

(یادداشت فنی)

## مدلسازی سه‌بعدی تقاطع تونل‌های مترو خط ۶ و ۷ تهران به منظور تعیین مناسب‌ترین توالی حفر تونل‌های متقاطع غیرهمسطح

حمید شری‌زاده<sup>۱</sup>، سعید دهقان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، گروه معدن، محلات، ایران  
 ۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، گروه معدن، محلات، ایران

(دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۵، پذیرش: دی ۱۳۹۵)

## چکیده

پارامترهای متعددی مانند توالی حفر، روش حفر، ضخامت پوشش بتنی، فاصله بین دو تونل، طول دهانه پوشش داده نشده، خواص خاک و ... بر میزان اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح تاثیرگذار هستند. از آنجا که توالی حفر تأثیر زیادی بر نشست سطح زمین و سایر جنبه‌های منفی تونلسازی دارد، لذا یکی از مهمترین پارامترهایی است که باید قبل از حفاری این تونل‌ها علی‌الخصوص در نواحی تقاطع تعیین شود. هدف اصلی این پژوهش تعیین بهترین توالی حفر برای تونل‌های متقاطع غیرهمسطح در نواحی شهری است. بدین منظور تقاطع تونل‌های خطوط ۶ و ۷ متروی تهران مد نظر قرار گرفته است و بهترین گزینه برای حفاری این تونل‌ها در محل تقاطع آنها به کمک مدلسازی عددی سه‌بعدی با نرم‌افزار MIDAS GTS NX تعیین شده است. هر دو تونل دارای قطرهای مشابهی بوده و به کمک دستگاه حفر مکانیزه TBM-EPB حفاری می‌شوند. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌های خوبی برای مدلسازی تونل‌هایی که با سیستم مکانیزه حفر می‌شوند، است. برای دستیابی به هدف گفته شده، سه سناریو و پنج آلترناتیو در نظر گرفته شد و در هر سناریو اثر توالی حفر بر روی نتایج مدل از قبیل نشست سطح زمین، جابجایی کلی، نیروهای برشی و محوری القا شده در پوشش نهایی تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد بهترین سناریو حالتی است که تونل کم عمق / بالایی حداقل به میزان ۱۰ برابر قطر زودتر از تونل عمیق / پایینی حفر شود.

## کلید واژه‌ها

توالی حفر، TBM-EPB، مدلسازی عددی، تونل‌های متقاطع غیر همسطح، MIDAS GTS NX

## ارجاع به این مقاله:

شری‌زاده، ح.، دهقان، س.، (۱۳۹۵)، مدلسازی سه‌بعدی تقاطع تونل‌های مترو خط ۶ و ۷ تهران به منظور تعیین مناسب‌ترین توالی حفر تونل‌های متقاطع غیرهمسطح، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۲)، ۷۷-۸۹.

## ۱- مقدمه

مهمترین فرضیاتی که در اجرای این تحقیق در نظر گرفته شده، عبارت‌اند از:

- جنس خاک یکسان و بدون لایه‌بندی در نظر گرفته شده است.
- حفر تونل در محیطی خشک انجام می‌گیرد (مشابه شرایط واقعی محل تقاطع).
- رفتار خاک الاستیک-پلاستیک غیرخطی (مطابق مدل رفتاری موهر-کولمب) در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد نظر مدل بر اساس شرایط خاک تهران به مدل اعمال شده است.
- زاویه تقاطع تونل‌ها، ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است.
- بارهای دینامیکی ناشی از عبور قطارها و وزن دستگاه حفار (TBM-EPB) در نظر گرفته نشده است.
- فشار حاصل از ترافیک ماشین‌آلات ۲۰ کیلوپاسکال و فشار حاصل از هر طبقه ساختمان نیز همان مقدار، به صورت گسترده و یکنواخت در نظر گرفته شده است.

تحقیقات انجام شده شامل روش‌های تحلیلی، تجربی، مدلسازی‌های فیزیکی و شبیه‌سازی‌های عددی است. تاکنون تونل‌های متقاطع بیشتر مورد توجه محققین آسیایی (چین، سنگاپور، ایران و ...) بوده است. در ادامه به اختصار برخی مطالعات شاخص مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

پک و همکاران (۱۹۶۹) تونل‌های موازی یا متقاطع با قطرهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند [۱]. یکی از معتبرترین و شاخص‌ترین مطالعات انجام شده در این زمینه توسط کیم (۱۹۹۶) انجام شده است. این محقق تاثیر حفاری یک تونل جدید بوسیله سپر فولادی را بر تغییرات تنش، گشتاور و جابجایی تونل موجود را بررسی کرده است. وی از مدل فیزیکی برای بررسی اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح استفاده کرده و در آخر برای بررسی صحت مطالعات خود از روش عددی نیز بهره گرفته است [۲]. پاند و همکاران (۲۰۰۳) پایداری تونلی را که در زیر تونل راه‌آهن موجود در زیر فرودگاهی در لندن در حال احداث بود بررسی کردند [۳]. هفنی و همکاران (۲۰۰۹) اثر زاویه تونل‌ها نسبت به یکدیگر، اثر فاصله تونل جدید و تونل موجود از یکدیگر، اثر کاهش حجم، اثر عمق و اثر ضخامت پوشش را بررسی کردند [۴]. لی‌یو و همکاران (۲۰۰۸) تاثیر حفاری تونل جدید را روی سیستم نگهدارنده تونل موجود

به دلیل نیاز به توسعه بیشتر و موثرتر در شهرهای پرجمعیت و همچنین زیرساخت‌های محیطی مساعدتر در این شهرها ساخت تونل‌ها رو به افزایش بوده است. تونل‌ها نقش مهمی در توسعه حمل و نقل شهری ایفا می‌نمایند از این رو لزوم ساخت آنها در مجاورت یکدیگر رفته رفته بیشتر می‌شود. البته شرایط اجرای پروژه‌های شهری از منظر ایمنی، سرعت و دقت با پروژه‌های غیرشهری کاملاً متفاوت است. همه این عوامل باعث می‌شود تا اجرای پروژه‌ها با این شرایط به سوی روش‌هایی سریع و ایمن بروند. در همین راستا ماشین‌های حفاری مکانیزه به کار گرفته شدند. مخاطرات مرتبط با ساخت تونل در محیط شهری مواردی از قبیل سست بودن زمین، وجود سفره‌های آب زیرزمینی بالای تونل و کم عمق بودن تونل (اغلب روی امکان‌پذیری تاثیر می‌گذارد)، وجود بارهای ناشی از ترافیک و ساختمان و ... نشست‌های زمین ناشی از عملیات تونلسازی (همراه با خطر آسیب دیدن سازه‌های موجود و تالسیسات بالای تونل) را شامل می‌شود.

