

## بررسی تأثیر متقابل تونل‌های دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدلسازی عددی سه‌بعدی (مطالعه موردی: تونل‌های خط یک قطار شهری تبریز)

صابر اکبری<sup>1\*</sup>، شکراله زارع<sup>2</sup>، حسین میرزایی نصیرآباد<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

2- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

3- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

(دریافت: خرداد 1393 پذیرش: تیر 1394)

### چکیده

ارزیابی برهم‌کنش بین فضای زیرزمینی جدید و فضاهای زیرزمینی موجود و ارائه راهکارهای مناسب یکی از مهم‌ترین موضوعات تونلسازی در محیط شهری است که توجه به آن از اهمیت خاصی برخوردار است. در برخی موارد ضروری است تا تونل‌ها در مجاورت یکدیگر حفاری گردند که این امر منجر به ایجاد تأثیرات اندرکنش مهمی می‌شود. در این مقاله با مدلسازی سه‌بعدی عددی تونل‌های دوقلوی خط یک سازمان قطار شهری تبریز، پایداری حفاری تونل‌های دوقلو با استفاده از روش کرنش بحرانی ساکورائی بررسی و همچنین الگوی تغییر شکل ایجاد شده در سیستم نگهداری تونل‌های سهند و سیلان تعیین می‌گردد. همچنین تأثیر حفاری این تونل‌ها روی نشست سطح زمین و ساختمان‌های مجاور بررسی می‌گردد. جهت بررسی میزان نشست سطح زمین در مسیر حفاری تونل‌های دوقلوی قطار شهری تبریز از معیار کرامر و روش عددی تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC3D) استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر متقابل تونل‌های مذکور نیروها و ممان‌های اعمال شده روی سیستم نگهداری تونل‌های دوقلو پایش و ضریب ایمنی آن‌ها تعیین و در نهایت پایداری پایه قرارگرفته مابین دو تونل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که تونل‌های مترو تبریز در خلال حفاری پایدار خواهند بود، نشست سطح زمین تأثیر قابل توجهی بر سازه‌های اطراف نخواهد داشت، فاکتور ایمنی سیستم نگهداری در نقاط مختلف پایش شده مابین 5 الی 10 قرار می‌گیرد و پایه قرارگرفته مابین دو تونل پایدار خواهد بود.

### کلمات کلیدی

مدلسازی عددی، تأثیر متقابل تونل‌ها، نشست سطح زمین، تغییر شکل پوشش

## 1- مقدمه

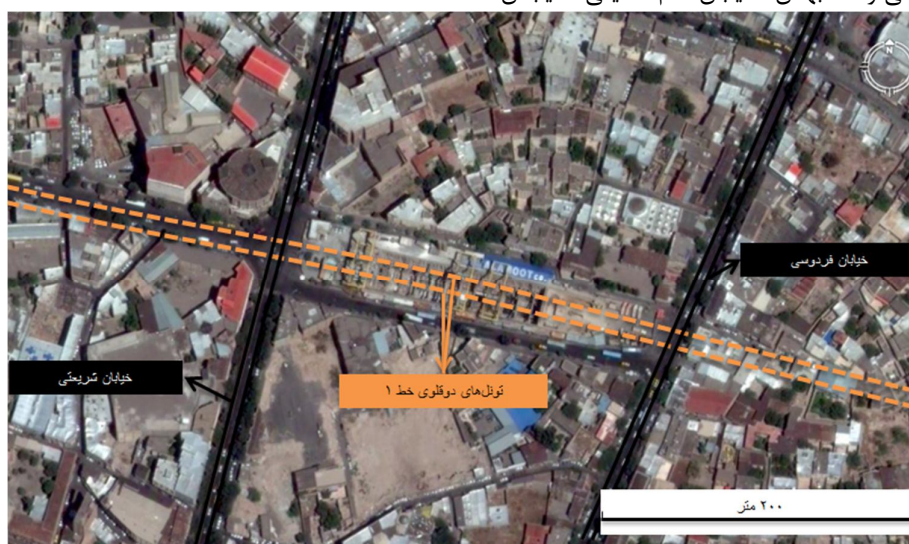
سیستم تونل موجود شده که آن منجر به ایجاد حداکثر ضریب محوری  $T/\gamma HR^2 = 0.24$  و حداکثر ضریب خمشی  $M/\gamma HR^2 = 0.0053$  گردید، که H و R به ترتیب عمق و شعاع تونل است. این مطالعه نشان داد که نیروی محوری و ممان خمشی اعمال شده روی پوشش بتنی تونل قدیمی در نتیجه حفاری تونل دوم، تاثیر مهمی روی نیروی محوری و ممان خمشی کل سیستم نگهداری نخواهند داشت.

آدنبروکه و پاتس در سال 2001 آنالیزهای دوبعدی اجزای محدود با استفاده از مدل خاک الاستیک غیرخطی، کاملاً پلاستیک روی چندین تونل انجام دادند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که برای تونل‌های حفاری شده در کنار هم، تأثیرات متقابل برای عرض پایه بیشتر از 7 برابر قطر قابل چشم پوشی خواهد بود. لی و همکاران در سال 2004 یک سری آنالیزهای سه بعدی اجزاء محدود برای بررسی تاثیر متقابل بین تونل‌های دوقلوی ساخته شده با روش ناتم در رس سخت انجام دادند. آن‌ها توجه ویژه‌ای به فاصله طولی بین سینه کارهای دو تونل ( $L_T$ ) و مکانیزم تبادل بار بین دو تونل معطوف داشتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در هر دو تونل  $L_T$  تاثیر بیشتری روی جابجایی‌های افقی نسبت به جابجایی‌های قائم می‌گذارد و به صورت قابل توجهی روی کوچک شدگی دهانه افقی تونل‌ها تاثیر می‌گذارد. تغییرات ایجاد شده در عرض پایه به طور تقریبی تابع خطی از  $L_T$  است. لیو و همکاران در سال 2009 تاثیر تونلسازی روی سیستم نگهداری تونل موجود در حالت‌های مختلف قرارگیری تونل‌ها از جمله کنارهم و روی هم در منطقه سیدنی را با استفاده از مدلسازی سه بعدی اجزاء محدود مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تأثیرات اندرکنش به صورت قابل توجهی وابسته به موقعیت نسبی تونل جدید نسبت به تونل موجود است. در مناطقی مانند سیدنی که دارای تنش‌های افقی بالا است، حفاری تونل جدید در بالا یا پایین تونل موجود نسبت به حالتی که تونل جدید در کنار تونل موجود قرار گرفته باشد، تأثیرات نامطلوبتری بر روی سیستم نگهداری تونل موجود خواهد داشت. اهداف اصلی این تحقیق عبارت‌اند از:

1. بررسی پایداری حفاری تونل‌های دوقلو با استفاده از روش کرنش بحرانی ساکورائی و همچنین بررسی الگوی

هنگامی که تونل جدیدی در مجاورت تونل موجود حفر می‌شود، تأثیرات اندرکنش مهمی می‌تواند ایجاد گردد. برای مثال ساخت تونل جدید می‌تواند تغییر شکل‌های غیرمجاز یا ممان خمشی روی سیستم نگهداری تونل موجود اعمال نماید. این اندرکنش وابسته به پارامترهایی نظیر فاصله تونل‌ها، اندازه هر دو تونل، صلبیت سیستم نگهداری و روش استفاده شده برای جایگذاری تونل دوم دارد. در مسائل طراحی واقعی که تأثیرات اندرکنشی دارای اهمیت زیادی هستند، معمولاً روش‌های تجربی توسعه داده شده از اندازه‌گیری‌های درجا و روش‌های عددی دوبعدی استفاده می‌شوند. اگرچه تأثیرات سه‌بعدی ممکن است گاهی مهم باشند، ولی عموماً انجام تحلیل‌های سه‌بعدی پیچیده در خلال طراحی‌های معمولی امکان‌پذیر نیست. اندرکنش مابین تونل‌های مجاور هم در گذشته با استفاده از روش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. تعداد زیادی از کارهای منتشر شده در این زمینه بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در خلال ساخت تونل‌ها است. همچنین در برخی از کارها نیز از آنالیزهای اجزای محدود و روش‌های تحلیلی برای مطالعه استفاده شده است. مطالعات کمتری نیز با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس کوچک انجام شده است. قابل توجه است که اگرچه مقدار زیادی از تحقیقات انجام شده در این زمینه در طول 30 سال گذشته نگارش شده، مطالعات بسیار کم اما ارزشمندی در سال‌های اخیر چاپ شده است. در مورد تاثیر متقابل تونل‌های دوقلو مطالعات تحلیلی اندکی در گذشته انجام شده است. در سال 1966 فتووا و شینین با استفاده از روش تحلیلی به اثرات اندرکنش دو تونل مجاور پرداخته‌اند. این مطالعه بر اساس فرض رفتار الاستیک خاک بوده و از تکنیک تبدیل لاپلاس برای ارزیابی تاثیر متقابل تونل‌ها استفاده کرده است. مطالعه مذکور برای مثالی از یک تونل نگهداری شده با قطر 6 متر در عمق 36 متر انجام شده است. برای خاک و سیستم نگهداری به ترتیب مشخصات سنگ و بتن در نظر گرفته شده است. تونل دوم با قطر مشابه در مجاورت تونل موجود و با فاصله مرکز به مرکز 8 متر حفاری شد که در این حالت نسبت عرض پایه به قطر تونل برابر 0/33 بوده است. حفاری تونل دوم سبب اعمال تنش‌های اضافی در

شهید سرگرد محقق، باغ گلستان، به کوی لاله ختم می‌شود. خط یک قطار شهری تبریز از لحاظ فیزیکی به صورت هم‌سطح، نیمه عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. در بخش عمیق به صورت دو تونل تک‌خطی (دوقلو) سهند و سبلان است که عملیات حفاری تونل‌ها با استفاده از دو ماشین حفاری تونل از نوع فشار تعادلی زمین انجام می‌پذیرد. قطر حفاری تونل‌ها 6/88 متر و قطر خارجی سگمنت‌ها 6/6 متر و قطر داخلی تونل‌ها 6 متر است و دارای 14 سانتی‌متر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌ها است که به وسیله بتن تزریقی پر می‌شود. شکل 1 عکس هوایی مسیر مترو تبریز و مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد [5].



شکل 1: محدوده مورد مطالعه تونل‌های دوقلوی خط یک مترو تبریز [5]

لایه‌های شیل و رگه‌های نازکی از زغال هستند (شکل 2) [6].

به طور کلی شهر تبریز بر روی رسوبات دوره‌های مختلف دوره‌های سوم و چهارم زمین‌شناسی بنا شده است. این رسوبات شامل سنگ‌رس، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، توف، ژپیس و رسوبات آبرفتی از قبیل رس، لای، ماسه، شن و قلوه‌سنگ است. به علاوه واریزه‌های کوه‌پایه‌ای و همچنین لایه‌هایی از خاک‌ریزهای دستی در قسمت‌هایی از شهر دیده می‌شوند. در جدول 1 سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده شهر تبریز معرفی شده‌اند.

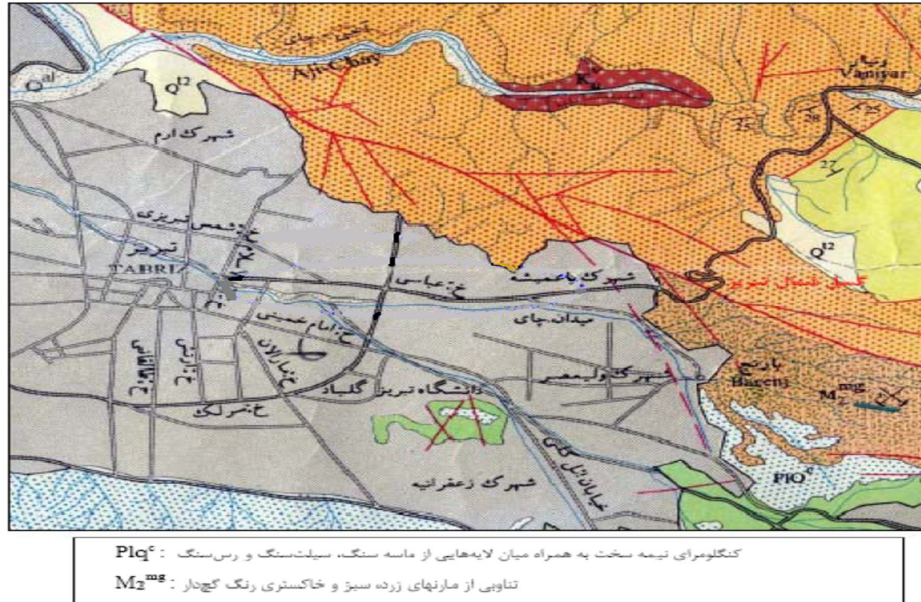
تغییر شکل ایجاد شده در سیستم نگهداری تونل‌های سهند و سبلان  
 2. بررسی تأثیر حفاری تونل‌های دوقلوی خط یک متروی تبریز روی نشست سطح زمین و ساختمان‌های مجاور  
 3. بررسی نیروها و ممان‌های اعمال شده روی سیستم نگهداری تونل‌ها و تعیین ضریب ایمنی  
 4. بررسی پایداری پایه قرار گرفته مابین تونل‌های دوقلو

