Archive of SID

همایش ملی پژوهش های کاربردی در افق های نوین عمران و معماری
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر
NATIONAL CONFERENCE OF PRACTICAL RESEARCHES IN MODERN HORIZONS OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURAL

بررسی اثر پایدارسازی سینه کاری خروجی TBM از ایستگاه با سیستم فورپولینگ با شبیه سازی سه بعدی عددی

(مطالعه موردی مسیر غربی ایستگاه K۳ خط ۳ قطار شهری مشهد)

امید سرگزی [۱]*، محمد مهدی سروش [۲]، مصطفی قلیچی [۳] ، حمید خباز [۴]

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، موسسه مهندسی رهاب، قرب قائم، *(o۶۹sargazi@gmail.com)*
۲- کارشناس ارشد عمران، موسسه مهندسی رهاب، قرب قائم، *(m.sorush@gmail.com)*
۳- دانشجوی دکتری سازه، موسسه مهندسی رهاب، قرب قائم، *(mostafa.ghelichi@gmail.com)*
۴- کارشناس ارشد سازه، موسسه مهندسی رهاب، قرب قائم، *(h.khabbaz@student.kgut.ac.ir)*

چکیده

در مناطق شهری بعلت غالب بودن شرایط زمینی ضعیف و بخاطر مسائلی نظیر ترافیک، حمل و نقل و طرح‌ریزی تجهیزات، تونلها در اعماق کم حفر می‌شوند. در تونل سازی یکی از شیوه های موثر افزایش خصوصیات ژئومکانیکی خاک و جلوگیری از نشست زمین در سازه های زیرزمینی کم عمق، استفاده از سیستم فورپولینگ می باشد. از این سیستم می‌توان جهت ایجاد چتری از خاک تقویت شده، در جلوی سینه کار در حال پیشروی تونل به منظور جلوگیری از نشست سطح زمین و کاهش جابجایی ها استفاده نمود. به منظور پایداری سینه‌کار و همچنین کنترل نشست سطح زمین، دستگاه TBM یک فشار اعمالی به سینه‌کار وارد می‌کند. از آن‌جا که برای اعمال این فشار نیازمند حفاری خاک و بالطبع پر شدن چمبر دستگاه می‌باشد، با توجه به این‌که در ابتدای حفاری دستگاه به طور کامل در خاک قرار ندارد و همچنین به دلیل عدم ایجاد شرایط آب بند و نیز پرنشدن چمبر از مصالح حفاری شده امکان اعمال کردن فشار کامل از طریق چمبر وجود ندارد. پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد، به طول ۲۸/۵ کیلومتر و مشتمل بر ۲۴ ایستگاه خواهد بود. نحوه حفاری در این پروژه، استفاده از سیستم شفت مرکزی می باشد. بدین ترتیب که دو دستگاه حفاری مکانیزه در دو جهت غربی و شرقی و در خلاف جهت یکدیگر عملیات حفاری را انجام می دهند. بعد از ریزش حادث شده در قسمت خروجی TBM شرقی و مطالعات انجام شده بر روی گزینه های مختلف جهت پایدارسازی سینه کار مسیر غربی استفاده از سیستم فورپولینگ جهت تحکیم قسمت های ریزشی در دستور کار قرار گرفت. در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از این سیستم پایدارسازی در سینه کار شروع حفاری مسیر غربی به کمک تحلیل عددی و با استفاده از نرم افزار $FLAC^{۳D}$ پرداخته می شود.

واژه‌های کلیدی: تونل، فورپولینگ، پایدارسازی، تحلیل عددی

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

عموماً در مناطق شهری بعلت غالب بودن شرایط زمینی ضعیف و بخاطر مسائلی نظیر ترافیک، حمل و نقل و طرح‌ریزی تجهیزات، تونلها عمدتاً در اعماق کم حفر می‌شوند. از طرف دیگر تونل‌ها باید بنحوی ساخته شوند که کمترین میزان تخریب را برای سازه های سطحی به همراه آورند، بنحوی که کمترین میزان تغییر شکل را در سطح زمین داشته باشیم. همچنین تونلها در مناطق غیر شهری عمدتاً در شرایط زمینی نامناسبی که تأمین پایداری و محدود سازی تغییر شکل درهنگام حفاری نسبتاً مشکل می‌باشد، حفرمی‌شوند. بنابراین مهندسی تونل باید قادر به رفع مشکلات و مسائل به وجود آمده در مناطق شهری و غیر شهری باشد. در مواردی که مقاومت زمین پایین بوده و نیاز به محدود سازی تغییر شکلها داریم، علاوه بر تقسیم سطح تونل به قطعات کوچکتر، از روش حفاری تونل با سیستم های پایدارساز نیز به صورت همزمان استفاده میشود.

جهت استحکام سینه کار در هنگام حفاری، از روش های کمکی خاص مانند فورپولینگ استفاده می شود. در این روش از لوله های فولادی برای تشکیل یک لایه تقویتی بین تونل در حال حفر و توده سنگ و خاک بالای تونل ، برای کاهش پتانسیل نشست سطحی استفاده می گردد. فورپولینگ یک تکنیک جدید تونل‌سازی است. این تکنیک یک روش پیش تحکیمی در سازندهای ضعیف است که محل انجام آن در سینه کار تونل می باشد. این روش معمولاً در شرایط زیر بکار برده می شود:

۱ - وجود روباره کم عمق بالای تونل ۲- زمین های روان ۳- محدود کردن نواحی واریزه ای زمین۴ - سنگهای له شده و به شدت خرد شده ۵ - زمینهای سست و ضعیف

این تکنیک در نواحی که در معرض خطر هستند بکار برده می شود، یعنی جبهه کارهایی که بعد از حفاری، با توجه به شرایط خاص سنگ یا خاک، زمان کافی برای نگهداری و تحکیم وجود ندارند. از این رو، قبل از حفاری باید زون مورد نظر نگهداری یا پیش تحکیم شود. در این روش یک لایه چتری در پیشانی (بالاتر از سطح مقطع) تونل قبل از حفاری ایجاد می شود تا حفاری با سرعت و ایمنی بیشتر در زیر چتر نگهدارنده انجام شود. از جمله دلایل موفقیت تکنولوژی و روش این سیستم می‌توان به موارد زیراشاره کرد:

- روش لوله گذاری به صورت مستقل از شرایط منطقه اطراف خود عمل کرده وریسک حرکت لایه ها و شرایط مشابه زمین شناسی را کاهش می دهد.
- این روش از نظراجرا بسیارساده بوده، نیاز به ماشین آلات خاص ندارد ویک روش انعطاف پذیرو قابل ترکیب با دیگر تکنیک ها و روش های تحکیمی می باشد .
- با اجرای این روش پایداری جبهه کارافزایش، از نشست های سطحی تونل ها به مقدار زیادی جلوگیری و ایمنی عملیات حفاری، با تحکیم سقف افزایش می یابد .

