

Evaluation of the effect of leading beam support structure in shallow tunnels, A case study of Ostad Moein Tunnel, Tehran

Masoumeh Amini Kheirabad¹, Meysam Jalali^{2*}, Mohsen Keramati³

1- MSc graduated, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT

One of the main goals in urban tunnel construction is to minimize and control ground settlement. The aim of the present study is to investigate the effect of leading beams on reducing ground settlement in shallow urban tunnels. This study was conducted by numerical modeling of the Ostad Moein Tehran Tunnel Project and using the Austrian tunneling method with Plaxis3D software. In this project, a leading beam pre-retaining guard structure was used to control the tunnel crown settlement. The performance of leading beams in controlling ground settlement as well as the amount of bending moment, axial forces, and shear forces of the leading beam were investigated in 12 numerical models constructed. Changing the dimensions of leading beams, changing the compressive strength of the concrete of leading beams, changing the tunnel overburden, and the length of the tunnel were investigated. The results of the present study showed that the presence of leading beams will result in a 21 percent reduction in ground settlement, and also by obtaining the optimal parameters of compressive strength, leading beam dimensions, overburden, and tunnel length, the effect of leading beams will be greater and ground settlement will be less. Finally, an approximate (manual) method for leading beam design is presented.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 December 2024

Revise Date: 24 April 2025

Accept Date: 21 May 2025

Keywords:

Leading Beams
Ground Settlement
Tunnel
Support structure
Numerical modelling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.495773.3609

*Corresponding author: Meysam Jalali

Email address: mjalali@shahroodut.ac.ir

ارزیابی تأثیر سازه نگهبان از نوع تیرهای پیشرو در تونل‌های کم‌عمق شهری، مطالعه موردی تونل تقاطع استاد معین تهران

معصومه امینی خیرآباد^۱، میثم جلالی^{۲*}، محسن کرامتی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

یکی از اهداف اصلی در ساخت تونل‌های شهری، به حداقل رساندن نشست زمین و کنترل آن است. هدف از تحقیق حاضر بررسی میزان تأثیر تیرهای پیشرو در کاهش نشست سطح زمین در تونل‌های کم عمق شهری می‌باشد. این تحقیق با مدل‌سازی عددی پروژه تونل استاد معین تهران و استفاده از روش حفاری تونل‌زنی اتریشی با نرم‌افزار Plaxis3D انجام شده است. در این پروژه برای کنترل نشست تاج تونل از سازه نگهبان پیش‌نگهدارنده تیرپیشرو استفاده شده است. عملکرد تیرهای پیشرو در کنترل نشست سطح زمین و همچنین میزان لنگر خمشی، نیروهای محوری و نیروهای برشی تیر پیشرو در ۱۲ مدل عددی ساخته شده بررسی شده است. تغییر ابعاد تیرهای پیشرو، تغییر مقاومت فشاری بتن تیرهای پیشرو، تغییر روباره تونل و طول تونل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد وجود تیرهای پیشرو ۲۱ درصد کاهش نشست سطح زمین را در پی خواهد داشت و همچنین با یدست آوردن پارامترهای بهینه مقاومت فشاری، مساحت تیرپیشرو، روباره و طول تونل تأثیر تیرهای پیشرو بیشتر و نشست سطح زمین نیز کمتر خواهد شد. در نهایت روش تقریبی (دستی) برای طراحی تیر پیشرو ارائه شده است.

کلمات کلیدی: تیر پیشرو، نشست سطح زمین، تونل، سازه نگهبان، مدل‌سازی عددی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.495773.3609	10.22065/jsce.2025.495773.3609	۱۴۰۳/۱۲/۲۹	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۴/۰۲/۰۴	۱۴۰۳/۱۰/۱۰
		*نویسنده مسئول:				
		میثم جلالی				
		mjatalali@shahroodut.ac.ir				
		پست الکترونیکی:				

۱- مقدمه

یکی از روش‌های توسعه حمل‌ونقل در محیط‌های شهری استفاده از فضاهای زیرزمینی است که اصلی‌ترین موضوع در اجرا و حفاری این‌گونه فضاها نشست حاصل از حفاری و اثرات آن بر سازه‌های سطحی می‌باشد. مهم‌ترین عامل در طراحی و اجرای فضاهای زیرزمینی، کاهش نشست سطح زمین بوده که خود تابع پارامترهایی نظیر شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه، هندسه و عمق تونل، نوع روش اجرا و خصوصیات و نحوه اجرای سیستم نگهداری است [۱]. همانطور که می‌دانیم از عوامل مهم و تأثیرگذار در اجرای این تونل‌ها وجود تأسیسات فراوان در بالای تاج تونل است که این تأسیسات ممکن است به نشست حساسیت فراوان داشته باشند، بنابراین جهت کنترل این نشست‌ها، روش‌های متفاوتی از جمله استفاده از سیستم‌های پیش نگهدارنده در تاج تونل مرسوم بوده و نمونه‌ای از آن با عنوان تیر پیشرو در تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیق حاضر بر روی رفتار سیستم پیش نگهدارنده در تاج تمرکز دارد.

طبق بررسی انجام شده توسط نویسندگان مقاله، تحقیقات آزمایشگاهی یا تحلیلی موجود اغلب در زمینه ی Umbrella arch and forepoling support هستند و استفاده از تیرهای پیش رو در تونل‌های کم عمق شهری با جزئیات مندرج در تحقیق حاضر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این که استفاده از سیستم پیش نگهدارنده تیرهای پیشرو بسیار نوین است و در ایران تنها در تونل ضربعلی‌زاده مداح و تونل استاد معین تهران اجرا شده است و همچنین میزان مؤثر بودن و روش تحلیل و طراحی این سیستم در این دو پروژه با ابهاماتی روبرو بوده است، روش مدل‌سازی، طراحی و میزان کارایی این روش پیش نگهداری در تحقیق حاضر مدنظر قرار خواهد گرفت.

در این تحقیق، تأثیر تیرهای پیشرو در کنترل نشست‌های سطح زمین ناشی از تونل‌زنی کم عمق در تونل استاد معین تهران بررسی می‌شود. همچنین تحلیل و طراحی تیرهای پیشرو با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پلکسیس انجام می‌شود.

همچنین در این پژوهش از نرم‌افزار کاربرپسند plaxis3D v20 برای تحلیل‌ها استفاده شده است و با توجه به حساس بودن نتایج نسبت به ورژن نرم‌افزار، سعی بر این بود که مدل‌ها با آخرین ورژن نرم‌افزار مدل‌سازی شوند تا نتایجی نزدیک به واقعیت داشته باشیم. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی سه‌بعدی مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌باشد.

بنابراین، به بررسی مطالعات مرتبط با سیستم‌های پیش نگهدارنده تونل با تمرکز بر مدل‌سازی‌های عددی پرداخته می‌شود.

ژانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۵)، به منظور کنترل تغییر شکل سطح زمین، بر روی پروژه ایستگاه متروی مدفون کم عمق پینگانلی در خط ۱۹ پکن تکنیک‌های ساخت و ساز فشرده روش پایپ روف با قطر بزرگ + روش PBA (Pile-Beam-Arch) پیشنهاد دادند و اثر روش پایپ روف بر روی ویژگی‌های اثر تغییر شکل زمین مورد تجزیه و تحلیل عددی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر شکل زمین را می‌توان به طور موثر از طریق پایپ روف با قطر بزرگ کنترل کرد و در نتیجه ایمنی ساخت و ساز مهندسی زیرزمینی و محیط اطراف را تضمین کرد. همچنین این روش می‌تواند یک مرجع معنادار برای پروژه‌های مشابه در موقعیت‌های پیچیده محیطی ارائه کند [۲].

گنگوار^۲ و همکاران (۲۰۲۵)، بر روی یک مطالعه موردی پایداری تونل راه‌آهن Rishikesh-Karnaprayag در منطقه هیمالیا، هند با استفاده از روش پیش تقویت پایپ روف تحقیق کردند. آن‌ها روشی از طراحی پایپ روف را با استفاده از رفتار زمین نظارت شده با کمک ابزار دقیق تونل برای تایید کارایی این روش پیشنهاد دادند. این مطالعه نشان داد که پایپ روف قبل از حفاری به‌عنوان یک تیر قوسی در سراسر محیط تونل رفتار می‌کند که پایداری زمین اطراف را چند برابر افزایش می‌دهد. همچنین به این نتیجه رسیدند که تجزیه و تحلیل منجر به تعیین تونل کم عمق و عمیق بر اساس یک مقدار محدود کننده دوباره مشاهده شده از طریق تجزیه و تحلیل عددی در مقایسه با نتایج نظارت بر تغییر شکل‌های زمین می‌شود [۳].

¹ Zhang

² Gangwa

ارجیکن^۱ و همکاران (۲۰۲۴)، بر روی مدل‌سازی عددی تونل‌های دوقلو مترو Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli با استفاده از پیش تقویت روش قوس چتری و مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی تحقیق کردند. بخش تونل با استفاده از سه رویکرد (یعنی صفحه، صفحه ساختگی و لوله مجزا) مدل‌سازی شد و نتایج با اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه شد. نتایج تحلیل عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی مطابقت داشت. رویکرد صفحه ساختگی منجر به پیش‌بینی‌های نشست دقیق‌تر در مقایسه با سایر رویکردها شد. همچنین نتایج نشان داد که تونل‌ها به اندازه کافی دور بوده‌اند، به طوری که نیمرخ نشست سطحی به دلیل توالی ساخت تونل‌های دوقلو، تاثیر واضحی را نشان نمی‌دهد [۴].

سایاد^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، یک شبیه‌سازی عددی المان محدود برای بررسی اثر کاهشی یک عنصر چتری (Umbrella arch) که به‌عنوان یک ناحیه همگن مدل‌سازی شده بود، بر تغییر شکل‌های ناشی از حفاری یک گذرگاه انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با استفاده از این نوع پیش‌نگهدارنده می‌توان تغییر شکل‌های زمین را به طور موثر کنترل کرد. با این حال، یافته‌ها نشان داد که طول قوس چتری تأثیری بر کاهش تغییر شکل‌های زمین ندارد [۵].

ژائو^۳ و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی اثربخشی قوس چتر در کنترل تغییر شکل خاک‌های اطراف با تمرکز بر بخش سرریز بسیار کم عمق بزرگراه ترانزیت شرقی شنژن در چین پرداختند. هر دو مدل‌سازی عددی و نظارت میدانی برای ارزیابی اثر قوس چتر انجام دادند. مکانیسم جابه‌جایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نشان داد که قوس چتر در درجه اول از فروپاشی سنگ اطراف با ایجاد یک ناحیه فشرده کوچک جلوگیری می‌کند. آن‌ها توصیه کردند که بخش شروع با طول و قطر یکسان برای ساخت طاق‌های چتر بلند در نظر گرفته شود تا اثر تقویت آن‌ها به حداکثر برسد. مدل عددی پیشنهادی با استفاده از داده‌های نظارت میدانی کالیبره شد و پاسخ‌های مکانیکی یک طاق چتر به طول ۸۰ متر در طول ساخت و ساز به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نتایج تحقیقات ارائه شده در این مقاله می‌تواند به عنوان مرجعی برای طراحی قوس‌های چتری در پروژه‌های مشابه در آینده باشد [۶].

باقرزاده و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از شبیه‌سازی عددی تفاضل محدود برای مدل‌سازی و تحلیل اثربخشی روش قوس چتری در تونل راه‌آهن قزوین-رشت و همچنین اندازه‌گیری درجا انجام دادند. رفتار ساختاری لوله‌ها در توالی حفاری و همچنین اهمیت عناصر طراحی هندسی و فیزیکی بر پایداری تونل با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D تحلیل شدند. نتایج نشان داد که روش قوس چتری همگرایی تونل را تا ۴۹ درصد کاهش می‌دهد. همچنین با در نظر گرفتن محدودیت اجرایی، افزایش زاویه، قطر و ضخامت، طول همپوشانی لوله، کاهش فاصله لوله‌ها، شعاع نفوذ دوغاب و نسبت آب به سیمان ۰/۵ تأثیر مثبتی در ایجاد مقاومت بیشتر قوس و پایداری تونل داشته است [۷].