با توجه به روند رو به رشد احداث تونل‌های شهری در بسیاری موارد به اجبار تونل‌ها از نزدیک یکدیگر یا سایر سازه‌های زیرزمینی عبور خواهند کرد یا بالاجبار لازم است تا به منظور پرهیز از برخورد تونل‌ها با یکدیگر، تونل‌ها در ترازهای مختلف ارتفاعی حفر شوند که در این شرایط تونل‌ها با یکدیگر تقاطع پیدا می‌نمایند. در تونل‌های متقاطع، عوامل متعددی از قبیل ضخامت پوشش اولیه و ثانویه، توالی ساخت، مشخصات خاک، نحوه حفاری، طول دهانه پوشش داده نشده، فاصله بین دو تونل، زاویه تقاطع و ... وجود داشته که بر روی اندرکنش این تونل‌ها تاثیرگذارند. ولی یکی از مهمترین مسائل که نیاز به بررسی بیشتری دارد، توالی حفر است. در این تحقیق تقاطع خطوط ۶ و ۷ متروی تهران در زیر چهارراه ۱۷ شهریور-خیابان سعیدی، به منظور تعیین مناسب‌ترین توالی حفر تونل‌های شهری مورد بررسی قرار گرفته است. با ساخت مدل‌های سه‌بعدی متعدد تلاش شده تا تاثیر توالی حفر این تونل‌ها را بر روی پارامترهایی از قبیل نشست سطح زمین در محل تقاطع، جابجایی مدل، تنش محوری و برشی القا شده در پوشش نهایی تونل‌ها و ... مورد بررسی قرار داد.

انجام دادند [۹]. لی و یوان (۲۰۱۲) تونل دو قلوبی را که با فاصله کم از زیر تونل دو طبقه دیگری عبور می‌کند مورد بررسی قرار دادند [۱۰].

محققان ایرانی نیز تحقیقات زیادی در این زمینه و در سال‌های اخیر انجام داده‌اند. قدیمی‌ترین و کامل‌ترین تحقیق مربوط به مطالعات توحیدی و صدقیانی (۱۳۸۹) است. این محققین یکی از کامل‌ترین بررسی‌ها را در ارتباط با تونل‌های متقاطع انجام دادند. سعی کردند بیشترین عوامل تاثیرگذار بر اندرکنش تونل‌ها را بررسی کنند. مدل ساخته شده توسط این محققین مکعب مستطیلی به طول، عرض و عمق  $111 \times 111 \times 70$  متر بود [۱۱]. عوامل موثر مورد بررسی این محققان در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: عوامل مؤثر مورد بررسی [۱۱]

عوامل مؤثر	توضیحات																			
توالی ساخت	ابتدا تونل کم عمق حفر و سپس تونل عمیق حفر شود.																			
	ابتدا تونل عمیق حفر و سپس تونل کم عمق حفر شود.																			
طول دهانه پوشش داده نشده	هر دو تونل همزمان حفر شوند.																			
	۴ مدل با طول دهانه پوشش داده نشده ۱/۵، ۳، ۶ و ۹ متری																			
سختی محوری و خمشی	چهار مدل با ضخامت پوشش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر و بدون پوشش.																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>نوع خاک</th> <th>E(MPa)</th> <th><math>\phi</math></th> <th>C(KPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>۱۰۰</td> <td>۴۰</td> <td>۶۵</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>۷۵</td> <td>۳۵</td> <td>۵۵</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>۵۰</td> <td>۳۰</td> <td>۵۰</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>۲۰۰</td> <td>۳۰</td> <td>۱۰۰</td> </tr> </tbody> </table>	نوع خاک	E(MPa)	$\phi$	C(KPa)	I	۱۰۰	۴۰	۶۵	II	۷۵	۳۵	۵۵	III	۵۰	۳۰	۵۰	IV	۲۰۰	۳۰
نوع خاک	E(MPa)	$\phi$	C(KPa)																	
I	۱۰۰	۴۰	۶۵																	
II	۷۵	۳۵	۵۵																	
III	۵۰	۳۰	۵۰																	
IV	۲۰۰	۳۰	۱۰۰																	
فاصله بین دو تونل	چهار مدل با فاصله کف تونل کم عمق تا تاج تونل عمیق ۳/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ متر.																			
	سه مدل با زوایای ۹۰، ۶۰ و صفر درجه																			
زاویه تقاطع	چهار مدل: تمام مقطع (Full face)، طاق و پطاق (Top+Bench)، دو مرحله طاق و در یک مرحله پطاق (2 Top+Bench)، ۴ مرحله طاق و در یک مرحله پطاق (4 Top+Bench)																			
	چهار مدل: تمام مقطع (Full face)، طاق و پطاق (Top+Bench)، دو مرحله طاق و در یک مرحله پطاق (2 Top+Bench)، ۴ مرحله طاق و در یک مرحله پطاق (4 Top+Bench)																			

(پوشش شاتکریت و پیچ سنگ) با در نظر گرفتن پارامترهایی مثل فرآیند حفر مرحله‌ای، اندرکنش بین پیچ‌سنگ و شاتکریت و اندرکنش بین شاتکریت و سنگ مورد بررسی قرار دادند [۵]. محققان چینی در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثر لرزه‌ای عبور قطارها بر روی تقاطع تونل‌های متقاطع غیرهمسطح مترو در چین پرداختند [۶]. چن و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل سه‌بعدی به بررسی پاسخ دینامیکی میدان نزدیک و دور تونل‌ها پرداختند، و این پاسخ را با یک تک تونل مقایسه کردند [۷]. لی‌یو و همکاران (۲۰۱۱) برای به دست آوردن مقدار بالا آمدگی و پایدارسازی تونل موجود بررسی‌های عددی‌ای انجام دادند [۸]. لی‌یو و همکاران (۲۰۱۲)، مدل سه‌بعدی المان محدود گروهی از تونل‌ها و سیستم خودکار عابر پیاده را

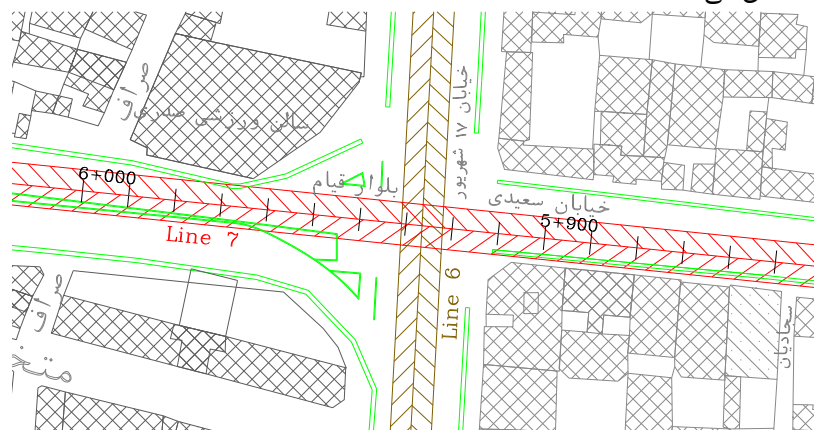
مطالعاتی را انجام داده‌اند ولی آنها نیز مطالعات خود را بر اساس داده‌های فرضی انجام داده و نتیجه مشخصی برای یک پروژه اجرایی ارائه نمودند. همچنین تقاطع این خطوط یک بار توسط رضی و شهریار (۲۰۱۳) بررسی شده است. قابل ذکر است تقاطع مورد بررسی در این تحقیق در عمل اجرا نشد و محل تقاطع به موقعیت در نظر گرفته شده در این تحقیق انتقال پیدا کرد. سایر مطالعاتی که به بررسی توالی حفر تونل‌ها پرداخته‌اند، توالی حفر را تنها در دو حالت (الف- حفر تونل کم عمق زودتر از عمیق یا ب-

علاوه بر این اسکندری و گشتاسبی (۱۳۹۲) تقاطع خطوط ۲، ۳ و ۴ متروی مشهد را مورد بررسی قرار دادند [۱]. رضی و شهریار (۱۳۹۲) نیز به مطالعه تقاطع خطوط متروی خط ۶ و ۷ تهران با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پرداختند [۱۲].