روش اجرای فورپولینگ به این صورت است که در ابتدا توسط یک سیستم حفار مثل جامبودریل نسبت به حفر چال های رینگی با مشخصات و زوایای محاسبه شده و نصب همزمان لوله در این چال ها اقدام می گردد. دراین حالت با توجه به وضعیت زمین شناسی، اقدام به حفاری چال هایی با زاویه مناسب نسبت به افق روبه بالا و نصب لوله همزمان با پیشروی چال می شود و سپس عملیات تزریق با توجه به شرایط منطقه و محیط کار صورت می گیرد. وجود سوراخ در لوله ها تاثیر زیادی بر دوخته شدن آن ها به خاک و پایدارسازی آن دارد.

از روش فورپولینگ نخستین بار در اوایل دهه شصت میلادی در بلژیک جهت احداث ایستگاه مترو انت ورپ استفاده شده است. این روش بصورت گسترده ای در امریکا[۱] جهت ساخت تونل های با قطر کوچک و در ژاپن[۲] جهت احداث ایستگاه‌های مترو به کار گرفته شد. ماتسوموتو و همکاران[۳] در سال ۲۰۰۱ به شرح، کاربرد و مدلسازی روش چتری در ساخت تونل ساتسوما تاگامی در ژاپن پرداخته و نشان دادند که کاربرد روش چتری در کاهش نشست زمین در اثر حفر تونل بسیار رضایت بخش می‌باشد. پیلا و همکاران[۴] در سال ۱۹۹۶ جهت مطالعه رفتار نیمرخ تسلیح شده تونل با لوله های فایبر گلاس طولی یک سری آنالیزهای اجزای محدود سه بعدی انجام داده و در یافتند که لوله های تسلیح کننده طولی اثری مثبت بر پایداری نیمرخ حفاری داشته و سبب کاهش تغییر مکان و کوچک شدن ناحیه پلاستیک شده اطراف دهانه تونل می شوند.

www.SID.ir

Archive of SID

در سال ۲۰۰۹، دیت و همکاران[۵] با انجام یک سری آزمون های سانتریفیوژ به شبیه سازی مدل فیزیکی از حفاری تونل های کم عمق و بررسی اثر استفاده از سیستم فورپولینگ در تسلیح خاک جبهه و سینه کار پرداختند. کاهش محسوس در میزان نشست های سطحی و تغییر ناحیه پلاستیک در تاج تونل، از جمله مهمترین نتایج پژوهش ایشان است. نتایج تحقیقات دیت و همکاران با یک مدل عددی سه بعدی تفاضل محدود نیز، تایید شده است. در سال ۲۰۱۰، جونیا و همکاران[۶] به روشی مشابه به بررسی اثر طول لوله های فورپولینگ بر پایداری تونل های حفاری شده در خاک های رسی پرداختند. نتایج نشان می دهد، افزایش طول لوله ها تا مقدار تقریبی دو برابر قطر تونل منجر به افزایش پایداری شده و افزایش بیشتر اثر چندانی بر میزان پایداری نخواهد داشت. در سال ۲۰۰۹، کنتوتاناسیس و همکاران[۷] به طراحی سیستم ایستگاه های تونل خط ۳ متروی آتن با استفاده از فورپولینگ و به کمک روش عددی پرداختند. هم چنین چویی و شین[۸] در سال ۲۰۰۴ و با تحلیل های عددی خود استفاده از روش فورپولینگ چتری را روشی بهینه در پایدارسازی سنگ های ضعیف معرفی کردند. نتایج بررسی های زمانیان و دارای[۹] در سال ۱۳۸۷ که بر روی تونل شبلی قطعه ۲الف آزادراه زنجان- تبریز واقع در سینه کار سنگی ضعیف، انجام شده است، نتایج تحقیقات چویی و شین[۸] را تایید می کند. هم چنین پژوهش عددی مطهری و وفائیان[۱۰] در سال ۱۳۸۷ حاکی از اثر بازدارندگی روش سقف لوله ای بر نشست تونل و متناظرا کاهش نشست سطح زمین است.

به منظور پایداری سینه‌کار و همچنین کنترل نشست سطح زمین، دستگاه TBM یک فشار اعمالی به سینه‌کار وارد می‌کند. از آن‌جا که برای اعمال این فشار نیازمند حفاری خاک و بالطبع پر شدن چمبر دستگاه می‌باشد. با توجه به این‌که در ابتدای حفاری دستگاه به طور کامل در خاک قرار ندارد و همچنین به دلیل عدم ایجاد شرایط آب بند و نیز پرنشدن چمبر از مصالح حفاری شده امکان اعمال کردن فشار کامل از طریق چمبر وجود ندارد. در نتیجه پیشروی با استفاده از جک‌ها و اعمال نیروی تراست (thrust) صورت می پذیرد. از آن‌جایی که محدوده پیش‌رو دارای خاک منطقه نامناسب جهت حفاری (خاک درشت دانه با چسبندگی پایین) می باشد و متعاقب آن احتمال ریزش در سطح زمین خواهد بود. با توجه به تجربه بدست آمده از شروع حفاری TBM شرقی، مطابق شکل (۱) که منجر به ریزش شدید خاک در سطح زمین گردید، گروه مهندسی پروژه به بررسی گزینه های مختلف جهت پایدارسازی خاک سینه کار حفاری پرداختند. روشی که منابع مختلف آن را تایید می کردند، استفاده از سیستم پایدارساز فورپولینگ بود. در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از این سیستم و تاثیر آن بر نشست های ایجاد شده به ویژه در سطح زمین با شبیه سازی سه بعدی عددی و به کمک نرم افزار تفاضل محدود FLAC^{3D} پرداخته می‌شود.

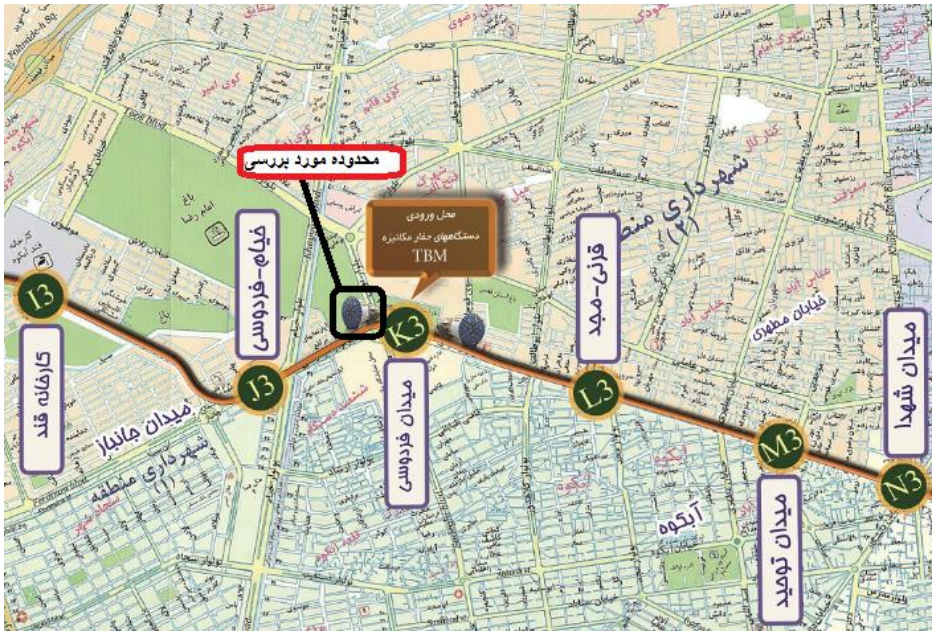
شکل۱: نمایی از ریزش صورت گرفته در محدوده ورودی **TBM** شرقی