مروتدار و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی تأثیر پارامترهای طراحی روش قوس چتری بر تقویت تونل‌های حفاری شده در زمین‌های نرم پرداختن و فرآیند تونل‌سازی مدل‌سازی شد و نشست‌های ناشی از حفاری تونل محاسبه شد. نتایج پس از پردازش تایید کرد که روش قوس چتری بطور قابل ملاحظه‌ای تاج تونل و نشست سطح زمین را به ترتیب ۷۶٪ و ۴۲٪ کاهش داد. علاوه بر این، تضاد نرخ کاهش نشست (SRRs) برای متغیرهای طراحی لوله نشان داد که پایداری تونل نسبت به مقادیر زاویه نصب و فاصله مرکز به مرکز لوله‌ها به تغییرات در مقادیر قطر و طول حساس‌تر است [۸].

لی^۴ و همکاران (۲۰۲۰) تحقیقی در مورد عملکرد عددی پیش‌نگهدارنده پایپ روف (PRPS^۵) و پیش‌تقویت پرده تزریق (CGPR^۶) ایستگاه مترو زیرزمینی بزرگ Badaling Great Wall انجام دادند. برای بهینه‌سازی طراحی PRPS و CGPR، یک سری تجزیه و تحلیل عددی توسط FLAC3D انجام دادند. نتایج نشان داد زاویه آرایش تأثیر زیادی در کنترل نشست تاج دارد. با افزایش زاویه آرایش از

¹ Erginca

² Siad

³ Zhao

⁴ Li

⁵ Pipe roof pre-support

⁶ curtain grouting pre-reinforcement

۰ درجه به ۱۵۰ درجه، نشست تاج به سرعت کاهش یافت، بنابراین، زاویه آرایش ۱۵۰ درجه طرح بهینه انتخاب شد. برای بررسی بهتر اثر ترکیبی PRPS و CGPR، دو مورد، یعنی بدون اجرای ترکیبی PRPS و CGPR و با اجرای ترکیبی PRPS و CGPR، به صورت عددی مقایسه شدند و نتیجه نشان داد با استفاده از ترکیب PRPS و CGPR، وضعیت تنش ستون سنگ بسیار بهبود یافته است [۹].

دهقان ع، ن (۲۰۲۰) تأثیر سیستم پیش نگهداری فورپولینگ و همچنین میزان نشست سطح زمین در پروژه زیرگذر ضربعلی زاده مداح را با استفاده از نرم افزار پلکسیس دوبعدی و سه بعدی و همچنین مقایسه با نتایج ابزار دقیق بررسی کرد. اختلاف میان نشست حداکثر حاصل از داده های ابزار دقیق (۳۰ میلی متر) نسبت به تحلیل عددی سه بعدی (۳۲ میلی متر) ناچیز و در حدود ۲ میلی متر (حدود ۶ درصد خطا) بود که مقادیر نشست به دست آمده از مدل سازی عددی و ثبت شده توسط ابزار دقیق در محدوده مجاز نشست های پیش بینی شده در مرحله طراحی بود [۱۰].

طهماسبی و همکاران (۲۰۱۸)، اثرات استفاده و عدم استفاده از سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو به روش عددی و به وسیله نرم افزار FLAC3D تحلیل و مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از مدل های عددی برای دو حالت مذکور و مقایسه آن ها با نتایج ابزارهای سطحی و زیرزمینی، کاهش ۲۰ درصدی میزان لنگر خمشی در سیستم نگهداری و کاهش ۵۰ درصدی جابجایی های قائم در هنگام استفاده از سیستم های پیش نگهدارنده مشاهده کردند. نتایج حاصل از مدل عددی حداکثر میزان نشست در سطح زمین را ۳۵ میلی متر مشخص کرد [۱۱].

لی و تیلور^۱ (۲۰۱۶) مجموعه ای از آزمایش های سانتریفیوژ را برای بررسی مزایای سیستم پیش نگهدارنده با استفاده از آرایش های مختلف لوله های فولادی قرار گرفته در یک مدل از تونل در اعماق مختلف انجام دادند. نتایج، اثرات نسبی عمق روباره تونل و آرایش فورپولینگ را برای دستیابی به یک طراحی سیستم پیش نگهدارنده فورپولینگ بهینه نشان داد. مزایای داشتن سیستم پیش نگهدارنده فورپولینگ در کاهش قابل توجه نشست های سطح زمین در تونل های عمیق و کم عمق و بهبود نسبت پایداری تونل در تونل های کم عمق منعکس شده بود. در تونل عمیق، افزایش نسبت پایداری تونل به اندازه تونل های کم عمق نبوده است همچنین طول های تعبیه شده بیشتر فورپولینگ ها، کارایی این سیستم را بهبود می بخشد [۱۱].

شی^۲ و همکاران (۲۰۱۷) تحقیقی در مورد عملکرد مکانیکی پایپ روف در مقیاس بزرگ (طول لوله ها ۸۵ متر و قطر ۱۵۹ میلی متر) تونل راه آهن Shitougang با استفاده از تجزیه و تحلیل عددی سه بعدی انجام دادند. این مدل عددی ابتدا در نرم افزار Midas ساخته شده و سپس داده های مدل برای تجزیه و تحلیل به برنامه FLAC3D وارد شده است. دو نتیجه تنش محاسبه شده از نتایج اندازه گیری های میدانی و تجزیه و تحلیل عددی از نظر مقادیر و توزیع زمانی که در یک طول حفاری بودند با هم توافق منطقی داشتند [۱۲].

در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از مدل سازی عددی با نرم افزار پلکسیس سه بعدی به بررسی تأثیر وجود پیش نگهدارنده تیرهای پیشرو در کاهش نشست سطح زمین در تونل استاد معین تهران با استفاده از مقایسه دو مدل بدون تیر پیشرو و با تیر پیشرو پرداخته شد، سپس آنالیز حساسیت بر روی چهار پارامتر مساحت تیرهای پیشرو، مقاومت فشاری بتن تیرهای پیشرو، روباره تونل و طول تونل انجام شد. همچنین طراحی دستی تیرهای پیشرو و مقایسه آن با مدل عددی انجام شد.

۲- صحت سنجی نرم افزار

در تحقیق حاضر جهت تأیید اعتبار مدل سازی انجام شده در نرم افزار Plaxis از نتایج پروژه تحقیقاتی ویتالی^۳ و همکاران (۲۰۲۲) مقاله ای تحت عنوان استراتژی های ساخت و ساز برای یک تونل NATM در خاک برجا مطالعه موردی سائوپائولو، برزیل استفاده شده است [۱۳]. در این مقاله، ابتدا رفتار تونل پارایسو^۴ واقع در شهر سائوپائولو برزیل با توجه به داده های ابزار دقیق منصوبه بررسی شده و سپس تاثیر

¹ Le and Taylor

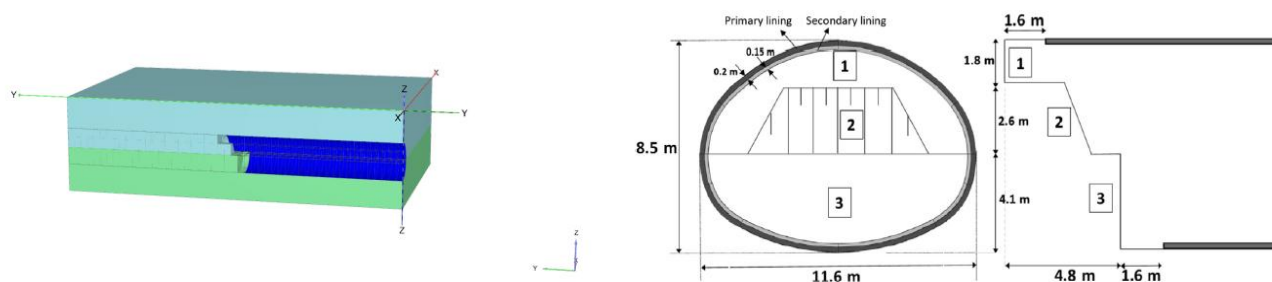
² Shi

³ Vitali

⁴ Paraiso

حفاری تمام مقطع یا وجود برم در نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. مقطع هندسی تونل و گام‌های حفاری در شکل ۱ ارائه شده است. سطح مقطع تونل به شکل بیضی شکل با عرض ۱۱/۶ متر و ارتفاع ۸/۵ متر می‌باشد.

حفاری مقطع تونل در سه مرحله انجام شده است. ابتدا ناحیه ۱ سپس با فاصله حدوداً ۴/۸ متری ناحیه ۲ و در نهایت ناحیه ۳ حفاری شده است. نگهدارنده شامل یک لاینینگ ۲۰ سانتی متری است. تونل در یک زمین آبرفتی دولایه قرار گرفته است. لایه اول شامل رس نرم که از سطح زمین تا عمق ۱۲ متری ادامه داشته و پس از آن یک لایه رس بسیار سخت که تا عمق ۲۲/۶ متری ادامه دارد بوده است. مدل عددی تا عمق ۲۲/۶ متری ادامه یافته است. در مقاله برای لایه اول به دلیل خاک سست و نرم از مدل رفتاری خاک سخت شونده و برای لایه دوم به دلیل مقدار نسبت پیش تحکیمی (OCR) بالا از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده است [۱۳].



شکل ۱: مقطع هندسی و گام‌های حفاری تونل [۱۳].

شکل ۲: مراحل حفاری در نرم افزار Plaxis

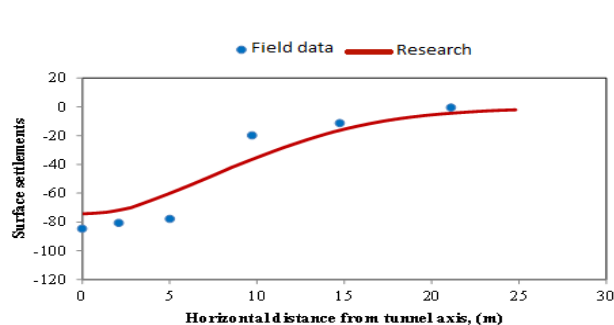
جدول ۱: پارامترهای لایه رس سطحی [۱۳]

φ (deg)	C ($\frac{kN}{m^2}$)	E_{ur} ($\frac{kN}{m^2}$) سختی بارگذاری باربرداری	E_{oed} ($\frac{kN}{m^2}$) سختی ادنومتر	E_{50} ($\frac{kN}{m^2}$) سختی سه محوری	γ ($\frac{kN}{m^3}$) وزن مخصوص
۳۰	۳۰	۱۲۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰	۱۵

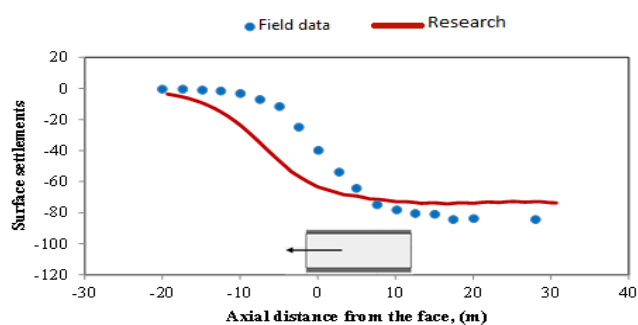
جدول ۲: پارامترهای لایه رس عمیق [۱۳]

φ (deg)	C ($\frac{kN}{m^2}$)	E_{50} ($\frac{kN}{m^2}$) سختی سه محوری	γ ($\frac{kN}{m^3}$) وزن مخصوص
۲۵	۶۶	۱۲۰۰۰۰	۱۸

در شکل ۳ و شکل ۴ پروفیل میزان نشست در سطح زمین موازی بر محور تونل و همچنین عمود بر محور تونل رسم و با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده است. در شکل ۳، ملاحظه می‌شود مقادیر نشست بدست آمده از نرم افزار در پشت جبهه حفاری با مقادیر ابزار دقیق متناظر هستند. همچنین در شکل ۴، ملاحظه می‌شود مقادیر نشست اندازه گیری شده و بدست آمده از تحلیل تطابق خوبی با یکدیگر دارند. در این نمودارها مقادیر اختلاف بین دو نمودار داده‌های ابزار دقیق و پلکسیس به طور میانگین به ترتیب حدود ۱۵ و ۱۰ درصد می‌باشد. بنابراین نتایج نشان دهنده صحت روند طی شده برای شبیه سازی تونل سازی به روش NATM است.