بررسی مطالعات انجام شده، نشان می‌دهد که عمده مطالعات به مقوله تأثیر احداث تونل جدید بر پوشش تونل موجود یا نشست سطح زمین پرداخته شده است. از بین مطالعات انجام شده در ایران، توحیدی و صدقیانی (۲۰۱۰)

## ۲- معرفی تقاطع مورد نظر

در این تحقیق، به منظور بررسی تاثیر توالی ساخت، تقاطع خطوط ۶ و ۷ مترو تهران در محل تقاطع خیابان سعیدی و خیابان ۱۷ شهریور، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ پلان تقاطع مورد نظر نشان داده شده است. در محل تقاطع، تونل خط ۷ متروی تهران با فاصله ۴/۸ متر در تراز پایین‌تر از تونل خط ۶ واقع شده است. علاوه بر این فاصله ۵/۴ متری و در تراز بالاتر از تونل خط ۶ و به موازات آن کانال فاضلاب ۱۷ شهریور وجود دارد (شکل ۲). روش اجرای هر دو تونل خط ۶ و ۷ متروی تهران به صورت مکانیزه و با استفاده از دو دستگاه حفر تمام مقطع (TBM EPB) است.



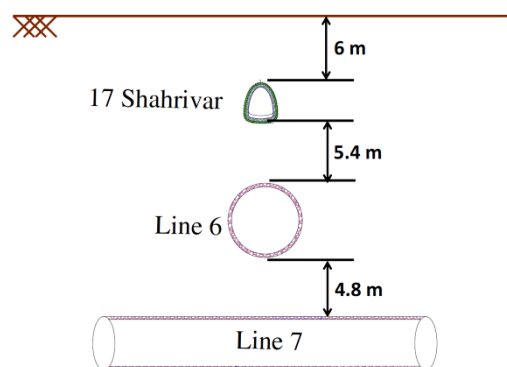
شکل ۱: پلان تقاطع خط ۶ و ۷ مترو تهران به همراه جهت پیشروی تونل‌ها [۱۳]

## ۲-۱- زمین‌شناسی تقاطع مورد بررسی

رسوبات آبرفتی تهران در مسیر خطوط متروی تهران، بیشتر شامل ترکیبی از رسوبات ریزدانه، شن، ماسه و قلوه‌سنگ است و به شکل روکشی روی رسوبات قدیمی‌تر را پوشانده است. بطور کلی از شرق به غرب رسوبات دانه ریزتر می‌شوند. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی، در شهر تهران لایه‌های خاکی به صورت شش واحد زمین‌شناسی مهندسی از ET-1 تا ET-6 تفکیک شده‌اند. از آنجا که خاک محدوده تقاطع از جنس ET-2 است، مشخصات این خاک که بر اساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی تعیین شده‌اند، در جدول ۲ ارائه شده است. این مشخصات در مدلسازی عددی به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند.

حفر تونل عمیق زودتر از کم عمق را در نظر گرفته‌اند. آنچه این تحقیق را نسبت به موارد مشابه متمایز می‌نماید، را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- در نظر گرفتن داده‌های واقعی در مدلسازی تونل‌های متقاطع
- بررسی پنج حالت مختلف برای توالی حفر تونل‌های متقاطع
- بررسی توأمان تاثیر پارامترهای متعدد نظیر نشست سطح زمین، مقادیر تنش‌های القایی در پوشش نهایی تونل‌ها، جابجایی سقف و کف تونل‌ها در حین بررسی اندرکنش تونل‌ها
- معرفی قابلیت‌های یک نرم‌افزار جدید که سرعت مدلسازی را افزایش و زمان تحلیل را نسبت به نرم‌افزارهای مشابه کاهش می‌دهد.



شکل ۲: عمق و نحوه قرارگیری سازه‌ها نسبت به هم [۱۳]

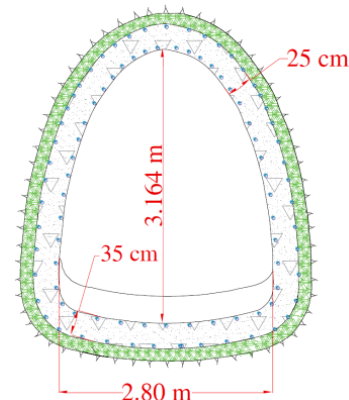
در ادامه در خصوص وضعیت زمین‌شناسی محل تقاطع و نیز مقاطع هندسی مطالبی ارائه شده است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۱۳]

مدل رفتاری	چسبندگی ( $kN/m^2$ )	زاویه اصطکاک (درجه)	مدول الاستیسیته ( $MN/m^2$ )	نسبت پواسون	دانسیته خشک ( $kN/m^3$ )	$K_0$
خاک ET-2 موهر-کولمب	۱۵	۳۳	۷۵	۰/۳	۱۸/۴	۰/۴۵۵
پوشش بتنی الاستیک	-	-	۲۰/۰۰۰	۰/۲	۲۵	-
سپر فولادی	-	-	۲۰۰/۰۰۰	۰/۲۵	۷۸/۵	-

## ۲-۲- مقاطع هندسی تونل‌ها

کانال فاضلاب ۱۷ شهریور به صورت تخم‌مرغی با قاعده‌ای به طول ۳/۳ و ارتفاع ۴ متر است. سیستم نگهداری به کار رفته در دیواره و کف این کانال از بتن مسلح با ضخامت ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متر تشکیل شده است (شکل ۳). البته در مدلسازی انجام شده ضخامت پوشش نهایی این تونل به منظور ساده‌سازی برابر ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



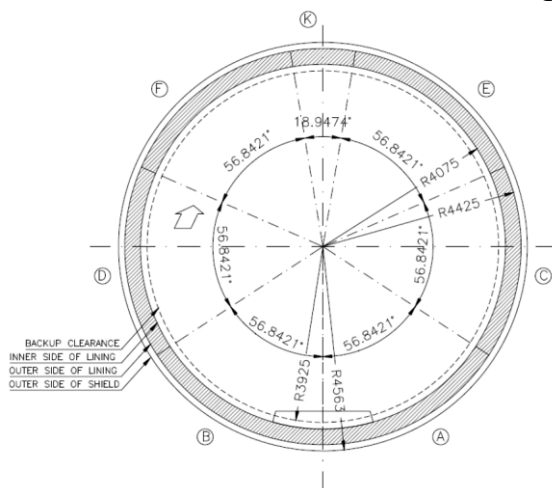
شکل ۳: ابعاد و طرح سیستم نگهداری کانال ۱۷ شهریور [۱۳]

تونل‌های خطوط متروی تهران به شکل دایروی و با قطر ۹/۱۶ هستند که ضخامت پوشش تونل مطابق گزارش طراحی پوشش تونل برابر ۳۵ سانتی‌متر است. (شکل ۴). شعاع پوشش داخلی سگمنت برابر ۴/۷۵ میلیمتر بوده و متشکل از ۱+۱+۶ سگمنت بوده، که یک سگمنت نقش کفسازی حین اجرا را داشته و ۱+۶ سگمنت دیگر تشکیل‌دهنده یک رینگ کامل هستند.

