-۵	مقطع ۴
۱۴۳	.....	۵-۳-۵	مقطع ۵
۱۴۵	.....	۶-۳-۵	مقطع ۶
۱۴۶	.....	۷-۳-۵	مقطع ۷
۱۴۷	.....	۸-۳-۵	مقطع ۸

۱۴۹	..... ۹-۳-۵- مقطع ۹
۱۵۰	..... ۴-۵- نتیجه‌گیری
۱۵۱	..... فصل ششم: مقایسه نتایج روش‌های عددی و شبیه‌سازی مونت کارلو برای برآورد فشار نگهداری
۱۵۲	..... ۱-۶- مقدمه
۱۵۲	..... ۲-۶- مقایسه نتایج بدست آمده برای فشار نگهداری سینه‌کار در مقابل ریزش
۱۵۴	..... ۳-۶- مقایسه نتایج بدست آمده برای فشار نگهداری سینه‌کار در مقابل بالازدگی
۱۵۵	..... ۴-۶-مقایسه کلی
۱۵۷	..... ۵-۶- نتیجه‌گیری
۱۵۹	..... فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد
۱۶۲	..... مراجع
۱۶۵	..... پیوست ۱: پروفایل طولی مسیر تونل در قطعه مورد مطالعه
۱۶۹	..... پیوست ۲: داده‌های پارامترهای خاک و منحنی‌های توابع توزیع احتمال تطبیق داده شده بر آنها
۱۷۰	..... ۱- داده‌های پارامترهای خاک
۱۷۶	..... ۲- توابع توزیع احتمال
۱۸۳	..... پیوست ۳: متن برنامه‌های اجرا شده در نرم‌افزار MATLAB
۱۸۴	..... ۱- روند اجرای برنامه‌ها
۱۸۵	..... 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 ۱۴
- شکل ۱-۲ مکانیزم‌های ناپایداری دایره‌ای و کروی ۱۹
- شکل ۲-۲ مدل سه بعدی سیلو و گوه ۲۰
- 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 ۲۶
- شکل ۲-۷ گوه بارگذاری شده توسط سیلوی خاکی ۲۹
- شکل ۲-۸ تشریح نمادها در مدل گوه‌ای چندلایه ۲۹
- شکل ۲-۹ نیروهای نگهداری در سینه‌کار (دستگاه اسلاری) ۳۲
- شکل ۲-۱۰ روش‌های مختلف توزیع تنش افقی در صفحات جانبی گوه ۳۵
- شکل ۲-۱۱ مدل ککت ۳۷
- شکل ۲-۱۲ شعاع تصحیح شده تونل برای نگهداری (کارانزا - تورس) ۳۸
- شکل ۲-۱۳ مدل بالازدگی شامل تنش برشی در مرز صفحات ۳۹
- شکل ۲-۱۴ حد بالا و پایین نسبت پایداری برای تونل بدون نگهداری ۴۱
- شکل ۲-۱۵ مکانیزم ناپایداری در حد بالا ۴۲
- شکل ۲-۱۶ عدد پایداری حد بالا و پایین برای تونل با نگهداری کامل ۴۳
- شکل ۳-۱ مدل پایداری سینه‌کار تونل برومز و بنرمارک ۴۷
- شکل ۳-۲ تاثیر نسبت روباره به قطر بر عدد پایداری سینه‌کار با نگهداری کامل و فشار سطحی ۴۸

- شکل ۳-۳. عدد پایداری حاصل از آزمایش سانتریفوژ..... ۴۹
- شکل ۳-۴. مکانیزم شکست برای تونل‌های با عمق کم..... ۵۰
- شکل ۳-۵. تعیین پارامترهای T_s و T_γ بر حسب زاویه اصطکاک داخلی طبق روش اتکینسون و میر..... ۵۱
- شکل ۲-۶. مقاطع تخریب برای نسبت‌های مختلف روباره به قطر..... ۵۲
- شکل ۴-۱. نقشه حدود مرزبندی نهشته‌های تهران و منطقه مورد مطالعه (قطعه چهارم)..... ۶۰
- شکل ۴-۲. وارد کردن اطلاعات مربوط به هر گمانه در RockWorks..... ۶۲
- شکل ۴-۳. مقطع درونبایی شده توسط RockWorks..... ۶۳
- شکل ۴-۴. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های B.3-0-2 و BH-C2..... ۶۴
- شکل ۴-۵. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C2 و BH-C4..... ۶۵
- شکل ۴-۶. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C2 و B.3-1-2..... ۶۶
- شکل ۴-۷. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های B.3-1-2 و BH-C9..... ۶۶
- شکل ۴-۸. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C9 و BH-C12..... ۶۷
- شکل ۴-۹. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C12 و C.3-0-3..... ۶۷
- شکل ۴-۱۰. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های C.3-0-3 و D.3-0-1..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های D.3-0-1 و BH-C14..... ۶۹
- شکل ۴-۱۲. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C14 و E.3-0-1..... ۷۰
- شکل ۴-۱۳. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های E.3-0-1 و BH7M..... ۷۰
- شکل ۴-۱۴. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH7M و BH8M..... ۷۱
- شکل ۴-۱۵. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH8M و BH9M..... ۷۱
- شکل ۴-۱۶. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH9M و BH10M..... ۷۲
- شکل ۴-۱۷. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH10M و BH11M..... ۷۲
- شکل ۴-۱۸. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH11M و BH12M..... ۷۳

- شکل ۴-۲۱. تطبیق توزیع چگالی احتمال بر داده‌های ورودی در Easyfit ۸۰
- شکل ۴-۲۲. میانگین احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از مقادیر متناظر به ازای فشار نگهداری واقعی در مقاطع طبق روش بروئر ۹۴
- شکل ۴-۲۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ ۹۵
- شکل ۴-۲۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB ۹۶
- شکل ۴-۲۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ ۹۷
- شکل ۴-۲۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ۹۸
- شکل ۴-۲۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش جدید ۹۸
- شکل ۴-۲۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ ۹۹
- شکل ۴-۲۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB ۱۰۰
- شکل ۴-۳۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ ۱۰۰
- شکل ۴-۳۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری ۱۸۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ۱۰۱
- شکل ۴-۳۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری ۱۸۷ کیلوپاسکال برای روش جدید ۱۰۱
- شکل ۴-۳۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ ۱۰۲
- شکل ۴-۳۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۰ کیلوپاسکال برای روش COB ۱۰۳
- شکل ۴-۳۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ ۱۰۳

- شکل ۴-۳۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ۱۰۴
- شکل ۴-۳۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش جدید ۱۰۴
- شکل ۴-۳۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ ۱۰۵
- شکل ۴-۳۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB ۱۰۶
- شکل ۴-۴۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ ۱۰۶
- شکل ۴-۴۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۲۰۹ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ۱۰۷
- شکل ۴-۴۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۱۸۵ کیلوپاسکال برای روش جدید ۱۰۷
- شکل ۴-۴۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ ۱۰۸
- شکل ۴-۴۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB ۱۰۹
- شکل ۴-۴۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ ۱۰۹
- شکل ۴-۴۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۳۶ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس ۱۱۰
- شکل ۴-۴۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش جدید ۱۱۰
- شکل ۴-۴۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ ۱۱۱
- شکل ۴-۴۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB ۱۱۲

شکل ۴-۵۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶..... ۱۱۲

شکل ۴-۵۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری ۱۹۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس..... ۱۱۳

شکل ۴-۵۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری ۲۲۰ کیلوپاسکال برای روش جدید..... ۱۱۳

شکل ۴-۵۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷..... ۱۱۴

شکل ۴-۵۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB..... ۱۱۵

شکل ۴-۵۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷..... ۱۱۵

شکل ۴-۵۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۳۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس..... ۱۱۶

شکل ۴-۵۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۳۰ کیلوپاسکال برای روش جدید..... ۱۱۶

شکل ۴-۵۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸..... ۱۱۷

شکل ۴-۵۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB..... ۱۱۸

شکل ۴-۶۰. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸..... ۱۱۸

شکل ۴-۶۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۱۸۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس..... ۱۱۹

شکل ۴-۶۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۲۱۰ کیلوپاسکال برای روش جدید..... ۱۱۹

شکل ۴-۶۳. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹..... ۱۲۰

- شکل ۴-۶۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB
 ۱۲۱
- شکل ۴-۶۵. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ ۱۲۱
- شکل ۴-۶۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۲۹۰ کیلوپاسکال برای روش
 بالتائوس ۱۲۲
- شکل ۴-۶۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش جدید
 ۱۲۲
- شکل ۵-۱. مراحل احداث تونل با سپر ۱۲۷
- شکل ۵-۲. المان حجمی در نرم افزار PLAXIS^{3D} Tunnel (الف) گوه ۱۵ گره‌ای (ب) نقاط تنش در گوه
 ۱۲۸
- شکل ۵-۳. هندسه مدل در نرم‌افزار PLAXIS^{3D} Tunnel ۱۲۹
- شکل ۵-۴. مدل دوبعدی و سه بعدی در PLAXIS^{3D} Tunnel ۱۳۰
- شکل ۵-۵. فشار منفذی فعال ۱۳۲
- شکل ۵-۶. تنش‌های میانگین موثر ۱۳۲
- شکل ۵-۷. فشار منفذی فعال در فاز ۱ ۱۳۴
- شکل ۵-۸. توقف فاز ۲ بعلا ریزش سینه‌کار ۱۳۵
- شکل ۵-۹. فرایند تخریب در سینه‌کار و بالازدگی در اثر کاهش و افزایش فشار نگهداری ۱۳۵
- 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) ۱۳۸
- 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) ۱۴۰
- 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) ۱۴۱

- شکل ۵-۱۳. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۴ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۳ و ۶ متر) ۱۴۳
- شکل ۵-۱۴. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۵ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۶ و ۲۰ متر) ۱۴۴
- شکل ۵-۱۵. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۶ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۳ و ۶ متر) ۱۴۶
- شکل ۵-۱۶. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۷ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۱۰ و ۱۵ متر) ۱۴۷
- شکل ۵-۱۷. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۸ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۳ و ۱۰ متر) ۱۴۸
- شکل ۵-۱۸. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۹ (فاصله افقی A و B از سینه‌کار به ترتیب ۶ و ۲۰ متر) ۱۴۹
- 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 ۱۵۳
- 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 ۱۵۳
- 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 ۱۵۴
- 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 ۱۵۴
- 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 ۱۵۶
- 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 ۱۵۶

- شکل ۶-۷. مقایسه نتایج روش عددی (فاکتور ایمنی=۲) برای ریزش و بالازدگی با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه ۱۵۶
- 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 ۱۵۷
- 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 ۱۵۸
- شکل پیوست ۱-۱. مسیر خط ۳ متروی تهران و محدوده قطعه چهارم (قسمتی که EPBS در آن استفاده می شود) ۱۶۶
- 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 تعمیر یافته تطبیق داده شده بر داده های چسبندگی زهکشی نشده خاک ناحیه رسی ۱۷۶
- شکل پیوست ۲-۲. توزیع احتمال ویکبای تطبیق داده شده بر داده های زاویه اصطکاک زهکشی نشده خاک ناحیه رسی ۱۷۷
- شکل پیوست ۲-۳. توزیع احتمال ۴- پارامتری بار تطبیق داده شده بر داده های وزن مخصوص خشک خاک ناحیه رسی ۱۷۷
- شکل پیوست ۲-۴. توزیع احتمال ویکبای تطبیق داده شده بر داده های چسبندگی موثر خاک ناحیه رسی ۱۷۸
- شکل پیوست ۲-۵. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیر یافته تطبیق داده شده بر داده های زاویه اصطکاک موثر خاک ناحیه رسی ۱۷۸
- شکل پیوست ۲-۶. توزیع احتمال کمینه گامبل تطبیق داده شده بر داده های چسبندگی خاک ناحیه ماسه ای ۱۷۹

- شکل پیوست ۲-۷. توزیع احتمال ویکبای تطبیق داده شده بر داده‌های زاویه اصطکاک خاک ناحیه ماسه-ای..... ۱۷۹
- شکل پیوست ۲-۸. توزیع احتمال ۳-پارامتری بار تطبیق داده شده بر داده‌های وزن مخصوص خشک خاک ناحیه ماسه‌ای..... ۱۸۰
- شکل پیوست ۲-۹. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های چسبندگی خاک ناحیه شنی..... ۱۸۰
- شکل پیوست ۲-۱۰. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های زاویه اصطکاک خاک ناحیه شنی..... ۱۸۱
- شکل پیوست ۲-۱۱. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های وزن مخصوص خشک خاک ناحیه شنی..... ۱۸۱
- شکل پیوست ۳-۱. مراحل اجرای برنامه‌های برآورد فشار نگهداری در MATLAB..... ۱۸۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۱. مقایسه روش‌های مختلف تحلیل پایداری..... ۱۲
- جدول ۱-۲. مقادیر فشار نگهداری بکار رفته در حفاری با دستگاه فشار تعادلی زمین در ژاپن طبق تحقیق کانایاسو و همکاران..... ۱۵
- جدول ۱-۲. مقادیر زاویه لغزش β بر اساس زاویه اصطکاک داخلی (φ) و نسبت روباره به قطر تونل (C/D) ۲۱
- جدول ۲-۲. ضریب سه بعدی فشار زمین بر اساس زاویه اصطکاک داخلی (φ) و نسبت روباره به قطر تونل (C/D) ۲۲
- جدول ۳-۲. مقدار ضریب فشار جانبی زمین..... ۲۴
- جدول ۴-۲. پارامترهای مربوط به مدل‌های مورد استفاده در روش بروئر..... ۳۶
- جدول ۵-۲. رابطه بین عدد پایداری و تغییر شکل..... ۴۲
- جدول ۱-۴. ویژگی‌های آبرفت‌های گستره شهر تهران..... ۶۱
- جدول ۱-۴. مقادیر چگالی دانه‌های جامد خاک (G_s) در نواحی سه‌گانه..... ۸۳
- جدول ۲-۴. مقادیر پیشنهادی فاکتور ایمنی موضعی برای مدل پوسته کامل..... ۹۲
- جدول ۳-۴. مشخصات مقطع ۱..... ۹۵
- جدول ۴-۴. مشخصات مقطع ۲..... ۹۹
- جدول ۵-۴. مشخصات مقطع ۳..... ۱۰۲
- جدول ۶-۴. مشخصات مقطع ۴..... ۱۰۵
- جدول ۷-۴. مشخصات مقطع ۵..... ۱۰۸
- جدول ۸-۴. مشخصات مقطع ۶..... ۱۱۱
- جدول ۹-۴. مشخصات مقطع ۷..... ۱۱۴
- جدول ۱۰-۴. مشخصات مقطع ۸..... ۱۱۷

- جدول ۴-۱۱. مشخصات مقطع ۹ ۱۲۰
- جدول ۵-۱. ضریب پواسون و مدول الاستیسیته در انواع خاک ۱۳۶
- جدول ۵-۲. مشخصات خاک مقطع ۱ ۱۳۷
- جدول ۵-۳. مشخصات خاک مقطع ۲ ۱۳۹
- جدول ۵-۴. مشخصات خاک مقطع ۳ ۱۴۰
- جدول ۵-۵. مشخصات خاک مقطع ۴ ۱۴۲
- جدول ۵-۶. مشخصات خاک مقطع ۵ ۱۴۴
- جدول ۵-۷. مشخصات خاک مقطع ۶ ۱۴۵
- جدول ۵-۸. مشخصات خاک مقطع ۷ ۱۴۶
- جدول ۵-۹. مشخصات خاک مقطع ۸ ۱۴۸
- جدول ۵-۱۰. مشخصات خاک مقطع ۹ ۱۴۹
- جدول پیوست ۱-۲. علائم اختصاری مربوط به هر گمانه ۱۷۰
- جدول پیوست ۲-۲. داده‌های مربوط به پارامترهای خاک (علائم داخل پرانتز معرف گمانه‌ها هستند- ۱۷۱)
- جدول پیوست ۲-۱) ۱۷۱

فصل اول

تونلسازی مکانیزه در محیط شهری

۱-۱- مقدمه

شهرهای امروزی از شبکه‌های متراکم حمل و نقل، بهره برداری و ساختمان‌های مسکونی و صنعتی تشکیل شده‌اند. میلیون‌ها نفر در شهرهای بزرگ در فضاهای محدود و متراکم زندگی می‌کنند. طبق مطالعات انجام شده توسط ری^۱ (۱۹۹۸)، انتظار می‌رود جمعیت شهری در جهان با افزایش بسیار زیادی مواجه شود بدین صورت که در پنجاه سال آینده بسیاری از شهرهای امروز از لحاظ اندازه از کوچک به متوسط، متوسط به بزرگ و بزرگ به بسیار بزرگ ارتقا یابند.

این روند نیاز مداوم به تخصیص و توزیع مناسب فضاهای محدود به نیازهای گذشته و جدید را در محیط‌های شهری ایجاب می‌کند. تصویر تقابل دائمی تقاضا (زیر ساخت‌ها و امکانات) و عرضه (فضای محدود شهری) در دنیای پیشرفته، برنامه ریزان، سیاست مداران، معماران و مهندسی را به سمت در نظر گرفتن فضای نامرئی موجود در زیر زمین سوق داده است [1].

در واقع، فضاهای زیرزمینی از دیرباز به عنوان مسیرهای ترافیکی (خیابان، مترو و راه آهن) و به منظور ارائه خدمات عمومی (لوله انتقال آب و مسیر فاضلاب) در محیط‌های شهری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. امروزه از فضاهای زیرزمینی به منظور ذخیره سازی، ایجاد پناهگاه، مراکز تجاری، ایستگاه‌های زیرزمینی الکتریکی و مقاصد مختلف دیگر استفاده می‌شود. در مورد دلایل استفاده از فضاهای زیرزمینی می‌توان به بررسی کاملی که در کتابچه منتشر شده توسط ITA^۲ (۲۰۰۲) با عنوان "چرا به سمت زیر زمین؟"، مراجعه کرد. در همین کتابچه آمده است که "هر نوع از سازه‌های زیرزمینی در محیط شهری باعث ایجاد فضای خالی در سطح برای رفع نیازهای مهم‌تری که شرایط بهتر زندگی را به همراه دارند، می‌شوند. در مورد مسیرهای درون شهری، احداث تونل‌های بلند با صرفه جویی در وقت و کاهش هزینه‌ها

¹ Ray

² International Tunneling Association

(سفرهای کوتاه‌تر و مصرف انرژی کمتر)، بیشینه کردن ایمنی و کمینه کردن تأثیرات مخرب محیطی، توجیه می‌شود.^۱

مطالعه تحلیلی توسط اسیس^۱ (۲۰۰۳) با پیش زمینه تقاضای روزافزون استفاده از سازه‌های زیرزمینی با تمرکز بر موضوعاتی نظیر روش‌های ساخت این فضاها انجام شده است. از نقطه نظر رابطه بین توسعه بزرگ مقیاس و استفاده از فضاهای زیرزمینی در آینده، کاربردهای معمولی شهری نظیر حمل و نقل (بین زیرساخت‌ها مانند مترو، بزرگراه، جاده و راه‌آهن)، خدمات (آبرسانی، فاضلاب، تبادل اطلاعات، تولید حرارت) و ایمنی (محافظت در برابر سیل) انگیزه فراوانی برای احداث فضاهای زیرزمینی ایجاد می‌کند. دلیل مستحکم دیگر برای انتقال فعالیت‌های معمول شهری به زیر زمین کاهش تأثیرات منفی بصری، محدود کردن آلودگی صوتی و حفظ محیط سطحی است. علاوه بر این برای توسعه گسترده سازه‌های زیر سطحی، احداث تونل مستقل از روش ساخت، یک عمل الزامی است [1].

طبق نظر پلیرا^۲ (۱۹۹۶) استفاده از فضای زیر زمینی نه تنها یک اجبار بلکه یک انتخاب منطقی از میان راه حل‌های مختلف است که تحت تأثیر پیچیدگی فاکتورهای اقتصادی و اجتماعی بوده و تکمیل آن بهبود کیفیت زندگی را نتیجه می‌دهد. در دنیای پر جمعیت امروزی استفاده از فضای زیرزمینی کاربردی ترین ابزار برای حفظ و در صورت امکان ارتقای کیفیت زندگی سازگار با نیازهای بشر خواهد بود. نیاز روزافزون به احداث تونل در محیط شهری عامل بسیار موثری در بهبود تکنیک‌های حفاری، بویژه حفاری مکانیزه است. در این مورد، تحقیقات دنباله دار برای دستیابی به راه حلی سریع و ایمن برای هر نوع شرایط، محدوده امکان پذیری در تونلسازی را به طور قابل توجهی افزایش داده است [1].

¹ Assis

² Pelizza

در اثر پیشرفت تکنیک‌های حفاری مکانیزه در ۳۰ سال اخیر، حفاری تونل با سرعت بالا در مراکز شهری با عمق روباره کم، در زمین سست، زیر سطح آب زیرزمینی، با مقدار کم نشت سطح و بدون ایجاد مزاحمت برای فعالیت‌های شهری امکان‌پذیر است.

از دلایل افزایش فاحش استفاده از روش‌های حفاری مکانیزه در مقایسه با روش‌های سنتی، می‌توان برتری‌های زیر را برشمرد [1].

- محیط کاری بیشتر مانند کارخانه بوده تا معدن و کارگران از ایمنی و راحتی بیشتری برخوردارند.
- تسریع و حتی‌الامکان صنعتی کردن چرخه‌های ساخت با اتوماتیک کردن فعالیت‌ها و روندهای کاری مانند حفاری، نصب سیستم نگهداری، حمل و نقل، خارج کردن ماده استخراج شده و در نتیجه کاهش دوره ساخت.
- امکان اندازه‌گیری و پایش پارامترهای اساسی ساخت نظیر مقدار ماده استخراج شده، فشار نگهداری اعمال شده بر سینه‌کار، اضافه حفاری^۱، حرکت زمین در اطراف تونل و نشست‌های سطحی وجود دارد.
- گسترش گرد و غبار در محیط کاری محدود بوده، کمترین تغییر در سطح آب زیرزمینی بوجود می‌آید، همچنین مقدار صدای تولیدی نیز کم است.
- استفاده از سگمنت‌های از پیش ساخته شده برای نگهداری، کنترل آسان‌تر مرحله حفاری و بهبود کیفیت کار تمام شده.
- هزینه کلی در اغلب موارد نسبت به روش‌های سنتی کمتر است.

¹ over-break

در بعضی از موارد خاص مانند عبور خط آهن از زیر مراکز تاریخی مهم استفاده از روشی غیر از حفاری مکانیزه به دلیل کنترل بهتر پارامترهای با ریسک بالا، غیر عملی است.

در مواردی غیر از میکرو-تونل‌ها^۱ (با قطر ۲-۳ متر) که حفر آنها به منظور نصب تجهیزات خدماتی در شهرها بسیار معمول است، از حفاری مکانیزه با سپر بیشتر برای احداث زیرساخت‌های حمل و نقل شامل سیستم مترو ریل-سبک^۲ استفاده می‌شود [1].

کاربرد حفاری مکانیزه برای احداث دیگر سیستم‌های حمل و نقل، با وجود تعدد کم ولی با چشم اندازی روشن در آینده را می‌توان در مواردی مانند احداث جاده‌های ورودی یا کمربندی در صورتی که به اندازه کافی طولانی باشند که این نوع حفاری را توجیه کنند، برشمرد. بعضی از پروژه‌های بزرگ که در این مورد انجام شده است شامل جاده حلقه‌ای اطراف مسکو به طول ۲/۲ کیلومتر حفر شده توسط TBM^۳ با قطر ۱۴/۲ متر و پروژه تونل‌های دوقلو M-۳۰ با طول ۳/۶ کیلومتر در شهر مادرید حفاری شده با دو دستگاه TBM به قطر ۱۵/۲ متر که بزرگ‌ترین ماشین سپری تا سال ۲۰۰۷ بوده است، می‌شود.

حتی در زمینه سازه‌های آبرسان، حفاری تونل‌های جمع آوری با قطر زیاد با استفاده از TBM بسیار معمول شده است. به عنوان مثال می‌توان از تونل ایوری-مسینا^۴ با طول ۱/۹ کیلومتر (TIMA) در پاریس یاد کرد که بزرگ‌ترین و عمیق‌ترین تونل جمع آوری آب باران در اروپا با قطر ۷/۹ متر بوده که بوسیله TBM حفر شده است.

¹ micro-tunnels

² light-rail metro systems

³ Tunnel Boring Machine

⁴ Ivry-Massena

تونل‌های دیگری در محیط شهری حفر شده‌اند که کاربردهای متفاوت دارند. از این نوع تونل‌ها می‌توان به سیستم اسمارت^۱ در کوالالمپور اشاره کرد که تونل با طول ۱۳ کیلومتر توسط دو دستگاه TBM با قطر ۱۳/۳ متر حفر شده است. از این تونل هم به عنوان وسیله‌ای برای کاهش میزان ترافیک و هم کانالی برای انتقال آب طوفان برای کاهش ریسک وقوع سیل در مرکز شهر استفاده می‌شود [1].

قابل ذکر است که تقاضا برای حفاری تونل به منظور نصب لوله‌های گاز رسانی و فاضلاب در محیط‌های شهری در حال افزایش است.

به طور خلاصه می‌توان عنوان کرد که از منظر تئوری هر زیر ساخت خطی در سطح زمین به سادگی قابل احداث در زیر زمین حتی با هزینه‌های کلی کمتر بوده و این مساله دلیلی برای کاربرد روزافزون حفاری مکانیزه در محیط‌های شهری است.

۱-۲- حفاری مکانیزه در محیط شهری

در حال حاضر دو نوع دستگاه TBM وجود دارند که نیازهای فنی ذکر شده در بالا را تامین می‌کنند: سپر اسلاری^۲ یا سپر آبی^۳ و سپر فشار تعادلی زمین^۴.

انتخاب از بین این دو دستگاه به سادگی بر اساس نوع زمین، توزیع اندازه ذرات در لایه‌های مختلف زمین، حضور یا عدم حضور آب زیرزمینی، ارتفاع سطح آب زیرزمینی (در صورت وجود) نسبت به عمق تونل و دیگر موارد، اولویت‌بندی نمی‌شود. تمام پارامترهای ذکر شده در انتخاب موثر بوده اما هر کدام از آنها باید مورد به مورد از منظر تحلیل ریسک در یک پروژه مورد بررسی قرار گیرند [1].

¹ SMART

² Slurry shield

³ Hydro shield

⁴ Earth-pressure balance shield

در هر مورد برای داشتن بهترین انتخاب لازم است که ادراک بسیار خوبی از ویژگی‌های هر دو نوع دستگاه وجود داشته باشد. در ادامه توضیح مختصری در مورد دستگاه اسلاری داده خواهد شد. به این دلیل که در منطقه مورد مطالعه از سپر فشار تعادلی زمین استفاده شده است، توضیح بیشتری درباره آن داده خواهد شد.

۱-۲-۱- سپر اسلاری

این دستگاه قابلیت نگهداری سینه‌کار با سیال بنتونیتی تحت فشار که به داخل اتاقک حفاری^۱ پمپ می‌شود را داراست. این سیال بطور کلی از تعلیق بنتونیت در آب تشکیل شده و در موارد لازم افزودنی‌ها به آن اضافه می‌شود. اتاقک حفاری که پلنم^۲ نامیده می‌شود فضای بین سینه‌کار و دیواره فولادی^۳ (اتاقک حفاری را از بقیه اجزای دستگاه جدا می‌کند) است که در آن ماده استخراج شده با سیال بنتونیتی مخلوط می‌شود. یک سیستم پمپاژ وظیفه تزریق اسلاری و تخلیه ماده استخراج شده از اتاقک حفاری را از طریق لوله‌ها بر عهده دارد.

تعادل بین جریان ورودی و خروجی اسلاری از اتاقک حفاری باعث می‌شود که سیال در داخل اتاقک تحت فشار باقی بماند. با کنترل مقدار ورودی و خروجی اسلاری می‌توان مقدار فشار نگهداری سینه‌کار را کنترل کرد.

در سپر آبی یک دیواره اضافی پشت دیواره اصلی وجود دارد که فضایی برای یک اتاقک اضافی ایجاد می‌کند. این اتاقک اضافی دو نوع سیال را در خود جای می‌دهد. هوای فشرده در بالش هوا^۴ اسلاری را به سمت جلوی سینه‌کار فشرده می‌کند و آن را تحت فشار حفظ می‌کند. فشار این بالش هوا را می‌توان

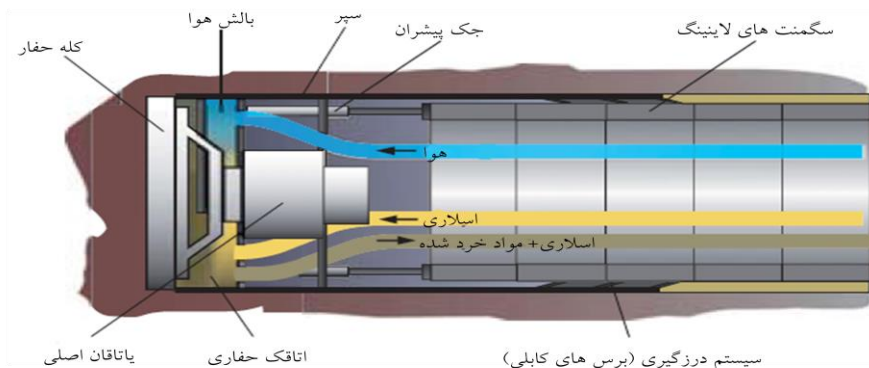
¹ excavation chamber

² Plenum

³ steel bulkhead

⁴ air cushion

با یک سیستم تنظیم خودکار کنترل کرد. حباب هوا به عنوان جذب کننده شوک برای جبران تغییرات اجتناب ناپذیر فشار نیز به کار می‌رود (شکل ۱-۱) [1].



شکل ۱-۱ اصول عملکرد یک سپر آبی [1]

۱-۲-۲- سپر فشار تعادلی زمین

در سپر فشار تعادلی زمین (EPBS)، برای حفظ فشار بر سینه‌کار از نیروی پیشران و حرکت روبه جلوی دستگاه استفاده می‌شود. فشار نگهداری توسط ماده کنده شده از سینه‌کار که در اتاقک حفاری انباشته شده و تحت فشار قرار گرفته، اعمال می‌شود.

حفاری در کله حفار به وسیله دیسک و تیغه^۱، باعث تجمع ماده حفاری شده در اتاقک حفاری (که بسیار شبیه به معادل آن در سپر اسلاری است: فضای بین کله حفار و دیواره) می‌شود. خروج ماده استخراج شده از اتاقک حفاری توسط یک نقاله مارییج^۲ چرخنده یا نقاله آرکیمدیس^۳ (بدون انتها) انجام می‌شود. مقدار ماده استخراج شده به سرعت چرخش نقاله مارییج و نرخ پیشروی سپر بستگی دارد. در اتاقک حفاری یک تعادل دینامیکی بین حجم حفاری شده و خارج شده (تعادل حجم) برقرار می‌شود. با

¹ pick

² screw conveyor

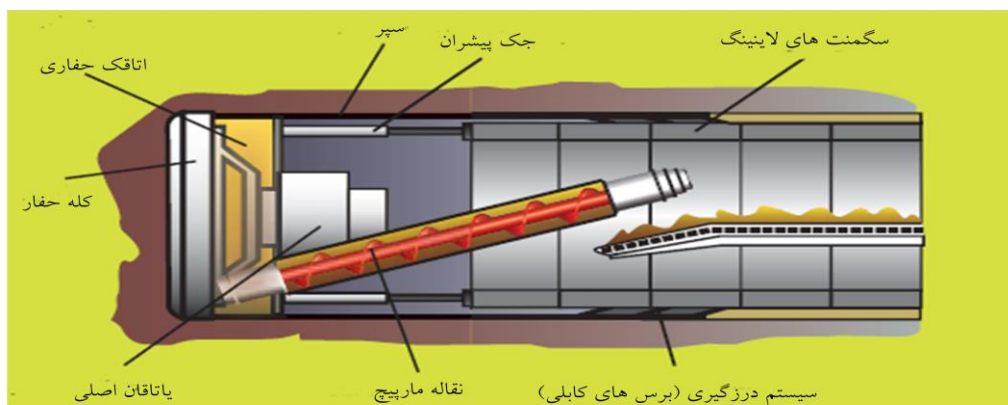
³ Archimedes

تغییر دادن سرعت چرخش نقاله مارپیچ می‌توان این تعادل را در راستای تجمیع و تحت فشار قرارگیری ماده استخراج شده در اتاقک حفاری تنظیم کرد.

فشار نگهداری سینه‌کار با تغییر سرعت چرخش نقاله مارپیچ به عنوان تابعی از نرخ نفوذ TBM کنترل می‌شود.

اضافه بر عملکردهای معمول خارج کردن ماده استخراج شده و کنترل فشار نگهداری سینه‌کار، نقاله مارپیچ نقش دیگری نیز بر عهده دارد (شکل ۱-۲). اتلاف فشار در اتاقک حفاری از بیشترین مقدار (کف اتاقک حفاری) تا فشار اتمسفریک (در درگاه تخلیه) با شکل‌گیری درپوشی^۱ از مواد در طول نقاله صورت می‌گیرد.

جک‌های طولی سیلندری شکل بر روی سگمنت‌های نصب شده فشار وارد کرده و نیروی پیشران کافی برای حفاری، مقابله با اصطکاک بین سپر و خاک و تامین فشار مورد نیاز نگهداری سینه‌کار را به کله حفاری و سپر اعمال می‌کند [1].



شکل ۱-۲ اصول عملکرد سپر فشار تعادلی زمین [1]

¹ plug

انتخاب مناسب‌ترین زمین برای حفاری توسط سپر فشار تعادلی بویژه در رابطه با استخراج و بهسازی بهینه زمین، در بسیاری از موارد مورد بحث بوده است. در رابطه با انتخاب و مدیریت حفاری با این نوع سپر، تحلیل موشکافانه‌ای در موارد زیر باید انجام شود [1].

۱. نوع زمین (چسبنده، اصطکاکی، سنگریزه و غیره). زمانی که استفاده از یک سپر فشار تعادلی زمین تایید شد، نوع و بهسازی مناسب (داخل اتاقک حفاری) زمین بر عملکرد و پایداری سینه‌کار تاثیر می‌گذارد. استفاده از این نوع سپر در زمین‌هایی که مقدار ذرات ریز در آن کمتر از ۱۰٪ است، مطلوب نیست.

۲. نفوذپذیری و موقعیت سطح آب زیر زمینی. بطور کلی سپر فشار تعادلی زمین در خاک با نفوذپذیری کمتر از 10^{-5} متر بر ثانیه و هد آب کمتر از ۳ بار عملکرد بهینه‌ای دارد. اگر نفوذپذیری زمین بیشتر از مقدار ذکر شده باشد، نوع و مقدار عنصر بهسازی برای تزریق در اتاقک حفاری و نقاله مارپیچ مد نظر قرار می‌گیرد.

۳. مواد ناهمگن، لایه بندی و ناپیوستگی‌ها در مقطع تونل.

۴. درصد، بزرگترین بعد، سختی و ساینده‌گی بولدرها (در صورت وجود) که در رابطه با موارد زیر حائز اهمیت هستند: آسیب و فرسایش مکانیکی، احتمال ورود بولدرها به داخل اتاقک حفاری از میان کله حفار و انتقال آنها به محل انباشت مواد استخراج شده از میان نقاله مارپیچ، عرض بیشینه فواصل به عنوان درصدی از سطح کله حفار، قطر و زاویه نقاله مارپیچ باید متناسب با بزرگترین قطر مورد انتظار بولدرها باشد.

۵. درصد کانی‌ها با قابلیت واکنش شیمیایی بالا (مانند کانی‌های سنگین رسی) که بر بهسازی ماده استخراج شده تاثیر گذاشته و باعث بروز رفتار چسبندگی در آن می‌شود.

۶. دفع و استفاده نهایی ماده استخراج شده.

۱-۳- طراحی فشار نگهداری سینه کار

۱-۳-۱- بررسی روش‌های تحلیل پایداری سینه کار تونل

پایداری سینه کار تونل یکی از فاکتورهای اساسی در انتخاب روش استخراج تونل در خاک‌های نرم و مناطق شهری است.

ارزیابی فشار سینه کار در حفاری بوسیله TBM، یکی از فاکتورهای حیاتی در مراحل طراحی و ساخت است در حالیکه توصیه‌های ویژه و استانداردهای تکنیکی به عنوان راه حل مشترک برای طراحی وجود ندارند. در این مطالعه رویکردهای متفاوتی که اغلب به منظور ارزیابی پایداری و برآورد فشار سینه کار مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

برآورد مقادیر طراحی برای فشار سینه کار در راستای تحقق شرایط لازم پایداری در پیشروی دستگاه و تامین دیگر اولویت‌های استخراج، مستلزم رعایت موارد زیر است.

- کنترل نشست سطحی و به طور کلی حفظ شرایط قبل از آغاز حفاری در سازه‌های موجود و
- حفظ وضعیت تعادل آب زیرزمینی

در طراحی فشار نگهداری باید از تحلیل مرحله‌ای استفاده کرد. ابتدا باید از شرایط پایداری سینه کار اطمینان حاصل نموده، سپس پارامترهای پایداری برای کنترل کامل گسترش تغییر شکل و جریان آب به سمت سینه کار را تعیین کرد [1].

روش‌های موجود برای تحلیل پایداری سینه کار عبارتند از:

- روش‌های تجربی و آزمایشگاهی

- روش‌های تحلیلی، تشکیل شده از روش‌های تعادل حدی و روش‌های حدی
- روش‌های عددی (دو بعدی و سه بعدی)

در جدول ۱-۱ مشخصات روش‌های تحلیلی و عددی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱-۱. مقایسه روش‌های مختلف تحلیل پایداری [1]

فشار تعادلی کلی	فشار پایداری سینه‌کار	تحلیل نشست	گسترش باند تسلیم	پایداری سینه-کار	شبیه‌سازی روند ساخت	نوع تحلیل
بلی	بلی	بلی	بلی	بلی ^{xx}	بلی	عددی سه بعدی
خیر	خیر	خیر ^{xxx}	بلی	خیر	خیر	عددی دو بعدی (عرضی)
(بلی)	بلی	(بلی)	بلی	بلی ^{xx}	(بلی)	عددی دو بعدی (طولی)
خیر	بلی	خیر	خیر	بلی	خیر	تعادل حدی
(بلی)	بلی	خیر	خیر	خیر	خیر	تئوری فشار زمین

^{xx} پایداری سینه‌کار با اندازه‌گیری نشست تایید می‌شود، ^{xxx} به این دلیل که امکان شبیه‌سازی تاثیر فشار اعمالی سینه‌کار بر نشست در این مورد وجود ندارد، (بلی) بدین معناست که تنها ارزیابی تقریبی ممکن است.

عبارت "فشار تعادلی کلی" به امکان تایید تاثیرات فشار نگهداری برآورد شده بر نگهداری سینه‌کار

و نشست‌های سطحی اشاره دارد.

موارد زیر از جدول ۱-۱ استنباط می‌شوند:

- با توجه به پیچیدگی برهمکنش بین حفریه و خاک، تنها روش تحلیل عددی سه بعدی از منظر تئوری در مقامی است که نتایج معتبر و کامل برای تاثیرات حفاری و فشار مورد نیاز نگهداری را مهیا کند.

- تحلیل‌های عددی دو بعدی پیش زمینه‌های متفاوتی در مقاطع عرضی و طولی بدست می‌دهند. شبیه سازی (با تقریب منطقی) رفتار کرنش و ارزیابی تاثیرات فشار اعمالی در سینه کار، تنها در مقاطع طولی امکان پذیر است.
- روش‌های تعادل حدی در شرایط عدم قطعیت ژئوتکنیکی بدلیل سادگی نسبی در کاربرد و امکان اجرای آسان تحلیل‌های حساسیت و احتمالاتی، مفید هستند. این روش‌ها مقادیر کمی برای نشست‌های سطحی ارائه نمی‌کنند.
- روش‌های حدی یا تئوری فشار زمین تنها برای تعریف فشار افقی تئوری برای حفظ خاک در محدوده تغییر شکل (شرایط حدی مقاوم یا محرک)، مناسب هستند.

به نظر می‌رسد که تحلیل‌های عددی سه بعدی بیشترین پتانسیل را برای تامین نیازهای شبیه‌سازی دارند. روش‌های ساده شبیه‌سازی بویژه در فاز اولیه طراحی و در طول عملیات به منظور شبیه سازی سریع عملیات حفاری، مورد استفاده قرار می‌گیرند. رویکرد بهینه در استفاده از روش‌های مختلف و وزن-دهی به هر روش بر حسب مرحله طراحی و پیچیدگی آن است. در فصل‌های آینده توضیحات بیشتری در مورد روش‌های تحلیل پایداری سینه کار داده خواهد شد [1].

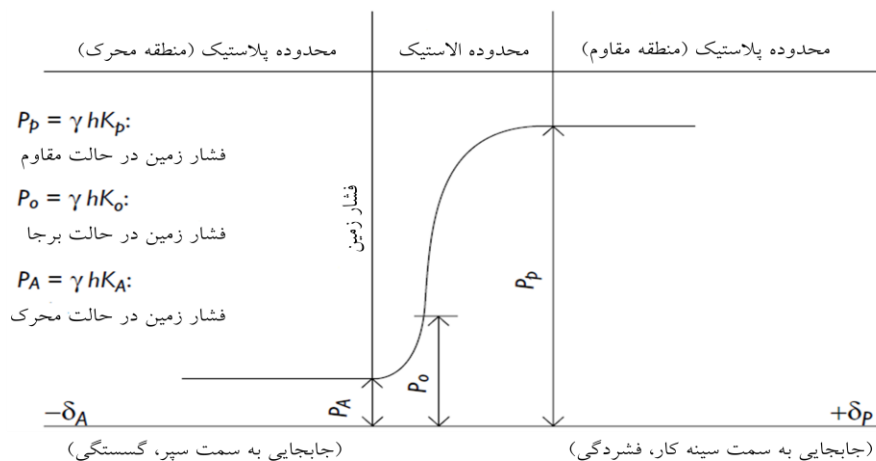
۱-۳-۲- ملاحظات مربوط به انتخاب فشار پایداری

برای تونل سازی توسط دستگاه‌های بسته در محل سینه کار، اعمال فشار نگهداری OT به منظور کمینه کردن تغییر شکل و حفظ پایداری سینه کار مد نظر قرار می‌گیرد.

از نقطه نظر تئوری ثابت شده که کاهش فشار نگهداری نسبت به فشار زمین در حالت برجا به افزایش میزان قابل قبول ریسک نشست‌های سطحی منجر شود. این شرایط تنها در صورتی قابل قبول است که تغییر شکل‌های پلاستیک مجاز باشد.

در تحقیقات گذشته بطور مکرر بیان شده که با در نظر گرفتن فشار نگهداری بین مقدار فشار زمین در حالت محرک و برجا، پایداری سینه‌کار قابل کنترل است. فشار زمین زمانی محرک یا مقاوم خوانده می‌شود که زمین دچار تغییر شکل پلاستیک به ترتیب به سمت کله حفار یا در جهت مخالف شود. کانایاسو و همکاران^۱ (۱۹۹۵) از تحقیقی که بر تونل‌های حفاری شده با سپر در ژاپن انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که فشار محرک زمین به عنوان کمترین فشار مجاز نگهداری برای سینه‌کار در نظر گرفته می‌شود در حالیکه اصول واضحی در مورد تعریف مقدار طراحی فشار نگهداری سینه‌کار وجود ندارد. با در نظر گرفتن ریسک بالادگی زمین به عنوان یک قانون سرانگشتی، توصیه می‌شود که حد بالا برای فشار نگهداری در تاج تونل، فشار کل عمودی در نظر گرفته شود. در ادامه مشاهده شد که حد بالایی برای مقدار فشار سینه‌کار باید در نظر گرفته شود [1].

مثال‌هایی از فشار سینه‌کار اعمال شده در دستگاه فشار تعادلی زمین در کشور ژاپن در شکل ۳-۱ و جدول ۲-۱ خلاصه وار آورده شده‌اند.



شکل ۳-۱. رابطه بین فشار زمین و جابجایی [1]

¹ Kanayasu et al

جدول ۱-۲. مقادیر فشار نگهداری بکار رفته در حفاری با دستگاه فشار تعادلی زمین در ژاپن طبق تحقیق کانایاسو و

همکاران [1]

فشار نگهداری اعمال شده	نوع خاک	قطر کله حفار (متر)
فشار زمین در حالت برجا	سیلت نرم	۷/۴۵
فشار زمین در حالت برجا + فشار آب + ۲۰ کیلوپاسکال	خاک ماسه‌ای، خاک چسبنده	۸/۲۱
فشار زمین در حالت برجا + فشار آب + فشار نوسانی	ماسه ریز	۵/۵۴
فشار زمین در حالت برجا + ۳۰-۵۰ کیلوپاسکال	خاک ماسه‌ای، خاک چسبنده	۴/۹۳
فشار زمین در حالت برجا + فشار آب	گراول، سنگ بستر، خاک چسبنده	۲/۴۸
فشار زمین در حالت برجا + فشار آب	گراول، خاک چسبنده	۷/۷۸
فشار زمین در حالت برجا + ۱۰ کیلوپاسکال	لای نرم	۷/۳۵
فشار زمین در حالت برجا + ۲۰ کیلوپاسکال	خاک نرم چسبنده	۵/۸۶

۱-۴- نتیجه گیری

موضوع محاسبه فشار نگهداری سینه کار از ابعاد گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. برآورد فشار سینه- کار باید با استفاده از تحلیل‌های متفاوت انجام شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شود تا تصویر کاملی از رفتار مورد انتظار در تونل و سطح زمین بدست آید.

استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی با نقش تکمیلی نسبت به یکدیگر، به منظور گسترش نتایج دقیق حاصل از روش‌های عددی برای تعداد زیادی از ترکیبات پارامتری باید انجام شود. در چنین شرایطی

استفاده از روش‌های احتمالاتی برای در نظر داشتن عدم قطعیت و تغییرات در پارامترهای ژئوتکنیکی و ساختاری در رابطه با انتخاب‌های طراحی و احتمال وقوع به شدت توصیه می‌شود.

در فصل‌های آینده روش‌های مختلف برآورد فشار سینه‌کار مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

فصل دوم

روش‌های تحلیلی برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل

۲-۱- مقدمه

بطور منطقی ارزیابی فشار پایداری سینه‌کار امری حیاتی در فاز طراحی و اجراست. در حال حاضر روش جامعی برای طراحی در این شرایط وجود ندارد. محاسبه در روش‌های تحلیلی ساده بوده و از نتایج آنها می‌توان در مراحل اولیه طراحی و به عنوان مکملی برای روش‌های عددی استفاده کرد. در این فصل رویکردهای مختلف روش‌های تحلیلی اعم از روش‌های تعادل حدی و روش‌های تحلیل حدی برای ارزیابی شرایط پایداری و برآورد فشار پایداری سینه‌کار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲- روش‌های تعادل حدی

مطالعه پایداری سینه‌کار پیچیده است و یافتن راه حل موشکافانه تنها با استفاده از روش‌های عددی سه بعدی ممکن است. در هر صورت در بسیاری از موارد روش‌های تعادل حدی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند و در صورتی که بر اساس مدل شکست سه بعدی شکل گرفته باشند، در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند [2]. در ادامه چند روش مرجع تعادل حدی بررسی شده‌اند.

پایداری استاتیکی سینه‌کار به تنهایی ضامن عدم نشست هنگام حفاری با عمق روباره کم در مناطق شهری نیست. برای این منظور باید از پایداری سپر و لاینینگ نهایی و حفظ شرایط آب زیرزمینی اطمینان حاصل نمود. بدین منظور در کاربرد عملی روش‌های تعادل حدی همواره فشار معادل فشار آب در اتاقک حفاری مدنظر قرار می‌گیرد [2]. در ادامه روش‌های تحلیل پایداری سینه‌کار تونل در زمین‌های چسبنده-اصطکاکی آورده شده‌اند.

۱-۲-۲- روش کراس^۱ (۱۹۸۷)

برای محاسبه فشار سینه کار کمینه، تنش برشی در راستای صفحات لغزش مدنظر قرار می‌گیرد. در شکل ۱-۲ سه مکانیزم ناپایداری ارائه شده توسط کراس آورده شده است. از مکانیزم ربع دایره بالاترین میزان فشار کمینه نگهداری بدست می‌آید [3]:

$$\sigma_{Tmin} = \frac{1}{\tan \varphi} \left(\frac{D\gamma}{3} - \frac{\pi c}{2} \right) \quad (1-2)$$

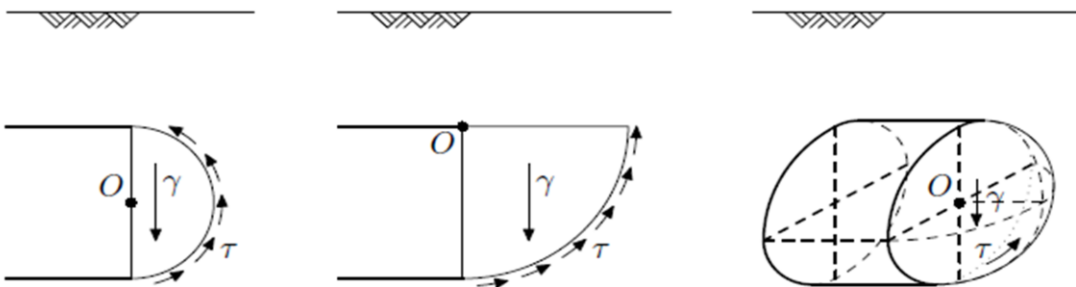
σ_{Tmin} = فشار سینه کار کمینه

φ = زاویه اصطکاک داخلی (°)

D = قطر تونل

c = چسبندگی

γ = وزن مخصوص خاک



شکل ۱-۲. مکانیزم‌های ناپایداری دایره‌ای و کروی [3]

¹ Krause

در بسیاری از موارد مکانیزم ناپایداری نیمکره‌ای نتایجی نزدیکتر به واقعیت نسبت به مکانیزم

دایره‌ای ارائه می‌دهند. فشار کمینه سینه‌کار با استفاده از این مکانیزم از رابطه ۲-۲ محاسبه می‌شود.

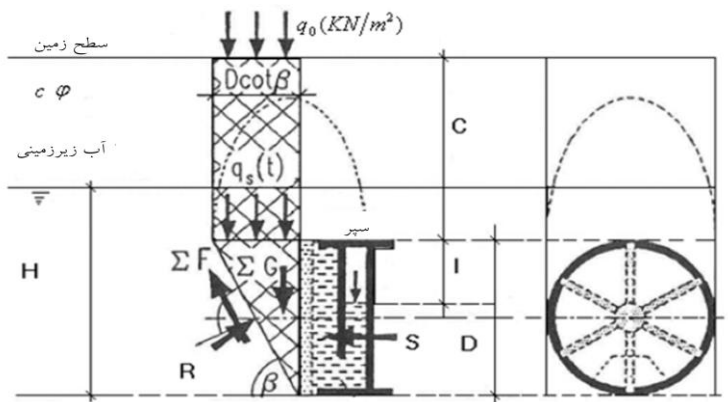
$$\sigma_{Tmin} = \frac{1}{\tan \varphi} \left(\frac{D\gamma}{9} - \frac{\pi c}{2} \right) \quad (2-2)$$

راه حل ارائه شده برای مکانیزم نیم‌دایره به صورت زیر است.

$$\sigma_{Tmin} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \tan \varphi} \left(\frac{D\gamma}{6} - \frac{\pi c}{2} \right) \quad (3-2)$$

۲-۲-۲- روش ینسز و استینر^۱

در این روش از مدل سه بعدی ارائه شده توسط هورن^۲ استفاده شده است. این مدل از یک گوه در مقابل سینه‌کار و یک منشور که تا سطح زمین گسترش یافته تشکیل شده است. این مدل به واقعیت نزدیک بوده و استفاده از آن باعث سهولت در محاسبات می‌شود. فشار عمودی وارده از سیلو به گوه به روش ترزاقی^۳ محاسبه می‌شود. مقدار فشار سینه‌کار در خاک چسبنده-اصطکاکی از رابطه ۲-۴ محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۲. مدل سه بعدی سیلو و گوه [2]

¹ Jancsecz and Steiner

² Horn

³ Terzaghi

$$\sigma_T = ka_3 \sigma_v + P_w \quad (4-2)$$

$\sigma_T =$ فشار سینه کار

$\sigma_v =$ فشار موثر عمودی

$P_w =$ فشار آب زیرزمینی

ضریب سه بعدی فشار زمین ka_3 از رابطه (5-2) حاصل می شود [2].

$$ka_3 = \frac{\left(\sin \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \varphi - \frac{K' a' \cos \beta \tan \varphi}{1.5} \right)}{\sin \beta \cos \beta + \sin^2 \beta \tan \varphi} \quad (5-2)$$

$$K' = \frac{1 - \sin \varphi + \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)}{2} \quad (6-2)$$

$$a' = \frac{\left(1 + \frac{3C}{D} \right)}{\left(1 + \frac{2C}{D} \right)} \quad (7-2)$$

$\beta =$ زاویه لغزش (°)

$C =$ عمق روباره

برای محاسبه مقدار زاویه لغزش از جدول ۱-۲ می توان استفاده نمود [4].

جدول ۱-۲. مقادیر زاویه لغزش β بر اساس زاویه اصطکاک داخلی (φ) و نسبت روباره به قطر تونل (C/D). [4]

$\frac{C}{D}$	β				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
0	60.340	62.611	64.802	66.900	68.918
1	61.890	64.161	66.286	68.283	70.177
2	62.197	64.464	66.580	68.566	70.423
3	62.322	64.592	66.706	68.683	70.527

جدول ۲-۲. ضریب سه بعدی فشار زمین بر اساس زاویه اصطکاک داخلی (φ) و نسبت روباره به قطر تونل (C/D) [4].

$\frac{C}{D}$	K_{A3}				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
0	0.386	0.310	0.248	0.199	0.159
1	0.354	0.279	0.222	0.177	0.141
2	0.348	0.273	0.217	0.173	0.138
3	0.345	0.271	0.214	0.171	0.136

فشار موثر عمودی در این روش از روابط ارائه شده توسط ترزاقی محاسبه می‌شود. در این روابط

اثر قوسی شدن خاک مدنظر قرار گرفته است. در حالتی که محیط خشک باشد، σ_v از رابطه ۲-۱۰

استفاده خواهد شد [4].

$$\sigma_v = \frac{a\gamma_d - c}{k_0 \tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{CK_0 \tan \varphi}{a}} \right] + q_0 e^{-\frac{CK_0 \tan \varphi}{a}} \quad (۸-۲)$$

برای قسمتی از خاک که زیر سطح ایستابی قرار دارد از رابطه ۲-۹ استفاده خواهد شد [4].

$$\sigma_v = \frac{a\gamma_{sat} - c}{k_0 \tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{(H-D)K_0 \tan \varphi}{a}} \right] + \sigma_{vd} e^{-\frac{(H-D)K_0 \tan \varphi}{a}} \quad (۹-۲)$$

$$\sigma_{vd} = \frac{a\gamma_d - c}{k_0 \tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{C-(H-D)}{a} K_0 \tan \varphi} \right] + q_0 e^{-\frac{C-(H-D)}{a} K_0 \tan \varphi} \quad (۱۰-۲)$$

a = نسبت مساحت به محیط سطح افقی گوه

H = ارتفاع سطح آب زیرزمینی از کف تونل

q_0 = بار سطحی

γ_d = وزن مخصوص خاک در حالت خشک

γ_{sat} = وزن مخصوص اشباع خاک

k_0 = ضریب فشار جانبی زمین (نسبت فشار جانبی به عمودی) در حالت برجا

برای محاسبه مساحت و محیط سطح افقی گوه مقدار عرض گوه را برابر با قطر تونل در نظر گرفته و ضلع دیگر آن با استفاده از زاویه لغزش گوه بدست می‌آید [3].

$$a = \frac{D}{2(1+\tan \theta)} \quad (11-2)$$

ضریب فشار جانبی زمین در حالت برجا مقادیر متفاوتی را اختیار می‌کند. تعیین این ضریب بطور عملی کار مشکلی بوده و همواره مقدار آن برآورد می‌شود. یک راه برای محاسبه مقدار این ضریب استفاده از ضریب پواسون است که نتیجه حاصل در اغلب موارد دور از واقعیت است ($K_0=v/(1-v)$). برای این منظور باید روند تغییرات تاریخی منطقه را مدنظر قرار داد. به عنوان مثال با وجود یخچال در گذشته ممکن است مقدار این ضریب در منطقه بزرگتر از ۱ باشد. در مورد خاک تحکیم یافته می‌توان از زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده استفاده کرد [5].