## 2- معرفی پروژه

پروژه خط یک سازمان قطار شهری تبریز به طول 17/2 کیلومتر با 18 ایستگاه از میدان ائل‌گلی آغاز و از طریق بلوارهای ائل‌گلی و 29 بهمن، خیابان امام خمینی، خیابان

## 3- وضعیت زمین‌شناسی و بررسی ساختار مسیر

از نظر لیتولوژی اکثر تشکیلات و طبقات زمین‌شناسی آذربایجان، شامل طبقات رسوبی، تشکیلات آتش‌فشانی و تبخیری هستند. مهم‌ترین این طبقات که در اکثر نقاط آذربایجان رخنمون دارند عبارت‌اند از: طبقات آهکی، مارنی، ماسه‌سنگ‌های قرمز، سنگ‌های آواری، سنگ‌های آذرین و رسوبات تبخیری شامل طبقات گچ و نمک و همچنین

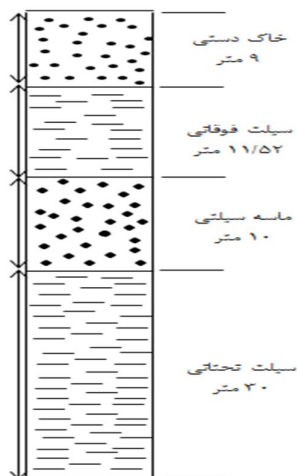


شکل 2: ساختار زمین‌شناسی شهر تبریز [7]

جدول 1: سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده شهر تبریز [7]

دوران	نوع رسوبات
کواترنری	آبرفت‌های کواترنری: رسوبات تخریبی درشت‌دانه (ماسه شن‌دار و سیلت‌دار)
پلیوسن	رسوبات با فسیل ماهی: طبقات حاوی فسیل ماهی (مارن، خاکستر آتش‌فشانی و دپاتومیت و با ضخامت متوسط 7 متر)
میوسن	سازند باغمیشه (لایه‌های مارنی-شیلی خاکستری تا سبز تیره دارای ریز لایه‌های لیگنیت‌دار)
	سازند قرمز فوقانی: رسوبات قرمز رنگ تخریب قاره‌ای (ماسه‌سنگ، سیلتستون، مارن و کنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی)

شده است. همچنین لایه‌های خاک شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3: لایه‌های خاک شناسایی شده در منطقه مورد نظر [8]

بررسی‌ها و مطالعات ژئوتکنیک به منظور ارائه داده‌های مربوط به رفتار خاک صورت می‌گیرد و بطور کلی می‌توان گفت این بررسی‌ها برای رسیدن به نیازهای ساخت و عملکرد سازه انجام می‌گیرد. مطالعات صورت گرفته جهت بررسی‌های صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی مشتمل بر آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی به منظور شناخت شرایط و ویژگی‌های لایه‌های زیرزمینی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله جهت دستیابی به تعیین بافت و ضخامت لایه‌های خاکی، بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاکی و تعیین نوع سیمان مصرفی صورت گرفته است. نتایج نهایی حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته و بررسی شرایط محلی خاک منطقه برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک منطقه، در جدول 2 ارائه شده است. قابل ذکر است که داده‌های ارائه شده در جدول 2 برای مدلسازی لایه‌های خاک موجود در منطقه استفاده

جدول 2: مشخصات فیزیکی مکانیکی خاک منطقه [8]

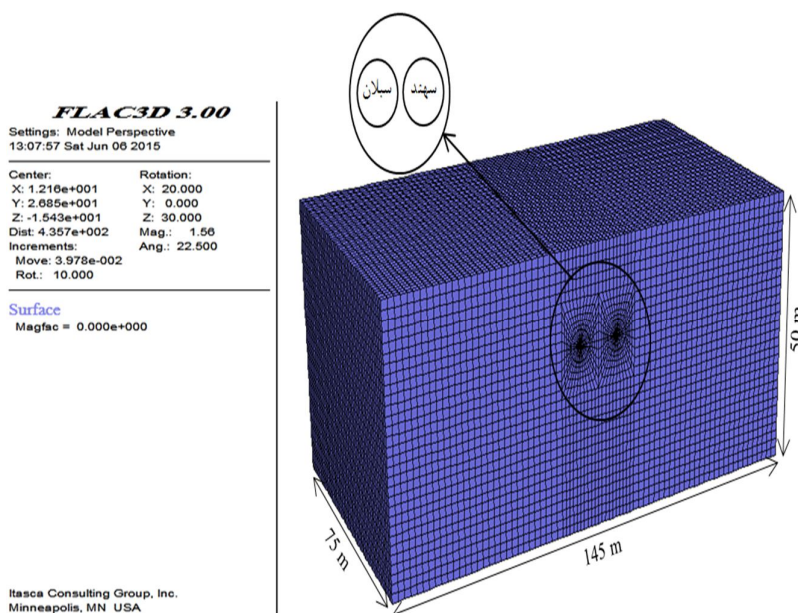
عمق لایه‌ها (m)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	نوع خاک
9	5	25	40	1/5	خاک دستی
11/52	20	25	15	1/7	سیلت فوقانی
10	5	35	50	1/9	ماسه سیلتی
30	25	28	35	1/7	سیلت تحتانی

#### 4- تحلیل عددی

با توجه به ماهیت سه‌بعدی مسئله و نیز پیوسته بودن محیطی که در آن حفاری انجام می‌شود، از نرم‌افزار عددی FLAC3D به منظور مدل‌سازی مسئله استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش تفاضل محدود استوار بوده و به منظور شبیه‌سازی رفتار سه‌بعدی سازه‌های خاکی، سنگی یا سایر موارد، تحت شرایط جریان پلاستیک (به هنگام وقوع تسلیم) استفاده می‌شود.