## ۳- معرفی نرم‌افزار MIDAS GTS NX

در این تحقیق برای اولین بار در ایران برای مدلسازی سه‌بعدی از نرم‌افزار المان محدود MIDAS GTS NX استفاده شده است. این نرم‌افزار عددی مختص حل مسائل ژئوتکنیکی است لذا دارای مدل‌های رفتاری و آنالیزهایی

است که عمدتاً برای مسائل ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴: سطح مقطع تونل در نظر گرفته شده برای مدلسازی [۱۳]

از مدل‌های رفتاری موجود در این نرم‌افزار می‌توان به موهر-کولمب، موهر-کولمب اصلاح شده، هوک و براون، هوک و براون اصلاح شده، دراگر پراگر، الاستیک و ... اشاره کرد. علاوه بر مدل‌های رفتاری موجود، می‌توان مدل رفتاری مورد نظر را نوشته و در نرم‌افزار فراخوانی کرد. این نرم‌افزار دارای محیط سازگار با اتوکد بوده که فرایند مدلسازی را بسیار آسان می‌کند. توانایی فراخوانی فایل هندسه مدل و خصوصیات مدل رفتاری از دیگر قابلیت‌های این نرم‌افزار است. به کمک این نرم‌افزار می‌توان مدلسازی در دو و سه بُعد را انجام داد. این نرم‌افزار توانایی حل مسائل را به روش‌های مختلف از قبیل آنالیز استاتیکی (خطی و غیرخطی)، آنالیز پایداری شیب (SSR, SRM)، آنالیز احداث مرحله‌ای، آنالیز دینامیکی، آنالیز جریان آب، آنالیز همزمان جریان آب-تنش و آنالیز تحکیمی را داراست. از دیگر قابلیت‌های این نرم‌افزار توانایی ساخت لایه‌های زمین بر اساس داده‌های حاصل از گمانه‌ها است. همچنین می‌توان سطح توپوگرافی زمین را فقط با دادن نقاط شبیه‌سازی کرد.

نرم افزار انجام شده است. مهمترین پارامترهایی که به نظر محققین، سبب برتری این نرم افزار نسبت به FLAC3D هستند، در جدول ۳ خلاصه شده است.

به طور معمول برای تحلیل مسائل مشابه، از نرم افزارهای FLAC3D یا 3DEC (شرکت ITASCA) استفاده می شود. ولی به دلیل توانایی های بیشتر نرم افزار GTS NX (شرکت MIDAS) این تحقیق، به کمک این

جدول ۳: مقایسه دو نرم افزار FLAC 3D و GTS NX [۱۴]

نرم افزار FLAC 3D	نرم افزار GTS NX	پارامترهای مورد بررسی
ندارد	دارد	توانایی فراخوانی از نرم افزارهای دیگر (DWG, dxf و ...)
ندارد (فقط سه بُعد)	دارد	قابلیت کار در دو و سه بُعد
ندارد	دارد	داشتن انواع مقاطع از پیش تعریف شده
ندارد	دارد	توانایی فراخوانی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی تعریف شده در مدل های دیگر و از نرم افزارهای دیگر (EXCEL)
ندارد	دارد	داشتن محیط CAD-base برای کار آسان تر با مدل
دارد	دارد	توانایی تولید فیلم از خروجی آنالیزها
ندارد	دارد	توانایی تولید فایل pdf سه بُعدی
دارد (با استفاده از دو نرم افزار دیگر، Rhino و Kubrix)	دارد	توانایی ساخت هندسه های پیچیده
دارد	دارد	توانایی در نظر گرفتن پارامتر مختلف برای یک المان
ندارد	دارد	توانایی انجام آنالیز SSR (مخصوص آنالیز شیب)
ندارد	دارد	توانایی ساخت لایه های زمین بر اساس اطلاعات گمانه های اکتشافی

ساختمان است. بار ناشی از ترافیک  $20 \text{ kPa}$  و بار ناشی از وجود ساختمان ها برای هر طبقه معادل  $20 \text{ kPa}$  در نظر گرفته شده است [۱۳]. بنابراین میزان بار ساختمان اعمالی به مدل در سمت جنوب غربی برابر  $60$  و در سمت جنوب شرقی برابر  $20$  کیلونیوتن اعمال شده است (شکل ۵). فشار جبهه کار، سپر فولادی و فشار دوغاب پشت پوشش بتنی نیز به ترتیب به میزان  $133 \text{ kPa}$  و  $233 \text{ kPa}$  در نظر گرفته شده و به مدل اعمال شده است [۱۴].

#### ۴-۲- مراحل اجرای مدل

به منظور مدلسازی واقعی حفر تونل ها، مطابق روش اجرایی حفر تونل توسط دستگاه حفار تمام مکانیزه عمل شده است. بدین ترتیب که ابتدا تونل به میزان عرض پوشش بتنی حفاری شده، استقرار سپر فولادی، نصب پوشش بتنی و نهایتاً فشار دوغاب به پشت پوشش بتنی اعمال شده است. مراحل احداث مرحله ای تونل ها، در سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده، بسته به اینکه ابتدا تونل عمیق حفاری شود یا تونل کم عمق، متفاوت است. برای حالتی که ابتدا تونل عمیق حفاری شود این مراحل به صورت خلاصه و به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

#### ۴-۱- مدلسازی سه بُعدی تقاطع

با توجه به ابعاد تونل ها، ابعاد مدل در دو جهت  $x$  و  $y$  برابر  $183$  متر (هر گام پیشروی  $1/5$  متر) و عمق مدل در جهت  $z$  نیز  $90$  متر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بدین ترتیب است که دیواره های جانبی در جهت افقی و کف مدل در تمام جهات گیردار شده است. بدین ترتیب کف مدل به عنوان بستری صلب عمل خواهد کرد.

انتخاب اندازه و شکل مش ها در حالتی که چندین فضای زیرزمینی مدلسازی می شود، دارای اهمیت بالایی است. در چنین حالتی ابعاد بسیار بزرگ مدل یکی از محدودیت های طراحی و اخذ نتایج سریع و صحیح از آن است. در این تحقیق از المان های مثلثی شکل (*Tetra*) استفاده شده است.

#### ۴-۱- بارهای اعمال شده بر مدل

در این تقاطع و در سمت جنوب غربی مدرسه ای سه طبقه، سمت جنوب شرقی آن ساختمان های یک طبقه، سمت شمال غربی آن ورزشگاه و سمت شمال شرقی بدون

۶- تکرار این مراحل تا ۱۲۲ مرحله برای تونل عمیق (خط ۷)

۷- اعمال این مراحل برای تونل کم عمق (خط ۶) تا ۱۲۲ مرحله

در سناریوهایی که در آنها حفاری تونل کم عمق (خط ۶) زودتر از تونل عمیق در نظر گرفته شده‌اند، تغییراتی در این توالی حفر داده شده به نحوی که در مراحل ۲ تا ۶ ابتدا فعالیت‌ها برای تونل کم عمق انجام شده و سپس در مرحله ۷، تونل عمیق در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ نحوه اعمال بار به سینه کار، فشار تزریق دوغاب، سپر فولادی و مابقی جزئیات مدل نشان داده شده است.