www.SID.ir

Archive of SID

۲- محدوده بررسی و خصوصیات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی خاک در محل پروژه

پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد، به طول ۲۸/۵ کیلومتر و مشتمل بر ۲۴ ایستگاه خواهد بود که غربی ترین نقطه شهر مشهد واقع در انتهای الهیه را به جنوب شرقی شهر واقع در شهرک ابوذر متصل می کند. نحوه حفاری در این پروژه، استفاده از سیستم شفت مرکزی می باشد. بدین ترتیب که دو دستگاه حفاری مکانیزه در دو جهت غربی و شرقی و در خلاف جهت یکدیگر عملیات حفاری را انجام می دهند. شکل (۲) موقعیت و محدوده مورد بررسی را نشان می دهد.



شکل ۲: محدوده مورد مطالعه

بر اساس مطالعات صورت گرفته و نتایج آزمون های محلی و آزمایشگاهی، خصوصیات ژئوتکنیکی شفت ورودی خط ۳ قطار شهری مشهد (شفت میدان فردوسی) به صورت زیر می‌باشد:

لایه اول: این لایه با ضخامت حدود ۲متر، لایه‌ای از خاک نباتی و زراعی می‌باشد.

لایه دوم: این لایه با ضخامت حدود ۱۰متر، لایه‌ای از نوع ML و SM می‌باشد. وزن مخصوص خشک خاک این لایه حدود ۱۶کیلونیوتن برمترمکعب برآورد می‌شود. عدد آزمایش SPT برای این لایه خاک بطور متوسط ۲۵ بدست آمده است. با استفاده از آزمایش برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی برای این لایه بطور متوسط حدود ۲۷درجه و چسبندگی آن حدود ۲۰ کیلوپاسکال بدست آمده است.

لایه سوم: از عمق حدود ۱۰ تا ۱۴ متر، لایه‌ای از نوع SM می‌باشد که در آن لنزهایی از ML وجود دارد. وزن مخصوص خشک خاک این لایه به طور متوسط حدود ۱۶کیلونیوتن برمترمکعب برآورد شده است. عدد آزمایش SPT برای این لایه خاک بطور متوسط ۳۰ بدست آمده است. با استفاده از آزمایش برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی بطور متوسط حدود ۲۸درجه و چسبندگی آن حدود ۲۰ کیلوپاسکال بدست آمده است.

لایه چهارم: از عمق حدود ۱۴ تا ۲۰متر لایه‌ای از نوع SM و SP دیده می‌شود. وزن مخصوص خشک خاک این لایه به طور متوسط حدود ۱۷/۵کیلونیوتن برمترمکعب برآورد شده است. عدد آزمایش SPT برای این لایه خاک بیش از ۴۰ بدست آمده است. زاویه اصطکاک داخلی بطور متوسط حدود ۳۱درجه و چسبندگی آن حدود ۱۵ کیلوپاسکال بدست آمده است.

لایه پنجم: از عمق حدود ۲۰ تا ۳۰متر لایه‌ای از نوع SM و GM می‌باشد. وزن مخصوص خشک خاک این لایه بطور متوسط ۱۷/۵کیلونیوتن برمترمکعب می‌باشد. عدد آزمایش SPT برای این لایه خاک حدود ۵۰ بدست آمده است. زاویه

www.SID.ir

Archive of SID

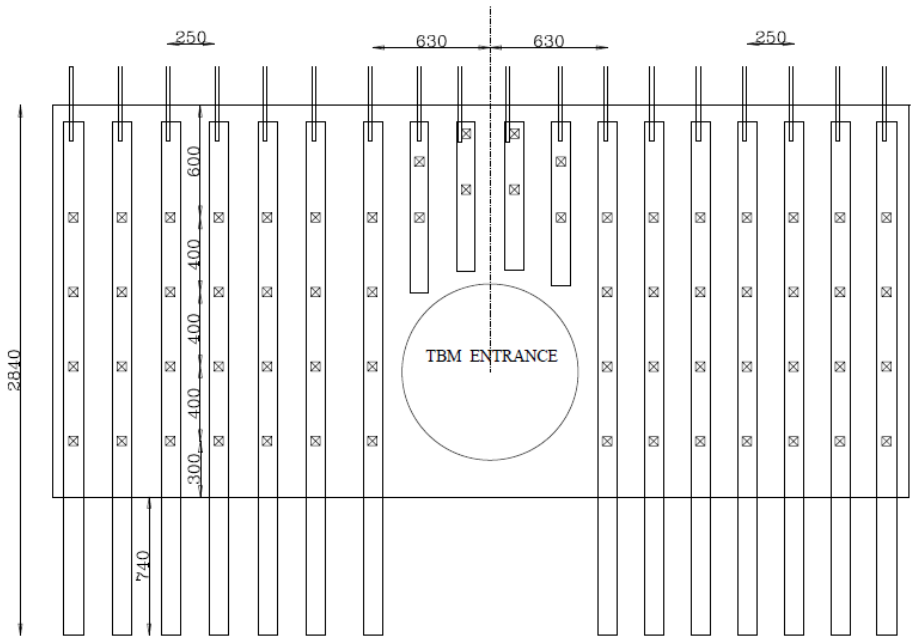
اصطکاک داخلی بطور متوسط حدود ۳۲درجه و چسبندگی آن حدود ۱۰ کیلوپاسکال بدست آمده است. جدول (۱) خلاصه ای از پارامترهای ژئوتکنیکی را ارائه می دهد.