شکل ۴: نشست سطح زمین عمود بر محور تونل بر حسب فاصله از محور تونل



شکل ۳: نشست سطح زمین موازی محور تونل بر حسب فاصله از جبهه حفاری

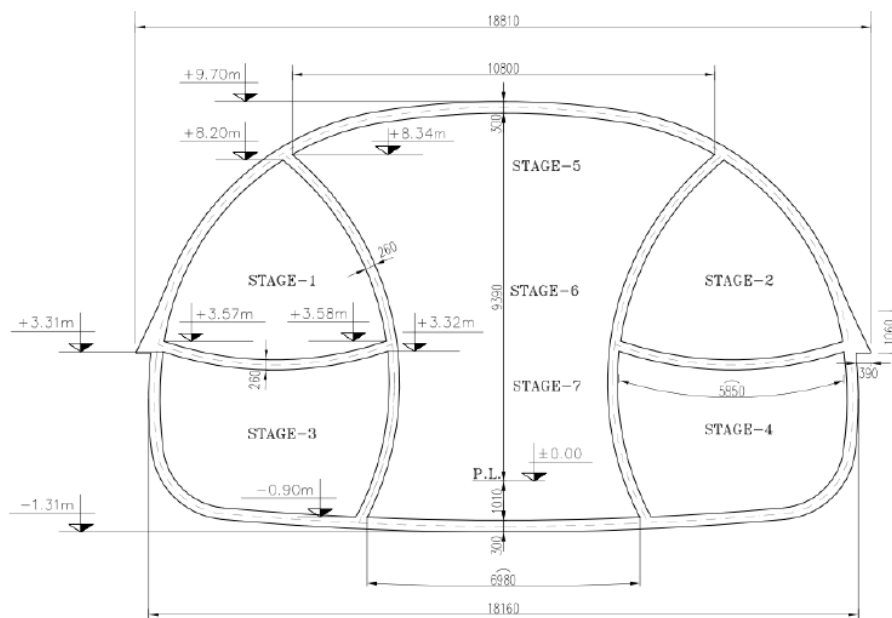
۳- معرفی تونل استاد معین تهران

الف- موقعیت جغرافیایی پروژه

پروژه مورد بررسی در محدوده شهرداری منطقه ۹، تقاطع خیابان آزادی با خیابان استاد معین، در مجاورت ساختمان شهرداری منطقه ۹ تهران قرار گرفته است [۱۴].

ب- مشخصات هندسی مقطع

در شکل زیر مقطع کلی مورد بررسی از تونل زیرگذر ارائه شده است. همچنین ابعاد هندسی مقطع ارائه شده است. بررسی نقشه‌های پروفیل طولی مسیر پروژه نشان می‌دهد بیشترین روباره برای تونل حاضر ۶/۵ متر می‌باشد لذا مقطع تونل با روباره فوق به عنوان مقطع بحرانی معرفی شده و مدل‌سازی عددی برای آن انجام می‌پذیرد.



شکل ۵: مقطع کلی پوشش اولیه تونل [۱۴].

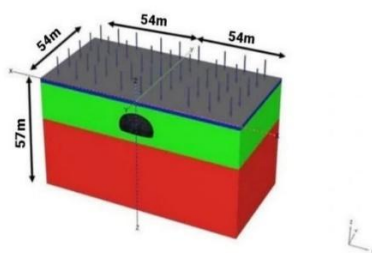
پ- فرضیات مدل سازی

بررسی نقشه‌های پروفیل طولی مسیر پروژه نشان می‌دهد بیشترین روباره برای تونل حاضر ۶/۵ متر می‌باشد لذا مقطع تونل با روباره فوق به عنوان مقطع بحرانی معرفی شده و مدل سازی عددی برای آن انجام می‌پذیرد. ابعاد مدل‌های ساخته شده در پروژه به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که میزان اثرات ناشی از مرزها به حداقل قابل قبول برسد. براین اساس است که برای مدل سه بعدی با توجه به بزرگ شدن ابعاد مدل و زمان بردن پروسه حل مسئله، مقادیر ۳ برابر قطر تونل (قطر تونل ۱۸ متر) از مرکز آن به عنوان مرزهای جانبی و تحتانی مدل در نظر گرفته شده است [۱۵].

بار قائم ناشی از وسایل نقلیه در سطح زمین با در نظر گرفتن بار گسترده‌ای معادل ۲۰ کیلوپاسکال مدل سازی شد. دیواره اصلی تونل با شاتکریت به ضخامت ۳۰ سانتی متر به عنوان پوشش اولیه و دیواره فرعی تونل و کف بند به عنوان پوشش تخریبی با استفاده از شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتی متر اجرا شد. در نرم افزار پلکسیس شاتکریت با استفاده از المان پلیت مدل سازی شده است و از المان سطح مشترک، جهت توزیع مناسب تنش و در نظرگیری اندرکنش شاتکریت و خاک اطراف استفاده شده است.

در تحقیق حاضر برای حصول نتایج مدل سازی بادقت بالاتر، از مدل پیشرفته ژئوتکنیکی خاک سخت شونده استفاده شده است این مدل راه حل بهتر و رضایت بخش تری نسبت به مدل موهر کولمب برای همه مصالح خاک به ویژه هنگام باربرداری در مسائلی همچون خاک برداری، تونل سازی و حفاری فضاهای زیرزمینی ارائه می‌دهد.

لایه‌های خاک محل بر اساس مطالعات ژئوتکنیک صورت گرفته و قضاوت مهندسی مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل سازی‌های انجام شده مدول باربرداری (E_{irr}) سه برابر مدول بارگذاری (E_{50}) در نظر گرفته شده است [۱۴].



شکل ۶: ابعاد مدل ساخته شده در پلکسیس سه بعدی

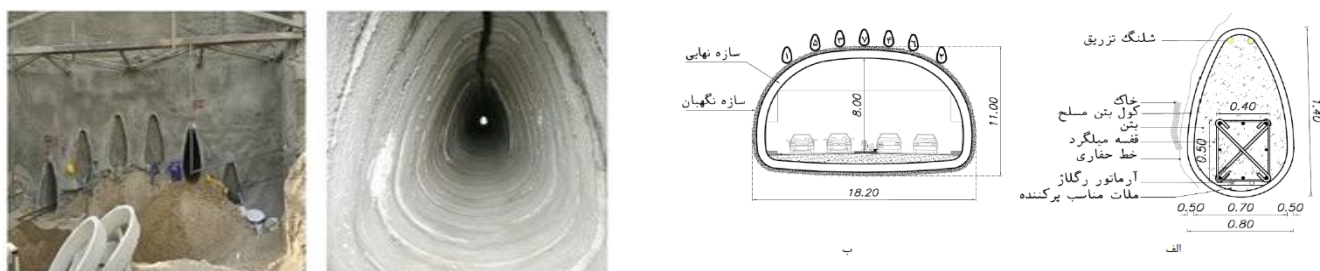
جدول ۳: مشخصات مقاومتی سیستم‌های نگهداری اولیه و موقت [۱۴].

سازه	Shot30	Shot25
مدل رفتاری	الاستیک	الاستیک
ضخامت D(m)	۰/۳	۰/۲۵
وزن مخصوص γ ($\frac{kN}{m^3}$)	۲۴	۲۴
مدول الاستیسیته E ($\frac{kN}{m^2}$)	۲۱E۶	۲۱E۶
نسبت پواسون ν	۰/۲۵	۰/۲۵

جدول ۴: مشخصات لایه‌های خاک در مدل عددی [۱۴].

لایه	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳
عمق (متر)	۲-۰	۲۱-۲	۵۷-۲۱
مدل رفتاری	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده
$\gamma \left(\frac{KN}{m^3}\right)$	۲۰	۲۰	۲۰
وزن مخصوص			
$E_{50} \left(\frac{KN}{m^2}\right)$	۱۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
سختی سه‌محوری			
$E_{oed} \left(\frac{KN}{m^2}\right)$	۱۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
سختی ادنومتر			
$E_{ur} \left(\frac{KN}{m^2}\right)$	۴۵۰۰۰	۲۲۵۰۰۰	۳۰۰۰۰۰
سختی بارگذاری			
باربرداری			
$C \left(\frac{KN}{m^2}\right)$	۱۰	۴۰	۵۵
چسبندگی			
$\varphi (deg)$	۲۵	۴۰	۴۰
زاویه اصطکاک			

وجود تأسیسات فراوان و متراکم از جمله عبور لوله آب ۹۰۰ و لوله گاز ۷۰۰ میلی‌متری و همچنین خطوط اصلی فیبر نوری امکان استفاده از روش‌های پیش تحکیمی متداول همچون فورپولینگ و ... را از بین می‌برد. بر این اساس از روشی نوین و ابتکاری جهت پیش تحکیمی توده خاک و توزیع تنش در حین حفاری استفاده شده است. این روش که با نام تیرهای پیشرو معروف است، شامل اجرای ۷ عدد تیربتنی مسلح در راستای طولی تونل با سطح مقطع هر تیر ۰/۸۴۹۸ مترمربع به شکل بیضی و با طول ۵۴ متر حفاری و اجرا شده است. شکل ۶ و شکل ۷ موقعیت قرارگیری این تیرها نسبت به تونل، ترتیب اجرای تیرها و همچنین مقطع یکی از این تیرها را نشان می‌دهد [۱۵].



شکل ۷: الف: جزئیات تیرهای پیشرو. ب: مقطع تونل و موقعیت قرارگیری تیرهای پیشرو. شکل ۸: اجرای تیرهای پیشرو در محل تونل استاد معین تهران

تیرهای پیشرو از نوع بتن C20 با مدل رفتاری Linear elastic در نظر گرفته شده است همچنین در نرم‌افزار پلکسیس تیر پیشرو با المان حجمی مدل‌سازی شده است و طبق آیین نامه ACI-318-19 ضریب کاهش سختی ۰/۶۷ برای تیرها لحاظ شده است (برای دیدن اثر ترک خوردگی از ضریب کاهش سختی استفاده شده است) که مشخصات این تیرها در جدول ۵ آورده شده است [۱۶].

جدول ۵: مشخصات تیرهای پیشرو در مدل عددی

نام	تیرپیشرو
مدل رفتاری	الاستیک خطی
γ وزن مخصوص ($\frac{KN}{m^3}$)	۲۴
E ($\frac{KN}{m^2}$)	۲۱E۶
مدول الاستیسیت	
ν نسبت پواسون	۰/۲

آنالیز حساسیتی مبنی بر تغییر مساحت تیرهای پیشرو صورت گرفت (در بخش ۷) که مشخصات این تغییر مساحت مطابق جدول ۶ می باشد. همچنین مساحت تیرهای پیشرو را باتوجه به مدل اصلی ساخته شده ۲۰ درصد کاهش، ۳۰ درصد افزایش و ۴۰ درصد افزایش داده ایم و این تغییر مساحت هم از ارتفاع و هم از عرض مقطع می باشد. ارتفاع و عرض تیرهای پیشرو در شکل ۷ الف قابل مشاهده می باشد.

