

Study of the behavior of large section underground spaces for multi-stage excavating system (Case study: Qom metro)

Navid Ganjian¹, Mehrad Mirsepahi², Fatemeh Omid³, Mohammad Ali Omid⁴, Saeed HejaziRad⁵, GholamReza Panah⁶

1- Assistant professor, Department of civil engineering, science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Ph.D., Department of Civil Engineering, Arak branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Civil engineering student, Department of Civil Engineering, University of Science and Industry, Tehran, Iran

4- Master of civil engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, AUT (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

5- Ph.D., Department of civil engineering, science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

6- Master of civil engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, AUT (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

ABSTRACT

Excavating tunnels in soft urban land has its own limitations. One of the most important limitations is the control of surface settlements to prevent damage to surface structures. Accordingly, choosing the best method for tunnel excavation is very significant. Among the existing methods for digging urban tunnels, step drilling methods are very widely used. Typically, these methods are not comparable to the mechanized drilling method for long tunnels. However, step drilling methods are used to drill short tunnels, large sections such as subway stations, non-circular sections, and complex structures such as intersections. Among the most important executive parts of step drilling are the length of the drilling step and the distance between the work fronts. Although these two parameters are very influential factors on the technical and economic aspects of the step drilling method, but there is no coherent process to determine these two parameters. In this research, the drilling stages of the tunnel of line A of Qom metro have been investigated in order to determine the length of the drilling step and the distance between the work fronts. The method of excavating this tunnel is pre support method. Using three-dimensional finite element modeling (Praxis 3D Tunnel), tunnel drilling is simulated in different progress modes. Eight progressive modes are provided for step length and six modes for spacing between fronts. The length of the drilling step and the distance between the work fronts are selected by examining the effect of different forward modes on the transverse diagrams of surface settlement, settlement values and soil displacement around the tunnel. Studies show that the same drilling step of 1 meter for the upper and lower parts with a distance of 25 meters between the fronts (a distance of more than one diameter of the tunnel), has the best performance for tunneling.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 April 2021

Revise Date: 08 May 2021

Accept Date: 01 June 2021

Keywords:

Excavation methods

Urban area

Ground surface settlement

Excavating step length

Finite Element Method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.281896.2429>

*Corresponding author: Navid Ganjian

Email address: N.ganjian@srbiau.ac.ir

مطالعه رفتار تونل های مترو برای سیستم حفاری چند مرحله ای (مطالعه موردی: مترو

قم)

نوید گنجیان^{۱*}، مهرداد میرسپاهی^۲، فاطمه امید^۳، محمد علی امید^۴، سعید حجازی راد^۵، غلامرضا پناه^۶

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

۵- دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۶- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

حفر تونل در زمین نرم شهری محدودیت های خاص خود را دارد. از مهمترین این محدودیت ها، کنترل نشست سطحی است تا از وارد شدن خسارت به سازه های سطحی جلوگیری شود. بنابراین، انتخاب بهترین روش برای حفاری تونل بسیار اهمیت دارد. در میان روش های موجود برای حفر تونل های شهری، روش های حفاری مرحله ای بسیار پرکاربرد هستند. به طور معمول این روش ها قابل مقایسه با روش حفاری مکانیزه برای تونل های طویل نیستند. اما روش های حفاری مرحله ای برای حفاری تونل های کوتاه، مقاطع بزرگ مانند ایستگاه های مترو، مقاطع غیر دایروی و سازه های پیچیده مانند تقاطع ها بکار می روند. از جمله مهم ترین بخش های اجرایی حفاری مرحله ای، طول گام حفاری و فاصله بین جبهه کارها می باشد. با وجود اینکه این ۲ پارامتر از عوامل بسیار تأثیرگذار بر جنبه های فنی و اقتصادی روش حفاری مرحله ای می باشند، ولی فرآیند منسجمی برای تعیین این دو پارامتر وجود ندارد. در این تحقیق، مراحل حفاری تونل خط A متروی شهر قم به منظور تعیین طول گام حفاری و فاصله بین جبهه کارها بررسی شده است. روش حفر این تونل، طاق و پاتاق می باشد. با استفاده از مدل سازی المان محدود سه بعدی (Plaxis 3D Tunnel) حفاری تونل در حالت های مختلف پیشروی شبیه سازی شده است. هشت حالت پیشروی برای طول گام و شش حالت برای فاصله بین جبهه کارها در نظر گرفته شده است. طول گام حفاری و فاصله بین جبهه کارها با بررسی اثر حالت های مختلف پیشروی بر نمودارهای عرضی نشست سطحی، مقادیر نشست و جابجایی خاک اطراف تونل انتخاب می شود. بررسی ها نشان می دهد که گام حفاری یکسان ۱ متر برای قسمت فوقانی و تحتانی با فاصله ۲۵ متر بین جبهه کارها (فاصله ای بیشتر از یک قطر تونل)، بهترین کارایی را برای تونلسازی دارد.

کلمات کلیدی: روش های حفاری مرحله ای، زمین نرم شهری، نشست سطح زمین، طول گام حفاری، فاصله بین جبهه کارها، روش

المان محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.281896.2429	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.281896.2429	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۱۱	۱۴۰۰/۰۳/۱۱	۱۴۰۰/۰۲/۱۸	۱۴۰۰/۰۱/۲۹
				نوید گنجیان [*]		
				پست الکترونیکی:		
				N.ganjan@srbiau.ac.ir		

۱- مقدمه

نیاز به فضاهای زیرزمینی از گذشته مورد توجه انسان بوده است. با پیشرفت سریع تکنولوژی و علوم از جمله ژئوتکنیک و شناخت دقیق تر رفتار سنگ و خاک و با توجه به نیازهای روزافزون جوامع بشری کاربردهای بسیاری را برای فضاهای زیرزمینی میتوان متصور شد. مشکلاتی که در ساخت فضاهای زیرزمینی نقش دارند شامل، هزینه و زمان زیاد، در خطر بودن نیروی انسانی و سازه های مجاور فضای زیرزمینی، حساس بودن به کیفیت محاسبات، در برخی موارد ناهمخوانی شرایط بوجود آمده با پیش بینی های قبلی می باشد [۱].

با توجه به افزایش جمعیت و گسترش روزافزون شهرها و محدودیت استفاده از سطح زمین جهت کاهش ترافیک، ساخت تأسیسات و مراکز خدمات رسانی لزوم احداث فضاهای زیرزمینی مانند تونل های شهری بیش از پیش احساس می شود. از مهم ترین انواع تونل های شهری می توان به تونل های راه و مترو اشاره نمود که می توانند سهم به سزایی در کاهش ترافیک شهری داشته باشند. عوامل مختلف فنی، زمین شناسی و ژئوتکنیکی بسیاری در ساخت تونل های شهری به علت محدودیت های موجود در این گونه محیط ها نقش دارند. از طرفی ساخت تونل های شهری مسائل و مشکلات خاص خود را دارد. به طور مثال خاک محیط های شهری بسیار سست بوده و همچنین عمق روباره در بالای این نوع فضاها کم است. بنابراین حفظ پایداری فضاهای زیرزمینی در محیط های شهری در زمان حفاری و جلوگیری از نشست های احتمالی مشکل است.

تعداد تونل های شهری ساخته شده و در حال اجرا در شهرهای بزرگ جهان که در جدول (۱) به تعدادی از آنها اشاره شده، نشان دهنده این واقعیت است که تونل ها راه حلی مناسب برای کاهش ترافیک و عوارض ناشی از آن می باشد. تونل های شهری بر اساس شرایط ژئوتکنیکی، نوع کاربری، رعایت ایمنی، اندازه مقطع حفاری و نظایر آنها ممکن است با استفاده از حفاری مرحله ای و یا تمام مقطع به صورت یک تونل بزرگ مقطع دو خطه و یا دو تونل تک خطه موازی با مقطع کوچک ساخته شوند [۲]. اجرای تونل های شهری از جنبه های مختلفی مانند انتخاب مسیر، روش پیش نگهداری و روش حفاری قابل بررسی می باشد.