جدول ۱: مشخصات ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه

عمق (m)	لایه	نوع خاک	$\gamma_d(KN/m^3)$	S.P.T	Es (Mpa)	C(Kpa)	φ	C_c	C_s
۲	۱	خاک نباتی							
۱۰	۲	ML & SM	۱/۶	۲۵	۱۵	۲۰	۲۷	۰/۱	۰/۲۰
۱۴	۳	SM & ML	۱/۶	۳۰	۱۷	۲۰	۲۸	۰/۲۵	۰/۰۱۵
۲۰	۴	SP-SM	۱/۷۵	۴۰	۳۰	۱۵	۳۱	-	-
۳۰	۵	SP-SM & GM	۱/۷۵	۵۰	۵۰	۱۰	۳۲	-	-

۳- مشخصات هندسی محدوده مورد بررسی

به منظور دستیابی به شفت ورودی میدان فردوسی، و با توجه به عمق گودبرداری حدود ۳۰ متری آن از سیستم سازه نگهبان شمع و انکر برای پایدارسازی دیواره غربی استفاده شده است. شمع های بتن مسلح دارای قطر ۸۰ سانتی متر و فاصله مرکز به مرکز ۲۵۰ سانتی متر بوده و سیستم انکراژ نیز مطابق آرایش نشان داده شده شکل (۳) اجرا شده اند.

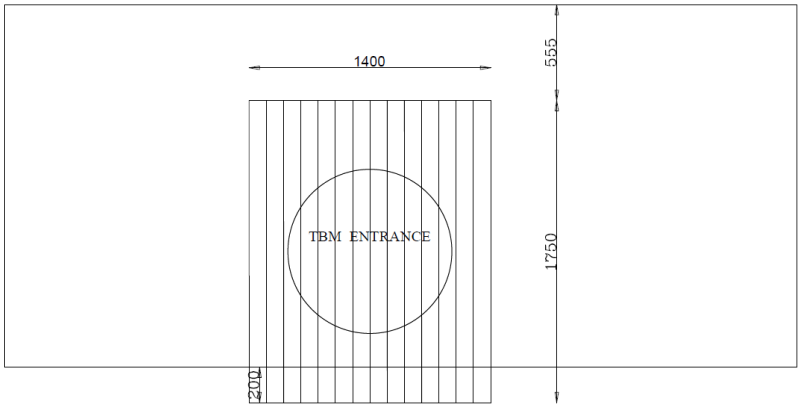


شکل ۳: سیستم سازه نگهبان در محل شروع به حفاری (دیواره غربی شفت)

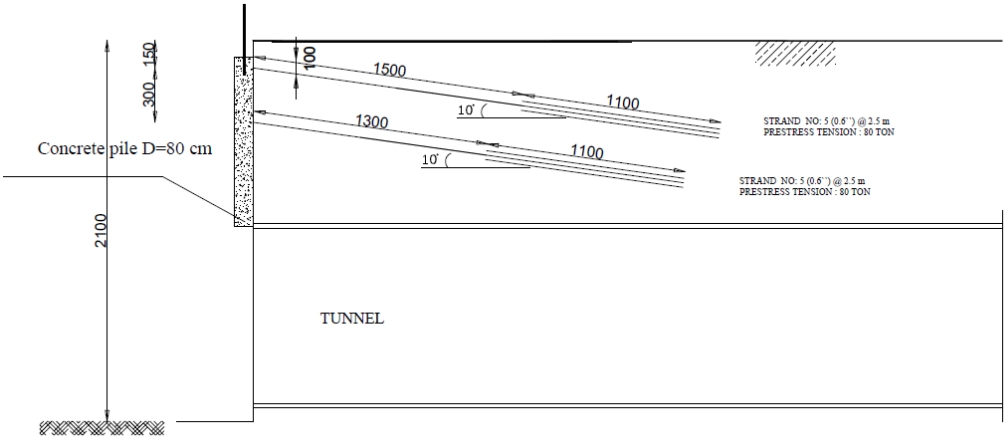
هم چنین در محل خروج دستگاه حفار از شمع های بتن پلاستیک (تامپون) مطابق شکل (۴- الف) استفاده شده است. در این قسمت آرایش سیستم انکراژ نیز متفاوت از دیگر بخش های این دیواره می باشد به نحوی که وجود عناصر سازه ای نگهبان، در محل عبور دستگاه حفار قرار نداشته باشد. شکل (۴- ب) مقطع جانبی سیستم نگهبان در محور عبور دستگاه را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- الف: شمع های تامپون در محل خروج TBM



شکل ۴- ب: مقطع جانبی سیستم نگهبان در محور تونل

۴- مدل سازی عددی

شبیه سازی عددی مسئله حفاری تونل با یک مدل اختلاف محدود و به کمک نرم افزار $FLAC^{3D}$ انجام شده است. این برنامه کاربرد وسیعی در تحلیل مسائل پیچیده مهندسی و بطور ویژه مهندسی ژئوتکنیک داشته و قابلیت کدنویسی در آن، این برنامه را از برنامه‌های مشابه متمایز می‌کند و قدرت بیشتری در آنالیز مسائل مختلف ایجاد کرده است. به جهت جلوگیری از اثرات مرزی در هنگام تحلیل و هم چنین بهینه سازی زمان تحلیل، ابعاد محیط خاکی در هر دو راستای عمود بر حفاری، ۳ برابر شعاع حفاری، از مرکز تونل تعیین می‌گردد[۱۱]. به منظور ایجاد شرایط جدا شدگی، بین خاک و عناصر سازه ای، المان فصل مشترک تعریف شده است. درخصوص تعیین مقادیر سختی نرمال و برشی فصل مشترک، یک قانون تجربی در این زمینه وجود دارد که مقادیر سختی نرمال(k_n) و سختی برشی (k_s) را مساوی با ده برابر سختی معادل سخت ترین ناحیه مجاور پیشنهاد می‌دهد[۱۲]. سختی معادل (بیان شده در واحد تنش بر طول) برای یک زون در جهت قائم از رابطه (۱) قابل محاسبه است:

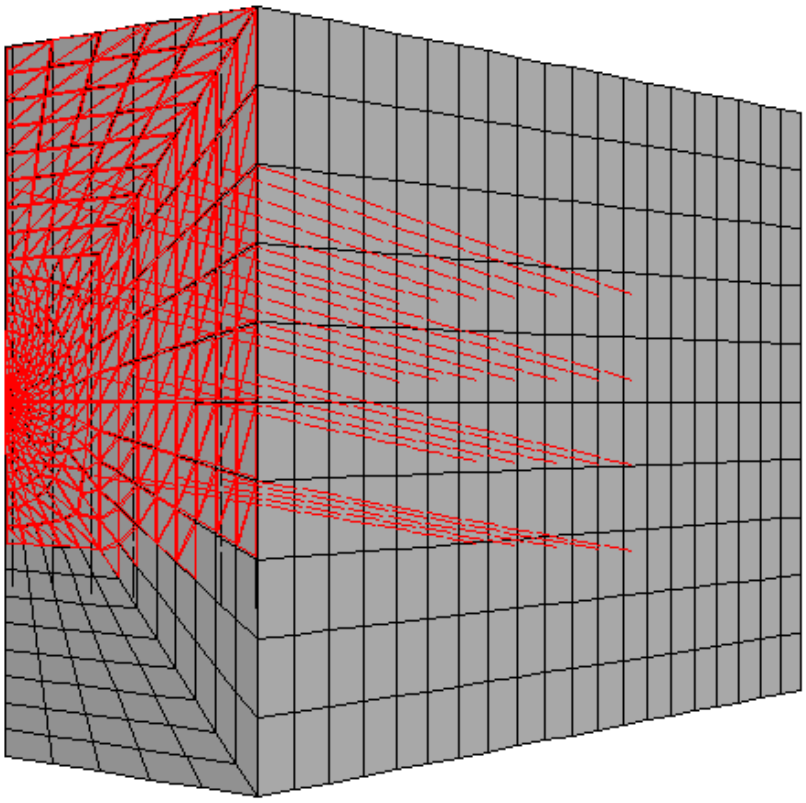
$$k = \left[\frac{K + 4/3G}{\Delta Z_{\min}} \right] \qquad (۱)$$