#### 1-4- ابعاد مدل و شرایط مرزی

نمای سه‌بعدی مدل عددی ساخته شده به منظور بررسی اندرکنش تونل‌های دوقلوی خط یک در شکل 4 نشان داده شده است. ابعاد مدل عددی، بر اساس محدودیت‌های ارائه شده بر اساس قطر و عمق تونل‌ها در مرجع شماره 9، به منظور جلوگیری از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج به دست آمده و ایجاد خطا، انتخاب گردیده‌اند. مرزهای جانبی در جهت افقی و مرز پایینی آن در جهت قائم ثابت شده‌اند. همچنین مقدار بار 20 کیلو پاسکال بر اساس آیین‌نامه آشتو، به عنوان بار وارد شده از طرف ساختمان‌ها و ترافیک بر سطح مدل اعمال می‌گردد. در جدول 3 مشخصات تونل‌های دوقلوی خط یک قطار شهری تبریز آورده شده است.



شکل 4: نمای سه‌بعدی مدل عددی ساخته شده برای تونل‌های دوقلوی خط یک

#### 2-4- انتخاب مدل رفتاری و اعمال تنش‌های برجا

مدل رفتاری لایه‌های خاکی نیز به صورت الاستیک-کاملاً پلاستیک (با معیار شکست مور-کلمب) در نظر

گرفته شده است. این مدل پرکاربردترین مدل در مطالعات عمومی مهندسی است و برای موادی به کار می‌رود که تحت بارگذاری برشی تسلیم می‌شوند. این مدل می‌تواند در مواد دانه‌ای شن، سیمان، خاک، سنگ و بتن مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان از این مدل در تحلیل پایداری حفاریات زیرزمینی و پایداری شیب بهره جست [11]. تنش‌های برجای قائم در مدل به صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برای خاک برابر با  $(1 - \sin(\varphi))$  در نظر گرفته شده است. سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در عمق 9 متری است. عمق مرکز تونل‌های دوقلو از سطح زمین 20/52 متر است.

**جدول 3: مشخصات در نظر گرفته شده تونل‌های دوقلوی خط یک [10]**

قطر داخلی	6/88 متر
قطر خارجی	6 متر
ضخامت پوشش	0/3 متر
ضخامت گروت	0/14 متر
ضریب پواسون	0/2

**3-4- سیکل حفاری**

تونل‌های دوقلوی سهند و سیلان با استفاده از دستگاه فشار تعادلی زمین حفاری می‌شوند، به صورتی که ابتدا تونل سهند به صورت تدریجی با اعمال فشار سینه کار یک

بار، با گام‌های حفاری 1/5 متری (با توجه به عرض سگمنت) و با اعمال شرایط سپر تا متر 9 متری (طول سپر) حفاری می‌شود. سپس با عبور متر 9 متری و حرکت دستگاه حفاری به جلو، در هر گام حفاری همزمان با مدلسازی سپر در قسمت حفر شده، از 1/5 متر ابتدایی المان سپر برداشته شده و المان پوسته‌ای پوشش بتنی و تزریق پشت سگمنت به مدل اعمال می‌شود و تا انتهای متر 9 متری حفاری این روند ادامه می‌یابد، سپس این روند در مورد تونل سیلان انجام می‌گیرد. مدلسازی سپر با استفاده از المان‌های پوسته‌ای انجام گرفته است و خواص اختصاص داده شده برای آن در جدول 4 درج شده است. همچنین المان‌های پوسته‌ای مربوط به پوشش بتنی با مشخصات درج شده در جدول 5 مدلسازی شده‌اند. حلقه‌های پوشش بتنی در این تحقیق به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و از درزه‌های طولی صرف نظر شده است. گرادیان فشار سینه کار با توجه به چگالی خاک درونگیر تونل اعمال شده است. همچنین فشار تزریق 2/5 بار در طول هر گام حفاری، همزمان با اعمال پوشش بتنی و تزریق در گام مذکور، در جهت عمود بر دیواره تونل اعمال گردیده است. فاصله مرکز به مرکز تونل‌های دوقلو در محدوده مورد مطالعه 13/3 متر است. با توجه به بافت قدیمی شهر در محدوده سهراب امین و حساسیت نشست سطح زمین، این محدوده جهت مطالعه انتخاب شده است.

جدول 4: مشخصات سپر [8]

مدول الاستیسیته (GP)	ضخامت (m)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	نسبت پواسون
210	0/1	7850	0/17

جدول 5: مشخصات پوشش تونل‌های دوقلوی خط یک [10]

سیستم نگهداری	ضخامت (m)	مدول الاستیسیته (GP)	نسبت پواسون	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
سگمنت	0/3	23/5	0/2	2446

به‌عنوان روشی متداول برای محاسبه همگرایی (جابجایی نسبی دیواره‌های تونل) استفاده می‌شود که در طی بررسی تونل‌های مختلف به دست آمده است. ساکورائی و همکارانش علاوه بر روابطی که بین مقاومت فشاری تک‌محوره و کرنش بحرانی برای توده‌سنگ‌های مختلف بیان کرده‌اند [12]، روابط 1، 2 و 3 را نیز بین مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی ارائه کرده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، معادله

## 5- کنترل پایداری با روش کرنش مجاز

ساکورائی در سال 1986 روشی را برای ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوره بر روی سنگ‌های مختلف تعریف می‌شود. این روش اغلب

3 است.

1 و 3 نشان‌دهنده حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی است. معادله 2 نیز مقدار لگاریتمی متوسط معادله‌های 1 و

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 0.85$$

$$\text{I تراز هشدار خطر}$$

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.22$$

$$\text{II تراز هشدار خطر}$$

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.59$$

$$\text{III تراز هشدار خطر}$$

$$u_c = 0.013 \times 3.44 = 0.044 \text{ m}$$

بردارهای جابجایی مربوط به دیواره هر یک از تونل‌های دوقلو در نتیجه تأثیر تونل دیگر اندکی به سمت مخالف منحرف شده است. همچنین حداکثر مقدار جابجایی که در ناحیه سقف و کف تونل‌ها ایجاد می‌شود برابر با 32 میلی‌متر است که این مقدار کمتر از حداکثر جابجایی مجاز 44 میلی‌متر به دست آمده از روابط ارائه شده توسط ساکورائی است، لذا تونل‌های دوقلوی خط 1 در مرحله حفاری مشکل ناپایداری نخواهند داشت.

منحنی‌های مربوط به تغییر شکل یک حلقه پوشش بتنی تونل سهند و تونل سیلان به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 با بزرگ‌نمایی 50 برابر نشان داده شده است. ترتیب حفاری تونل‌ها در بخش‌های قبلی آورده شده است. محورهای قائم و افقی نشان‌دهنده قطر تونل و برحسب متر هستند. این رینگ به علت اجتناب از اثرات مرزی بافاصله مناسب از ابتدا و انتهای مدل در نظر گرفته شده است.