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (12-2)$$

برای خاک‌های رسی تحکیم یافته، بروکر و ایرلند^۱ (۱۹۶۵) رابطه زیر را پیشنهاد کردند [6].

$$K_0 = 0.95 - \sin \varphi \quad (13-2)$$

برای رس تحکیم یافته رابطه تجربی دیگری (۲-۱۴) توسط آلپان^۲ (۱۹۶۷) پیشنهاد شده است [6].

$$K_0 = 0.19 + 0.233 \log(\text{PI}) \quad (14-2)$$

PI = نشانه خمیری

¹ Brooker and Ireland

² Alpan

در خاک پیش تحکیم این ضریب اغلب بزرگتر از ۱ است. بطور کلی مقدار این ضریب در بازه ($0.1 < K_0 < 3$) قرار دارد. در رس پیش تحکیم یافته، ضریب فشار جانبی در حالت سکون از رابطه تقریبی ۱۵-۲ به دست می‌آید [6].

$$K_0 (\text{پیش تحکیم}) = K_0 (\text{عادی تحکیم یافته}) \sqrt{OCR} \quad (15-2)$$

$$OCR = \frac{\text{فشار پیش تحکیمی}}{\text{فشار موثر سربار موجود}} \quad (16-2)$$

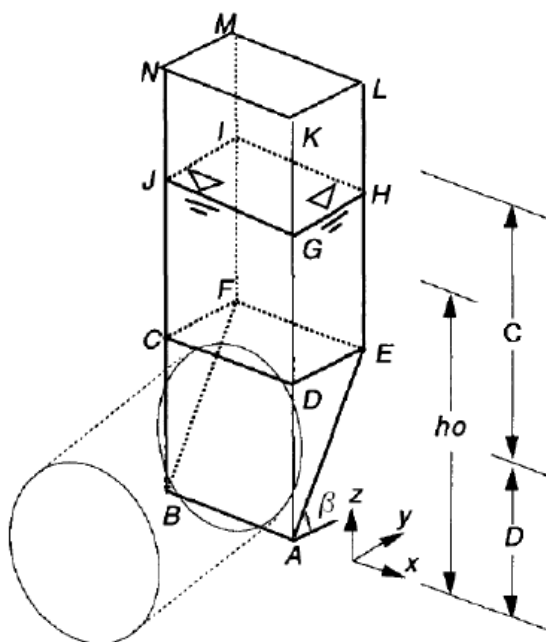
در جدول ۳-۲ مقدار K_0 برای چند نوع خاک آورده شده است. تعیین مقدار ضریب فشار جانبی زمین بخشی از مطالعات زمین شناسی مهندسی است [5].

جدول ۳-۲. مقدار ضریب فشار جانبی زمین [5]

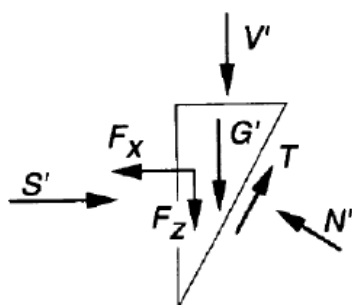
K_0	جنس زمین
۰/۴-۰/۵	ماسه
۰/۶-۰/۸	خاک رسی (بین لایه‌های سنگ)
۱	اسلاری
۰/۴-۰/۶	سنگ نرم
(۰/۲)۰/۵-۰/۸(۱/۲)	خاک یا سنگ سخت
۰/۶-۱/۵	رس لندن

۳-۲-۲- روش آناگنوستو و کواری (۱۹۹۴)

در این روش از مدل سه بعدی هورن استفاده شده است (شکل ۳-۲)، سینه‌کار در حالتی پایدار فرض می‌شود که تعادل حدی برای گوه و منشور برقرار شود. نیروهای عمل کننده بر گوه در شکل ۳-۲ نشان داده شده‌اند. G' وزن اشباع گوه، V' نیروی عمودی عمل کننده بر سطح مشترک گوه و منشور، F_x و F_z نیروهای حاصل از جریان آب، N' و T نیروهای نرمال و برشی عمل کننده بر سطح لغزش و S' نیروی موثر وارد بر سینه‌کار است [7].



شکل ۲-۳. مدل گوه و منشور [7]



شکل ۲-۴. نیروهای وارد بر گوه در مقابل سینه کار [7]

فشار نگهداری تابع پارامترهای هندسی مانند قطر تونل، عمق روباره و زاویه سطح لغزش و پارامترهای خاک از قبیل وزن مخصوص، مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی است. مقدار فشار نگهداری برای استفاده از سپر فشار تعادلی زمین از رابطه زیر محاسبه می‌شود [8].

$$S' = F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \quad (17-2)$$

$$\Delta h = h_0 - h_f$$

(۱۸-۲)

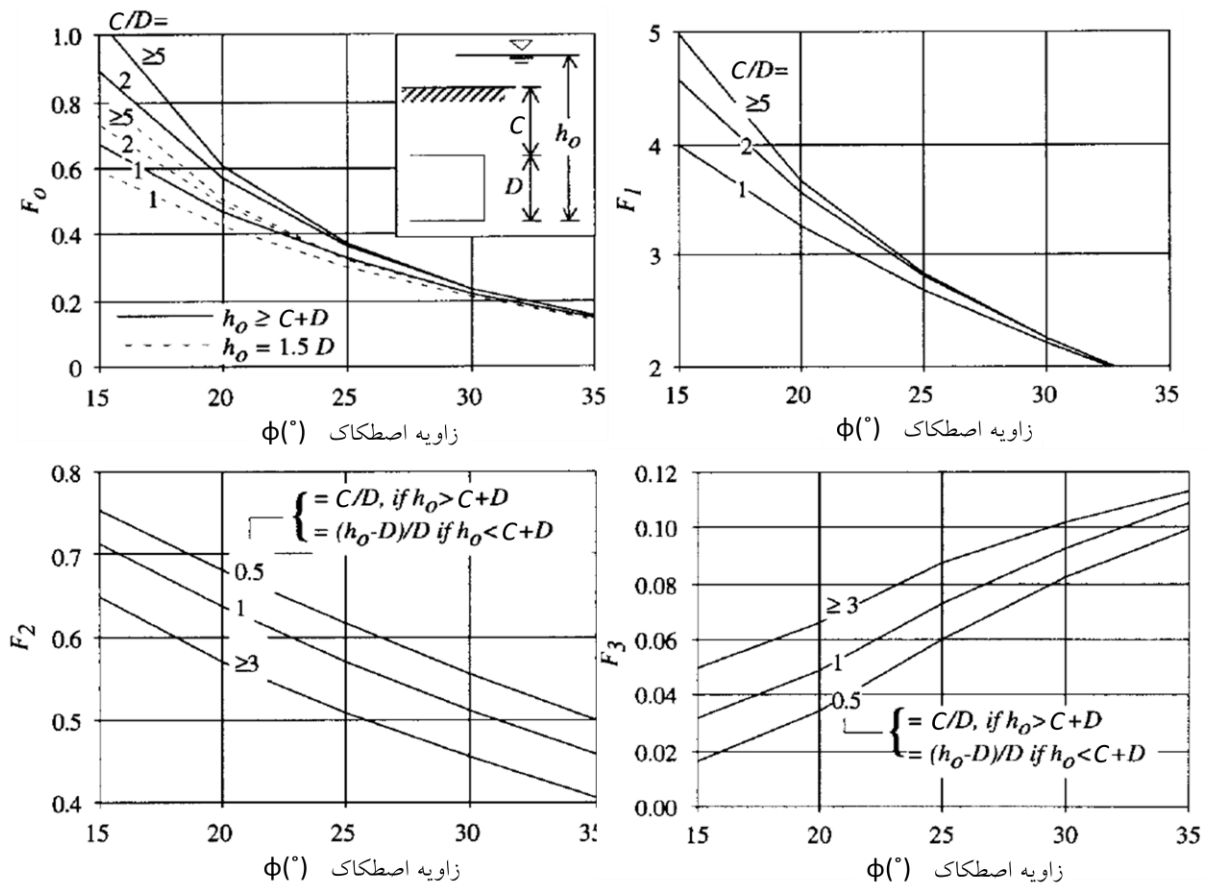
S' = فشار موثر نگهداری

F_0, F_1, F_2 و F_3 = ضرایب بدون بعد

h_0 = ارتفاع آب زیرزمینی از کف تونل

h_f = هد در اتاقک حفاری

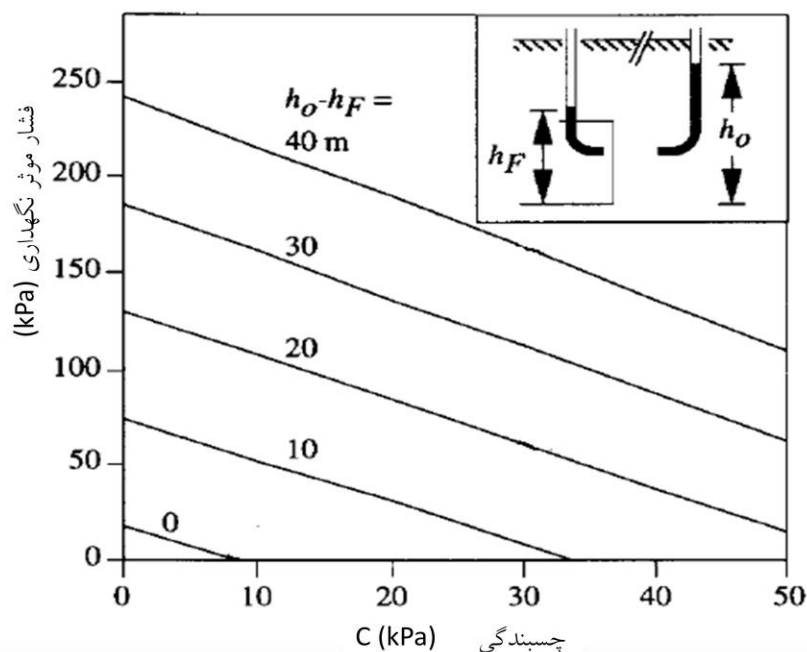
γ' = وزن مخصوص موثر $(\gamma_{sat} - \gamma_w)$ برای حالت اشباع



شکل ۲-۵. منحنی‌های مربوط به ضرایب بدون بعد [8]

مقادیر ضرایب F_0 , F_1 , F_2 و F_3 بر اساس زاویه اصطکاک داخلی از شکل ۲-۵ قابل استخراج هستند. این ضرایب تابعی از زاویه اصطکاک داخلی، نسبت روباره به قطر، نسبت وزن مخصوص خشک به اشباع و نسبت $(h_0-D)/D$ هستند. نسبت وزن مخصوص خشک به وزن مخصوص غوطه‌وری (موثر)، $1/6$ در نظر گرفته شده که در عمل تقریب خوبی است [8].

در شکل ۲-۶ تاثیر اختلاف هد بر فشار موثر نگهداری نشان داده شده است. اگر در سینه‌کار اختلاف هد وجود نداشته باشد، پایداری حتی در زمین با مقاومت چسبندگی کمتر از ۱۰ کیلو پاسکال به آسانی تامین می‌شود ولی اگر اختلاف هد زیاد باشد به فشار موثر بالایی برای تامین پایداری سینه‌کار نیاز است [8].



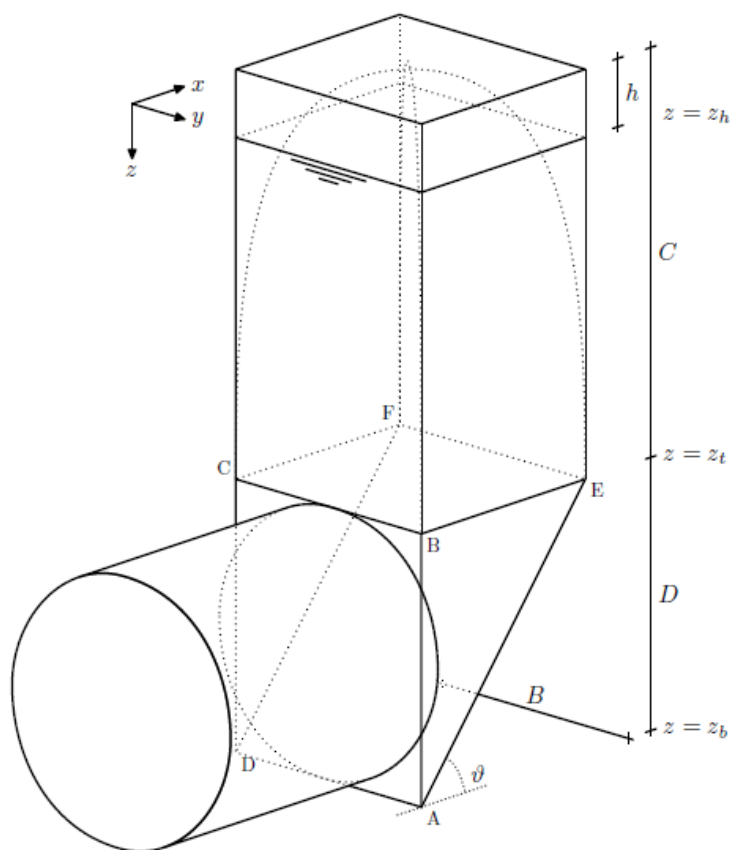
شکل ۲-۶. فشار موثر نگهداری بر اساس چسبندگی و اختلاف هد در سینه‌کار [8]

۲-۲-۴- روش بروئر^۱ (۲۰۰۱)

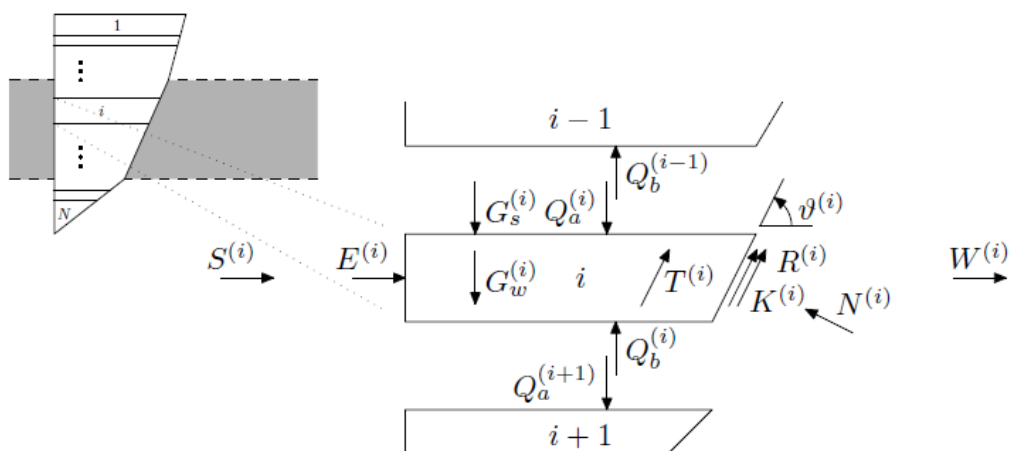
مزیت این روش نسبت به دو روش تعادل حدی ینسز و استینر و آناگنوستو و کواری اینست که می‌توان فشار سینه کار را در مناطقی که جنس خاک متفاوت است، محاسبه کرد. اساس محاسبات در این روش نیز بر مبنای مدل سیلو و گوه است (شکل ۲-۷) با این تفاوت که گوه ناپایدار به N تعداد قطعه کوچکتر هموژن تقسیم شده است. خواص خاک مانند زاویه لغزش، در هر قطعه نسبت به قطعه مجاور متفاوت هستند. این روش در ادامه مورد استفاده قرار می‌گیرد پس توضیحات بیشتری در مورد آن آورده خواهد شد [3].

هر قطعه (i) توسط برآیند نیروهای وارد از طرف قطعه بالایی ($i-1$) و پایینی ($i+1$) که به ترتیب $Q_a^{(i)}$ و $Q_b^{(i)}$ نامیده می‌شوند و وزن موثر خود قطعه $G_w^{(i)}$ و نیروی روباره $G_s^{(i)}$ ، بارگذاری می‌شود. نیروی چسبندگی $K^{(i)}$ و نیروی حاصل از اصطکاک $R^{(i)}$ که در اثر نیروی عمود بر سطح $N^{(i)}$ بوجود می‌آید، عمود بر صفحات لغزش اعمال می‌شوند. نیروی برشی $T^{(i)}$ موازی با جهت نیروی چسبندگی و در جهت عکس لغزش گوه بر صفحات جانبی عمل می‌کند. تعادل نیروها ایجاب می‌کند که مجموع مقادیر نیروی موثر زمین $E^{(i)}$ و نیروی آب $W^{(i)}$ برابر با نیروی نگهداری $S^{(i)}$ باشد.

¹ Broere



شکل ۲-۷. گوه بارگذاری شده توسط سیلوی خاکی [3]



شکل ۲-۸. تشریح نمادها در مدل گوه‌ای چندلایه [3]

با تشکیل دادن روابط تعادل در جهت‌های افقی و عمودی، معادلات زیر حاصل می‌شوند.

$$E^{(i)} + 2T^{(i)} \cos \theta^{(i)} + (K^{(i)} + R^{(i)}) \cos \theta^{(i)} - N^{(i)} \sin \theta^{(i)} = 0 \quad (19-2)$$

$$Q_a^{(i)} + G_s^{(i)} + G_w^{(i)} - Q_b^{(i)} - 2T^{(i)} \sin \theta^{(i)} - (K^{(i)} + R^{(i)}) \sin \theta^{(i)} - N^{(i)} \cos \theta^{(i)} = 0 \quad (20-2)$$

با در نظر گرفتن $R^{(i)} = N^{(i)} \tan \varphi^{(i)}$ ، پارامتر $N^{(i)}$ از معادلات حذف شده و با جمع دو معادله بالا می‌توان $R^{(i)}$ را نیز از معادلات حذف نمود.

$$G_s^{(i)} + G_w^{(i)} + Q_a^{(i)} - Q_b^{(i)} + 2T^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + K^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + E^{(i)} \frac{\zeta_+^{(i)}}{\zeta_-^{(i)}} = 0 \quad (21-2)$$

که در آن

$$\zeta_-^{(i)} = \tan \varphi \cos \theta - \sin \theta \quad (22-2)$$

$$\zeta_+^{(i)} = \tan \varphi \sin \theta + \cos \theta \quad (23-2)$$

همانطور که در هر قطعه شرایط تعادل باید برقرار باشد، شرایط پیوستگی نیز باید مهیا باشد.

$$Q_a^{(i)} = Q_b^{(i-1)} \quad (24-2)$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی $Q_a^{(1)} = 0$ و $Q_b^{(N)} = 0$ ، و اعمال این شرایط برای بلوک N ، رابطه ۲-۲۱

۲۱ بصورت زیر تغییر می‌کند.

$$Q_a^{(N)} = Q_b^{(N-1)} = - \left[G_s^{(N)} + G_w^{(N)} + 2T^{(N)} \frac{1}{\zeta_-^{(N)}} + K^{(N)} \frac{1}{\zeta_-^{(N)}} + E^{(N)} \frac{\zeta_+^{(N)}}{\zeta_-^{(N)}} \right] \quad (25-2)$$

با توجه به روابط تعادل می‌توان رابطه زیر را برای بلوک N-1 نوشت.

$$Q_a^{(N-1)} = Q_b^{(N-2)} \quad (26-2)$$

$$= - \left[G_S^{(N)} + G_S^{(N-1)} + G_W^{(N)} + G_W^{(N-1)} + 2T^{(N)} \frac{1}{\zeta_-^{(N)}} + 2T^{(N-1)} \frac{1}{\zeta_-^{(N-1)}} + \right. \\ \left. K^{(N)} \frac{1}{\zeta_-^{(N)}} + K^{(N-1)} \frac{1}{\zeta_-^{(N-1)}} + E^{(N)} \frac{\zeta_+^{(N)}}{\zeta_-^{(N)}} + E^{(N-1)} \frac{\zeta_+^{(N-1)}}{\zeta_-^{(N-1)}} \right] \quad (27-2)$$

برای بلوک ۱ با در نظر گرفتن شرایط حد بالا، رابطه ۲۸-۲ بدست می‌آید.

$$Q_a^{(1)} = - \left[\sum_{i=1}^N G_S^{(i)} + \sum_{i=1}^N G_W^{(i)} + 2 \sum_{i=1}^N T^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + \sum_{i=1}^N K^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + \right. \\ \left. \sum_{i=1}^N E^{(i)} \frac{\zeta_+^{(i)}}{\zeta_-^{(i)}} \right] = 0 \quad (28-2)$$

روابط بالا برای گوه‌ای که از یک قطعه (هموزن) تشکیل شده، بصورت زیر ساده می‌شوند.

$$G_S + G_W + (2T + K) \frac{1}{\zeta_-} + E \frac{\zeta_+}{\zeta_-} = 0 \quad (29-2)$$

$$E = - \frac{\zeta_- (G_S + G_W) + (2T + K)}{\zeta_+} \quad (30-2)$$

رابطه بدست آمده برای نیروی سینه‌کار با نتایج ینسز و استینر مطابقت دارد. نیروهای عمل

کننده برای یک گوه ساده شده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [3].

$$G_S = BD \cot \theta \sigma'_v(z_t) \quad (31-2)$$

$$G_W = \frac{BD^2 \cot \theta}{2} \gamma' \quad (32-2)$$

$$T = \frac{D^2 \cot \theta}{2} (c + K_y \bar{\sigma}'_v \tan \varphi) \quad (33-2)$$

$$K = \frac{BDc}{\sin \theta} \quad (۳۴-۲)$$

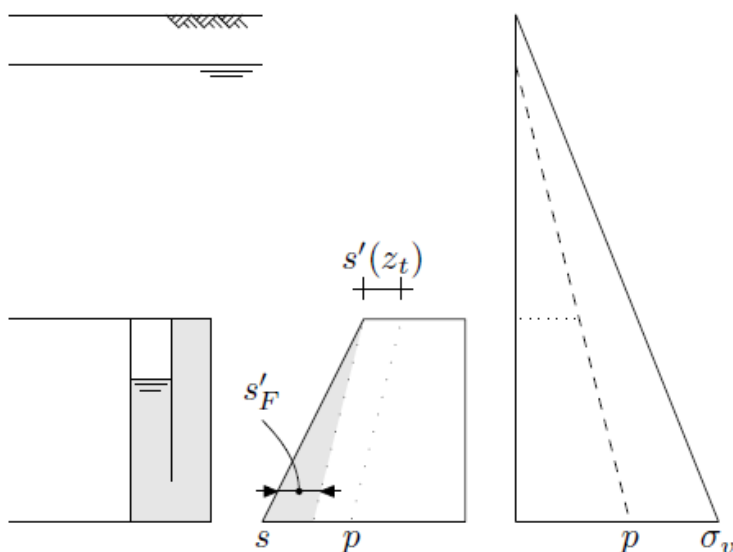
$$\bar{\sigma}'_v = \sigma'_v(z_t) + \frac{D\gamma'}{3} \quad (۳۵-۲)$$

γ' = وزن مخصوص موثر

K_y = ضریب تنش موثر افقی

B = عرض گوه (این پارامتر برابر با قطر تونل در نظر گرفته می‌شود)

کمترین مقدار نیروی نگهداری ($S=E+W$) را می‌توان با تغییر دادن زاویه لغزش و استخراج بزرگ‌ترین مقدار نیروی موثر زمین (E)، بدست آورد [3].



شکل ۲-۹. نیروهای نگهداری در سینه‌کار (دستگاه اسلاری) [3]

برای تولید مدل پایداری گوه‌ای که بتوان بوسیله آن لایه‌بندی، نفوذ سیال نگهداری و فشار حفره-ای اضافی را تحلیل کرد، رابطه ۲-۲۸ را باید بصورت انتگرالی بیان کرد. همانطور که در شکل ۲-۹ آمده است، فشار نگهداری را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. یک بخش که به تنهایی به فشار موثر وابسته

است (در تاج تونل) و بخش دیگر که به وزن موثر سیال نگهداری وابسته است. فشار موثر بنتونیت و نیروی دویاتوریک نگهداری از روابط ۲-۳۶ و ۲-۳۷ بدست می‌آیند [3].

$$s'_F = \int_{z_t}^z \gamma'_F dz \quad (۲-۳۶)$$

$$s'_{dev} = B \int_{z_t}^{z_b} \frac{\zeta_+}{\zeta_-} s'_F dz \quad (۲-۳۷)$$

با $N \rightarrow \infty$ در رابطه ۲-۲۸، فشار نگهداری کمینه در تاج تونل ($z=z_t$) با بدست آوردن مقدار بیشینه رابطه ۲-۳۸، با تغییر دادن زاویه لغزش، محاسبه می‌شود.

$$s'(z_t) = -\frac{G_S + G_W + K' + 2T' + s'_{dev}}{Z} \quad (۲-۳۸)$$

$$T' = \int_{z_t}^{z_b} \frac{\omega}{\zeta_-} [c + K_y \sigma'_v \tan \varphi] dz \quad (۲-۳۹)$$

$$K' = B \int_{z_t}^{z_b} \frac{c}{\zeta_- \sin \theta} dz \quad (۲-۴۰)$$

$$G_S = \frac{BD}{\tan \theta} \sigma'_v(z_t) \quad (۲-۴۱)$$

$$G_W = B \int_{z_t}^{z_b} \omega \gamma' dz \quad (۲-۴۲)$$

$$Z = B \int_{z_t}^{z_b} \cot(\varphi - \theta) dz \quad (۲-۴۳)$$

$$\omega = (z_b - z) \cot \theta \quad \text{for } z_t \leq z \leq z_b \quad (۲-۴۴)$$

با بدست آوردن مقدار $s'(z_t)$ و فشار منفذی آب (p)، فشار مورد نیاز نگهداری سینه کار را می‌توان

از رابطه ۲-۴۵ محاسبه کرد.

$$s = s' + p \quad (45-2)$$

برای محاسبه دقیق مقدار فشار نگهداری باید قوسی شدن خاک را مدنظر قرار داد. بار موثر وارد بر بالای گوه کمتر از مجموع وزن خاک بالای آن است که این اختلاف در اثر قوسی شدن خاک به وجود می‌آید. همانطور که در مورد روش ینسز و استینر توضیح داده شد، بر اساس مدل ترزاقی بار عمودی در خاک با لایه‌های متفاوت را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد (سطح بالای لایه i ، $z=t^{(i)}$) [3].

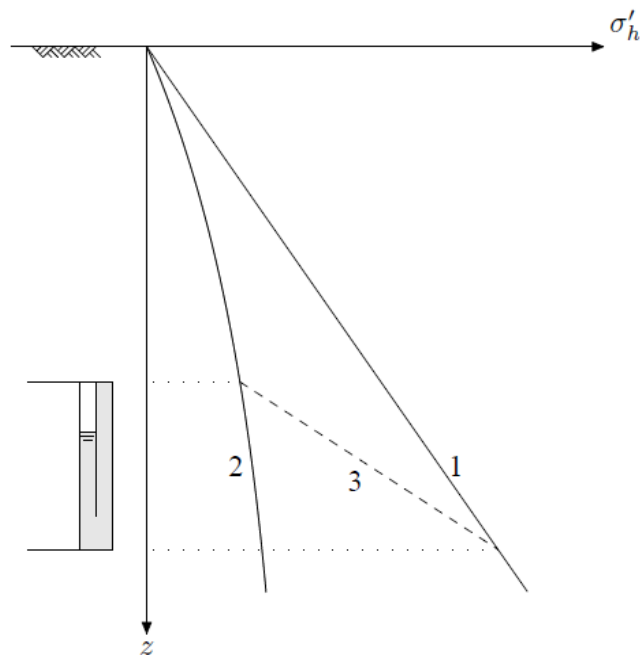
$$\sigma_v'^{(i)} = \frac{\alpha \gamma'^{(i)} - c'^{(i)}}{k^{(i)} \tan \varphi'^{(i)}} \left(1 - e^{-k^{(i)} \tan \varphi'^{(i)} \frac{z}{a}} \right) + \sigma_v'^{(i-1)} (t_i) e^{-k^{(i)} \tan \varphi'^{(i)} \frac{z}{a}}$$

$$t^{(i)} \leq z \leq t^{(i+1)} \quad (46-2)$$

فشار سطحی را می‌توان برای لایه اول ($i=1$) در روابط وارد نمود.

$$\sigma_v'^{(0)} = q_0 \quad (47-2)$$

مقدار a در روش ینسز و استینر برابر با نسبت مساحت به محیط سطح افقی گوه در نظر گرفته می‌شود. بروئر دو مکانیزم دو بعدی و سه بعدی را برای قوسی شدن خاک معرفی کرده است. در مکانیزم دو بعدی مقدار پارامتر a ، برابر با شعاع تونل و در حالت سه بعدی برابر با نسبت فوق (مساحت به محیط سطح افقی گوه) منظور می‌شود. همچنین برای محاسبه توزیع تنش عمودی در صفحات جانبی گوه که منجر به تولید نیروی برشی T می‌شود، سه روش مختلف پیشنهاد شده است. در روش اول تنش عمودی بدون در نظر گرفتن تاثیر قوسی شدن خاک محاسبه می‌شود. در روش دوم در نظر گرفتن تاثیرات قوسی شدن خاک در محاسبات پیشنهاد می‌شود. روش سوم میانگین گیری از دو روش اول است (به عنوان مثال درون یابی از مقادیر تنش عمودی حاصل از روش دوم در تاج تونل و تنش عمودی حاصل از روش اول در انتهای گوه) [3].



شکل ۲-۱۰. روش‌های مختلف توزیع تنش افقی در صفحات جانبی گوه [3]

برای پارامتر k ، ضریب فشار جانبی زمین نیز دو مقدار پیشنهاد شده که اولی برابر با مقدار این ضریب در حالت برجا ($k=k_0$) و دومی برابر با مقدار این ضریب در حالت محرک است ($k=k_a$) [3].

بروئر بر اساس روش‌های مذکور مدل‌های متفاوتی را ایجاد کرد و فشار نگهداری حاصل از این مدل‌ها را با نتایج آزمایش‌های سانتریفوژ که توسط چامبون و بزیجن^۱ انجام شده، مقایسه کرد. از میان مدل‌های مختلف، نتایج دو مدل^۲ از باقی مدل‌ها بهتر بود. مقادیر پارامترهای مربوط به این دو مدل در جدول ۲-۴ آمده است.

نتایج حاصل از این مدل‌ها با نتایج آزمایش چامبون که در ماسه خشک فاین‌تین بلو^۳ ($\varphi=35^\circ$) انجام شده بود، مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نسبت روباره به قطر نتایج متفاوتی از این مقایسه‌ها

¹ Chambon and Bezuijen

² نام مدل‌های ۱ و ۲ در مرجع اصلی به ترتیب $b_{1,0}$ و $c_{1,0}$ است.

³ Fontaineblue

بدست آمد. در حالتی که این نسبت کمتر از ۱ بود، نزدیکترین و ایمنترین نتایج از مدل ۱ بدست می-آمد. برای نسبت روباره به قطر ۲، باز هم نزدیکترین نتایج از مدل ۱ بدست می-آمد اگرچه اینبار از ایمنی بالایی برخوردار نبودند. در نسبت روباره به قطر ۴، مدل ۲ بهترین نتایج را ارائه می-داد در حالیکه از مدل ۱ مقادیر ایمنی بدست نمی-آمد.

جدول ۲-۴. پارامترهای مربوط به مدل‌های مورد استفاده در روش بروئر [3]

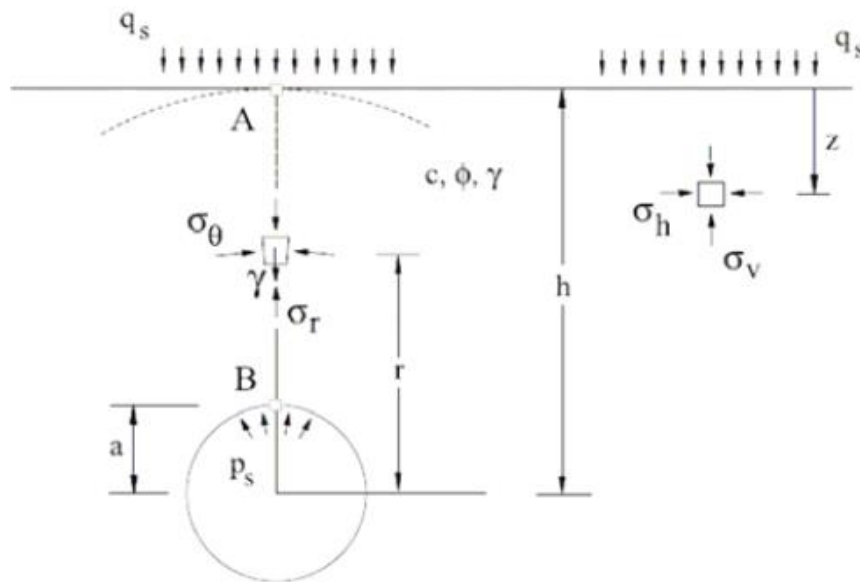
مدل	مدل قوسی شدن خاک	تنش در صفحات جانبی گوه	ضریب فشار جانبی زمین
۱	سه بعدی	خطی(بدون قوسی شدن)	برجا
۲	دو بعدی	خطی(بدون قوسی شدن)	برجا

در حالت دیگر مقایسه با نتایج آزمایش بزیجن بر روی نمونه‌های ماسه اشباع ($\phi=35/6^\circ$) و رس نرم ($c'=1 \text{ kPa}, \phi'=23^\circ$) انجام شد. در نسبت روباره به قطر کم ($C/D=0/6-0/8$) در دو تست مدل ۱ بهترین نتایج را ارائه می-داد اگرچه در یکی از آنها از مدل ۲ نتیجه‌ای با ایمنی بیشتر بدست می-آمد. در تست سوم از مدل ۲ نتایج نزدیک‌تر و ایمن‌تری بدست می-آمد اگرچه مدل‌های دیگر (غیر از دو مدل مذکور) هم نتایج نزدیکی ارائه می-کردند [3].

بر اساس تعداد محدود آزمایش‌ها، مدل ۱ صحیح‌ترین برآورد از حداقل فشار نگهداری سینه‌کار که در آن ریزش کامل اتفاق می‌افتد را بدست می‌دهد. کاهش ایمنی نتایج این مدل با بزرگتر شدن نسبت روباره به قطر بیشتر می‌شود. فشار پیشنهادی از مدل ۱ باعث بوجود آمدن تغییر شکل‌های بزرگ در سینه-کار (ریزش) می‌شود ولی تحت فشار پیشنهادی در مدل ۲ این تغییر شکل‌ها محدود خواهند بود. از نقطه نظر مهندسی مدل ۲ می‌تواند قابل ترجیح بر مدل ۱ باشد [3].

۲-۲-۵- روش کارانزا - تورس^۱ (۲۰۰۴)

این روش بر مبنای مدل ککت^۲ (۱۹۵۶) بوجود آمده است. این مدل شرایط تعادل در محدوده ناپایدار بالای تاج تونل (استوانه‌ای یا کروی) کم عمق را بررسی می‌کند. خاک در این تونل از معیار تسلیم کولمب پیروی می‌کند. توزیع تنش قبل از حفاری بصورت لیتواستاتیک بوده پس نسبت تنش افقی به عمودی برابر با ۱ است [4].



شکل ۲-۱۱. مدل ککت [4]

همانطور که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده، فشار نگهداری کمینه یا بحرانی است که برای مقادیر کمتر از آن ریزش در سینه کار رخ می‌دهد. رابطه ۲-۴۸ برای محاسبه فشار نگهداری در خاک خشک ارائه شده است [4].

¹ Carranza and Torres

² Caquot

$$\frac{p_s}{\gamma a} = \left(\frac{q_s}{\gamma a} + \frac{c}{\gamma a \tan \varphi} \right) \left(\frac{h}{a} \right)^{-k(N_{\varphi}^{FS}-1)} - \frac{1}{k(N_{\varphi}^{FS}-1)-1} \left(\left(\frac{h}{a} \right)^{-k(N_{\varphi}^{FS}-1)} - 1 \right) - \frac{c}{\gamma a \tan \varphi}$$

(۴۸-۲)

a = شعاع تونل

h = عمق محور تونل

q_s = بار سطحی

k = پارامتر مربوط به نوع استخراج (برای استخراج استوانه‌ای ۱ و برای کروی ۲)

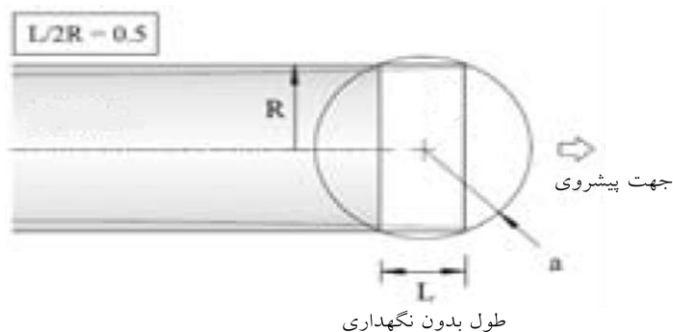
FS = فاکتور ایمنی (نسبت پارامترهای واقعی و بحرانی معیار موهر-کلمب)

$$FS = \frac{c}{c^{cr}} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi^{cr}}$$

(۴۹-۲)

$$N_{\varphi}^{FS} = \frac{1 + \sin\left(\tan^{-1} \frac{\tan \varphi}{FS}\right)}{1 - \sin\left(\tan^{-1} \frac{\tan \varphi}{FS}\right)}$$

(۵۰-۲)



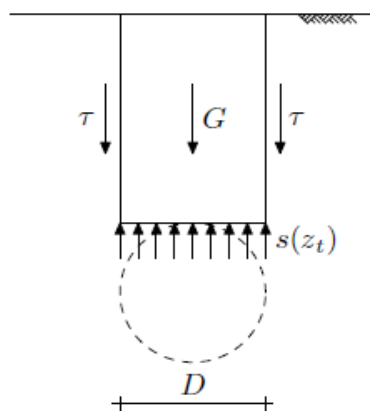
شکل ۲-۱۲. شعاع تصحیح شده تونل برای نگهداری (کارانزا - تورس) [1]

$$a = \sqrt{\frac{L^2}{4} + R^2} \quad (51-2)$$

۲-۲-۶- روش بالتائوس^۱

این مدل برای تعیین فشار نگهداری در مقابل بالازدگی توسط بالتائوس (۱۹۸۸) گزارش شده است. در این روش تنش برشی بین بدنه خاک بالای سینه‌کار و خاک اطراف مدنظر قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده، تنش برشی شامل نیروهای برشی در طول سطوح عمودی بدنه مستطیل شکل می‌شود [3].

$$S_{\max} = C \left[\gamma + \frac{2c + CK_y \gamma' \tan \varphi}{D} \right] \quad (52-2)$$



شکل ۲-۱۳. مدل بالازدگی شامل تنش برشی در مرز صفحات [3]

¹ Balthaus

۲-۳- روش‌های تحلیل حدی

در این نوع از روش‌ها حد بالا و پایین محاسبه می‌شود. اساس حد بالا و پایین به ترتیب بر رویکردهای سینماتیکی و استاتیکی استوار است. در رویکرد سینماتیکی کار خارجی انجام شده بروی سیستم از کار هدر رفته در داخل بیشتر است. اساس رویکرد در حد پایین توزیع تنش مجاز از نظر استاتیکی و ایجاد تعادلی است که در چارچوب معیار گسیختگی باشد.

۲-۳-۱- روش اتکینسون و پاتس^۱ (۱۹۷۷)

در این روش فشار کمینه نگهداری سینه‌کار در محیط خشک و بدون چسبندگی برای حفریه بدون نگهداری مورد مطالعه قرار گرفت و دو حد پایین برای آن ارائه شد. فشار سطحی در حالت دوم لحاظ نشده و از روش کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. در مدل اول برای حد پایین وزن مخصوص زمین برابر با صفر در نظر گرفته شده است (رابطه ۲-۵۲) [9].

$$\sigma_{Tmin} = \sigma_s \left(1 + \frac{2C}{D} \right)^{1-Kp} \quad (۲-۵۳)$$

Kp = ضریب فشار زمین رانکین^۲ در حالت مقاوم

در حالت دوم وزن مخصوص زمین صفر نبوده و فشار سطحی برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود [9].

$$\sigma_{Tmin} = \frac{Kp \gamma D}{Kp^2 - 1} \quad (۲-۵۴)$$

در حد بالا مقادیر کمتری برای فشار کمینه بدست می‌آید که برآورد مناسبی (ایمن) بدست نمی‌-

دهد. در روش حد بالا، نتایج مستقل از نسبت روباره به قطر هستند [9].

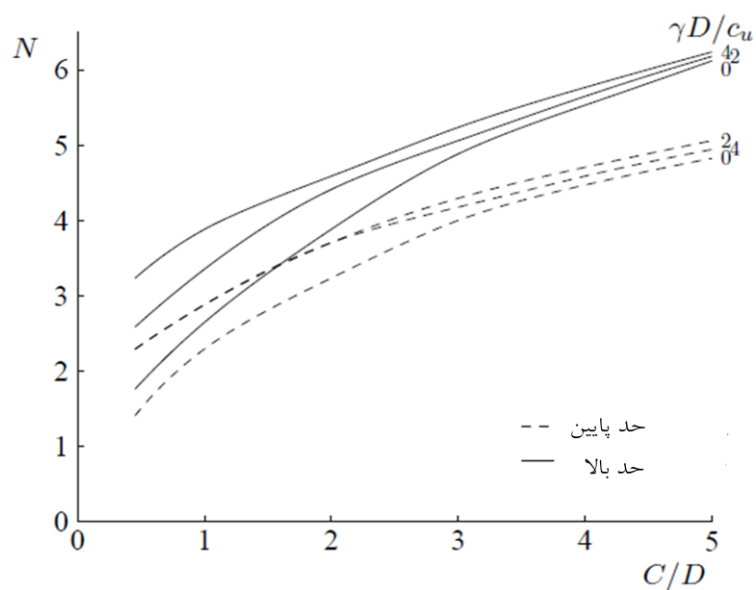
¹ Atkinson and Potts

² Rankine

$$\sigma_{Tmin} = \frac{\gamma D}{4 \cos \varphi} \left(\frac{1}{\tan \varphi} + \varphi - \frac{\pi}{2} \right) \quad (55-2)$$

۲-۳-۲- روش دیویس و همکاران^۱ (۱۹۸۰)

دیویس و همکاران از روش کرنش صفحه‌ای استفاده کرده و مدل آنها از معیار ترسکا پیروی می‌کند. مقادیر حد بالا و پایین فشار نگهداری در این روش به ترتیب از رویکردهای سینماتیکی و استاتیکی استخراج شده‌اند. مقادیر حد بالا و پایین برای تونل بدون نگهداری در شکل ۱۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴. حد بالا و پایین نسبت پایداری برای تونل بدون نگهداری [3]

مکانیزم ناپایداری در روش حد بالا از دو بلوک به شکل ذوزنقه و مثلث متساوی‌الساقین تشکیل

می‌شود (شکل ۲-۱۵). شرایط پایداری سینه کار توسط عدد پایداری ارزیابی می‌شود [7].

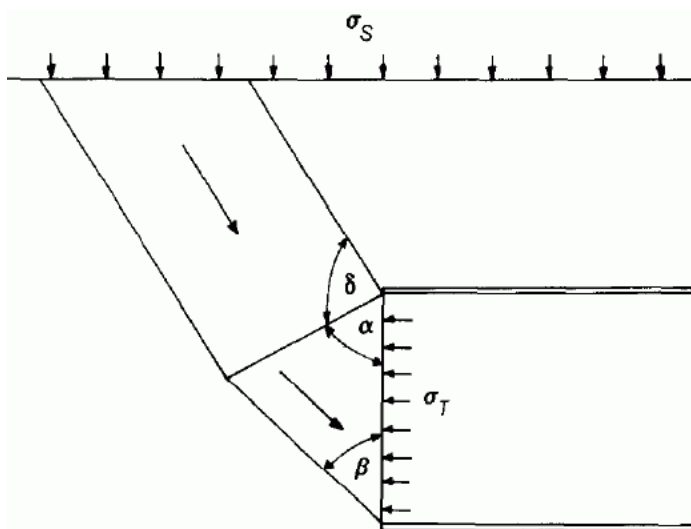
$$N = \frac{\sigma_S + \left(C + \frac{D}{2}\right) - \sigma_T}{C_u} \quad (56-2)$$

¹ Davis et al

عدد پایداری = N

C_{II} = مقاومت برشی زهکشی نشده

طبق نظر این محققین عدد پایداری برای تونل‌هایی که محور آنها در عمق بیشتر از چهار برابر قطر تونل قرار دارد باید کمتر از ۸-۶ باشد تا شرایط پایداری در سینه‌کار مهیا شود. مطالعات بعدی نشان دادند که برای تونل‌های با عمق کمتر این نسبت باید کمتر از ۶ باشد. جدول ۲-۵ رابطه بین عدد پایداری و نوع تغییر شکل در سینه کار را نشان می‌دهد [10].



شکل ۲-۱۵. مکانیزم ناپایداری در حد بالا [10]

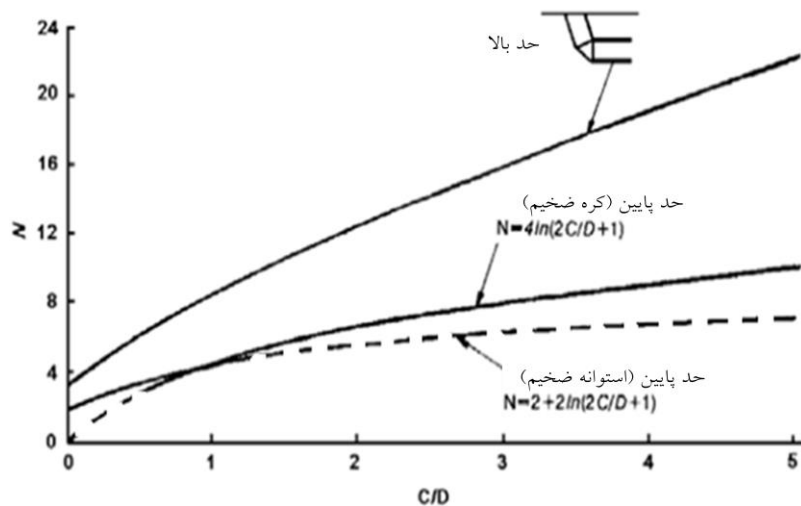
جدول ۲-۵. رابطه بین عدد پایداری و تغییر شکل [3]

N	تغییر شکل
< 1	قابل چشم پوشی
۱-۲	الاستیک
۲-۴	الاستیک - پلاستیک
۴-۶	پلاستیک
> ۶	ریزش

از آنجایی که در مورد استفاده از TBM تونل با نگهداری کامل خواهد بود، طول بدون نگهداری وجود ندارد. دیویس و همکارانش برای روش حد پایین از میدان تنش استوانه‌ای و کره‌ای استفاده کرده و عدد پایداری حاصل از این روش‌ها به ترتیب از روابط ۲-۵۷ و ۲-۵۸ محاسبه می‌شود [3].

$$N = 2 + 2 \ln \left(\frac{2C}{D} + 1 \right) \quad (۵۷-۲)$$

$$N = 4 \ln \left(\frac{2C}{D} + 1 \right) \quad (۵۸-۲)$$



شکل ۲-۱۶. عدد پایداری حد بالا و پایین برای تونل با نگهداری کامل [7]

۴-۲- نتیجه گیری

روش‌های مختلف تحلیلی به منظور تعیین فشار سینه‌کار برای شرایط ریزش و بالازدگی، در این فصل مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های تحلیلی به دو دسته روش‌های تعادل حدی و روش‌های حدی تقسیم شده است. روش‌های تعادل حدی در شرایط سه بعدی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند. در روش‌های تحلیل حدی نتایج حد بالا و پایین به ترتیب بر اساس تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی بدست می‌آیند. با بررسی نتایج بدست آمده از حد بالا و پایین، از حد پایین نتایج نزدیک‌تری به واقعیت حاصل می‌شود.

فصل سوم

روش‌های تجربی و آزمایشگاهی برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل

۳-۱- مقدمه

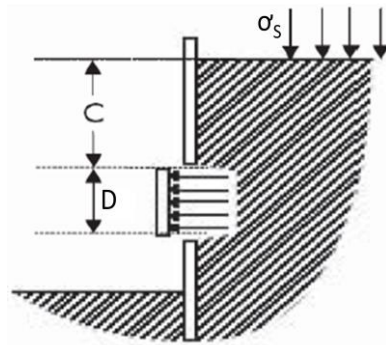
روش‌های تجربی و آزمایشگاهی حاصل از تجربیات بدست آمده در پروژه‌های مختلف و تست‌های انجام شده در شرایط آزمایشگاه است. در مورد روش‌های تجربی می‌توان به تحقیق کانایاسو و همکاران (جدول ۳-۱) که در آن مقدار فشار نگهداری سینه‌کار در حفاری با دستگاه فشار تعادلی زمین در پروژه‌های احداث تونل در کشور ژاپن مورد مطالعه قرار گرفته، اشاره کرد. در مطالعات انجام شده مربوط به روش‌های آزمایشگاهی بیشتر از تست سانتریفیوژ استفاده شده است. روش‌های دیگری نیز برای مدل کردن شرایط واقعی در آزمایشگاه بکار گرفته شده است که در ادامه به آنها پرداخته خواهد شد.

۳-۲- روش برومز و بنرمارک^۱ (۱۹۶۷)

در این روش پایداری یک حفریه افقی در رس مورد مطالعه قرار گرفت. با اعمال فشار بر نمونه رسی فشار حاصل از روباره (سطحی) شبیه سازی شد. این فشار باعث حرکت رس از داخل یک سوراخ دایره‌ای در جدار یک استوانه عمودی می‌شود. رفتار خاک در این روش بر اساس معیار ترسکا تعریف می‌شود (شکل ۳-۱) [4]. شرایط پایداری در آزمایشگاه و پروژه‌های عملیاتی با استفاده از عدد پایداری مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

$$N = \frac{\sigma_S + \left(C + \frac{D}{2}\right) - \sigma_T}{C_u} \quad (۳-۱)$$

¹ Broms and Bennermark



شکل ۳-۱. مدل پایداری سینه‌کار تونل برومز و بنرمارک [4]

۳-۳- روش اتکینسون و پاتس (۱۹۷۷)

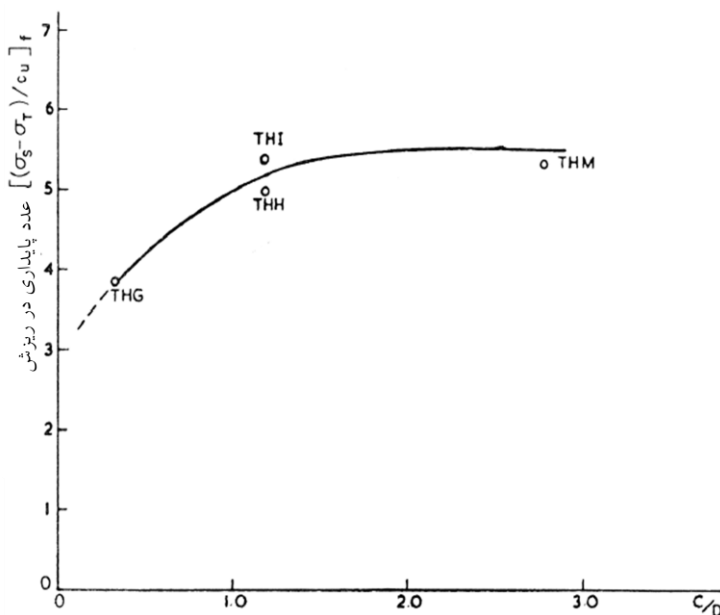
این محققین تعدادی آزمایش سانتریفوژ بر روی نمونه‌های شنی متراکم انجام دادند. این آزمایش‌ها در دو حالت بدون فشار سطحی و با فشار سطحی انجام شدند. در حالت دوم فشار سطحی توسط فشار سیال موجود در پوسته لاستیکی بر سطح اعمال شد. فشار اولیه سینه‌کار برابر با فشار عمودی در عمق محور تونل در نظر گرفته شد [9].

$$\sigma_T = \gamma \left(C + \frac{D}{2} \right) + \sigma_S \quad (۲-۳)$$

در طول آزمایش فشار سینه‌کار کاهش داده شد تا ریزش روی دهد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که در حالتی که فشار سطحی وجود دارد، فشار نگهداری حداقل با نتایج رابطه ۲-۵۵ همخوانی دارد. در حالتی که فشار سطحی صفر در نظر گرفته می‌شود، نتایج از حد بالای ارائه شده توسط رابطه ۲-۵۴ تجاوز می‌کند [9].

۳-۴- روش کاسارین (۱۹۷۷) - میر و کاسارین^۱ (۱۹۸۱)

کاسارین در سال ۱۹۷۷ از یک مدل ۱g رسی با مقاومت برشی زهکشی نشده ۶۳ کیلوپاسکال و ضریب پیش تحکیم ۳/۵، استفاده کرد. برای مدل کردن سیستم نگهداری یک استوانه برنجی و برای مدلسازی سینه‌کار پوشش لاستیکی و فشار هوا بکار برده شد. در طول آزمایش فشار شبیه ساز روباره ثابت بوده در حالیکه فشار سینه کار کاهش داده می‌شود. نتایج نشان دادند که هر چه نسبت طول بدون نگهداری به قطر تونل بیشتر باشد جابجایی بیشتری در سینه‌کار رخ می‌دهد. افزایش نسبت روباره به قطر باعث افزایش عدد پایداری می‌شود ولی این افزایش با رسیدن این نسبت به مقدار ۲ متوقف می‌شود (شکل ۳-۲). [10]

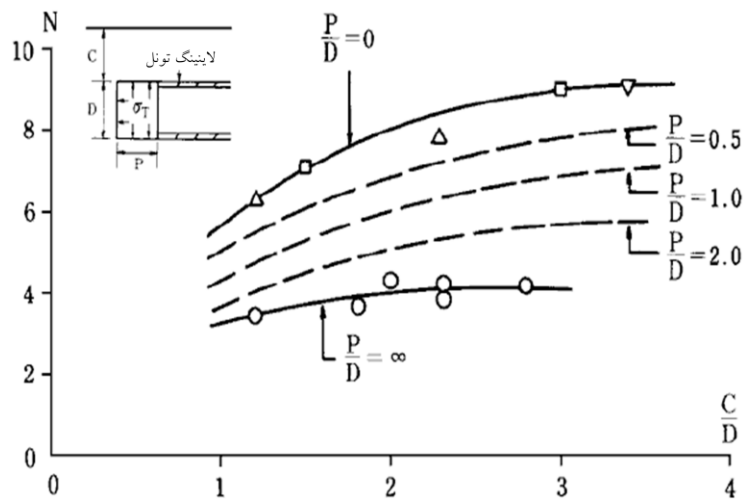


شکل ۳-۲. تاثیر نسبت روباره به قطر بر عدد پایداری سینه‌کار با نگهداری کامل و فشار سطحی [10]

¹ Mair and Casarin

۳-۵- روش میر (۱۹۷۹) - میر و کیمورا^۱ (۱۹۸۱)

مطالعات پایداری سینه کار بوسیله آزمایش سانتریفوژ انجام شد. فضای تونل مانند با قطر ۶۰ میلیمتر در رس با نسبت‌های روباره به قطر و طول بدون نگهداری به قطر متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش سانتریفوژ با شتاب ۷۵g و ۱۲۵g انجام شد که مدل را از نظر شرایط پایداری، معادل با تونل‌هایی با اقطار ۴/۵ و ۷/۵ متر قرار می‌داد. سیستم نگهداری بوسیله استوانه برنجی و سینه کار با لایه لاستیکی و فشار هوا تامین شده بودند. فشار هوا برابر با فشار روباره در نظر گرفته شده بود و مقدار آن به تدریج کاهش می‌یافت تا سینه کار ریزش کند. مقدار عدد پایداری در رابطه با نسبت‌های روباره به قطر و طول نگهداری نشده به قطر در شکل ۳-۳ آمده است. بدلیل استفاده از TBM مقدار طول نگهداری نشده صفر خواهد بود مگر اینکه تکه‌های بزرگ سنگ در خاک وجود داشته یا محیط از رس با سفتی بالا تشکیل شده باشد.



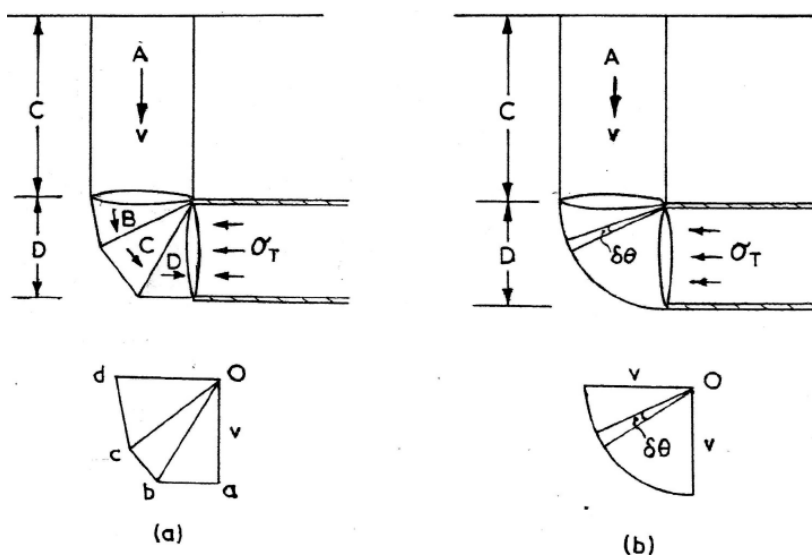
شکل ۳-۳. عدد پایداری حاصل از آزمایش سانتریفوژ [7]

¹ Kimura

همچنین میر در سال ۱۹۷۹ مقادیر حد بالا برای پایداری تونل با مقطع دایره در محیط زهکشی نشده را بدست آورد. مکانیزم شکست در روش او از یک بلوک استوانه‌ای و یک بلوک شاخ مانند تشکیل شده است (شکل ۳-۴) [10].

$$N_c = \frac{3}{2}\pi + 4\frac{C}{D} \quad (3-3)$$

N_c = عدد پایداری بحرانی



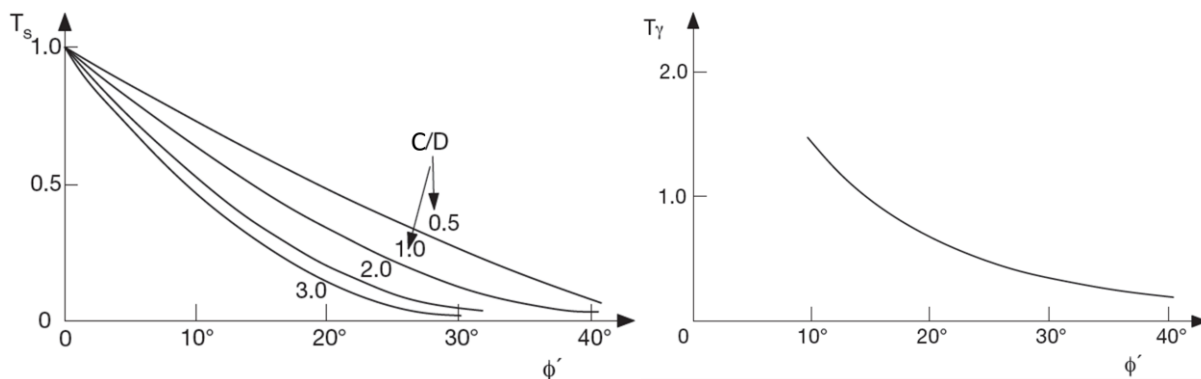
شکل ۳-۴. مکانیزم شکست برای تونل‌های با عمق کم [10]

۳-۶- روش اتکینسون و میر برای خاک درشت‌دانه

برای محاسبه فشار سینه کار تونلی که در بالای سطح ایستابی در خاک درشت‌دانه حفر می‌شود، رابطه زیر ارائه شده است [5].

$$\sigma_T = \sigma_S T_S + \gamma_d D T_\gamma \quad (4-3)$$

T_s و T_γ پارامترهای معادل عدد پایداری (N) برای خاک‌های ریزدانه هستند و به ترتیب معرف عدد پایداری برای فشار سطحی و بار وارده از طرف خاک‌اند. مقادیر این دو پارامتر از منحنی‌های شکل ۳-۵ قابل استخراج است [5].