در رابطه اخیر K و G به ترتیب مدول بالک و مدول برشی و ΔZ_{min} کمترین ضخامت زون مجاور فصل مشترک در جهت عمود بر آن است. نظر به یکسان بودن مقدار ΔZ_{min} در مدل هندسی مقدار سختی معادل برابر ۳۰۰ مگاپاسکال بدست می آید. سایر مشخصات المان فصل مشترک نیز وابسته به مشخصات خاک می باشد. بر این اساس مقدار اصطکاک برابر دوسوم زاویه اصطکاک داخلی خاک و مقدار چسبندگی نیز برابر دو سوم چسبندگی خاک در نظر گرفته شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

برای اعمال شرایط مرزی به مدل ساخته شده، تغییر مکان کف مدل باید در هر سه جهت مختصاتی بسته شود تا از وقوع جابجایی و ایجاد ناپایداری جلوگیری شود. تغییر مکان جداره جانبی بیرونی مدل باید در جهت x و y بسته شود و مدل فقط می‌تواند در جهت قائم تغییر مکان دهد. در مرز محل محور تقارن مدل نیز برای ایجاد شرایط تقارن، تنها جابجایی در جهت عمود بر صفحه بسته شده است. به مرز محل اجرای سازه نگهبان و سطح زمین نیز که یک مرز حقیقی است، هیچ گونه محدودیتی اعمال نمی شود. شکل (۵) هندسه مدل عددی را نشان می دهد.



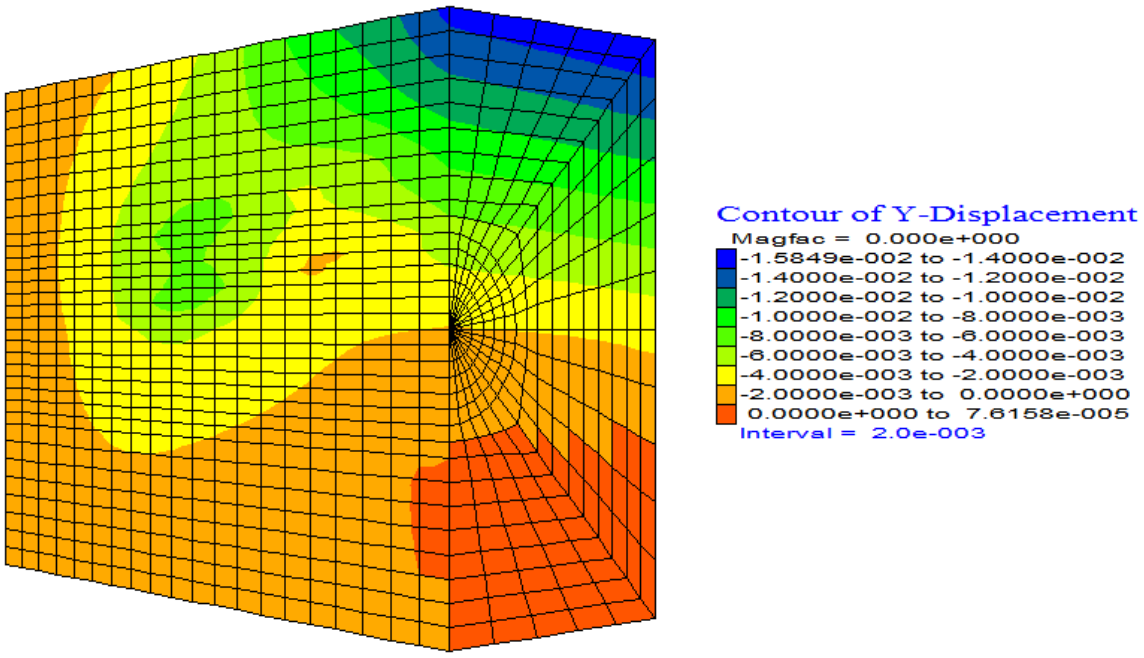
شکل ۵: هندسه اولیه پیش از انجام حفاری

مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل، مطابق جدول (۱) بوده و مدل رفتاری استفاده شده نیز مور-کولمب با فرض قانون جریان غیر هم بسته می باشد. مشخصات و موقعیت قرارگیری المان های سازه ای بر اساس شمع های بتن مسلح، شمع های تامپون، سیستم انکراژ و شاتکریت شکل های (۳) و (۴) و با فرض رفتار الاستیک اعمال شده است. برای شمع های بتن مسلح از المان سازه ای شمع و برای انکرها از المان سازه ای کابل استفاده شده است. هم چنین برای شاتکریت و شمع های تامپون از المان سازه ای پوسته بهره گیری شده است. برای ایجاد شرایط اولیه و برجا، تحلیل مدل صورت گرفته تا تنش‌های اولیه در محیط ایجاد گردند. در پایان این مرحله کلیه تغییر مکان ها صفر شده و سپس تحلیل ها برای انجام مراحل حفاری صورت خواهد پذیرفت. شکل (۶) وضعیت تغییرمکان های افقی در مدل پس از اعمال شرایط برجا را نشان می دهد.