جدول (۱) تونل های شهری برخی از کشورها

ردیف	نام پروژه	کشور	طول تونل (کیلومتر)	بازه زمانی پروژه
۱	خط ۳ مترو Guangzhou	چین	۶۷/۳	۲۰۰۵-۲۰۱۰
۲	خط ۲ مترو Montreal	کانادا	۳۰/۸	۱۹۶۶-۲۰۰۷
۳	Berlin U-Bahn (Transit)	آلمان	۳۱/۸	۱۹۲۴-۱۹۸۴
۴	خط ۱۰ سیستم زیرگذر Beijing	چین	۵۴/۸	۲۰۰۸-۲۰۱۲
۵	خط دایروی Mass Rapid Transit	سنگاپور	۳۵/۵	۲۰۰۹-۲۰۱۱
۶	خط ۵ سیستم زیرگذر سئول	کره جنوبی	۴۷/۶	۱۹۹۵-۱۹۹۶
۷	زیرگذر Toe oedo	ژاپن	۴۰/۷	۱۹۹۱-۲۰۰۰
۸	خط ۱۲ مترو مادرید	اسپانیا	۴۰/۹۶	۲۰۰۳
۹	خط ۲ مترو مسکو	روسیه	۴۱/۵	۱۹۸۳-۲۰۰۲
۱۰	خط زرد مترو Delhi	هند	۲۴	۲۰۱۰
۱۱	خط ۹ مترو Seoul	کره جنوبی	۲۳/۴	۲۰۰۹
۱۲	خط ۱ مترو Warsaw	لهستان	۲۳/۱	۱۹۹۵-۲۰۰۸
۱۳	خط ۶ مترو Shanghai	چین	۲۰/۳۴	۲۰۰۷-۲۰۱۱
۱۴	خط ۹ مترو Paris	فرانسه	۱۸/۶	۱۹۱۰-۱۹۸۷
۱۵	خط ۱ مترو تهران	ایران	۱۴/۹	۲۰۰۱-۲۰۱۲
۱۶	تونل نیایش تهران	ایران	۱۰/۲۵	۲۰۱۱-۲۰۱۳
۱۷	تونل توحید تهران	ایران	۲/۱۳	۲۰۰۷-۲۰۰۹
۱۸	تونل رسالت تهران	ایران	۰/۹۳	۱۹۹۷-۲۰۰۶

تونلسازی شهری دارای برخی از ویژگی های خاص ژئوتکنیک، ساختاری و زیست محیطی و محدودیت هایی نسبت به مناطق غیر شهری می باشد، که شامل موارد مذکور می باشد: تداخلات بالقوه با ساختمان های سطحی، تأسیسات زیرزمینی و سطحی و سایر ساختارهای زیر سطح، مطالعات ضعیف و یا ناکافی مکان یابی کارگاه به علت عدم اجازه یا اشغال سطح، تونل شهری عموماً در عمق کم که اغلب از زمین های نرم شامل خاک غیر یکنواخت، بی نهایت متغیر و شاید ترکیبات ساخته شده به وسیله انسان در طول سال های مختلف تشکیل شده، ساخته می شود. حضور آب بالای تونل، نشست زمین ناشی از حفر تونل با خسارت احتمالی به سازه های موجود (ساختمان ها، پلها و غیره) و تأسیسات بالای تونل، طرح نظارت ژئوتکنیک، سازه ای و زیست محیطی مورد نیاز است، که نه تنها نیاز به ورودی پول بیشتر دارد بلکه تلاش اضافی انسان را نیز می خواهد، محدودیت ها برای نصب و راه اندازی دستگاه در مسیر تونل، ساختمان ها و دیگر سازه های سطحی، در طول تونل در مناطق شهری، یک طرح مناسب برای انحراف موقت ترافیک، یک برنامه دقیق برای محیط کار، توجه خاص به کنترل گرد و غبار و سر و صدا و تولید گازهای گلخانه ای و مراقبت های ویژه مسائل ایمنی لازم است. محیط سیاسی و فیزیکی شهرهای بزرگ باعث می شود تصمیم گیری در مورد پروژه های ساخت و ساز بزرگ نه به عنوان یک مسأله سه بعدی، بلکه به عنوان مسأله چهار بعدی با در نظر گرفتن زمان و حتی به عنوان مسأله پنج بعدی شامل سیاست در نظر گرفته شود [۳،۴].

برای ساخت تونل های شهری روش های مختلفی وجود دارد. این روش ها را می توان در یک دسته بندی کلی به دو روش سطحی (ترانشه باز) و زیرزمینی تقسیم کرد. در حالت کلی استفاده از روش های زیرزمینی به نسبت روش های سطحی به علت تداخل روش های سطحی در ترافیک و تأسیسات مطلوب تر است. روش های زیرزمینی به دو صورت حفاری تمام مقطع و یا مرحله ای انجام می شود. در حفاری تمام مقطع که بر اساس استفاده از **TBM** شکل گرفته، به علت همزمان بودن حفاری و نصب نگهداری دائم کمترین میزان نشست در سطح زمین ایجاد می شود. از روش های سطحی تونلسازی شهری می توان به روش کند و پوش و روش پوش و کند اشاره کرد.

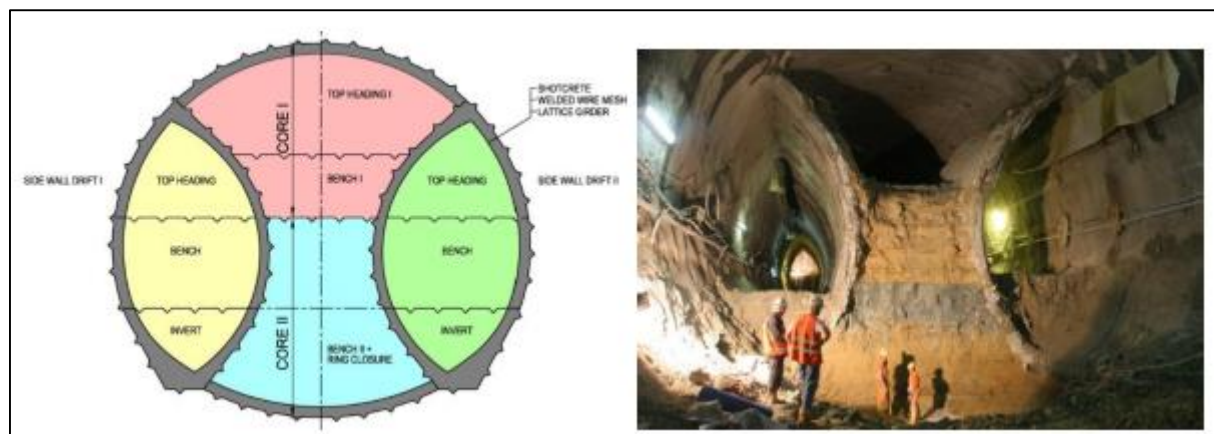
روش مدنظر در تحقیق بر مبنای روش اتریشی بوده که بر اساس تجربیات به دست آمده از احداث تونل های مختلف تحت شرایط زمین شناسی متفاوت ابداع شده است. مبنای کار به این صورت است که در ابتدا دو دالان یکی در پایین و دیگری در بالای تونل اصلی ایجاد می شد. به تدریج همراه با پیشروی، دالان بالایی به طرف جوانب و پایین تونل گسترش می یافت. این عمل همراه با نگهداری حائل بندی تونل انجام می شد [۵]. اساس این روش استفاده از حداکثر توانایی باربری زمین اطراف و بهره گیری از خاصیت خودایستایی محیط پیرامون تونل با فعال کردن پدیده قوس زدگی در زمین است [۶].

روند طراحی در این روش را می توان به دو عامل تقسیم بندی کرد. اولین عامل نیازهای سیستم پوشش این روش نسبت به شرایط زمین و عامل دیگر در نظر گرفتن محدودیت های خارجی مانند میزان نشست، تکنولوژی مهندسی، تأثیرات زیست محیطی، مسائل قرار دادی و مالی و غیره است. بعد از تعیین ابعاد و اندازه های تونل با توجه به کار برد، برای طراحی بر اساس **NATM** بیشتر تمرکز بر مشخصات پوشش های تونل است [۷]. طراحی پوشش اولیه از مهم ترین بخش های روش **NATM** است. انعطاف پذیری و ضخامت پوشش اولیه با اضافه شدن تقویت کننده ها مثل مش فولادی، راک بولت و تقسیم بندی حفاری برای افزایش پایداری جبهه کار باید در نظر گرفته شود. تغییر مشخصات پوشش با گذشت زمان و بسته شدن حلقه کمکی به صورت بهینه از جمله مسائلی است که باید به آن توجه شود [۸].

در شکل (۱) نمایی از مقطع تونل حفر شده به روش گالری های کناری، که یکی از روش های حفاری مرحله ای است، نمایش داده شده است.