شکل ۳-۵. تعیین پارامترهای T_s و T_γ بر حسب زاویه اصطکاک داخلی طبق روش اتکینسون و میر [5]

اگر تونل زیر سطح ایستابی حفر می‌شود معادله فشار سینه کار از منظر تئوری بصورت زیر تغییر می‌کند.

$$\sigma_T = \sigma_S T_S + (\gamma_d(C - h_w) + \gamma_{sat} h_w) T_\gamma + \gamma_w h_w \quad (5-3)$$

h_w = ارتفاع سطح ایستابی تا تاج تونل

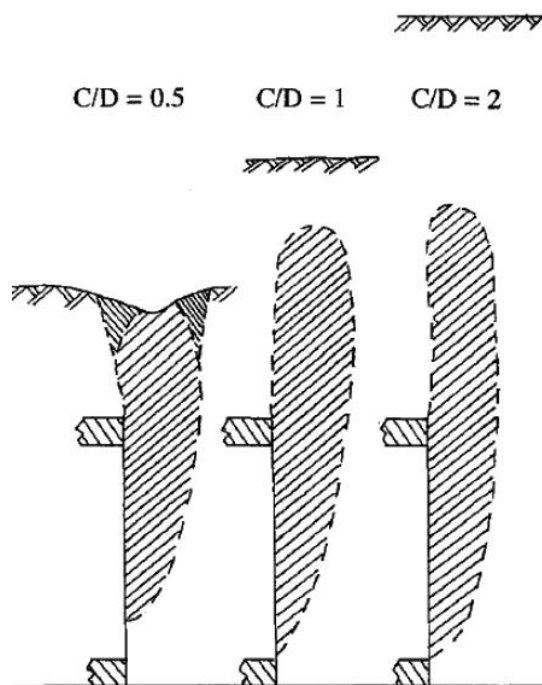
قابل ذکر است که در صورت وجود نیروی تراوش میزان فشار نگهداری افزایش خواهد یافت [5].

۳-۷- روش چامبون و کورته (۱۹۹۴)

آزمایش سانتریفیوژ در این روش برای مدلی از شن خشک انجام شد. مدل‌ها تونل‌هایی با شعاع ۵، ۱۰ و ۱۳ متر را شبیه‌سازی می‌کردند. قوس خاکی که در اثر ریزش سینه‌کار در آزمایش گسترش می‌یافت، مگر در صورتی که عمق روباره کم بود و منطقه تخریب به سطح زمین می‌رسید، از عمق تونل تاثیری نمی‌پذیرفت. طبق نتایج آزمایش هر ریزش منطقه‌ای در سینه‌کار در اثر حرکت گوه‌ها یا بلوک‌ها صورت

می‌گرفت و کاهش بیشتر فشار سینه‌کار منجر به تخریب بزرگ‌تر (دودکش مانند) می‌شد [10]. لازم بذکر است که آزمایش‌ها بر روی خاک با بازه تغییرات کم وزن مخصوص (۱۶/۱-۱۵/۳ کیلونیوتن بر متر مکعب) و نسبت روباره به قطر بین ۰/۵ تا ۴، انجام شدند. فشار سینه‌کار اولیه تا تخریب سینه‌کار کاهش داده شد. فشار اولیه سینه‌کار طبق رابطه رانکین محاسبه می‌شود [9]:

$$\sigma_T = \gamma \left(C + \frac{D}{2} \right) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6-3)$$



شکل ۶-۲. مقاطع تخریب برای نسبت‌های مختلف روباره به قطر [10]

نتایج آزمایش‌ها بصورت خلاصه در ادامه آمده است:

- شکست بصورت ناگهانی اتفاق می‌افتد.
- زمانی ریزش صورت می‌گیرد که فشار سینه‌کار به مقدار کمی (چند کیلوپاسکال) کاهش پیدا کند.

- نسبت روباره به قطر تاثیر کمی بر فشار حدی دارد.
- زون شکسته شده شکلی حباب مانند داشته و بزرگترین بعد آن در سینه کار واقع شده است.
- هندسه زون شکسته مستقل از تغییرات نسبت روباره به قطر و وزن مخصوص خاک است (بدلیل بازه کوچک تغییرات وزن مخصوص در آزمایش‌ها).
- در صورتی که نسبت روباره به قطر بزرگتر از یک باشد، شکست تا سطح زمین ادامه پیدا نخواهد کرد [10].

۳-۸- روش پیشنهادی توسط مرکز زیرزمینی بوون^۱ (COB)

طبق گزارش پروثر، مرکز زیرزمینی بوون در هلند مقداری کمی بیشتر از فشار زمین در حالت محرک را بعنوان فشار کمینه نگهداری پیشنهاد می‌کند [3].

$$\sigma_{Tmin} = K_a \sigma'_V + P_W + 20 \text{ kPa} \quad (7-3)$$

$$\sigma'_V = \text{تنش موثر عمودی}$$

$$P_W = \text{فشار آب زیرزمینی}$$

۳-۹- نتیجه گیری

در این فصل روش‌های مختلف تجربی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در روش‌های آزمایشگاهی سعی بر این است که شرایط واقعی شبیه سازی شود، بنابراین محققین در بسیاری از موارد از این روش‌ها برای صحت سنجی نتایج تحلیلی خود استفاده می‌کنند.

¹ Centre Underground Bowen

روابط حاصل از روش‌های تجربی بر اساس مشاهدات در پروژه‌های مختلف بوده است. مقادیر فشاری که با موفقیت به کار گرفته شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته و روابط تجربی از آنها استخراج می‌شود.

فصل چهارم

برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل در حفاری با دستگاه متعادل کننده

فشار زمین با استفاده از روش مونت کارلو

۴-۱- مقدمه

خط ۳ متروی تهران از بزرگراه آیتاله سعیدی در مجاورت جاده ساوه در جنوب غرب تهران به شکل رو سطحی آغاز شده و از قبل از میدان راه آهن به صورت زیرسطحی ادامه می یابد. این خط زیر خیابان ولیعصر تا میدان ولیعصر امتداد یافته سپس تغییر مسیر داده و در راستای خیابان شهید بهشتی تا خیابان استاد حسن بنا و در جهت شمال شرق در راستای بزرگراه دارآباد تا بزرگراه لشگرک ادامه می یابد. قطعه چهارم این خط حد فاصل ایستگاه B3 واقع در حوالی منطقه قلعه مرغی تا ایستگاه K3 واقع در میدان ولیعصر قرار داشته و در مجموع دارای طولی در حدود ۸۴۰۰ متر است. حفاری در این قطعه با استفاده از دستگاه متعادل کننده فشار زمین انجام می شود [11]. بدلیل عبور از زیر مسیر راه آهن، برآورد صحیح فشار نگهداری سینه کار تونل امری حائز اهمیت است. در این فصل مقدار فشار نگهداری بهینه حداقل و حداکثر در سینه کار تونل با استفاده از روش مونت کارلو برآورد می شود. ابتدا بر اساس اطلاعات گمانه-های حفر شده مدل ژئوتکنیکی مسیر تونل تشکیل می شود سپس تابع توزیع احتمال مربوط به پارامترهای خاک تعریف می شود. شبیه سازی با استفاده از ایجاد اعداد تصادفی، ۵۰۴۱ بار تکرار می شود. در فرایند شبیه سازی بمنظور برآورد فشار سینه کار در برابر ریزش از روش تحلیلی بروئر و روش تجربی COB، استفاده می شود. برای برآورد حداکثر فشار نگهداری در مقابله با بالازدگی نیز از روش بالتائوس و روشی جدید بر اساس روش COB، استفاده خواهد شد. در پایان مقدار بهینه فشار سینه کار با توجه به فاکتور ایمنی و احتمال مربوط به آن تعیین می شود.

۴-۲- زمین شناسی مهندسی گستره تهران و محل مورد مطالعه

۴-۲-۱- زمین ساخت گستره تهران

گستره تهران در دامنه جنوبی البرز مرکزی و بر روی نهشته‌های آبرفتی کوارتز بنا شده و قسمت جنوبی آن کم و بیش در کناره شمال غربی کویر بزرگ مرکزی قرار دارد. کوه‌های البرز در شمال تهران متشکل از یک سری چین‌ها و راندگی‌های شرقی - غربی است که از محور مرکزی البرز کوه بر روی هم و به سمت جنوب و شمال رانده شده است. شدت دگر ریختی در دو کناره شمالی و جنوبی به بیشترین مقدار خود رسیده است و بلندی‌های البرز کوه به ترتیب بر روی دشت کناری خزر در شمال و دشت تهران در جنوب رانده شده است. گستره دشت تهران با شیب از شمال به جنوب به وسیله بلندی‌ها و فرونشست‌های شرقی-غربی به بخش‌های گوناگونی از دیدگاه فیزیوگرافی به شرح ذیل تقسیم می‌گردد [12]:

گستره بلند البرز: این گستره به سمت جنوب و بر روی چین‌های کناری البرز رانده شده است. گستره بلند البرز از سنگ‌های پالئوزوئیک، مزوزوئیک و تریاس بر تشکیل شده است که به سبب چین‌خوردگی‌های شدید و راندگی‌های مشترک، بر روی هم رانده شده و بلندی یافته‌اند. این گستره به وسیله گسله جنبا و لرزه‌ای مشا و گستره چین‌های کناری البرز به وسیله راندگی مشا در شمال از بلند البرز جدا شده است و خود در راستای راندگی شمال تهران بر روی گستره کوهپایه دشت تهران رانده شده است [12].

گستره کوهپایه: تهران در فرونشست‌های پای البرز کوه بر روی نهشته‌های آبرفتی که از فرسایش شدید البرز بالا رونده در راستای گسله‌های گوناگون تشکیل شده، قرار گرفته است. این فرونشست از دو بخش

کوهپایه‌ای در شمال و فرونشست شمالی ایران مرکزی در جنوب تشکیل شده است. از دیدگاه فیزیوگرافی این گستره در دشت تهران به پنج بخش اساسی از نظر کارکرد گسله‌ها تقسیم می‌شود:

۱. بلندی‌های سعادت‌آباد- شمیران، دزاشیب

۲. فرونشست اوین - نیاوران - تجریش

۳. بلندی‌های محمودیه - الهیه - قیطریه - فرمانیه و شیان - کوثر

۴. فرونشست داوودیه

۵. بلندی‌های طرشت - عباس‌آباد

گستره فرونشست شمال ایران مرکزی (دشت تهران - ری): این بخش که قسمت‌های مرکزی و جنوب شهر تهران، شهر ری و جنوب آن را فرا می‌گیرد، از نهشته‌های آبرفتی جوان و کمی قدیمی‌تر پوشیده شده است و مخروط افکنه‌های رودخانه‌های کن، کرج و جاجرود، قسمت‌های جنوبی آن را می‌پوشانند. این گستره به سبب کارکرد چند گسله به بخش‌های فیزیوگرافی زیر تقسیم می‌شود [12]:

۱. دشت تهران

۲. فرونشست ری

۳. فرونشست جنوب ری

۴. فرونشست کهریزک

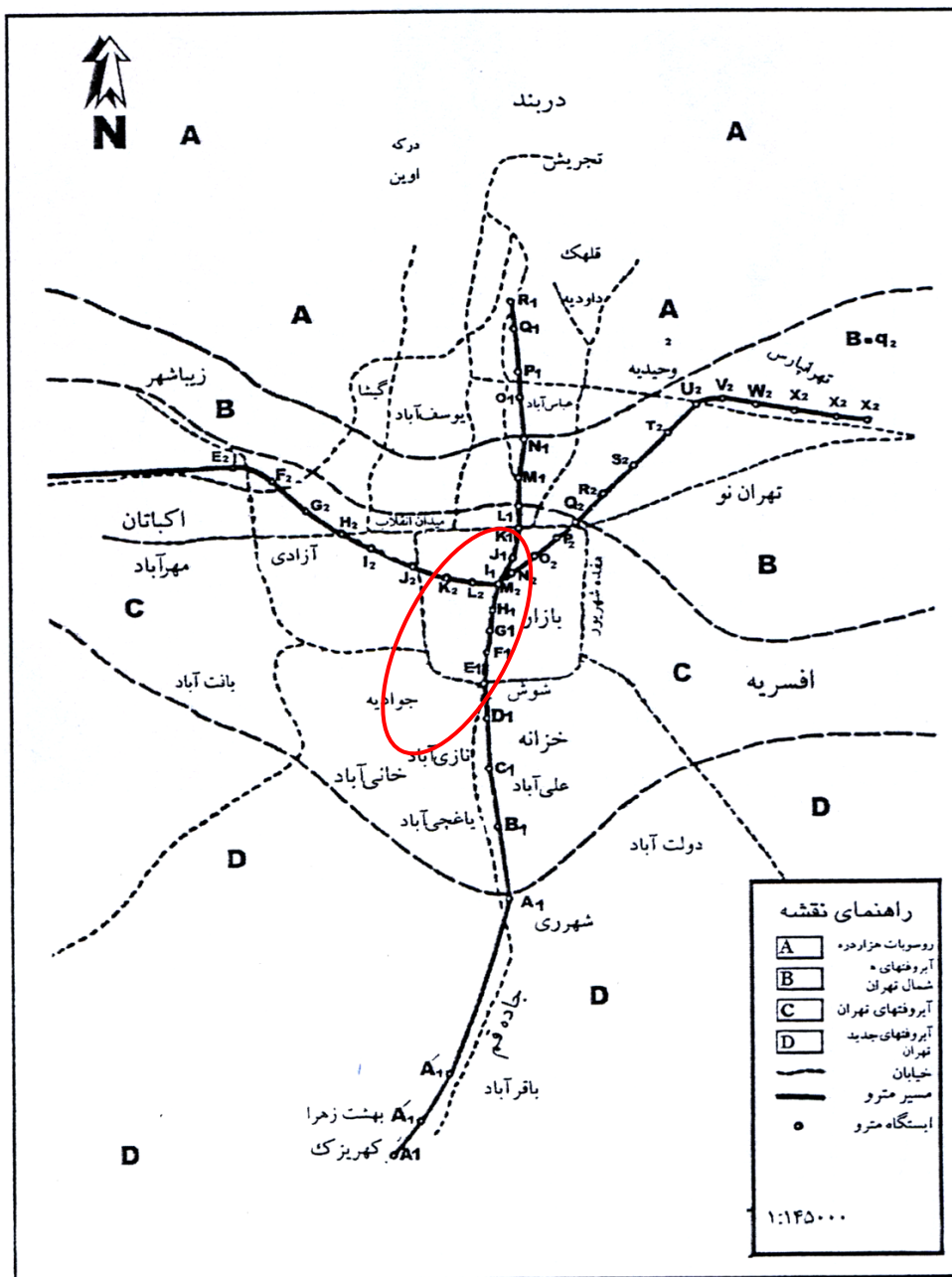
۴-۲-۲- ویژگی‌های نهشته‌های دشت تهران

شهر تهران بر روی نهشته‌های آبرفتی که از کوهپایه‌های البرز تا کناره کویر جنوبی تهران گسترش دارند، بنا شده است. این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های جریان یافته از کوه‌های البرز هستند و

به دنبال چرخه های فرسایشی پلیوسن- پلیستوسن (سازند هزاردره) انباشته شده‌اند. آبرفت‌های تهران از نظر خاستگاه ویژگی های یکسانی دارند ولی تناوب چرخه‌های آب وهوایی و حتی رخداد‌های زمین ساختی بر ویژگی‌های این آبرفت‌ها اثر گذار بوده و با توجه به ویژگی‌های ظاهری، تغییرات فیزیکی و مکانیکی از جمله لایه‌بندی، دانه‌بندی، جورشدگی، تخلخل، نفوذپذیری، هوازدگی، درجه سیمانتاسیون، ناپیوستگی های رسوبی، مقاومت مکانیکی و تکتونیک از قدیم به جدید به چهار سازند اصلی تقسیم شده است (جدول ۴-۱) [12].

در سال های اخیر مطالعات زیادی بر روی آبرفت‌های دشت تهران انجام شده است. از جمله امینی (۱۳۷۳) بر اساس حفاری های انجام شده در مطالعات مترو که بصورت گمانه‌های اکتشافی و چاهک های دستی به صورت پراکنده در سرتاسر تهران به عمل آمده و همچنین با استفاده از نتایج آزمایش‌های صحرایی و نیز آزمایشگاهی بر روی نمونه های حاصل از حفاری‌ها، نهشته‌های دشت تهران را از شمال به جنوب از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی به چهار بخش متمایز تقسیم کرده است. ایشان این بخش ها را با علائم A, B, C و D مشخص کرده و مرز بین آنها را تقریبی مشخص می‌نماید (شکل ۴-۱). این بخش‌ها بصورت نوارهای شرقی- غربی بوده که به ترتیب از شمال به جنوب تهران گسترده شده‌اند. در بخش‌های شمالی، آبرفت‌ها از شن و ماسه قلوه سنگ دار با دانسیته زیاد تشکیل شده‌اند. در بخش میانی نیز که به دو زیر بخش درشت دانه و ریزدانه تفکیک شده، مقاومت مکانیکی و دانسیته خاک نسبت به بخش‌های شمالی کمتر ذکر شده است. رسوبات بخش جنوبی نیز بیشتر از خاک ریزدانه تشکیل شده‌است [12].

بعنوان جمع بندی کلی حاصل از مطالعات انجام شده و نتایج بدست آمده از حفاری گمانه‌ها و چاهک‌های دستی، منطقه مورد مطالعه بیشتر منطبق بر نهشته‌های C آبرفت‌های تهران است.



شکل ۴-۱. نقشه حدود مرزبندی نهشته‌های تهران و منطقه مورد مطالعه (قطعه چهارم) [12]

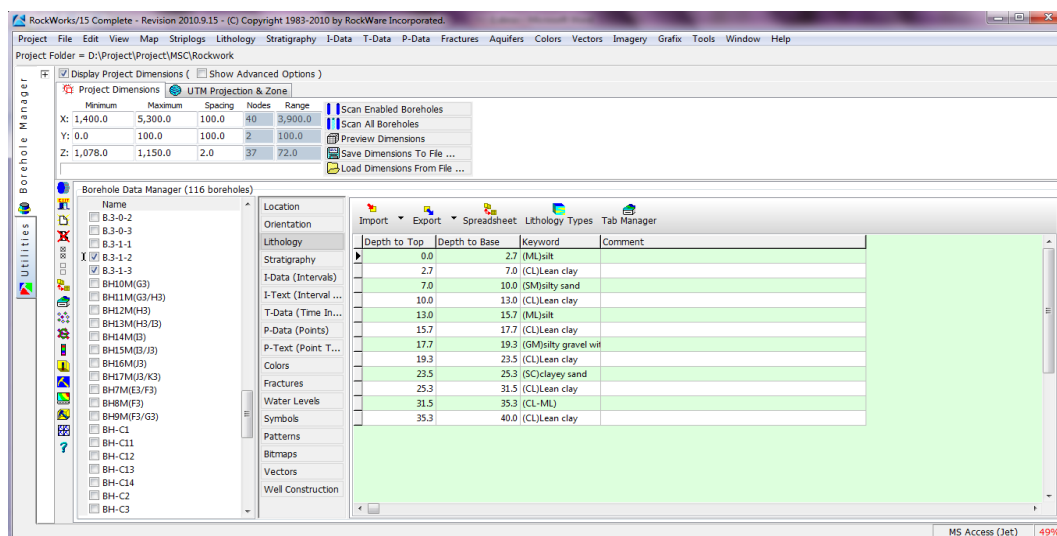
جدول ۴-۱. ویژگی‌های آبرفت‌های گستره شهر تهران [12]

نام و (سن) سازند	علامت طبقه بندی	توصیف کلی	نوع و اندازه ذرات	جنس سیمان بین ذرات	ضخامت سازند	شیب لایه‌ها	همگنی ذرات	محل‌های اصلی رخنمون سازند
هزار دره (کواترنری - پلیوسن)	A	کنگومرایی همگن به رنگ خاکستری روشن، سیمان شده و سخت شده با لایه بندی منظم، بطور موضعی دارای لایه‌ها و عدسی‌های رس و ماسه سنگ عموماً به شکل تپه‌هایی با دره‌های عمیق در اکثر نقاط دیده می‌شود	مخلوطی از قلوه سنگ، شن، ریگ؛ ماسه، سیلت و رس که قلوه‌های آن نیمه مدور بوده و متوسط حداکثر اندازه آنها ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر است.	ماسه و سیلت	حدود ۱۲۰۰ متر	تا ۹۰ درجه	همگن	کن، اوین، قیطریه، عباس‌آباد، گیشا، گردنه قرچک
ناهمگن شمال تهران (کواترنری)	B	کنگومرایی سخت نشده و ناهمگن با رنگی تیره‌تر از آبرفت A که بطور دگر شیب بصورت تپه‌های بلند بر روی سازند هزار دره قرار دارد. گاهی دارای عدسی‌هایی از رس و سیلت است.	مخلوطی از شن، ریگ و قلوه سنگ، رس و گاهی بلوک‌های درشت، اندازه‌های قلوه‌ها از چند سانتی‌متر تا چند متر	ماسه و سیلت	حداقل ۶۰ متر که به سمت جنوب کم می‌شود	حداکثر تا ۱۵ درجه	ناهمگن	باغ فیض، شهرک غرب، شهید بهشتی، جاده شمیران، جاده قدیم شمیران به سمت جنوب تا عباس‌آباد
سازند تهران (کواترنری)	C	نهبشته‌های رودخانه‌ای یا سیلابی جوان، جور نشده (از نظر زمین‌شناسی)، همگن و سخت نشده	مخلوطی از قلوه سنگ، شن و ریگ در ملاتی از ماسه و سیلت و رس	ماسه و سیلت	تا ۶۰ متر	افقی	همگن	بخش گسترده‌ای از شهر تهران، عمدتاً از مرکز به سمت شمال
آبرفتهای کنونی (کواترنری)	D	جوان ترین نهبشته‌های رودخانه ای یا سیلابی بصورت پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه و کاملاً منفصل	درشمال تهران قلوه سنگ و شن گرد شده و در جنوب تهران سیلت و رس	بدون سیمان	کمتر از ۱۰ متر	افقی		بخش‌های اعظم مرکز و جنوب تهران، همچنین در بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها

۳-۲-۴- تهیه مدل ژئوتکنیکی مسیر تونل

بمنظور شناخت دقیق لایه‌های خاک مجموعه عملیات شناسایی ژئوتکنیکی در طول مسیر تونل انجام شد. این عملیات که از دو مرحله اولیه و تکمیلی تشکیل شده بود شامل حفاری در مجموع ۳۶ گمانه اکتشافی می‌شد. برای تهیه مدل ژئوتکنیکی مسیر تونل ابتدا مقاطع بین هر دو گمانه با استفاده از درون‌یابی اطلاعات گمانه‌های مربوط به آن مقطع ایجاد شده سپس با ترکیب این مقاطع مدل کلی ژئوتکنیکی مسیر تشکیل می‌شود.

درون‌یابی در هر مقطع با استفاده از نرم افزار RockWorks 15 انجام شد. در بخش مدیریت گمانه‌ها در این نرم افزار اطلاعات مربوط به هر گمانه از قبیل کیلومتر، ارتفاع از سطح دریا، عمق، لایه بندی و تراز آب زیرزمینی را وارد کرده سپس با انتخاب مقطع^۱ در منوی لیتولوژی^۲ وارد بخش مربوط به تهیه مقطع زمین شناسی می‌شویم (شکل ۲-۴).

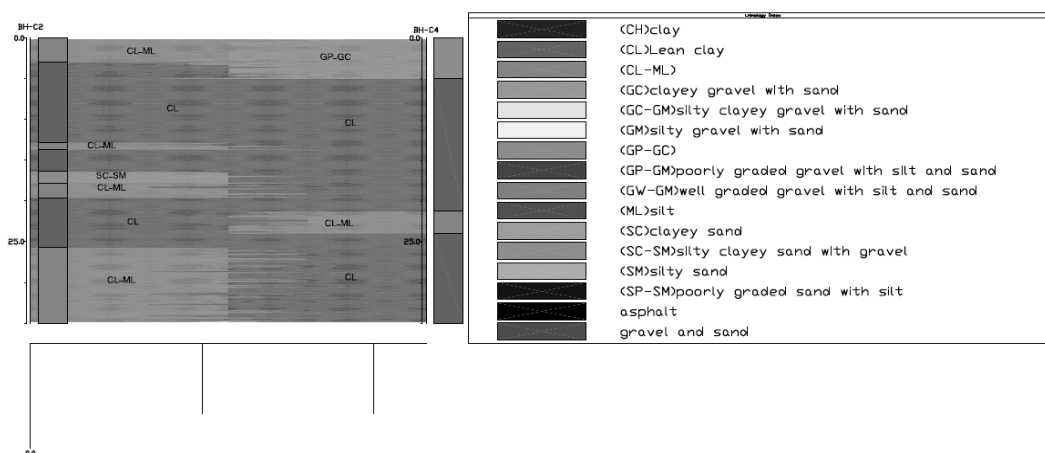


شکل ۲-۴. وارد کردن اطلاعات مربوط به هر گمانه در RockWorks

¹ section

² lithology

در مورد گمانه‌های نزدیک به هم (گمانه‌های حفر شده در یک ایستگاه)، گمانه‌ای که بیشترین تطابق و همپوشانی را با شرایط خاک داشت انتخاب شد و در محاسبات مدنظر قرار گرفت. با انتخاب هر دو گمانه مجاور، مدل خاک بین آنها ایجاد شده و نتایج با فرمت DXF ذخیره شده (شکل ۴-۳) تا توسط نرم افزار AutoCAD قابل بازخوانی باشند.



شکل ۴-۳. مقطع درونیابی شده توسط RockWorks

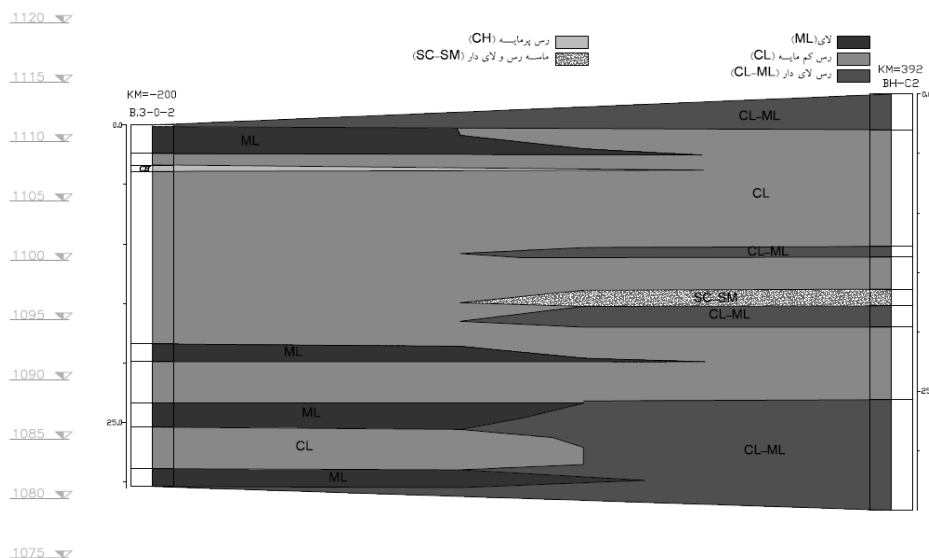
مدل‌های ایجاد شده در AutoCAD تصحیح شده و در هر مرحله بر مقطع تونل منطبق شدند. مقطع مربوط به تراز آب زیرزمینی نیز در طول مسیر بوجود آمد. در اشکال ۴-۴ تا ۴-۱۸ مدل‌های زمین شناسی بین تمامی گمانه‌های مسیر نمایش داده شده است. مدل کلی ژئوتکنیکی مسیر در پیوست ۱ ضمیمه شده است. بطور کلی می‌توان مسیر تونل را از دیدگاه خصوصیات ژئوتکنیکی به ۳ ناحیه به شرح زیر تقسیم کرد:

- **ناحیه رسی:** این ناحیه از خاک ریزدانه بوده و از رس کم مایه گاهی لای دار و لای تشکیل شده است. مقدار میانگین پارامترهای چسبندگی (کیلوپاسکال)، زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، مدول

الاستیسیته (مگاپاسکال)، وزن مخصوص خشک (کیلونیوتن بر متر مکعب) و ضریب پواسن در این ناحیه به ترتیب ۴۲، ۲۷، ۱۰، ۱۷ و ۰/۴ است.

- **ناحیه ماسه‌ای:** خاک در این محدوده از تناوبی از خاک‌های درشت دانه خوب یا بد دانه بندی شده همراه با لای و رس با تراکم متوسط تا بسیار متراکم تشکیل شده است. مقدار میانگین پارامترهای چسبندگی (کیلوپاسکال)، زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)، وزن مخصوص خشک (کیلونیوتن بر متر مکعب) و ضریب پواسن در این ناحیه به ترتیب ۳۸/۱، ۳۳/۵، ۴۵، ۱۸/۳ و ۰/۳۸ است.

- **ناحیه شنی:** خاک ساختگاه این محدوده از خاک‌های درشت دانه خوب یا بد دانه بندی شده همراه با لای و رس با تراکم متوسط تا بسیار متراکم تشکیل شده است. مقدار میانگین پارامترهای چسبندگی (کیلوپاسکال)، زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)، وزن مخصوص خشک (کیلونیوتن بر متر مکعب) و ضریب پواسن در این ناحیه به ترتیب ۴۴/۸، ۳۵/۴، ۷۰، ۱۸/۵ و ۰/۳۵ است.



شکل ۴-۴. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های B.3-0-2 و BH-C2

نامگذاری خاک در مدل‌سازی مسیر تونل بر اساس سیستم طبقه بندی متحد صورت گرفت. در

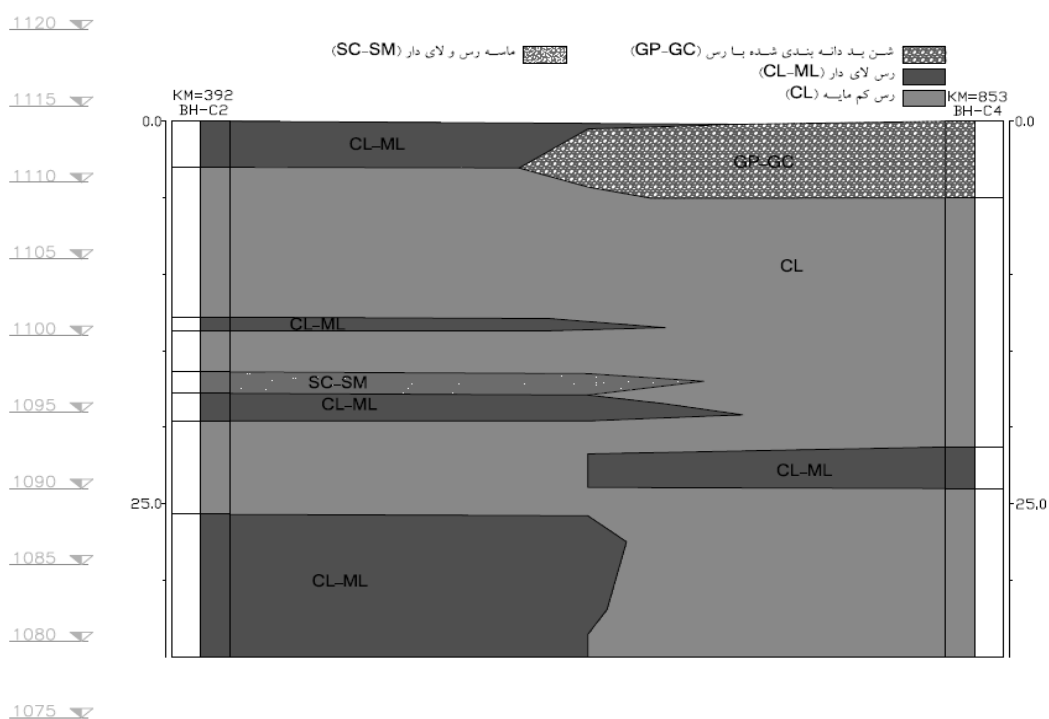
این سیستم خاک‌ها به دو طبقه بزرگ تقسیم می‌شوند [6]:

۱. خاک‌های درشت دانه با طبیعت شنی و ماسه‌ای و درصد عبوری کوچکتر از ۵۰٪ از الک

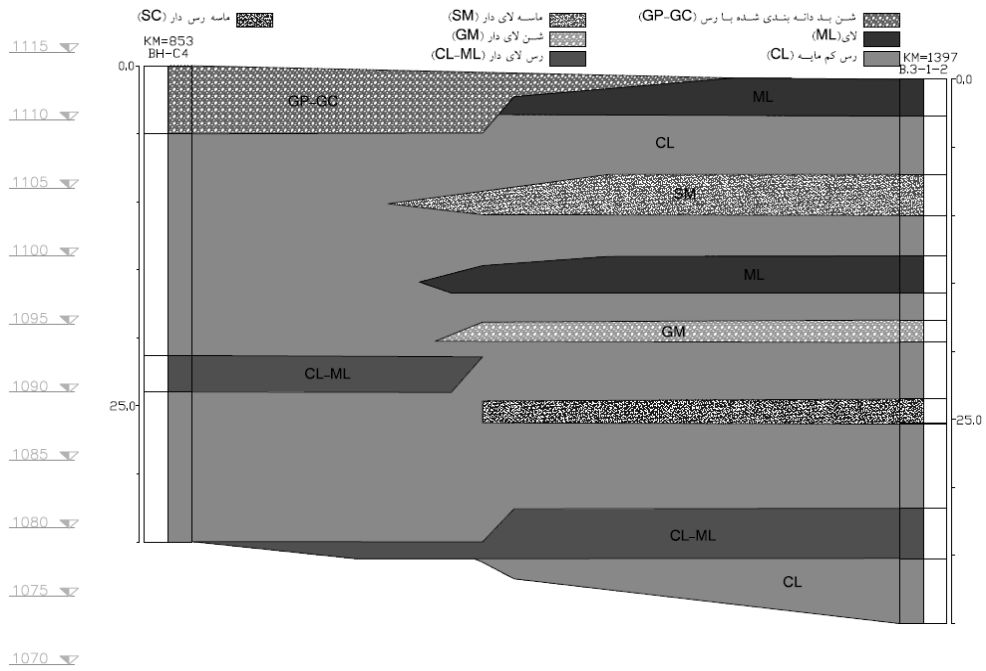
نمره ۲۰۰. علامت گروه‌های این طبقه با حروف G یا S شروع می‌شود. علامت G برای شن

یا خاک‌های شن‌دار و علامت S برای ماسه یا خاک‌های ماسه‌دار به‌عنوان حرف اول بکار می-

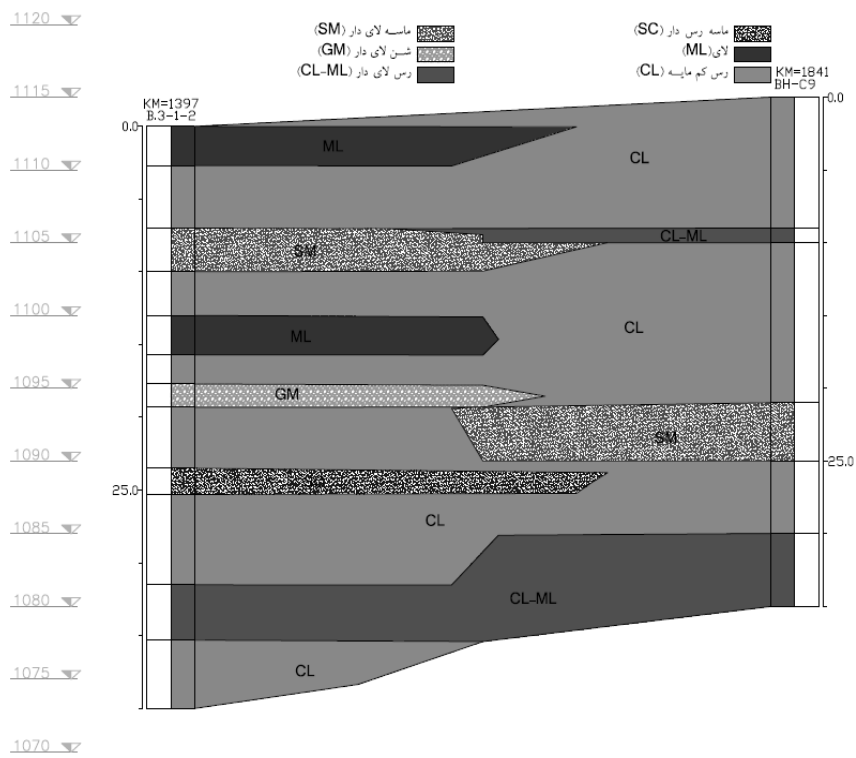
روند.



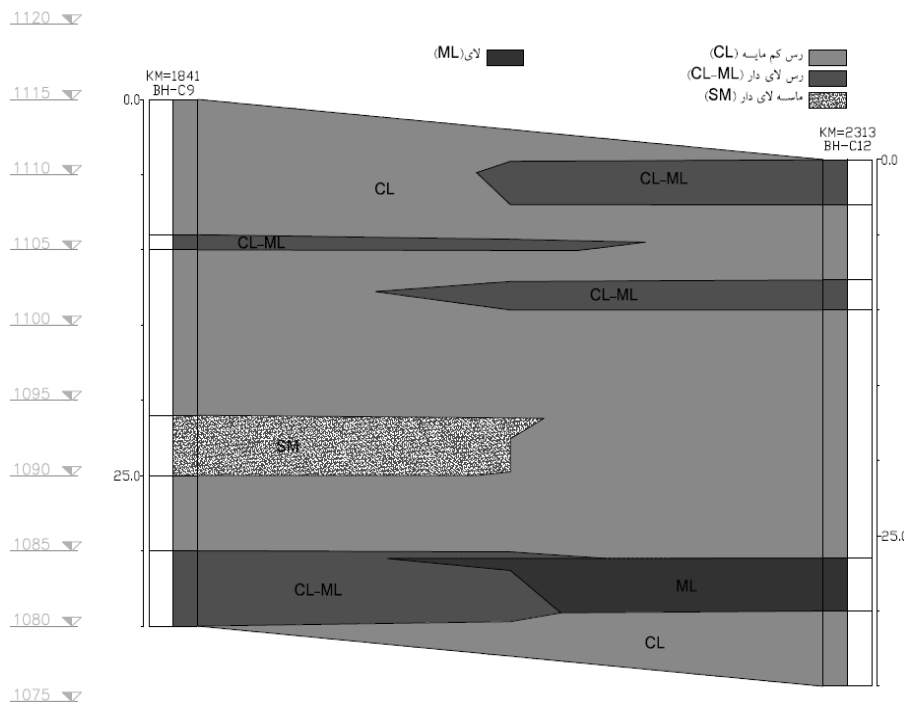
شکل ۴-۵. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C2 و BH-C4



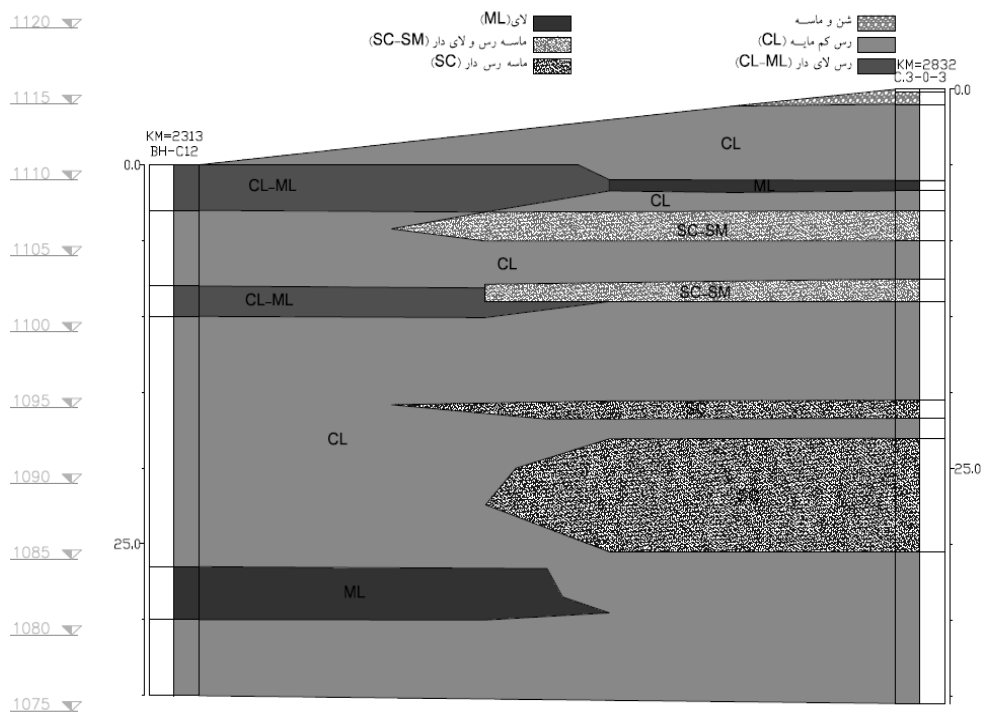
شکل ۴-۶. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C2 و B.3-1-2



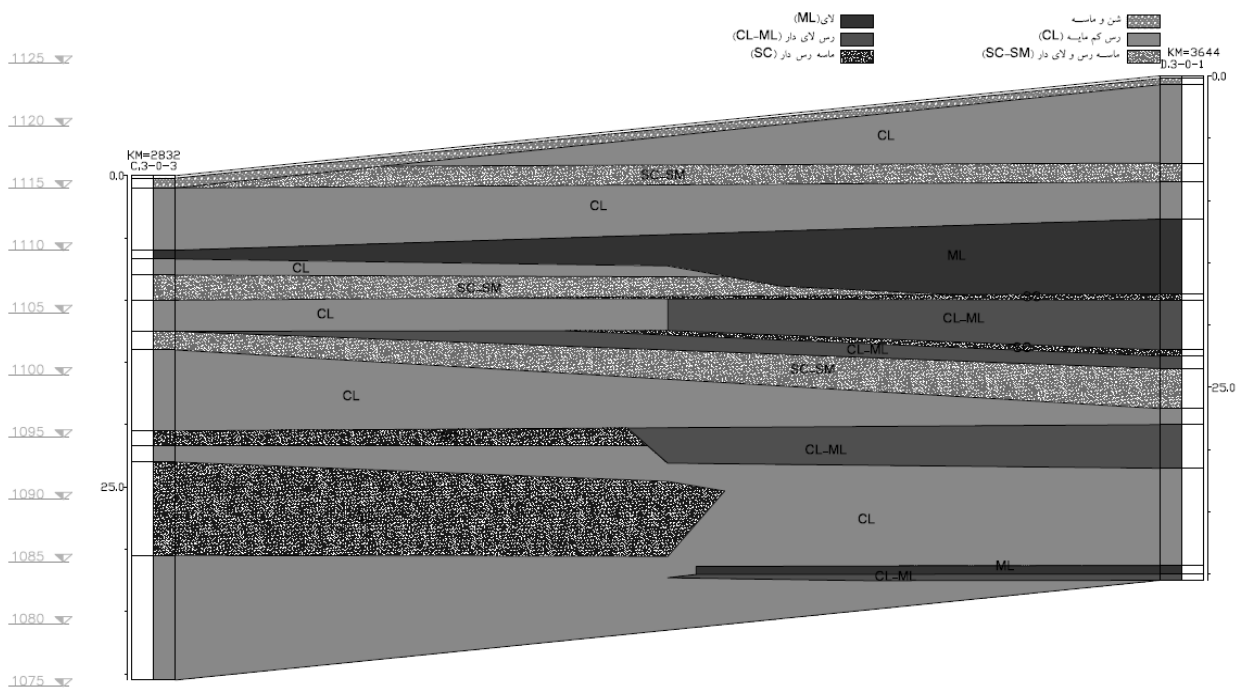
شکل ۴-۷. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C9 و B.3-1-2



شکل ۴-۸. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C9 و BH-C12



شکل ۴-۹. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C12 و C.3-0-3



شکل ۴-۱۰. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های C.3-0-3 و D.3-0-1

۲. خاک‌های ریزدانه با درصد عبوری بزرگتر از ۵۰٪ از الک نمره ۲۰۰. علامت گروه‌های این

طبقه با حروف M برای لای غیر آلی و یا C برای رس غیر آلی و O برای لای‌ها و رس‌های

آلی شروع می‌شود.

علائمی که بعنوان حروف دوم در طبقه‌بندی بکار می‌روند، عبارتند از:

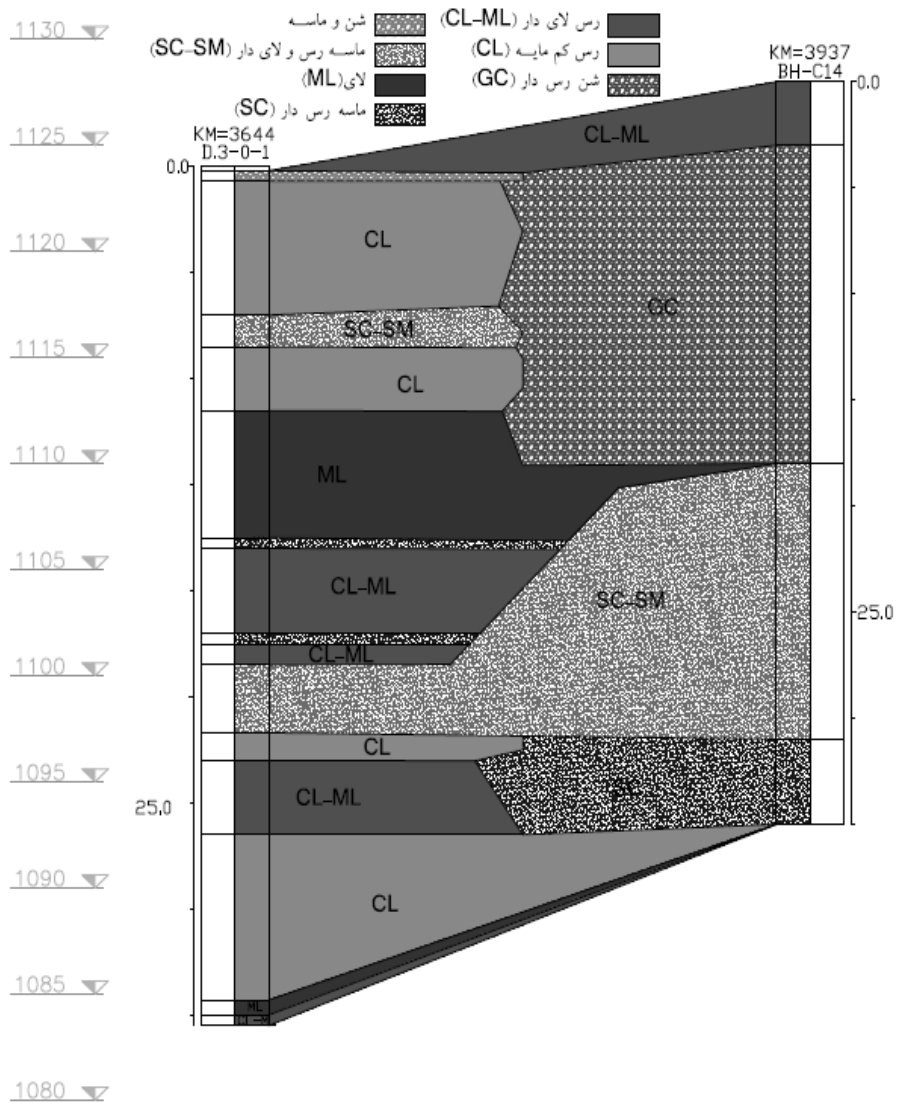
W = خوب دانه‌بندی شده

P = بد دانه‌بندی شده

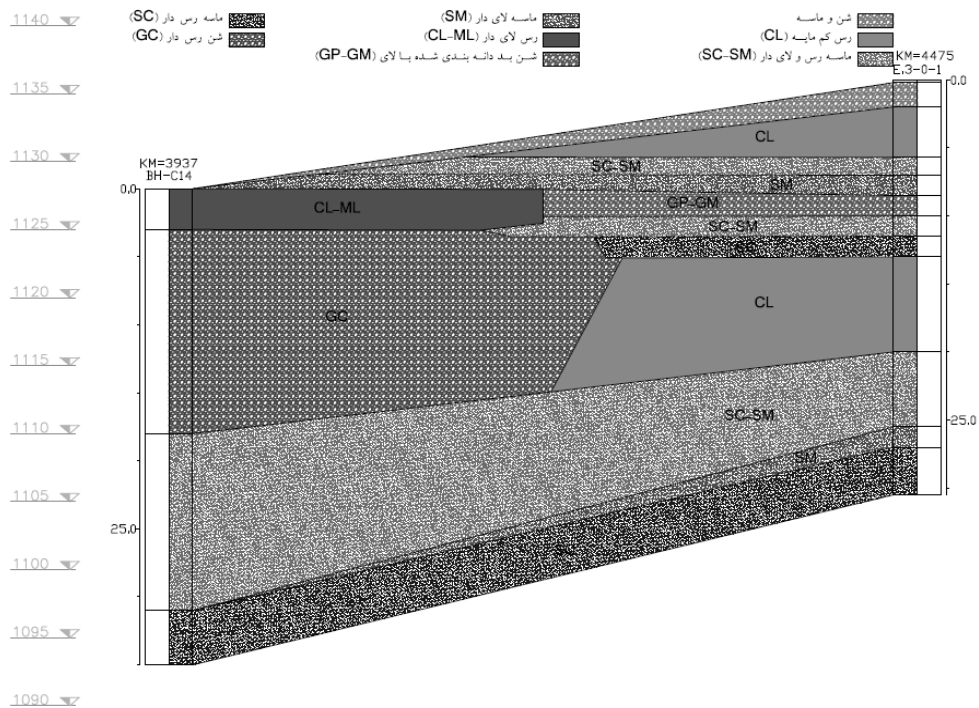
L = خاصیت خمیری کم (حد مایع کوچکتر از ۵۰)

H = خاصیت خمیری زیاد (حد مایع بزرگتر از ۵۰)

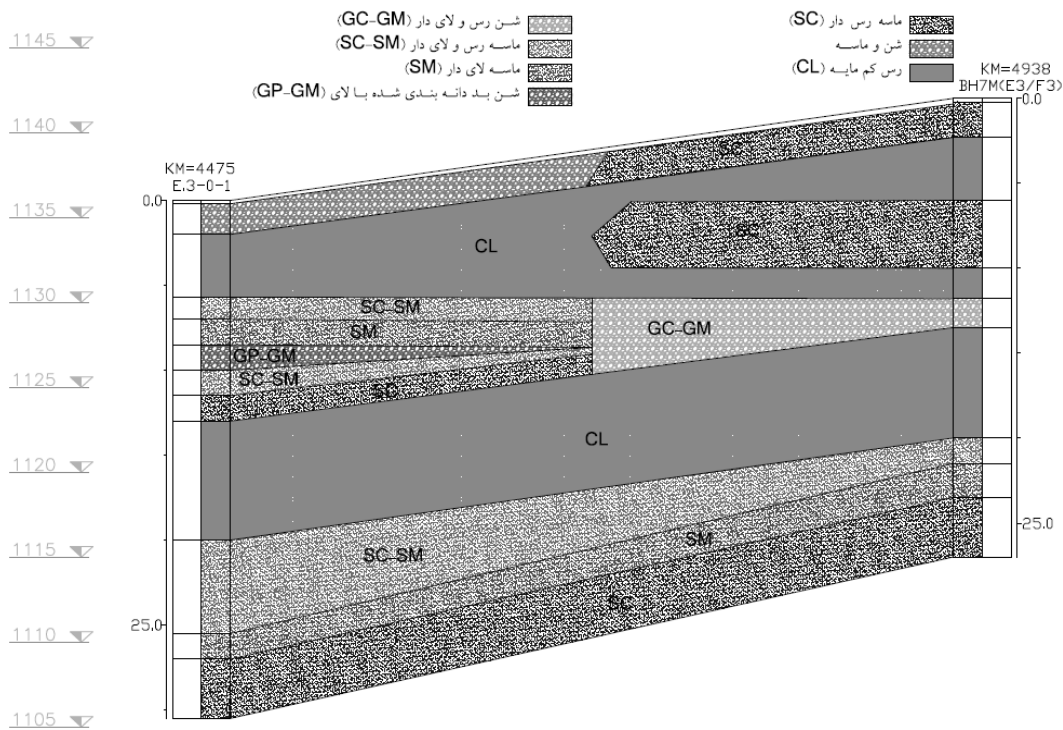
حروف فوق همیشه بعنوان حرف دوم قرار گرفته و صفت حرف اول هستند [6].