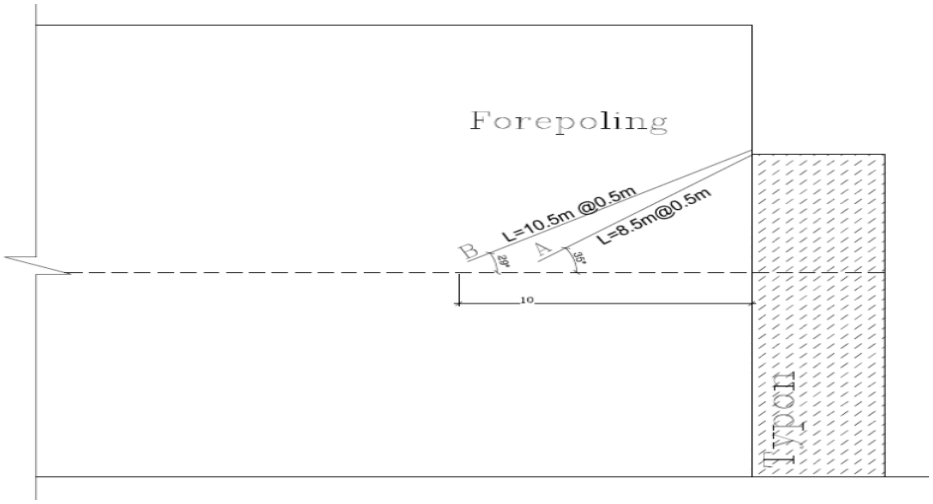
با رسیدن به شرایط پیش از حفاری در مدل، تحلیل هایی در دو حالت استفاده و یا عدم استفاده از سیستم پایدارساز فورپولینگ به ازای متراژ متفاوت حفاری انجام و مقایسه ای میان تغییر مکان های ایجاد شده صورت خواهد پذیرفت. بر این اساس سیستم فورپولینگ پیشنهادی مطابق شکل (۷) می باشد. مطابق این شکل از دو شبکه لوله فولادی سوراخ دار به قطر ۳ اینچ و ضخامت ۶ میلی متر که تزریق با فشار گروت در آن صورت می گیرد، در محدوده فوقانی تونل (عرض ۱۰ متر) استفاده می شود. لازم به ذکر است فاصله لوله های فورپولینگ از یکدیگر ۵۰ سانتی متر در عرض بوده و آرایش قرارگیری دو شبکه بصورت مثلثی است. جزییات طول و زاویه فورپولینگ در شکل (۷) آورده شده است.

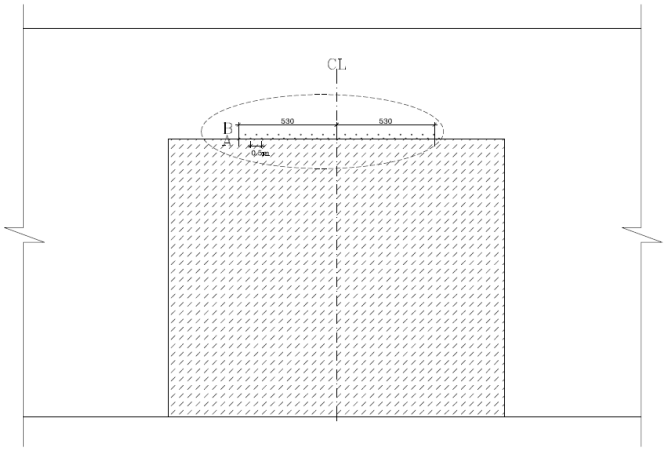
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶: وضعیت تغییرمکان افقی در شرایط برجا



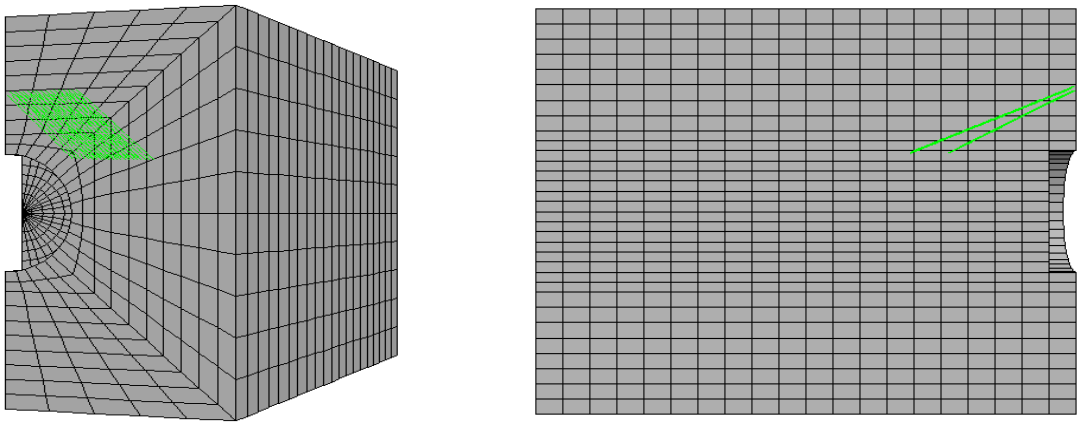


شکل ۷: جزییات محل قرارگیری و آرایش سیستم فورپولینگ

www.SID.ir

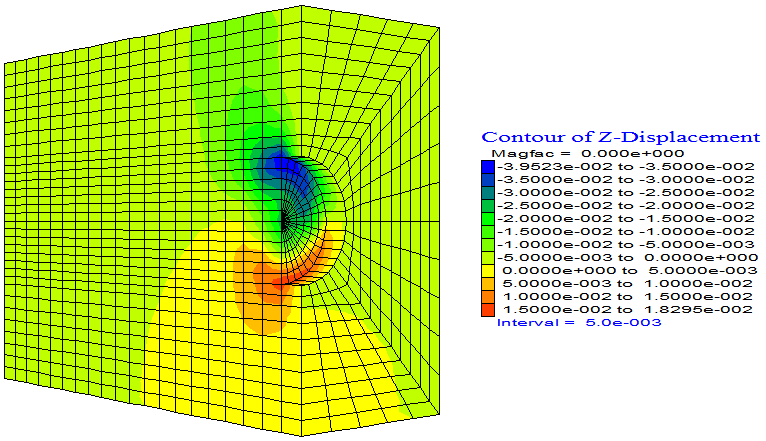
Archive of SID

به منظور شبیه سازی رفتار فورپولینگ از المان سازه ای تیر استفاده شده است و مشخصات لوله فولادی و گروت تزریق شده بصورت معادل در نرم افزار وارد شده است. شکل (۸) شبیه سازی فورپولینگ در $FLAC^{3D}$ را نشان می دهد.