¹ Tunnel Boring Machine

² New Austrian Tunnel Method



شکل (۱): نمایی از مقطع تونل حفر شده به روش گالری های کناری [۱۰]

از جمله مهم ترین بخش های اجرایی روش مرحله ای، طول گام حفاری و فاصله بین جبهه کارها می باشد. منظور از گام حفاری (دهانه فعال)، طولی بدون نگهداری از دهانه تونل است که فرض می شود در هر مرحله حفر می شود. در روش حفاری مرحله ای بعد از تقسیم مقطع تونل، هر قطعه بطور جداگانه با فواصل مشخص از بالا به پایین به صورت عمودی حفر می شود. بطور مثال در روش طاق و پاطاق قسمت فوقانی با گام حفاری مشخص حفر شده و سپس نگهداری می شود. با تکرار این مرحله و با رسیدن به یک فاصله از پیش تعیین شده بین قسمت فوقانی و تحتانی، حفاری قسمت تحتانی آغاز می شود. علت این امر این است که در اثر حفاری، یک زون بحرانی در جلوی جبهه کار بوجود می آید. اگر جبهه کارها نزدیک هم باشند، زون های بحرانی مربوط به جبهه کارهای مختلف در هم تداخل داشته و موجب بروز جابجایی بیشتر در تاج تونل و در نتیجه نشست بیشتر در سطح زمین می شوند، بنابراین رسیدن به یک فاصله مکانی مناسب بین جبهه کارها بگونه ای که زون های بحرانی کمترین تأثیر را روی هم داشته باشند، امری ضروری است [۹]. با وجود اینکه این دو پارامتر از عوامل بسیار تأثیرگذار بر جنبه های فنی و اقتصادی روش حفاری مرحله ای می باشند، ولی فرآیند منسجمی برای تعیین این دو پارامتر وجود ندارد [۱۰]. از این رو مطالعه بر روی این دو پارامتر اجرایی و تعیین فواصل بهینه جهت افزایش سرعت عملیات حفاری همراه با کاهش احتمال ریزش تونل، کاهش بار وارده بیش از حد به سیستم نگهداری و جلوگیری از طراحی غیراقتصادی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

۲- نشست زمین ناشی از ساخت تونل

حفر تونل باعث حذف توده ای از سنگ و خاک شده و میدان تنش در منطقه را تغییر می دهد. از مهم ترین تأثیرات ناشی از حفر تونل و نشست زمین به خصوص در مناطق شهری، ایجاد خطرات ناشی از این پدیده بر روی ساختمان ها می باشد. حرکات سطحی بر اثر حفر تونل های کم عمق تفاوت زیادی با پدیده نشست در معادن عمیق دارد. این تفاوت نه تنها به واسطه اختلاف در عمق و وجود لایه های مختلف زمین شناسی است، بلکه به دلیل حساسیت نسبت به میزان نشست و اثر احتمالی بر سازه های سطحی به خصوص سازه های مسکونی می باشد. در یک طبقه بندی کلی می توان گفت روش های پیش بینی و محاسبه نشست زمین در اثر ساخت تونل ها به روش های تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم می شود.

در طول چند دهه اخیر روش های عددی به دلیل امکان تطبیق اجزای مختلف مسئله اندرکنش در یک تحلیل و توانایی دخالت دادن پارامترهای متنوع تونلسازی مورد توجه قرار گرفته اند. انواع روش های عددی را می توان به روش المان محدود^۳، روش المان مرزی^۴، روش تفاضل محدود^۵، روش المان مجزاء^۶ و روش شبکه شکستگی های مجزاء^۷ تقسیم بندی کرد [۱۱].

³ Finite Element Method (FEM)

⁴ Boundary Element METHOD (BEM)

کاتزنیخ و برث (۱۹۸۱) تحلیل المان محدود سه بعدی تونلسازی NATM در شهر فرانکفورت را ارائه کردند. نتایج تحلیل آنها رفتارهای سه بعدی خاک اطراف جبهه کار تونل از قبیل قوسی شدن و اهمیت بستن حلقه نگهداری در پایداری جبهه کار را نشان می‌داد [۱۲]. دساری و همکارانش (۱۹۹۶) حفاری تونل آزمایشی هیترودر شهر لندن را با استفاده از روش المان محدود سه بعدی مدل‌سازی کردند. مطالعات آنها نشان داد که مدول یانگ وابسته به زمان پوشش تونل، تأثیر زیادی بر گودی نشست سطح زمین ندارد. همچنین آنها بیان کردند شرایط تثبیت نشست در فاصله $2D$ (D قطر تونل) پشت جبهه کار، برقرار می‌شود [۱۳].

تأثیر طول گام حفاری بر منحنی نشست توسط تانگ و همکاران (۲۰۰۰) بوسیله مدل‌سازی المان محدود سه بعدی بررسی شد. آنها تونل با دو طول گام حفاری ۵ و ۱۰ متر را مدل‌سازی کردند. منحنی عرضی نشست آنها صرف نظر از طول گام حفاری خیلی پهن بوده و منحنی طولی در هر دو طول حفاری در فاصله ای در حدود ۲۰ متر پشت جبهه کار تونل بصورت افقی در آمده که نشان دهنده تثبیت رفتار نشست در این ناحیه است [۱۴].

ورمیر و همکارانش (۲۰۰۲) با مدل‌سازی المان محدود سه بعدی، اهمیت مرحله اول ساخت تونل را بر پایداری جبهه کار نشان دادند. آنها دریافتند که فاز اول حفاری تأثیر زیادی بر کل تحلیل داشته و شرایط تثبیت نشست فقط در فاصله مشخصی از جبهه کار تونل (5D) برقرار می‌شود [۱۴]. الی و شوپرت (۲۰۰۸) با ساخت مدل فیزیکی و تفاضل محدود سه بعدی، مکانیزم و ارتباط بین همگرایی

تونل و طول گام حفاری را تعیین کردند [۱۵]. یو (۲۰۰۹) بررسی عددی المان محدود سه بعدی تونلسازی NATM با چند جبهه کار را در زمین نرم (مترو شهر سئول)، انجام داد. یو نشان داد روش حفاری گالری‌های جانبی نسبت به روش طاق و پطاق دارای کارایی بیشتری در تمامی جنبه‌های تونلسازی می‌باشد. بر اساس نتایج مطالعه یو، بهترین کارایی تونلسازی را زمانی که فاصله بین جبهه کارها بیشتر از یک قطر تونل باشد، می‌توان به دست آورد [۱۶]. شریف زاده و همکاران (۲۰۱۳) به طراحی روش حفاری مرحله ای تونل های بزرگ مقطع شهری در زمین نرم بر اساس داده های تونل نیایش شهر تهران پرداختند. آنها جهت مدل‌سازی از روش عددی المان محدود سه بعدی استفاده کردند. با انجام تحلیل بر روی منحنی‌های عرضی و طولی نشست سطح زمین، نوع روش حفاری مرحله ای، طول بهینه گام حفاری، فاصله بهینه بین جبهه کارها و توالی مناسب حفاری مقاطع انتخاب شد. نتایج حاصل از این تحقیق برای فاصله بهینه بین جبهه کارها، تطابق خوبی با نتایج مطالعه یو (۲۰۰۹) دارد [۱۷]. در سال‌های اخیر، استفاده از روش جدید اتریشی برای حفاری‌های شهری با شرایط ساختمانی سخت افزایش یافته است اگر چه اصول اولیه این روش توسط رابسونج و مولر تاسیس و برای حفاری تونل در شرایط ساختمانی مناسب گسترش یافت [۱۸]. مطالعاتی در رابطه با بررسی اثرات مراحل حفاری یک تونل فرضی ایده آل بر نشست زمین به صورت سه بعدی صورت گرفته است [۱۹]. لی و وانگ بعداً اثرات روش حفاری پیش نگهدارنده طاق بتنی تونل بر نشست متروی را توسط روش اجزاء محدود به صورت دو بعدی (کرنش مسطح) و سه بعدی ارزیابی کردند. تمرکز مطالعه آنها بر تفاوت نتایج دوبعدی و سه بعدی بود [۲۰].

⁵ Finite Difference Method (FDM)

⁶ Distinct Element Method (DEM)

⁷ District Fracture Network (DFN)

۳- مدلسازی عددی

خاک موجود در طبیعت به ندرت حالت کلاسیک (همگن، ایزوتروپ و ارتجاعی) دارد. لذا در کاربرد تئوری ها، روابط و نمودارهای ارائه شده برای تخمین خواص مهندسی خاک و قضاوت مهندسی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. همچنین معضلات موجود در زمین از جمله زمین لغزش، روان گرایی، نشست و غیره مهندسین طراح را ضمن غافلگیری با مشکلات بسیاری مواجه می کند که رهایی از آنها به تکنولوژی و دانش پیشرفته نیازمند می باشد. خوشبختانه پس از سالها انتظار نرم افزاری جامع در حوضه ژئوتکنیک تحت عنوان Plaxis عرضه شده و در دنیا با استقبال چشمگیری مواجه شده است. به همین دلیل شاید بتوان گفت نیاز مبرم دانشگاه ها، مؤسسات آموزشی و مهندسین مشاور به نرم افزارهای قوی تحلیل و طراحی در زمینه ژئوتکنیک و وجود مسائل و مشکلات خاص مهندسین طراح در این زمینه از یک طرف و طیف وسیع کاربری این نرم افزار در عرصه های مختلف ژئوتکنیک از طرف دیگر، انگیزه اصلی در ارائه این نرم افزار بوده است. Plaxis نرم افزاری المان محدود در تحلیل تغییر شکل ها و پایداری در پروژه های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. معمولا در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدلسازی رفتار غیر خطی و وابسته به زمان خاک ها بسته به هدف مورد نظر لازم است. با این نرم افزار می توان خاکبرداری و خاکریزی مرحله ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان های مثلثی ۶ و ۱۵ گرهی مدلسازی نمود. المان های مثلثی ۶ و ۱۵ گرهی برای تحلیل دو بعدی و تنها المان ۱۵ گرهی برای تحلیل سه بعدی قابل استفاده است.