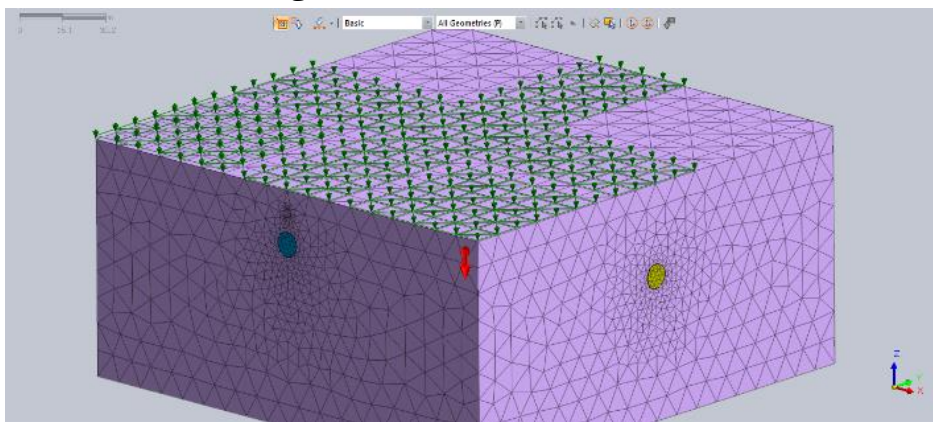
۱- در نظر گرفتن تونل فاضلاب بصورت حفر شده و نصب نگهداری، اعمال فشار ساختمان‌ها و ترافیک به مدل

۲- اعمال فشاری معادل  $133 \text{ kPa}$  به سینه کار تونل عمیق (خط ۷)

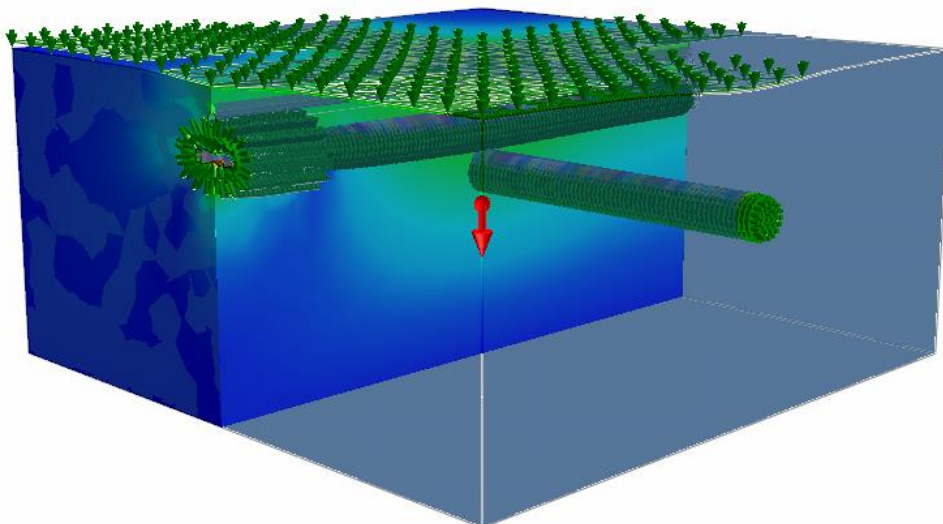
۳- حفاری تونل عمیق (خط ۷) و پیشروی  $1/5$  متر (به اندازه عرض پوشش بتنی)

۴- در نظر گرفتن سپر فولادی تونل عمیق (خط ۷) بلافاصله پس از پیشروی

۵- پس از پیشروی  $10/5$  متر، نصب پوشش بتنی و اعمال فشار دوغاب ( $233 \text{ kPa}$ ) به پشت پوشش بتنی



شکل ۵: نوع و اندازه مش انتخاب شده (به همراه بار ترافیک و ساختمان‌های اطراف) [۱۴]



شکل ۶: جزئیات مدل سه‌بعدی ساخته شده (بار ناشی از تزریق دوغاب در تونل کم عمق نشان داده شده است) [۱۴]

مناسب‌ترین توالی حفر مورد بررسی قرار گرفت. منظور از توالی حفر، تقدم و تاخر در احداث تونل‌ها است. بدین منظور، چندین حالت متفاوت به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

##### ۵- بررسی توالی حفر

با توجه به موضوع تحقیق، پس از ساخت مدل پایه توالی‌های مختلف حفر تونل‌ها به منظور پیدا کردن

بررسی قرار گرفتند و در هر مدل پس از حصول اطمینان از به تعادل رسیدن مدل، خروجی‌های مختلفی از آن استخراج شده است. خروجی‌های مدل در دو دسته کلی استخراج شده‌اند. برخی خروجی‌ها مربوط به خاک دربرگیرنده و برخی مربوط به پوشش نهایی تونل‌ها هستند. به جهت اهمیت نشست سطح زمین در محل تقاطع، جابجایی سطح زمین نیز به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این میزان جابجایی در سقف و کف تونل‌ها و تنش اصلی حداکثر و حداقل و تنش برشی در کل مدل مورد بررسی قرار گرفته است. ضمناً نیروی محوری، ممان خمشی و بیشینه کرنش برشی در پوشش نهایی تونل‌ها استخراج شده و نتایج در کلیه حالات حفاری با حالت اجرا شده مقایسه شده است.

#### ۶- نتایج حاصل از مدلسازی

به منظور بررسی و مقایسه سناریوهای مختلف موارد متفاوتی از قبیل، میزان جابجایی سقف و کف تونل‌ها، میزان نشست سطح زمین، نیروها و ممان خمشی بوجود آمده در پوشش نهایی تونل‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت کلیه سناریوها با وضعیت موجود (حفر تونل عمیق با فاصله بسیار زیاد، زودتر از تونل کم عمق) مقایسه شدند.

#### ۶-۱- میزان جابجایی سقف و کف تونل‌ها

میزان جابجایی سقف و کف هر سه تونل در سناریوهای مختلف در جدول ۴ آورده شده است. در هر سناریو بیشترین میزان جابجایی سقف و کف در محدوده تقاطع نشان داده شده است.

با بررسی جدول ۴، ملاحظه می‌شود در سناریویی که تونل عمیق زودتر از تونل کم عمق حفر می‌شود، جابجایی‌های بیشتری در سقف و کف تونل‌ها به وجود می‌آورد. همچنین سناریو یک (وضعیت اجرا شده) نامناسب‌ترین سناریو است.

#### ۶-۲- میزان نشست سطح زمین

نشست سطح زمین در دو راستای عمود بر محور تونل‌ها اندازه‌گیری شده است. با توجه به فاصله تونل‌ها از سطح زمین و اندرکنش تقریباً زیاد این تونل‌ها با یکدیگر به نظر می‌رسد نشست سطح زمین در محل تقاطع تونل‌ها

**حالت یک:** تونل عمیق (خط ۷) بسیار زودتر (به اندازه طول تونل‌ها) از تونل کم عمق (خط ۶) از محل تقاطع عبور کند:

این حالت نشان دهنده وضعیت موجود است. به عبارتی ابتدا تونل عمیق حفر شده و سپس تونل کم عمق احداث شده است. یعنی در این حالت تونل عمیق به بهره‌برداری رسیده و سپس تونل کم عمق از تراز بالاتر آن عبور خواهد کرد.

**حالت دو:** تونل کم عمق (خط ۶) بسیار زودتر (به اندازه طول تونل‌ها) از تونل عمیق (خط ۷) حفاری شود:

در این حالت تونل کم عمق (خط ۶) به بهره‌برداری رسیده، سپس تونل عمیق (خط ۷) از تراز پایین‌تر از آن عبور خواهد کرد.

**حالت سه:** ابتدا تونل عمیق (خط ۷) و سپس تونل کم عمق (خط ۶) با فواصل متفاوت از محل تقاطع حفاری شود:

جهت بررسی این حالت فرض شده که جبهه کار تونل عمیق (خط ۷) با فواصل متفاوت  $2D$ ،  $4D$ ،  $6D$ ،  $8D$  و  $10D$  جلوتر از تونل کم عمق (خط ۶) حفاری می‌شود. با توجه به اینکه مدل بصورت متقارن ساخته شده، پس از اینکه جبهه کار تونل عمیق (خط ۷)، به میزان ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۷۲ و ۹۰ متر از محل تقاطع عبور کرد، تونل کم عمق (خط ۶) به تقاطع خواهد رسید.