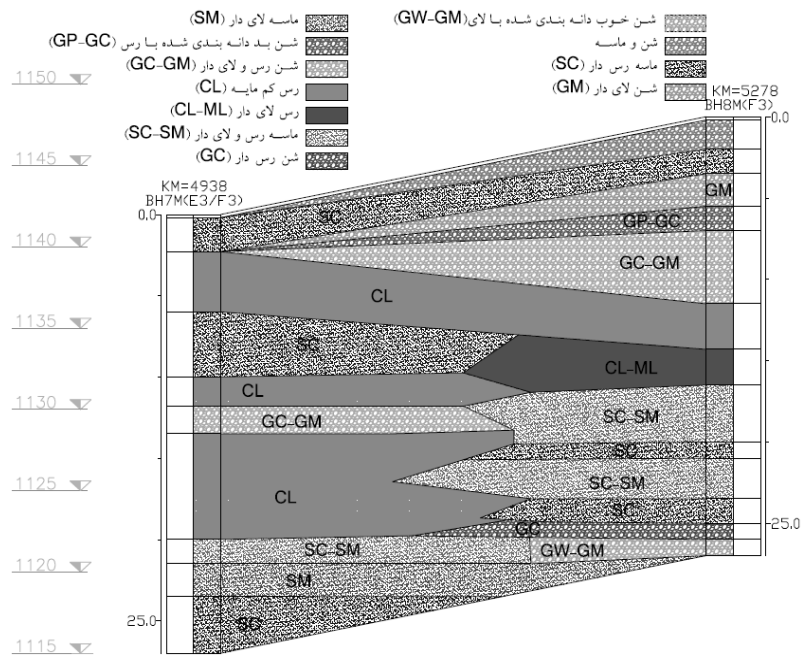
شکل ۴-۱۱. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های D.3-0-1 و BH-C14



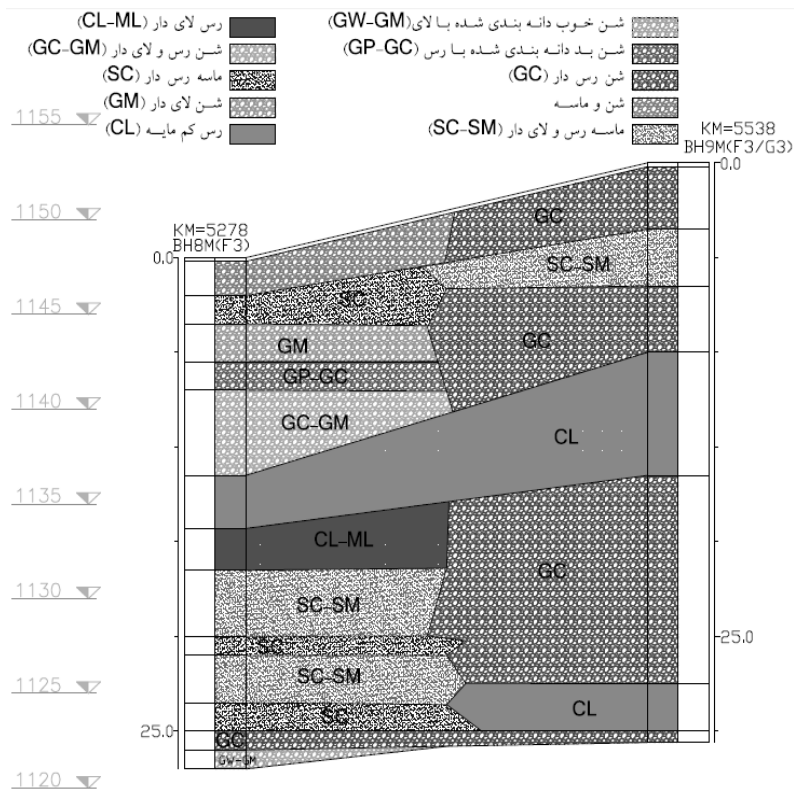
شکل ۴-۱۲. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH-C14 و E.3-0-1



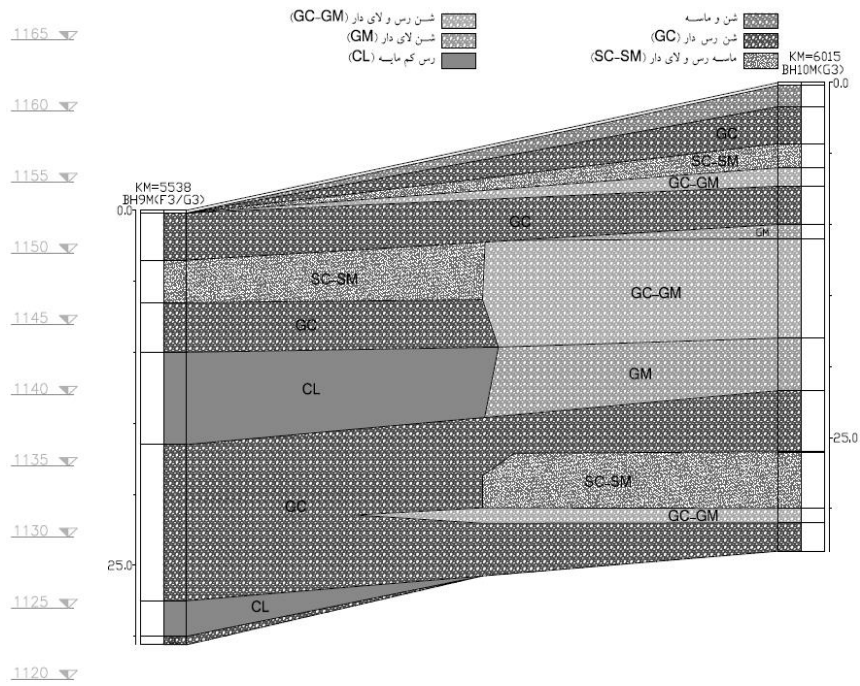
شکل ۴-۱۳. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های E.3-0-1 و BH7M



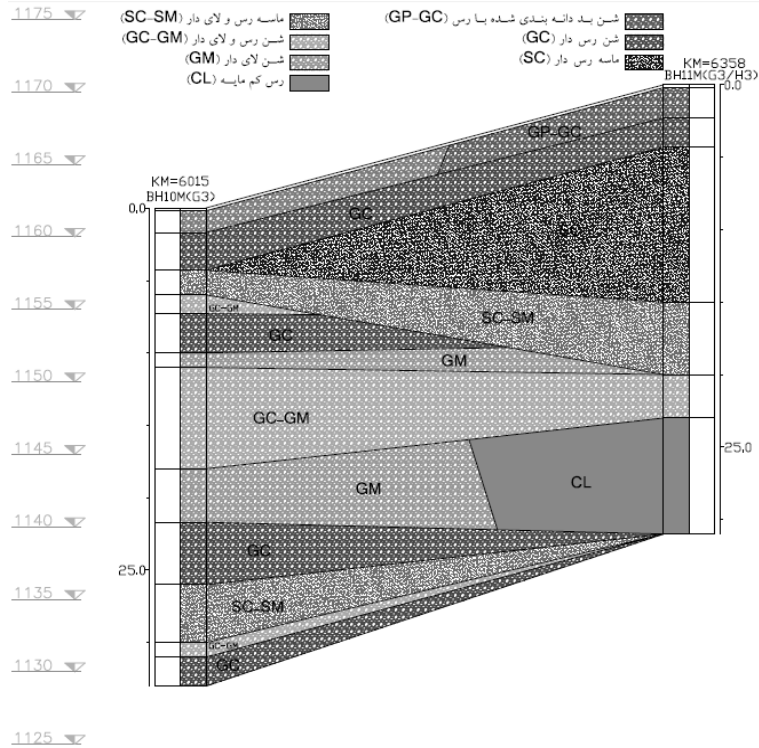
شکل ۴-۱۴. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH7M و BH8M



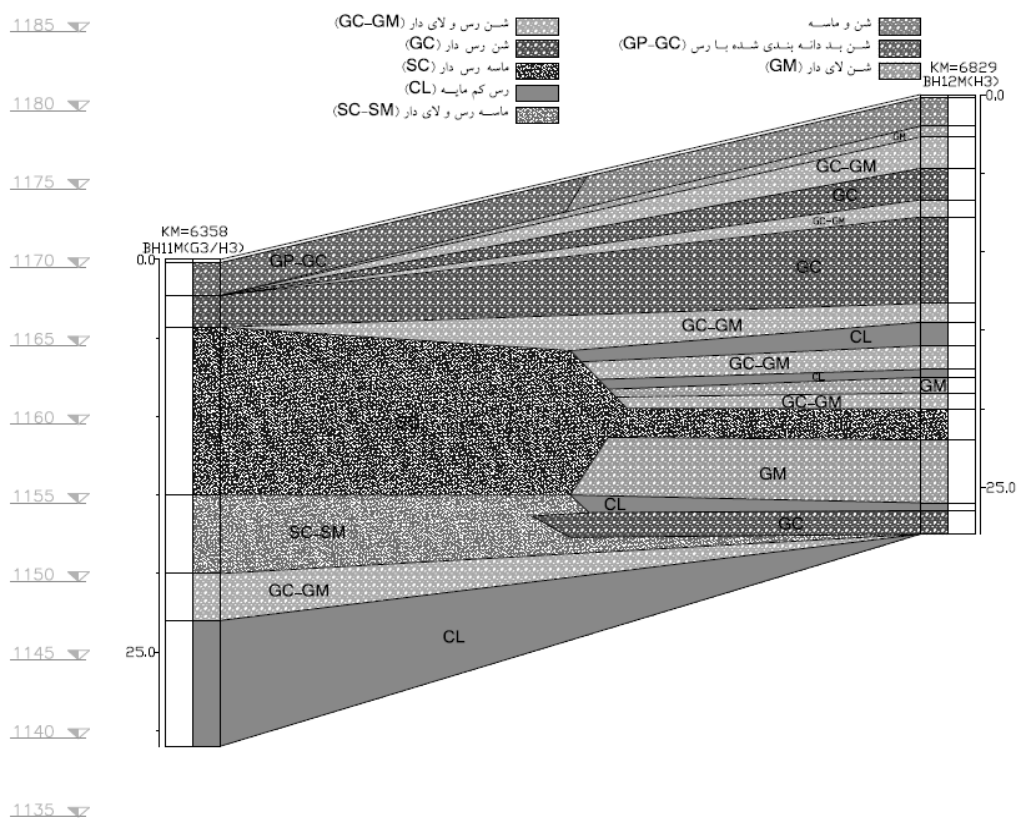
شکل ۴-۱۵. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH8M و BH9M



شکل ۴-۱۶. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH9M و BH10M



شکل ۴-۱۷. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH10M و BH11M



شکل ۴-۱۸. مدل خاک مسیر تونل بین گمانه‌های BH11M و BH12M

۳-۴- شبیه‌سازی با استفاده از تکنیک مونت کارلو

شبیه‌سازی شاخه ای از علم آمار است که برای پاسخ دادن به سوالات مربوط به دنیای واقعی می‌تواند با انجام آزمایش‌هایی مصنوعی که بسیار شبیه شرایط واقعی هستند به ما کمک کند، همچنین شبیه‌سازی می‌تواند در حل مسائل پیچیده نیز موثر باشد.

برای اجرای شبیه‌سازی، آزمایش به دفعات زیاد تکرار و کمیت مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود. به-عنوان مثال برای برآورد احتمال آوردن حداقل یک شش در ریختن ۴ تاس می‌توان آزمایش ریختن ۴ تاس را به دفعات زیاد انجام داد و نسبت تعداد دفعاتی که در آنها حداقل یک بار ۶ بدست آمده را حساب کرد. شبیه‌سازی‌ها در صورتی کلید پاسخ‌های قابل اطمینان هستند که تکرار آزمایش به دفعات زیاد و یا

در مدت زمان طولانی (هرکدام که امکان‌پذیر است) انجام شود. در هر روش شبیه‌سازی از اعداد تصادفی استفاده می‌شود.

روش مونت کارلو یک تکنیک برای تحلیل پدیده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های محاسبه‌گر است که در آن استفاده از اعداد تصادفی ضروری است. این روش توسط استانیسلاو اولام^۱ و جان ون نیومن^۲ برای حل مشکل انتشار نوترون در میانه دهه ۴۰ میلادی اختراع و نامگذاری شد. روش‌های مونت کارلو بطور گسترده‌ای در ریاضیات، علوم، صنعت، تجارت و سرگرمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها در مرکز الگوریتم‌هایی قرار می‌گیرند که از آنها برای پیش‌بینی فرآیندهای اتفاقی در برگزیده اجزا تصادفی استفاده می‌شود. از این فرآیندهای اتفاقی می‌توان به حرکت ذرات میکروسکوپی در محیط، تولید و حرکت بسته‌های اطلاعات در شبکه‌ها، ورود و دریافت خدمات کشتی‌ها در یک بندر پر رفت و آمد و بسیاری از فرایندهای دیگر که در آنها مردم نیاز به دریافت خدمات دارند، اشاره کرد. از اعداد تصادفی بطور مستقیم در انتقال و حفاظت اطلاعات در امواج رادیویی و اینترنت استفاده می‌شود. یک فرستنده یا گیرنده امواج رادیویی می‌تواند فرکانس‌های انتقالی را لحظه به لحظه، در ظاهر تصادفی ولی مرتبط با یکدیگر تغییر دهد. داده‌ها در اینترنت می‌توانند حاوی اطلاعات کارت اعتباری یک خریدار، سهام یا یک تراکنش بانکی باشند که هوشمندانه با استفاده از اعداد تصادفی حفاظت می‌شوند [13].

در این تحقیق پارامترهای مورد نیاز برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی می‌شوند.

¹ Stanislaw Ulam

² John von Neumann

۴-۳-۱- اعداد تصادفی

در گذشته ایجاد اعداد تصادفی با استفاده از روش‌های دستی مانند پرتاب سکه، تاس، بر زدن کارت بازی و چرخش رولت^۱ انجام می‌شد. پس از آن تجهیزات مکانیکی از قبیل دیود صوتی و شمارشگر گایگر به محاسبه‌گرها افزوده شدند. اعتقاد گسترده‌ای بر این بود که تنها ابزارهای مکانیکی و الکترونیکی هستند که توانایی ایجاد دنباله‌های تصادفی بصورت واقعی را دارند. اگرچه هنوز از ابزار مکانیکی در مسابقات بخت آزمایی و قمار استفاده می‌شود، این ابزارها توسط جامعه شبیه سازی کامپیوتری به دلایل زیر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. الف) ابزارهای مکانیکی برای استفاده عمومی بسیار کند بودند، ب) قابلیت تکرار دنباله‌های تصادفی را نداشته و پ) وابستگی^۲ و اریبی^۳ در اعداد ایجاد شده موجود بود. اگرچه بعضی از روش‌های فیزیکی جدید سریع بوده و بیشتر تست‌های آماری برای تصادفی بودن را با موفقیت پشت سر می‌گذارند، عدم توانایی آنها در تکرار، از کاربردی بودن آنها می‌کاهد. امروزه ایجاد اعداد تصادفی با استفاده از الگوریتم‌های ساده قابل اجرا در کامپیوتر انجام می‌شود. این عمل سریع، بدون اشغال فضای زیاد و با قابلیت تکرار دنباله‌های تصادفی به طرز آسانی صورت می‌پذیرد. یک ایجاد کننده اعداد تصادفی مناسب، تمامی ویژگی‌های آماری یک دنباله تصادفی را در بر می‌گیرد حتی اگر دنباله مذکور توسط یک الگوریتم قطعی تولید شده باشد، به همین دلیل این ایجاد کننده‌ها شبه تصادفی^۴ نیز نامیده می‌شوند [14].

¹ یک نوع بازی که در آن توپی به داخل یک صفحه گردان انداخته می‌شود و بازیگران با حدس زدن سوراخی که توپ در آن قرار خواهد گرفت برنده می‌شوند.

² در آمار منظور از وابستگی هرگونه رابطه میان دو متغیر تصادفی یا دو دسته داده است.

³ اریبی تخمین گر یک پارامتر برابر با اختلاف بین امید ریاضی تخمین گر و مقدار حقیقی آن پارامتر است.

⁴ pseudorandom

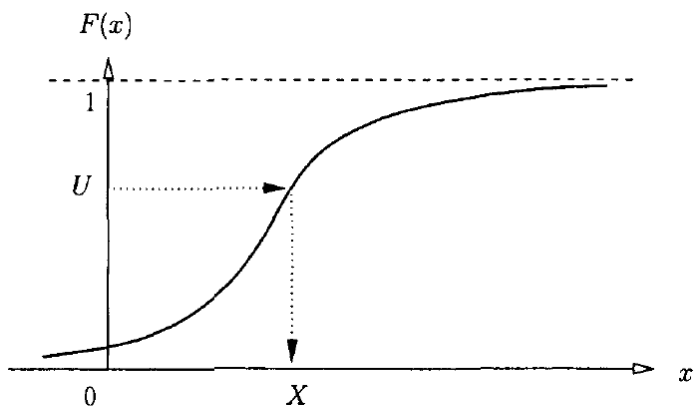
۴-۳-۱-۱- تولید متغیرهای تصادفی

در این بخش روش‌های مختلف معمول برای ایجاد برای متغیرهای تصادفی یک بعدی از یک تابع توزیع تجمعی مشخص، معرفی می‌شوند.

۴-۳-۱-۱- روش تبدیل معکوس^۱

تابع توزیع تجمعی F ، یک تابع غیر نزولی بوده و رابطه بین متغیر تصادفی X و معکوس این تابع اینگونه تعریف می‌شود [14]:

$$X = F^{-1}(U) \quad U \sim U(0,1) \quad (1-4)$$



شکل ۴-۱۹. روش تبدیل معکوس [14]

۴-۳-۱-۲- روش نام مستعار^۲

این روش معادل روش تبدیل معکوس برای تولید متغیرهای تصادفی گسسته است که در آن نیازی به محاسبه معکوس تابع توزیع تجمعی نیست. این روش بر این اصل استوار است که هر توزیع چگالی

¹ Inverse-Transform

² Alias method

احتمال n نقطه‌ای را می‌توان توسط $n-1$ تابع چگالی احتمال هموزن $(q^{(k)}, k=1, \dots, n-1)$ که هر کدام حداکثر دو عضو غیر صفر دارند، نمایش داد. هر تابع چگالی احتمال n نقطه‌ای برای تابع‌های دو نقطه‌ای $q^{(k)}$ را می‌توان بصورت زیر نمایش داد [14].

$$f(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} q^{(k)}(x) \quad (2-4)$$

تولید متغیر تصادفی از رابطه بالا با طی مراحل زیر صورت می‌گیرد.

۱. نسبت دادن مقدار برای احتمال $(U \sim U(0,1))$ و $k=1+[(n-1)U]$

۲. تولید X از توابع دو نقطه‌ای $q^{(k)}$

۴-۳-۱-۱-۳-۴ روش ترکیب^۱

در این روش تابع توزیع تجمعی توسط ترکیبی از توابع توزیع تجمعی $\{G_i\}$ تعریف می‌شود.

$$F(x) = \sum_{i=1}^m p_i G_i(x) \quad p_i > 0, \sum_{i=1}^m p_i = 1 \quad (3-4)$$

با در نظر گرفتن $X_i \sim G_i$ و Y به عنوان یک متغیر تصادفی گسسته مستقل از X_i

متغیر تصادفی X با تابع توزیع تجمعی F از رابطه زیر محاسبه می‌شود [14].

$$X = \sum_{i=1}^m X_i I_{\{Y=i\}} \quad (4-4)$$

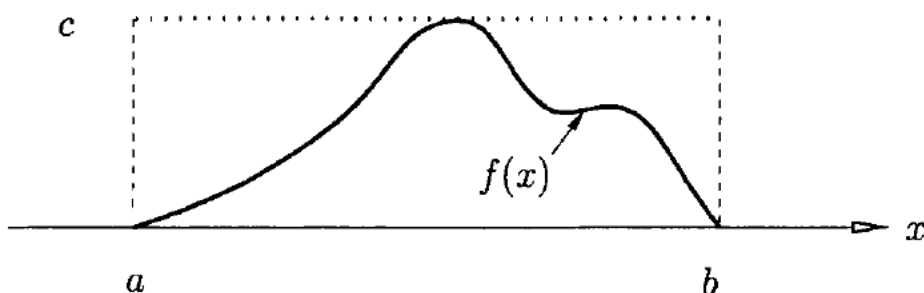
$I_{\{Y=i\}}$ = تابع نشانگر رویداد Y

¹ composition

۴-۳-۱-۱-۴- روش پذیرش و رد کردن^۱

روش‌های تبدیل معکوس و ترکیب بدلیل درگیری مستقیم با تابع توزیع تجمعی که متغیر تصادفی از آن تولید خواهد شد، مستقیم خوانده می‌شوند. از روش پذیرش و رد کردن در شرایطی که دو روش ذکر شده در بالا کاربردی نبوده یا از نظر محاسباتی به صرفه نباشند استفاده می‌شود.

برای تعریف بهتر روش تابع توزیع تجمعی f را در بازه $[a, b]$ در نظر گرفته در حالیکه مقدار آن در خارج از بازه صفر است. تولید متغیر تصادفی $Z \sim f$ با پیروی از مراحل زیر صورت می‌پذیرد.



شکل ۴-۲۰. روش پذیرش و رد کردن [14]

۱. ایجاد $X \sim U(a, b)$

۲. تولید متغیر Y مستقل از X $[Y \sim U(0, c)]$

۳. اگر $Z = X$, $Y \leq f(X)$ در غیر این صورت به مرحله اول برگرد.

هر بردار (X, Y) تولید شده بصورت یکپارچه در مستطیل $[a, b] \times [0, c]$ قرار می‌گیرد. جفت

پذیرفته شده (X, Y) بصورت یکپارچه در زیر منحنی f قرار می‌گیرد.

¹ Acceptance-Rejection

۴-۳-۲- تعیین مقدار کافی تکرار برای روش مونت کارلو

برای تعیین تعداد تکرار در شبیه‌سازی مونت کارلو مراحل زیر باید طی شوند:

۱. یک مقدار دقت مورد نظر باید تعیین شود.
۲. شبیه‌سازی را N بار تکرار کرده و مقدار متوسط داده مورد نظر تعیین می‌شود.
۳. مرحله ۲ آنقدر تکرار می‌شود تا اختلاف دو مقدار متوسط بدست آمده متوالی از مقدار دقت کمتر باشد.

تولید اعداد تصادفی در این تحقیق با استفاده از روش تبدیل معکوس صورت می‌گیرد پس ابتدا

باید تابع توزیع تجمعی مربوط به هر پارامتر تعیین شود [15].

۴-۴- تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای مربوط به محاسبه فشار نگهداری

در نتیجه تست‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های حاصل از گمانه‌های حفاری شده در طول مسیر تونل، مقادیر پارامترهای مختلف از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص خشک و اشباع برای هر نوع خاک بدست آمد. بررسی روش‌های مختلف برآورد فشار نگهداری سینه‌کار در فصول گذشته نشان می‌دهد که پارامترهای فوق در تعیین مقدار فشار نگهداری در بیشتر روش‌ها نقشی تعیین کننده دارند.

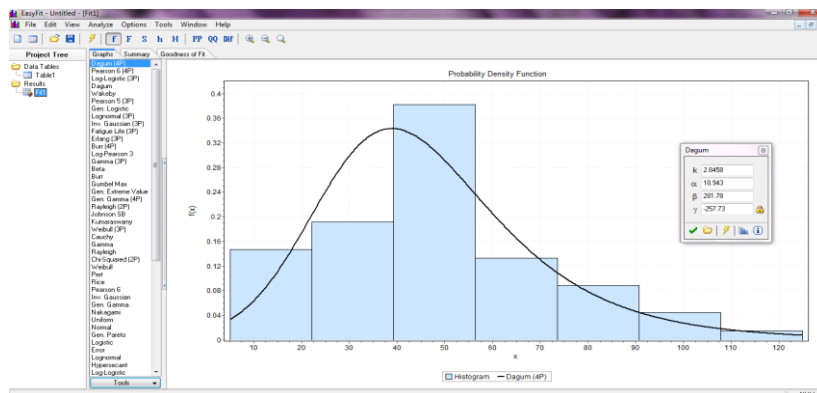
برای شبیه‌سازی این پارامترها، تابع توزیع تجمعی مربوط به هر کدام باید تعیین شود. برای تحقق

این امر از نرم افزار Easyfit 5.5 Professional استفاده شد. این برنامه کاربردی شبیه‌ساز و تحلیل

داده است که مناسب‌ترین توزیع احتمال را بر داده‌های نمونه تطبیق می‌دهد و نتایج تحلیل را برای

تصمیم‌گیری بهتر ارائه می‌دهد. با استفاده از Easyfit مناسب‌ترین تابع توزیع احتمال برای هر پارامتر را

بدست آورده سپس با محاسبه معکوس تابع توزیع تجمعی و اعطای مقادیر تصادفی به F ، داده‌های تصادفی مربوط به هر پارامتر تولید می‌شود. اساس کار با این نرم‌افزار ساده است بطوریکه با وارد کردن داده‌ها و اجرای دستور تطبیق توزیع^۱ بیش از ۳۰ توزیع احتمال مختلف بر داده‌های ورودی تطبیق داده می‌شوند. با ورود به پنجره صلاحیت تطبیق^۲ می‌توان رتبه هر توزیع احتمال را بر اساس تست‌های مختلف مشاهده کرد. در ادامه توزیع احتمال و تابع توزیع تجمعی تطبیق داده شده به پارامترهای مربوط به هر نوع خاک معرفی می‌شود. منحنی تابع توزیع احتمال تطبیق داده شده بر هر پارامتر و داده‌های مربوط به آن در پیوست ۲ ضمیمه شده است.



شکل ۴-۲۱. تطبیق توزیع چگالی احتمال بر داده‌های ورودی در Easyfit

۴-۴-۱- تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه رسی

تعداد ۹۱ داده مربوط به چسبندگی خاک ناحیه رسی در حالت زهکشی نشده از آزمایش برش مستقیم بدست آمده بود. توزیع مقادیر بیشینه تعمیم یافته^۳ بهترین تطبیق را بر این داده‌ها داشت. در روابط ۴-۵ و ۴-۶ تابع توزیع تجمعی و معکوس آن آورده شده‌اند.

¹ fit distribution

² goodness of fit

³ Generalized Extreme Value Distribution

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 + kz\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \quad z \equiv \frac{x-\mu}{\sigma} \quad k \neq 0 \quad (5-4)$$

$$x(F) = \left[\sigma \left(\frac{(-\ln(F))^{-k} - 1}{k} \right) \right] + \mu \quad (6-4)$$

که در آن σ ، k و μ توسط Easyfit تعیین می‌شوند.

$$\sigma = 18.963 \quad k = -0.0121 \quad \mu = 30.96$$

داده‌های زاویه اصطکاک (۸۵ عدد) خاک ناحیه رسی در حالت زهکشی نشده، به بهترین نحو توسط توزیع ویکبای^۱ تطبیق می‌یافتند. این توزیع بشکل تابع معکوس تابع توزیع تجمعی تعریف می‌شود (رابطه ۷-۴).

$$X(F) = \xi + \frac{\alpha}{\beta} (1 - (1 - F)^\beta) - \frac{\gamma}{\delta} (1 - (1 - F)^{-\delta}) \quad (7-4)$$

$$\xi = 6.1166 \quad \alpha = 91.89 \quad \beta = 4.4707 \quad \gamma = 3.2842 \quad \delta = 0.13937$$

توزیع ۴-پارامتری بار^۲ بهترین تطبیق را بر داده‌های مربوط به وزن مخصوص خشک خاک ناحیه رسی داشت. تابع توزیع تجمعی و معکوس آن از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$F(x) = 1 - \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^\alpha \right)^{-k} \quad (8-4)$$

$$x(F) = \left[\beta \left(\left(\frac{1}{1-F} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right)^\alpha \right] + \gamma \quad (9-4)$$

$$\beta = 20.208 \quad k = 2.1303 \quad \alpha = 23.96 \quad \gamma = -2.3112$$

¹ Wakeby

² four-parameter Burr distribution

پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک موثر در نمونه‌های ناحیه رسی را می‌توان با انجام آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده بدست آورد. این آزمایش بر روی ۲۰ نمونه صورت گرفت. توزیع ویکیبای با پارامترهای زیر بهترین تطبیق را بر داده‌های چسبندگی موثر داشت.

$$\xi = -4.6274 \quad \alpha = 42.137 \quad \beta = 0.61274 \quad \gamma = 0 \quad \delta = 0$$

در مورد داده‌های زاویه اصطکاک موثر، توزیع مقادیر بیشینه تعمیم یافته بهترین تطبیق را ارائه می‌دهد.

$$\sigma = 3.6109 \quad k = -0.74303 \quad \mu = 35.299$$

برای بدست آوردن مقدار وزن مخصوص اشباع از وزن مخصوص خشک باید مقدار پوکی را بدست آوریم (رابطه ۴-۱۰). مقدار پارامتر پوکی به شرط دانستن مقدار چگالی دانه‌های جامد خاک از رابطه ۴-۱۱ محاسبه می‌شود. چگالی دانه‌های جامد خاک هر ناحیه در جدول ۴-۱ آورده شده است. مقادیر موجود در این جدول با استفاده از میانگین گیری بدست آمده‌اند.

$$\gamma_{sat} = \gamma_d + \left(\frac{e}{1+e} \right) \gamma_w \quad (10-4)$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \quad (11-4)$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (12-4)$$

G_s = چگالی دانه‌های جامد

e = پوکی

γ' = وزن مخصوص غوطه‌وری

جدول ۴-۱. مقادیر چگالی دانه‌های جامد خاک (G_s) در نواحی سه‌گانه

G_s	ناحیه
۲/۷	رسی
۲/۶۵	ماسه‌ای
۲/۶	شنی

۴-۲-۴- تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه ماسه‌ای

داده‌های پارامتر چسبندگی در این ناحیه به بهترین نحو با توزیع کمینه گامبل^۱ تطبیق داده می‌شوند. تابع توزیع تجمعی و معکوس آن در قالب روابط ۴-۱۳ و ۴-۱۴ آورده شده‌اند.

$$F(x) = 1 - \exp(-\exp(z)) \quad z \equiv \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (۴-۱۳)$$

$$x(F) = \left[\sigma \left(\ln(-\ln(1 - F)) \right) \right] + \mu \quad (۴-۱۴)$$

$$\sigma = 18.21 \quad \mu = 48.599$$

داده‌های مربوط به زاویه اصطکاک داخلی توسط توزیع ویکبای با پارامترهای زیر تطبیق داده شدند.

$$\xi = 19.49 \quad \alpha = 68.726 \quad \beta = 4.9689 \quad \gamma = 2.0724 \quad \delta = 0.17932$$

در آزمایش برش مستقیم استاندارد (ASTM D1586) نمونه در یک جعبه برش قرار می‌گیرد که در بالا و پایین آن سنگ‌های متخلخل قرار دارند که به نمونه امکان زهکشی شدن می‌دهند. از آنجایی که ضریب نفوذ پذیری خاک‌های ناحیه رسی پایین بوده، اجازه زهکشی و زایل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی به وجود آمده به نمونه داده نمی‌شود. برای تحقق این امر باید بارگذاری با سرعت بسیار آهسته اعمال شود. روش سریع‌تر برای بدست آوردن پارامترهای موثر، انجام آزمایش سه محوری بر روی نمونه‌ها است. ضریب نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و شنی بالا بوده و فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در اثر بارگذاری (قائم

¹ Gumble min distribution

و برشی) به سرعت زایل می‌شود بنابراین مقادیر بدست آمده برای پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه‌های شنی و ماسه‌ای در آزمایش برش مستقیم به مقادیر موثر آنها نزدیک است [6]. در این تحقیق مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک موثر در خاک‌های ماسه‌ای و شنی برابر با نتایج آزمایش برش مستقیم در نظر گرفته شده‌اند.

داده‌های وزن مخصوص خشک خاک ماسه‌ای با توزیع ۳-پارامتری بار تطبیق داده شدند. تنها تفاوت در رابطه تابع توزیع تجمعی این توزیع و نوع ۴-پارامتری، مقدار پارامتر مکان پیوسته (γ) است که در نوع ۳-پارامتری برابر با صفر قرار داده می‌شود.

$$\beta = 17.702 \quad k = 0.2838 \quad \alpha = 97.552 \quad \gamma = 0$$

۳-۴-۴- تعیین تابع توزیع تجمعی پارامترهای خاک ناحیه شنی

توزیع مقادیر بیشینه تعمیم یافته بهترین تطبیق را بر داده‌های نیروی چسبندگی در این ناحیه داشت.

$$\sigma = 22.472 \quad k = -0.05545 \quad \mu = 33.017$$

در مورد زاویه اصطکاک و وزن مخصوص خشک نیز توزیع فوق بهترین تطبیق را ارائه می‌دهد.

$$\sigma = 6.3733 \quad k = -0.27708 \quad \mu = 33.08$$

پارامترهای این توزیع برای داده‌های وزن مخصوص خشک در زیر آمده است.

$$\sigma = 0.64666 \quad k = -0.54988 \quad \mu = 18.349$$

۴-۵- برآورد فشار نگهداری با استفاده از برنامه‌های نوشته شده در MATLAB

در فصل‌های گذشته روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و آزمایشگاهی محاسبه فشار نگهداری سینه‌کار مورد بررسی قرار گرفتند. بعضی از این روش‌ها برای شرایط خاص طراحی شده بودند (روش برومز و بنرمارک برای خاک غیر اصطکاکی و روش آناگنوستو و کواری برای شرایطی که تاج تونل زیر تراز آب زیرزمینی قرار دارد مناسب است). در تمامی روش‌ها به جز روش بروئر خاک همگن در نظر گرفته می‌شود در حالی که خلاف این امر در عمل بسیار محتمل است. با تامل در مدل ژئوتکنیکی مسیر مشخص می‌شود که روش بروئر مناسبترین روش برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار است. داده‌های تصادفی تولید شده در قالب روابط بروئر قرار گرفته تا فشار نگهداری برای هر دسته داده تصادفی محاسبه شود. فشار نگهداری با استفاده از روش تجربی COB نیز برآورد می‌شود. فرآیند تولید داده‌های تصادفی و محاسبه فشار نگهداری با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود.

نرم‌افزار MATLAB برای کسانی که با محاسبات عددی و بویژه جبر خطی سر و کار دارند، تهیه شده است. نام این نرم‌افزار از عبارت انگلیسی MATrix LABoratory اقتباس شده و هدف اولیه آن قادر ساختن مهندسين و دانشمندان به حل مسائل شامل عملیات ماتریسی بدون نیاز به نوشتن برنامه در زبان‌های برنامه‌نویسی متداول همچون C و FORTRAN بود. با گذشت زمان قابلیت‌های بسیار بیشتری به این نرم‌افزار افزوده شده‌اند بطوری که در حال حاضر به ابزار پر قدرتی برای ترسیم داده‌ها، برنامه‌نویسی و انجام محاسبات مهندسی و پژوهشی تبدیل شده است. برنامه‌های محاسباتی زیادی در این نرم‌افزار موجود است اگرچه برنامه نویسی در این نرم‌افزار نیز به آسانی امکان پذیر است. نام این نرم‌افزار نشان دهنده رویکرد ماتریس محور آن است که در حقیقت تمام داده‌ها در آن به شکل ماتریس ذخیره می‌شوند.

در ادامه در مورد برنامه‌هایی که باید در MATLAB اجرا شوند توضیح داده خواهد شد. یکی از قابلیت‌های این نرم‌افزار تولید اعداد تصادفی است. همانطور که در بخش ۴-۴ توضیح داده شد، تولید داده‌های تصادفی با اعطای مقادیر تصادفی به F (در روابط بخش ۴-۴) در معکوس تابع توزیع تجمعی انجام می‌شود. این عمل با تولید اعداد تصادفی در بازه $(0, 1)$ ، در قالب ماتریس‌های مربعی و استفاده از آنها در توابع معکوس مذکور صورت می‌گیرد. با 5041 بار تکرار مقدار دقت 0.05 برای شبیه‌سازی بدست می‌آید. برای تولید داده‌های تصادفی برنامه پارامترها (parameters) در ابتدای تمام روش‌ها باید اجرا شود. توضیحات در مورد نامگذاری پارامترها در متن برنامه‌ها گنجانده شده است. متن تمام برنامه‌ها در پیوست ۳ ضمیمه شده است.

۴-۵-۱- فشار نگهداری در برابر ریزش

۴-۵-۱-۱- روش بروئر

در روش بروئر علاوه بر برنامه پارامترها دو برنامه دیگر به نام‌های اصلی^۱ و بروئر باید اجرا شوند. اطلاعات مورد نیاز این دو برنامه در قالب سوالاتی از کاربر دریافت می‌شوند. نکاتی که در هنگام اجرای این دو برنامه باید مدنظر قرار گیرند در ادامه آمده است:

- در برنامه اصلی منظور از فشار اضافی^۲، بار سطحی بوده که نحوه محاسبه آن در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.
- برنامه بروئر برای محاسبات حداکثر ۴ لایه خاک در گوه طراحی شده است در حالتی که با تغییرات جزئی می‌توان از آن برای انجام محاسبات بیش از ۴ لایه نیز استفاده کرد.

¹ main

² surcharge pressure

- در صورتی که عمق تراز آب زیرزمینی بیشتر از عمق محور تونل باشد، مقدار آن در برنامه باید ۱- وارد شود.
- در وارد کردن نوع لایه‌های خاک، باید از معادل انگلیسی نام هر ناحیه استفاده کرد (رس=clay، ماسه=sand و شن=gravel). در صورتی که یک لایه زیر سطح ایستابی قرار دارد در واژه مربوط به نوع آن لایه، باید یک s به انتهای نام آن اضافه کرد (sands, clays و gravels).
- حفاری در این تحقیق با استفاده از دستگاه متعادل کننده فشار زمین انجام می‌شود پس سیال نگهداری از مواد کنده شده و عناصر بهسازی خاک تشکیل می‌شود. بنابراین در رابطه ۲-۳۶، مقدار وزن مخصوص موثر سیال نگهداری با میانگین‌گیری از وزن مخصوص اشباع لایه‌های خاک موجود در گوه محاسبه (فرض) می‌شود.
- برای سرعت بخشیدن به محاسبات، انتگرال‌های موجود در روابط گسسته‌سازی شده و مقدار آنها در هر لایه جداگانه محاسبه می‌شود.
- خروجی‌های برنامه اصلی، تنش عمودی موثر در تاج تونل در حالت خطی و با در نظر گرفتن قوسی شدن خاک هستند که به ترتیب با نام‌های SigmaL و sigmak نمایش داده می‌شوند.
- در پایان اجرای برنامه بروئر، پارامترهای فشار موثر و فشار کل نگهداری و فشار آب در محور تونل به ترتیب با نام‌های facepe، facepressure و pw، به عنوان خروجی برنامه ایجاد می‌شوند.

۴-۵-۱-۱-۱- محاسبه بار سطحی

قسمت اعظم مسیر تونل زیر خیابان ولیعصر قرار دارد به جز قسمت‌های اولیه آن که تونل از زیر خط راه- آهن و ساختمان مربوط به آن واقع در میدان راه‌آهن، عبور می‌کند. بنابراین مقدار بار سطحی برای خیابان و خط آهن مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

برآورد مقدار بار سطحی خیابان بر اساس دستور العمل ارائه شده توسط آشتو^۱ برای محاسبه بار زنده وارده بر پل، انجام شده است. در این دستور العمل مقدار عرض هر خط^۲، سه متر در نظر گرفته شده است. سه نوع بار زنده برای طراحی در نظر گرفته شده است [16].

- کامیون طراحی^۳: با نام HS-20 وزنی برابر با ۳۲۵ کیلونیوتن داشته و فاصله بین محور جلویی تا محور میانی آن ۴/۳ متر است. فاصله بین محور میانی و محور عقبی بین ۴/۳ تا ۹ متر است. فاصله عرضی بین دو محور آن نیز ۱/۸ متر است.

- بار جفتی^۴: مقدار این بار ۱۱۰ کیلونیوتن به ازای هر محور است. فاصله طولی و عرضی این دو محور به ترتیب ۱/۲ و ۱/۸ متر است.

- بارگذاری یکپارچه^۵: مقدار این بار گسترده ۹/۳ کیلونیوتن بر متر برای عرض هر خط است (برای یک خط با عرض سه متر، مقدار این بار ۳/۱ کیلونیوتن بر متر مربع است).

سه روش برای تجمیع این سه نوع بار زنده پیشنهاد شده است. بیشترین بار حاصل از هر کدام از این روش‌ها برای طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد [16].

۱. بار یک کامیون طراحی + بار یکپارچه

۲. یک بار جفتی + بار یکپارچه

۳. نود درصد بار دو کامیون طراحی (فاصله محور جلویی و عقبی دو کامیون از یکدیگر = ۱۵ متر) +

نود درصد بار یکپارچه

¹ AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

² lane

³ design truck

⁴ tandem

⁵ uniform loads

فاکتور اضافی دینامیکی^۱ که باید در محاسبه بار جفتی و کامیون طراحی مورد استفاده قرار گیرد برای سازه‌های زیر سطحی صفر در نظر گرفته می‌شود. بیشترین بار از ترکیب دوم حاصل شده و مقدار آن ۶۴/۱ کیلونیوتن بر متر مربع برآورد شده است.

بر اساس بارگذاری استاندارد در نشریه شماره ۲۷۹ مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه‌آهن، مقدار بار سطحی برای تونلی که زیر مسیر خط آهن حفر می‌شود برابر با ۱۵۶ کیلونیوتن بر متر مربع است [17].

۴-۵-۱-۲- روش COB

در این روش برای محاسبه تنش عمودی موثر در تاج تونل از روش ترزاقی استفاده می‌شود که در آن تاثیر قوسی شدن خاک مدنظر قرار می‌گیرد. پارامتر ضریب جانبی فشار زمین رانکین در حالت محرک از رابطه ۶۵-۲ محاسبه می‌شود که در آن برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی از میانگین‌گیری (معادل‌سازی) استفاده می‌شود. در اجرای این برنامه نکات زیر باید در نظر گرفته شوند.

- در صورتی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تاج تونل واقع شده باشد، عددی منفی را باید برای آن وارد کرد.
- نامگذاری لایه‌های خاک باید مانند روش‌های اصلی و بروئر صورت گیرد.
- محاسبات در این برنامه برای حداکثر ۹ لایه خاک روباره امکان‌پذیر است.
- پارامترهای خروجی عبارتند از k_{active} , pw , $facepecob$ و $facepressurecob$ که به ترتیب معرف ضریب فشار جانبی زمین در حالت محرک (رانکین)، فشار آب در عمق تاج تونل، فشار نگهداری موثر و فشار نگهداری کل هستند.

¹ dynamic allowance factor

۴-۵-۲- فشار نگهداری برای بالازدگی

در روش‌های مربوط به محاسبه فشار نگهداری در برابر بالازدگی بعد از برنامه پارامترها، برنامه mainb باید اجرا شود. در این برنامه فشار موثر عمودی در تاج تونل بر اساس رابطه (۲-۴۶) ارائه شده توسط ترازقی محاسبه می‌شود و بار سطحی صفر در نظر گرفته شده زیرا هدف برآورد کمترین میزان فشار نگهداری است که به ازای آن بالازدگی رخ می‌دهد.

۴-۵-۲-۱- روش بالتائوس

روابط مربوط به این روش در برنامه‌ای با نام blowoutb گنجانده شده و حین اجرای آن باید به نکات زیر توجه کرد:

- در صورتی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تاج تونل واقع شده باشد، عددی منفی را باید برای آن وارد کرد.
- نامگذاری لایه‌های خاک در این برنامه نیز همانند برنامه‌های اصلی و بروئر است.
- خروجی‌های این برنامه، facepressurebe، facepressureb و pw نام دارند که به ترتیب معرف فشار موثر و کل نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی و فشار آب در تاج تونل هستند.

۴-۵-۲-۲- روش پیشنهادی بر اساس روش تجربی COB

با توجه به اینکه روش‌های محدودی برای برآورد فشار نگهداری در برابر بالازدگی ارائه شده بود، سعی بر آن بود تا از روشی جدید برای این منظور استفاده شود. این روش مشابه روش ارائه شده توسط مرکز زیرزمینی بوون برای محاسبه فشار ریزش سینه‌کار تونل است با این تفاوت که در آن از ضریب فشار جانبی زمین در حالت مقاوم استفاده می‌شود (رابطه ۴-۱۵).

$$\sigma_{Tmax} = K_p \sigma'_v + P_w + 20 \text{ kPa} \quad (15-4)$$

مقدار پارامتر k_p از رابطه ۲-۶۴ محاسبه می‌شود. در ادامه با مقایسه نتایج این روش با نتایج روش‌های دیگر، میزان صحت نتایج این روش مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

- شرایط وارد کردن اطلاعات ورودی تراز آب زیرزمینی و نامگذاری لایه‌های خاک مانند روش‌های قبلی است.
- پارامترهای خروجی pw ، $facepecobb$ و $facepressurecobb$ نام دارند که به ترتیب نماینده فشار آب، فشار موثر و کل نگهداری در تاج تونل هستند.

۴-۵-۳- فاکتور ایمنی

ارزیابی هر چهار روش در مقاطع مورد مطالعه با استفاده از فاکتور ایمنی انجام می‌شود. یک مقدار ثابت برای فاکتور ایمنی در نظر گرفته شده سپس با اعمال مقادیر فشار نگهداری پیشنهادی می‌توان احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی حاصل از نتایج را نسبت به فاکتور ایمنی اولیه محاسبه کرد. در تعیین مقدار طراحی فشار نگهداری سینه‌کار با استفاده از روش‌های تحلیلی، از رویکردهای متفاوتی برای تعیین فاکتور ایمنی چه بر اساس پارامترهای مقاومت برشی یا فشار محاسبه شده، استفاده می‌شود. عناصر اساسی این رویکردها در ادامه آورده شده است [1].

- از فاکتور ایمنی برای کاهش میزان تغییرات پارامترهای مقاومت برشی استفاده می‌شود (رابطه ۴-۱۶). این رویکرد توسط آناگنوستو و کواری مورد استفاده قرار گرفته است [1].

$$\tau = \frac{c}{FS} + \sigma \tan\left(\frac{\phi}{FS}\right) \quad (16-4)$$

- رویکرد دیگر، روش کاهش مقاومت^۱ است. در این رویکرد فاکتور ایمنی، نسبت پارامترهای طبیعی خاک در معیار موهر-کولمب به مقادیر بحرانی آنهاست که در آن شرایط تعادل حدی برقرار می‌شود. این روش توسط کارانزا تورس مورد استفاده قرار گرفته است (رابطه ۲-۴۹) [1].
- ینسز و استینر برای مدل پوسته کامل^۲، استفاده از فاکتورهای ایمنی موضعی را پیشنهاد کردند. این فاکتورها ضرایب فشار نگهداری موثر و فشار آب هستند (به ترتیب η_E و η_W) [1]. فاکتور ایمنی کل از رابطه ۴-۱۷ بدست می‌آید [3]. در جدول ۴-۲ برخی از مقادیر پیشنهادی برای فاکتورهای ایمنی موضعی آورده شده است.

$$FS = \frac{S}{\eta_E E + \eta_W W} \quad (17-4)$$

$S =$ فشار نگهداری اعمالی

$E =$ فشار موثر نگهداری (محاسبه شده)

$W =$ فشار آب

جدول ۴-۲. مقادیر پیشنهادی فاکتور ایمنی موضعی برای مدل پوسته کامل [1]

η_W	η_E	مرجع
۱	۱/۳-۱/۱	بالتانوس (۱۹۸۸)
۱/۰۵	$\geq 1/5 - 1/75$	ینسز (۱۹۹۷) *
۱/۰۵	۱/۵	طراحی تونل همنورد ۲
۱/۰۵	۱/۷	طراحی تونل بوتلک

* فاکتور ایمنی $\eta_B = 1/1$ نیز برای بالا زدگی پیشنهاد شده است.

¹ Strength-Reduction Method

² full-membrane model

در ادامه برای ریزش از مقادیر پیشنهادی بالتائوس و برای بالازدگی از مقدار پیشنهادی ینسز استفاده خواهد شد. برای انجام ارزیابی نتایج هر روش باید از برنامه مخصوص همان روش استفاده کرد. نام هر روش در عنوان برنامه مربوط به آن گنجانده شده است (FSBalthaus، FSCOB، FSbroere) و FSNewMethod به ترتیب برای ارزیابی نتایج روش‌های بروئر، COB، بالتائوس و روش جدید باید اجرا شوند). اساس کار در این برنامه‌ها بدین گونه است که تعداد دفعات ارزیابی پارامترهای خروجی هر روش در ابتدا از کاربر پرسیده می‌شود. پس از مشخص شدن تعداد دفعات ارزیابی، مقدار فشار نگهداری پیشنهادی در هر دفعه از کاربر پرسیده شده و میزان احتمال (POF) کمتر بودن فاکتور ایمنی کل از مقداری مشخص به آن تخصیص داده می‌شود. مقدار این فاکتور ایمنی مرجع (x) نیز در ابتدای هر برنامه از کاربر پرسیده می‌شود.

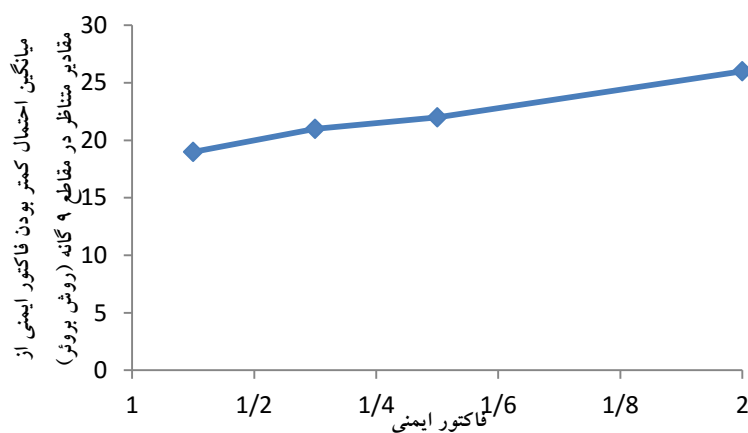
۴-۵-۴- مقاطع مورد مطالعه

به منظور صحت سنجی روش‌های مورد مطالعه، ۹ مقطع در طول مسیر مورد بررسی قرار گرفت. مکان مقاطع در پیوست ۱ نشان داده شده‌است. محاسبات ۴ روش مذکور برای این مقاطع انجام شده و نتایج آنها با استفاده از فاکتور ایمنی مورد تحلیل قرار گرفته و با داده‌های واقعی مقایسه شده است.

در انتخاب مقدار فاکتور ایمنی مرجع و احتمال مربوط به آن دو شرط زیر باید همزمان مدنظر قرار گیرند تا از ایمنی و صحت نتایج اطمینان حاصل شود.

- احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از مقدار مرجع باید تا حد امکان کم باشد.
- فاکتور ایمنی مرجع باید متضمن نتایج ایمن باشد.

برای حصول این شرایط، احتمال مقادیر مختلف فاکتور ایمنی به ازای فشار واقعی نگهداری در هر مقطع در طول مسیر محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای روش بروئر احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از مقادیر ۱/۱، ۱/۳، ۱/۵ و ۲ به ازای فشار نگهداری واقعی در مقاطع ۹ گانه محاسبه شده که خلاصه نتایج در شکل ۴-۲۲ آورده شده‌است. میانگین احتمال متناظر با فشار واقعی برای مقادیر فاکتور ایمنی مذکور به ترتیب ۱۹، ۲۱، ۲۲ و ۲۶ درصد است.



شکل ۴-۲۲. میانگین احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از مقادیر متناظر به ازای فشار نگهداری واقعی در مقاطع طبق روش بروئر

مقادیر احتمال بدست آمده تا حدودی بالا هستند. بدیهی است که در نظر گرفتن مقادیر احتمال کمتر، فشار نگهداری ایمن‌تری را در بر خواهد داشت. در نظر گرفتن مقادیر فاکتور ایمنی بزرگتر از ۱/۱ در روش COB، احتمال زیادی را برای فشارهای نگهداری کم به همراه داشت.

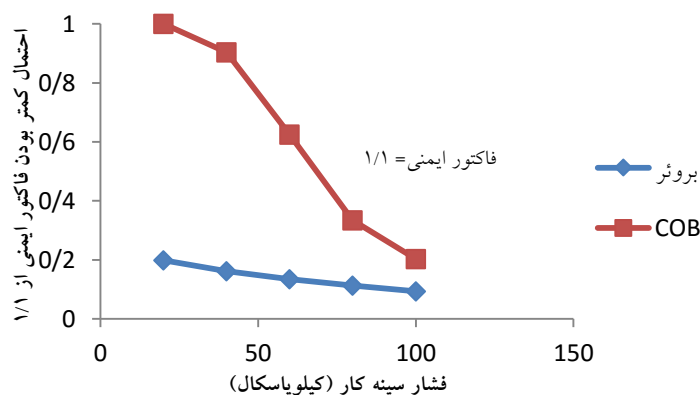
۴-۵-۴-۱- مقطع ۱

مشخصات این مقطع در جدول ۴-۳ آورده شده‌است. لازم بذکر است که در جداول مربوط به مشخصات مقطع، بازه لایه‌بندی خاک، از سطح زمین تا کف تونل مدنظر قرار گرفته است.

جدول ۴-۳. مشخصات مقطع ۱

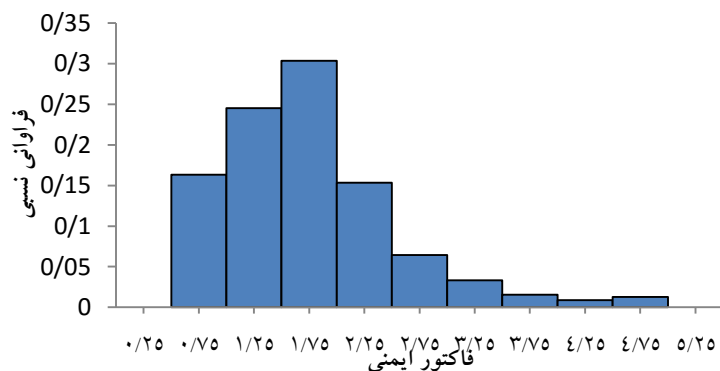
کیلومتر از	ضخامت (متر)	نوع خاک
۱۴۵۰		
عمق روباره (متر)	۶/۵۸	رس
عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)	۲/۹۸	ماسه
شیب تونل (%)	۷/۹۲	رس
بار سطحی (کیلوپاسکال)	۱/۵۹	شن
قطر تونل (متر)	۳/۲۳	رس

همانطور که در فصل دوم به آن اشاره شد، مقادیر بدست آمده فشار نگهداری سینه کار با استفاده از روش بروئر (مدل ۲) از ایمنی بالایی برخوردار بوده و حتی می توان از در نظر گرفتن فاکتور ایمنی برای آن اجتناب نمود. در نتیجه، مقدار ۱/۱ به عنوان فاکتور ایمنی روش بروئر انتخاب شده (حصول احتمال کمتر برای فاکتور ایمنی) و برای تمام مقاطع مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از مدل ۱ بدلیل چسبندگی بالای خاک منطقه مورد مطالعه امکان پذیر نبود (برای تنش عمودی موثر در تاج تونل مقادیر منفی بدست می آمد) در حالیکه در تمامی مناطقی که بروئر در آنها این مدل را تحت آزمایش قرار داده بود، چسبندگی بیشینه خاک تنها ۵ کیلوپاسکال بود. در روش COB نیز مقدار ۱/۱ برای فاکتور ایمنی در تمام مقاطع انتخاب شد. در نمودار شکل ۴-۲۳ می توان نتایج این دو روش را مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد.



شکل ۴-۲۳. فشار نگهداری سینه کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱

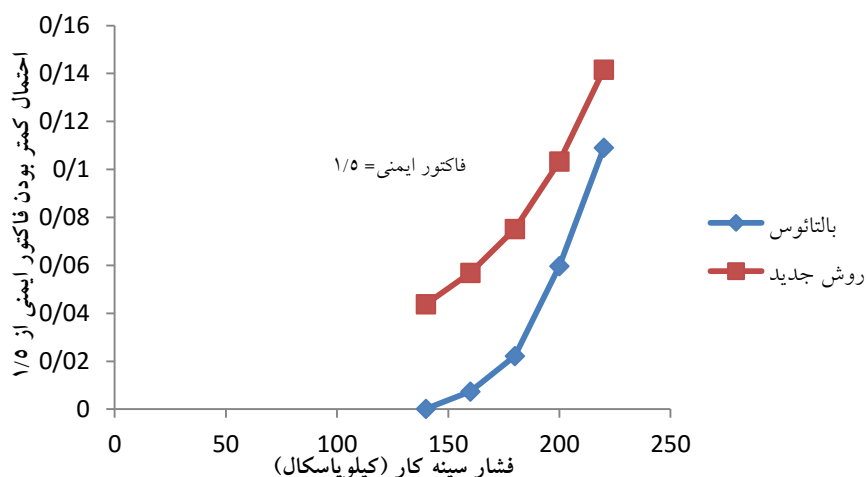
مقدار واقعی فشار نگهداری سینه‌کار در این مقطع ۴۷ کیلوپاسکال است. با اعمال همین مقدار فشار در روابط بروئر احتمال اینکه فاکتور ایمنی از ۱/۱ کمتر باشد، ۱۵ درصد است. در فرآیند شبیه‌سازی بخشی از مقادیر تولید شده فشار موثر نگهداری با استفاده از روابط بروئر کوچکتر از صفر بودند (عدم ریزش در سینه‌کار - دلیل کم بودن شیب نمودار این روش). در نتیجه به منظور نتیجه‌گیری مناسب، از فشار کل نگهداری برای محاسبه فاکتور ایمنی استفاده شده که در صورت منفی بودن آن مقدار ۱ برای آن منظور شده و بجای استفاده از رابطه ۴-۱۷، فاکتور ایمنی از نسبت فشار نگهداری پیشنهادی به فشار کل نگهداری محاسبه می‌شود. با اعمال فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال در روش COB، احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از مقدار مذکور ۲۰ درصد است. نمودار فراوانی نسبی فاکتور ایمنی در روش COB برای فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده که در آن مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی به ترتیب ۰/۵۶۱، ۴/۵۵ و ۱/۷۴ بوده و نشانگر اینست که ۱۶ درصد از مقادیر فاکتور ایمنی کمتر از ۱ هستند. توزیع احتمال فاکتور ایمنی برای روش بروئر بدلیل ایجاد اصلاحات در مقادیر فشار نگهداری و در نتیجه تغییر مقادیر فاکتور ایمنی، آورده نشده است.



شکل ۴-۲۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB

برای اعتبار سنجی محاسبات مربوط به بالازدگی، داده واقعی موجود نبوده و مقایسه نتایج روش-های مختلف تنها روش موجود برای ارزیابی است. برای این منظور نتایج روش‌های حاصل از شبیه‌سازی با نتایج روش عددی (نرم‌افزار PLAXIS^{3D} Tunnel) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. محاسبه فشار نگهداری با استفاده از روش عددی در فصل ۵ مورد بررسی قرار گرفته است. در مقایسه نتایج روش بالتائوس و روش عددی، دو مقدار ۱/۵ و ۲ برای فاکتور ایمنی در این روش در نظر گرفته شد. با عدم تطابق بین نتایج روش جدید با روش‌های بالتائوس و عددی، اعمال تغییر در رابطه ۴-۱۵ الزامی می‌نمود. با تغییر رابطه مذکور به رابطه ۴-۱۸ و استفاده از دو فاکتور ایمنی ۱/۵ و ۲، تطابق بیشتری بین نتایج این روش و روش-های دیگر ایجاد شد.