۴- معرفی قطار شهری قم

قم استانی در مرکز ایران در مجاورت استان های تهران، مرکزی، اصفهان و سمنان است و برای عبور از استان های شمالی به استان های مرکزی و جنوبی کشور می بایست از این استان گذر کرد.

وجود آستانه مقدس حضرت معصومه (س) و همچنین مسجد جمکران سالانه جمع کثیری از زائران ایرانی و کشورهای مسلمان جهان را به سوی خود جلب می کند؛ همچنین وجود حوزه علمیه قم و حضور برخی از مراجع تقلید در این شهر و استقبال جمع کثیری از مسلمانان جهان برای تحصیل در این حوزه، وجهه شهر را به گونه دیگری تغییر داده است.

پروژه خط مترو قطار شهری قم، جنوب غربی به شمال شرقی می باشد و مطالعات زمین شناختی نیز در همین گستره انجام گرفته است. موقعیت خط متروی قم با حفظ دسترسی های محلی، از مسجد جمکران آغاز و در قلعه کامکار خاتمه می یابد. لازم به ذکر است، دسترسی به قطار شهری برای مسافران درون شهری از طریق ۱۴ ایستگاه پیش بینی شده است. سکوهای مسافرگیری در کلیه ایستگاه ها در طرفین خط ریلی قرار داشته و بدون قوس می باشند. متوسط طول ایستگاه ها ۱۰۹ متر و فاصله مرکز به مرکز ایستگاه های متوالی بین ۶۶۰ تا ۱۹۸۰ متر یعنی بطور متوسط ۱ کیلومتر می باشد.

این خط شامل توقفگاه ابتدایی در حوالی مسجد جمکران بوده و محل دیو آن در منطقه کامکار می باشد. دیپوی خط در انتهای مسیر، ۳۷ هکتار مساحت دارد .

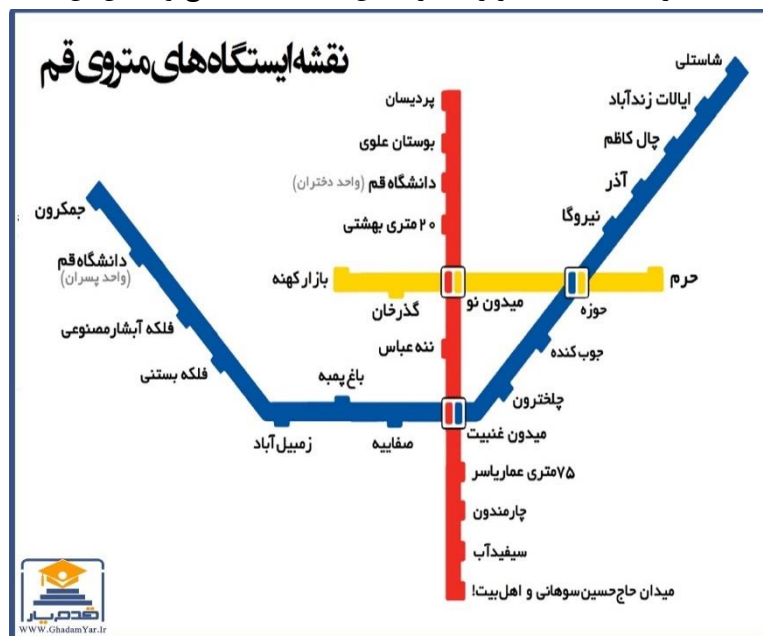
موقعیت قرارگیری محل دیو در این منطقه و فاصله ۴/۵ کیلومتری از ایستگاه گارمانوری خط راه آهن تهران-قم، امکان اتصال خط متروی قم را به ایستگاه یاد شده میسر می گرداند.

ابتدای مسیر از توقفگاه ابتدایی (در تراز ۱۸- متر) شروع و با توجه به پلان طراحی شده از میدان بقیه...، ولیعصر، در امتداد خیابان دل آذر تا میدان پلیس ادامه می‌یابد و سپس با عبور از موقعیت خیابان میرزای قمی، محلهٔ چهل اختران، تقاطع غیرهمسطح عمار یاسر به چهار راه بازار، پل علیخانی، میدان مطهری، خیابان هدف، میدان سعیدی با قوس‌هایی در طول خیابان امامزاده ابراهیم(ع). در ادامه بعد از عبور از تقاطع غیرهمسطح راه‌آهن و عبور از مقابل صحن امامزاده ابراهیم(ع)، میدان معصومیه، میدان کشاورز ادامه می‌یابد و در انتها به محله قلعه کامکار رسیده و به پایان می‌رسد.

بررسی بر روی گمانه‌های حفاری شده در این محدوده مورد بررسی نشان می‌دهد که این رسوبات اغلب از خاک درشت دانه شن و ماسه تشکیل شده و با حرکت به سمت شرق ساختگاه و با دور شدن از قسمت‌های مرکزی دانه تر شده است. این مصالح از دیدگاه مکانیکی دارای مقاومت بالایی هستند. همچنین لایه‌ای به ضخامت حداکثر ۲ متر از خاک دستی در سطح زمین قرار گرفته که تأثیری در طراحی تونل ندارد. بنابراین به لحاظ پارامترهای ژئومکانیکی مورد بررسی قرار نگرفته است. توصیف فیزیکی و ظاهری مصالح خاکی ریز دانه و درشت دانه مسیر به شرح زیر می‌باشد:

الف. خاک ریز دانه (L1): قسمت فوقانی خاک مورد بررسی در نواحی شرقی تا مرکزی از خاک ریز دانه تشکیل شده است، این لایه خاک عمدتاً شامل مصالح ریز دانه رسی گاهی همراه با ماسه و لای و به ندرت ماسه رسی و لای، مرطوب به رنگ قهوه‌ای است. در چند نقطه از مسیر تونل لنزهایی از این خاک ریز دانه درون لایه‌های درشت، نهشته شده است. ضخامت این لایه از صفر تا ۱۵ متر متغیر می‌باشد.

خاک درشت دانه (L2): قسمت تحتانی خاک در محدوده غربی و مرکزی از خاک درشت دانه تشکیل شده است. تقریباً کل بافت خاک محدوده ساختگاه از لایه‌های خاک درشت دانه اغلب گرد گوشه‌شن و ماسه رسی و گاهی لای دار، با تراکم متوسط تا بسیار متراکم و به رنگ خاکستری و گاهی قهوه‌ای و در عمده قسمت‌ها همراه با قطعات درشت قلوه سنگ همراه می‌باشد، تشکیل گردیده است. جنس دانه‌های این لایه عمدتاً آذرآواری، کوارتز و سیلیس دار می‌باشد. حداقل ضخامت این لایه در گمانه‌های حفر شده ۱۰ متر می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده که این لایه خاک درشت دانه به سه زیرلایه بر اساس لایه بندی مصالح و جنس آن تفکیک پذیر است.



شکل (۲): نقشه ایستگاه‌های مترو قم

زیرلایه (L2-1): این زیرلایه اغلب متشکل از ماسه رسی و به ندرت ماسه لای دار است. ذرات شن نیز در این لایه مشاهده شده است. این لایه با تراکم متوسط تا متراکم ارزیابی شده است و دارای رنگ خاکستری و در بعضی موارد قهوه ای است.