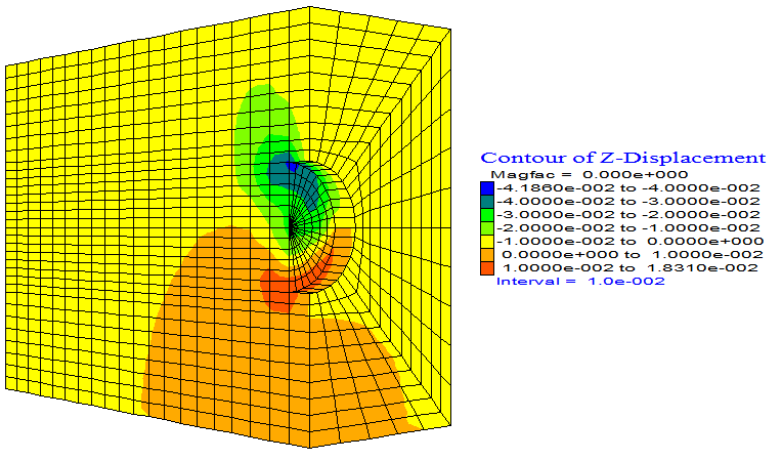


شکل ۸: شبیه سازی فورپولینگ با المان سازه ای تیر

پس از مدل سازی شرایط اولیه، میزان نشست ها و تغییر مکان های ایجاد شده به ازای متراژ مختلف حفاری در دو شرایط استفاده و عدم استفاده از سیستم فورپولینگ با انجام تحلیل هایی در $FLAC^{3D}$ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۹) وضعیت نشست قائم ایجاد شده به ازای ۲ و ۴ متر حفاری تونل را نشان می دهند.



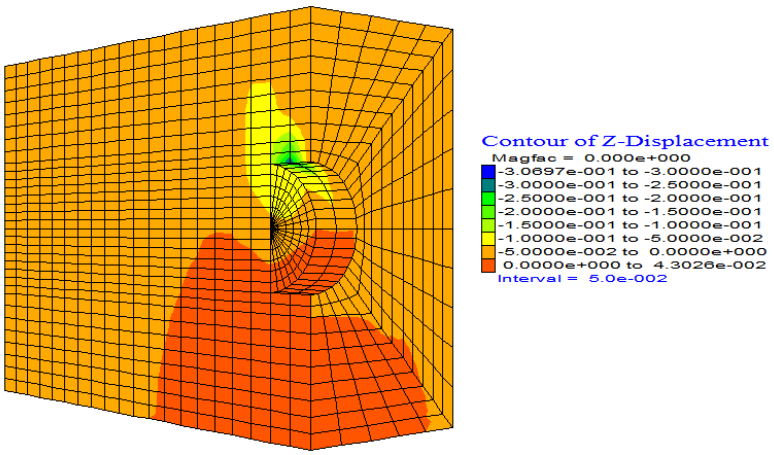
شکل ۹- الف: نشست به ازای ۲ متر حفاری با سیستم فورپولینگ



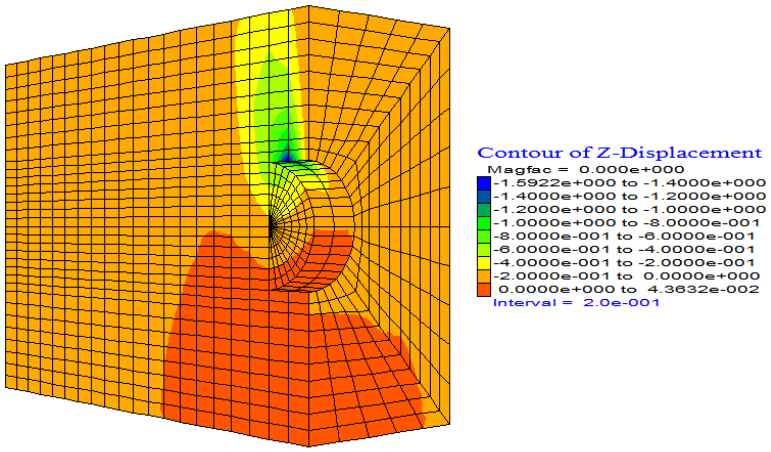
شکل ۹- ب: نشست به ازای ۲ متر حفاری بدون سیستم فورپولینگ

www.SID.ir

Archive of SID



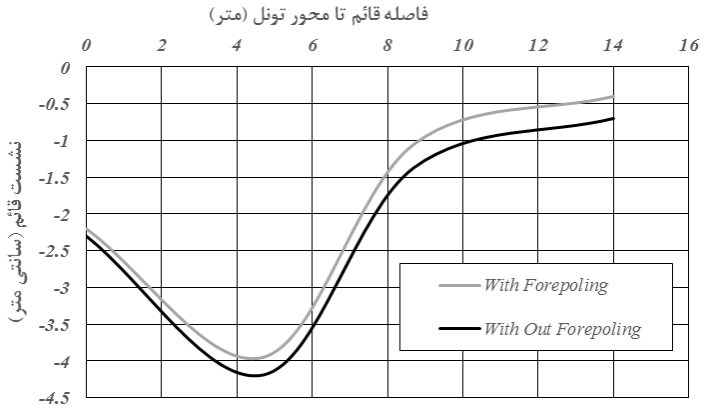
شکل ۹- پ: نشست به ازای ۴ متر حفاری با سیستم فورپولینگ



شکل ۹- ت: نشست به ازای ۴ متر حفاری بدون سیستم فورپولینگ

۵- تفسیر نتایج تحلیل عددی

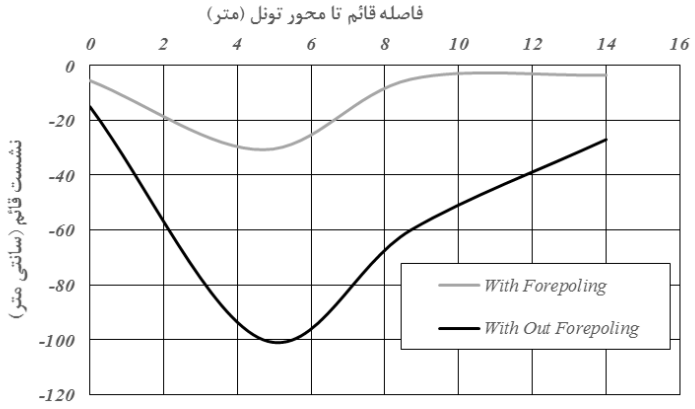
با انجام تحلیل های عددی در دو حالت استفاده و عدم استفاده از سیستم فورپولینگ، مقادیر تغییر مکان های قائم و افقی در ترازهای محور تونل، تاج تونل، بالای تامپون و سطح زمین برداشت و مقایسه ای میان حالت عادی و شرایط پایدار شده با فورپولینگ انجام شده است. نمودارهای (۱) به مقایسه نشست قائم و نمودارهای (۲) به مقایسه تغییر مکان افقی در ترازهای مذکور می پردازند.