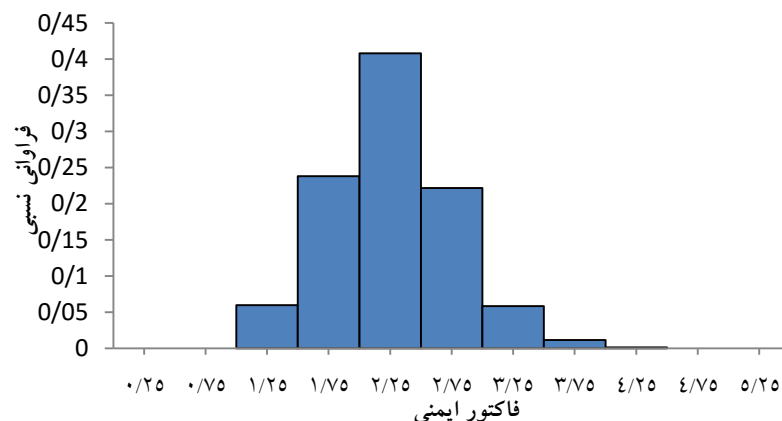
$$\sigma_{Tmax} = K_p \sigma'_v + P_w + 170 \text{ kPa} \quad (۱۸-۴)$$



شکل ۴-۲۵. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱

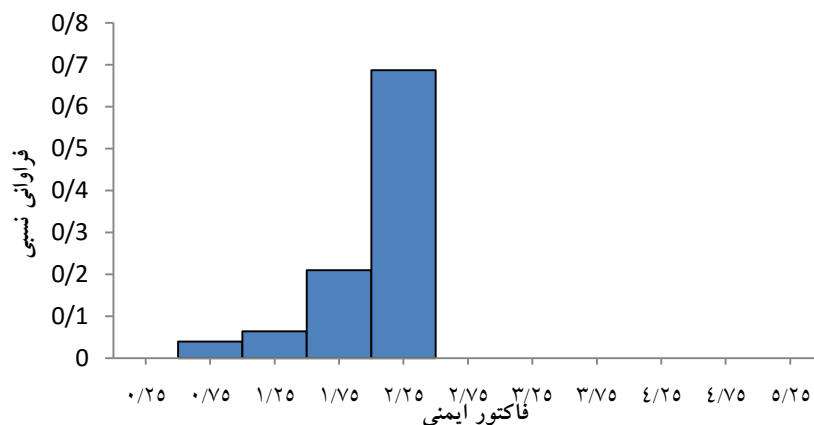
طبق رابطه بالتائوس با اعمال فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال، احتمال اینکه فاکتور ایمنی در برابر بالازدگی کمتر از ۱/۵ باشد، ۶ درصد است. این احتمال در شرایط مشابه با استفاده از رابطه روش

جدید ۱۰ درصد خواهد بود. این نتایج تطابق مناسبی با نتایج روش عددی (۱۸۹ کیلوپاسکال با فاکتور ایمنی ۲) دارند.



شکل ۴-۲۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس

توزیع احتمال فاکتور ایمنی با مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین ۱/۰۴، ۴/۴ و ۲/۲۶ در روش بالتائوس برای فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۴-۲۶ آورده شده است. فاکتور ایمنی در روش جدید برای همین مقدار فشار نگهداری دارای مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین ۰/۹۴، ۲/۲۸ و ۲/۰۱ است (شکل ۴-۲۷).



شکل ۴-۲۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۱ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش جدید

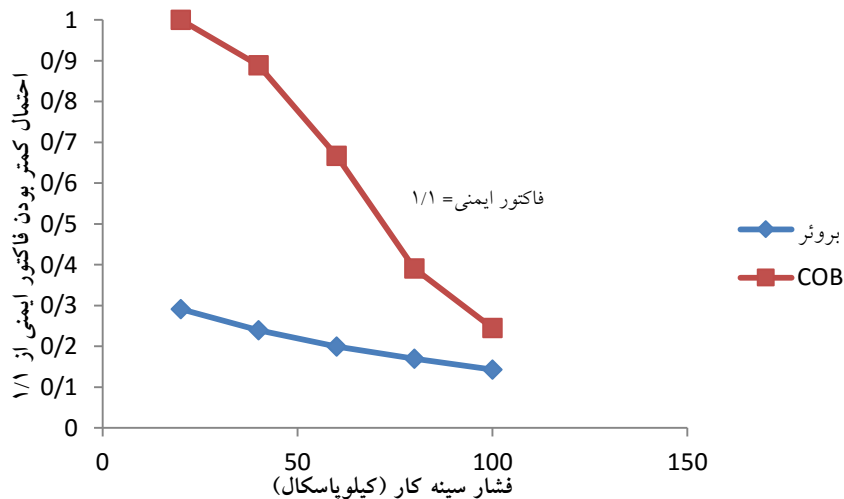
۴-۵-۴-۲- مقطع ۲

تونل در این مقطع زیر خیابان فریدون نوری حفر شده است. مشخصات این مقطع در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴. مشخصات مقطع ۲

کیلومتر از	ضخامت (متر)	نوع خاک
۱۸۵۰	۲۱/۱	رس
۱۵ عمق روباره (متر)	۲/۹	ماسه
۱۸/۳ عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)		
۰/۲ شیب تونل (%)		
۶۴ بار سطحی (کیلوپاسکال)		
۹ قطر تونل (متر)		

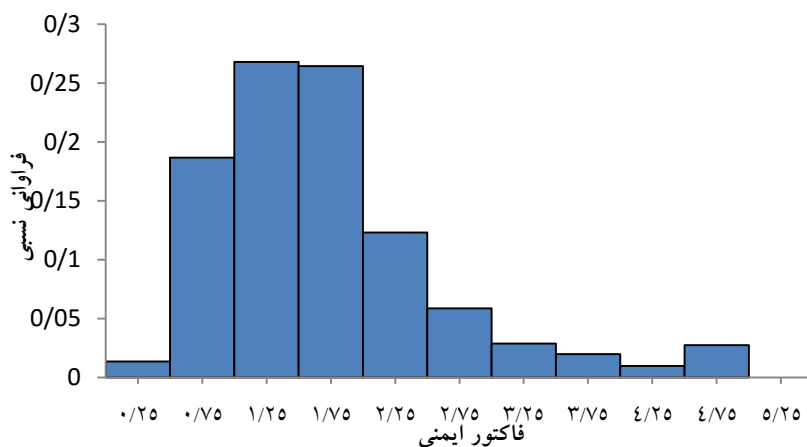
با اعمال فشار ۹۲ کیلوپاسکال، احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از ۱/۱ در روش بروئر ۱۵ درصد است. با فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال هم در روش COB، این احتمال برای فاکتور ایمنی ۲۵ درصد است (شکل ۴-۲۸). مقدار فشار واقعی نگهداری در این مقطع ۶۹ کیلوپاسکال است.



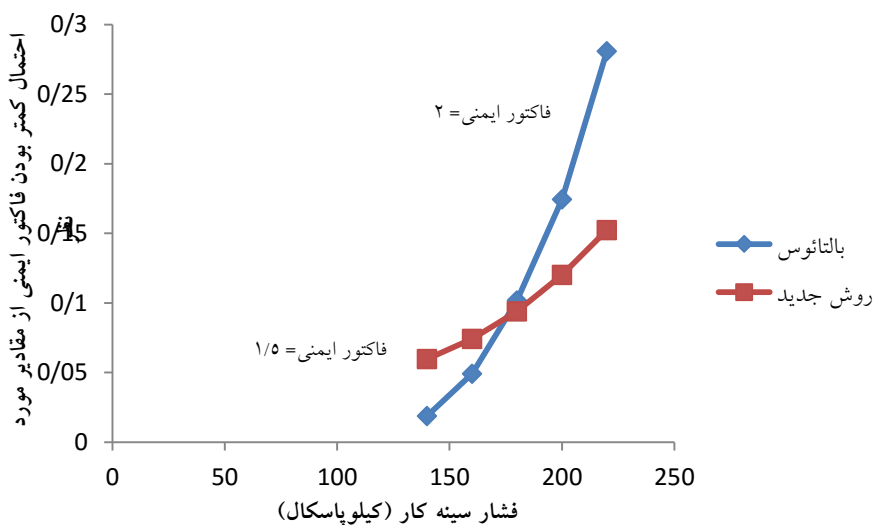
شکل ۴-۲۸. فشار نگهداری سینه کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲

مقادیر متناظر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی برای فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال در

روش COB به ترتیب ۰/۴۷، ۴/۵۵ و ۱/۷۱ است (شکل ۴-۲۹).



شکل ۴-۲۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB

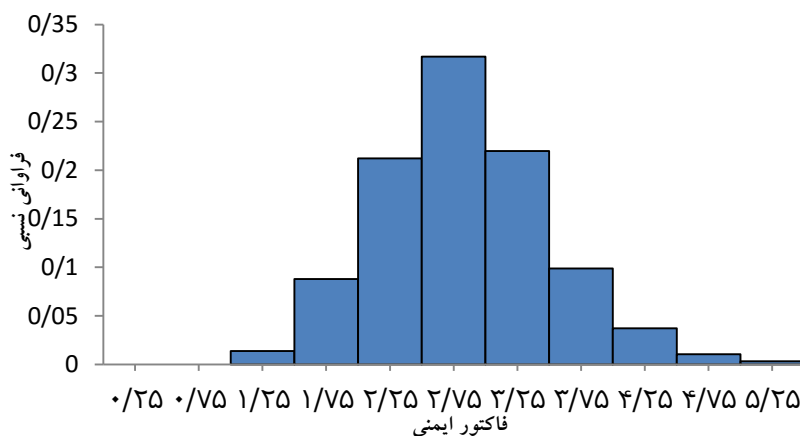


شکل ۴-۳۰. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲

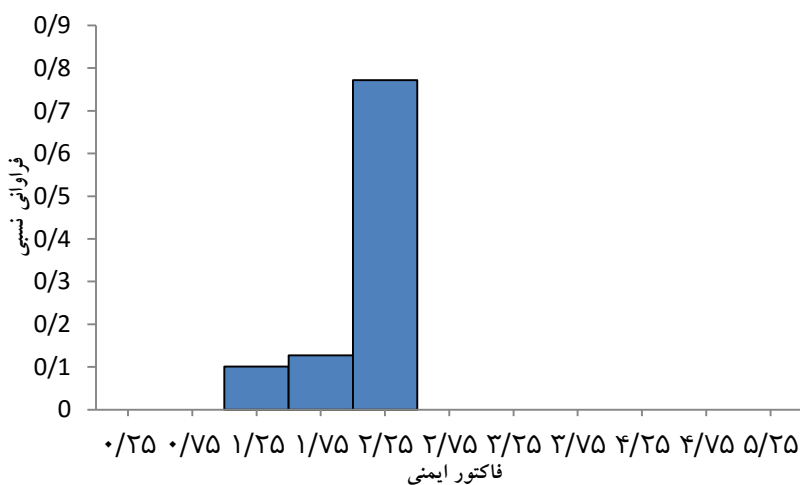
اگر فشار نگهداری در روش بالتائوس ۱۸۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شود، احتمال کمتر بودن

فاکتور ایمنی از ۲ در برابر بالازدگی در این مقطع ۱۰ درصد است. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین

فاکتور ایمنی برای این فشار به ترتیب $1/0.9$ ، $5/7.9$ و $2/8.3$ است. احتمال مشابه در روش جدید با اعمال فشار 187 کیلوپاسکال برای فاکتور ایمنی $1/5$ بدست می‌آید. توزیع احتمال فاکتور ایمنی به ازای فشار نگهداری مذکور در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده است. مقدار فشار بالازدگی با فاکتور ایمنی ۲، طبق روش عددی در این مقطع 172 کیلوپاسکال است.



شکل ۴-۳۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری 180 کیلوپاسکال برای روش بالتائوس



شکل ۴-۳۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۲ با فشار نگهداری 187 کیلوپاسکال برای روش جدید

۴-۵-۴-۳- مقطع ۳

تونل در این مقطع در نزدیکی میدان راه آهن و زیر خط آهن حفاری شده است. مشخصات این مقطع در جدول ۴-۵ آمده است.

جدول ۴-۵. مشخصات مقطع ۳

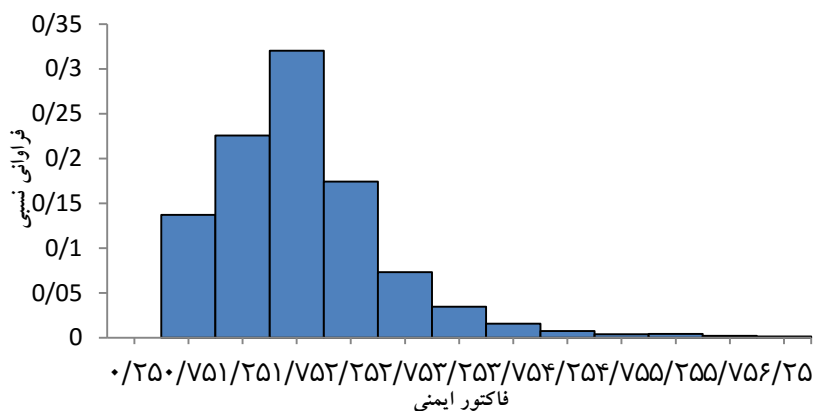
کیلومتر	نوع خاک	ضخامت (متر)
۲۲۰۰	رس	۱۸/۴
۹/۴		عمق روباره (متر)
۹/۵		عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)
۰/۲		شیب تونل (%)
۱۵۶		بار سطحی (کیلوپاسکال)
۹		قطر تونل (متر)

مقدار فشار نگهداری واقعی در این مقطع ۱۳۹ کیلوپاسکال بود. در روش بروئر با ایجاد فشار نگهداری ۱۶۰ کیلوپاسکال احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از ۱/۱، ۱۸ درصد است. این احتمال برای فشار ۱۴۰ کیلوپاسکال ۲۰ درصد است.

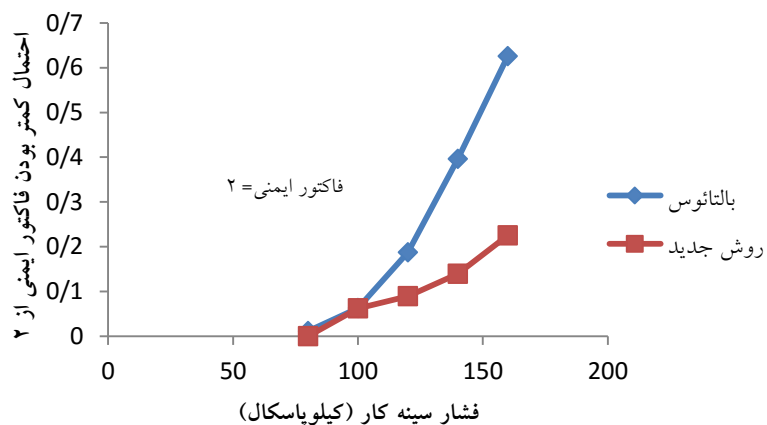


شکل ۴-۳۳. فشار نگهداری سینه کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳

در روش COB، احتمال فاکتور ایمنی برای فشار ۱۴۰ کیلوپاسکال ۱۷ درصد است. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی در این فشار نگهداری به ترتیب ۰/۶۱، ۶/۳۶ و ۱/۸۱ است (شکل ۴-۳۴).



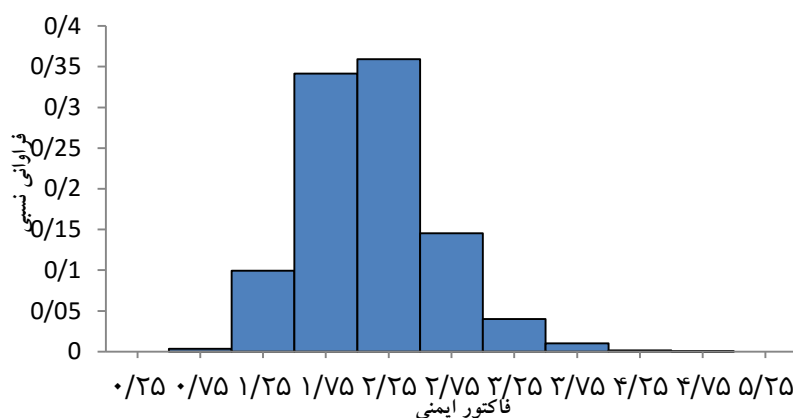
شکل ۴-۳۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۰ کیلوپاسکال برای روش COB



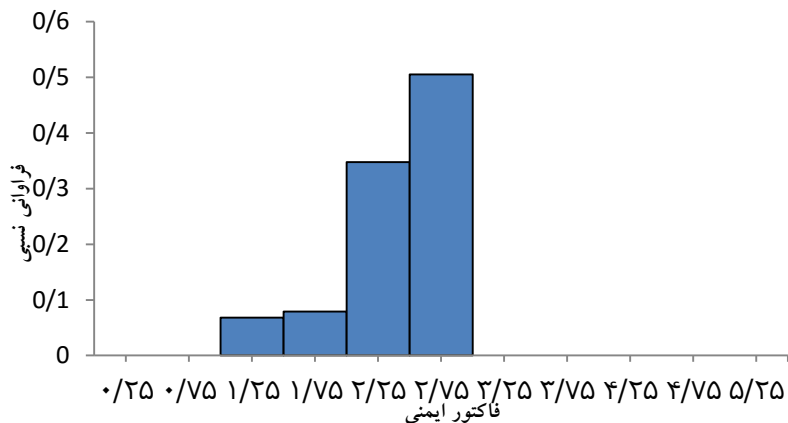
شکل ۴-۳۵. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳

نتایج بدست آمده از هر دو روش برای بالازدگی در این مقطع با شرایط واقعی همخوانی ندارد. در رابطه بالتائوس با اعمال فشار ۱۴۴ کیلوپاسکال احتمال فاکتور ایمنی ۱/۵، ۱۰ درصد است. کمینه، بیشینه و میانگین مقادیر فاکتور ایمنی به ازای این فشار نگهداری ۰/۸۱، ۴/۶۲ و ۲/۱۱ خواهد بود. توزیع

احتمال فاکتور ایمنی در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است. با اعمال همین فشار در روش جدید احتمال برای فاکتور ایمنی $1/5$ ، ۶ درصد خواهد بود. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی به ازای این فشار نگهداری $1/3$ ، $2/66$ و $2/36$ خواهد بود. نزدیکی این نتایج با فشار نگهداری واقعی ریزش در این مقطع را می‌توان به مقدار بار سطحی نسبت داد زیرا محاسبات بالازدگی بدون در نظر گرفتن بار سطحی انجام می‌شوند.



شکل ۴-۳۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس



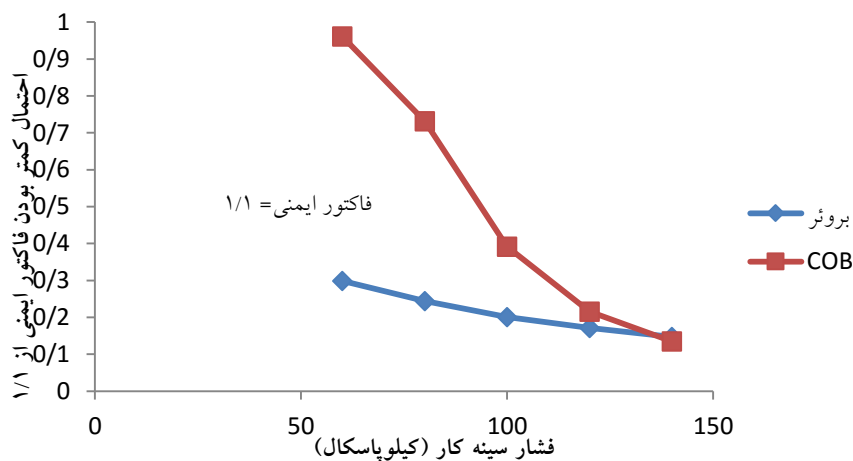
شکل ۴-۳۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش جدید

۴-۵-۴-۴- مقطع ۴

در این مقطع و مقاطع بعدی تونل زیر خیابان ولیعصر حفاری می‌شود. این مقطع در ابتدای خیابان ولیعصر و شمال میدان راه‌آهن واقع شده است و اولین مقطع مورد مطالعه است که در آن تونل زیر سطح ایستابی واقع شده است. مشخصات این مقطع در جدول ۴-۶ آمده است.

جدول ۴-۶. مشخصات مقطع ۴

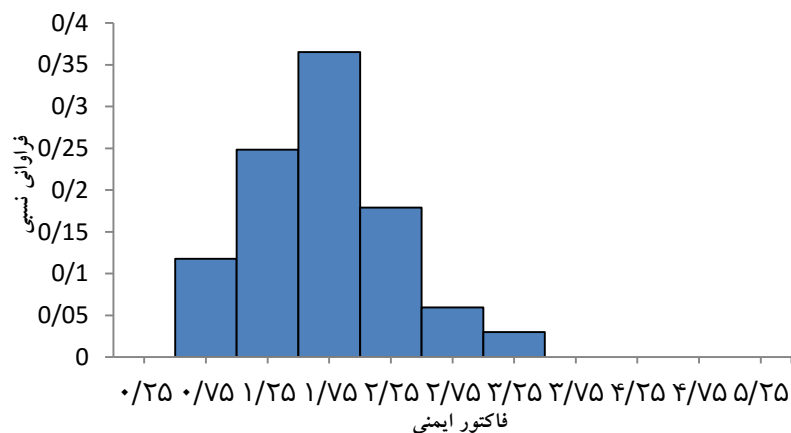
نوع خاک	ضخامت (متر)	کیلومتر از	۲۶۰۰
رس	۶/۲	عمق روباره (متر)	۱۲/۳
ماسه	۱/۹	عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)	۱۱
رس	۲/۹	شیب تونل (/)	۱/۲۳
ماسه	۱/۲	بار سطحی (کیلوپاسکال)	۶۴
رس	۶/۵	قطر تونل (متر)	۹
ماسه	۱/۲		
رس	۱/۴		



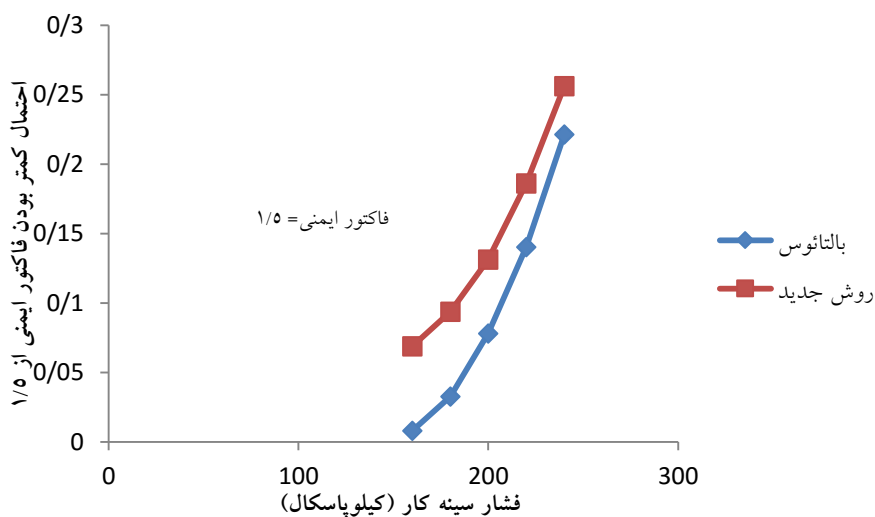
شکل ۴-۳۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴

فشار واقعی نگهداری در این مقطع ۱۱۷ کیلوپاسکال بوده است. با انتخاب فشار نگهداری ۱۳۳ کیلوپاسکال در روش بروئر احتمال فاکتور ایمنی ۱۵ درصد خواهد بود. احتمال مشابه طبق روش COB

برای فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال بدست می‌آید (شکل ۴-۳۸). توزیع احتمال فاکتور ایمنی برای این فشار نگهداری در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است.



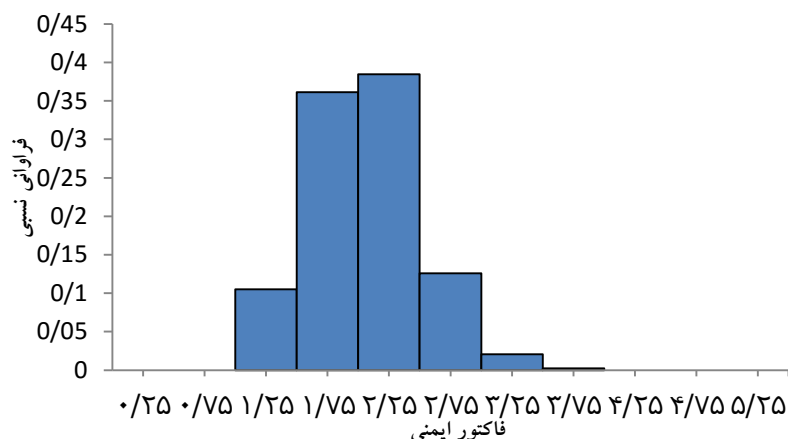
شکل ۴-۳۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB



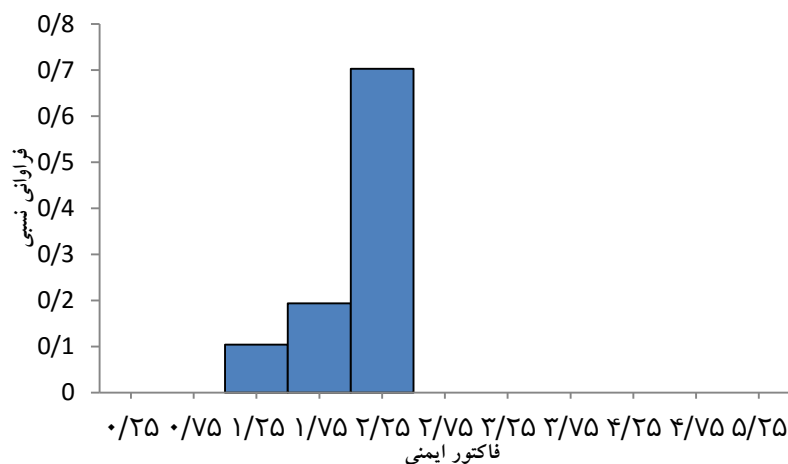
شکل ۴-۴۰. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴

با اعمال فشار نگهداری ۲۰۹ کیلوپاسکال در روش بالتائوس احتمال فاکتور ایمنی ۱/۵ در برابر بالازدگی ۱۰ درصد بود. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی برای این فشار نگهداری به ترتیب

۱/۰۳، ۳/۸۹ و ۲/۰۵ است. همانطور که در شکل ۴-۴۱ نشان داده شده، احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از ۱ در این فشار نگهداری صفر است. احتمال مشابه در روش جدید با انتخاب فشار نگهداری ۱۸۵ کیلوپاسکال برای فاکتور ایمنی ۱/۵ بدست می‌آید. مقدار فشار نگهداری در برابر بالازدگی با فاکتور ایمنی ۲ در روش عددی ۲۰۸ کیلوپاسکال است.



شکل ۴-۴۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۲۰۹ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس



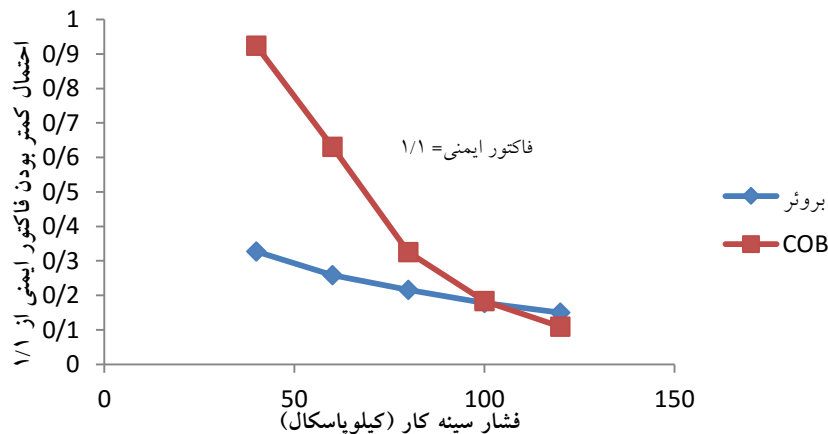
شکل ۴-۴۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۴ با فشار نگهداری ۱۸۵ کیلوپاسکال برای روش جدید

۵-۴-۵-۴-۵ - مقطع ۵

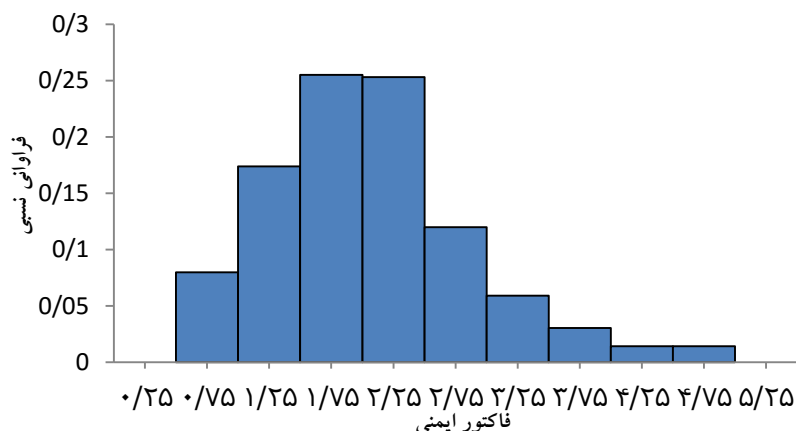
این مقطع در نزدیکی تقاطع خیابان مختاری و ولیعصر قرار دارد. اطلاعات مربوط به این مقطع در جدول ۷-۴ آمده است. فشار واقعی نگهداری سینه کار ۹۴ کیلوپاسکال است در حالیکه با اعمال فشار ۱۲۰ کیلوپاسکال در روابط بروئر احتمال فاکتور ایمنی ۱۵ درصد خواهد بود. فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال احتمالی نزدیک به ۱۰ درصد را برای فاکتور ایمنی ۱/۱ در روش COB رقم می‌زند (شکل ۴-۴۳). مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی برای این فشار به ترتیب ۰/۷۷، ۴/۹۹ و ۲/۰۶ است (شکل ۴-۴۴).

جدول ۷-۴. مشخصات مقطع ۵

نوع خاک	ضخامت (متر)	کیلومتر از	۲۹۰۰
شن	۱/۳	عمق روباره (متر)	۱۱/۱
ماسه	۰/۵	عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)	۱۱
رس	۷	شیب تونل (%)	۱/۲۳
ماسه	۱/۹	بار سطحی (کیلوپاسکال)	۶۴
رس	۲/۸	قطر تونل (متر)	۹
ماسه	۱/۶		
رس	۵		

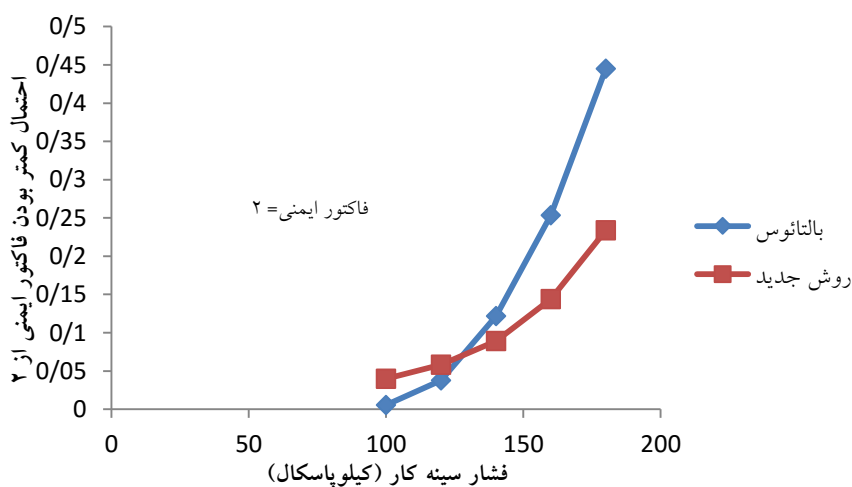


شکل ۴-۴۳. فشار نگهداری سینه کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵

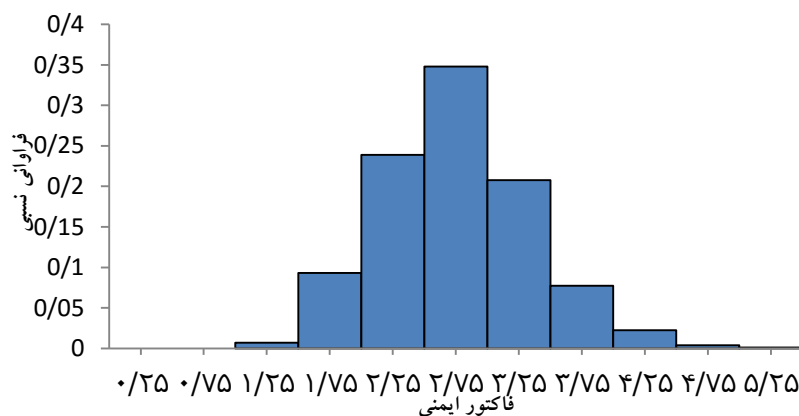


شکل ۴-۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB

فشار نگهداری در مقابل بالازدگی در روش عددی با فاکتور ایمنی ۲ برابر با ۱۱۴ کیلوپاسکال است. احتمال فاکتور ایمنی ۲ در روش بالتائوس برای این فشار فقط ۲ درصد است. با انتخاب فشار ۱۳۶ کیلوپاسکال احتمال فاکتور ایمنی مذکور ۱۰ درصد خواهد بود که به نظر منطقی تر می‌آید (با توجه به فشار نگهداری واقعی).

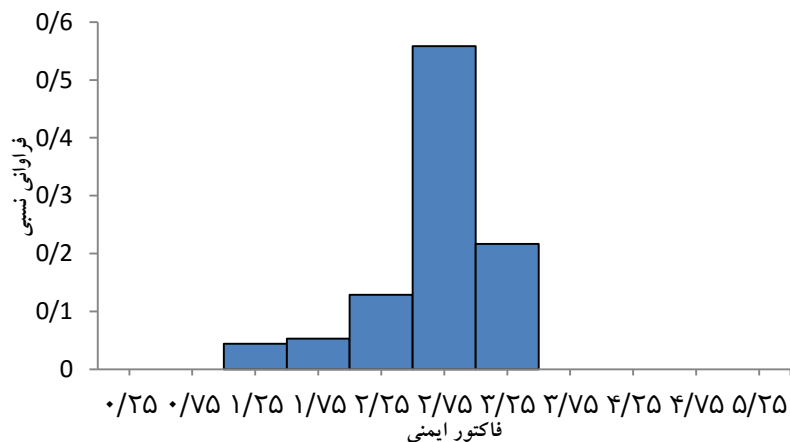


شکل ۴-۵. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵



شکل ۴-۴۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۳۶ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس

در روش جدید با اعمال فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال احتمال فاکتور ایمنی ۲ در برابر بالازدگی ۱۰ درصد خواهد بود در حالیکه مقدار احتمال برای فاکتور ایمنی ۲ تحت فشار نگهداری ۱۱۴ کیلوپاسکال تنها ۲/۴ درصد است. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی تحت این فشار به ترتیب ۱/۳۱، ۳/۰۳ و ۲/۶۹ است.



شکل ۴-۴۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۵ با فشار نگهداری ۱۴۴ کیلوپاسکال برای روش جدید

۴-۵-۴-۶- مقطع ۶

این مقطع در ۱۳۰ متری شمال تقاطع خیابان‌های مولوی و ولیعصر واقع شده است. از این تقاطع خطوط ۳ و ۷ مترو نیز عبور می‌کنند.

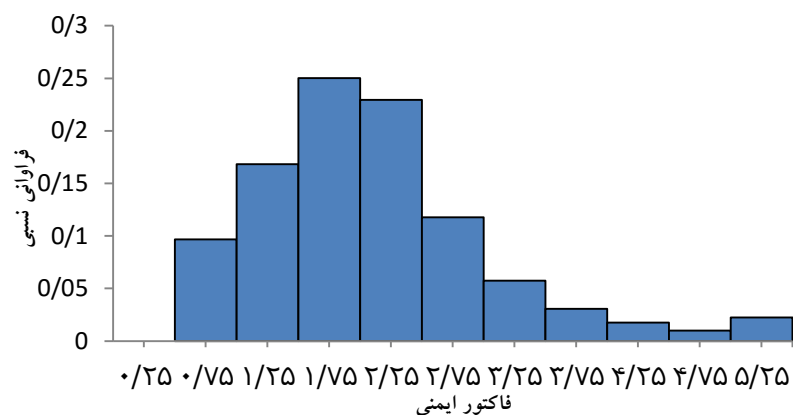
جدول ۴-۸. مشخصات مقطع ۶

نوع خاک	ضخامت (متر)	کیلومتر	متر
شن	۰/۶	عمق روباره (متر)	۱۱/۹
رس	۵	عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)	۱۲/۳
ماسه	۱/۵	شیب تونل (%)	۰/۲
رس	۱۳/۸	بار سطحی (کیلوپاسکال)	۶۴
		قطر تونل (متر)	۹

با انتخاب فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمنی در روش بروئر ۱۵ درصد خواهد بود در حالیکه فشار واقعی نگهداری ۹۲ کیلوپاسکال است. تحت این فشار احتمال فاکتور ایمنی ۱۹ درصد خواهد بود. احتمال ۱۳ درصدی فاکتور ایمنی در روش COB، تحت فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال رقم خواهد خورد (شکل ۴-۴۸).

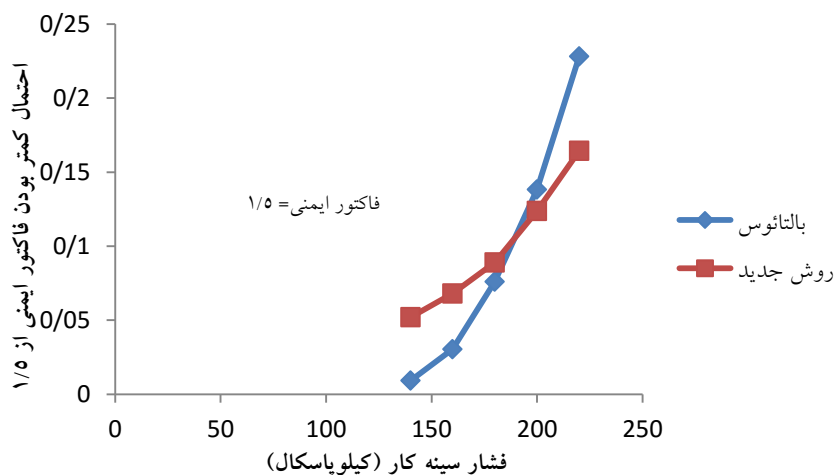


شکل ۴-۴۸. فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶



شکل ۴-۴۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری ۱۲۰ کیلوپاسکال برای روش COB

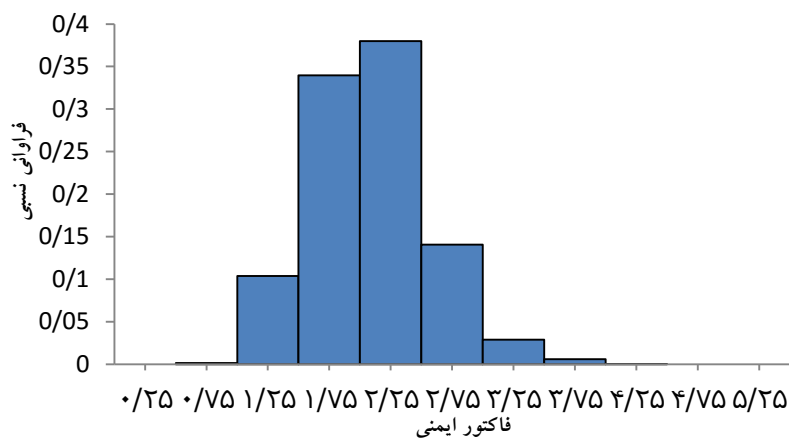
انتخاب فشار نگهداری ۱۹۰ کیلوپاسکال احتمال ۱۰ درصدی را برای فاکتور ایمنی ۱/۵ در روش بالتائوس به همراه خواهد داشت. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی در این فشار نگهداری ۰/۸۹، ۴/۱۹ و ۲/۰۸ است.



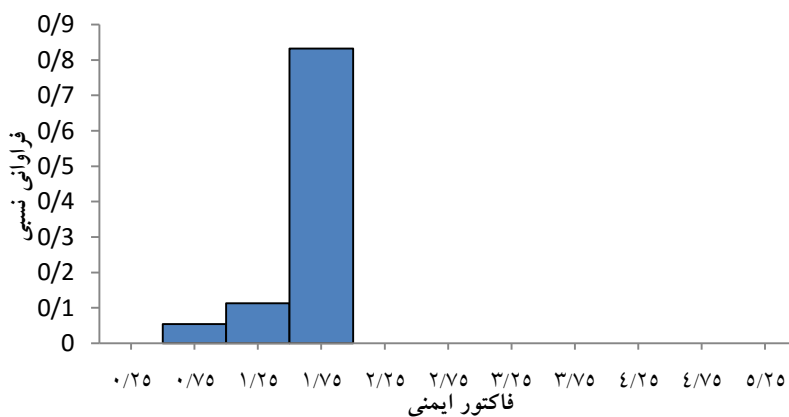
شکل ۴-۵۰. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶

مقدار فشار بالازدگی در روش عددی تحت فاکتور ایمنی ۲ برابر با ۲۲۹ کیلوپاسکال است. شرایط مشابه روش بالتائوس برای روش جدید برقرار است. با انتخاب فشار نگهداری ۲۲۰ کیلوپاسکالی مقدار

احتمال فاکتور ایمنی $1/5$ برای دو روش مذکور به ترتیب 23 و 16 درصد خواهد بود (شکل ۴-۵۰). مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی به ازای فشار نگهداری مذکور به ترتیب 0.85 ، 1.97 و 1.74 است.



شکل ۴-۵۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری 190 کیلوپاسکال برای روش بالتائوس



شکل ۴-۵۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۶ با فشار نگهداری 220 کیلوپاسکال برای روش جدید

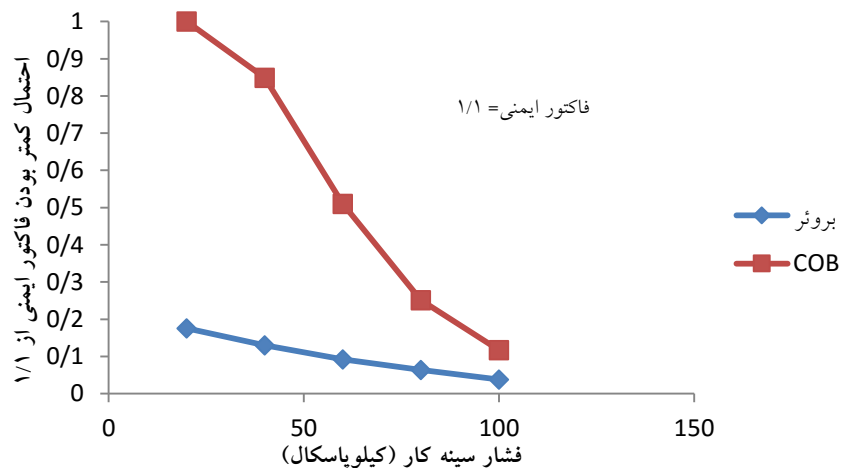
۷-۴-۵-۴- مقطع ۷

این مقطع در فاصله ۱۵۰ متری جنوب تقاطع خیابان قزوین و ولیعصر قرار دارد.

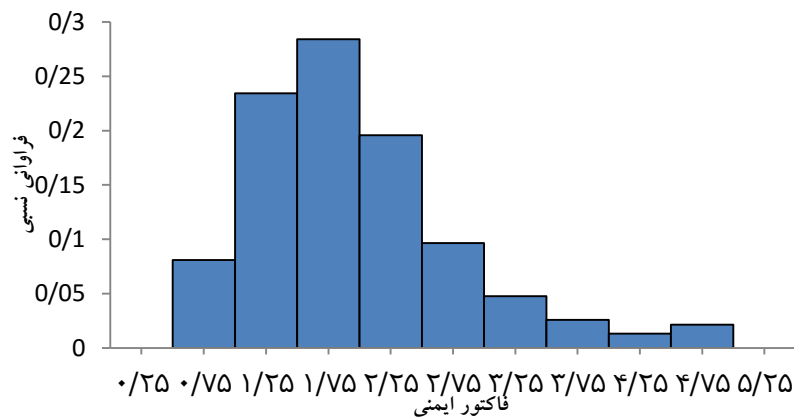
جدول ۹-۴. مشخصات مقطع ۷

نوع خاک	ضخامت (متر)	کیلومتر از
شن	۱	۴۱۵۰
ماسه	۲/۳	عمق روباره (متر) ۱۱/۷
رس	۳	عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر) ۱۷/۳
شن	۱۲/۷	شیب تونل (%) ۱/۴۳
ماسه	۱/۷	بار سطحی (کیلوپاسکال) ۶۴
		قطر تونل (متر) ۹

فشار نگهداری واقعی سینه کار ۴۱ کیلوپاسکال بوده است. به ازای فشار نگهداری ۳۰ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمنی در روش بروئر ۱۵ درصد است در حالیکه برای فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمنی در روش COB، ۱۱ درصد خواهد بود (شکل ۴-۵۳). توزیع احتمال فاکتور ایمنی برای فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۴-۵۴ نشان داده شده است. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی به ترتیب ۰/۶۷، ۴/۵۴ و ۱/۹۷ است.

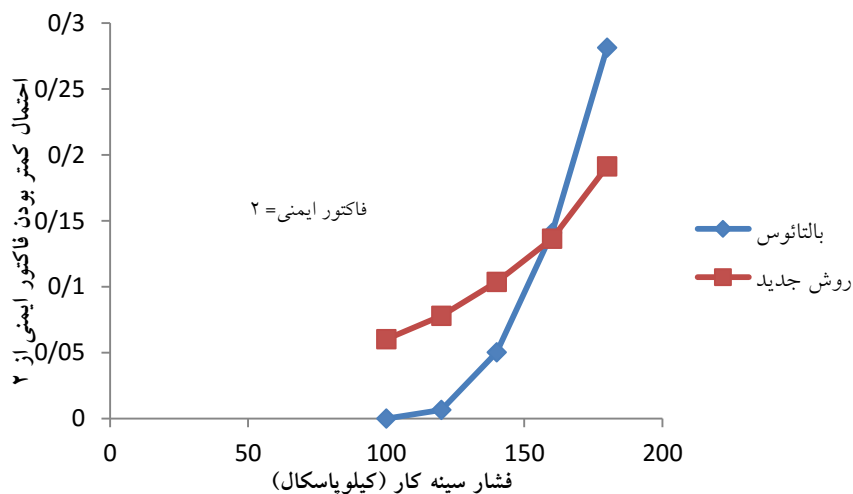


شکل ۴-۵۳. فشار نگهداری سینه کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷

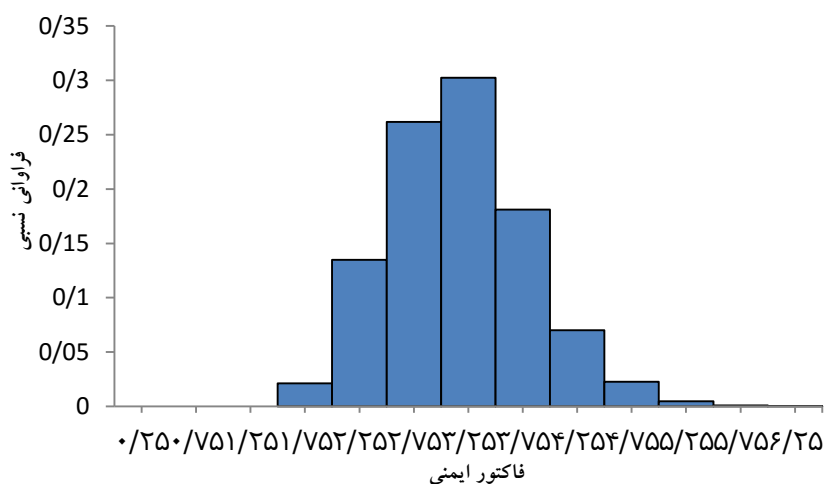


شکل ۴-۵۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB

فشار نگهداری در برابر بالازدگی طبق روش عددی برای این مقطع با فاکتور ایمنی ۲، ۱۳۵ کیلوپاسکال است. با انتخاب فشار ۱۳۰ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمنی ۲ در روش بالتائوس، ۳ درصد است (شکل ۴-۵۵). توزیع احتمال فاکتور ایمنی در شکل ۴-۵۶ نشان داده شده که در آن مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی به ترتیب ۱/۶۸، ۶/۱۲ و ۳/۱۶ است.



شکل ۴-۵۵. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷

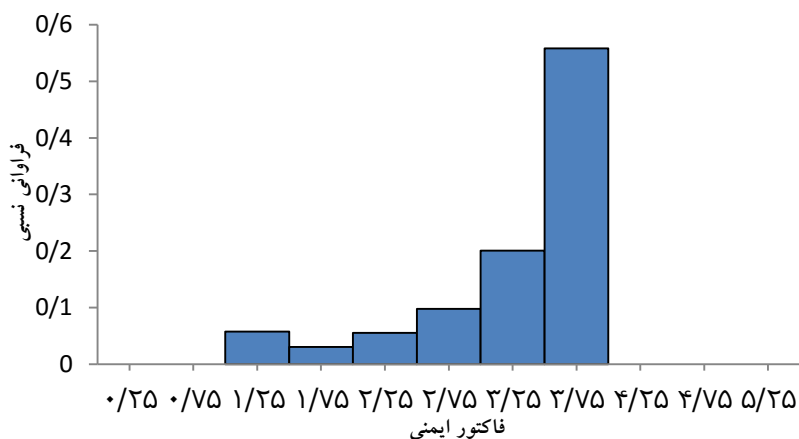


شکل ۴-۵۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۷ با فشار نگهداری ۱۳۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس

انتخاب فشار نگهداری ۱۳۰ کیلوپاسکالی برای فاکتورهای ایمنی ۱/۵ و ۲ به ترتیب احتمال ۳ و

۹ درصد را در روش جدید به همراه خواهد داشت. تحت این فشار نگهداری مقادیر ۱/۴۴، ۳/۸۲ و ۳/۲۸

برای کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی بدست می‌آید.

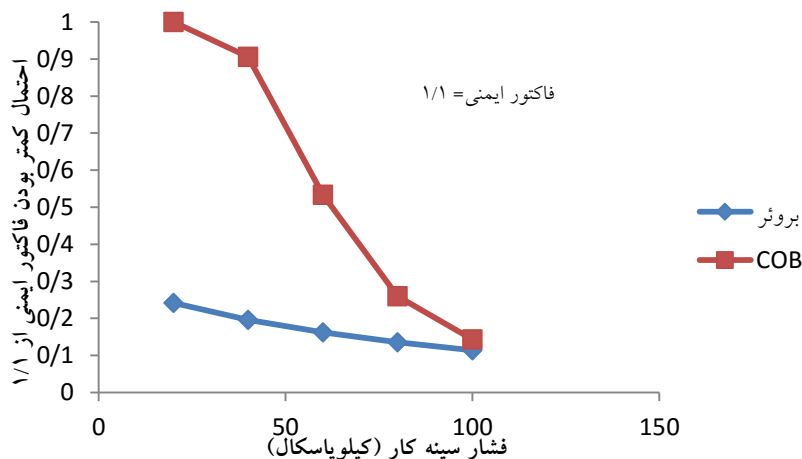


۸-۴-۵-۴- مقطع ۸

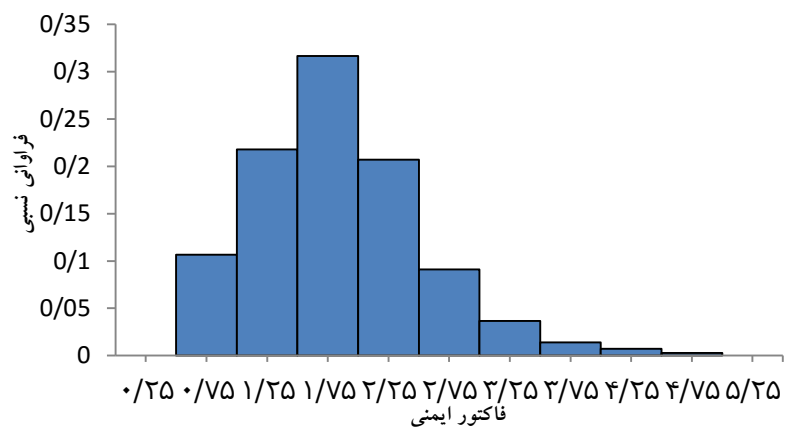
این مقطع در جنوب میدان منیریه واقع شده است. با اعمال فشار نگهداری ۶۷ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمنی در روش بروئر ۱۵ درصد خواهد بود. مقدار فشار نگهداری واقعی در این مقطع ۳۰ کیلوپاسکال بوده است. انتخاب فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال احتمال ۱۴ درصدی را برای فاکتور ایمنی در روش COB به همراه خواهد داشت. توزیع احتمال فاکتور ایمنی برای این فشار نگهداری در شکل ۴-۵۸ نشان داده شده است. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی به ترتیب ۰/۷۳، ۴/۵۵ و ۱/۸۴ است.

جدول ۴-۱۰. مشخصات مقطع ۸

نوع خاک	ضخامت (متر)	کیلومتر از
ماسه	۱/۸	۴۸۰۰
رس	۲/۱	۱۱ عمق روباره (متر)
ماسه	۳/۹	۲۲/۲ عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)
رس	۱/۸	۰/۲ شیب تونل (%)
شن	۳/۳	۶۴ بار سطحی (کیلوپاسکال)
رس	۶/۶	۹ قطر تونل (متر)
ماسه	۰/۵	

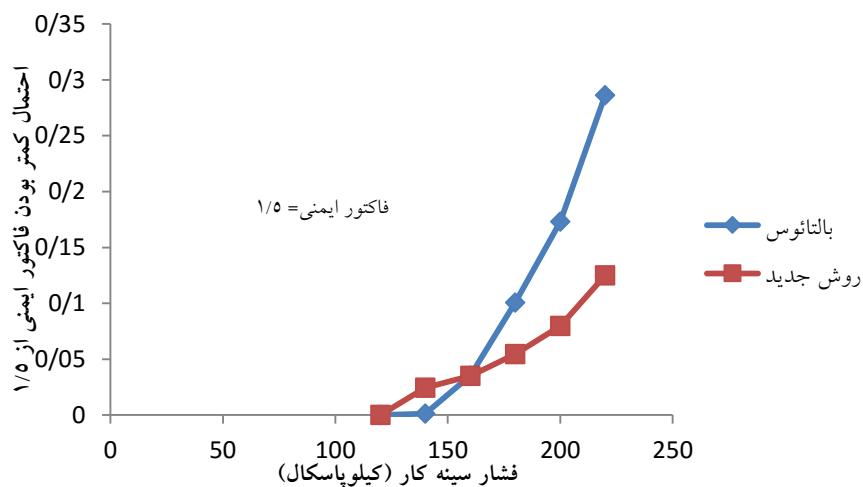


شکل ۴-۵۸. فشار نگهداری سینه کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸

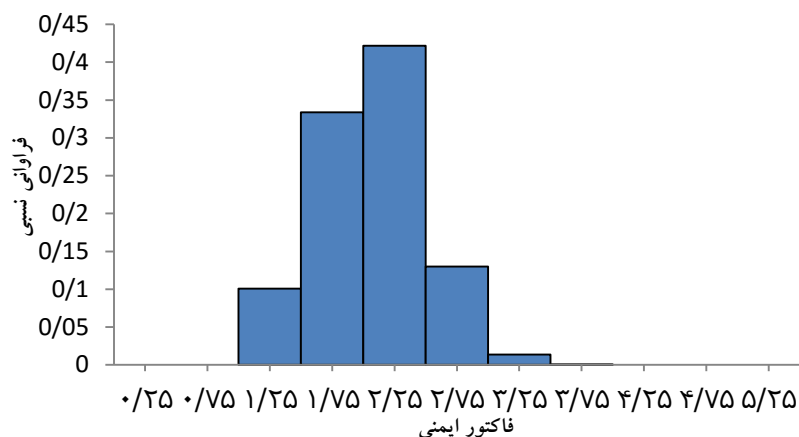


شکل ۴-۵۹. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB

با انتخاب فشار نگهداری ۱۸۰ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمنی $1/5$ در روش بالتائوس ۱۰ درصد خواهد بود. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی به ازای این فشار نگهداری به ترتیب $1/09$ ، $3/65$ و $2/06$ است (شکل ۴-۶۱).

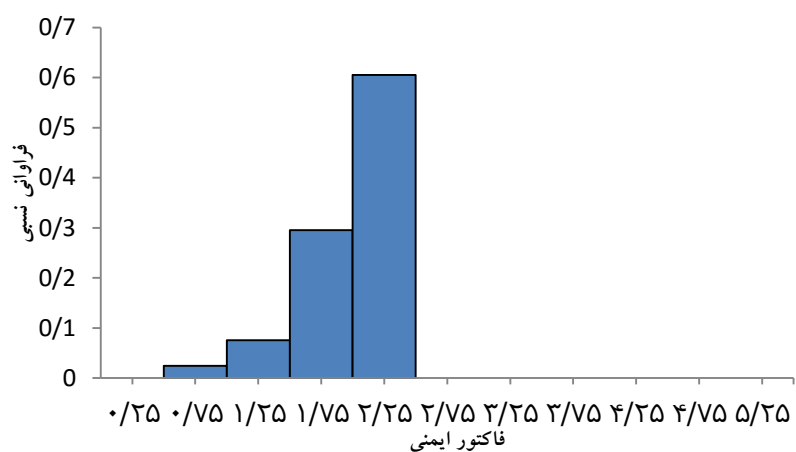


شکل ۴-۶۰. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالادگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸



شکل ۴-۶۱. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۱۸۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس

مقدار فشار بالازدگی با استفاده از روش عددی با فاکتور ایمنی ۲، ۲۱۲ کیلوپاسکال است. احتمال ۱۰ درصدی فاکتور ایمنی ۱/۵، با اعمال فشار نگهداری ۲۱۰ کیلوپاسکال در روش جدید حاصل می‌شود. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی تحت فشار نگهداری ۲۱۰ کیلوپاسکال ۰/۸۹، ۲/۲۶ و ۱/۹۷ است (شکل ۴-۶۲).