زیرلایه (L2-2): جنس این لایه نیز مانند لایه (L2-1) اغلب از ماسه رسی و بعضاً ماسه لای دار است. با این تفاوت که میان لایه های شن رس و لای دار در این میان لایه مشاهده شده که موجب کاهش تغییر شکل پذیری و افزایش پارامترهای مقاومتی خاک شده است. این زیرلایه بسیار متراکم بوده و رنگ آن خاکستری می باشد و زیرلایه (L2-3) جنس غالب این لایه خاکی از مصالح درشت دانه شنی با دانه بندی خوب یا بد است که بدلیل حذف ذرات ریز دانه به خصوص مصالح رسی، چسبندگی این مصالح پایین ارزیابی شده است. این زیرلایه از بافت بسیار متراکمی برخوردار بوده و غالباً با رنگ خاکستری مشاهده گردیده است. ضخامت این زیرلایه که تا انتهای عمق حفاری گمانه های مرکزی و شرقی ساختگاه مشاهده گردیده، با حرکت به سمت شرق رفته رفته افزایش یافته و در مناطق شرقی کل عمق شناسایی شده (از سطح تا عمق ۳۰ متری) را در برمی گیرد. محیط در برگیرنده تونل دارای ۴ تیپ خاک S1 و S2 و S3 و S4 می باشد. در تیپ S1 تونل دارای جبهه کار مختلط تشکیل شده از زیرلایه های (L2-1) و (L2-2) می باشد. در تیپ S2 تونل تنها از زیرلایه (L2-2) عبور می کند. در تیپ S3 تونل دارای جبهه کار مختلط تشکیل شده از زیر لایه های L1 و (L2-2) می باشد. در تیپ S4 تونل تنها از زیرلایه (L2-3) عبور می کند.

در جدول (۲) پارامترهای ژئومکانیکی خاک مسیر تونل به تفکیک لایه های مختلف ارائه شده است. در این جدول، γ وزن مخصوص، $d\gamma$ وزن مخصوص خشک، ω درصد رطوبت، و C چسبندگی، و ϕ زاویه اصطکاک داخلی، E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون و K ضریب نفوذپذیری می باشد. این پارامترها بر اساس متوسط مقادیر حاصل از آزمایشات مختلف و قضاوت مهندسی انتخاب و جهت انجام آنالیزها و محاسبات مختلف توصیه شده اند.

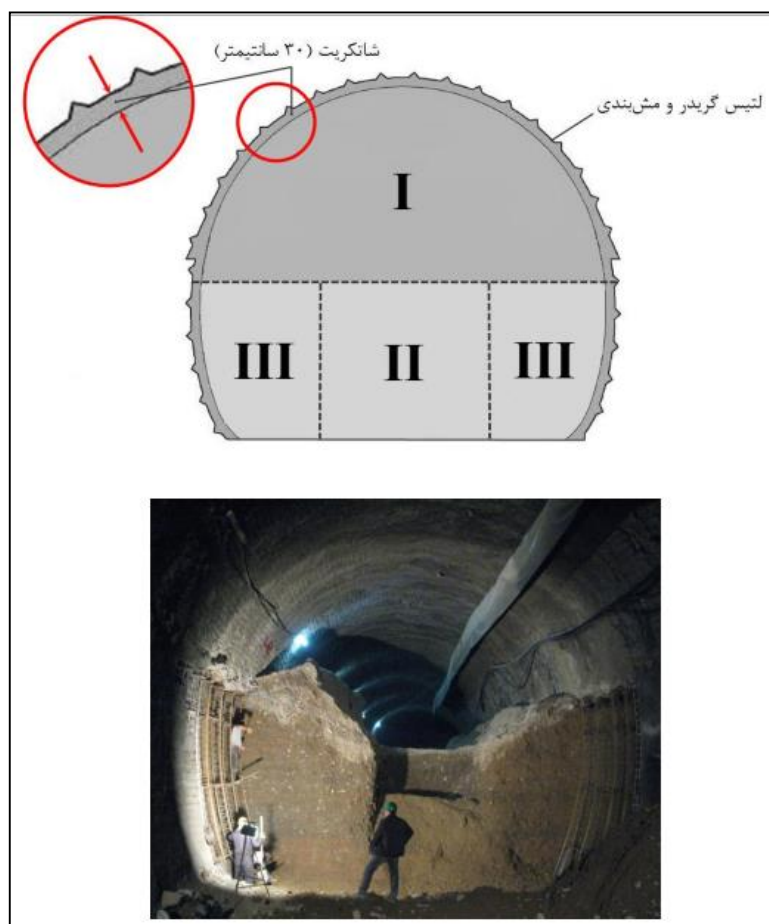
جدول (۲): پارامترهای خاک تشکیل دهنده مسیر تونل

نوع لایه	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ω (%)	C (kN/m ²)	ϕ	E (MPa)	ν	K (cm/s)
L1	۱۸/۶	۱۶/۴	۱۴	۵۰	۲۰	۳۰	۰/۳۵	۱E-۶
L2-1	۲۰/۱	۱۸	۱۲	۳۵	۳۲	۵۰	۰/۳۵	۱E-۵
L2-2	۲۰/۴	۱۸/۶	۱۰	۲۵	۳۶	۷۵	۰/۳	۲/۵E-۲
L2-3	۲۰	۱۹	۵	۶	۴۰	۹۰	۰/۳	۱/۵

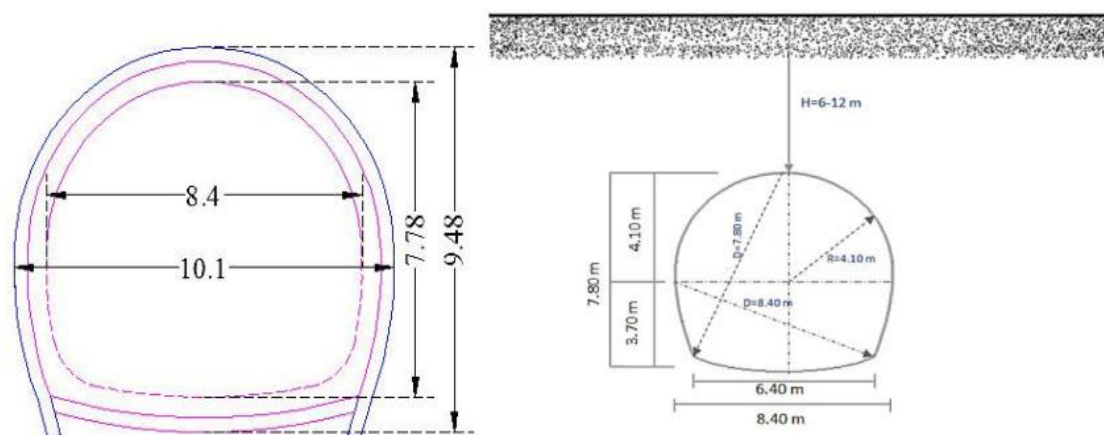
روش حفاری تونل متروی قم، روش مرحله ای طاق و پاتاق است که در سه مرحله به کمک بیل مکانیکی، لودر و نیروی انسانی انجام می شود. مراحل حفاری تونل مطابق شکل (۳) به صورت زیر است: قسمت فوقانی با گام مشخص (در مراحل اجرایی، حفاری با حداکثر گام ۱ متر و حداقل ۳۰ سانتی متر انجام شده است و مقادیر بیشتر از ۱ متر باعث ریزش در جبهه کار شده است) حفاری و بعد از بستر سازی، لتیس گریدر (قاب مشبک فولادی) با فاصله داری ۱۰۰ سانتی متر همراه با وایر مش (شبکه سیمی) نصب و پس از تنظیم نهایی و قرار دادن لایه دوم مش، شاتکریت پاشیده می شود.

سیکل حفاری قسمت فوقانی و اجرای پوشش اولیه آن تا فاصله ای معین (۵۰-۱۰ متر متناسب با شرایط زمین) تکرار می شود. حفاری قسمت تحتانی با گام مشخص (طول گام پیشروی برای قسمت فوقانی و تحتانی یکسان اجرا شده است). با برداشتن باکس میانی شروع شده و بعد از ایجاد فضای کاری مناسب، نسبت به حفاری پله های جانبی اقدام می شود. سپس لتیس گریدر همراه با وایر مش نصب و شاتکریت پاشیده می شود.

محدوده انتخاب شده برای این تحقیق به طول تقریبی یک کیلومتر در حد فاصل ایستگاه A4 و A5 می باشد. مشخصات شاتکریت بکار رفته در تونل مطابق جدول (۳) بوده است.