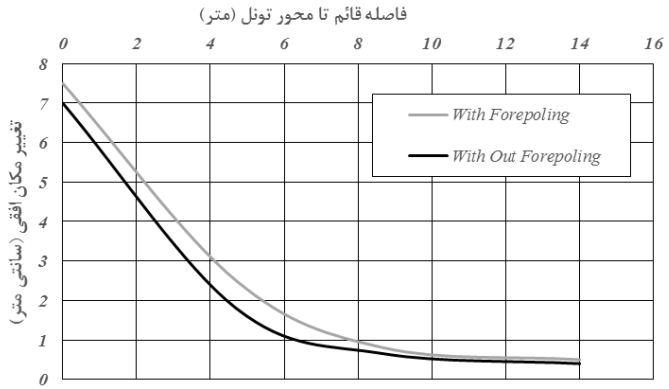
نمودار ۱- الف : نشست قائم در تراز های مختلف به ازای ۲ متر حفاری

www.SID.ir

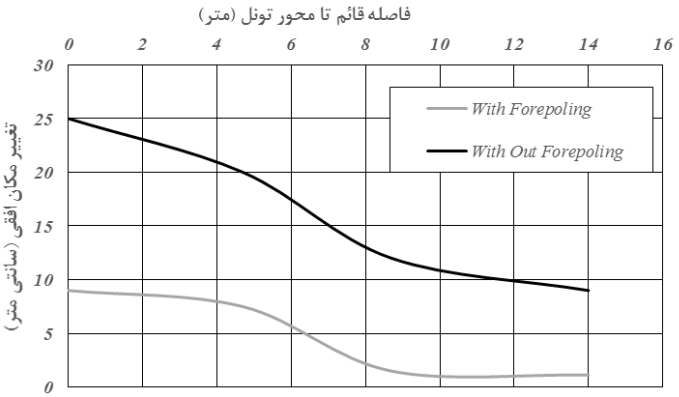
Archive of SID



نمودار ۱- ب : نشست قائم در تراز های مختلف به ازای ۴ متر حفاری



نمودار ۲- الف : تغییر مکان افقی در تراز های مختلف به ازای ۲ متر حفاری



نمودار ۲- ب : تغییر مکان افقی در تراز های مختلف به ازای ۴ متر حفاری

مطابق نمودارهای (۱) می توان اظهار داشت، استفاده از سیستم فورپولینگ به طور کلی موجب افزایش پایداری در سینه‌کار می شود. این مسئله بویژه در متراژ حفاری بیشتر نمایان می شود، بنحوی که استفاده از سیستم فورپولینگ مقادیر نشست های قائم در سطح زمین را از حدود ۳۰ سانتی متر به کمتر از ۳/۵ سانتی متر محدود می کند.

از بررسی وضعیت تغییر مکان افقی در ترازهای مختلف می توان اظهار داشت که بهره گیری از سیستم فورپولینگ مقادیر تغییر مکان جانبی به ازای ۴ متر طول حفاری را از ۷ سانتی متر به کمتر از ۲ سانتی متر کاهش داده است. این موضوع در نمودار (۲- ب) نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۶- نتیجه‌گیری

در تونل سازی یکی از شیوه های موثر افزایش خصوصیات ژئومکانیکی خاک و جلوگیری از نشست زمین در سازه های زیرزمینی کم عمق، استفاده از سیستم فورپولینگ می باشد. از این سیستم می توان جهت ایجاد چتری از خاک تقویت شده، در جلوی سینه کار در حال پیشروی تونل به منظور جلوگیری از نشست سطح زمین و کاهش جابجایی ها استفاده نمود. در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از این سیستم و تاثیر آن بر نشست های ایجاد شده به ویژه در سطح زمین با شبیه سازی سه بعدی عددی و به کمک نرم افزار تفاضل محدود FLAC^{3D} پرداخته شد. از جمله مهمترین نتایج این بررسی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- استفاده از سیستم فورپولینگ به طور کلی موجب افزایش پایداری در سینه‌کار می شود. این موضوع با افزایش متراژ طولی حفاری بیشتر نمود می یابد.

۲- استفاده از دو شبکه فورپولینگ با فواصل عرضی ۵۰ سانتی متر و آرایش مثلثی در سینه کار حفاری منجر به کاهش ۹۰ درصدی نشست های قائم و ۷۰ درصدی تغییر مکان های افقی گردیده است.

۳- استفاده از فورپولینگ می تواند متراژ حفاری ایمن بدون وارد کردن فشار به دیواره ها و یا هرگونه عملیات لاینینگ را حدود ۵۰ درصد افزایش دهد.

مراجع

[۱] G. W. Rhodes and J. L. Kauschinger, "Microtunnelling provides structural support for large tunnels with shallow cover," *North American Tunneling. Rotterdam: Balkema AA*, pp. ٤٤٣-٤٤٩, ١٩٩٦.

[۲] S. Satoh, S. Furuyama, Y. Murai, and T. Endoh, "Construction of a subway tunnel just beneath a conventional railway by means of large-diameter long pipe-roof method," *North American Tunneling*, vol. ٩٦, pp. ١٢٥-١٣٧, ١٩٩٦.

[۳] B. B. Chloride, E. E. P. Bureau, and H. H. E. P. Arrestor, "Technical Guideline on Environmentally Sound Management of Mercury Waste .Version ٢٤ July ٢٠٠٧.

[٤] D. Peila, "A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face," *Geotechnical & Geological Engineering*, vol. ١٢, pp. ١٤٥-١٦٨, ١٩٩٤.

[٥] K. Date, R. Mair ,and K. Soga, "Reinforcing effects of forepoling and facebolts in tunnelling," in *Proceedings of the ٦ th international symposium (IS-Shanghai ٢٠٠٨)*, ٢٠٠٨, pp. ٦٣٥-٦٤١.

[٦] A. Juneja, A. Hegde, F. Lee, and C. Yeo, "Centrifuge modelling of tunnel face reinforcement using forepoling," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. ٢٥, pp. ٣٧٧-٣٨١, ٢٠١٠.

[٧] P. Kontothanassis, N. Koronakis, A. Karinas, and S. Massinas, "Design and construction of NATM underground station tunnel by using the forepoling method in difficult conditions for Athens Metro," *Atlas of Oculoplastic and Orbital Surgery*, p. ٢٦٥, ٢٠٠٩.

[٨] S. O. Choi and H.-S. Shin, "Stability analysis of a tunnel excavated in a weak rock mass and the optimal supporting system design," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. ٤١, pp. ٨٧٦-٨٨١, ٢٠٠٤.

[۹]دزیانیان، حمیدرضا و رحمان دارای، استفاده از فورپولینگ جهت ریزش برداری تونل شبلی قطعه ۲ الف با نگرشی بر ویژگی های ژئوتکنیکی ساختگاه، ششمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران، انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸.

[۱۰]مطهری, محمدرضا و محمود وفائیان، تحلیل اجزای محدود روش چتری در تونل سازی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران،۱۳۸۷.

[۱۱] M. Budhu, "Soil mechanics and foundations, ٣e," ed: Wiley ISBN, ٢٠١١.

[۱۲] F. D. Itasca, "Fast Lagrangian Analysis of Continua in ٣ Dimensions, Version ٤.٠," Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, vol. ٤٣٨, ٢٠٠٩.

www.SID.ir