**حالت چهار:** ابتدا تونل کم عمق (خط ۶) و سپس تونل عمیق (خط ۷) با فواصل متفاوت از محل تقاطع حفاری شود:

این حالت معکوس حالت سوم است، یعنی جبهه کار تونل کم عمق با فواصل متفاوت ذکر شده در حالت قبل زودتر از جبهه کار تونل عمیق به محل تقاطع می‌رسد.

**حالت پنج:** حفر همزمان هر دو تونل:

در این حالت حفر و پیشروی تونل‌ها همزمان انجام می‌شود. با توجه به اینکه مدل متقارن است هر دو تونل با هم به محل تقاطع می‌رسند.

از آنجا که تونل فاضلاب قبل از آغاز حفاری این تونل‌ها احداث شده است، در تمام سناریوهای فوق، تونل فاضلاب در مدل قبل از هر اقدامی حفر شده است. حالت‌های مختلف که در بالا به آنها اشاره شد، در قالب مدل‌های عددی سه‌بعدی متعدد و به کمک نرم‌افزار فوق‌الذکر مورد



بیشترین مقدار باشد. بنابراین بیشترین میزان نشست در هر راستا در محدوده تقاطع تونل‌ها بررسی شده است. در جدول ۵ بیشترین میزان نشست در هر سناریو آورده شده

است. در این جدول راستای  $X-X'$  عمود بر محور تونل کم عمق و راستای  $Y-Y'$  عمود بر محور تونل عمیق در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: میزان جابجایی سقف و کف تونل‌ها در هر سناریو [۱۴]

تونل	موقعیت	شماره سناریو				
		سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
فاضلاب	سقف (mm)	۹/۳۵	۷/۱۰	۷/۰۶	۹/۹۶	۷/۰۱
	کف (mm)	۸/۹	۸/۳۵	۸/۹	۹/۸۰	۸/۷۳
کم عمق	سقف (cm)	۱/۳	۱/۱	۱/۲۸	۱/۱۲	۱/۲
	کف (cm)	۰/۳۰۴	۱/۴۵	۱/۴۴	۱/۴۵	۱/۴۵
عمیق	سقف (cm)	۱/۷۳	۱/۷۳	۱/۲۷	۱/۷۳	۱/۷۳
	کف (cm)	۲/۶۵	۲/۷۴	۲/۶۵	۲/۷۴	۲/۷۰

مطابق جدول ۶، سناریو شماره ۱، باعث القا شدن بیشترین نیروی محوری در پوشش نهایی تونل فاضلاب و تونل عمیق می‌شود. کمترین ممان خمشی مثبت در تونل‌های عمیق، کم عمق و فاضلاب به ترتیب در سناریوهای شماره ۳، ۱ و ۱ رخ می‌دهد. همچنین کمترین نیروی محوری کششی نیز در تونل‌های عمیق، کم عمق و فاضلاب به ترتیب در سناریوهای شماره ۴، ۳ و ۵ رخ می‌دهد.

#### ۶-۴- مقایسه کلیه سناریوها با وضعیت موجود

به منظور انتخاب مناسب‌ترین سناریو نتایج حاصل از مدلسازی کلیه سناریوها از قبیل میزان جابجایی کلی مدل، بیشترین نشست سطح زمین، بیشترین جابجایی سقف و کف تونل‌ها، بیشترین نیروی محوری فشاری و کششی القا شده در پوشش نهایی، بیشترین ممان خمشی مثبت و منفی القا شده در پوشش نهایی و تنش برشی حداکثر و حداقل القا شده در پوشش نهایی تونل‌ها با وضعیت اجرا شده مقایسه و بر اساس نتایج، بهترین سناریو انتخاب شد. خلاصه این سناریوها در جدول ۷ آورده شده است. مطابق این جدول، در صورتی که ابتدا تونل کم عمق به فاصله حداقل ۱۰ برابر قطر، زودتر از تونل عمیق به محل تقاطع برسد، وضعیت و شرایط مناسب‌تر است.

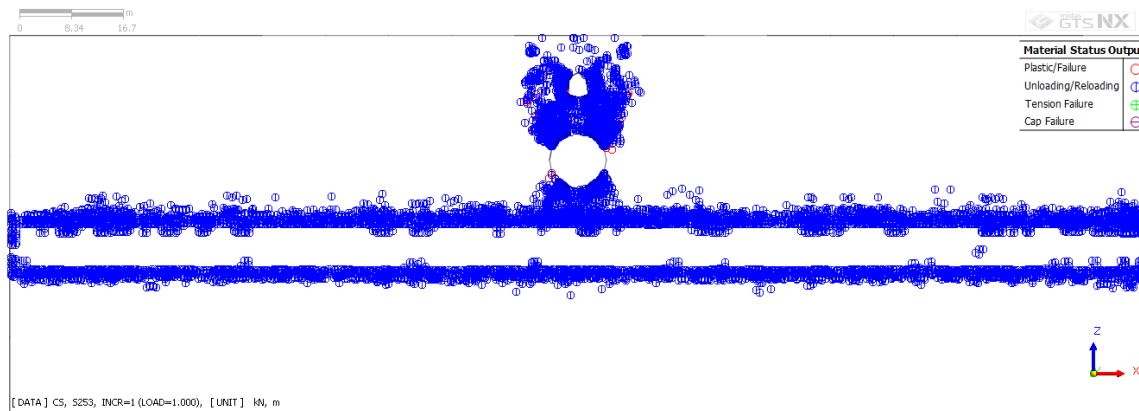
جدول ۵: بیشترین میزان نشست سطح زمین [۱۴]

شماره سناریو	میزان نشست (cm) در راستای	
	$X-X'$	$Y-Y'$
سناریو ۱	۱/۳۱	۱/۱۳
سناریو ۲	۱/۳۲	۱/۰۶
سناریو ۳	۱/۳۱	۱/۱۴
سناریو ۴	۱/۳۱	۱/۰۷
سناریو ۵	۱/۳۲	۱/۱

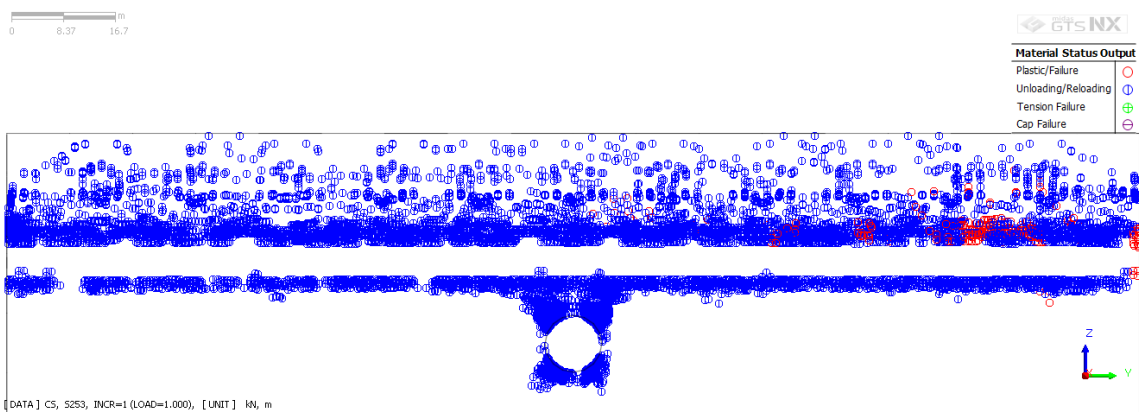
مطابق جدول ۵، فارق از سناریوهای مختلف، میزان نشست در راستای تونل کم عمق بیشتر از تونل عمیق خواهد بود. میزان نشست در راستای  $X-X'$  در سناریوهای مختلف تفاوت چندانی با هم ندارد. دلیل این امر می‌تواند وجود تونل فاضلاب، به موازات تونل کم عمق و با فاصله کم، بالای آن باشد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، محدوده اغتشاش ناشی از احداث تونل‌ها به تونل فاضلاب رسیده و تنها نقاط محدودی به سطح زمین رسیده است.