شکل ۴-۶۲. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۸ با فشار نگهداری ۲۱۰ کیلوپاسکال برای روش جدید

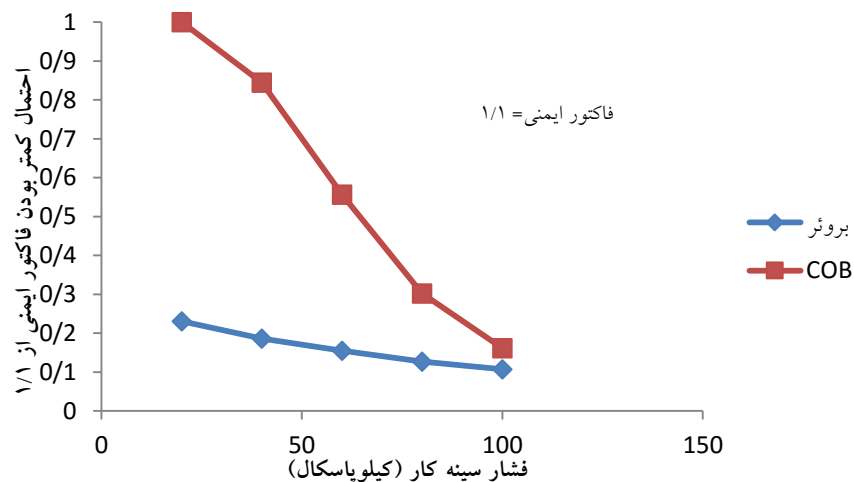
۹-۴-۵-۴-۹- مقطع ۹

این مقطع در جنوب تقاطع خیابان اسدی منش با ولیعصر قرار دارد. مشخصات این مقطع در جدول ۱۱-۴ آمده است.

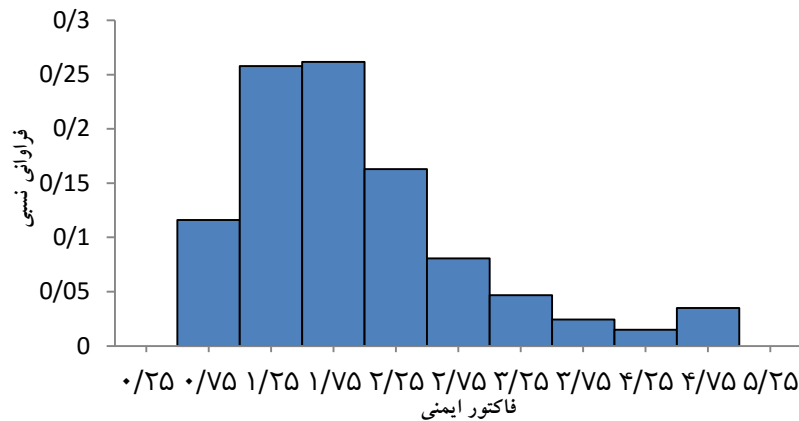
جدول ۱۱-۴. مشخصات مقطع ۹

نوع خاک	ضخامت (متر)	کیلو متر از	۵۳۰۰
شن	۲/۴	عمق روباره (متر)	۱۵/۸
ماسه	۱/۵	عمق تراز آب زیرزمینی از سطح (متر)	۲۵
شن	۷/۹	شیب تونل (%)	۱/۴۶
رس	۵/۲	بار سطحی (کیلو پاسکال)	۶۴
ماسه	۷/۸	قطر تونل (متر)	۹

مقدار فشار واقعی نگهداری در این مقطع ۲۰ کیلو پاسکال است. با انتخاب فشار نگهداری ۶۰ کیلو پاسکال، احتمال فاکتور ایمنی در روش بروئر ۱۵ درصد خواهد بود. این مقدار احتمال برای فاکتور ایمنی در روش COB با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلو پاسکال تامین می شود (شکل ۴-۶۳). مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی تحت این فشار نگهداری به ترتیب ۰/۵۷، ۴/۵۵ و ۱/۹۲ است.

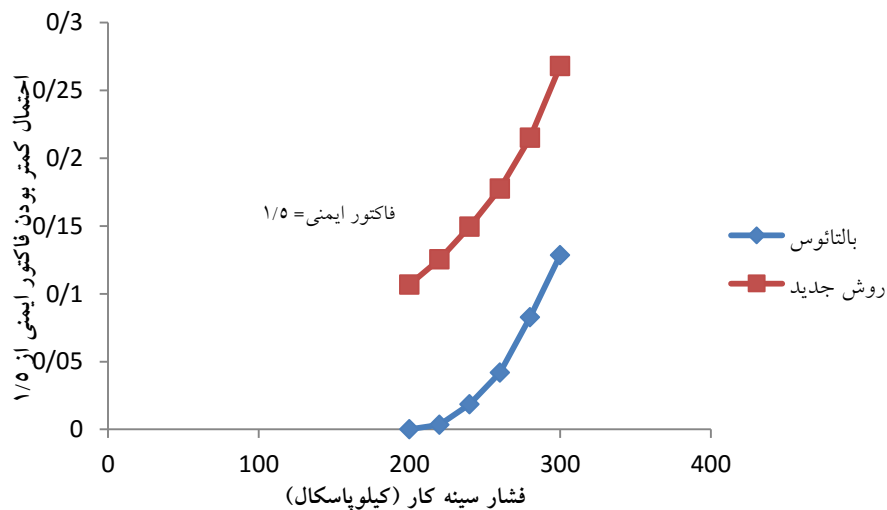


شکل ۴-۶۳. فشار نگهداری سینه کار در برابر ریزش و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹

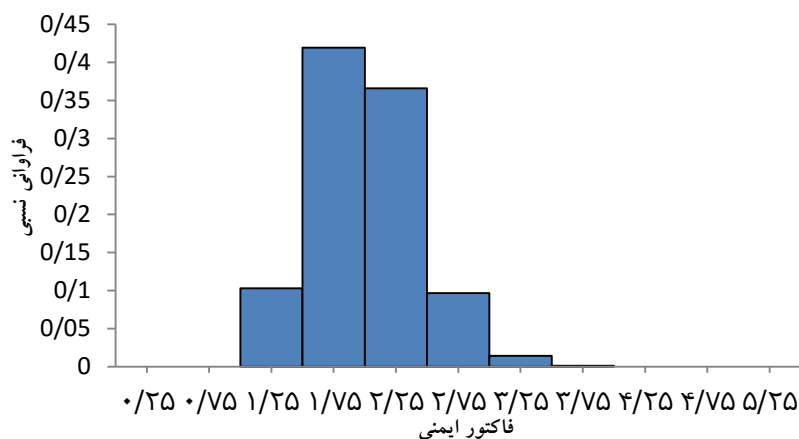


شکل ۴-۶۴. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۱۰۰ کیلوپاسکال برای روش COB

احتمال کمتر بودن فاکتور ایمنی از $1/5$ در روش بالتائوس، با اعمال فشار نگهداری ۲۹۰ کیلوپاسکال ۱۰ درصد است. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در شکل ۴-۶۶ آورده شده است. مقدار فشار بالازدگی با فاکتور ایمنی ۲ در این مقطع بر اساس روش عددی ۳۰۳ کیلوپاسکال است. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی تحت این فشار نگهداری به ترتیب $1/0.2$ ، $3/7$ و ۲ است.



شکل ۴-۶۵. فشار نگهداری سینه کار در برابر بالازدگی و احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹

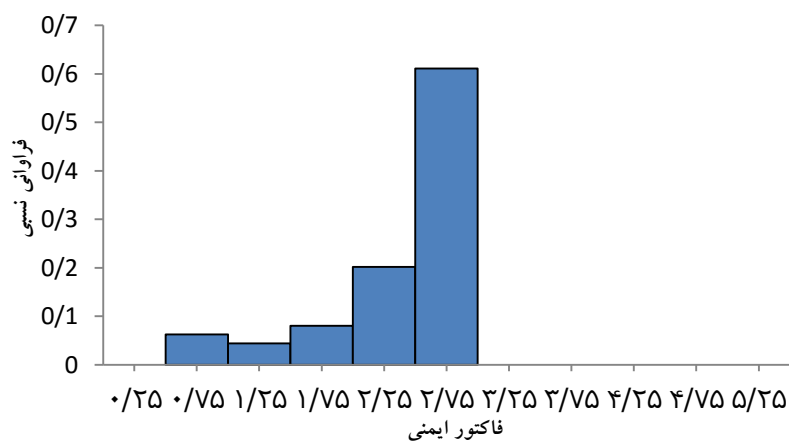


شکل ۴-۶۶. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۲۹۰ کیلوپاسکال برای روش بالتائوس

با اعمال فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال در روش جدید، احتمال فاکتور ایمنی $1/5$ ، ۱۰ درصد خواهد بود

(شکل ۴-۶۵). مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین فاکتور ایمنی تحت این فشار نگهداری به ترتیب $0/94$ ،

$2/87$ و $2/4$ است.



شکل ۴-۶۷. توزیع احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۹ با فشار نگهداری ۲۰۰ کیلوپاسکال برای روش جدید

۴-۶- نتیجه‌گیری

در این فصل برآورد فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و بالازدگی با استفاده از شبیه‌سازی به روش مونت‌کارلو مور مطالعه قرار گرفت. حفاری تونل در قطعه چهارم از خط ۳ متروی تهران با استفاده از دستگاه متعادل کننده فشار زمین انجام شد. خاک مسیر تونل در ابتدا بیشتر از مواد ریزدانه تشکیل شده و با نزدیک شدن به انتهای مسیر بر کمیت مواد درشت دانه افزوده می‌شود. بعد از تشکیل مدل ژئوتکنیکی مسیر با استفاده از اطلاعات گمانه‌ها، تابع توزیع تجمعی متناسب با پارامترهای خاک در تعیین فشار نگهداری سینه‌کار، مشخص شد. فرآیند شبیه‌سازی و محاسبه فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و بالازدگی در محیط MATLAB انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای ریزش با مقادیر واقعی بکار رفته در عمل، در ۹ مقطع از مسیر تونل مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به عدم وجود مقادیر واقعی، نتایج شبیه‌سازی برای بالازدگی با یکدیگر و با نتایج روش عددی مورد مقایسه قرار گرفت.

با بررسی نتایج شبیه‌سازی در برابر ریزش و مقایسه با مقادیر واقعی، فشار نگهداری حاصل از روش بروئر با احتمال ۱۵ درصدی فاکتور ایمنی ۱/۱ در بیشتر مقاطع به مقادیر واقعی نزدیک بود. طبق نظر ارائه‌دهنده روش، از این مکانیزم (مدل ۲) مقادیر بالاتری برای فشار نگهداری بدست می‌آید و حتی می‌توان از بکارگیری فاکتور ایمنی برای آن اجتناب کرد. در روش COB نیز فشار نگهداری با احتمال ۱۵ درصدی فاکتور ایمنی ۱/۱، به مقادیر واقعی در ۳ مقطع (۳، ۴ و ۶) نزدیک بود. در مقاطع دیگر، فشار نگهداری حاصل از این روش با شرایط مشابه احتمال و فاکتور ایمنی بیشتر از مقادیر واقعی بود.

بدلیل عدم وجود داده واقعی، نتایج شبیه‌سازی برای بالازدگی با نتایج روش عددی (نرم‌افزار PLAXIS^{3D} Tunnel) مورد مقایسه قرار گرفت. در روش بالتائوس در پنج مقطع (۱، ۴، ۶، ۸ و ۹)، فشار نگهداری با احتمال ۱۰ درصدی و یا کمتر (۶ درصد در مقطع ۱) فاکتور ایمنی ۱/۵، به نتایج روش عددی

نزدیک بودند. در مقاطع ۲ و ۵، فشار نگهداری با احتمال ۱۰ درصدی فاکتور ایمنی ۲ به نتایج روش عددی نزدیک بودند. در مقطع ۷، فشار نگهداری با احتمال ۳ درصدی فاکتور ایمنی ۲ با مقدار فشار بالازدگی روش عددی مطابقت داشت. در ۶ مقطع (همه به جز مقاطع ۳، ۵ و ۹)، فشار نگهداری با احتمال ۱۰ درصدی فاکتور ایمنی ۱/۵ در روش جدید با نتایج روش عددی همخوانی داشتند. در مقطع ۳، هیچ-یک از دو روش مذکور با نتایج روش عددی همخوانی نداشتند زیرا مقدار فشار بالازدگی در این مقطع طبق روش عددی ۵۶ کیلوپاسکال بود که از فشار نگهداری واقعی در این مقطع کمتر بود (عدم احتساب بار سطحی). در روش‌های بالتائوس و جدید با اعمال فشار نگهداری ۱۴۴ و ۱۶۰ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمنی ۱/۵ به ترتیب ۱۰ و ۹ درصد خواهد بود.

فصل پنجم

برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل با استفاده از روش عددی

۵-۱- مقدمه

روش‌های عددی در پروژه‌های مهندسی، کاربردی و مفید هستند. کاربرد گسترده از این روش‌ها در در مهندسی عمران در زمینه‌های تحلیل تنش، کرنش و تغییر شکل است. همچنین تحلیل جریان سیال و انتقال حرارت از میان محیط متخلخل اغلب با استفاده از روش‌های عددی انجام می‌شود. بیشتر کاربرد-های ذکر شده در تونلسازی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش المان محدود بطور معمول در تحلیل پایداری سینه‌کار مورد استفاده قرار می‌گیرد. سمپریچ^۱ (۱۹۸۰) از اولین محققینی بود که از محاسبات المان محدود سه بعدی برای تحلیل تغییر شکل در نزدیکی سینه‌کار بدون نگهداری استفاده کرد. اسدی و اسلوان^۲ (۱۹۹۳) برای اولین بار استفاده از تحلیل حدی المان محدود برای پایداری تونل‌های دایره‌ای کم عمق در زمین با خاک چسبنده را مدنظر قرار دادند [18]. ورمیر و همکاران^۳ (۲۰۰۲) مدل‌های سه بعدی المان محدود مختلفی را برای مطالعه پایداری سینه‌کار تونل در ماسه شبیه‌سازی کردند. نتایج حاکی از این بودند که زون ناپایدار در مقابل سینه‌کار به مقدار زاویه اصطکاک وابسته بوده و فشار مورد نیاز نگهداری با افزایش زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد [19]. در این فصل برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار از نرم افزار PLAXIS^{3D} نسخه مخصوص تونل استفاده شده است. این یک نرم افزار المان محدود بوده که یکی از کاربردهای ویژه آن تعیین فشار نگهداری سینه‌کار تونل در برابر ریزش است.

۵-۲- تعیین فشار نگهداری سینه‌کار تونل با نرم افزار PLAXIS^{3D} Tunnel

این یک نرم افزار سه بعدی المان محدود است که برای تحلیل تغییر شکل و پایداری در انواع تونل‌ها در خاک و سنگ ساخته شده است. در این نرم افزار مش المان محدود سه بعدی بر اساس مقاطع هندسی

¹ Semprich

² Assadi and Sloan

³ Vermeer et al.

تکراری ساخته می‌شود. اگرچه بخش‌های مخصوص به روش NATM و حفاری با سپر در این نرم افزار گنجانده شده است، برای دیگر شرایط ساختاری ژئوتکنیکی نیز می‌توان از آن استفاده کرد.

احداث تونل با استفاده از سپر را می‌توان بصورت مرحله‌ای مدل کرد. هنگام نصب سگمنت‌های نگهداری، سپر ثابت می‌ماند. پس از این که نصب سگمنت‌ها در یک حلقه کامل شد، حفاری تا جایی که امکان نصب حلقه بعدی سگمنت‌ها ممکن باشد ادامه می‌یابد. در نتیجه احداث تونل به مراحل حفاری تقسیم می‌شود که طول آنها برابر با طول سگمنت‌هاست. در هر مرحله حفاری موارد زیر باید مدل شوند (شکل ۵-۱) [20].

- فشار نگهداری در سینه کار برای جلوگیری از ریزش
- شکل مخروطی سپر
- حفاری خاک و آب منفذی در سپر
- نصب لاینینگ و تزریق دوغاب بین خاک و لاینینگ

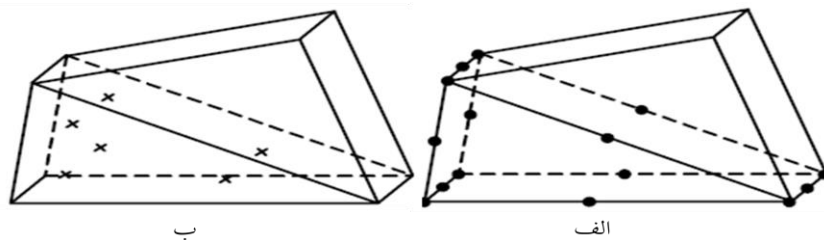


شکل ۵-۱. مراحل احداث تونل با سپر [20]

در این تحقیق تنها پایداری سینه کار مدنظر بوده بنابراین فقط سپر در مدل گنجانده خواهد شد.

۵-۲-۱- تشکیل هندسه مدل

مرحله اول برای تولید مدل، ترسیم هندسه آن است. تونل مورد نظر توسط TBM حفاری می‌شود در نتیجه مقطع آن دایره‌ای بوده و بدلیل متقارن بودن مقطع، تنها نیمی از هندسه آن ترسیم و تحلیل می‌شود. در گام اول باید ابعاد مدل را مشخص کرد. ابعاد در عمق و عرض برای تونل به قطر ۹ متر هر کدام ۳۰ متر در نظر گرفته می‌شوند. المان‌های این نرم افزار گوه‌های سه بعدی ۱۵ گره‌ای هستند (شکل ۵-۲). این نوع المان حجمی جابجایی را با استفاده از توابع درجه دوم درونیابی می‌کنند و در هر کدام ۶ نقطه تنش وجود دارد [21].



شکل ۵-۲. المان حجمی در نرم افزار PLAXIS^{3D} Tunnel (الف) گوه ۱۵ گره‌ای (ب) نقاط تنش در گوه [21]

بعد از ترسیم هندسه کلی مدل مقطع نیم‌دایره تونل را رسم کرده و لایه‌های تشکیل دهنده خاک تحدید می‌شوند. برای تولید شرایط مرزی دستور ثابت کردن استاندارد^۱ را اجرا کرده تا نرم‌افزار مرزهای جانبی و تحتانی محیط را ثابت کرده و از چرخش نقاط انتهایی تونل جلوگیری کند. در گام بعدی باید مشخصات فیزیکی و مکانیکی هر نوع خاک را وارد کرد. در این مورد مطالعاتی معیار تسلیم خاک موهر کولمب و نوع خاک زهکشی شده در نظر گرفته می‌شوند. از دیگر خصوصیات خاک که باید به نرم‌افزار معرفی شوند می‌توان به وزن مخصوص خشک و اشباع، چسبندگی، ضریب پواسن، مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی اشاره کرد. از پارامتر R_{inter} برای توصیف خصوصیات سطح مشترک بین خاک و

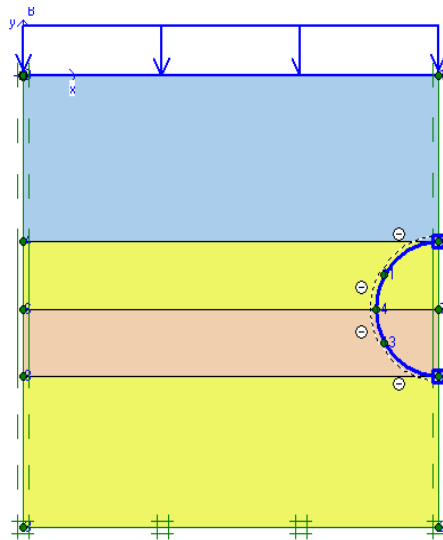
¹ Standard fixities

سازه (مصالح یا سپر) استفاده می‌شود. این پارامتر رابطه بین مقاومت خاک و سطح مشترک را نشان می‌دهد. در حالت معمول مقدار این پارامتر ۱ در نظر گرفته می‌شود ولی در سطح مشترک بین خاک و سازه مقدار آن باید بصورت دستی تعیین شود [21].

$$\tan \varphi_{\text{interface}} = R_{\text{inter}} \times \tan \varphi_{\text{soil}} \quad (1-5)$$

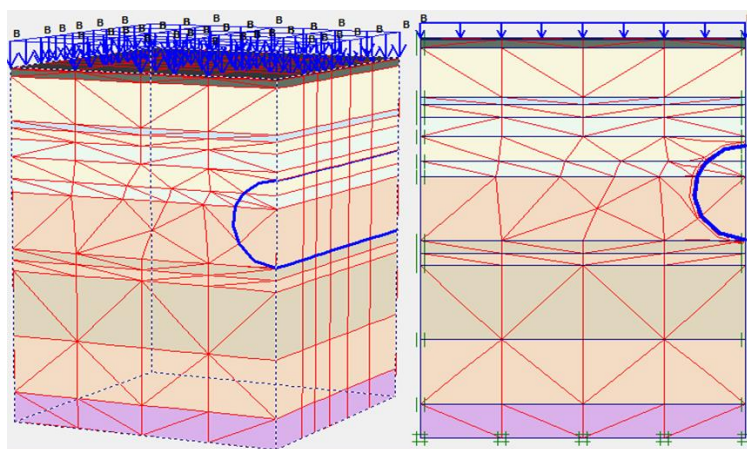
$$C_{\text{interface}} = R_{\text{inter}} \times C_{\text{soil}} \quad (2-5)$$

بطور معمول چسبندگی و اصطکاک خاک در سطح مشترک با سازه کمتر از حالت طبیعی است بنابراین برای قسمتی از خاک که در تماس با سازه است R_{inter} کمتر از ۱ در نظر گرفته می‌شود (بخش ۵-۴). در همین پنجره مشخصات مربوط به سپر را نیز باید وارد کرد. بار سطحی از نوع بار گسترده B انتخاب شده و بر سطح فوقانی مدل اعمال می‌شود. عرض مدل عددی ۳۰ متر است که بیشتر از عرض خیابان بوده ولی بار سطحی ساده سازی شده و در تمام عرض مدل برابر با بار سطحی خیابان در نظر گرفته شده است. در شکل ۳-۵ نمونه‌ای از هندسه مدل نشان داده شده است.



شکل ۳-۵. هندسه مدل در نرم‌افزار PLAXIS^{3D} Tunnel

در گام بعدی مش دو بعدی تولید می‌شود. در محدوده تونل المان‌ها بصورت خودکار کوچکتر در نظر گرفته می‌شوند. در تشکیل مش سه بعدی طول بعد سوم مدل را مشخص کرده و یک صفحه را به سینه کار اختصاص می‌دهیم. مقدار فاکتور اندازه المان محلی^۱ در صفحه سینه کار برابر ۵/۱. قرار داده می‌شود. در صورت شیب‌دار بودن تونل، مقدار آن در این بخش باید وارد شود. به ابتدا و انتهای تونل نیز باید یک صفحه اختصاص داده شود. نرم افزار صفحاتی اضافی بین صفحات تولید شده ایجاد می‌کند.



شکل ۴-۵. مدل دوبعدی و سه بعدی در PLAXIS^{3D} Tunnel

۵-۲-۲- شرایط اولیه^۲

در این مرحله عمق سطح آب زیر زمینی به منظور ایجاد فشار آب و همچنین تنش‌های حاصل از لایه‌های مختلف خاک تعیین می‌شوند (اشکال ۵-۵ و ۵-۶). تراز آب زیرزمینی در محدوده مدل مشخص شده و با انتخاب گزینه تولید فشار آب^۳، مدل فشار منفذی تولید می‌شود. سپس با انتخاب گزینه تولید تنش‌های

¹ Local element size factor

² initial condition

³ Generate water pressures

اولیه^۱، تنش‌های موثر مدل می‌شوند. لازم بذکر است که ضریب فشار جانبی زمین در این نرم‌افزار از رابطه ۱۲-۲ محاسبه می‌شود.

۵-۲-۳- روند محاسبات

فرایند تعیین فشار نگهداری سینه‌کار در برابر ریزش و بالازدگی در ۴ فاز صورت می‌پذیرد. دو فاز اول مربوط به تعیین فشار ریزش و فازهای سوم و چهارم مربوط به بالازدگی هستند.

فاز اول در مرحله محاسبه، استخراج تونل به اندازه میزان پیشروی TBM است. پس از ایجاد فاز اول در صفحه پارامترها باید گزینه تعریف^۲ را انتخاب کرد. با توجه به تعداد صفحات (N) تولید شده در گام تولید مش سه بعدی، مدل به N-1 قطعه^۳ تقسیم می‌شود. در قطعه‌ای که حفاری شده، برای فعال کردن سپر باید روی آن کلیک کرده و گزینه صفحه^۴ را انتخاب کرد. در این قطعه باید از خاک با R_{inter} کمتر از ۱ استفاده کرد (برای قسمتی از خاک که با سپر در تماس است). برای مدل کردن استخراج در این قطعه باید خاک موجود در محدوده سپر را حذف کرد. برای فعال کردن بار سطحی باید بر روی آن در هر قطعه کلیک کرد. اگر تمام طول سپر در مدل باشد برای مدل کردن کاهش حجم بعلت اختلاف قطر سپر در جلو و عقب آن، باید میزان پارامتر انقباض (کاهش حجم) را در صفحه‌ای که انتهای سپر در آن قرار دارد، وارد کرد. این پارامتر از رابطه ارائه شده توسط شیرلاو^۵ محاسبه می‌شود (رابطه ۳-۵) [22].

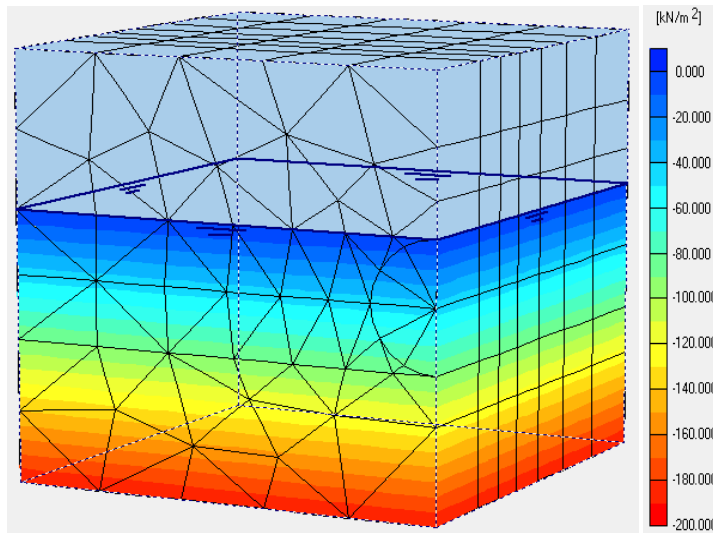
¹ Generate initial stresses

² define

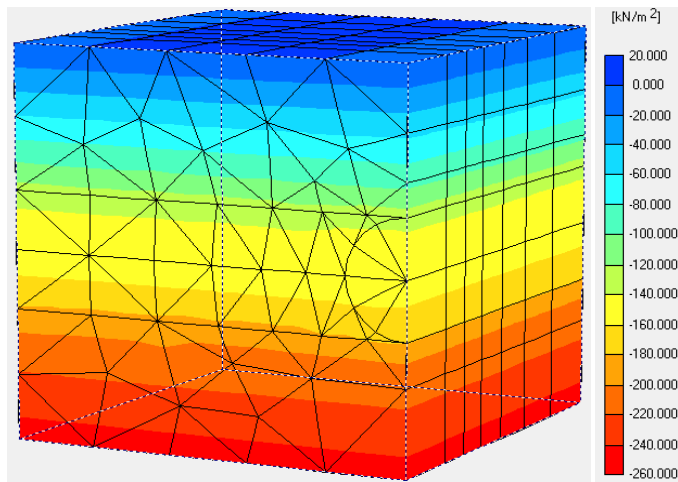
³ slice

⁴ plate

⁵ Shirlaw



شکل ۵-۵. فشار منفذی فعال



شکل ۵-۶. تنش‌های میانگین موثر

$$V_L = \frac{(ROS^2 \times \pi) - (ROT^2 \times \pi)}{(ROS^2 \times \pi)} \quad (3-5)$$

V_L = کاهش حجم

ROS = شعاع شیلد جلویی

ROT = شعاع شیلد عقبی

در صفحه مربوط به سینه کار باید مقدار فشار نگهداری اولیه را برای تمام لایه‌هایی که در محدوده تونل قرار دارند تعیین کرد. این فشار از نوع بار گسترده A است. در قسمت مربوط به عمق و فشار مرجع (P_{ref} و Y_{ref})، باید عمق و فشار نگهداری در تاج تونل را وارد کرد. پارامتر P_{inc} معرف گرادیان فشار سینه‌کار است که مقدار آن در این محاسبات از میانگین‌گیری وزن مخصوص اشباع لایه‌های خاک سینه‌کار حاصل می‌شود (فرض شده است بدلیل استفاده از EPBS). فشار اعمالی سینه‌کار در تاج تونل از رابطه ۴-۵ محاسبه شده است. همچنین داخل سپر در بخش فشار منفذی اولیه باید خشک در نظر گرفته شود (شکل ۵-۷). برای تحقق این امر گزینه فشار منفذی اولیه انتخاب شده و با دوبار کلیک کردن متوالی بر روی مناطق داخل سپر وارد منوی توزیع فشار منفذی دسته^۱ شده و دو گزینه توزیع فشار منفذی توسط کاربر^۲ و خشک بودن دسته در قطعه^۳ انتخاب می‌شود. پردازش در این فاز باید با موفقیت به پایان برسد [21].

$$P = K_0 \sigma'_v + 20 \quad (4-5)$$

K_0 = ضریب فشار جانبی زمین در حالت برجا (رابطه ۲-۱۲)

σ'_v = تنش موثر عمودی در تاج تونل (کیلوپاسکال)

در فاز بعدی میزان فشار نگهداری که تحت آن ریزش در سینه کار اتفاق می‌افتد، محاسبه می‌شود. این فاز از انتهای فاز اول آغاز گشته و در پنجره مربوط به پارامترها گزینه‌های ضرایب مجموع^۴ و

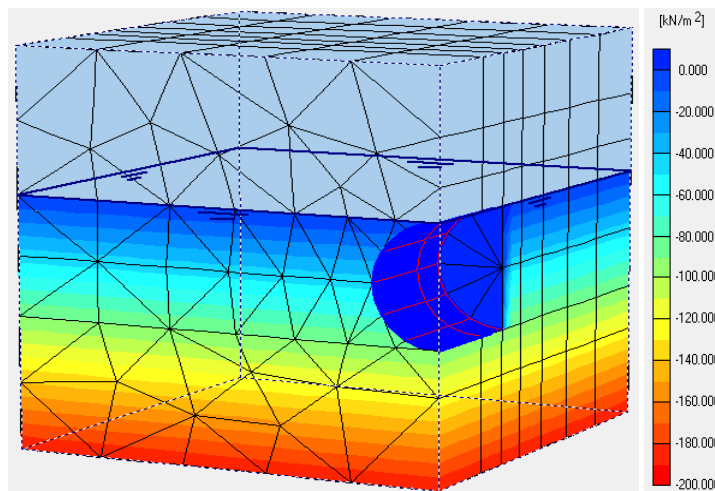
¹ cluster pore pressure distribution

² User defined pore pressure distribution

³ Cluster is dry in this slice

⁴ Total multipliers

بازنشاندن جابجایی به صفر^۱ انتخاب می‌شوند. در بخش ضرایب مجموع، مقدار Σ -MloadA برابر با صفر قرار داده می‌شود. این بدین معنی است که مقدار فشار نگهداری در هر مرحله از پردازش به سمت صفر حرکت می‌کند. با تعیین چند نقطه مرجع در مدل می‌توان میزان جابجایی در این نقاط را در طول محاسبات پایش کرد. اگر این فاز تکمیل شود نشانه این است که بدون اعمال فشار نگهداری نیز سینه کار پایدار خواهد بود، در غیر اینصورت با پیغام ریزش خاک مواجه شده (شکل ۵-۸) و با انتخاب گزینه نتایج بدست آمده^۲ در بخش ضرایب مجموع می‌توان فشار نگهداری که به ازای آن ریزش در سینه کار اتفاق افتاده است را محاسبه کرد. دستور محاسبه باید در پایان فازهای دوم و چهارم اجرا شود.



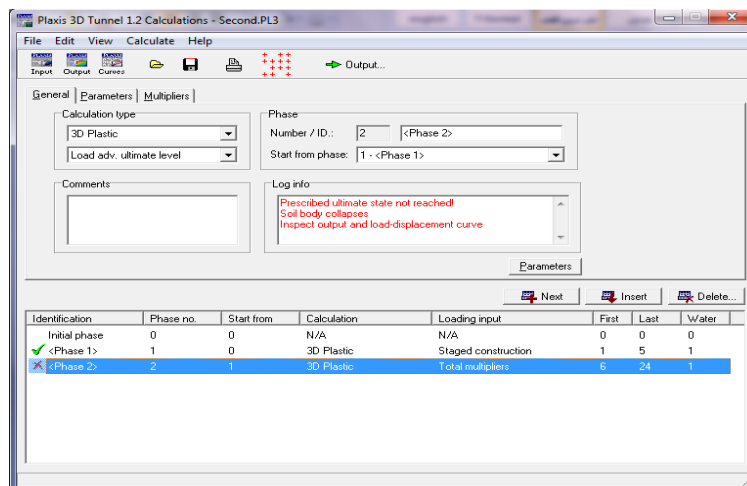
شکل ۵-۷. فشار منفذی فعال در فاز ۱

فاز سوم برای محاسبه فشار نگهداری که به ازای آن بالازدگی در سطح زمین ایجاد می‌شود، تولید می‌گردد. این فاز از فاز اولیه^۳ آغاز گشته و تفاوت آن با فاز ۲ در فعال نکردن بار سطحی در تمام قطعه‌ها و در نظر گرفتن فشار سینه کار ۲۰ کیلوپاسکال کمتر از نتیجه رابطه ۵-۴ است.

¹ reset displacements to zero

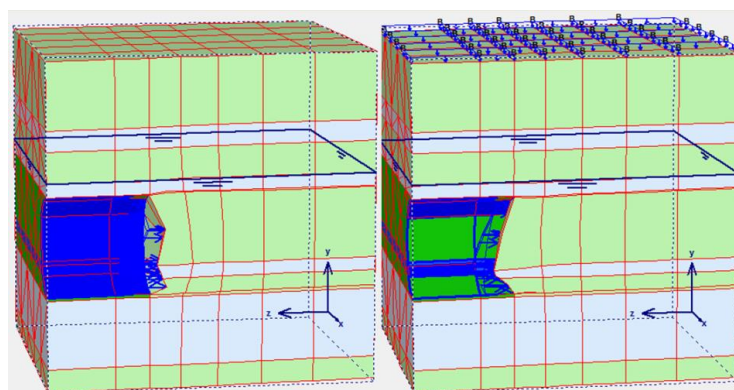
² reached values

³ initial phase



شکل ۵-۸. توقف فاز ۲ بعلت ریزش سینه کار

در فاز چهارم فشار نگهداری حداکثر که به بالازدگی در سطح منجر می‌شود، محاسبه می‌شود. این فاز از انتهای فاز سوم آغاز می‌شود ولی مقدار Σ -MloadA بیشتر از ۱ در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه طی این فاز میزان فشار نگهداری اولیه افزایش خواهد یافت. با پایش نقاط سطحی می‌توان میزان فشاری که در آن بالازدگی در سطح اتفاق افتاده را تعیین کرد.



شکل ۵-۹. فرایند تخریب در سینه کار و بالازدگی در اثر کاهش و افزایش فشار نگهداری

۵-۳- مقاطع مورد مطالعه

در این بخش فشار نگهداری سینه‌کار برای ریزش و بالازدگی در تاج تونل برای ۹ مقطع مورد مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS^{3D} Tunnel، محاسبه می‌شود. موقعیت مقاطع در پیوست ۱ آمده است. همانطور که در فصل قبل نیز به آن اشاره شد، مقدار بار سطحی در تمام مقاطع غیر از مقطع ۳ (۱۵۶ کیلوپاسکال)، ۶۴ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. طول سپر (طول حفاری) ۹/۲۵ متر است. میزان پارامترهای خاک در هر مقطع از میانگین‌گیری بین پارامترهای دو گمانه مجاور بدست می‌آید. فاکتور ایمنی طبق توصیه راهنمای نرم‌افزار از ضرب کردن فشار بدست آمده در مقدار مورد نظر (فاکتور ایمنی) بدست می‌آید. قطر تونل ۹ متر بوده و مقدار پارامتر R_{inter} برای خاک ناحیه رسی، ماسه‌ای و شنی به ترتیب ۰/۸، ۰/۹ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است. مقدار پارامترهای ضریب پواسون و مدول الاستیسیته در هر ناحیه در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱. ضریب پواسون و مدول الاستیسیته در انواع خاک [11]

نوع خاک	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
رس	۰/۴	۱۰
ماسه	۰/۳۸	۴۵
شن	۰/۳۵	۷۰

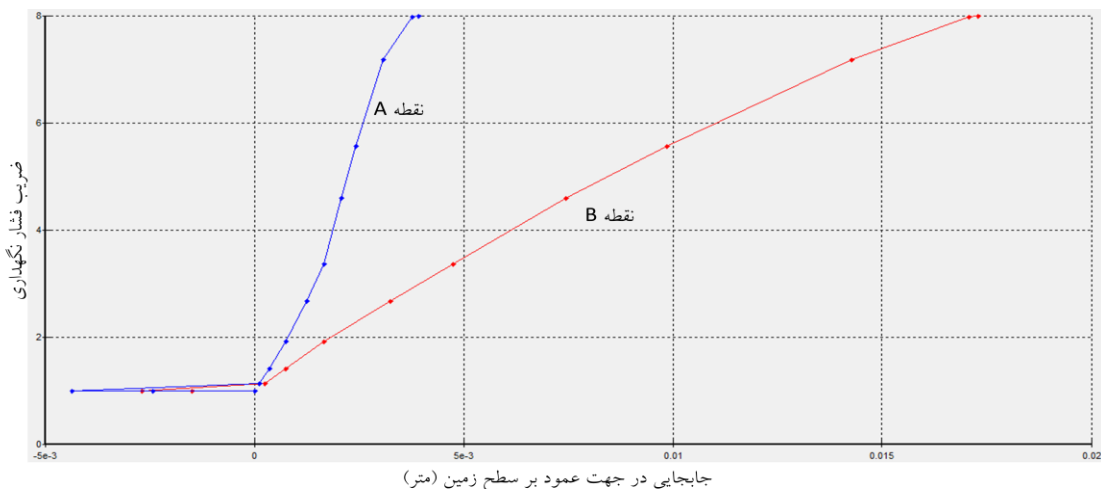
۵-۳-۱- مقطع ۱

عمق روباره و تراز آب زیرزمینی از سطح به ترتیب ۱۳/۳ و ۲۰/۴ متر است. شیب تونل نیز ۰/۲ درصد است. مشخصات لایه‌های خاک این مقطع در جدول ۵-۲ آمده است.

جدول ۵-۲. مشخصات خاک مقطع ۱

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۰-۶/۵۸ ۹/۵۶-۱۷/۴۸ ۱۹/۰۷-۲۳/۱ ۲۴/۹-۳۰	۱۶/۹	۲۰/۵	۴۶/۵	۲۴/۳
ماسه	۶/۵۸-۹/۵۶ ۲۳/۱-۲۴/۹	۱۷/۵	۲۰/۷	۲۰	۳۲
شن	۱۷/۴۸-۱۹/۰۷	۱۸/۱	۲۰/۹	۲۵	۳۶

با پایان محاسبات در این مقطع و سوق دادن فشار نگهداری به صفر در فاز دوم، ریزش در سینه- کار رخ نداد. مقدار فشار نگهداری واقعی در این مقطع ۴۷ کیلو پاسکال است. گرادیان فشار نگهداری در سینه کار ۲۰/۷ کیلو پاسکال بر متر است. در فاز سوم، حفاری بدون در نظر گرفتن بار سطحی انجام شده و در فاز چهارم مقدار فشار نگهداری سینه کار به ۸ برابر مقدار اولیه افزایش داده شد (برای تمام مقاطع). با پایش میزان نشست سطح زمین در صفحات جلوی سینه کار (در فواصل ۳، ۶، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر از سینه- کار)، میزان فشار نگهداری که به ازای آن بالازدگی رخ می دهد، مشخص می شود. با مقایسه میزان نشست دو نقطه سطحی (A و B) در مقطع ۱ که در فاصله ۳ و ۶ متری سینه کار قرار دارند (اولین نقاط وقوع بالازدگی)، می توان مقدار ضریب فشاری که در آن بالازدگی رخ می دهد را مشخص کرد (شکل ۵-۱۰).



شکل ۵-۱۰. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۱ (فاصله افقی A و B از سینه کار به- ترتیب ۳ و ۶ متر)

نشست اولیه با ضریب فشار نگهداری ۱، مربوط به فاز سوم و مرحله استخراج است. نقطه مورد نظر در نمودارهای شکل ۵-۱۰، نقطه ایست که در آن نشست فاز سوم جبران شده و بالازدگی کلی در سطح آغاز شود. شرط فوق در مقطع ۱ به ازای ضریب $3/0.15$ فشار نگهداری برقرار می‌شود. فشار نگهداری اولیه در تاج تونل ۱۲۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده که با احتساب این ضریب مقدار فشار نگهداری که در آن بالازدگی رخ می‌دهد، ۳۷۷ کیلوپاسکال است. با در نظر گرفتن فاکتور ایمنی ۲، فشار نگهداری مجاز در برابر بالازدگی ۱۸۹ کیلوپاسکال خواهد بود.

۵-۳-۲- مقطع ۲

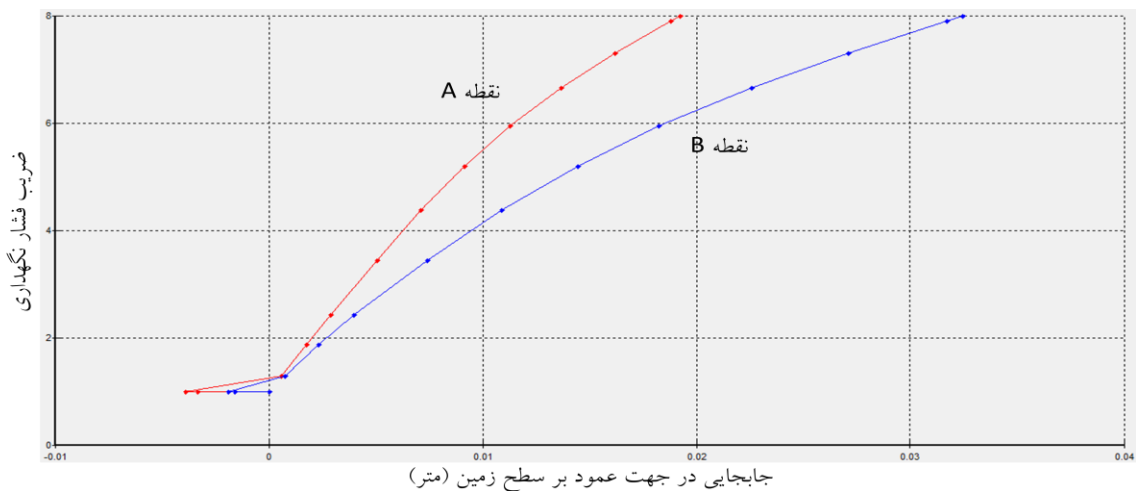
مشخصات خاک در این مقطع در جدول ۳-۵ آمده است. عمق روباره و تراز آب زیرزمینی از سطح، در این مقطع به ترتیب ۱۵ و ۱۸/۳ متر بوده و شیب تونل ۰/۲ درصد است.

جدول ۳-۵. مشخصات خاک مقطع ۲

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۰-۲۱/۱ ۲۵/۱-۳۰	۱۷/۳	۲۰/۷	۲۵	۳۳/۵
ماسه	۲۱/۱-۲۵/۱	۱۷/۵	۲۰/۷	۲۰	۳۲

فشار اولیه نگهداری سینه کار در این مقطع ۱۳۶ کیلو پاسکال با گرادیان ۲۰/۷ کیلو پاسکال بر متر در نظر گرفته شد که با میل کردن آن به صفر، ریزش در سینه کار رخ داد. ضریب فشار نگهداری هنگام ریزش ۰/۰۵ بود که در نتیجه مقدار فشار نگهداری با فاکتور ایمنی ۲، ۱۴ کیلو پاسکال بدست آمد. مقدار فشار واقعی ۶۹ کیلو پاسکال است.

مقدار فشار نگهداری اولیه در برابر بالازدگی ۱۱۶ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. با پایش نقاط A و B در سطح زمین در فاصله ۶ و ۱۰ متری از سینه کار، ضریب فشار نگهداری که در آن بالازدگی در سطح اتفاق می افتد، ۲/۹۶۹ است (شکل ۵-۱۱). با احتساب فاکتور ایمنی ۲ مقدار فشار نگهداری در برابر بالازدگی ۱۷۲ کیلو پاسکال خواهد بود.



شکل ۵-۱۱. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۲ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۶ و ۱۰ متر)

۵-۳-۳- مقطع ۳

عمق سطح آب زیرزمینی و روباره از سطح به ترتیب ۹/۵ و ۹/۴ متر است. شیب تونل در این مقطع ۰/۲ درصد است.

جدول ۵-۴. مشخصات خاک مقطع ۳

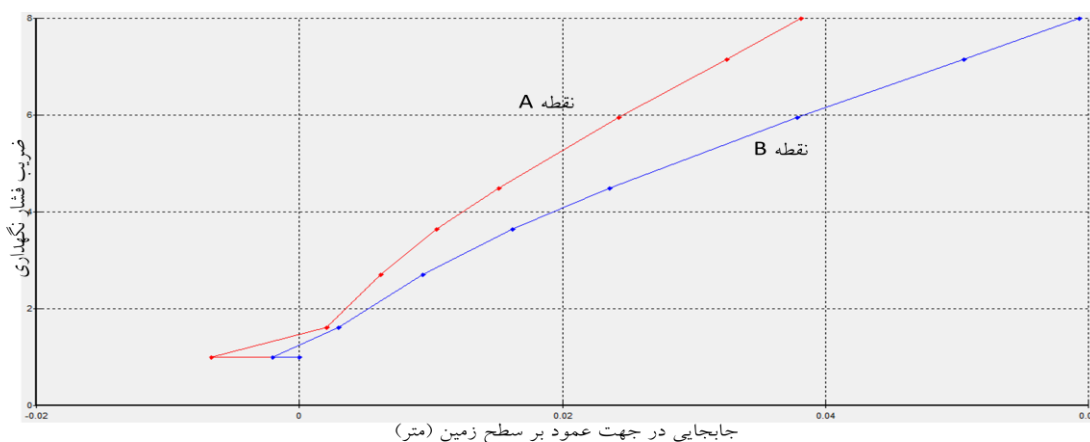
نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۰-۳۰	۱۷/۳	۲۰/۷	۲۵	۳۳/۵

پارامترهای خاک این مقطع مشابه مقطع ۲ است زیرا هردو بین دو گمانه یکسان واقع شده‌اند.

فشار واقعی نگهداری ۱۳۹ کیلو پاسکال است. فشار اولیه نگهداری ۹۳ کیلو پاسکال با گرادیان ۲۰/۷

کیلوپاسکال بر متر در نظر گرفته شده است. ضریب فشار نگهداری هنگام ریزش، $0/2386$ است که با احتساب فاکتور ایمنی ۲، فشار نگهداری ۴۴ کیلوپاسکال خواهد بود.

با در نظر گرفتن ۷۳ کیلوپاسکال به عنوان فشار نگهداری مرجع در تاج تونل و با پایش جابجایی در سطح هنگام افزایش فشار نگهداری، ضریب فشار $2/862$ برای بالازدگی بدست آمد. فشار نگهداری در برابر بالازدگی با فاکتور ایمنی ۲، ۱۰۴ کیلوپاسکال بدست آمد که مقداری دور از واقعیت است. در شکل ۵-۱۲ مقدار جابجایی عمودی نقاط A و B در فاصله ۶ و ۱۰ متری از سینه کار نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۳ (فاصله افقی A و B از سینه کار به ترتیب ۶ و ۱۰ متر)

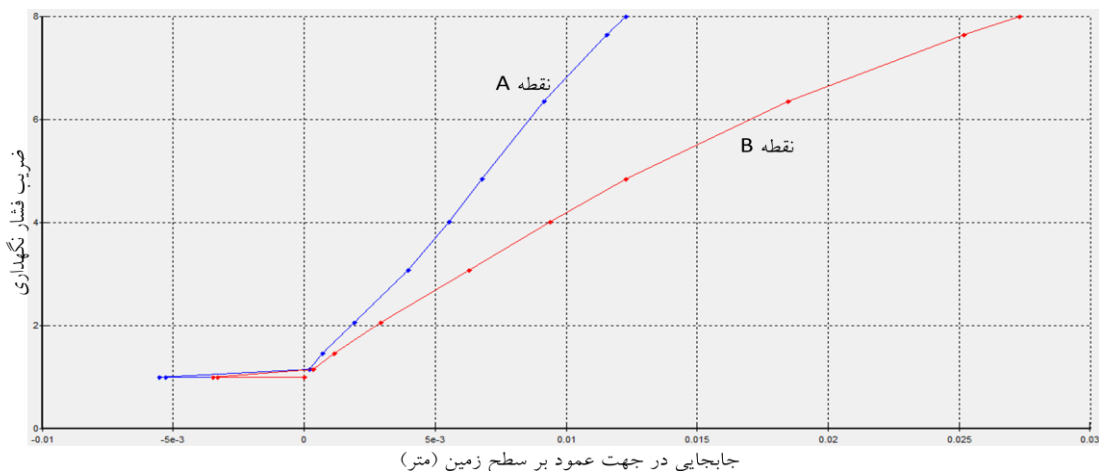
۴-۳-۵- مقطع ۴

عمق روباره و فاصله تراز آب زیرزمینی تا سطح به ترتیب ۱۲/۳ و ۱۱ متر بوده و شیب تونل ۱/۲۳ درصد است.

جدول ۵-۵. مشخصات خاک مقطع ۴

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۰-۶/۲ ۸/۱-۱۱ ۱۲/۲-۱۸/۷ ۱۹/۹-۲۱/۶ ۲۷/۹-۳۰	۱۶/۶	۲۰/۳	۳۷	۲۹
ماسه	۶/۲-۸/۱ ۱۱-۱۲/۲ ۱۸/۷-۱۹/۹ ۲۱/۶-۲۷/۹	۱۷/۷	۲۰/۸	۱۸	۳۳

مقدار واقعی فشار نگهداری ۱۱۷ کیلو پاسکال است. در نتیجه فاز دوم و ریزش سینه کار، مقدار ضریب فشار ۰/۲۹۷ برای فشار مرجع ۱۲۰ کیلو پاسکال بدست آمد. گرادیان فشار نگهداری در سینه کار ۲۰/۴ کیلو پاسکال بر متر است. فشار نگهداری با فاکتور ایمنی ۲ در تاج تونل، ۷۱ کیلو پاسکال بدست آمد. در شکل ۵-۱۵ جابجایی کل در نقاط A و B واقع بر سطح زمین در فاصله ۳ و ۶ متری سینه کار نشان داده شده است. فشار نگهداری اولیه در تاج تونل ۱۰۰ مگاپاسکال است. ضریب فشار نگهداری ۴/۱۶۹ بوده که با فاکتور ایمنی ۲، مقدار فشار نگهداری در برابر بالازدگی ۲۰۸ کیلو پاسکال خواهد بود.



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)

۵-۳-۵- مقطع ۵

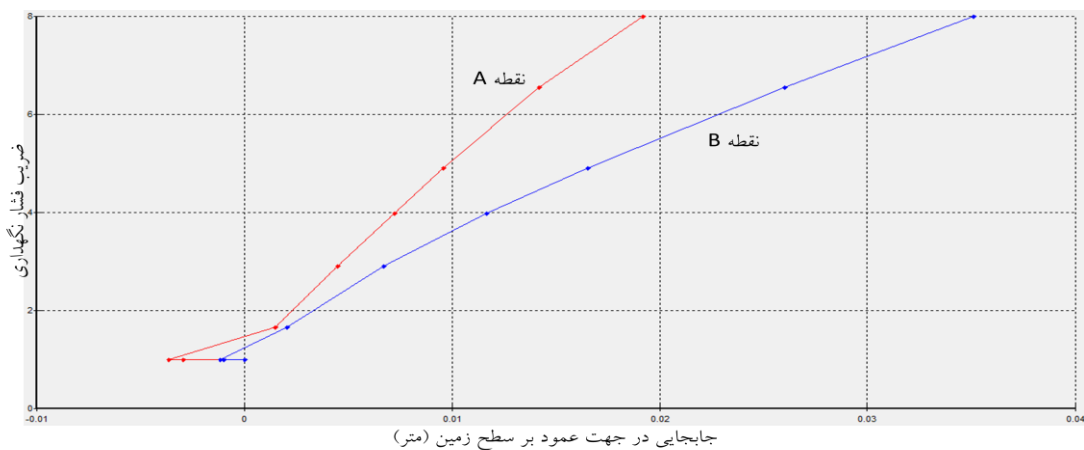
عمق روباره ۱۱/۱ متر و عمق سطح آب زیرزمینی ۱۱ متر است. شیب تونل ۱/۲۳ درصد است. مشخصات لایه‌های خاک در جدول ۵-۶ آمده است.

فشار اولیه نگهداری در تاج تونل ۱۰۸ کیلوپاسکال با گرادیان ۲۰/۵ کیلوپاسکال بر متر در نظر گرفته شد. ضریب فشار نگهداری هنگام ریزش ۰/۱۹۲۲ بوده که در نتیجه فشار نگهداری با فاکتور ایمنی ۲، ۴۲ کیلوپاسکال خواهد بود. فشار واقعی نگهداری در این مقطع ۹۴ کیلوپاسکال است.

مقدار فشار اولیه نگهداری برای فاز سوم ۸۸ کیلوپاسکال انتخاب شد. در شکل ۵-۱۴ منحنی‌های نقاط A و B معرف جابجایی‌های عمودی کل به ازای فشار نگهداری هستند که در فواصل ۶ و ۲۰ متری از سینه کار قرار دارند. مقدار ضریب فشار نگهداری در برابر بالازدگی ۲/۵۸۵ در نظر گرفته شد که در نتیجه فشار نگهداری با فاکتور ایمنی ۲، برابر با ۱۱۴ کیلوپاسکال می‌شود.

جدول ۵-۶. مشخصات خاک مقطع ۵

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۱/۸-۸/۸ ۱۰/۷-۱۳/۵ ۱۵/۱-۲۱/۲ ۲۲/۴-۲۳/۹	۱۶/۸	۲۰/۴	۵۳	۳۱
ماسه	۱/۳-۱/۸ ۸/۸-۱۰/۷ ۱۳/۵-۱۵/۱ ۲۱/۲-۲۲/۴ ۲۳/۹-۳۰	۱۷/۷	۲۰/۸	۱۸	۳۳
شن	۰-۱/۳	۱۷/۵	۲۰/۶	۲۰	۳۲



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)

۵-۳-۶- مقطع ۶

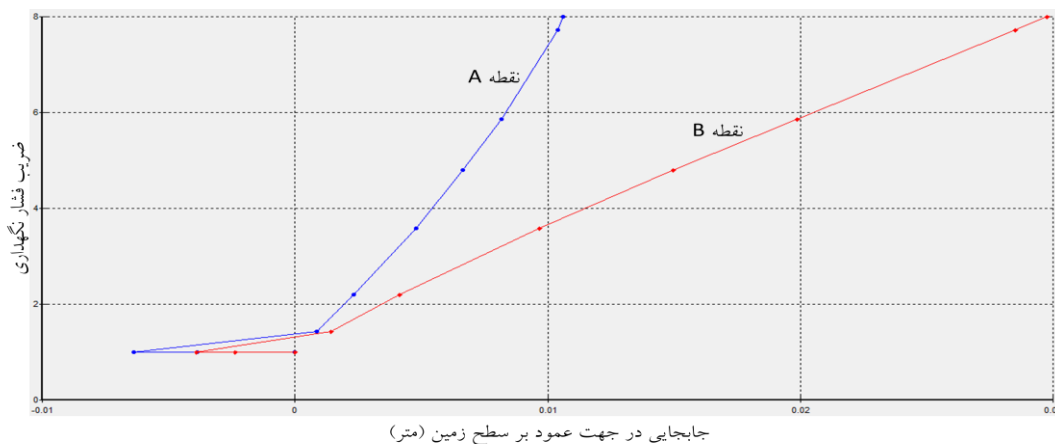
عمق روباره و تراز آب زیرزمینی از سطح به ترتیب ۱۱/۹ و ۱۲/۳ است. شیب تونل نیز ۰/۲ درصد است. دو مقطع ۵ و ۶ هر دو بین دو گمانه یکسان قرار دارند پس پارامترهای خاک در آنها برابراند.

جدول ۵-۷. مشخصات خاک مقطع ۶

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۰/۶-۵/۶ ۷/۱-۲۱/۶ ۲۴/۵-۳۰	۱۶/۸	۲۰/۴	۵۳	۳۱
ماسه	۵/۶-۷/۱ ۲۱/۶-۲۴/۵	۱۷/۷	۲۰/۸	۱۸	۳۳
شن	۰-۰/۶	۱۷/۵	۲۰/۶	۲۰	۳۲

فشار نگهداری واقعی ۹۲ کیلو پاسکال بوده و فشار اولیه اولیه ۱۱۸ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. گرادیان فشار نگهداری ۲۰/۴ کیلو پاسکال بر متر بدست آمد. مقدار ضریب فشار اولیه هنگام ریزش ۰/۱۶۸۵ بوده که در نهایت فشار نگهداری ۴۰ کیلو پاسکال با فاکتور ایمنی ۲ بدست می آید.