جدول ۶: مشخصات تغییر مساحت تیرهای پیشرو

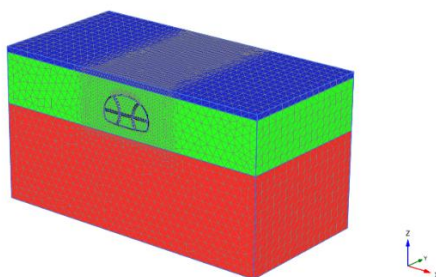
مدل	پارامتر	عرض (mm)	ارتفاع (mm)	ممان اینرسی (mm^4)
A_1		۷۲۰	۱۳۲۰	$۳/۷۵ \times 10^{10}$
A		۸۰۰	۱۴۰۰	$۷/۱۸ \times 10^{10}$
A_2		۹۰۰	۱۶۰۰	$۱۲/۰۵ \times 10^{10}$
A_3		۹۵۰	۱۶۶۰	$۱۳/۷۸ \times 10^{10}$

$$(A = T - With, A_1 = 0.8A, A_2 = 1.3A, A_3 = 1.4A)$$

۴- مش بندی مدل

در پروژه حاضر، در محدوده قرارگیری سازه تونل و تیرهای پیشرو از المان های ریزتری جهت مدل سازی دقیق تر رفتار غیرخطی توده خاک و تمرکز تنش در این محدوده استفاده شده است.

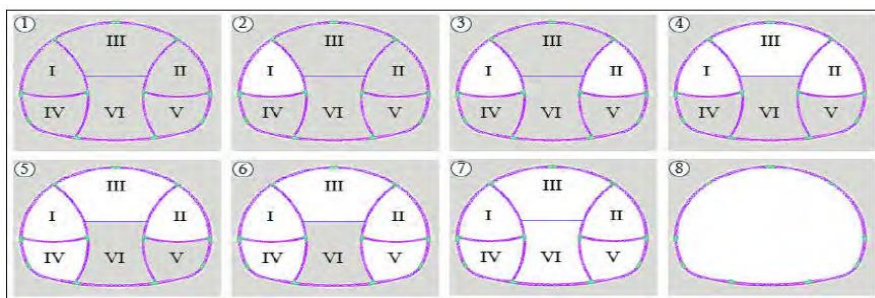
برای مش بندی آنالیز حساسیت انجام شده است و چندین مش بندی برای یکی از مدل ها مورد استفاده قرار گرفته است ولی برای حفظ اختصار در این مقاله آورده نشده است ولی در پایان نامه کارشناسی ارشد بررسی شده است [۱۷]. همچنین باتوجه به اینکه صحت سنجی انجام شده است این صحت سنجی تایید می کند که مش بندی پروژه حاضر مناسب می باشد.



شکل ۹: مش بندی انجام شده در نرم افزار Plaxis 3D

۵- مراحل مدل سازی تونل در پلکسیس

همان طور که توضیح داده شد روش حفاری در پروژه حاضر NATM می باشد در نرم افزار پلکسیس در فاز صفر برقراری تنش های اولیه در محیط انجام شد، در فاز اول بارگذاری ترافیک به مقدار ۲۰ کیلونیوتن بر مترمربع اعمال شد، در فاز دوم المان تیرهای پیشرو فعال شدند و از فاز سوم تا فاز هفدهم مطابق شکل ۱۰ به ترتیب، محیط معرف خاک در بخش های مختلف حذف و سپس پوشش موقت در بخش های مختلف فعال شدند.



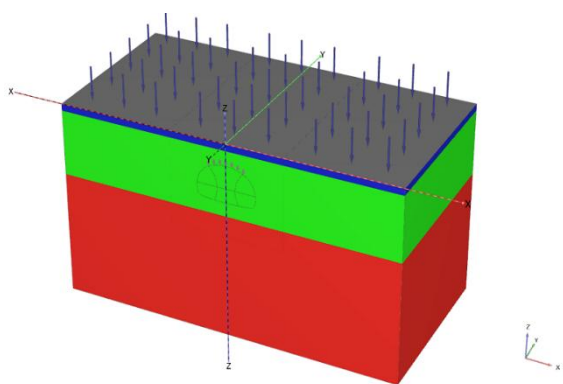
شکل ۱۰: ترتیب و توالی حفاری در تونل استاد معین تهران

۶- مدل سازی عددی و تحلیل نتایج

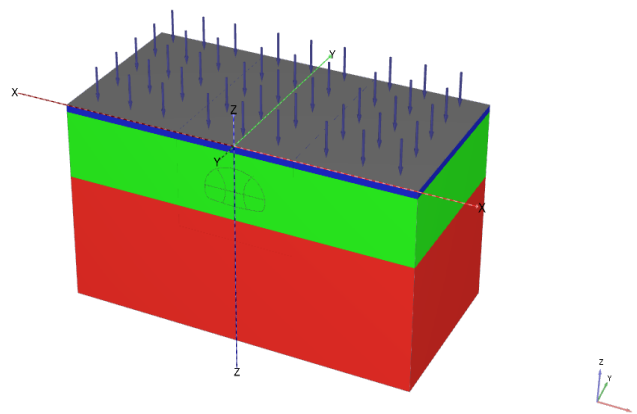
در این تحقیق از روش های عددی برای تعیین تغییر شکل و نشست ناشی از حفاری تونل و اجرای سازه نگهدارنده استفاده شده است. با مدل سازی دقیق مراحل روش اجرا و در نظر گرفتن اثرات ناشی از اجرای مرحله ای، بارهای سطحی ناشی از ترافیک و مشخصات مکانیکی توده خاک، مقادیر نشست های محتمل محاسبه گردیده است.

۷- مقایسه دو مدل بدون تیر پیشرو و با تیر پیشرو

دو مدل بدون تیر پیشرو (T) و با تیر پیشرو (T-With) با مشخصات خاک و سربار یکسان در نرم افزار Plaxis 3D مدل سازی شدند که در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ دو مدل بدون تیر پیشرو و با تیر پیشرو در نرم افزار نشان داده شده است همچنین نتایج خروجی این دو مدل استخراج شده در جدول ۷ قابل مشاهده می باشد.



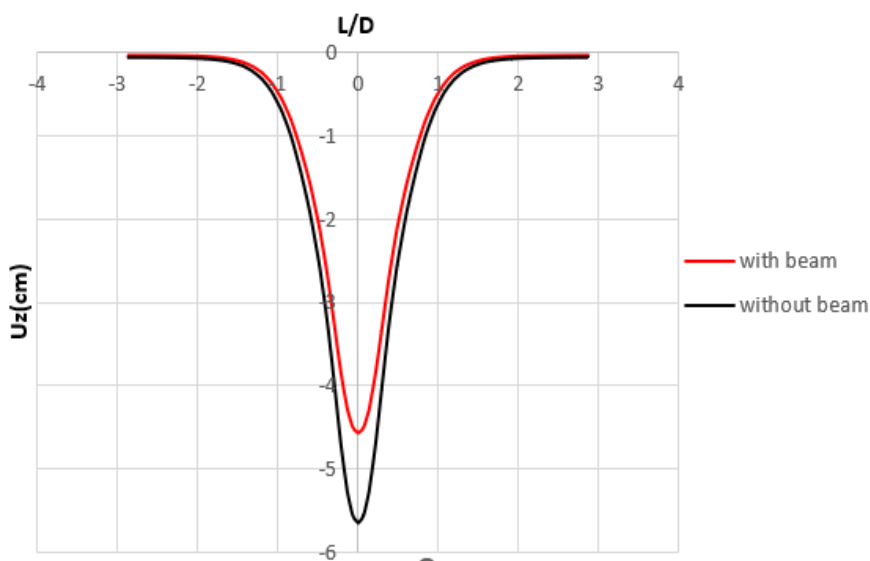
شکل ۱۲: تونل مدل شده با تیر پیشرو در نرم افزار Plaxis 3D



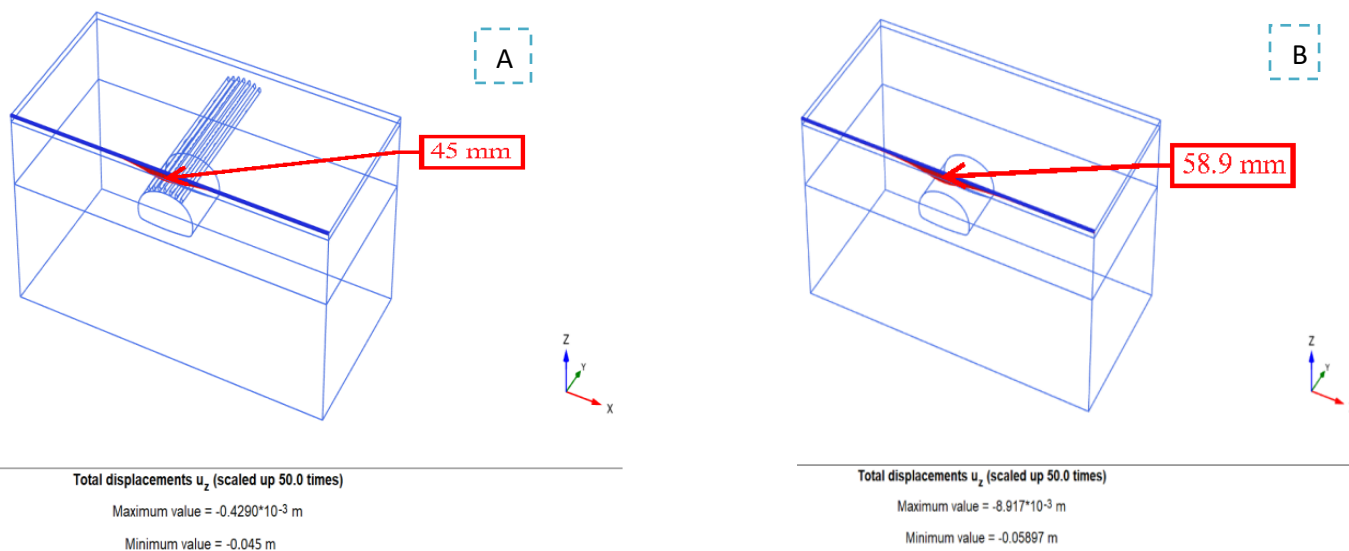
شکل ۱۱: تونل مدل شده بدون تیر پیشرو در نرم افزار Plaxis 3D

جدول ۷: نتایج خروجی دو مدل بدون تیر پیشرو و با تیر پیشرو

مدل‌ها	پارامترها	نشست (Uz)	لنگر خمشی (راستای x-M11) kN m/m	نیروی محوری (راستای z-N2) kN/m	نیروی برشی (راستای YZ-Q23) kN/m
بدون تیر پیشرو (T)	۵/۷	۵۴/۰۵	۳۱/۷۵	۳۳۵/۴	
باتیر پیشرو (T-With)	۴/۵	۵۱/۲۹	۲۷/۰۶	۳۳۲/۸	
درصد تغییرات (کاهش)	۲۱٪	٪۶	٪۱۵	٪۱	



شکل ۱۳: پروفیل عرضی نشست سطح زمین بدون تیر پیشرو و با تیر پیشرو بر حسب فاصله از محور تونل



شکل ۱۴: (A) پروفیل نشست سطح زمین در حالت باتیر پیشرو (T-With) (B) پروفیل نشست سطح زمین در حالت بدون تیر پیشرو (T)

باتوجه به نتایج به دست آمده از این دو مدل مشاهده می‌کنیم در صورت وجود سیستم نگهدارنده تیر پیشرو میزان نشست، لنگر خمشی و همچنین نیروهای پوشش تونل کاهش خوبی داشته است. کاهش نشست به میزان ۲۱ درصد بوده است که مقدار قابل توجهی می‌باشد و می‌توان گفت تیرهای پیشرو عملکرد خوبی بر روی تونل داشته اند.

۷- آنالیز حساسیت

به منظور بررسی اثر سیستم تیر پیشرو بر نشست سطحی، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مساحت تیرهای پیشرو، مقاومت فشاری تیرهای پیشرو، روبره (سربار) تونل و طول تونل صورت گرفت.