شکل (۴): مراحل حفاری تونل مترو

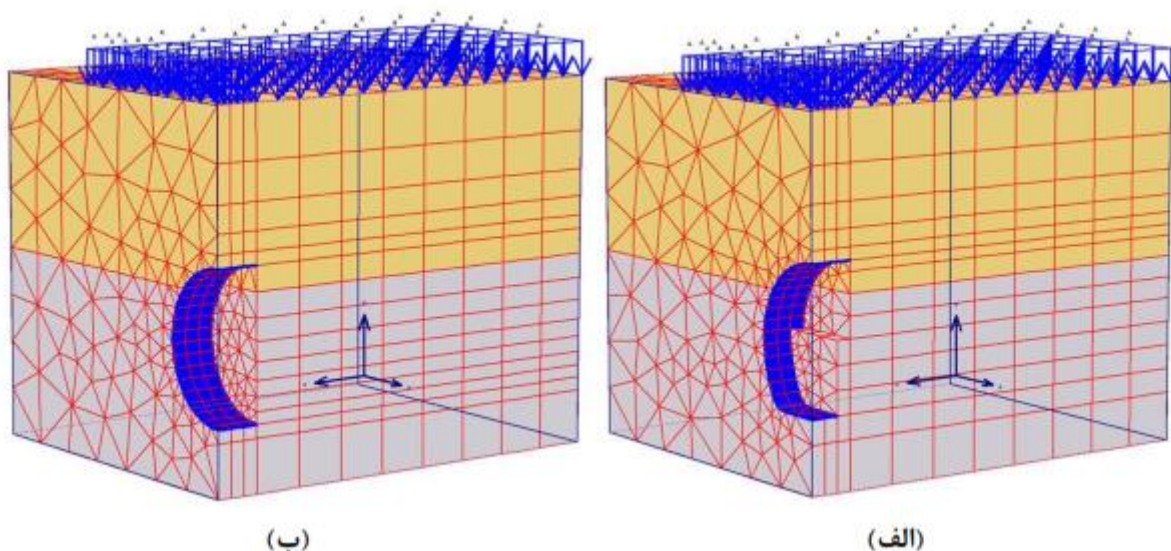


شکل (۵): ابعاد هندسی مقطع تونل

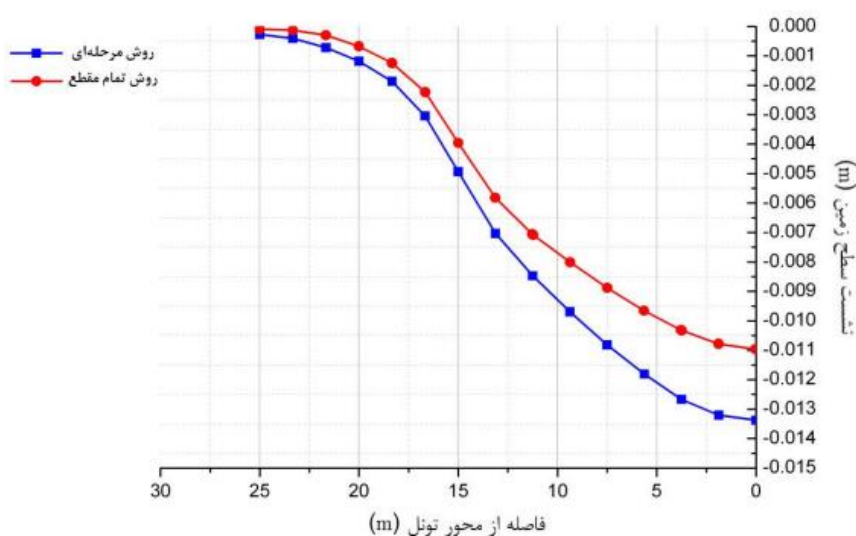
همچنین برای انتخاب روش حفاری از بین دو روش مرحله ای و تمام مقطع از منحنی های عرضی نشست حاصل از مدلسازی عددی استفاده می شود. در روش مرحله ای تونل با گام پیشروی ۱ متر حفر شده است شکل (۶) و شکل (۷) به ترتیب مقاطع مدلسازی تونلسازی مرحله ای (در دو فاز فوقانی و تحتانی) و تونلسازی تمام مقطع (حفاری تمام مکانیزه با مقطع دایره) تحت شرایط یکسان و نمودارهای عرضی نشست هر یک از آنها را نشان می دهند.

جدول (۳) : مشخصات شاتکریت بکار رفته در تونل مترو

نوع المان	t(m)	$I(m^4)$	$EI(kN/m^2/m)$	$EA(kN/m)$	$W(kN/m/m)$	ν
الاستیک	۰/۳	$۲/۵E-۳$	$۱/۹۷۶E۴$	$۲/۶۲۳E۶$	۴/۴۵	۰/۲۵



شکل (۶) : مقاطع مدل تونلسازی مرحله ای و تمام مقطع الف) حفاری مرحله ای ب) حفاری تمام مقطع



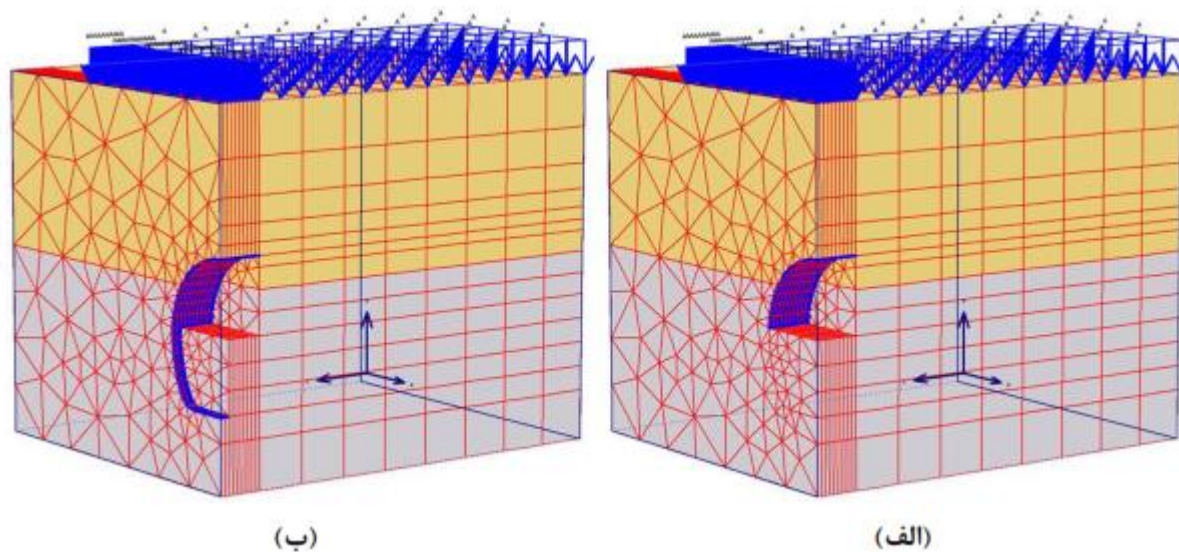
شکل (۷) : نمودارهای عرضی نشست تونلسازی مرحله ای و تمام مقطع

در جدول (۴) میزان حداکثر نشست سطحی و جابجایی تاج تونل برای حفاری مرحله ای و تمام مقطع بوسیله مدل‌سازی محاسبه شده است. بر طبق نمودار شکل (۷) و جدول (۴)، نشست و جابجایی ها در حفاری تمام مقطع کمتر از روش مرحله ای است. دلیل این امر نصب سریع پوشش نگهداری بلافاصله بعد از حفاری است. در شرایط متروی قم از نظر کنترل نشست، حفاری تمام مقطع مناسب تر است.

جدول (۴): میزان حداکثر نشست سطحی و جابجایی تونل برای حفاری مرحله ای و تمام مقطع

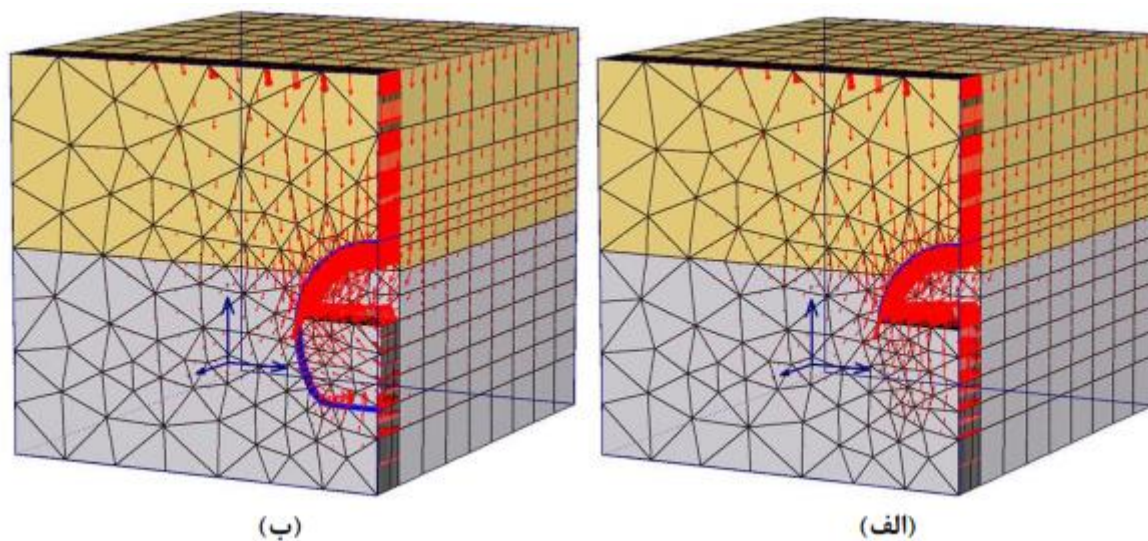
شماره	طول گام حفاری فوقانی و تحتانی (متر)	حداکثر نشست سطحی (mm)	حداکثر جابجایی تاج تونل (mm)
۱	۱	۱۳/۳۷	۲۳/۱۵
۲	تمام مقطع	۱۰/۹۷	۱۱/۸۵