#### ۶-۳- نیروها و ممان خمشی بوجود آمده در پوشش نهایی تونل‌ها

با توجه به اینکه نقطه ضعف پوشش نهایی بتنی کشش است، مقادیر نیروی محوری کششی و ممان خمشی مثبت برای هر سه تونل و همه سناریوها در جدول ۶ نشان داده شده است.



الف) محدوده پلاستیک در راستای  $x-x'$



ب) محدوده پلاستیک در راستای  $Y-Y'$

شکل ۷: محدوده پلاستیک بوجود آمده ناشی از احداث تونل‌ها [۱۴]

جدول ۶: مقادیر نیروی محوری کششی و ممان خمشی مثبت تونل‌ها در هر سناریو [۱۴]

تونل	موقعیت	شماره سناریو				
		سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
فاضلاب	نیروی محوری کششی (kN)	۷۱/۲۹۸۶	۶۰/۷۸۱۳	۶۹/۰۹۶۶	۶۳/۸۱۱۵	۶۰/۷۸۱۳
	ممان خمشی مثبت ( $kN/m^2$ )	۱۱/۳۵۸۳	۱۱/۴۰۱۳	۱۱/۳۹۱۳	۱۱/۴۰۲۳	۱۱/۴۰۱۳
کم عمق	نیروی محوری کششی (kN)	۱۱۹۸/۹۴	۱۳۰۳/۶۳	۱۱۹۰/۴۲	۱۳۲۷/۶	۱۳۰۳/۶۳
	ممان خمشی مثبت ( $kN/m^2$ )	۲۵/۴۳۴۲	۳۰/۴۷۹۹	۲۹/۹۶۵۵	۲۹/۵۲۹۱	۳۰/۴۷۹۹
عمیق	نیروی محوری کششی (kN)	۱۸۴۲/۱۸	۱۸۳۰/۶۳	۱۸۳۷/۷۸	۱۶۵۳/۰۵	۱۸۳۰/۶۳
	ممان خمشی مثبت ( $kN/m^2$ )	۲۸/۷۰۵۴	۳۰/۴۷۹۹	۲۸/۷۰۵۳	۲۹/۰۲۲	۲۸/۶۶۹۱

شود روند تغییرات جابجایی شبیه تونل‌های موازی خواهد بود. در این مورد تاج و کف تونل موجود به طرف داخل حرکت خواهد کرد و در حالتی که حفر تونل جدید در بالای تونل موجود انجام گیرد، جابجایی شعاعی تونل موجود به صورت سیکنی با پیشروی تونل جدید تغییر خواهد کرد. لی‌یو و همکاران (۲۰۰۸) نیز به نتایج مشابه کیم رسیدند، مطابق نتایج این مطالعات پس از عبور تونل جدید از روی تونل موجود، تونل موجود به سمت بالا

## ۷- بحث

در این قسمت مقایسه‌ای هر چند اجمالی درخصوص نتایج این تحقیق با نتایج سایر محققان ارائه شده است: هیچ یک از کارهای انجام شده قبلی به بیشینه جابجایی رخ داده در مدل اشاره نکرده‌اند، در حالیکه این پارامتر یکی از پارامترهای مهم در مدلسازی عددی است. در خصوص جابجایی سقف و کف تونل‌ها، کیم (۱۹۹۶) ادعان داشت در حالتی که تونل جدید زیر تونل موجود حفر

حرکت خواهد کرد. نتایج این تحقیق در مطابقت کامل با سوابق است.

در خصوص تنش‌های القا شده به پوشش نهایی، مطابق نظر کیم (۱۹۹۶) وقتی تونل کم عمق زودتر حفر شود اندرکنش تونل‌ها کمتر خواهد بود. البته این محقق از منظر دیگری به بررسی تنش‌ها پرداخته است، با پیشروی تونل جدید تغییرات تنش در تونل موجود، ابتدا در دیواره نزدیک به تونل جدید، سپس در سقف، کف و در نهایت در دیواره دور از تونل جدید ایجاد خواهد شد. لی‌یو و همکاران (۲۰۰۸) نیز چنین نتیجه‌گیری کردند که حفر تونل کم عمق در ابتدا، باعث ایجاد ترک‌های کششی در پوشش شاتکریت تونل کم عمق، در اثر حفر تونل عمیق به صورت عمود و در زیر تونل موجود خواهد شد. همچنین با حفر

تونل عمیق در ابتدا، ساخت تونل عمیق عمود بر تنش‌های اصلی متوسط نه ترک کششی و نه گسیختگی فشارشی را به دنبال خواهد داشت. اما پس از آن حفر تونل کم عمق به صورت عمود بر تنش اصلی حداکثر باعث گسیختگی فشارشی در پوشش شاتکریت تونل عمیق خواهد شد. توحیدی و صدقیانی (۲۰۱۰) نیز نظری مشابه کیم ارائه کردند. نتایج این تحقیق با سوابق موجود تطابق کامل داشته و حفر تونل عمیق زودتر از تونل کم عمق باعث القا شدن نیروی محوری بیشتری در پوشش تونل فاضلاب و تونل عمیق خواهد شد. همچنین حفر تونل کم عمق باعث القا شدن کمترین میزان نیروی محوری کششی در پوشش نهایی تونل‌ها خواهد شد.

جدول ۷: مقایسه پارامترهای مختلف جهت تعیین مناسب‌ترین سناریو حفاری [۱۴]