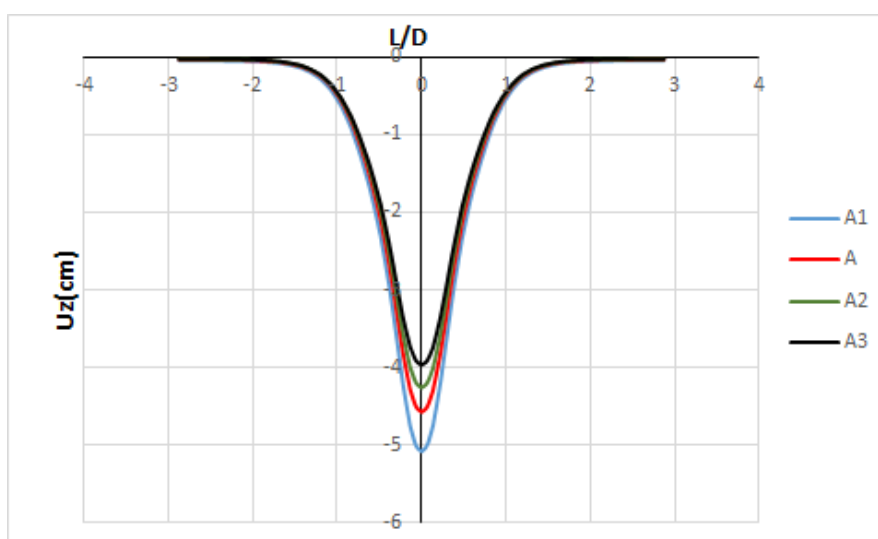
- آنالیز حساسیت مساحت تیرهای پیشرو

مساحت تیرهای پیشرو را باتوجه به مدل اصلی ساخته شده ۲۰ درصد کاهش، ۳۰ درصد افزایش و ۴۰ درصد افزایش داده ایم و مقادیر نشست سطح زمین، لنگر خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی سازه نگهدارنده (لاینینگ) تونل مقایسه شد و نتایج این مقایسه در جدول ۸ نشان داده شده است.

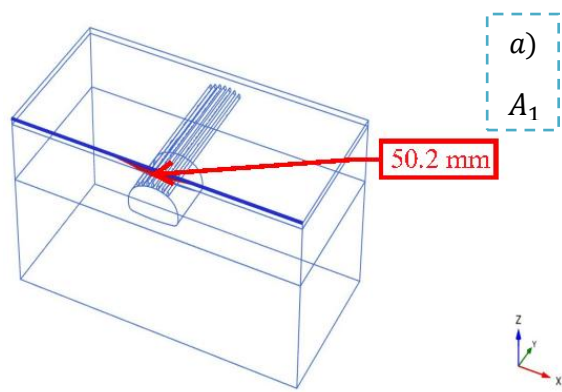
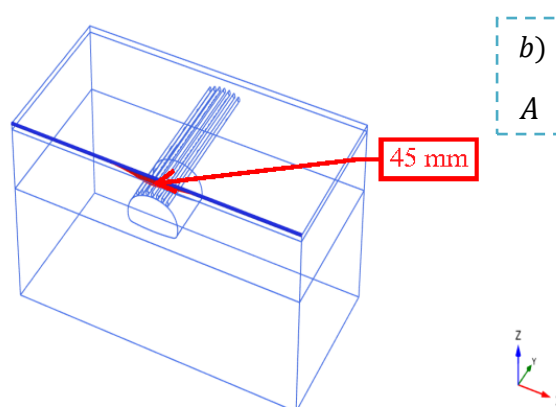
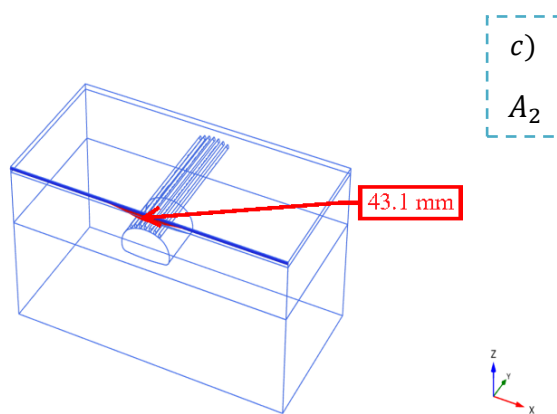
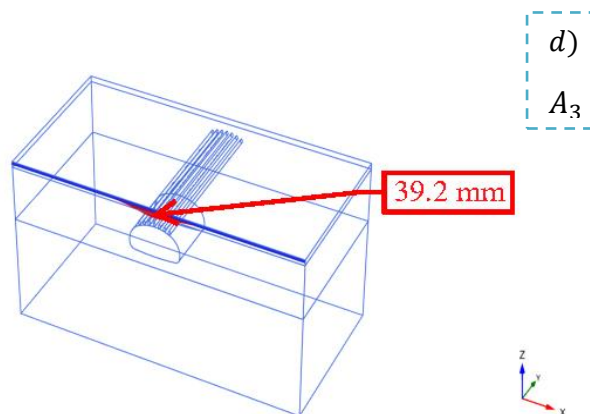
جدول ۸: نتایج خروجی تغییر مساحت تیرهای پیشرو

پارامترها	نشست (Uz) Cm	لنگر خمشی (راستای x-M11) kN m/m	نیروی محوری (راستای z-N2) kN/m	نیروی برشی (راستای YZ-Q23) kN/m	مدل‌ها
A ₁	۵/۰۲	۵۲/۵۴	۳۶/۸۶	۳۳۳/۹	
A	۴/۵۰	۵۱/۲۹	۲۷/۰۶	۳۳۲/۸	
A ₂	۴/۳۱	۵۰/۵۳	۲۶/۵۲	۳۳۲/۰	
A ₃	۳/۹۲	۵۰/۰۳	۲۵/۵۴	۳۳۱/۵	

(A = T - With , A₁ = 0.8A , A₂ = 1.3A , A₃ = 1.4A)



شکل ۱۵: پروفیل عرضی نشست سطح زمین با مساحت مختلف تیرهای پیشرو بر حسب فاصله از محور تونل

Total displacements u_z (scaled up 50.0 times)Maximum value = $-0.4255 \cdot 10^{-3}$ mMinimum value = -0.0502 mTotal displacements u_z (scaled up 50.0 times)Maximum value = $-0.4290 \cdot 10^{-3}$ mMinimum value = -0.045 mTotal displacements u_z (scaled up 50.0 times)Maximum value = $-0.4184 \cdot 10^{-3}$ mMinimum value = -0.0431 mTotal displacements u_z (scaled up 50.0 times)Maximum value = $-0.4224 \cdot 10^{-3}$ mMinimum value = -0.0392 m

شکل ۱۶: (a) پروفیل نشست سطح زمین در حالت ۲۰ درصد کاهش مساحت تیر پیشرو (b) پروفیل نشست سطح زمین مدل اصلی (c) پروفیل نشست سطح زمین در حالت ۳۰ درصد افزایش مساحت تیر پیشرو (d) پروفیل نشست سطح زمین در حالت ۴۰ درصد افزایش مساحت تیر پیشرو

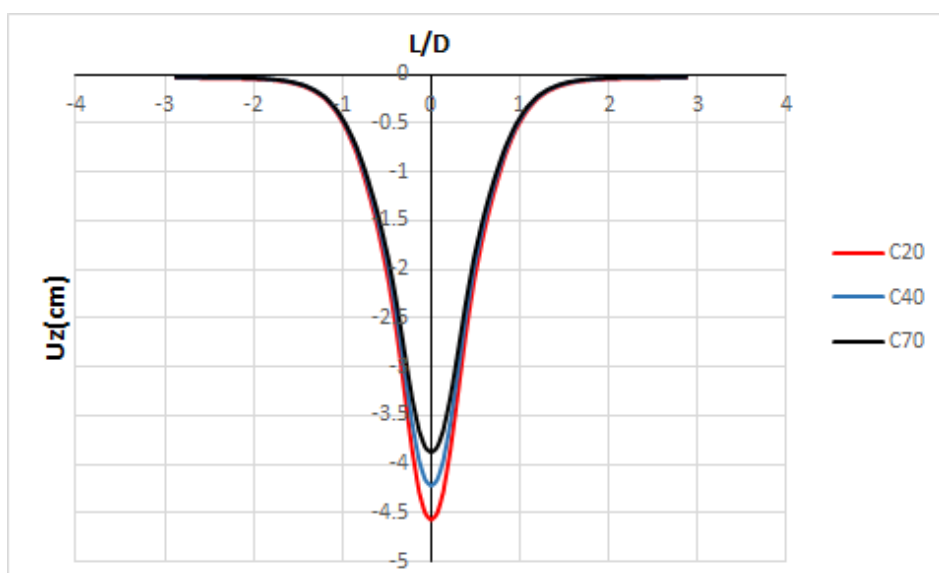
باتوجه به نتایج به دست آمده از این ۴ مدل ساخته شده در نرم افزار، مقادیر نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی با بزرگ شدن مساحت تیرهای پیشرو این پارامترها کمتر می شوند. میزان کاهش نشست از حالت ۲۰ درصد کاهش مساحت تیر پیشرو (A_1) نسبت به حالت ۴۰ درصد افزایش مساحت تیر پیشرو (A_3) ۲۸ درصد (A_3) می باشد که می توان نتیجه گرفت درصوت افزایش مساحت تیر پیشرو نشست سطح زمین کمتر می شود.

– آنالیز حساسیت مقاومت فشاری تیرهای پیشرو

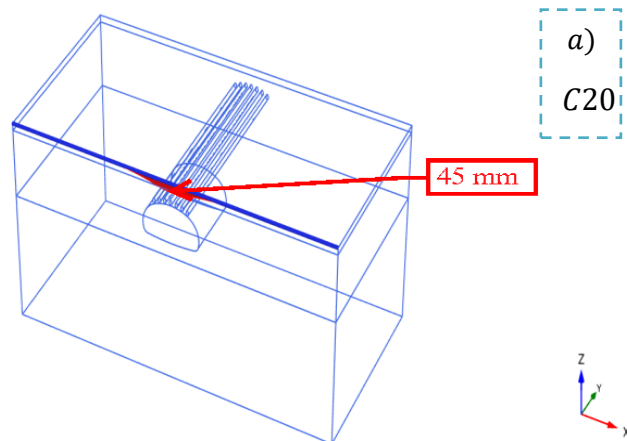
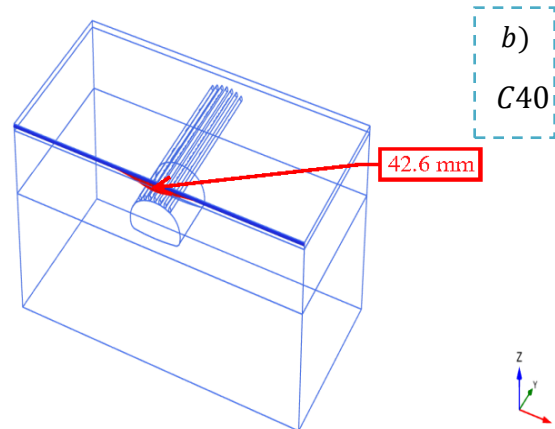
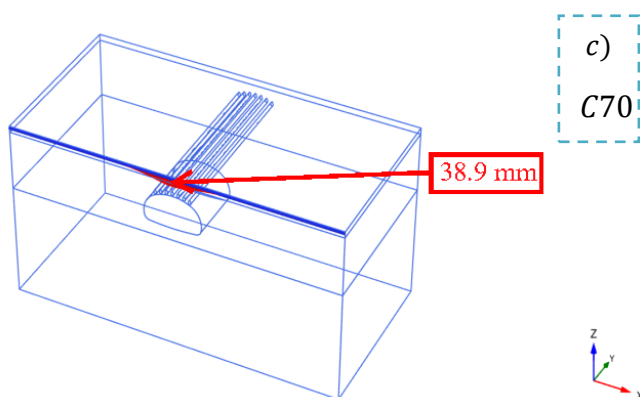
مقاومت فشاری تیرهای پیشرو مدل اصلی ۲۰ مگاپاسکال می باشد. دو مدل دیگر با مقاومت فشاری بتن ۴۰ و ۷۰ مگاپاسکال مدل سازی شدند تا عملکرد تیرهای پیشرو بر روی متغیرهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی سازه نگهبان تونل بررسی شود. جدول ۹ مقایسه نتایج پارامترهای این سه مدل را نشان می دهد.