برای مدل‌سازی در این مرحله چهار گام حفاری، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، و یک متر متناسب با شرایط متروی قم برای قسمت فوقانی مقطع انتخاب شده است. مقادیر بیشتر از ۱ متر ریزش جبهه کار تونل را در پی داشته است. گام حفاری تحتانی در دو حالت مدل می شود. در حالت اول گام تحتانی برابر با گام فوقانی فرض می شود. در حالت دوم دو برابر گام فوقانی برای گام تحتانی در نظر گرفته می شود. هدف از این کار انتخاب طول بهینه برای گام تحتانی و بررسی تأثیر افزایش اختلاف طول بین گام تحتانی و فوقانی می باشد. بنابراین برای مدل‌سازی هشت حالت مختلف پیشروی تونل در نظر گرفته می شود. مطابق با شکل (۸) پیشروی قسمت فوقانی در فاز اول و پیشروی قسمت تحتانی در فاز دوم مدل می شود.



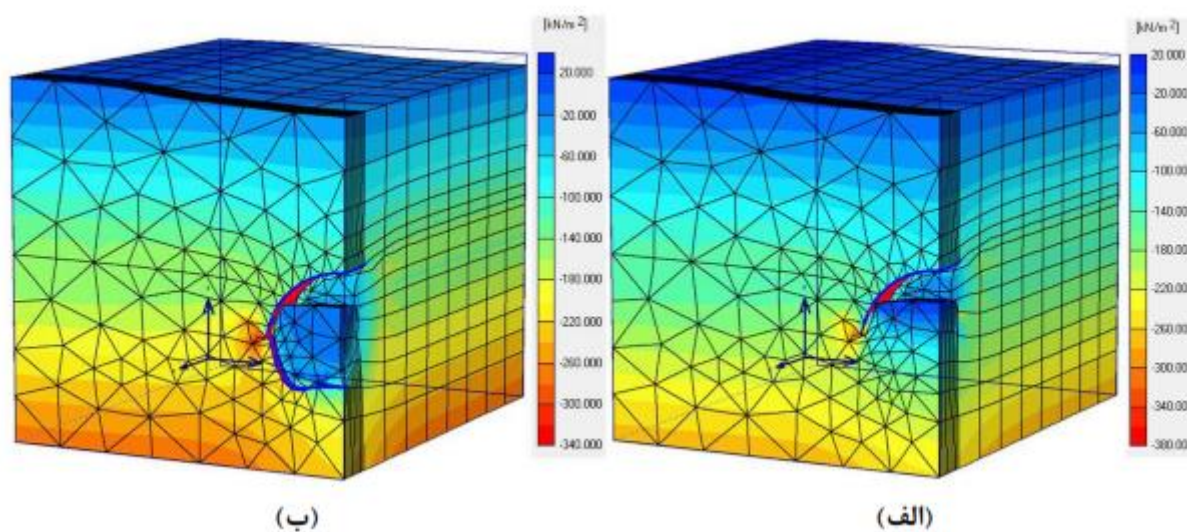
شکل (۸): مدل‌سازی پیشروی قسمت فوقانی و تحتانی در دو فاز (الف: فاز اول مدل‌سازی، ب: فاز دوم مدل‌سازی)

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود در اثر حفاری قسمت فوقانی، خاک بالای تاج تونل به سمت پایین حرکت می کند و بیشترین جابجایی مربوط به این قسمت می باشد، خاک قسمت تحتانی و جلو جبهه کار فوقانی به سمت داخل تونل جابجا می شود. بعد از حفاری قسمت تحتانی، جابجایی ها افزایش پیدا کرده و خاک به سمت گوشه میانی مقطع تونل حرکت می کند.



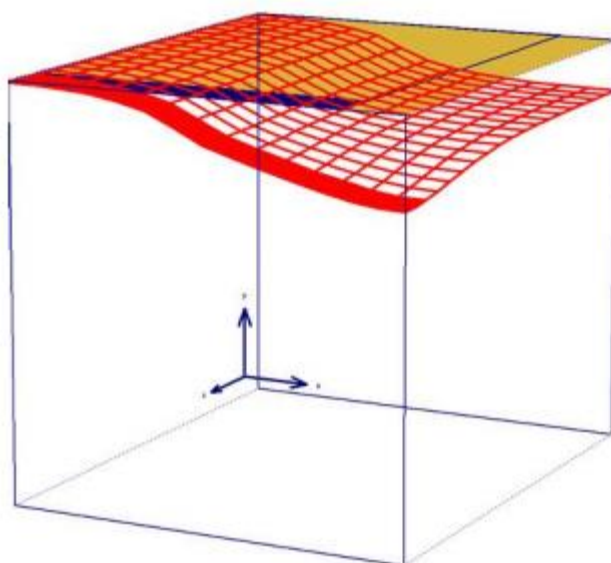
شکل (۹) برآیند جابجایی خاک اطراف تونل (الف: جابجایی در فاز اول حفاری، ب: جابجایی در فاز دوم حفاری)

شکل (۱۰) وضعیت توزیع تنش را در مدل نشان می دهد. بیشترین تمرکز تنش در گوشه میانی مقطع مشاهده شده است که در اثر حفاری فاز دو، میزان تنش افزایش پیدا می کند.



شکل (۱۰) وضعیت توزیع تنش در اطراف تونل در دو فاز حفاری (الف: توزیع تنش در فاز اول حفاری، ب: توزیع تنش در فاز دوم)

شکل (۱۱) گودی حاصل از نشست سطح زمین در بالای تونل متروی قم نشان داده شده است. طبق شکل (۱۱) بیشترین نشست سطحی در بالای تاج تونل روی می دهد و هرچه از آن در عرض فاصله بگیریم، نشست سطحی کاهش می یابد.



شکل (۱۱) گودی حاصل از نشست سطح زمین در تونل مترو قم

همانطور که اشاره شد، هشت حالت مختلف برای طول گام در نظر گرفته شده است. برای هر حالت، نمودارهای عرضی نشست بر حسب فاصله از محور تونل برای دو فاز حفاری بررسی شده و بیشترین میزان نشست در بالای تاج تونل (جبهه کار حفاری) رخ داده است و هر چه فاصله از محور تونل افزایش یابد، نشست کاهش پیدا می کند. بخش اعظم نشست سطحی و جابجایی تاج تونل در زمان حفاری فوقانی (فاز اول) رخ می دهد. بر اساس ارزیابی ها حفاری قسمت تحتانی (فاز دوم) موجب افزایش نشست سطحی و افزایش شیب نمودار نشست می شود. حداکثر نشست سطحی در بالای تاج تونل برای گام های حفاری مختلف بعد از اعمال دو فاز حفاری از ۱۳ میلی متر تا ۱۵/۹۷ میلی متر متغیر است که این مقادیر کمتر از میزان مجاز نشست در زیر خیابان ها (۲ سانتی متر) می باشد.