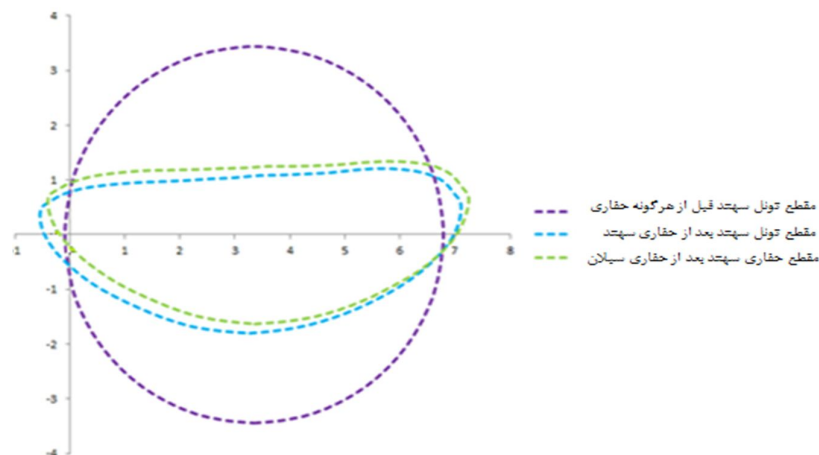
که در این روابط  $\varepsilon_c$ : کرنش بحرانی E: مدول الاستیسیته توده سنگ برحسب  $\text{Kgf/cm}^2$  است. ساکورائی و همکاران، تراز هشدار II را به عنوان مبنا برای طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد نموده‌اند. با محاسبه کرنش بحرانی از رابطه 2 جابه‌جائی مجاز با استفاده از رابطه 4 به دست می‌آید.

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (4)$$

که در آن  $u_c$  مقدار جابجایی مجاز در سقف و a شعاع تونل است. شرط پایداری فضای حفاری این است که جابجایی ایجاد شده در سقف تونل از جابجایی مجاز به دست آمده از رابطه 4 کمتر باشد. با استفاده از جدول 2 در عمق قرارگیری تونل مدول الاستیسیته در حدود 35 مگاپاسکال است. لذا:

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.22 \Rightarrow \varepsilon_c = 0.013$$

و همچنین با توجه به رابطه 4 و جایگذاری شعاع تونل  $(a=3.44\text{m})$ :

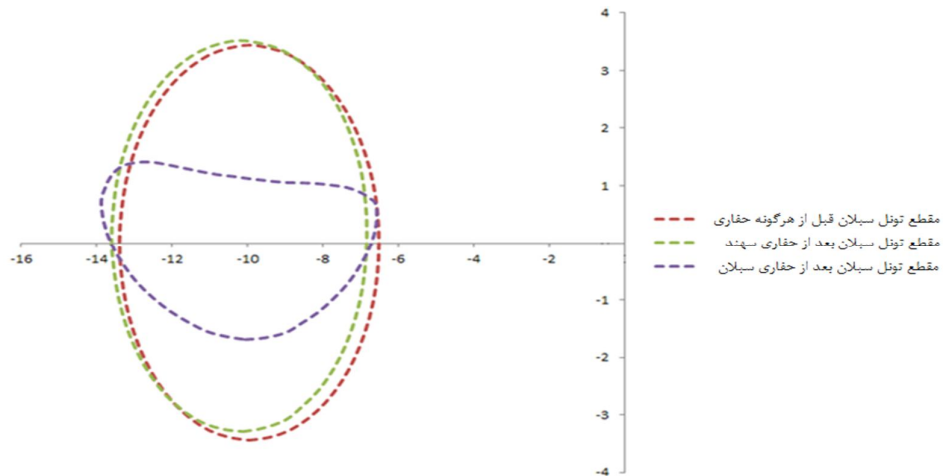


شکل 5: تغییر شکل پوشش تونل سهند

6 به این صورت است که سقف و کف به سمت داخل و دیواره‌ها به سمت بیرون جابجا می‌شوند. به علاوه نمودار

قابل مشاهده است که الگوی تغییر شکل پوشش بتنی تونل‌های سهند و سیلان، نشان داده شده در شکل‌های 5 و

می‌توان استنباط کرد مقطع اولیه در اثر حفاری تونل سه‌پند کمی به سمت چپ و بالا تغییر شکل می‌دهد و مشابه شرایط پیش‌آمده برای تونل سه‌پند، بیشترین مقدار تغییر شکل این تونل در اثر حفاری خود تونل سبلان اتفاق می‌افتد.



شکل 6: تغییر شکل پوشش تونل سبلان

منطبق باشد، امکان‌پذیر نیست. از این‌رو مقدار مشخصی تغییر شکل در عمق تونل اتفاق خواهد افتاد، این موضوع زنجیره‌ای از حرکات را به راه خواهد انداخت که تا سطح زمین گسترش می‌یابد و با کاهش عمق تونل این نشست‌ها به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابند. در شکل 7 تغییر شکل‌های ایجاد شده در نتیجه حفاری تونل‌های دوقلوی خط یک نشان داده شده است.

#### FLAC3D 3.00

Step 92214 Model Perspective  
20:55:35 Thu Apr 23 2015

Center:	Rotation:
X: -1.918e+000	X: 0.000
Y: 3.750e+001	Y: 0.000
Z: -9.800e+000	Z: 0.000
Dist: 2.311e+002	Mag.: 1
Increments:	Ang.: 22.500
Move: 3.978e-002	
Rot.: 10.000	

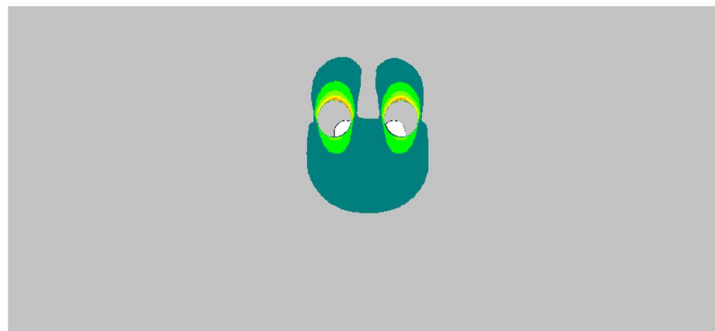
#### Surface

Magfac = 0.000e+000

#### Contour of Displacement Mag.

Magfac = 0.000e+000

0.0000e+000 to 2.0000e-002
2.0000e-002 to 4.0000e-002
4.0000e-002 to 6.0000e-002
6.0000e-002 to 8.0000e-002
8.0000e-002 to 1.0000e-001
1.0000e-001 to 1.2000e-001
1.2000e-001 to 1.2547e-001
Interval = 2.0e-002