جدول ۹: نتایج خروجی تغییر مقاومت فشاری بتن

پارامترها مدل‌ها	نشست (Uz) Cm	لنگر خمشی (راستای x-M11) kN m/m	نیروی محوری (راستای z-N2) kN/m	نیروی برشی (راستای YZ-Q23) kN/m
C20 (مدل اصلی)	۴/۵۰	۵۱/۲۹	۲۷/۰۶	۳۳۲/۸
C40	۴/۲۶	۵۱/۰۱	۲۳/۲۷	۳۳۱/۴
C70	۳/۸۹	۵۰/۰۳	۲۲/۹۷	۳۳۰/۷



شکل ۱۷: پروفیل عرضی نشست سطح زمین با تغییر مقاومت فشاری بتن بر حسب فاصله از محور تونل

Total displacements u_z (scaled up 50.0 times)Maximum value = $-0.4290 \cdot 10^{-3}$ mMinimum value = -0.045 mTotal displacements u_z (scaled up 50.0 times)Maximum value = $-0.4224 \cdot 10^{-3}$ mMinimum value = -0.0426 mTotal displacements u_z (scaled up 50.0 times)Maximum value = $-0.4184 \cdot 10^{-3}$ mMinimum value = -0.0389 m

شکل ۱۸: (a) پروفیل نشست سطح زمین با مقاومت فشاری بتن ۲۰ مگاپاسکال، (b) پروفیل نشست سطح زمین با مقاومت فشاری بتن ۴۰ مگاپاسکال، (c) پروفیل نشست سطح زمین با مقاومت فشاری بتن ۷۰ مگاپاسکال.

باتوجه به نتایج بدست آمده از جدول ۹ می توان نتیجه گرفت با افزایش مقاومت فشاری بتن، کاهش پارامترهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی را خواهیم داشت. کاهش میزان نشست سطح زمین در مدل C20 نسبت به مدل C70، ۱۶ درصد می باشد که می توان گفت؛ افزایش مقاومت فشاری بتن، تاثیر کمی روی پارامترها دارد زیرا افزایش مقاومت فشاری بتن، سختی عضو را متاثر نمی کند (با توجه به حضور ترک ها در قسمت خمشی ناحیه کششی) بنابراین، افزایش مقاومت فشاری در عضو بتن مسلح باعث افزایش آنچنانی در سختی نمی شود. با توجه به این که عملکرد این تیرهای پیشرو خمشی است. در عضو خمشی افزایش مقاومت بتن مترادف با بهبود عملکرد نمی باشد.

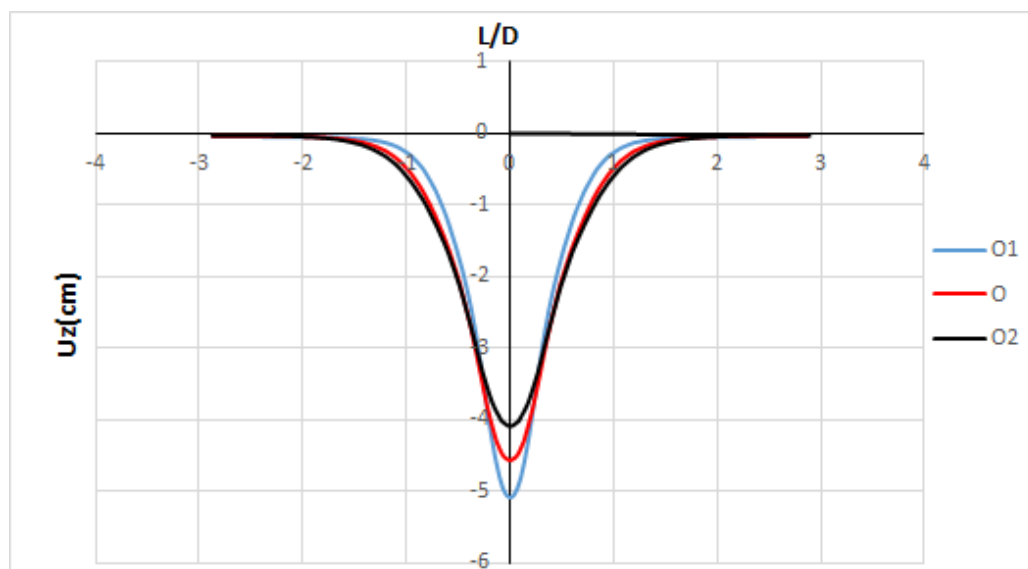
– آنالیز حساسیت روباره (سر بار) تونل

مدل اصلی با روباره تونل ۶/۵ متر ساخته شده است و مدل‌های دیگری با روباره تونل ۴ متر و ۸ متر نیز در نرم‌افزار مدل‌سازی شدند تا عملکرد تیرهای پیشرو بر روی متغیرهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی سازه نگهبان تونل بررسی شود. جدول ۱۰ مقایسه نتایج این سه مدل ارائه شده است.

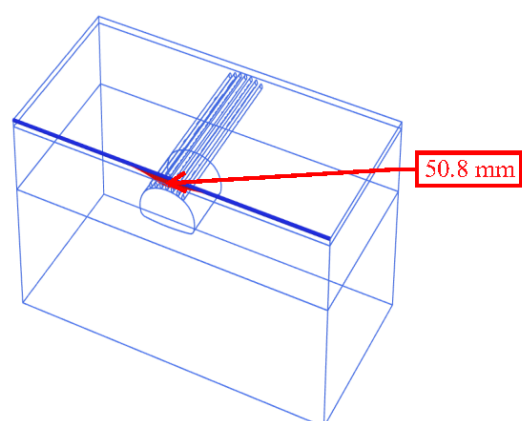
جدول ۱۰: نتایج خروجی تغییر روباره تونل

مدل‌ها	پارامترها	نشست (Uz) Cm	لنگر خمشی (راستای x-M11) kN m/m	نیروی محوری (راستای z-N2) kN/m	نیروی برشی (راستای YZ-Q23) kN/m
0	۴/۵	۵۱/۲۹	۲۷/۰۶	۳۳۲/۸	
O ₂	۴/۰۱	۴۷/۶۳	۲۶/۶۸	۳۰۳/۳	

(O₁: H = 4m , 0: H = 6.5m , O₂: H = 8m)



شکل ۱۹: پروفیل عرضی نشست سطح زمین با تغییر روباره تونل بر حسب فاصله از محور تونل

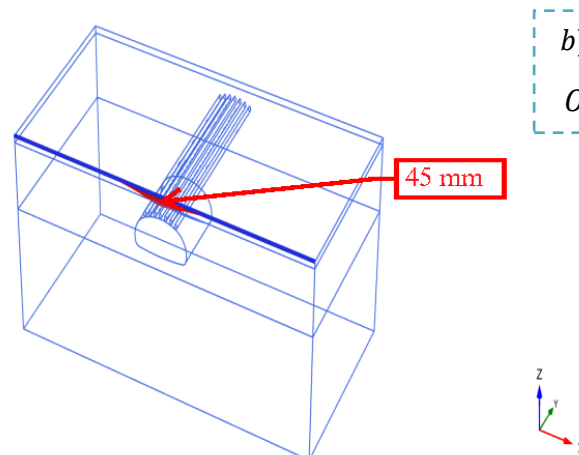


a)
 O_1

Total displacements u_z (scaled up 50.0 times)

Maximum value = -0.4438×10^{-3} m

Minimum value = -0.05086 m

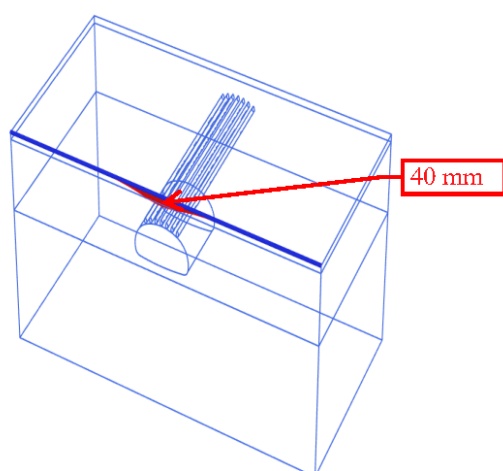


b)
 O

Total displacements u_z (scaled up 50.0 times)

Maximum value = -0.4290×10^{-3} m

Minimum value = -0.045 m



c)
 O_2

Total displacements u_z (scaled up 50.0 times)

Maximum value = -0.4119×10^{-3} m

Minimum value = -0.0401 m

شکل ۲۰: (a) پروفیل نشست سطح زمین با روباره تونل ۴ متر. (b) پروفیل نشست سطح زمین با روباره تونل ۶/۵ متر. (c) پروفیل نشست سطح زمین با روباره تونل ۸ متر.

از نتایج به دست آمده از جدول ۱۰ می توان گفت با افزایش روباره تونل مقادیر پارامترهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی کاهش داشته ایم. کاهش میزان نشست سطح زمین از حالت ۴ متر ارتفاع روباره تونل (O_1) نسبت به حالت ۸ متر روباره تونل (O_1)، ۲۷ درصد می باشد. به دلیل عمق کم روباره در این سه حالت، به واسطه arching و پدیده قوس زدگی مقدار ارتفاع قوس زدگی که روی تونل قرار دارد یکسان می باشد.

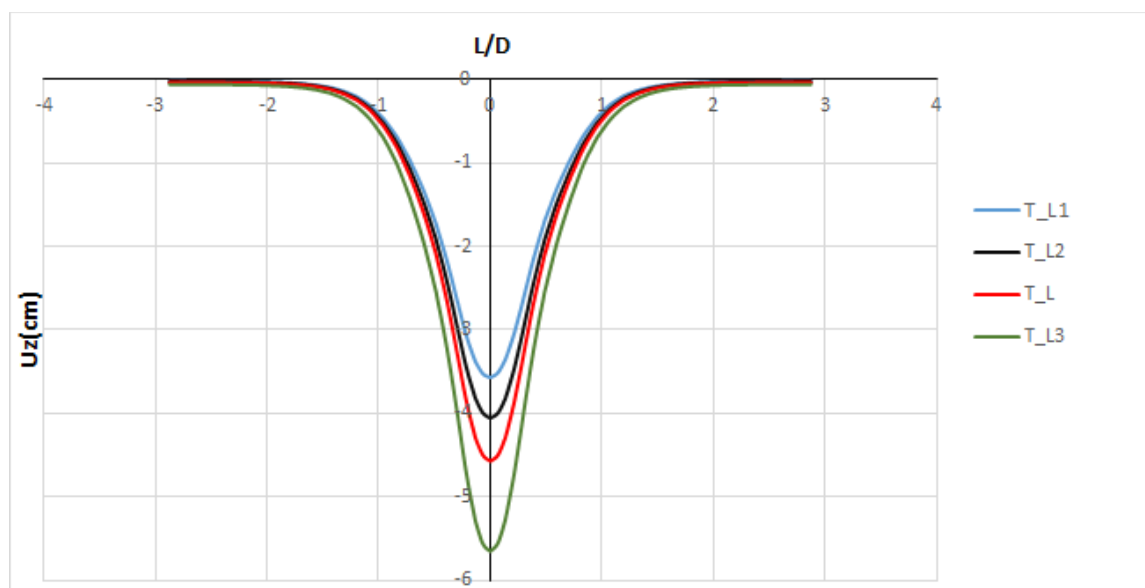
- آنالیز حساسیت طول تونل

طول تونل در مدل اصلی ۱۸ متر می باشد. سه مدل دیگر طول های متفاوت تونل مدلسازی شدند تا عملکرد تیرهای پیشرو بر روی متغیرهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی سازه نگهبان تونل بررسی شود. چهار مدل ساخته شده با نسبت $\frac{L}{D}$ های ۰/۵ و ۰/۷ و ۱/۵ و ۱ شدند (L طول تونل، D قطر تونل). جدول ۱۱ مقایسه نتایج پارامترهای این چهار مدل را نشان می دهد.