پارامترهای مورد بررسی	نام بهترین سناریو	درصد اختلاف با وضعیت موجود
بیشینه جابجایی رخ داده در مدل	گزینه‌ها با هم تفاوت چندانی ندارند	-
نشست سطح زمین	گزینه‌ها با هم تفاوت چندانی ندارند	-
جابجایی سقف تونل	فاضلاب حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق	۵/۷۴٪
	خط ۶ حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق	۸/۰۶٪
	خط ۷ حفر تونل کم عمق به فاصله ۸D زودتر از عمیق	۷۲/۴۵٪
جابجایی کف تونل	فاضلاب حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق	۷/۵۸٪
	خط ۶ تمامی گزینه‌هایی که تونل کم عمق زودتر از عمیق حفر شود	-
	خط ۷ گزینه‌ها با هم تفاوت چندانی ندارند	-
نیروی محوری فشاری در پوشش نهایی تونل	فاضلاب حفر تونل عمیق به فواصل ۸D و ۱۰ زودتر از کم عمق	۰/۰۲٪
	خط ۶ حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق	۴۰٪
	خط ۷ حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق	۱۴٪
نیروی محوری کششی در پوشش نهایی تونل	فاضلاب حفر تونل عمیق به فاصله ۲D زودتر از کم عمق	۱۸٪
	خط ۶ حفر تونل عمیق به فاصله ۲D زودتر از کم عمق	۴٪
	خط ۷ حفر تونل کم عمق با فاصله بسیار زیاد از عمیق	۱۱٪
ممان خمشی منفی در پوشش نهایی تونل	فاضلاب وضعیت موجود	-
	خط ۶ حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق	۳۴٪
	خط ۷ حفر تونل کم عمق با فاصله بسیار زیاد از عمیق	۵٪
ممان خمشی مثبت در پوشش نهایی تونل	فاضلاب وضعیت موجود	-
	خط ۶ حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق	۱٪
	خط ۷ حفر تونل کم عمق به فاصله ۲D زودتر از عمیق	۰/۳٪
تنش برشی بیشینه و کمینه در پوشش نهایی تونل	فاضلاب حفر تونل کم عمق با فاصله بسیار زیاد از عمیق	۵۵٪ و ۸۷٪
	خط ۶ حفر تونل کم عمق به فاصله ۱۰D زودتر از عمیق و حفر تونل عمیق به فاصله ۶D زودتر از کم عمق	۷۸٪ و ۷۸٪
	خط ۷ حفر تونل کم عمق با فاصله بسیار زیاد از عمیق	۵٪ و ۳٪

مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مهندسیین مشاور ساحل و موسسه حراء به ویژه جناب آقای مهندس ابوطالبی که در زمینه ارائه اطلاعات طرح و داده‌های مورد نیاز در مدلسازی نهایت همکاری را مبذول داشتند، اعلام می‌دارند.

### مراجع

[1] Eskandari, Fatemeh. Goshtasbi, Kamran. (2013), Stability analysis of the intersection lines 2,3 & 4 in Mashhad Urban Railway, Master of Science Thesis, Tarbiat modares university, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering (in Persian).

[2] Kim, Sang-Hwan. (1996), Model testing and analysis of interactions between tunnels in clay, PhD dissertation, University of Oxford.

[3] Pound, C. Hsu, Y. S. Walker, G R. (2003), Predicted and Observed Ground Movements around a Tunnel boring machine at Heathrow airport: International Conference on Underground Construction, London, pp. 549-562.

[4] Hefny, A. M., H. C. Chua, and J. Zhao. (2004), Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels, tunneling and underground space technology, Underground Space for Sustainable Urban Development, proceedings of the 30<sup>th</sup> ITA-AITES world tunnel congress Singapore, vol. 19, no. 4-5.

[5] Liu, H. Y., J. C. Small, and J. P. Carter. (2008), Full 3D modeling for effects of tunneling on existing support systems in the Sydney region, Tunnelling and Underground Space Technology 23, no. 4, pp.399-420.

[6] J. Yingxuan, L. Weining, S. Xiaojing, L. Weifeng and Z. Hougui, (2008), Dynamic responses of spatial overlapping tunnels induced by passing trains, Underground Facilities for Better Environment and Safety, India, pp. 252-260.

[7] Chen, Guo-xing, LeiChen, and Yan Dai. (2011), The seismic response of intersecting metro tunnels and single tunnel, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International conference on Structural Dynamics. Leuven, Belgium: EURO DYN 2011, pp. 459-465.

[8] H. Liu, P. Li and J. Liu, (2011), Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction, Tunnelling and Underground Space Technology, pp. 276-283.

[9] Z. Liu, C. Zhou, and F. You, (2012) 3D Numerical Stability Analysis of Overlapped Tunnel Groups under Shield Tunnel Undercrossing, International Journal of Earth Science and Engineering, Vol. 5, No. 5, pp. 1110-1122.

در خصوص نشست سطح زمین، لی‌یو و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند با عبور تونل جدید از روی تونل موجود، سطح زمین به سمت بالا حرکت خواهد کرد. توحیدی و صدقیانی (۲۰۱۰) اظهار داشتند که حفاری زودتر تونل عمیق موجب نشست بیشتر سطح زمین می‌شود. رضی و شهریار (۲۰۱۳) نیز نشان دادند در صورتی که احداث تونل عمیق زودتر انجام شود، نشست سطح زمین بیشتر خواهد شد. در این تحقیق در هیچیک از سناریوها سطح زمین به سمت بالا حرکت نکرد، هرچند تفاوت چندانی بین سناریوهای مختلف مشاهده نشد.

### ۸- نتیجه‌گیری

مطابق نتایج این تحقیق مناسب‌ترین سناریو وضعیتی است که، ابتدا تونل کم عمق به فاصله حداقل ۱۰ برابر قطر زودتر از تونل عمیق حفر شود. در بهترین سناریو تونل‌های مترو از نظر تنش برشی در وضعیت مناسب‌تری نسبت به حالت موجود قرار خواهند داشت. از نظر نیروی محوری نیز منجر به میزان کمتر از مقدار موجود خواهد شد. با توجه به جدول ۷، این سناریو در ۸ مورد مناسب‌ترین سناریو حفاری است. در صورتی که حفاری تونل کم عمق زودتر از تونل عمیق انجام شود، باعث جابجایی کمتر تونل‌ها، بوجود آمدن نیروها، ممان‌ها و تنش‌های برشی کمتری در پوشش نهایی تونل‌ها به خصوص در تونل‌های مترو خواهد شد. نشست در راستای تونل کم عمق در تمامی سناریوها به توالی حفر وابسته نبوده و تقریباً مقدار ثابتی است. به نظر می‌رسد سختی پوشش نهایی تونل فاضلاب که به موازات تونل کم عمق قرار دارد، باعث بوجود آمدن تاثیر کم توالی حفر بر میزان نشست سطح زمین شده که با مراجعه به سوابق تحقیق می‌توان اینگونه بیان نمود که یافته‌های این تحقیق تقریباً در راستای اکثر نتایج کسب شده توسط تحقیقات انجام شده (کیم (۱۹۹۶)؛ پاند و همکاران (۲۰۰۳)؛ لی‌یو و همکاران (۲۰۰۸)؛ توحیدی و صدقیانی (۱۳۸۹) و ...) است.

### ۹- تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بر اساس نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات است. نویسندگان

[10] X. G. Li and D. J. Yuan, (2012), Responses of a double-decked metro tunnel to shield driving of twin closely under-crossing tunnels, *Tunnels and Underground Space Technology* (28), pp. 18-30.

[11] Tohidi. Amin, Sadaghiani. Mohammad Hossein, (2010), An investigation on affecting factors on interaction of constructing non-level crossing tunnels, Master of science Thesis, Sharif university of technology, Faculty of engineering, civil engineering department (in Persian).

[12] Razi. Amir mohammad, Shahriar. Kourosh, (2013), Analysis of interaction of two tunnels (case study: tunnels line 6 and 7 of Tehran subway), Master of science Thesis, Islamic Azad University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Mining Engineering Department (in Persian).

[13] Sahel. Consulting Company, Sepasad. engineering company, (2014), Analysis of interaction of tunnels line 6 and 7 of Tehran subway in new corridor (in Persian).

[14] Sherizadeh. Hamid, Dehghan. Saeed, (2016), An improvement of distance between urban tunnels in intersecting areas and an investigation on excavation sequence, Master of science Thesis, Islamic Azad University of Mahallat, Faculty of Engineering, Mining Engineering Department (in Persian).

THIS PAGE IS INTENTIONALLY LEFT BLANK