Itasca Consulting Group, Inc.  
Minneapolis, MN USA

شکل 7: تغییر شکل‌های ایجاد شده در محیط اطراف تونل‌های دوقلوی خط یک

تغییر شکل پوشش بتنی مربوط به هر تونل در اثر تأثیر تونل دوم کمی به سمت مخالف جابجا می‌شود. در مورد تونل سه‌پند، بیش‌ترین تغییر شکل مقطع اولیه در اثر حفاری خود تونل سه‌پند اتفاق می‌افتد و سپس حفاری تونل سبلان مقطع تونل سه‌پند را کمی به سمت راست و بالا جابجا می‌کند. در مورد تونل سبلان نیز همانطور که از شکل 6

## 6- بررسی نشست سطح زمین و تأثیر آن بر ساختمان‌های مجاور

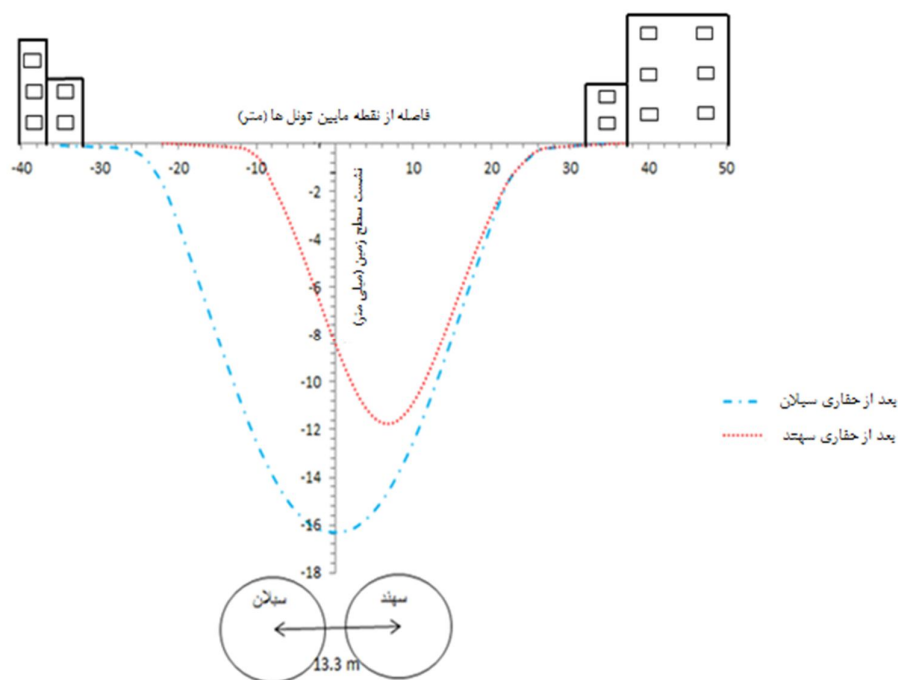
حرکات زمین نتیجه اجتناب‌ناپذیر حفاری و ساخت تونل است. حفاری تونل باعث برهم خوردن تنش‌های برجا در زمین می‌شود، که فقط با نصب سیستم نگهداری در تونل می‌توان آن را محدود کرد. در حقیقت ساخت همزمان یک حفره و ایجاد سیستم نگهداری صلب که کاملاً بر تونل



جدول 6: تأثیر شیب منحنی نشست بر روی سازه‌های سطحی (معیار کرامر)

خسارتی ندارد	کمتر از $\frac{1}{1000}$
خسارت خیلی کم	بین $\frac{1}{1000}$ - $\frac{1}{600}$
خسارت معماری کم	بین $\frac{1}{600}$ - $\frac{1}{400}$
خسارت معماری متوسط	بین $\frac{1}{400}$ - $\frac{1}{300}$

منحنی نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های دوقلوی خط یک در شکل 8 نشان داده شده است.



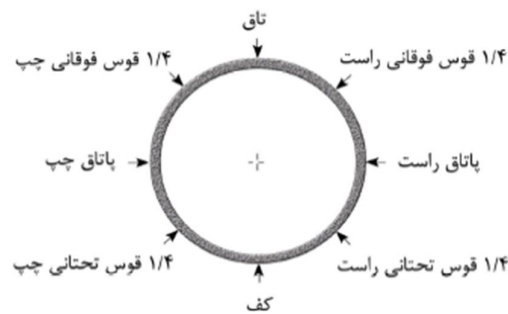
شکل 8: منحنی نشست سطح در اثر حفاری تونل‌های دوقلوی خط یک

زمین در محدوده سه‌راه امین در عرض 45 متر است. توجه به این نکته ضروری است که تونل‌های دوقلوی خط یک در ناحیه مورد بررسی از زیر خیابان با عرض حدود 65 متر عبور می‌نماید و در محدوده تأثیر نشست ناشی از تونلسازی، ساختمان، پل و ... وجود ندارد. بنابراین نشست ایجاد شده در سطح زمین در ناحیه مورد نظر مشکلی ایجاد نخواهد کرد. با توجه به جدول ارائه شده توسط کرامر، در صورتی که در نقطه هم‌عرض با محدوده شیب حداکثر منحنی نشست در سطح زمین ساختمان وجود داشته باشد،

نشست سطح زمین می‌تواند تأثیر زیادی بر روی ساختمان‌ها و پل‌های اطراف داشته باشد. شیب منحنی نشست مهم‌ترین پارامتر در بررسی تأثیر نشست بر روی ساختمان‌ها و پل‌ها است. از جمله معیارهای مشهور در بررسی این تأثیرات، معیار کرامر است. طبق این معیار بعد از محاسبه شیب منحنی نشست، می‌توان خطر آفرینی حفر تونل در منطقه مورد نظر را تعیین نمود (جدول 6). با توجه به این معیار ماکزیمم شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی چون پل 1/800 و برای سازه‌هایی چون ساختمان‌ها 1/900 است [13].