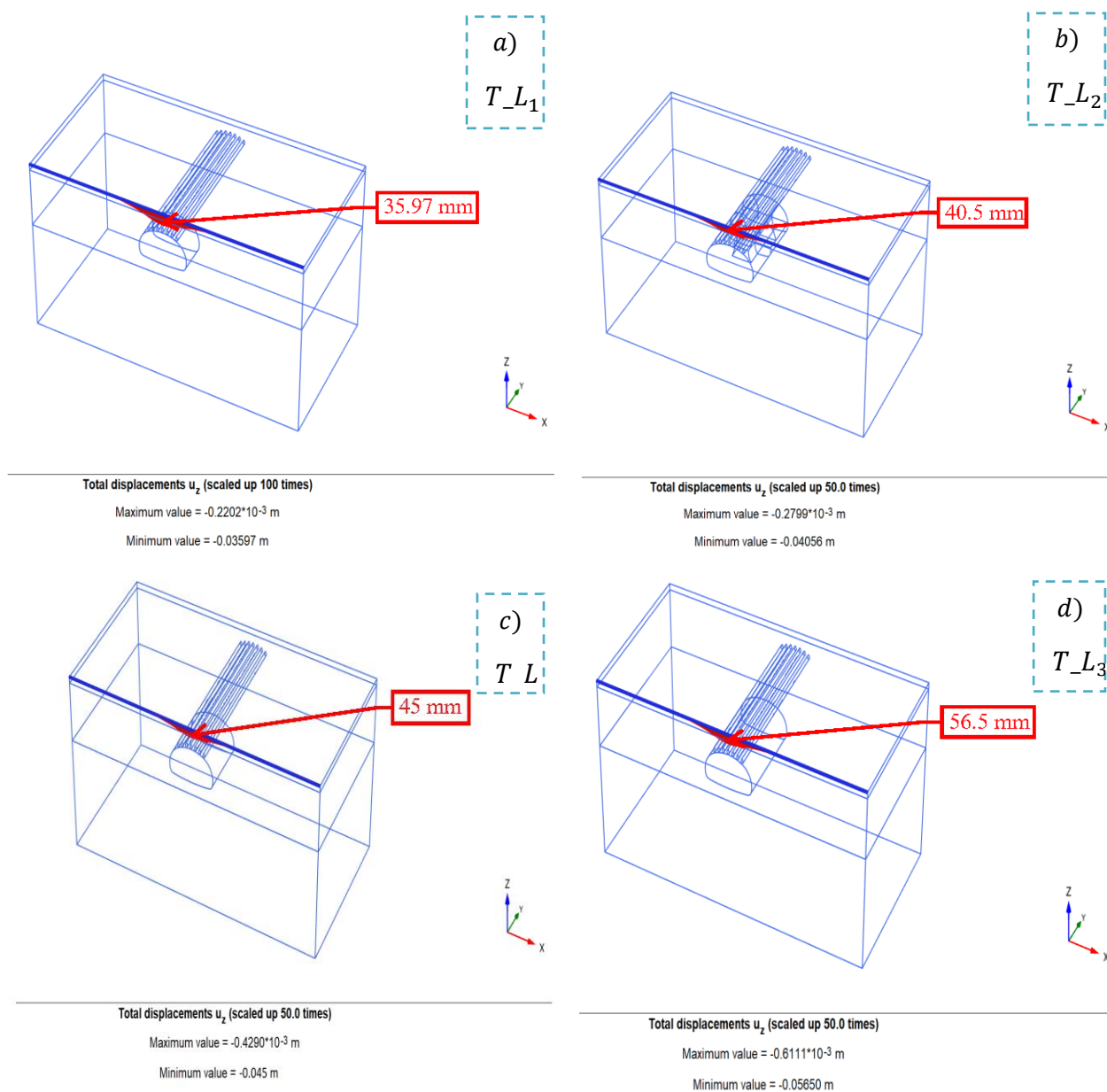
جدول ۱۱: نتایج خروجی تغییر طول تونل

پارامترها	نشست	لنگر خمشی (راستای x-M11)	نیروی محوری (راستای z-N2)	نیروی برشی (راستای YZ-Q23)	مدل ها
	(Uz)	kN m/m	kN/m	kN/m	
	Cm				
T_{L1}	۳/۵۹	۴۵/۶۷	۲۱/۰۱	۲۴۹/۹	
T_{L2}	۴/۰۵	۴۶/۲۸	۲۳/۹۲	۳۱۸/۳	
T_L	۴/۵	۵۱/۲۹	۲۷/۰۶	۳۳۲/۸	
T_{L3}	۵/۶۵	۵۲/۵۵	۳۷/۳۴	۳۷۰/۳	

$$(T_{L1} : \frac{L}{D} = 0.5, T_{L2} : \frac{L}{D} = 0.7, T_L : \frac{L}{D} = 1, T_{L3} : \frac{L}{D} = 1.5)$$



شکل ۲۱: پروفیل عرضی نشست سطح زمین با تغییر طول تونل بر حسب فاصله از محور تونل

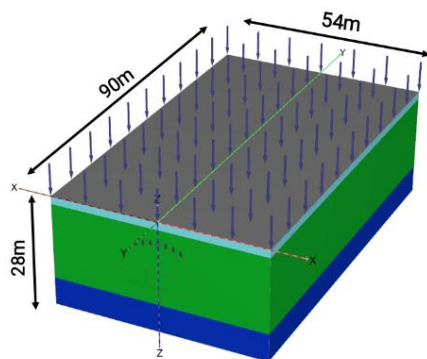


شکل ۲۲: (a) پروفیل نشست سطح زمین با ۱۰ متر طول تونل. (b) پروفیل نشست سطح زمین با ۱۳ متر طول تونل. (c) پروفیل نشست سطح زمین با ۱۸ متر طول تونل. (d) پروفیل نشست سطح زمین با ۲۸ متر طول تونل.

از نتایج به دست آمده از جدول ۱۱ می توان نتیجه گرفت با افزایش طول تونل مقادیر پارامترهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی افزایش یافته اند. این افزایش میزان نشست از حالت ۱۰ متر طول تونل (T_{L_1}) نسبت به حالت ۲۸ متر طول تونل (T_{L_3})، ۳۷ درصد می باشد؛ که می توان نتیجه گرفت برای $\frac{L}{D}$ های کمتر، اثر تیرهای پیشرو بیشتر می شود و نشست ها در سطح زمین کمتر خواهد شد.

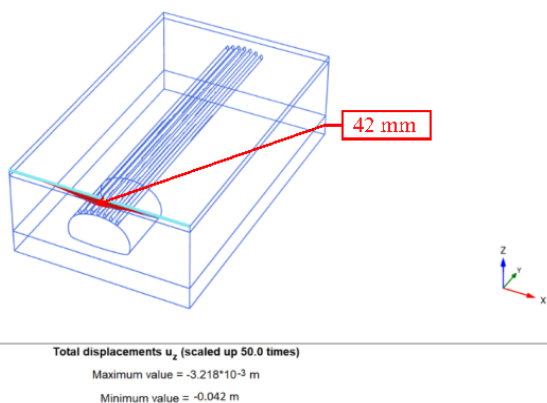
۸- مدل با ابعاد بیشتر و طول بیشتر تیرهای پیشرو

برای اطمینان بیشتر از نتایج حاصل از مدل‌های ساخته شده، مدلی با بعد در راستای طولی تونل ۵ برابر قطر تونل (۹۰ متر) ساخته شد که ابعاد این مدل در شکل ۲۳ قابل مشاهده می‌باشد (جهت کاهش زمان تحلیل، ابعاد دیگر کمتر در نظر گرفته شد).

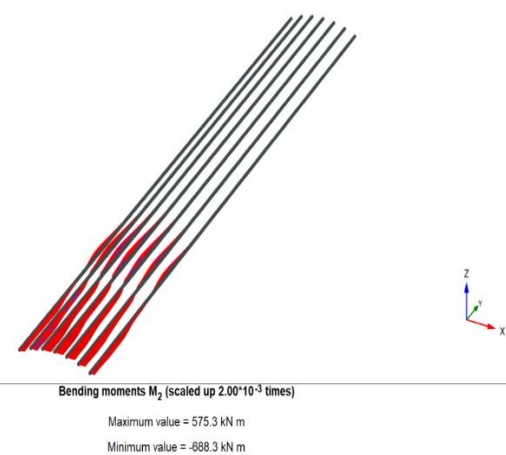


شکل ۲۳: ابعاد مدل ساخته شده

همانطور که در شکل ۲۴ و ۲۵ مشاهده می‌کنیم این تیرهای پیشرو از نوع خمشی هستند و لنگر خمشی دارند. همچنین میزان نشست سطح زمین مشابه حالت با ۵۴ متر در راستای طولی تونل (T-With) می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت طول بیشتر بعد در راستای طولی تونل تأثیری بر روی نتایج نداشته است.



شکل ۲۵: پروفیل نشست سطح زمین در حالت طول بیشتر تیرهای پیشرو



شکل ۲۴: لنگر خمشی تیرهای پیشرو

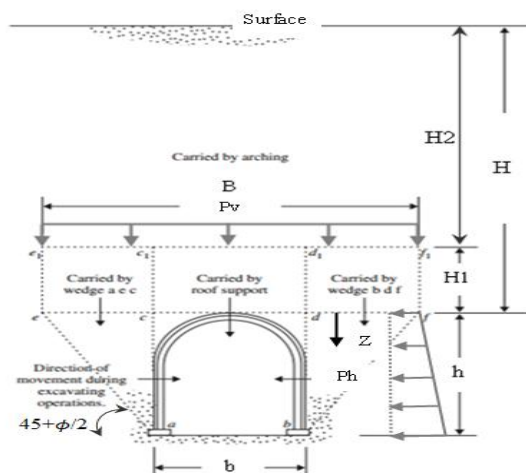
۹- طراحی دستی تیر پیشرو

طبق نظریه ترزاقی فشار عمودی روی تونل از رابطه (۱) بدست می‌آید [۱۸].

$$P_V = \frac{(\gamma - \frac{2C}{B})B}{2K \tan \varphi} (1 - e^{\frac{-2k \tan \varphi H_1}{B}}) + \gamma H_2 e^{\frac{-2k \tan \varphi H_1}{B}} \quad (1)$$

در این رابطه C چسبندگی خاک، H_1 ارتفاع قوسی، H_2 فاصله سطح زمین تا تاج قوسی، b عرض یا قطر تونل، γ وزن مخصوص معادل خاک، ϕ زاویه اصطکاک معادل خاک، K از نمودار بدست می‌آید، B مطابق شکل ۲۶ از رابطه (۲) بدست می‌آید و P_v فشار عمودی متوسط روی تاج تونل می‌باشد [۱۸].

$$B = b + 2h \tan^{-1}(45 - \phi/2) \quad (2)$$



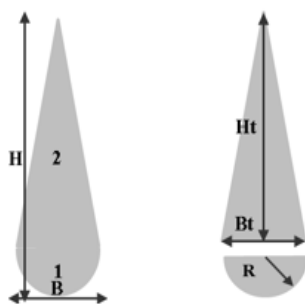
شکل ۲۶: مدل بار روی تونل [۱۸].

باتوجه به داده‌های موجود و با استفاده از رابطه (۱) مقدار فشار عمودی متوسط روی تونل ۱۰۵ کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین ارتفاع سست‌شدگی از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$H_{\text{arching}}(m) = \frac{P_v}{\gamma} \quad (3)$$

که ارتفاع سست‌شدگی ۵/۲۳ متر می‌باشد. این به این معنی است که از ۶/۲۵ متر از روباره تونل، حدود ۵/۲۳ متر هنگام حفاری می‌ریزد (در صورت نبود سیستم نگهداری).