فشار اولیه در فاز سوم در تاج تونل ۹۸ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. ضریب فشار نگهداری برای بالازدگی ۴ در نظر گرفته شده که در نتیجه آن فشار نگهداری ۱۹۶ کیلو پاسکال با فاکتور ایمنی ۲ بدست می آید. در شکل ۵-۱۵ جابجایی عمودی کل دو نقطه سطحی A و B که به ترتیب در فواصل ۳ و ۶ متر سینه کار قرار دارند، نشان داده شده است.



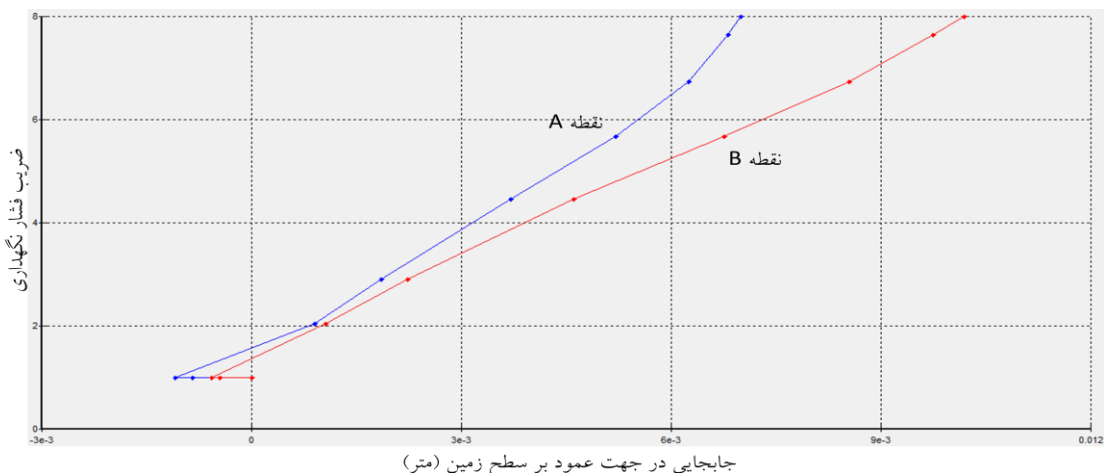
شکل ۵-۱۵. جابجایی عمودی کل نقاط A و B در فازهای سوم و چهارم در مقطع ۶ (فاصله افقی A و B از سینه کار به- ترتیب ۳ و ۶ متر)

۵-۳-۷- مقطع ۷

عمق روباره و تراز آب زیرزمینی در این مقطع به ترتیب ۱۱/۷ و ۱۷/۳ متر و شیب تونل ۱/۴۳ درصد است. فشار واقعی نگهداری ۴۱ کیلوپاسکال بوده و فشار اولیه برای محاسبات فازهای اول و دوم ۱۲۱ کیلوپاسکال با گرادیان ۲۰/۹ کیلوپاسکال بر متر در نظر گرفته شده است. ضریب فشار نگهداری ۰/۰۲۸۲ بوده که به ازای آن فشار نگهداری با فاکتور ایمنی ۲، ۷ کیلوپاسکال خواهد بود.

جدول ۵-۸. مشخصات خاک مقطع ۷

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۳/۳-۶/۳	۱۷/۳	۲۰/۷	۳۳	۲۳
ماسه	۱-۳/۳ ۱۹-۳۰	۱۷/۸	۲۰/۹	۱۴	۳۶
شن	۰-۱ ۶/۳-۱۹	۱۸	۲۰/۹	۱۵	۳۳



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)

فشار اولیه نگهداری در تاج تونل برای فازهای سوم و چهارم ۱۰۱ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. مقدار ضریب فشار نگهداری در برابر بالازدگی $\frac{2}{1185}$ بدست آمد که به ازای آن فشار نگهداری با فاکتور ایمنی ۲، ۱۱۰ کیلوپاسکال بدست آمد. در شکل ۵-۱۶ جابجایی نقاط سطحی A و B که به ترتیب در فواصل ۱۰ و ۱۵ متری سینه کار قرار دارند، نشان داده شده است.

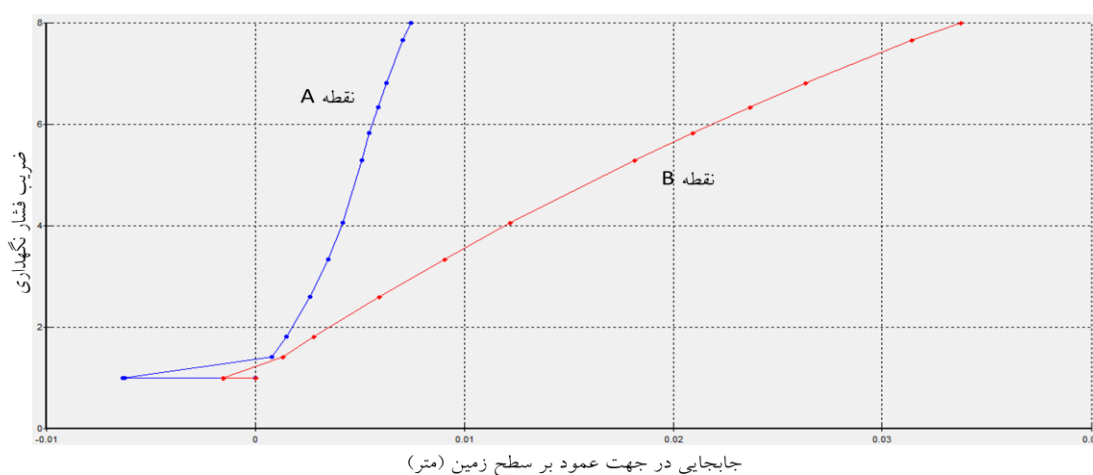
۵-۳-۸ - مقطع ۸

عمق روباره و تراز آب زیرزمینی به ترتیب ۱۱ و $\frac{22}{2}$ متر و شیب تونل $\frac{0}{2}$ درصد است. مشخصات خاک این مقطع در جدول ۵-۹ آورده شده‌اند. فشار واقعی نگهداری ۳۰ کیلوپاسکال است. فشار اولیه نگهداری برای فازهای اول و دوم، ۱۱۴ کیلوپاسکال با گرادیان $\frac{20}{7}$ کیلوپاسکال بر متر محاسبه شده است. سینه کار در پایان فاز دوم ریزش نمی‌کند.

جدول ۵-۹. مشخصات خاک مقطع ۸

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۱/۸-۳/۹ ۷/۸-۹/۶ ۱۲/۹-۱۹/۵	۱۷/۲	۲۰/۶	۳۸	۲۴
ماسه	۰-۱/۸ ۳/۹-۷/۸ ۱۹/۵-۳۰	۱۷/۹	۲۱	۱۷	۳۵
شن	۹/۶-۱۲/۹	۱۸	۲۰/۹	۱۵	۳۳

فشار اولیه برای دو فاز نهایی ۹۴ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. مقدار ضریب فشار نگهداری ۴/۵ و با احتساب فاکتور ایمنی ۲ فشار نگهداری در برابر بالازدگی ۲۱۲ کیلو پاسکال بدست می آید. در شکل ۱۷-۵ جابجایی نقاط A و B که در فواصل ۳ و ۱۰ متری از سینه کار قرار دارند، نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۵. 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)

۵-۳-۹- مقطع ۹

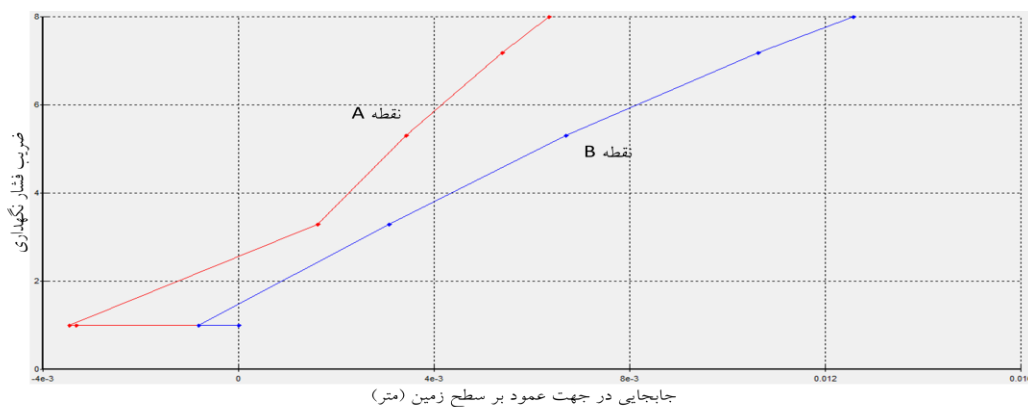
عمق روباره و تراز آب زیرزمینی به ترتیب ۱۵/۸ و ۲۵ متر و شیب تونل ۱/۴۶ درصد است. مشخصات لایه-های خاک در جدول ۵-۱۰ آمده است.

جدول ۵-۱۰. مشخصات خاک مقطع ۹

نوع خاک	عمق (متر)	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	۱۱/۸-۱۷	۱۶/۹	۲۰/۵	۶۰	۲۷
ماسه	۲/۴-۳/۹ ۱۷-۲۵/۴	۱۹	۲۱/۶	۶۰	۴۰
شن	۰-۲/۴ ۳/۹-۱۱/۸ ۲۵/۴-۳۰	۱۸/۵	۲۱/۲	۵۵	۴۰

فشار واقعی نگهداری ۲۰ کیلو پاسکال بوده و فشار اولیه نگهداری برای ریزش در تاج تونل ۱۳۴

کیلو پاسکال با گرادیان ۲۱/۵ کیلو پاسکال بر متر محاسبه شده است. سینه کار در این مقطع ریزش نکرد.



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)

با در نظر گرفتن فشار اولیه ۱۱۴ کیلوپاسکالی، ضریب فشار ۵/۳۰۴ برای فشار اولیه در نظر گرفته شد که به ازای آن فشار نگهداری در برابر بالازدگی با فاکتور ایمنی ۲، ۳۰۳ کیلوپاسکال می‌شود.

جابجایی عمودی نقاط سطحی A و B که به ترتیب در فواصل ۶ و ۲۰ متری از سینه‌کار قرار دارند در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.

۵-۴- نتیجه‌گیری

روش‌های عددی سه بعدی از بهترین ابزار برای برآورد فشار سینه‌کار هستند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان پیچیده‌ترین شرایط زمین شناسی را مدل کرده و نتایج قابل قبولی بدست آورد. در این فصل ابتدا کاربردهای مختلف روش‌های عددی در تونلسازی معرفی شده سپس مدلسازی و برآورد فشار نگهداری در ۹ مقطع از قطعه چهارم خط سه متروی تهران با استفاده از نرم افزار PLAXIS^{3D} Tunnel انجام شد.

در برآورد فشار نگهداری برای ریزش، با کاهش فشار نگهداری تا صفر در مقاطع ۱، ۸ و ۹ ریزش رخ نداد. در بیشتر مقاطع فشار نگهداری محاسبه شده، مساوی یا کمتر از نصف فشار واقعی بود در حالیکه فاکتور ایمنی ۲ در محاسبه آنها لحاظ شده بود. لازم بذکر است که فشار محاسبه شده برای تاج تونل بوده و مقادیر واقعی مربوط به محور تونل هستند.

برای محاسبه فشار نگهداری که در آن بالازدگی اتفاق می‌افتد از پایش جابجایی نقاط سطحی که در اثر افزایش فشار نگهداری بوجود می‌آید، استفاده شد. نتایج این روش به جز در مقطع ۳ با نتایج روش‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی انطباق مناسبی داشت. در فصل آینده نتایج روش عددی با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مقایسه می‌شوند.

فصل ششم

مقایسه نتایج روش‌های عددی و شبیه‌سازی مونت کارلو برای برآورد فشار

نگهداری

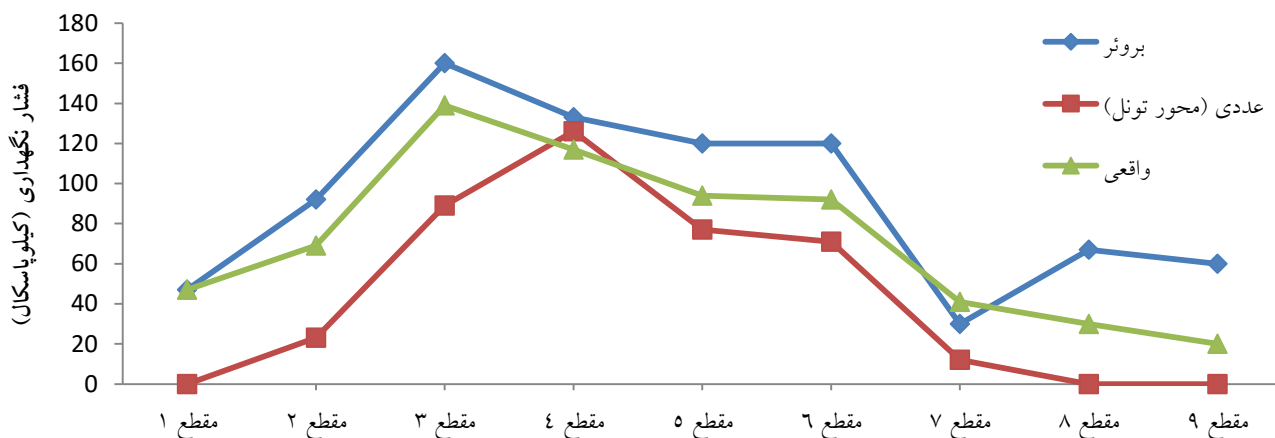
۶-۱- مقدمه

در فصول گذشته روش‌های مختلف برآورد فشار نگهداری سینه‌کار مورد بررسی قرار گرفت. از انواع این روش‌ها می‌توان به روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی اشاره کرد. در فصل چهارم با هدف کاهش عدم قطعیت از تکنیک مونت‌کارلو استفاده شد. از دو روش تحلیلی بروئر و تجربی COB برای برآورد فشار نگهداری در مقابل ریزش سینه‌کار و از روش بالتائوس و یک روش جدید برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی استفاده شد. در فصل پنجم، از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS^{3D} Tunnel برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار استفاده شد. در فصل حاضر نتایج این روش‌ها با یکدیگر و با مقادیر واقعی مقایسه و اعتبار سنجی می‌شوند.

۶-۲- مقایسه نتایج بدست آمده برای فشار نگهداری سینه‌کار در مقابل ریزش

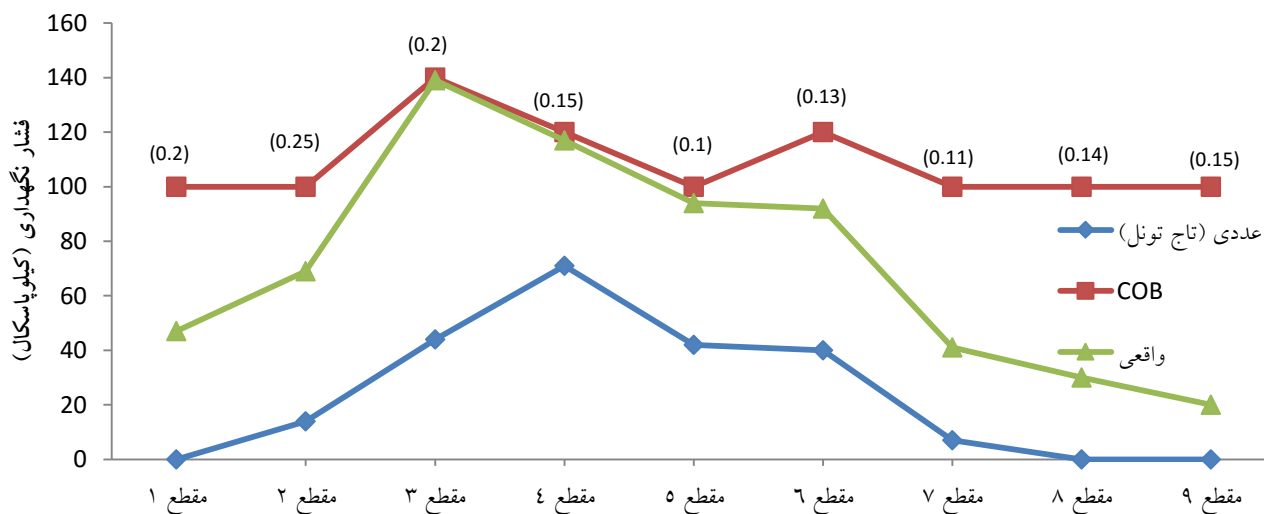
برای برآورد فشار سینه‌کار، شبیه‌سازی پارامترهای مورد نیاز در روابط بروئر با تکنیک مونت‌کارلو انجام شد. شبیه‌سازی ۵۰۴۱ بار تکرار شد. ارزیابی نتایج با تعیین احتمال فاکتور ایمنی صورت گرفت. مقدار فاکتور ایمنی در نظر گرفته شده برای این روش ۱/۱ و احتمال آن ۰/۱۵ است (احتمال فاکتور ایمنی در مقطع ۳، ۰/۱۷ است). نتایج حاصل از روش عددی نیز با فاکتور ایمنی ۲ محاسبه شد. در شکل ۶-۱ نتایج روش‌های عددی و بروئر در محور تونل با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است.

به جز مقاطع ۱ و ۷ فشار نگهداری حاصل از روش بروئر از مقادیر واقعی بیشتر است. این اختلاف در بدترین حالت به ۴۰ کیلوپاسکال می‌رسد. فشار نگهداری حاصل از روش عددی در محور تونل در تمام مقاطع به جز در مقطع ۴، کمتر از فشار واقعی بود. نتایج روش COB (در تاج تونل) در تمام مقاطع از مقادیر واقعی بیشتر بود (شکل ۶-۲). در مقاطع ۳ و ۴ نتایج این روش به نتایج واقعی نزدیک بود در حالیکه در بقیه مقاطع اختلاف زیادی وجود داشت (مقادیر واقعی مربوط به محور تونل هستند).



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



شکل ۶-۲. مقایسه نتایج روش عددی (فاکتور ایمنی=۲) و COB (فاکتور ایمنی ۱/۱، اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور

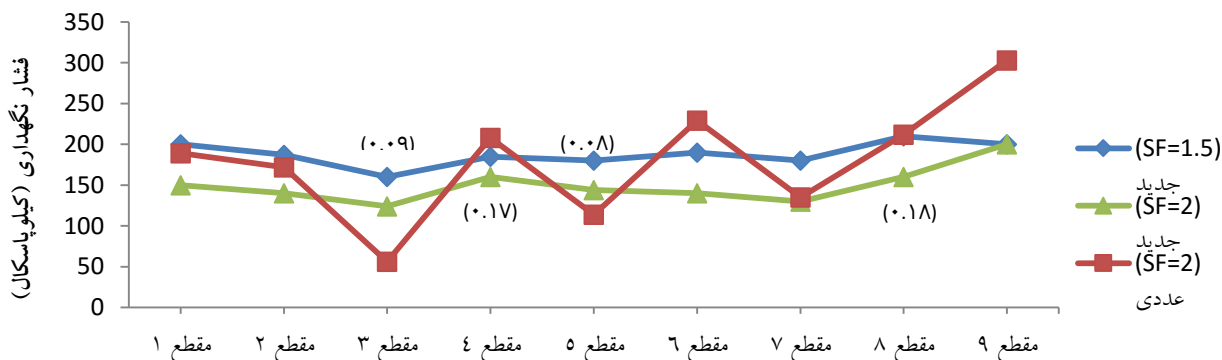
ایمنی هستند) در تاج تونل با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه

۳-۶- مقایسه نتایج بدست آمده برای فشار نگهداری سینه کار در مقابل بالازدگی

محاسبات روش بالتائوس برای دو مقدار فاکتور ایمنی $1/5$ و 2 با احتمال $0/1$ انجام شد. در بیشتر مقاطع، نتایج روش بالتائوس با فاکتور ایمنی $1/5$ نزدیکی بیشتری به نتایج روش عددی داشت. در شکل ۳-۶، مقایسه‌ای بین نتایج این روش‌ها صورت گرفته است. در این شکل مقدار احتمال فاکتور ایمنی در مقطعی که به آن اشاره نشده، $0/1$ است.



شکل ۳-۶. مقایسه نتایج روش عددی و بالتائوس (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال $0/1$ است) در مقاطع مورد مطالعه



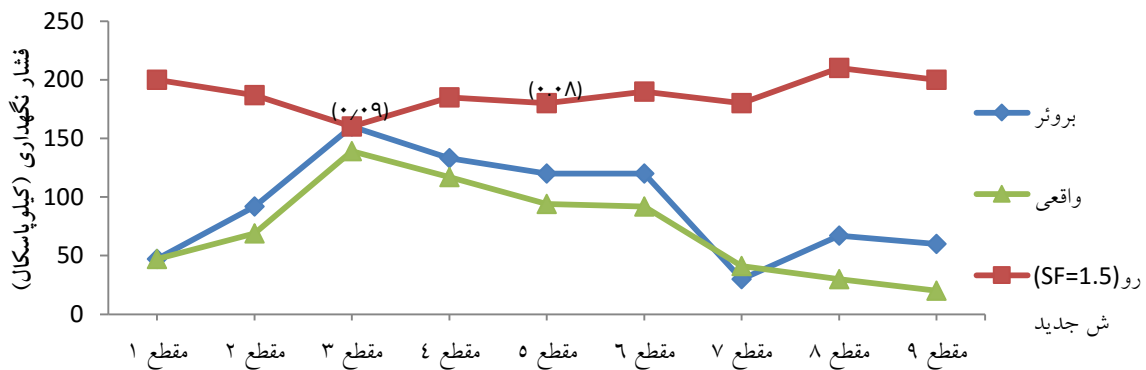
شکل ۴-۶. مقایسه نتایج روش‌های عددی و جدید (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال $0/1$ است) در مقاطع مورد مطالعه

نتایج روش جدید نیز برای دو فاکتور ایمنی $1/5$ و 2 انجام شده است. نتایج حاصله از فاکتور ایمنی $1/5$ با احتمال $0/1$ تطابق بیشتری با نتایج روش عددی داشت. با توجه به مقدار فشار نگهداری حاصل از روش عددی برای بالازدگی در مقطع 3 ، می‌توان اعتبار بیشتری برای نتایج دو روش دیگر قائل شد. در نمودار شکل $6-4$ ، نتایج روش عددی و روش جدید مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

6-4- مقایسه کلی

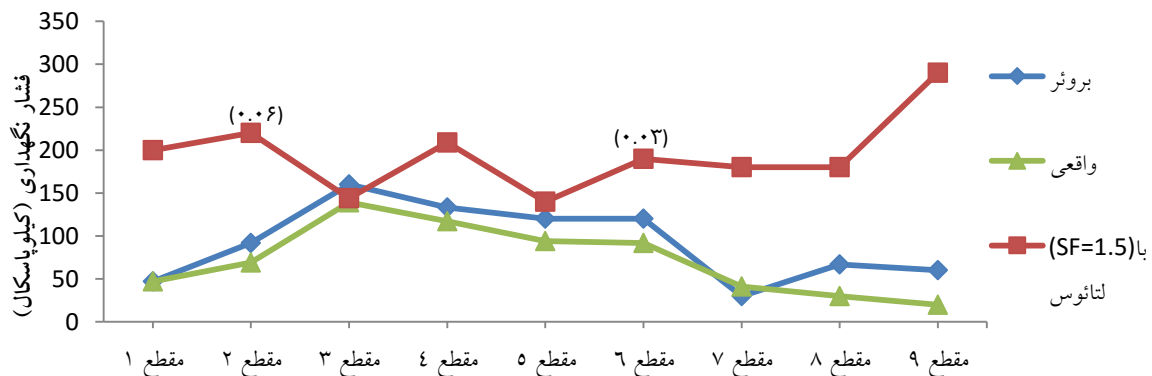
همانطور که در فصل اول به آن اشاره شد، اپراتور دستگاه متعادل کننده فشار زمین برای دستیابی به نرخ بهینه پیشروی نیاز به تغییر دادن فشار نگهداری سینه‌کار بصورت ممتد دارد بنابراین وجود حد بالا و پایین برای فشار نگهداری برای جلوگیری از بالازدگی و ریزش حائز اهمیت است. با مشخص شدن میزان بهینه فشار نگهداری در برابر بالازدگی و ریزش در هر مقطع، می‌توان حد بالا و پایین برای فشار نگهداری تعیین کرد. در شکل $6-5$ از نتایج روش بروئر و روش جدید (فاکتور ایمنی و احتمال آن به ترتیب $1/5$ و $0/1$) به عنوان حد پایین و بالا استفاده شده و از نتایج واقعی برای اعتبار سنجی استفاده شده است. در حالتی دیگر از روش‌های بروئر و بالتائوس (فاکتور ایمنی و احتمال آن به ترتیب $1/5$ و $0/1$) برای حد پایین و بالا استفاده شد (شکل $6-6$).

با استفاده از نتایج روش عددی برای حد بالا و پایین و مقایسه آنها با مقادیر واقعی، مشخص می‌شود که این روش به جز در مقطع 3 بازه مناسبی را برای فشار نگهداری تعیین می‌کند (شکل $6-7$). اگرچه بازه مذکور فشار نگهداری واقعی را در خود جای می‌دهد، اختلاف فشار نگهداری ریزش و بالازدگی در آن زیاد است. متوسط این اختلاف 136 کیلوپاسکال و در بدترین حالت به 303 کیلوپاسکال می‌رسد.



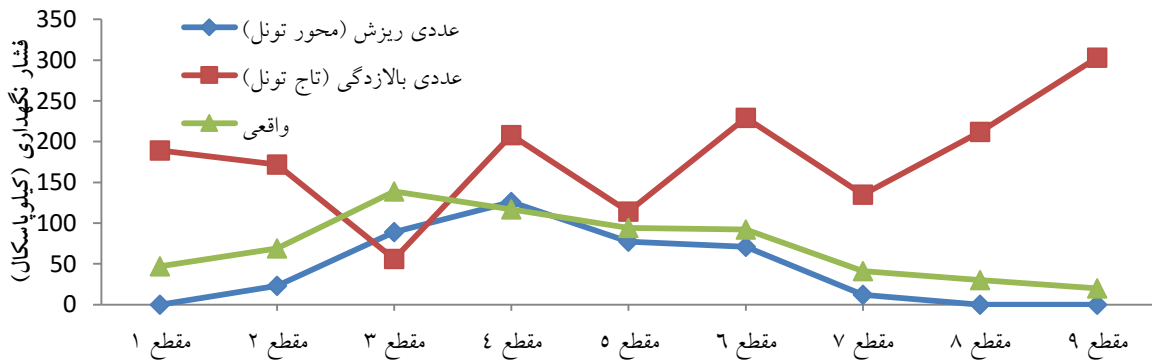
شکل ۵-۶. مقایسه نتایج روش بروئر و روش جدید (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال

۰/۱ است) با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه



شکل ۶-۶. مقایسه نتایج روش بروئر و بالتائوس (اعداد داخل پرانتز احتمال فاکتور ایمنی هستند در غیر اینصورت احتمال

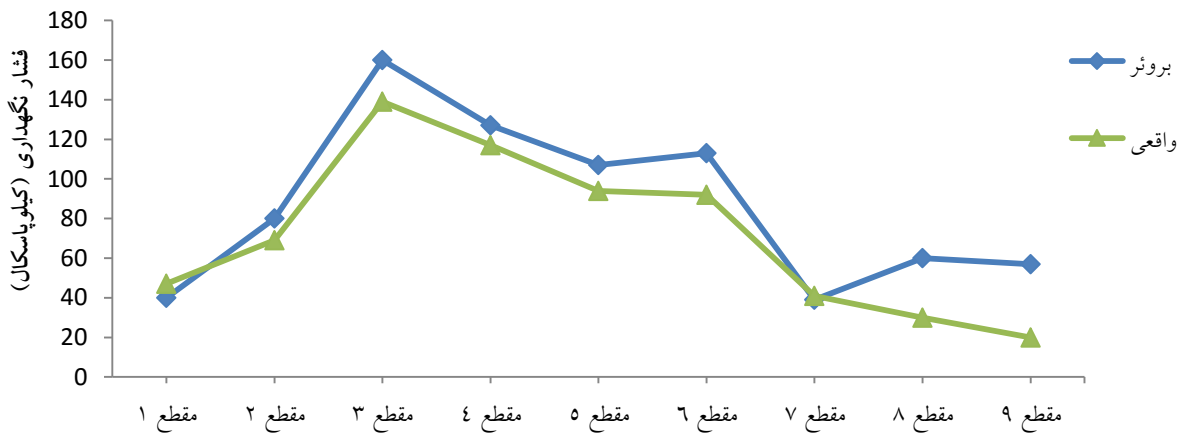
۰/۱ است) با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه



شکل ۷-۶. مقایسه نتایج روش عددی (فاکتور ایمنی=۲) برای ریزش و بالازدگی با مقادیر واقعی در مقاطع مورد مطالعه

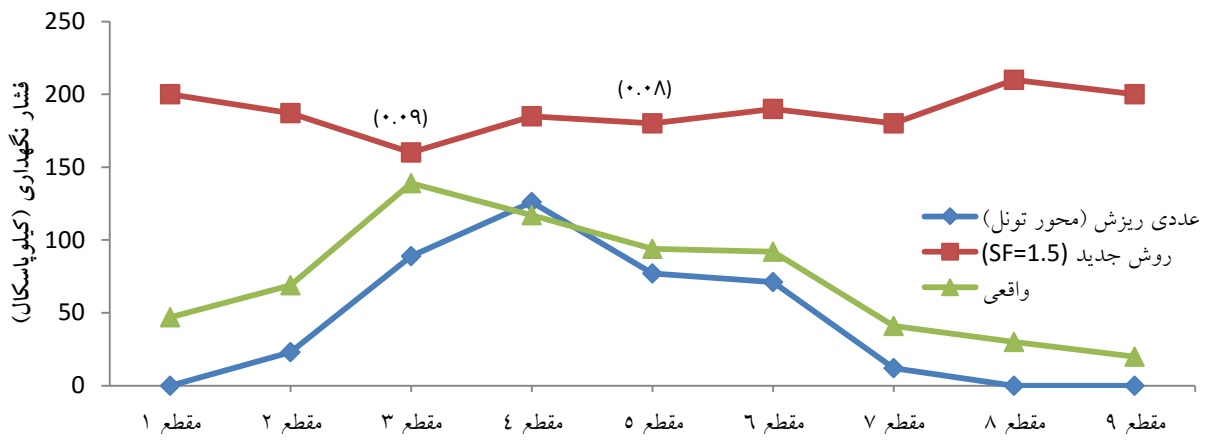
۵-۶- نتیجه‌گیری

نتایج روش‌های مختلف برای برآورد فشار سینه‌کار در برابر ریزش و بالازدگی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج روش بروئر با فاکتور ایمنی ۱/۱ بزرگتر اما نزدیک به مقادیر واقعی بود. متوسط اختلاف ۲۲ کیلوپاسکال است. بدون در نظر گرفتن فاکتور ایمنی نتایج این روش به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شود (شکل ۶-۸).



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

نتایج حاصل از روش COB به جز در دو مقطع (۳ و ۴) تطبیق مناسبی با داده‌های واقعی نداشت. در پایان مقادیر بدست آمده برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار در برابر بالازدگی با استفاده از روش‌های عددی، بالتائوس و روش جدید، مورد مقایسه قرار گرفتند. استفاده از شبیه‌سازی و قرار دادن نتایج آن در روابط روش‌های بروئر و جدید، محدوده مناسب را برای فشار نگهداری سینه‌کار بدست می‌دهد اگرچه نتایج حاصل از روش بروئر از مقادیر واقعی بیشترند. در روشی دیگر می‌توان از نتایج روش عددی در محور تونل و روش جدید با فاکتور ایمنی ۱/۵ و احتمال ۰/۱، به‌عنوان حد پایین و بالا استفاده کرد (شکل ۶-۹).



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

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

- برآورد فشار سینه‌کار تونل باید با استفاده از روش‌های متفاوت انجام شده تا تصویر کاملی از رفتار مورد انتظار در تونل و سطح زمین بدست آید. بنابراین استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی با نقش تکمیلی نسبت به یکدیگر، به منظور گسترش نتایج دقیق حاصل از روش‌های عددی برای تعداد زیادی از ترکیبات پارامتری می‌تواند مفید واقع شود.
- استفاده از شبیه‌سازی برای هرنوع از محاسبات به‌خصوص در خاک و سنگ بسیار مفید بوده طوری که میزان عدم قطعیت را کاهش داده و به دقت نتایج می‌افزاید.
- صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی به میزان کارایی روابط هر روش بستگی دارد. روش بروئر تنها روش موجود برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار در خاک ناهمگن بود که نتایج حاصل از آن بهترین تطبیق را با مقادیر واقعی داشت.
- با بررسی نتایج شبیه‌سازی در برابر ریزش و مقایسه با مقادیر واقعی، فشار نگهداری حاصل از روش بروئر با احتمال ۱۵ درصدی کمتر بودن فاکتور ایمنی از ۱/۱، در بیشتر مقاطع به مقادیر واقعی نزدیک بود. بدیهی است که با افزایش میزان احتمال فاکتور ایمنی و کاهش فاکتور ایمنی مرجع، نتایج نزدیکی بیشتری با مقادیر واقعی خواهند داشت.
- نتایج روش COB با مقادیر واقعی انطباق مناسبی نداشت. دلیل این امر را می‌توان به معادل‌سازی از طریق میانگین‌گیری برای پارامترهای خاک و تفاوت در ویژگی‌های خاک مورد مطالعه و خاکی که این رابطه تجربی برای آن تعریف شده نسبت داد.
- بدلیل عدم وجود داده واقعی، نتایج شبیه‌سازی برای بالازدگی با نتایج روش عددی (نرم‌افزار PLAXIS^{3D} Tunnel) مورد مقایسه قرار گرفت. در روش بالتائوس در پنج مقطع (۱، ۴، ۶، ۸ و ۹)، فشار نگهداری با احتمال ۱۰ درصدی و یا کمتر (۶ درصد در مقطع ۱) فاکتور ایمنی ۱/۵، به نتایج روش عددی نزدیک بودند. در مقاطع ۲ و ۵، فشار نگهداری با احتمال ۱۰ درصدی فاکتور

ایمینی ۲ به نتایج روش عددی نزدیک بودند. در مقطع ۷، فشار نگهداری با احتمال ۳ درصدی فاکتور ایمینی ۲ با مقدار فشار بالازدگی روش عددی مطابقت داشت.

- در ۶ مقطع (همه به جز مقاطع ۳، ۵ و ۹)، فشار نگهداری با احتمال ۱۰ درصدی فاکتور ایمینی ۱/۵ در روش جدید با نتایج روش عددی همخوانی داشتند. در مقطع ۳، هیچ‌یک از دو روش مذکور با نتایج روش عددی همخوانی نداشتند زیرا مقدار فشار بالازدگی در این مقطع طبق روش عددی ۵۶ کیلوپاسکال بود که از فشار نگهداری واقعی در این مقطع کمتر بود (عدم احتساب بار سطحی). در روش‌های بالتائوس و جدید با اعمال فشار نگهداری ۱۴۴ و ۱۶۰ کیلوپاسکال، احتمال فاکتور ایمینی ۱/۵ به ترتیب ۱۰ و ۹ درصد خواهد بود.

- در برآورد فشار نگهداری برای ریزش با استفاده از روش عددی، با کاهش فشار نگهداری تا صفر در مقاطع ۱، ۸ و ۹ ریزش رخ نداد. در همه مقاطع به جز مقطع ۴، فشار نگهداری محاسبه شده در محور تونل، مساوی یا کمتر از فشار واقعی بود در حالیکه فاکتور ایمینی ۲ در محاسبه آنها لحاظ شده بود.

- برای محاسبه فشار نگهداری که در آن بالازدگی اتفاق می‌افتد (روش عددی) از پایش جابجایی نقاط سطحی که در اثر افزایش فشار نگهداری بوجود می‌آید، استفاده شد. نتایج این روش به جز در مقطع ۳ با نتایج روش‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی انطباق مناسبی داشت.

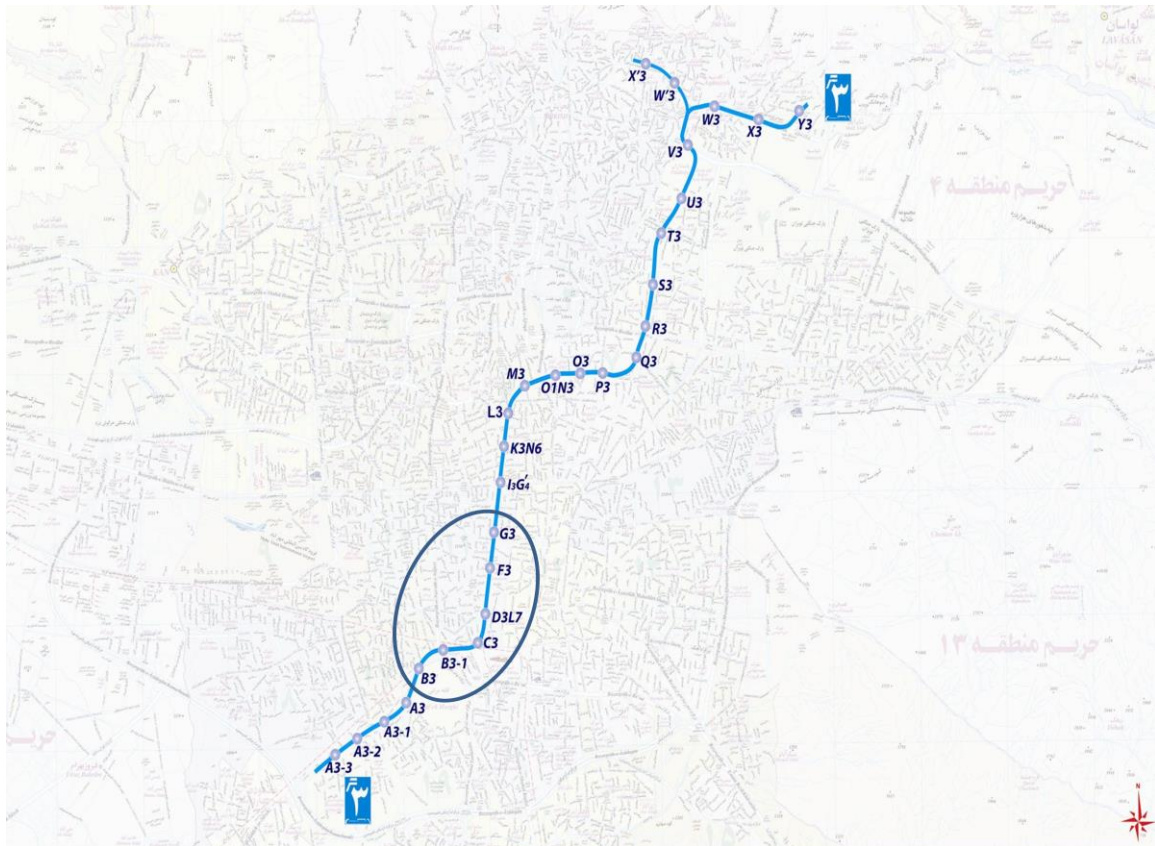
- فشار نگهداری سینه‌کار برای بالازدگی با استفاده از روش‌های مختلف مورد محاسبه قرار گرفت. از روش‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی عددی برای این منظور استفاده شد. برای دقت بیشتر استفاده از دیگر نرم‌افزارهای عددی مانند FLAC برای انجام محاسبات پیشنهاد می‌شود.

- [1] V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab and S. Xu, in *Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control*, Turin, Taylor & Francis/Balkema, 2008, pp. 1-7, 89-90, 98-104, 152-176, 391-403.
- [2] G. Russo, "Evaluating the Required Face-Support Pressure in EPBS Advance Mode", *Geodata*, vol. 71, pp. 1-3, 2003.
- [3] W. Broere, "Tunnel Face Stability and New CPT Applications", PhD thesis, Delft University of Technology, 2001, pp. 5-100.
- [4] J. Mohammadi, K. Shahriar and P. Moarefvand, "Tunnel Face Stability Analysis in Soft Ground in Urban Tunneling by EPB Shield (Case Study: 7th Line in Tehran Metro)", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 11, pp. 589-601, 2011.
- [5] D. Chapman, N. Metje and A. Stärk, "Preliminary analyses", in *Introduction of Tunnel Construction*, Abingdon, Spon Press, 2010, pp. 64-74.
- [6] ا. د. براجا و ش. طاحونی، "اصول مهندسی ژئوتکنیک. ج. ۱. مکانیک خاک"، تهران، ۱۳۷۱، ص. ۳۸-۷۵، ۴۱۸-۳۷۳.
- [7] S. H. Kim, "Large Tunnels for Transportation Purposes and Face Stability of Mechanically Driven Tunnels in Soft Ground", PhD thesis, The University of Texas at Austin, 2010, pp. 141-153.
- [8] G. Anagnostou and K. Kovari, "Face Stability in Slurry and EPB Shield Tunnelling", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Mair and Taylor(eds), pp. 453-458, 1996.
- [9] M. Ahmed and M. Iskander, "Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 27, pp. 101-110, 2012.
- [10] Y. C. Hun, "Stability and Collapse Mechanism of Unreinforced and Forpole-Reinforced Tunnel Headings", PhD thesis, National University of Singapor, 2011, pp. 9-13, 16-19.

- [11] "گزارش مطالعات ژئوتکنیک مسیر تونل قطعه چهارم خط سه متروی تهران"، شرکت مهندسان مشاور دریا خاک پی، ۱۳۸۷.
- [12] "گزارش مطالعات تکمیلی ژئوتکنیک قطعه چهارم از خط سه متروی تهران"، شرکت مهندسين مشاور رادپی قائم، تهران، ۱۳۸۹.
- [13] R. W. shonkwiler and F. Mendivil, *Explorations in Monte Carlo Methods*, New York: Springer, 2009, pp. 1-10.
- [14] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008, pp. 49-56.
- [15] م. عطائپور "مدل سازی و شبیه سازی در معادن"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۹.
- [16] J. A. Swanson and R. A. Miller, "LRFD Bridge Design: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications-Loading and General Information," University of Cincinnati, 2007.
- [17] وزارت راه و ترابری معاونت آموزش تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل "مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه آهن"، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۳.
- [18] K. Yamamoto, A. V. Lyamin, D. W. Wilson, S. W. Sloan and A. J. Abbo, "Stability of a circular tunnel in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading," *Computers and Geotechnics*, vol. 38, pp. 504-515, 2011.
- [19] R. P. Chen, L. J. Tang, D. S. Ling and Y. M. Chen, "Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method," *Computers and Geotechniques*, vol. 38, pp. 187-195, 2011.
- [20] N. D. Toan, "TBM and Lining-Essential Interfaces," MSc thesis, University of Technology of Turin, 2006, pp. 160-162.
- [21] "PLAXIS 3D Tunnel Reference Manual," A.A.BALKEMA Publishers, 2001.
- [22] J. Shirlaw and S. Boone, "Factors in the Variability of Measured Surface Settlements over EPB driven Tunnels in Soft Clay," in *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Colorado, Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2007, pp. 757-767.

پیوست ۱

پروفایل طولی مسیر تونل در قطعه مورد مطالعه



شکل پیوست ۱-۱. مسیر خط ۳ متروی تهران و محدوده قطعه چهارم (قسمتی که EPBS در آن استفاده می‌شود)

پیوست ۲

داده‌های پارامترهای خاک و منحنی‌های توابع توزیع احتمال تطبیق داده
شده بر آنها

۱- داده‌های پارامترهای خاک

داده‌های مربوط به پارامترهای مهم خاک در برآورد فشار نگهداری نظیر چسبندگی، زاویه اصطکاک و وزن مخصوص در این پیوست ارائه می‌شوند. این داده‌ها از انجام تست‌های صحرایی و آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های حاصل از حفاری گمانه‌های اکتشافی بدست آمده‌اند. مکان گمانه‌های حفاری شده در طول مسیر در شکل پیوست ۱-۲ ضمیمه شده است. در ادامه داده‌های پارامترهای خاک در جدول پیوست ۲-۲ آورده شده‌اند. به منظور سهولت در جانمایی گمانه مربوط به هر نمونه از علائم اختصاری زیر استفاده شده است (جدول پیوست ۱-۲). مجموع گمانه‌های حفاری شده در مسیر ۳۶ عدد بوده که بدلیل نزدیکی تعدادی از آنها در نقاطی از قبیل ایستگاه، از ۱۶ عدد گمانه برای تهیه پهنه‌بندی ژئوتکنیکی مسیر استفاده شده است. اطلاعات مربوط به تست‌های انجام شده بر روی نمونه‌های حاصل از گمانه BH-C14 موجود نبود.

جدول پیوست ۱-۲. علائم اختصاری مربوط به هر گمانه

نام گمانه	کیلومتر	علائم اختصاری	نام گمانه	کیلومتر	علائم اختصاری	نام گمانه	کیلومتر	علائم اختصاری
B.3-0-1	-۲۳۷	A	E.3-0-2	۴۵۹۳	M	BH17M (J3/K3)	۸۴۹۸	Y
B.3-0-2	-۲۰۰	B	E.3-0-3	۴۷۱۴	N	BH18M (K3)	۸۷۵۱	Z
B.3-0-3	-۱۵۴	C	BH7M (E3/F3)	۴۹۳۸	O	BH-C1	-۱۱۰	AA
B.3-1-1	۱۳۴۸	D	BH8M (F3)	۵۲۷۸	P	BH-C2	۳۹۲	AB
B.3-1-2	۱۳۹۷	E	BH9M (F3/G3)	۵۵۳۸	Q	BH-C3	۷۱۶	AC
B.3-1-3	۱۴۳۳	F	BH10M (G3)	۶۰۱۵	R	BH-C4	۸۵۳	AD
C.3-0-1	۲۸۸۶	G	BH11M (G3/H3)	۶۳۵۸	S	BH-C5	۱۱۰۸	AE
C.3-0-2	۲۷۶۴	H	BH12M (H3)	۶۸۲۹	T	BH-C7	۱۴۴۱	AF
C.3-0-3	۲۸۳۲	I	BH13M (H3/I3)	۷۱۷۸	U	BH-C9	۱۸۴۱	AG
D.3-0-1	۳۶۴۴	J	BH14M (I3)	۷۵۱۴	V	BH-C11	۲۱۵۴	AH
D.3-0-3	۳۷۷۳	K	BH15M (I3/J3)	۷۸۵۵	W	BH-C12	۲۳۱۳	AI
E.3-0-1	۴۴۷۵	L	BH16M (J3)	۷۹۹۷	X	BH-C13	۲۸۸۴	AJ

جدول پیوست ۲-۲. داده‌های مربوط به پارامترهای خاک (علائم داخل پرانتز معرف گمانه‌ها هستند-جدول پیوست ۱-۲)

وزن مخصوص خشک (کیلونیوتن بر متر مکعب)			زاویه اصطکاک (°)				چسبندگی (کیلوپاسکال)			
شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس		شن	ماسه	رس	
					موثر	زهکشی نشده			موثر	زهکشی نشده
۱۸/۱ ^(G)	۱۸/۱(G)	۱۵/۶(A)	۳۶(G)	۳۶(G)	۳۹(AA)	۲۵(A)	۲۵(G)	۲۵(G)	۱۱(AA)	۶۰(A)
۱۸(N)	۱۷/۵(G)	۱۷/۷(A)	۳۳(N)	۳۲(G)	۳۹/۵(AA)	۲۷(B)	۱۵(N)	۲۰(G)	۲۲(AA)	۵۵(A)
۱۹(P)	۱۷/۵(G)	۱۶(A)	۴۳(P)	۳۰(G)	۳۹(AB)	۲۰(B)	۶۰(P)	۱۰(G)	۲۱(AB)	۲۸(A)
۱۹(P)	۱۸(J)	۱۶/۷(A)	۴۳(P)	۲۸(J)	۳۵(AB)	۳۰(C)	۶۰(P)	۵۵(J)	۱۹(AB)	۷۵(B)
۱۹(P)	۲۱(K)	۱۶/۳(B)	۳۵(P)	۳۳(K)	۳۲(AC)	۲۷(C)	۷۰(P)	۴۵(K)	۶۲(AC)	۶۵(B)
۱۹(P)	۱۹/۵(K)	۱۶/۲(B)	۳۵(P)	۳۶(K)	۳۰(AD)	۳۳(C)	۷۰(P)	۷۰(K)	۰(AC)	۶۰(C)
۱۸(P)	۱۸(K)	۱۶/۲(C)	۳۵(P)	۳۵(K)	۳۵/۵(AD)	۳۴(D)	۱۵۰(P)	۶۰(K)	۳۸(AD)	۵۰(C)
۱۸(P)	۱۹/۶(K)	۱۸/۱(C)	۴۵(P)	۴۴(K)	۳۰(AE)	۳۰(D)	۰(P)	۰(K)	۵(AD)	۶۲(C)
۱۸(P)	۱۸(L)	۱۶/۴(C)	۴۵(P)	۳۷(L)	۳۸(AE)	۱۷(D)	۰(P)	۱۰(L)	۳۳(AE)	۴۰(C)
۱۸(Q)	۱۸(N)	۱۷/۱(C)	۳۵(Q)	۳۵(N)	۳۰(AA)	۱۰(E)	۳۰(Q)	۰(N)	۰(AE)	۳۵(D)
۱۹(R)	۱۸(N)	۱۷/۴(D)	۳۲(R)	۳۵(N)	۳۹(AF)	۳۰(E)	۱۰۵(R)	۵(N)	۲۹(AF)	۱۰۵(D)
۱۹(R)	۱۷/۱(N)	۱۶/۷(D)	۴۶(R)	۳۶(N)	۳۷(AF)	۱۷(E)	۲۵(R)	۴۰(N)	۴(AF)	۶۷(D)
۱۸(R)	۱۸(O)	۱۵/۹(D)	۳۰(R)	۳۳(O)	۳۷(AG)	۲۵(E)	۶۰(R)	۳۵(O)	۴۹(AG)	۹۵(D)
۱۹(R)	۱۸(O)	۱۶/۸(D)	۴۱(R)	۳۶(O)	۳۷(AG)	۶(F)	۵۵(R)	۱۰(O)	۳۱(AG)	۶۵(E)
۱۹(R)	۱۹(O)	۱۶/۱(E)	۴۱(R)	۳۵(O)	۳۶(AH)	۶(F)	۵۵(R)	۷۰(O)	۲۶(AH)	۸۰(E)
۱۹(R)	۱۹(Q)	۱۷/۳(E)	۴۲(R)	۴۵(Q)	۳۸(AH)	۱۱(F)	۵۵(R)	۵۰(Q)	۲۷(AH)	۳۵(E)
۱۹(R)	۱۸(S)	۱۶/۶(E)	۴۲(R)	۲۵(S)	۳۷(AI)	۱۱(F)	۵۵(R)	۱۵(S)	۳۶(AI)	۴۵(E)
۱۸(R)	۱۸(S)	۱۷(E)	۳۰(R)	۳۳(S)	۳۴(AI)	۱۹(F)	۹۰(R)	۱۰(S)	۰(AI)	۲۰(F)
۱۸(R)	۱۸(S)	۱۷/۴(E)	۳۰(R)	۳۱(S)	۳۸(AJ)	۲۷(F)	۹۰(R)	۵۰(S)	۱۷(AJ)	۱۰(F)
۱۹(R)	۱۸/۵(T)	۱۶/۶(E)	۳۹(R)	۳۳(T)	۳۳(AJ)	۲۷(F)	۵۰(R)	۱۰(T)	۰(AJ)	۳۰(F)
۱۹(R)	۱۷/۵(U)	۱۵/۳(E)	۴۰(R)	۲۷(U)		۳۱(F)	۳۰(R)	۴۰(U)		۳۰(F)
۱۸/۵ ^(T)	۱۸(V)	۱۸(F)	۴۱(T)	۲۱(V)		۳۱(F)	۲۵(T)	۴۵(V)		۹۰(F)
۱۸/۶ ^(T)	۱۷/۷(V)	۱۵/۳(F)	۴۵(T)	۲۶(V)		۳۳(F)	۴۵(T)	۴۰(V)		۴۰(F)
۱۸/۵ ^(T)	۱۹(W)	۱۸(F)	۳۲(T)	۳۵(W)		۲۶(G)	۳۰(T)	۸۰(W)		۴۰(F)
۱۸/۵ ^(T)	۱۷/۴(X)	۱۷/۲(F)	۳۶(T)	۴۰(X)		۱۵(G)	۱۵(T)	۴۰(X)		۲۰(F)
۱۸/۵ ^(T)	۱۸/۲(X)	۱۸/۴(F)	۳۰(T)	۳۶(X)		۲۸(G)	۵۰(T)	۲۰(X)		۵(F)
۱۸(U)	۱۸(X)	۱۷/۹(F)	۳۷(T)	۳۳(X)		۱۵(H)	۲۵(U)	۵۰(X)		۴۰(G)
۱۷/۵ ^(U)	۱۸/۱(X)	۱۸/۴(F)	۳۴(U)	۳۶(X)		۲۷(H)	۱۰(U)	۴۵(X)		۳۵(F)

ادامه جدول پیوست ۱-۲. داده‌های مربوط به پارامترهای خاک

وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)			زاویه اصطکاک (°)			چسبندگی (کیلو پاسکال)		
شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس
						زهکشی نشده		
۱۸(U)	۱۸(X)	۱۴/۹(F)	۳۷(U)	۳۳(X)	۱۵(H)	۶۰(U)	۴۰(X)	۵۰(G)
۱۷/۵ ^(U)	۱۸/۱(X)	۱۷/۹(F)	۳۴(U)	۳۶(X)	۱۵(H)	۱۰(U)	۸۰(Y)	۴۵(H)
۱۸(U)	۱۷/۷(X)	۱۵/۴(F)	۳۰(U)	۳۰(X)	۱۵(H)	۲۵(U)	۵۰(Y)	۴۰(G)
۱۷/۵ ^(U)	۱۸(Y)	۱۶/۴(F)	۳۵(U)	۴۰(Y)	۲۷(H)	۱۰(V)	۵۰(Y)	۴۰(H)
۱۸(U)	۱۹(Y)	۱۷(F)	۳۵(V)	۲۳(Y)	۲۵(I)	۵۰(V)	۵۰(Z)	۷۳(H)
۱۷/۵ ^(V)	۱۹(Y)	۱۷(F)	۳۶(U)	۲۸(Y)	۲۵(I)	۳۰(V)	۷۵(Z)	۴۰(H)
۱۸/۵ ^(V)	۱۹/۱(Z)	۱۷/۵(J)	۲۸(U)	۴۰(Z)	۴۵(J)	۷۰(V)		۵۵(H)
۱۸/۷ ^(V)	۱۸/۵(Z)	۱۷/۱(J)	۳۰(U)	۳۷(Z)	۳۲(I)	۷۰(W)		۸۰(H)
۱۸(V)		۱۶/۲(J)	۳۰(U)		۲۸(I)	۵۵(W)		۳۵(H)
۱۹(W)		۱۵/۸(H)	۴۲(W)		۲۹(I)	۲۵(W)		۷۴(I)
۱۹(W)		۱۸(H)	۴۵(W)		۳۱(K)	۳۵(W)		۳۰(I)
۱۹(W)		۱۸(H)	۳۹(W)		۲۱(K)	۱۰(W)		۴۵(I)
۱۹(W)		۲۰/۴(H)	۲۵(W)		۳۹(K)	۴۵(W)		۴۵(I)
۱۹(W)		۱۵/۱(H)	۳۹(W)		۴۳(K)	۲۵(X)		۷۰(J)
۱۹(W)		۱۹(H)	۳۱(W)		۲۰(L)	۳۵(X)		۵۰(J)
۱۶/۸ ^(X)		۱۶/۷(H)	۳۶(X)		۱۵(M)	۷۵(X)		۱۰۰(J)
۱۷/۵ ^(X)		۱۷/۵(H)	۳۸(X)		۳۰(M)	۳۵(Y)		۴۵(K)
۱۸(X)		۱۸/۲(K)	۳۱(X)		۲۵(M)	۵۵(Y)		۲۵(K)
۱۸(Y)		۱۷(K)	۴۶(Y)		۲۵(N)	۴۰(Y)		۷۵(K)
۱۹(Y)		۱۴/۴(K)	۴۱(Y)		۳۱(O)	۷۰(Y)		۱۰(K)
۱۸(Y)		۱۵/۷(K)	۲۵(Y)		۲۸(O)	۳۰(Z)		۴۰(L)
۱۹(Y)		۱۴/۸(K)	۲۳(Y)		۲۱(O)	۳۰(Z)		۵۰(M)
۱۷/۷ ^(Z)		۱۵/۴(K)	۲۶(Z)		۱۵(P)	۵۰(Z)		۲۰(M)
۱۹/۴ ^(Z)		۱۸(J)	۳۳(Z)		۱۵(Q)	۶۰(Z)		۲۰(M)
۱۹/۳ ^(Z)		۱۷/۸(J)	۳۱(Z)		۴۶(Q)	۴۰(Z)		۳۵(N)
۱۸/۹ ^(Z)		۱۶/۵(J)	۲۵(Z)		۳۳(Q)	۳۰(AA)		۴۰(O)
۱۹/۵ ^(Z)		۱۶/۲(J)	۲۵(Z)		۳۰(S)			۴۰(O)
		۱۸/۴(J)	۳۱(Z)		۲۰(S)			۵۵(O)
		۱۹/۶(J)			۲۸(AB)			۳۵(Q)
		۱۶/۳(J)			۳۹(AA)			۱۲۵(P)
		۱۶/۲(J)			۳۲(AA)			۶۰(Q)
		۱۷/۱(K)			۳۱(AB)			۲۰(Q)
		۱۶/۵(K)			۳۰(AB)			۵۰(S)