با توجه به شکل 8 بعد از حفاری تونل سهند بیشترین مقدار نشست سطح زمین حدود 11/76 میلی‌متر است. با حفاری تونل دوم (سبلان) حداکثر نشست سطح زمین به مقدار 16/31 میلی‌متر می‌رسد. این مقدار نشست که در نقطه مابین دو تونل اتفاق می‌افتد، کمتر از بیشترین میزان نشست مجاز تعیین شده توسط کارفرما، برابر با یک اینچ (2/54 سانتی‌متر) است. همچنین پرشیب‌ترین قسمت این منحنی که بعد از حفاری تونل دوم (سبلان) رخ می‌دهد، دارای شیبی در حدود 1/950 است. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، تأثیر تونل‌سازی بر نشست سطح

طولی قرار گرفته در داخل آن و تخصیص مشخصات مورد نیاز برای آن‌ها، نیروهای محوری و ممان‌های خمشی اعمال شده به پوشش بتنی را وارد می‌کنند. نرم‌افزار با ارزیابی اندرکنش نیروهای محوری و ممان‌های خمشی وارد شده و مقایسه آن‌ها با مقاومت کلی محاسبه شده برای پوشش بتنی، ضریب ایمنی پوشش بتنی مطابق با نیروها و ممان‌های مذکور را محاسبه می‌کند. نقاطی از پوشش که در آن از ممان خمشی، نیروهای برشی و محوری تاریخچه گرفته‌شده در شکل 9 نشان داده شده‌اند.



شکل 9: نقاط مدنظر برای ثبت نیروها و ممان خمشی

نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی بخش‌های مختلف پوشش تونل، در جدول 7 درج شده است.

جدول 7: نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند در حالتی که فقط سهند حفاری شده

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری kN	لنگر خمشی kN.m	نیروی برشی kN
1	تاق	540	29/38	8/53
2	1/4 قوس فوقانی چپ	780	11/83	38/85
3	پاتاق چپ	1000	10/44	35/14
4	1/4 قوس تحتانی چپ	780	2/78	8/08
5	کف	580	13/61	2/78
6	1/4 قوس تحتانی راست	850	1/2	1
7	پاتاق راست	1000	21/17	48/64
8	1/4 قوس فوقانی راست	700	1/2	40/46

گشتاور خمشی (محاسبه شده توسط نرم‌افزار FLAC3D) در نرم‌افزار PCACol، مقدار ضریب اطمینان برای مراحل مختلف حفاری محاسبه می‌گردد. قابل ذکر است که در بحث تونلسازی

شیب ذکر شده موجب ایجاد خسارت خیلی کم در ساختمان مذکور خواهد شد.

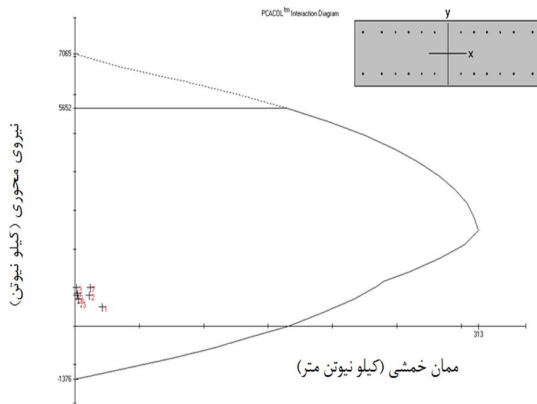
## 7- بررسی نیروها و ممان‌های اعمال شده روی سیستم نگهداری تونل‌های دوقلو و تعیین ضریب ایمنی آن‌ها

به منظور بررسی تأثیر متقابل تونل‌های دوقلوی خط یک، تأثیر حفاری هر یک از تونل‌های دوقلو بر پایداری تونل‌های مذکور بررسی می‌گردد. برای مطالعه پایداری تونل‌های دوقلوی خط یک، مراحل مختلف حفاری هر یک از تونل‌های سهند و سبلان با استفاده از نرم‌افزار از تونل مدلسازی شده و بردار جابجایی و میدان تنش ناشی از اندرکنش تونل‌های دوقلو تعیین می‌گردد.

### 7-1- حفاری تونل سهند

با استفاده از تاریخچه‌های به دست آمده از نیروهای محوری، برشی و ممان خمشی روی نقاط مختلف یک حلقه پوشش که به منظور اجتناب از شرایط مرزی با فاصله مناسب از ابتدا و انتهای مدل در نظر گرفته شده، مقادیر مربوطه استخراج و با نرم‌افزار PCACol پایداری آن‌ها کنترل شده است. نرم‌افزار PCACol برای ارزیابی اندرکنش نیروی محوری و ممان خمشی استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار بعد از مدلسازی مقطع پوشش بتنی و میلگردهای

به منظور کنترل نیروها و گشتاور خمشی ایجاد شده در مقطع پوشش بتنی تونل‌ها، از روش تنش مجاز استفاده شده است. با مدلسازی مقطع مورد نظر و اعمال نیروی محوری و



شکل 10: دیاگرام ظرفیت نگهداری بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند

قابل مشاهده است که پوشش بتنی تونل سهند در مقابل نیروها و ممان‌های اعمال شده، در حالتی که فقط خود این تونل حفاری شده باشد با ضرایب ایمنی بالایی (9-5) پایدار است.

### 2-7- حفاری تونل سبلان

نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی بخش‌های مختلف پوشش تونل سهند و سبلان، بعد از حفاری تونل سبلان در جدول 9 و 10 نشان داده شده است.

جدول 9: نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند بعد از حفاری سبلان

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری kN	لنگر خمشی kN.m	نیروی برشی kN
1	طاق	580	18	16
2	1/4 قوس فوقانی چپ	840	18/5	20
3	پاتاق چپ	1020	13	36
4	1/4 قوس تحتانی چپ	840	5/05	10
5	کف	650	2	5/13
6	1/4 قوس تحتانی راست	870	4/56	9
7	پاتاق راست	1010	11/5	50/63
8	1/4 قوس فوقانی راست	720	0	33

PCAcول نشان می‌دهد. همچنین ضرایب ایمنی به دست آمده از بخش‌های مختلف پوشش بتنی سبلان در جدول 12 و کنترل پایداری این بخش‌ها با نرم‌افزار PCAcول در شکل 12 نشان داده شده است.

در محیط‌های شهری، معمولاً فاکتور ایمنی 1/5 را به منزله شکست در نظر می‌گیرند [14]. نتایج حاصل از این بررسی‌ها برای مقطع بتن مسلح به عرض 1/4 متر و ضخامت 0/3 متر که تحت تأثیر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی ذکر شده در جدول 7 قرار می‌گیرند، به صورت ضرایب اطمینان مربوط به هر بخشی از مقطع مذکور در جدول 8 آورده شده است.