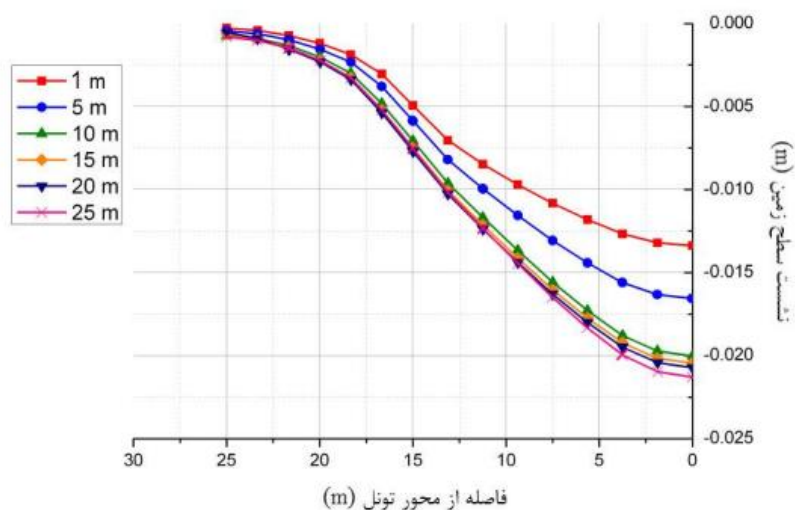
در جدول (۵) برای هر حالت پیشروی، میزان حداکثر نشست سطحی و جابجایی تاج تونل بوسیله مدلسازی محاسبه شده است. مطابق با جدول (۵) با ثابت نگاه داشتن طول گام فوقانی و افزایش گام تحتانی، نشست سطحی و جابجایی تاج تونل افزایش می یابد. میزان این افزایش هر چه طول گام حفاری بیشتر باشد، زیادتر است. افزایش طول گام تحتانی موجب نشست و جابجایی بیشتری نسبت به افزایش طول گام فوقانی می شود. ذکر این نکته اهمیت دارد که مدلسازی گام های حفاری مختلف برای یک طول ثابت از تونل انجام شده است. با افزایش طول گام از ۰/۳ متر تا ۰/۹ متر، نشست و جابجایی ها افزایش پیدا می کنند. اما در گام فوقانی ۱ متر و تحتانی ۱ متر به دلیل کم شدن تعداد سیکل کاری، بسته شدن سریعتر حلقه نگهداری و یکسان بودن گام در قسمت فوقانی و تحتانی نشست و جابجایی کاهش می یابد. بنابراین با توجه به جدول (۵)، نمودارهای عرضی نشست و میزان مجاز نشست سطحی در زیر خیابان ها، گام حفاری بهینه ۱ متر برای قسمت فوقانی و ۱ متر برای قسمت تحتانی می باشد. از طرفی به ازای گام تحتانی ۱/۸ متر و ۲ متر، نشست افزایش ۴ میلی متری دارد. دلیل این افزایش اختلاف طول زیاد بین گام فوقانی و تحتانی در این دو حالت می باشد.

برای بررسی اثر فاصله بین جبهه کارهای فوقانی و تحتانی شش طول ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر با گام حفاری ۱ متر در بالا و پایین مدل شده است.

بر اساس شکل (۱۲) میزان حداکثر نشست سطحی از ۱۳ میلی متر تا ۲۰/۷۲ میلی متر رو به افزایش است. بر اساس شکل (۱۲) تغییرات حداکثر نشست سطحی و جابجایی تاج تونل برای فواصل بیش از ۱۰ متر بین جبهه کارها بسیار ناچیز شده و نشست و جابجایی ها به یک حالت تثبیت رسیده اند. بنابراین فاصله ۲۵ متر بین جبهه کارها با در نظر گرفتن میزان مجاز نشست سطحی (۲ سانتی متر)، فاصله بهینه می باشد.

جدول (۵) میزان حداکثر نشست سطحی و جابجایی تاج تونل برای گام های حفاری مختلف

شماره	طول گام حفاری فوقانی (m)	طول گام حفاری تحتانی (m)	حداکثر نشست سطحی (mm)	حداکثر جابجایی تاج تونل (mm)
۱	۰/۳	۰/۳	۱۳	۱۴/۸۳
۲	۰/۳	۰/۶	۱۳/۶۲	۱۵/۹۶
۳	۰/۶	۰/۶	۱۳/۱۹	۱۵/۰۵
۴	۰/۶	۱/۲	۱۴/۵۵	۱۷/۵۵
۵	۰/۹	۰/۹	۱۳/۶۹	۱۵/۶۱
۶	۰/۹	۱/۸	۱۵/۸۷	۱۹/۴۸
۷	۱	۱	۱۳/۳۷	۱۵/۲۳
۸	۱	۲	۱۵/۹۷	۱۹/۹۷



شکل (۱۲) نمودارهای عرضی نشست سطح زمین برای فواصل مختلف بین جبهه کارهای مختلف

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، هدف تعیین طول گام حفاری و فاصله بین جبهه کارهای فوقانی و تحتانی در روش مرحله ای طاق و پطاق بوده است. با وجود اهمیت این دو پارامتر اجرایی، تحقیقات بسیار کمی در این مورد انجام شده و فرآیند منسجمی جهت تعیین این دو پارامتر وجود ندارد. از این رو در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از مدلسازی المان محدود سه بعدی، نمودارهای عرضی نشست سطحی، مقادیر نشست و جابجایی خاک اطراف تونل طول بهینه گام حفاری و فاصله بین جبهه کارها تعیین شود. حفاری قسمت فوقانی، بیشترین تأثیر را در روش مرحله ای طاق و پطاق دارد. با ثابت نگاه داشتن طول گام فوقانی و افزایش گام حفاری تحتانی، نشست سطحی و جابجایی تاج تونل افزایش یافته و میزان این افزایش هر چه طول گام حفاری بیشتر باشد، زیادتر گشته است. افزایش طول گام تحتانی موجب نشست سطحی و جابجایی بیشتری نسبت به افزایش طول گام فوقانی گردیده است. گام حفاری بهینه یک متر برای قسمت فوقانی و یک متر برای قسمت تحتانی بوده است. به ازای فواصل بیشتر از یک قطر تونل بین دو جبهه کار، تغییرات نشست سطحی ناچیز می باشد. دلیل این امر، دور شدن دو زون بحرانی بوجود آمده از هم در دو جبهه کار فوقانی و تحتانی می باشد. این نتیجه با تحقیق یو (۲۰۰۹) برای تونلسازی در متروی شهر سنول مطابقت دارد. فاصله ۲۵ متر بین جبهه کارها با در نظر گرفتن میزان مجاز نشست سطحی، فاصله بهینه بوده است.

مراجع

- [1] Sinha, R. S., 1991. Underground structures: design and construction, Elsevier Science Publisher, New York, pp. 430-450.
- [۲] علیزاده، ح. ر.، نواسانیان، م.، علوی خوشحال، م.، ۱۳۸۵. بررسی مشکلات اجرایی و خطرات زمان بهره برداری تونل های شهری، دانشگاه صنعتی شریف، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس تونل ایران، ص ۸۱۹
- [3] Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., Yasrobi, S., Daiyan, M., 2012. Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas - the case of niayesh road tunnel project, Tunnelling and Underground Space Technology (31), pp. 1-8.
- [4] Tonon, F., 2010. Sequential excavation, NATM and ADECO: what they have in common and how they differ, Tunnelling and Underground Space Technology (26), pp. 245-265.
- [5] Sandstörn, G. E., 1963. The history of tunnelling, underground workings through the Ages, Barrie and Rockliff.
- [6] Donde, P. M., Wagner, H., 1992. NATM subway station in soft ground, Towards New Worlds in Tunnelling, Vietez - Utesa, Vol.2, Balkema, Rotterdam, pp. 523-533.
- [7] Will, M., 1989. Excavation of large cross section tunnels in accordance with the basic principles of New Austrian Tunnelling Method (NATM), World Tunnelling, pp. 51-55.
- [8] Chow, L., 1994. Principles of surface settlement due to tunnelling in soft ground, MSc Thesis, University of Oxford.
- [9] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009. Technical manual for design and construction of road tunnels - civil elements, USA.
- [10] Lee, Y. Z., Schubert, W., 2008. Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock, Journal of Tunnelling and Underground Space Technology (23), pp. 221-231.
- [11] Jing, L., Hudson. J. A. 2002. Numerical methods in rock mechanics, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences (39), pp. 409-427.
- [12] Katzenbach, R., Breth, H., 1981. Nonlinear 3D analysis for NATM in Frankfurt Clay, Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., vol. 1. Balkema, Rotterdam, pp. 315-318.
- [13] Dasari, G. R., Rawlings, C. G., Bolton, M. D., 1996. Numerical modelling of a NATM tunnel construction in London clay, Proc. Of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, pp. 491-496.
- [14] Tang, D. K. W., Lee, K. M., Ng, C. W. W., 2000. Stress paths around a 3D numerically simulated NATM tunnel in stiff clay, Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, pp. 443-449.

- [15] Vermeer, P. A., Ruse, N., Marcher, T., 2002. Tunnel heading stability in drained ground. *Felsbau* 20, Vol. 6, pp. 8-18.
- [16] Yoo, C., 2009. Performance of multi-faced tunnelling - a 3D numerical investigation, *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology* (24), pp. 562-573.
- [17] Sharifzadeh, M., Kolivand, F., Ghorbani, M., Yasrobi, S., 2013. Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground - Niayesh tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology* (35), pp. 178-188.
- [18] Yoo, C. (2013). Interaction between tunneling and bridge foundation—A 3D numerical investigation. *Computers and Geotechnics*, 49, 70-78.
- [19] Wang, Z., Yao, W., Cai, Y., Xu, B., Fu, Y., and Wei, G. (2019). Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shallow-buried twin-tunnel in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 520-532
- [20] Li, B., and Wang, Z. Z. (2019). Numerical study on the response of ground movements to construction activities of a metro station using the pile-beam-arch method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 209-220.