ادامه جدول پیوست ۱-۲. داده‌های مربوط به پارامترهای خاک

وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)			زاویه اصطکاک (°)			چسبندگی (کیلو پاسکال)		
شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس
			زهکشی نشده			زهکشی نشده		
		۱۹/۱(K)			۳۰(AC)			۳۵(Q)
		۱۹/۵(K)			۲۶(AC)			۵۵(S)
		۱۴/۶(K)			۳۰(AC)			۲۵(Q)
		۱۷/۵(K)			۲۸(AC)			۴۰(S)
		۱۷/۹(L)			۳۲(AC)			۱۲(AA)
		۱۸(L)			۲۰(AC)			۱۴(AA)
		۱۶(M)			۳۶(AD)			۴۳(AB)
		۱۷/۵(M)			۳۷(AD)			۳۱(AB)
		۱۸(M)			۲۲(AE)			۲۶(AB)
		۱۴/۵(M)			۳۵(AC)			۵۱(AC)
		۱۷(M)			۲۹(AD)			۳۸(AC)
		۱۸(N)			۴۳(AD)			۲۱(AC)
		۱۸(O)			۳۱(AE)			۲۶(AD)
		۱۷/۵(O)			۲۹(AE)			۳۰(AD)
		۱۶(O)			۳۱(AE)			۳۴(AE)
		۱۸(O)			۳۰(AE)			۳۲(AE)
		۱۸(O)			۳۲(AF)			۸(AF)
		۱۹(O)			۳۸(AF)			۷(AF)
		۱۲/۷(O)			۳۳(AG)			۴۷(AF)
		۱۷/۸(S)			۲۵(AH)			۲۳(AG)
		۱۸/۵(S)			۲۵(AH)			۳۰(AG)
		۱۷/۳(AA)			۳۶(AH)			۱(AH)
		۱۶/۶(AA)			۲۹(AG)			۱۱(AH)
		۱۶/۳(AA)			۲۳(AJ)			۱۰(AH)
		۱۷(AA)						۲۶(AH)
		۱۷/۸(AB)						۱۳(AJ)
		۱۷/۱(AB)						۲۰(AJ)
		۱۶/۹(AB)						۲۱(AJ)
		۱۹/۱(AB)						۲۴(AJ)
		۱۶/۴(AB)						۴۰(AJ)
		۱۷(AC)						
		۱۸/۱(AC)						
		۱۶/۲(AC)						

ادامه جدول پیوست ۱-۲. داده‌های مربوط به پارامترهای خاک

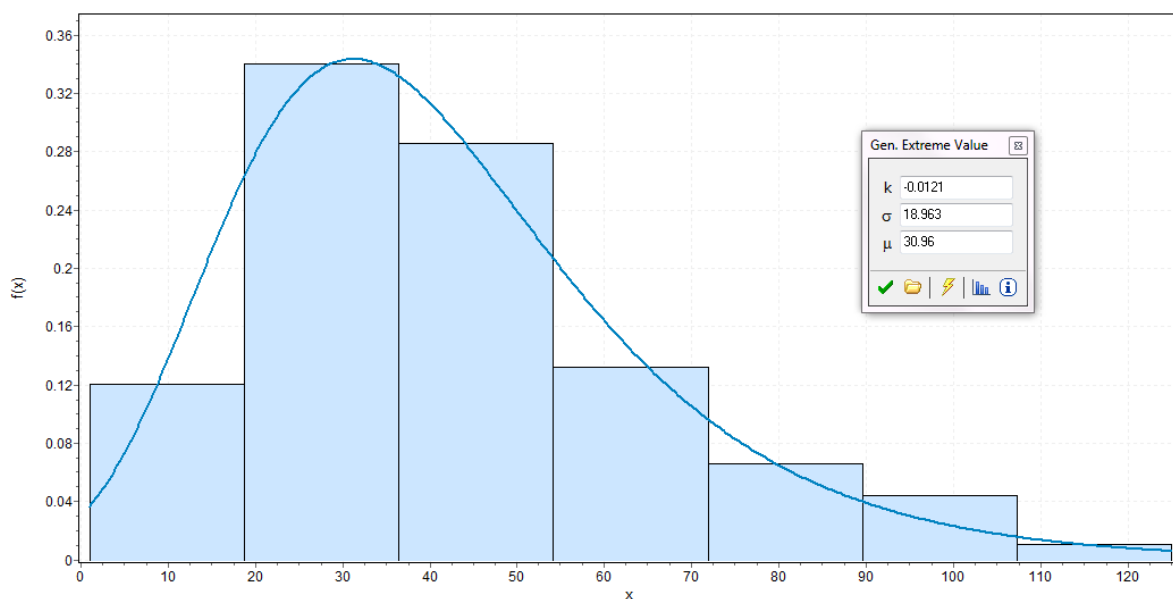
وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)			زاویه اصطکاک (°)			چسبندگی (کیلو پاسکال)		
شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس
		۱۶/۷(AC)						
		۱۷(AD)						
		۱۷/۶(AD)						
		۱۷/۷(AD)						
		۱۶/۹(AD)						
		۱۸/۲(AE)						
		۱۷/۴(AE)						
		۱۷/۴(AE)						
		۱۷/۳(AE)						
		۱۶/۵(AF)						
		۱۷/۷(AF)						
		۱۸/۶(AF)						
		۱۷/۶(AF)						
		۱۸(AF)						
		۱۷/۸(AG)						
		۱۷/۶(AG)						
		۱۷/۴(AG)						
		۱۵/۹(AG)						
		۱۶/۸(AH)						
		۱۹/۴(AH)						
		۱۷/۳(AH)						
		۱۷/۲(AI)						
		۱۷/۸(AH)						
		۱۶/۵(AH)						
		۱۷/۳(AI)						
		۱۶/۴(AI)						
		۱۷/۱(AI)						
		۱۴/۴(AI)						
		۱۶/۲(AJ)						
		۱۶/۲(AJ)						
		۱۸/۶(AJ)						
		۱۸/۳(AJ)						

ادامه جدول پیوست ۱-۲. داده‌های مربوط به پارامترهای خاک

وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)			زاویه اصطکاک (°)			چسبندگی (کیلو پاسکال)		
شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس	شن	ماسه	رس
		۱۷/۱(AJ)						
		۱۵(B)						
		۱۵/۷(B)						
		۱۶/۲(B)						
		۱۸(B)						
		۱۵/۹(B)						
		۱۵/۶(B)						
		۱۶(B)						
		۱۸/۱(J)						
		۱۷/۸(J)						
		۱۷/۸(J)						

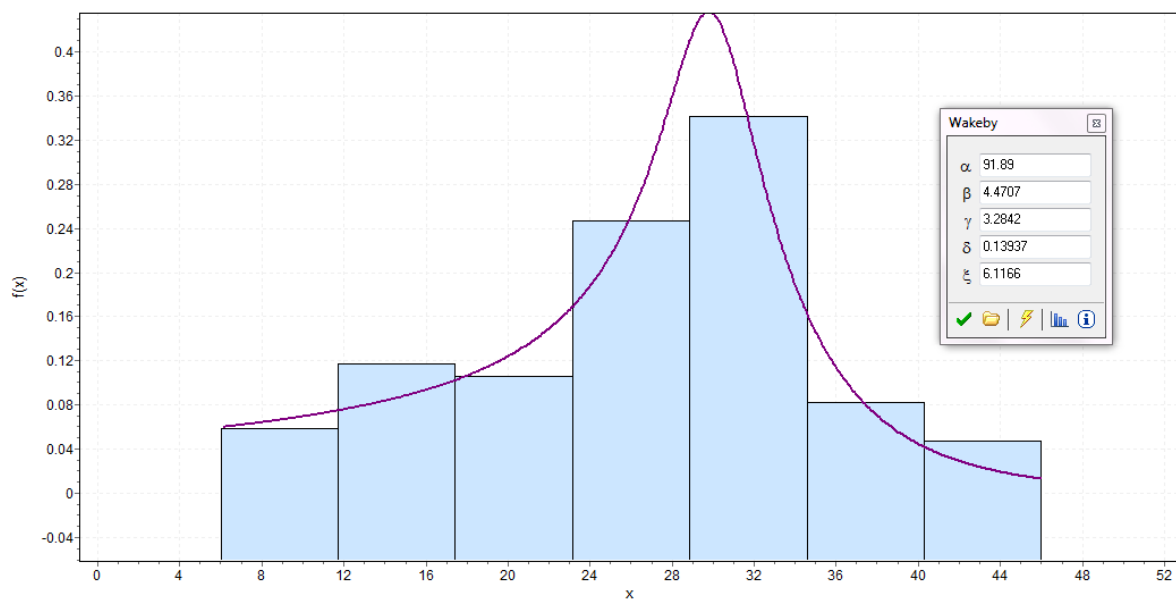
۲- توابع توزیع احتمال

در این تحقیق برای برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل از تکنیک مونت کارلو استفاده شد که در آن نیاز به تولید داده‌های تصادفی بود. به منظور ایجاد داده‌های تصادفی برای فرآیند شبیه‌سازی باید یک توزیع احتمال که بر داده‌های واقعی به خوبی تطبیق می‌یافت برای هر پارامتر تعیین می‌شد. برای این منظور از نرم‌افزار EasyFit Professional 5.5 استفاده شد. نحوه کار با نرم‌افزار و مشخصات توابع برازش شده بر داده‌های واقعی در بخش ۴-۴ شرح داده شده بنابراین در ادامه منحنی‌های مربوط به این توابع که خروجی این نرم‌افزار هستند، نمایش داده خواهند شد:

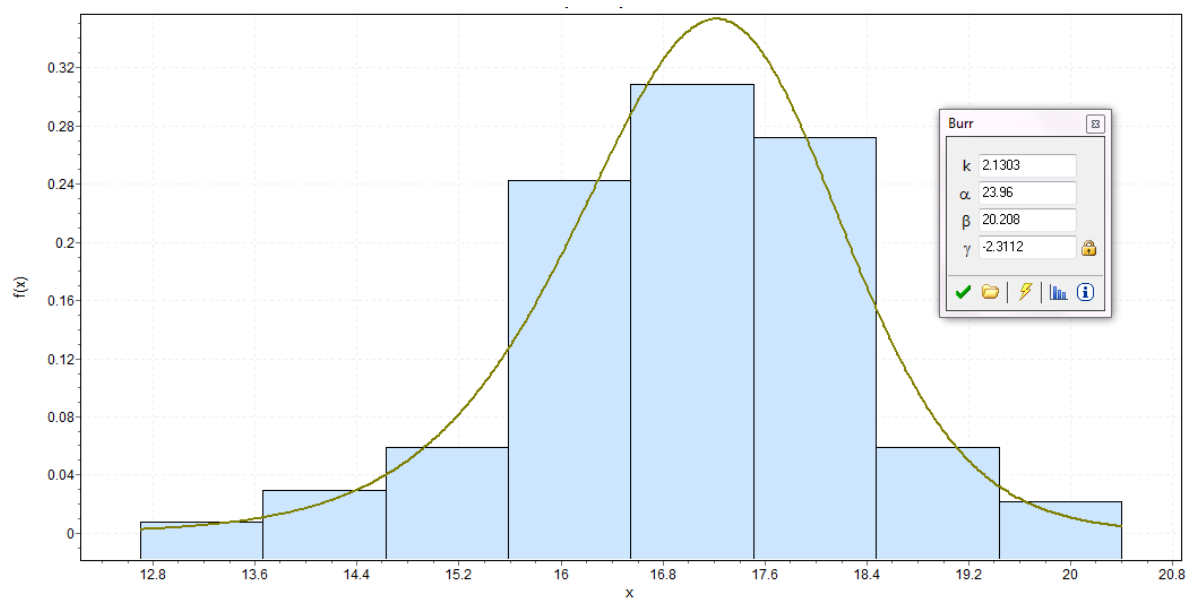


شکل پیوست ۱-۲. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های چسبندگی زهکشی نشده خاک

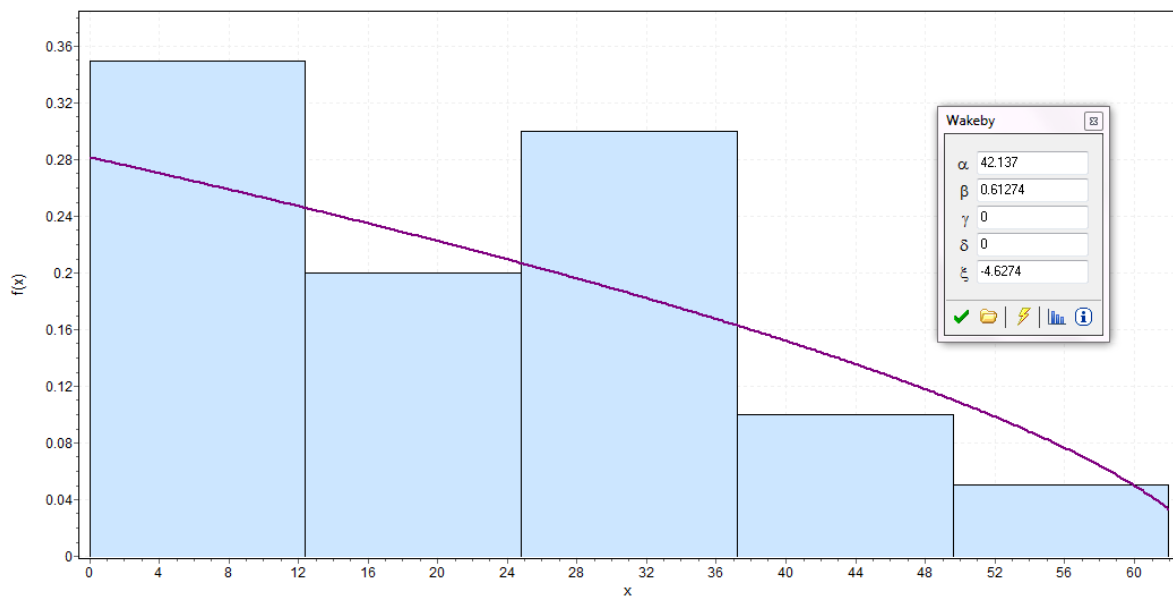
ناحیه رسی



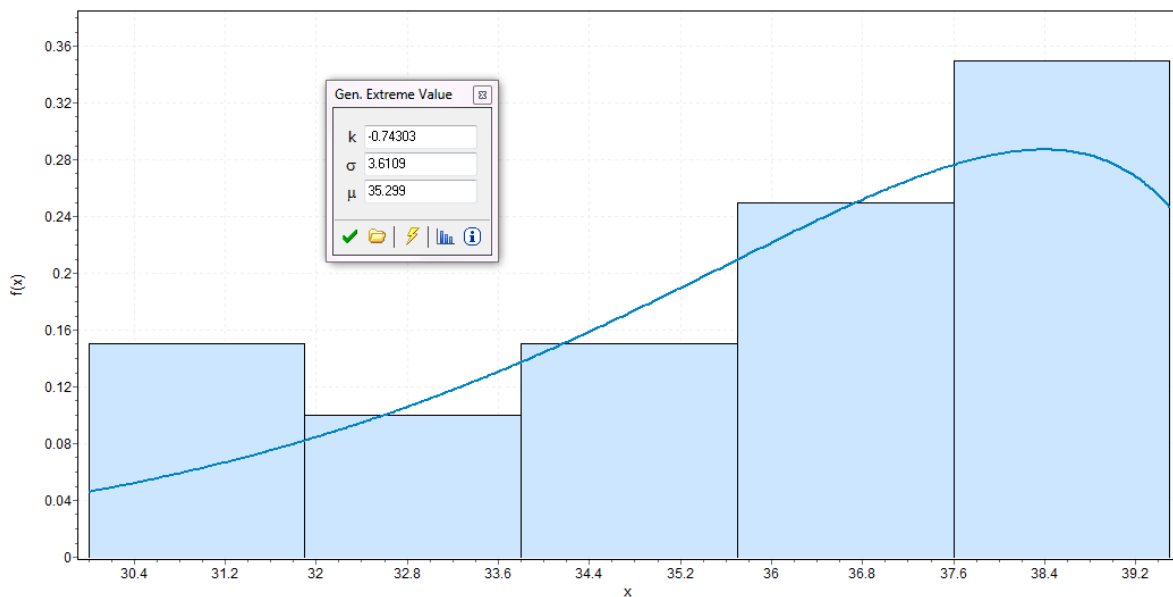
شکل پیوست ۲-۲. توزیع احتمال ویکیبای تطبیق داده شده بر داده‌های زاویه اصطکاک زهکشی نشده خاک ناحیه رسی



شکل پیوست ۲-۳. توزیع احتمال ۴-پارامتری بار تطبیق داده شده بر داده‌های وزن مخصوص خشک خاک ناحیه رسی

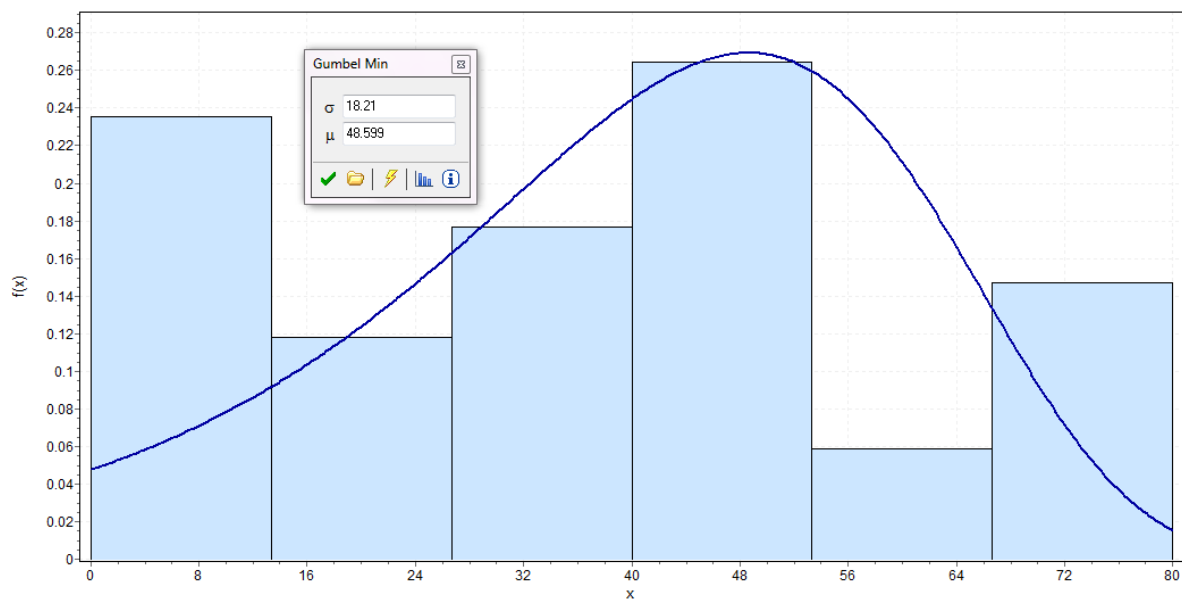


شکل پیوست ۲-۴. توزیع احتمال ویکبای تطبیق داده شده بر داده‌های چسبندگی موثر خاک ناحیه رسی

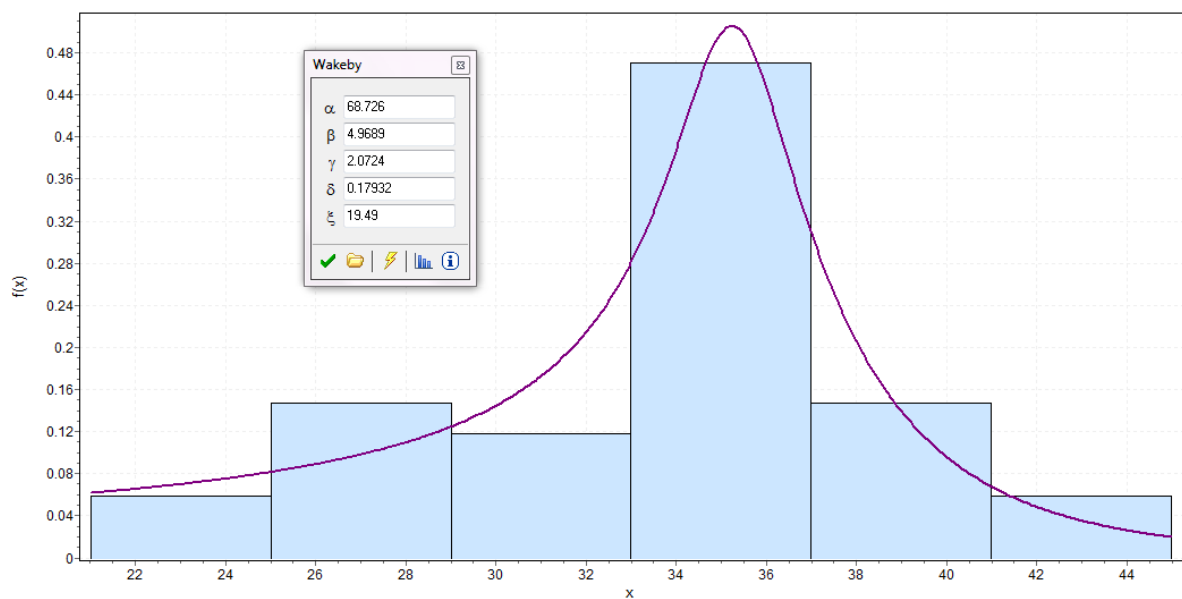


شکل پیوست ۲-۵. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های زاویه اصطکاک موثر خاک ناحیه

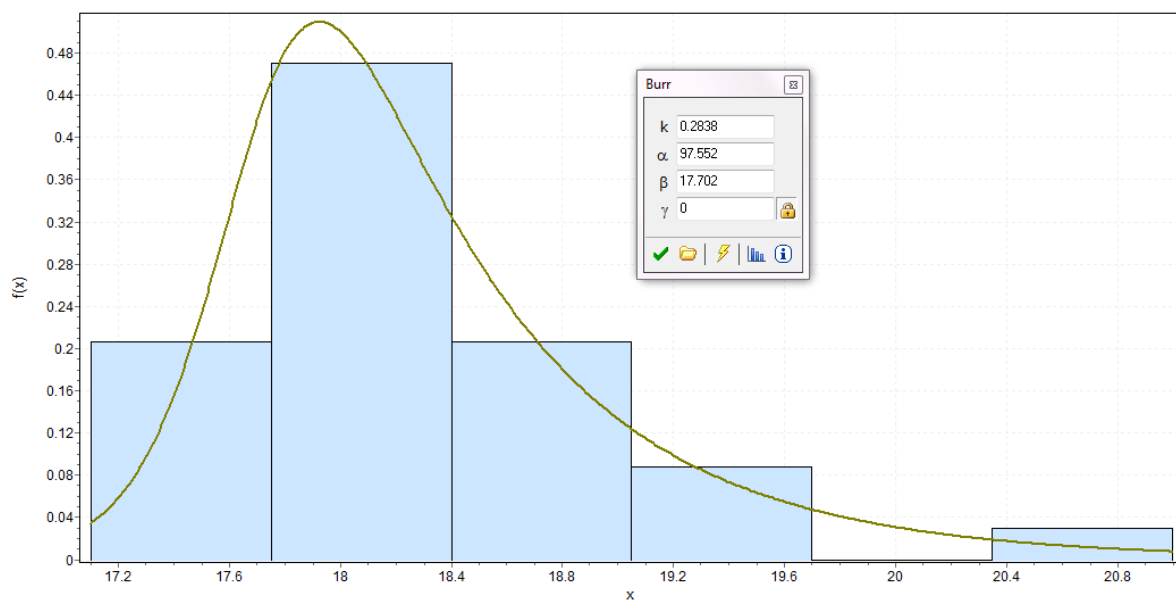
رسی



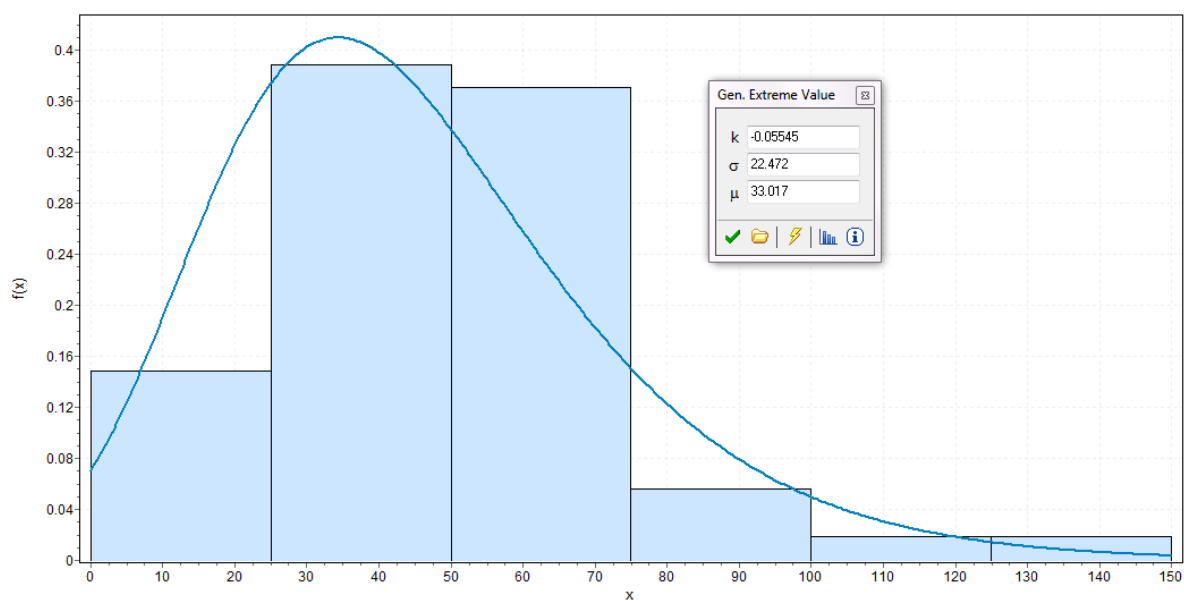
شکل پیوست ۲-۶. توزیع احتمال کمینه گامبل تطبیق داده شده بر داده‌های چسبندگی خاک ناحیه ماسه‌ای



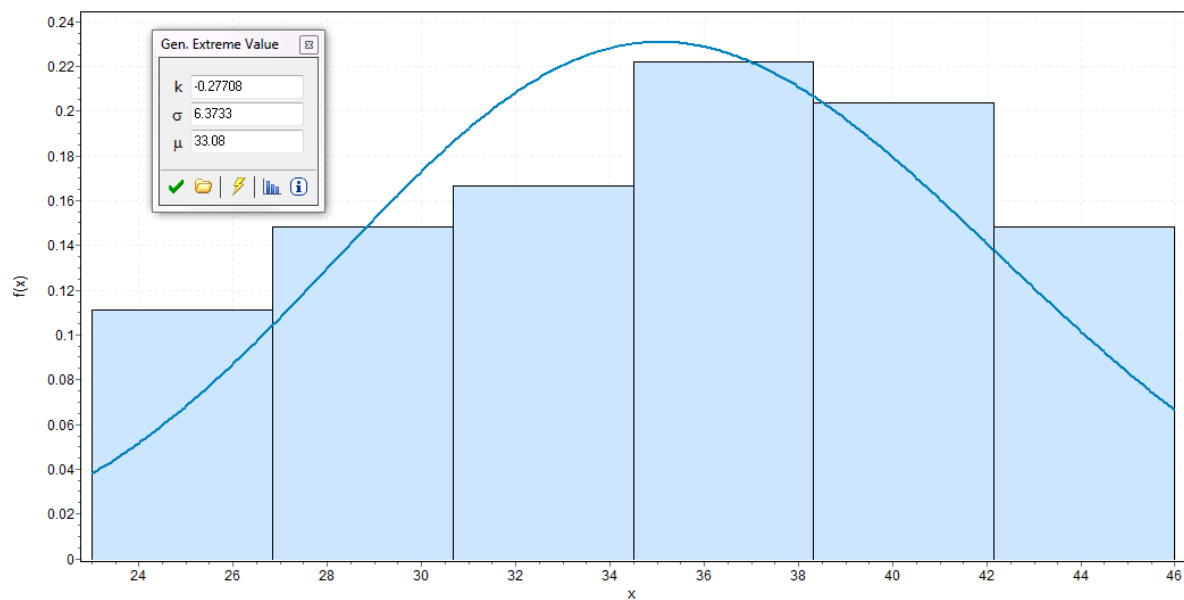
شکل پیوست ۲-۷. توزیع احتمال ویکبای تطبیق داده شده بر داده‌های زاویه اصطکاک خاک ناحیه ماسه‌ای



شکل پیوست ۲-۸. توزیع احتمال ۳-پارامتری بار تطبیق داده شده بر داده‌های وزن مخصوص خشک خاک ناحیه ماسه‌ای

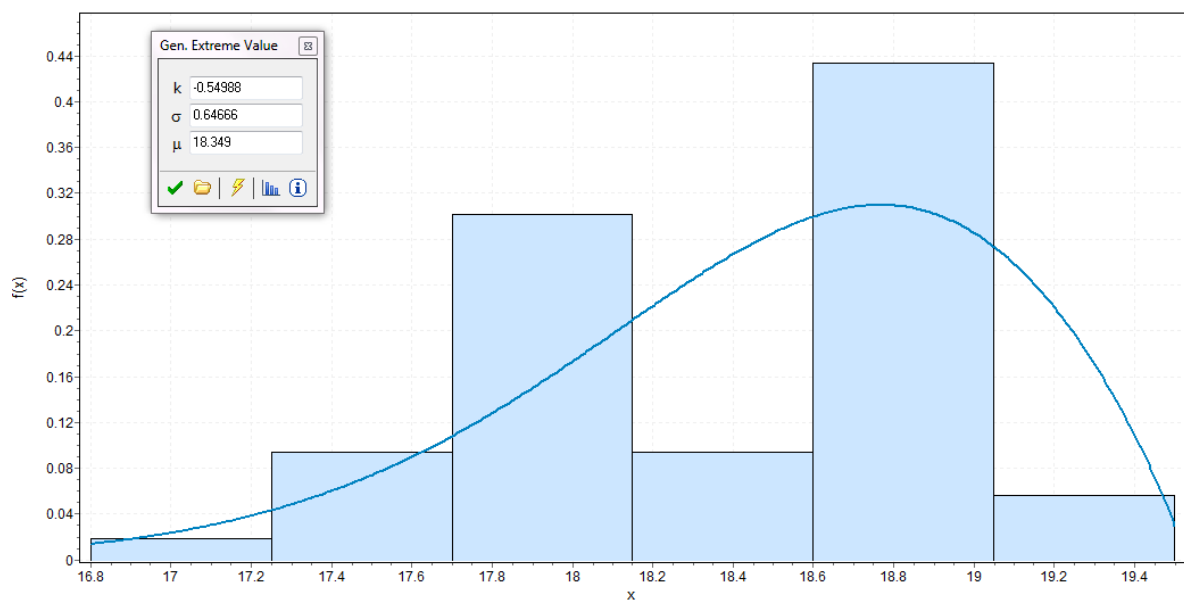


شکل پیوست ۲-۹. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های چسبندگی خاک ناحیه شنی



شکل پیوست ۲-۱۰. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های زاویه اصطکاک خاک ناحیه

شنی



شکل پیوست ۲-۱۱. توزیع احتمال مقادیر بیشینه تعمیم یافته تطبیق داده شده بر داده‌های وزن مخصوص خشک خاک

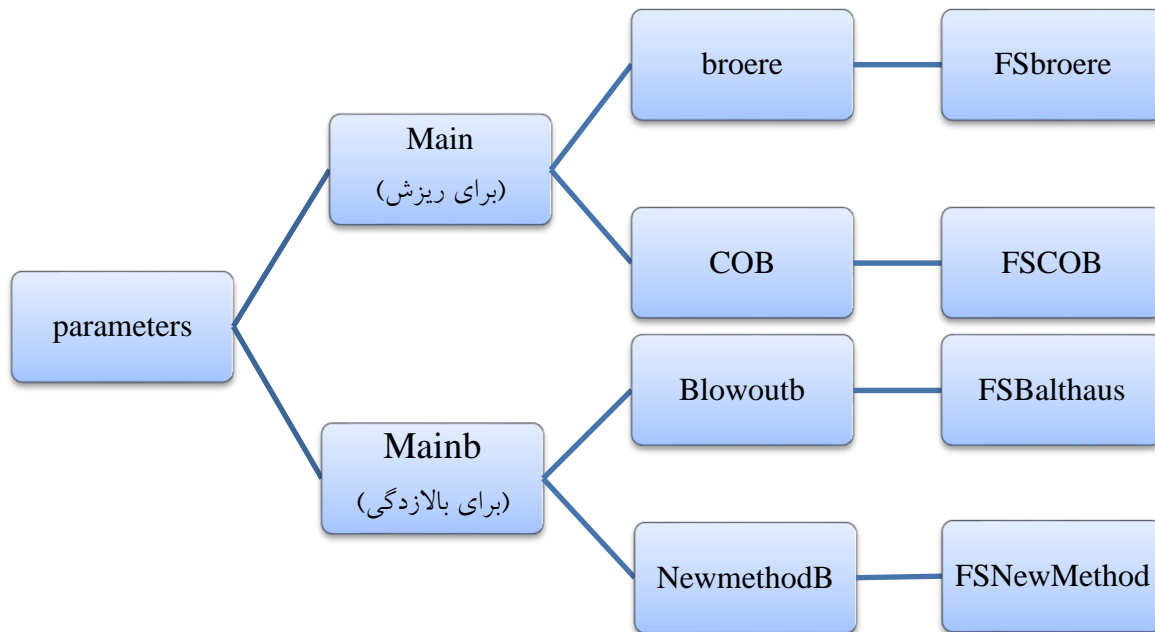
ناحیه شنی

پیوست ۳

متن برنامه‌های اجرا شده در نرم‌افزار **MATLAB**

۱- روند اجرای برنامه‌ها

در ابتدا برای انجام شبیه‌سازی، برنامه پارامترها باید اجرا شود. در مرحله بعدی با توجه به مقصود نهایی باید یکی از دو برنامه Main یا Mainb اجرا شوند. خروجی‌های این دو برنامه تنش عمودی در حالت عادی و با در نظر گرفتن قوسی شدن خاک هستند. با اجرای برنامه مربوط به هر روش ۵۰۴۱ جواب برای فشار نگهداری تولید می‌شود. سپس با اجرای برنامه فاکتور ایمنی برای هر رابطه، احتمال فاکتور ایمنی دلخواه بدست می‌آید. روند کلی اجرای برنامه‌ها در MATLAB در شکل ۱ این پیوست نشان داده شده است. در ادامه متن همه برنامه‌ها آمده است.



شکل پیوست ۳-۱. مراحل اجرای برنامه‌های برآورد فشار نگهداری در MATLAB

۲- متن برنامه‌ها

متن برنامه پارامترها:

```
tic
z=rand(71);
C=zeros(71);
phi=zeros(71);
ECg=zeros(71);
ECs=zeros(71);
Ephis=zeros(71);
Ephig=zeros(71);
SWd=zeros(71);
SWsc=zeros(71);
Cg=zeros(71);
phig=zeros(71);
SWdg=zeros(71);
SWsg=zeros(71);
Cs=zeros(71);
Ephi=zeros(71);
phis=zeros(71);
EC=zeros(71);
SWds=zeros(71);
SWss=zeros(71);
for i=1:1:71
    for j=1:1:71
        f=z(i,j);
        EC(i,j)=-4.6274+(42.137*(1-(1-f)^0.61274)/0.61274);
        % EC represents effective cohesive force in clay and silt
        % category
        if EC(i,j)<0
            EC(i,j)=0;
        end
        Ephi(i,j)=(3.619*(((log(f))^0.74303)-1)/-0.74303)+35.299;
        % Ephi represents effective friction angle in clay and silt
        % category in degree
        if Ephi(i,j)<0
            Ephi(i,j)=0;
        end
        C(i,j)=(18.963*(((log(f))^0.0121)-1)/-0.0121)+30.96;
        % C represents cohesive force in clay and silt
        % category
        if C(i,j)<0
            C(i,j)=0;
        end
        phi(i,j)=6.1166+(91.89*(1-(1-f)^4.4707)/4.4707)-
            (3.2842*(1-(1-f)^-.13937)/.13937);
        % phi represents friction angle in clay and silt
        % category in degree
        if phi(i,j)<0
            phi(i,j)=0;
        end
    end
end
```

```

end
SWd(i,j)=(20.208*(((1/(1-f))^4.4694)-1)^.0417)-2.3112;
% SWd represents dry specific weight in clay and silt
% category
if SWd(i,j)<0
    SWd(i,j)=0;
end
void=(2.7*9.81/SWd(i,j))-1;
SWsc(i,j)=((2.7+void)*9.81)/(1+void);
%SWsc represents saturated specific weight in clay and silt
%category
Cg(i,j)=(22.472*(((1-f)^.05545)-1)/-.05545)+33.017;
% Cg represents cohesive force in gravel
if Cg(i,j)<0
    Cg(i,j)=0;
end
phig(i,j)=(6.3733*(((1-f)^.27708)-1)/-.27708)+33.08;
% phig represents friction angle in gravel in degree
if phig(i,j)<0
    phig(i,j)=0;
end
SWdg(i,j)=(.64666*(((1-f)^.54988)-1)/-.54988)+18.349;
% SWdg represents dry specific weight in gravel
if SWdg(i,j)<0
    SWdg(i,j)=0;
end
void=(2.6*9.81/SWdg(i,j))-1;
SWsg(i,j)=((2.6+void)*9.81)/(1+void);
%SWsc represents saturated specific weight in gravel
%category
Cs(i,j)=(18.21*(log(-log(1-f))))+48.599;
% Cs represents Cohesive force in sand
if Cs(i,j)<0
    Cs(i,j)=0;
end
phis(i,j)=19.49+(68.726*(1-(1-f)^4.9689)/4.9689)-
(2.0724*(1-(1-f)^-.17932)/.17932);
% phis represents friction angle in sand
if phis(i,j)<0
    phis(i,j)=0;
end
SWds(i,j)=(17.702*(((1-f)^(-1/.2838))-1)^(1/97.552)));
% SWds represents amounts of dry specific weight in sand
if SWds(i,j)<0
    SWds(i,j)=0;
end
void=(2.65*9.81/SWds(i,j))-1;
SWss(i,j)=((2.65+void)*9.81)/(1+void);
%SWsc represents saturated specific weight in sand
%category
end
end
toc

```



```

tic
sigmak=zeros(71);
SigmaL=zeros(71);
sigmas=input('insert the amount of the surcharge pressure(kpa): ');
% sigmas is the surcharge pressure
doc=input('insert the depth of the tunnel crown(m): ');
doi=input('insert the depth of the tunnel invert(m): ');
wlt=input('insert the depth of underground water level(m): ');
radius=input('insert the radius of the bored tunnel(m): ');
m=input('insert the number of soil layers from surface to crown: ');
syms a
b=zeros(m,1);
d=zeros(m,1);
for i=1:1:m
    a(i,1)=input('insert the type of the layer: ','s');
    b(i,1)=input('insert the thickness of the layer(m): ');
end
alpha=radius;
for i=1:1:71
    for j=1:1:71
        sigma=sigmas;
        signal=sigmas;
        for k=1:1:m
            switch a(k,1)
                case 'clay'
                    gama=(SWsc(i,j)-9.81);
                    gamas=SWd(i,j);
                    ci=C(i,j);
                    kzero=1-sin(phi(i,j)*pi/180);
                    fa=phi(i,j);
                case 'clays'
                    gama=(SWsc(i,j)-9.81);
                    gamas=(SWsc(i,j)-9.81);
                    ci=EC(i,j);
                    kzero=1-sin(phi(i,j)*pi/180);
                    fa=Ephi(i,j);
                case 'sand'
                    gama=(SWss(i,j)-9.81);
                    gamas=SWds(i,j);
                    ci=Cs(i,j);
                    kzero=1-sin(phis(i,j)*pi/180);
                    fa=phis(i,j);
                case 'sands'
                    gama=(SWss(i,j)-9.81);
                    gamas=(SWss(i,j)-9.81);
                    ci=Cs(i,j);
                    kzero=1-sin(phis(i,j)*pi/180);
                    fa=phis(i,j);
                case 'gravel'
                    gama=(SWsg(i,j)-9.81);
                    gamas=SWdg(i,j);
            end
        end
    end
end

```

```

        ci=Cg(i,j);
        kzero=1-sin(phig(i,j)*pi/180);
        fa=phig(i,j);
    case 'gravels'
        gama=(SWsg(i,j)-9.81);
        gamas=(SWsg(i,j)-9.81);
        ci=Cg(i,j);
        kzero=1-sin(phig(i,j)*pi/180);
        fa=phig(i,j);
    end
    depth=b(k,1);
    sigmalf=(gamas)*b(k,1)+sigmal;
    sigmav=((alpha*(gamas))-ci)/
(kzero*tan(fa*pi/180))*(1-(exp(kzero*tan(fa*pi/180)*(depth/alpha))))+
sigma*exp(-kzero*tan(fa*pi/180)*(depth/alpha));
    sigma=sigmav;
    sigmal=sigmalf;
end
sigmak(i,j)=sigmav;
if sigmak(i,j)<0
    sigmak(i,j)=.1;
end
SigmaL(i,j)=sigmal;
end
end
toc

```

متن برنامه Mainb:

```

tic
sigmak=zeros(71);
SigmaL=zeros(71);
doc=input('insert the depth of the tunnel crown(m): ');
wlt=input('insert the depth of underground water level(m): ');
radius=input('insert the radius of the bored tunnel(m): ');
m=input('insert the number of soil layers from surface to crown: ');
syms a
b=zeros(m,1);
d=zeros(m,1);
for i=1:1:m
    a(i,1)=input('insert the type of the layer: ','s');
    b(i,1)=input('insert the thickness of the layer(m): ');
end
alpha=radius;
for i=1:1:71
    for j=1:1:71
        sigma=0;
        sigmal=0;
        for k=1:1:m
            switch a(k,1)
                case 'clay'
                    gama=(SWsc(i,j)-9.81);
                    gamas=SWd(i,j);
                    ci=C(i,j);
                    kzero=1-sin(phi(i,j)*pi/180);
                    fa=phi(i,j);

```

```

case 'clays'
    gama=(SWsc(i,j)-9.81);
    gamas=(SWsc(i,j)-9.81);
    ci=EC(i,j);
    kzero=1-sin(phi(i,j)*pi/180);
    fa=Ephi(i,j);
case 'sand'
    gama=(SWss(i,j)-9.81);
    gamas=SWds(i,j);
    ci=Cs(i,j);
    kzero=1-sin(phis(i,j)*pi/180);
    fa=phis(i,j);
case 'sands'
    gama=(SWss(i,j)-9.81);
    gamas=(SWss(i,j)-9.81);
    ci=Cs(i,j);
    kzero=1-sin(phis(i,j)*pi/180);
    fa=phis(i,j);
case 'gravel'
    gama=(SWsg(i,j)-9.81);
    gamas=SWdg(i,j);
    ci=Cg(i,j);
    kzero=1-sin(phig(i,j)*pi/180);
    fa=phig(i,j);
case 'gravels'
    gama=(SWsg(i,j)-9.81);
    gamas=(SWsg(i,j)-9.81);
    ci=Cg(i,j);
    kzero=1-sin(phig(i,j)*pi/180);
    fa=phig(i,j);
end
depth=b(k,1);
sigmalf=(gamas)*b(k,1)+sigmal;
sigmav=((alpha*(gamas))-ci)/
(kzero*tan(fa*pi/180))*(1-(exp(kzero*tan(fa*pi/180)*(depth/alpha))))+
sigma*exp(-kzero*tan(fa*pi/180)*(depth/alpha));
sigma=sigmav;
sigmal=sigmalf;
end
sigmak(i,j)=sigmav;
if sigmak(i,j)<0
    sigmak(i,j)=.1;
end
SigmaL(i,j)=sigmal;
end
end
toc

```

```

tic
sigmu=zeros(1);
sigmal2=zeros(1);
eta=zeros(1);
bta=zeros(1);
G=zeros(1);

```

متن برنامه :broere

```

tprime=zeros(10,23);
kprime=zeros(10,23);
zit=zeros(10,23);
giw=zeros(10,23);
gis=zeros(10,23);
S=zeros(10,23);
FPe=zeros(1);
facepe=zeros(71);
facepressure=zeros(71);
pw=zeros(71);
syms a1
n=input('insert the number of soil layers from crown to invert: ');
b1=zeros(n,1);
t1=zeros(n,1);
muck=zeros(4,1);
for i=1:1:n
    a1(i,1)=input('insert the type of the layer: ','s');
    t1(i,1)=input('insert the depth of the layer top from surface(m): ');
    b1(i,1)=input('insert the depth of the layer bottom from surface(m): ');
end
for i=1:1:71
    for j=1:1:71
        fp=-1000;
        SigE=sigmak(i,j);
        SigL=SigmaL(i,j);
        for k=1:1:n
            switch a1(k,1)
                case 'clay'
                    gamas=SWd(i,j);
                    gama=(SWsc(i,j)-9.81);
                    ci=C(i,j);
                    kzero=1-sin(phi(i,j)*pi/180);
                    fa=phi(i,j);
                case 'clays'
                    gamas=(SWsc(i,j)-9.81);
                    gama=(SWsc(i,j)-9.81);
                    ci=C(i,j);
                    kzero=1-sin(phi(i,j)*pi/180);
                    fa=phi(i,j);
                case 'sand'
                    gamas=SWds(i,j);
                    gama=(SWss(i,j)-9.81);
                    ci=Cs(i,j);
                    kzero=1-sin(phis(i,j)*pi/180);
                    fa=phis(i,j);
                case 'sands'
                    gamas=(SWss(i,j)-9.81);
                    gama=(SWss(i,j)-9.81);
                    ci=Cs(i,j);
                    kzero=1-sin(phis(i,j)*pi/180);
                    fa=phis(i,j);
                case 'gravel'
                    gamas=SWdg(i,j);
                    gama=(SWsg(i,j)-9.81);
                    ci=Cg(i,j);
            end
        end
    end
end

```

```

    kzero=1-sin(phig(i,j)*pi/180);
    fa=phig(i,j);
case 'gravels'
    gamas=(SWsg(i,j)-9.81);
    gama=(SWsg(i,j)-9.81);
    ci=Cg(i,j);
    kzero=1-sin(phig(i,j)*pi/180);
    fa=phig(i,j);
end
for teta=63:1:85
    gis(1,teta-62)=(((2*radius)^2)*SigE)/tan(teta*pi/180);
    sigmu=((b1(k,1)-t1(k,1))/2)*(gamas)+SigL;
    eta=(tan(fa*pi/180)*cos(teta*pi/180))-sin(teta*pi/180);
    bta=(tan(fa*pi/180)*sin(teta*pi/180))+cos(teta*pi/180);
    S(k,teta-62)=(bta/eta)*(b1(k,1)-t1(k,1));
    tprime(k,teta-62)=
    ((1/tan(teta*pi/180))*(ci+kzero*sigmu*tan(fa*pi/180))/eta)
    *(doi*(b1(k,1)-t1(k,1))-((b1(k,1)^2-t1(k,1)^2)/2));
    kprime(k,teta-62)=
    ((2*radius*ci)/(eta*sin(teta*pi/180)))*(b1(k,1)-t1(k,1));
    zit(k,teta-62)=
    ((2*radius*(b1(k,1)-t1(k,1)))/tan((fa-teta)*pi/180));
    giw(k,teta-62)=
    ((radius*(gamas))/tan(teta*pi/180))*((2*doi*(b1(k,1)- t1(k,1)))-((b1(k,1)^2)-(t1(k,1)^2)));
end
sigma2=(b1(k,1)-t1(k,1))*(gamas)+SigL;
SigL=sigma2;
muck(k,1)=gama*(b1(k,1)-t1(k,1));
end
G=(muck(1,1)+muck(2,1)+muck(3,1)+muck(4,1))/(2*radius);
S=2*radius^2*G*S;
for M=1:1:23
    for N=1:1:23
        for O=1:1:23
            for P=1:1:23
                gist=gis(1,P);
                tprimet=tprime(1,O)+tprime(2,N)+tprime(3,M)
                +tprime(4,P);
                kprimet=kprime(1,O)+kprime(2,N)+kprime(3,M)
                +kprime(4,P);
                zitt=zit(1,O)+zit(2,N)+zit(3,M)+zit(4,P);
                giwt=giw(1,O)+giw(2,N)+giw(3,M)+giw(4,P);
                SM=S(1,O)+S(2,N)+S(3,M)+S(4,P);
                FPe=(-(gist+giwt+kprimet+(2*tprimet)+SM)/zitt);
                if FPe>fp
                    facepe(i,j)=FPe;
                    fp=FPe;
                end
            end
        end
    end
end
end
switch wlt
case -1
    facepressure(i,j)=facepe(i,j);

```

```

        pw(i,j)=0;
    otherwise
        facepressure(i,j)=facepe(i,j)+(9.81*(((doi+doc)/2)-wlt));
        pw(i,j)=(9.81*(((doi+doc)/2)-wlt));
    end
end
end
toc

```

متن برنامه FSbroere:

```

tic
PP=zeros(20);
POF=zeros(20);
noi=input('insert the number of iterations: ');
x=input('insert the proposed safety factor: ');
for i=1:1:noi
    PP(i,1)=input('insert the applied face pressure(kPa): ');
end
SF=zeros(71);
FP=zeros(71);
for w=1:1:noi
    o=0;
    for i=1:1:71
        for j=1:1:71
            FP(i,j)=facepressure(i,j);
            if FP(i,j)<0
                FP(i,j)=1;
            end
            SF(i,j)=PP(w,1)/FP(i,j);
            if SF(i,j)<x
                o=o+1;
            end
        end
    end
    POF(w,1)=o/5041;
end
toc

```

متن برنامه COB:

```

tic
facepressurecob=zeros(71);
facepecob=zeros(71);
kactive=zeros(71);
MFA=zeros(71);
FA=zeros(30);
if wlt<0
    pw=0;
else
    pw=9.81*(doc-wlt);
end
for i=1:1:71
    for j=1:1:71
        for k=1:1:m
            switch a(k,1)
                case 'clay'

```

```

        fa=phi(i,j);
    case 'clays'
        fa=Ephi(i,j);
    case 'sand'
        fa=phis(i,j);
    case 'sands'
        fa=phis(i,j);
    case 'gravel'
        fa=phig(i,j);
    case 'gravels'
        fa=phig(i,j);
    end
    FA(k,1)=fa*b(k,1);
end
MFA(i,j)=(FA(1,1)+FA(2,1)+FA(3,1)+FA(4,1)+FA(5,1)+FA(6,1)
+FA(7,1)+FA(8,1)+FA(9,1))/doc;
kactive(i,j)=(1-sin(MFA(i,j)*pi/180))/(1+sin(MFA(i,j)*pi/180));
facepecob(i,j)=kactive(i,j)*sigmak(i,j)+20;
facepressurecob(i,j)=facepecob(i,j)+pw;
end
end
toc

```

متن برنامه FSCOB:

```

tic
PP=zeros(20);
POF=zeros(20);
noi=input('insert the number of iterations: ');
x=input('insert the proposed safety factor: ');
for i=1:1:noi
    PP(i,1)=input('insert the applied face pressure(kPa): ');
end
SF=zeros(71);
FP=zeros(71);
for w=1:1:noi
    o=0;
    for i=1:1:71
        for j=1:1:71
            FP(i,j)=facepecob(i,j);
            if FP(i,j)<0
                FP(i,j)=1;
            end
            SF(i,j)=PP(w,1)/(1.1*FP(i,j)+1*pw);
            if SF(i,j)<x
                o=o+1;
            end
        end
    end
    POF(w,1)=o/5041;
end
toc

```

```

tic
facepressurebe=zeros(71);
Facepressureb=zeros(71);
if wlt<0
    pw=0;
else
    pw=9.81*(doc-wlt);
end
D=2*radius;
for i=1:1:71
    for j=1:1:71
        Ga=0;
        Gs=0;
        CI=0;
        Ph=0;
        Kz=0;
        for q=1:1:m
            switch a(q,1)
                case 'clay'
                    Gama=SWd(i,j);
                    Gamas=SWsc(i,j)-9.81;
                    Ci=C(i,j);
                    Phi=phi(i,j);
                    Kzero=(1-sin(Phi*pi/180));
                case 'clays'
                    Gama=SWsc(i,j);
                    Gamas=SWsc(i,j)-9.81;
                    Ci=C(i,j);
                    Phi=phi(i,j);
                    Kzero=(1-sin(Phi*pi/180));
                case 'sand'
                    Gama=SWds(i,j);
                    Gamas=SWss(i,j)-9.81;
                    Ci=Cs(i,j);
                    Phi=phis(i,j);
                    Kzero=(1-sin(Phi*pi/180));
                case 'sands'
                    Gama=SWss(i,j);
                    Gamas=SWss(i,j)-9.81;
                    Ci=Cs(i,j);
                    Phi=phis(i,j);
                    Kzero=(1-sin(Phi*pi/180));
                case 'gravel'
                    Gama=SWdg(i,j);
                    Gamas=SWsg(i,j)-9.81;
                    Ci=Cg(i,j);
                    Phi=phig(i,j);
                    Kzero=(1-sin(Phi*pi/180));
                case 'gravels'
                    Gama=SWsg(i,j);
                    Gamas=SWsg(i,j)-9.81;
                    Ci=Cg(i,j);
                    Phi=phig(i,j);
            end
        end
    end
end

```



```

        Kzero=(1-sin(Phi*pi/180));
    end
    NGama=b(q,1)*Gama+Ga;
    NGamas=b(q,1)*Gamas+Gs;
    NCi=b(q,1)*Ci+CI;
    NPhi=b(q,1)*Phi+Ph;
    NKzero=b(q,1)*Kzero+Kz;
    Ga=NGama;
    Gs=NGamas;
    CI=NCi;
    Ph=NPhi;
    Kz=NKzero;
end
TG=Ga/doc;
TGs=Gs/doc;
TCI=CI/doc;
TPhi=Ph/doc;
TKz=Kz/doc;
facepressurebe(i,j)=
doc*(TG+((2*TCI+doc*TKz*TGs*tan(TPhi*pi/180))/D));
Facepressureb(i,j)=facepressurebe(i,j)+pw;
end
end
toc

```

متن برنامه FSBalhaus:

```

tic
PP=zeros(20);
POF=zeros(20);
noi=input('insert the number of iterations: ');
x=input('insert the proposed safety factor: ');
for i=1:1:noi
    PP(i,1)=input('insert the applied face pressure(kPa): ');
end
SF=zeros(71);
FP=zeros(71);
for w=1:1:noi
    o=0;
    for i=1:1:71
        for j=1:1:71
            FP(i,j)=facepressurebe(i,j);
            if FP(i,j)<0
                FP(i,j)=1;
            end
            SF(i,j)=(1.1*FP(i,j)+1*pw)/PP(w,1);
            if SF(i,j)<x
                o=o+1;
            end
        end
    end
end
POF(w,1)=o/5041;
end
toc

```

متن برنامه NewmethodB:

```
tic
facepressurecobb=zeros(71);
facepecobb=zeros(71);
kpassive=zeros(71);
MFA=zeros(71);
FA=zeros(30);
if wlt<0
    pw=0;
else
    pw=9.81*(doc-wlt);
end
for i=1:1:71
    for j=1:1:71
        for k=1:1:m
            switch a(k,1)
                case 'clay'
                    fa=phi(i,j);
                case 'clays'
                    fa=Ephi(i,j);
                case 'sand'
                    fa=phis(i,j);
                case 'sands'
                    fa=phis(i,j);
                case 'gravel'
                    fa=phig(i,j);
                case 'gravels'
                    fa=phig(i,j);
            end
            FA(k,1)=fa*b(k,1);
        end
        MFA(i,j)=(FA(1,1)+FA(2,1)+FA(3,1)+FA(4,1)+FA(5,1)+FA(6,1)
+FA(7,1)+FA(8,1)+FA(9,1))/doc;
        kpassive(i,j)=(1+sin(MFA(i,j)*pi/180))/(1-sin(MFA(i,j)*pi/180));
        facepecobb(i,j)=kpassive(i,j)*sigmak(i,j)+170;
        facepressurecobb(i,j)=facepecobb(i,j)+pw;
    end
end
toc
```

متن برنامه FSNewMethod:

```
tic
PP=zeros(20);
POF=zeros(20);
noi=input('insert the number of iterations: ');
x=input('insert the proposed safety factor: ');
for i=1:1:noi
    PP(i,1)=input('insert the applied face pressure(kPa): ');
end
SF=zeros(71);
FP=zeros(71);
for w=1:1:noi
    o=0;
    for i=1:1:71
```

```
for j=1:1:71
    FP(i,j)=facepecobb(i,j);
    if FP(i,j)<0
        FP(i,j)=1;
    end
    SF(i,j)=(1.1*FP(i,j)+1*pw)/PP(w,1);
    if SF(i,j)<x
        o=o+1;
    end
end
end
end
POF(w,1)=o/5041;
end
toc
```