برای طراحی تیرهای پیشرو باتوجه به اینکه مقطع تیرها شبیه به سنگ می‌باشند این تیر را به دو شکل هندسی مثلث و نیم‌دایره تقسیم کردیم که شماتیک این اشکال هندسی در شکل ۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۲۷: شکل هندسی تیرهای پیشرو

مشخصات هندسی این تیرهای پیشرو به صورت زیر می باشد:

$$B_t = 0.8 \text{ m}, \quad H_t = 1 \text{ m}, \quad B = 0.8 \text{ m}, \quad H = 1.4 \text{ m}, \quad R = 0.4 \text{ m}$$

با استفاده از سطح مقطع و ممان اینرسی تیرهای پیشرو و معادل کردن این تیرها به یک مستطیل می توان ابعاد مستطیل را بدست آورد و سپس طراحی مورد نظر را انجام داد.

$$Br = b \text{ (m)} = 0.57, \quad Hr = h \text{ (m)} = 1.15$$

چون این تیرهای پیشرو با خاک در تماس است مقدار پوشش (cover)، ۱۵ سانتی متر دارد، که عمق موثر تیر را ۱ متر در نظر می گیریم. برای طراحی، این تیر را مانند یک تیر یک سرگیردار در نظر می گیریم که روی آن بارسنگ ترازقی معادل ۱۰۵ کیلوپاسکال قرار دارد. می توان با استفاده از روابط زیر مقدار لنگر را بدست آورد [۱۸].

$$M = \frac{q L^2}{2N} \quad (4)$$

$$M = 747.07 \text{ kNm}$$

$$M = \rho b d^2 f_y \left(1 - 0.59 \frac{\rho f_y}{0.85 f_c}\right) \quad (5)$$

$$\rho_{\min} = \left\{ \frac{1.4}{f_y}, \frac{0.25 \sqrt{f_c}}{f_y} \right\} \quad (6)$$

$$A_s = \rho b d \quad (7)$$

$$A_s = 1981 \text{ mm}^2$$

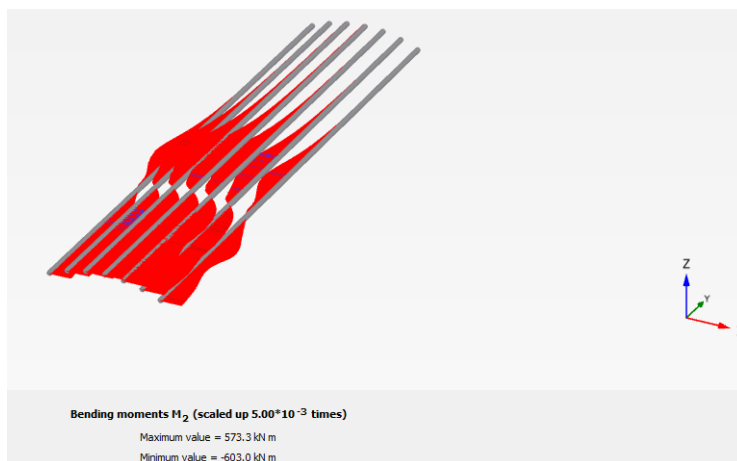
بافرض قطر میلگرد ۲۰ میلی متر می توان تعداد میلگردها را بدست آورد:

$$N_\phi = \frac{A_s}{\frac{\pi \phi^2}{4}} \quad (8)$$

$$N_\phi = 6 \text{ عدد}$$

۱۰- مقایسه نتایج دستی با مدل عددی

با توجه به شکل ۲۸ مقدار لنگر خمشی تیرهای پیشرو در مدل عددی $573/3 \text{ kN m}$ می باشد که کمتر از مقدار لنگر خمشی در روش محاسبات دستی ($747/07 \text{ kN m}$) می باشد. بنابراین، براساس مطالعه ای که بر روی تونل استاد معین تهران صورت گرفته است، میزان لنگر محاسبه شده با استفاده از روش دستی حداقل به میزان ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است اما برای تعمیم نتایج نیاز به مطالعات بیشتری احساس می شود و نمی توان با مطالعات محدود به نتیجه قطعی رسید.



شکل ۲۸: لنگر خمشی تیرهای پیشرو در مدل سازی عددی

۱۱- نتیجه گیری

به طور کلی با استفاده از ۱۲ مدل عددی ساخته شده در نرم افزار پلکسیس سه بعدی، کاهش نشست های سطح زمین در اثر وجود پیش نگهدارنده تیر پیشرو وجود دارد و همچنین با افزایش مساحت تیرهای پیشرو، افزایش مقاومت فشاری بتن تیرهای پیشرو، افزایش روباره تونل و کاهش طول تونل، اثر تیرهای پیشرو بیشتر می شود و در نتیجه مقدار نشست سطح زمین کمتر خواهد شد.

باتوجه به نتایج بدست آمده از دو مدل بدون تیر پیشرو و با تیر پیشرو مشاهده می کنیم در صورت وجود سیستم نگهدارنده تیر پیشرو میزان نشست، لنگر خمشی و همچنین نیروهای پوشش تونل کاهش خوبی دارند در واقع استفاده از تیر پیشرو با مقاومت فشاری بتن ۲۰ مگاپاسکال با مساحت $0/8498$ مترمربع و روباره تونل $6/5$ متر (تونل استاد معین تهران) میزان کاهش نشست سطح زمین ۲۱ درصد می باشد.

باتوجه به نتایج بدست آمده از ۴ مدل ساخته شده با مساحت مختلف تیرهای پیشرو در نرم افزار مقادیر نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی با بزرگ شدن مساحت تیرهای پیشرو این پارامترها کمتر می شوند. میزان کاهش نشست از حالت ۲۰ درصد کاهش مساحت تیر پیشرو (A_1) نسبت به حالت ۴۰ درصد افزایش مساحت تیر پیشرو (A_3) می باشد.

با افزایش مقاومت فشاری بتن تیرهای پیشرو، کاهش پارامترهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی را خواهیم داشت. کاهش میزان نشست سطح زمین در مدل C20 نسبت به مدل C70، ۱۶ درصد می باشد که می توان گفت؛ افزایش مقاومت فشاری بتن، تاثیر کمی روی پارامترها دارد زیرا افزایش مقاومت فشاری بتن، سختی عضو را متاثر نمی کند (با توجه به حضور ترک ها در قسمت خمشی ناحیه کششی) بنابراین، افزایش مقاومت فشاری در عضو بتن مسلح باعث افزایش آنچنانی در سختی نمی شود. با توجه به این که عملکرد این تیرهای پیشرو خمشی است. در عضو خمشی افزایش مقاومت بتن مترادف با بهبود عملکرد نمی باشد.

با افزایش روباره تونل مقادیر پارامترهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی کاهش پیدا کرده اند و کاهش میزان نشست سطح زمین از حالت ۴ متر ارتفاع روباره تونل (O_1) نسبت به حالت ۸ متر روباره تونل (O_2)، ۲۷ درصد می باشد، می توان گفت با افزایش روباره تونل پایداری تونل بیشتر می شود، در نتیجه مقدار نشست سطح زمین کمتر خواهد بود.

با افزایش طول تونل مقادیر پارامترهای نشست، لنگر خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروی برشی افزایش یافته اند. این افزایش میزان نشست از حالت ۱۰ متر طول تونل (T_L1) نسبت به حالت ۲۸ متر طول تونل (T_L3)، ۳۷ درصد می باشد؛ که می توان نتیجه گرفت برای $\frac{L}{D}$ های کمتر، اثر تیرهای پیشرو بیشتر می شود و نشست ها در سطح زمین کمتر خواهد شد.

بر اساس مطالعه ای که بر روی تونل استاد معین تهران صورت گرفته است، میزان لنگر محاسبه شده با استفاده از روش دستی حداقل به میزان ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است اما برای تعمیم نتایج نیاز به مطالعات بیشتری احساس می شود و نمی توان با مطالعات محدود به نتیجه قطعی رسید.

به طور کلی توصیه می شود در تونل های کم عمق شهری برای کاهش میزان نشست سطح زمین از سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو استفاده شود.

قدردانی

از همکاری و حمایت های سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، شرکت مهندسی مشاور رهساز طرح و همچنین از پشتیبانی و همکاری دانشگاه صنعتی شاهرود که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می کنیم.

مراجع

- [1] Tahmasebi, M., Shirinabadi, R., Hosseini, M., & Aboutalebi, A. (2018) Analysis of pre-retaining systems and their effects on reducing settlement caused by excavation of underground spaces, Fifth Iranian Dam and Tunnel Conference and Exhibition.
- [2] Zhang, Y., Zhao, X., Guo, F., Tao, L., Liu, J., Liao, W., ... & Yang, X. (2025). Construction techniques and support effect of large-diameter pipe roof for ultra-shallow buried subway station. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29(2), 100098.
- [3] Gangwar, A., Handa, S., Kumar, J., Singh, M., & Dwivedi, R. D. (2025). A Case Study of Tunnel Stability in Quaternary Deposits Using Pipe-Roof Supports. *Indian Geotechnical Journal*, 55(1), 426-442.
- [4] Ergincan, H. E., Ozudogru, T. Y., & Yildirim, I. Z. Numerical Modeling of NATM Tunnels Pre-Supported with Umbrella Arch Method: Comparison with Field Measurements. In *Geo-Congress 2024* (pp. 140-151).
- [5] Siad, I., Akchiche, M., & Spyridis, P. (2023). Effect of the Umbrella Arch Technique Modelled as a Homogenized Area above a Cross Passage. *Applied Sciences*, 13(3), 1588.
- [6] Zhao, J., Tan, Z., Li, L., Zhang, B., Liang, W., & Kong, H. (2023). Mechanism effect of umbrella arch supports in a shallow long-span tunnel: A case study. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24(1), 29.
- [7] Bagherzadeh, P., Goshtasbi, K., & Kashef, M. (2020). Umbrella arch method performance, structural behavior and design elements utilizing in collapsing zones. *Environmental Earth Sciences*, 79(23), 521.
- [8] Morovatdar, A., Palassi, M., & Ashtiani, R. S. (2020). Effect of pipe characteristics in umbrella arch method on controlling tunneling-induced settlements in soft grounds. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(5), 984-1000.
- [9] Li, R., Zhang, D., Wu, P., Fang, Q., Li, A., & Cao, L. (2020). Combined application of pipe roof pre-support and curtain grouting pre-reinforcement in closely spaced large span triple tunnels. *Applied Sciences*, 10(9), 3186 .
- [10] Dehghan, A.N.(2020) Influence of Forepoling Umbrella on the settlements induced by shallow urban tunneling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38: p. 5005-5022.
- [11] Le, B. and R. Taylor, (2016) A study on the reinforcing capabilities of Forepoling Umbrella System in urban tunnelling.
- [12] Shi, Y., et al., (2017) Performance evaluation of long pipe roof for tunneling below existing highway based on field tests and numerical analysis: case study. *International Journal of Geomechanics*, 17(9): p. 04017054.
- [13] Vitali, O.P., Celestino, T. B., & Bobet, A (2022) Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil. *Underground Space*, 7(1), 1-18.,.

- [14] Geotechnical report of the project by Ostad Moein Tehran, Rahasaz Tarh Consulting Engineers (1392) Tehran: 9,18,38,39
- [15] Engineers., C.R., (2021) Structural design criteria for urban and suburban train tracks.
- [16] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) First printing: June 2019 ISBN: 978-1-64195-056-5 DOI: 10.14359/51716937
- [17] Amini kheyrahad.M. Evaluating the effect of NATM method in the ground surface settlement of urban shallow tunnels (1402). MSc graduated. Shahrood University of Technology
- [18] Terzaghi, K., (1946) Rock defects and loads on tunnel supports. Rock tunneling with steel supports.