جدول 8: ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
1	طاق	8/43
2	1/4 قوس فوقانی چپ	7/24
3	پاتاق چپ	5/65
4	1/4 قوس تحتانی چپ	7/24
5	کف	9/74
6	1/4 قوس تحتانی راست	6/64
7	پاتاق راست	5/65
8	1/4 قوس فوقانی راست	8/07

شکل 10 کنترل پایداری بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند را در حالتی که فقط خود سهند حفاری شده باشد برای مقطع ذکر شده متناسب با شماره ردیف هر قسمت، در نرم‌افزار PCAcول نشان می‌دهد.

ضرایب اطمینان به دست آمده از بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند بعد از حفاری سبلان در جدول 11 نشان داده شده است. شکل 11 کنترل پایداری بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند را بعد از حفاری سبلان برای مقطع ذکر شده متناسب با شماره ردیف هر قسمت، در نرم‌افزار

جدول 10: نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل سبلان

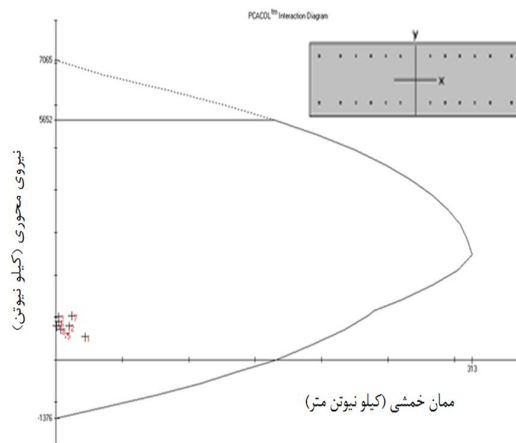
ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری kN	لنگر خمشی kN.m	نیروی برشی kN
1	تاق	560	29/32	8/55
2	1/4 قوس فوقانی چپ	800	11/77	38/78
3	پاتاق چپ	1020	9/47	35/42
4	1/4 قوس تحتانی چپ	820	2	5
5	کف	640	13/64	1/5
6	1/4 قوس تحتانی راست	900	1/25	3
7	پاتاق راست	1000	19/61	48
8	1/4 قوس فوقانی راست	740	2/5	39/61

جدول 12: ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی سبلان

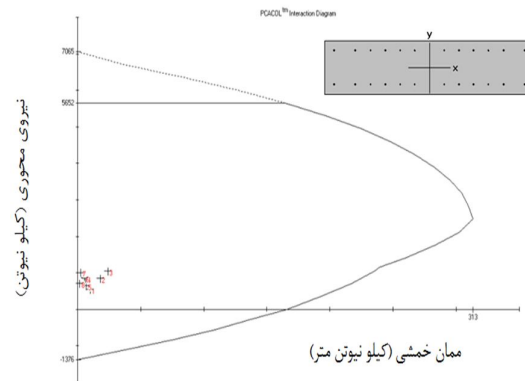
ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
1	تاق	8/28
2	1/4 قوس فوقانی چپ	7/06
3	پاتاق چپ	5/54
4	1/4 قوس تحتانی چپ	6/89
5	کف	8/83
6	1/4 قوس تحتانی راست	6/28
7	پاتاق راست	5/65
8	1/4 قوس فوقانی راست	7/63

جدول 11: ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی سهند بعد از حفاری سبلان

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
1	تاق	9/58
2	1/4 قوس فوقانی چپ	6/72
3	پاتاق چپ	5/51
4	1/4 قوس تحتانی چپ	6/72
5	کف	8/69
6	1/4 قوس تحتانی راست	6/49
7	پاتاق راست	5/59
8	1/4 قوس فوقانی راست	7/85



شکل 12: دیاگرام ظرفیت نگهداری بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سبلان



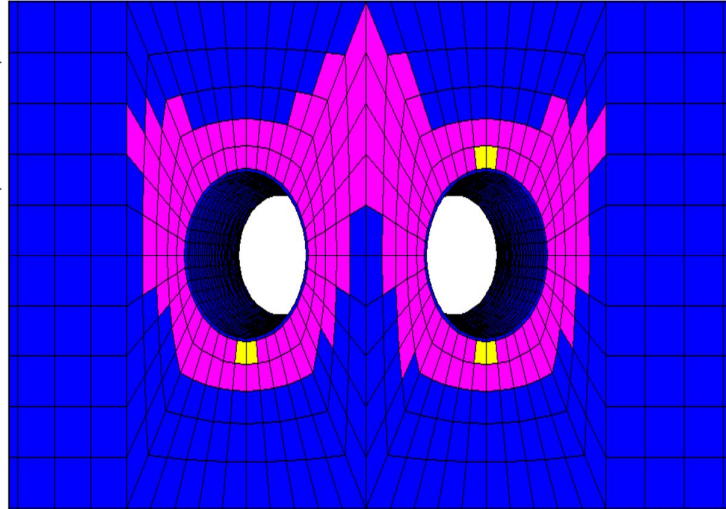
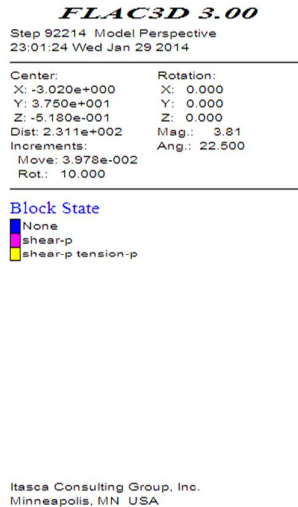
شکل 11: دیاگرام ظرفیت نگهداری بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند بعد از حفاری سبلان

همانطور که می‌توان از شکل‌ها و جداول ارائه شده استنباط نمود، در اثر نیروهای اعمال شده در نتیجه حفاری تونل سبلان میانگین ضرایب اطمینان پوشش بتنی تونل سهند کاهش یافته



دیواره هر تونل در نتیجه تأثیر تونل دوم اندکی به سمت مخالف جابجا می‌شوند.

این صورت که نقاط واقع سقف و کف تونل به سمت داخل تونل و نقاط واقع بر دیواره‌های تونل به سمت بیرون تغییر شکل می‌دهند. در نهایت بردارهای جابجایی مربوط به



شکل 14: نواحی پلاستیک شده مابین تونل‌ها

محدوده مورد مطالعه تأثیری بر سازه‌های رو سطحی نخواهد داشت.

3. با توجه به نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش تونل سهند در شرایطی که فقط تونل سهند حفاری شده باشد و نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش تونل‌های سهند و سبلان بعد از حفاری تونل سبلان و نیز توجه به این که ضریب ایمنی  $1/5$  را در تونلسازی در محیط‌های شهری برای پوشش بتنی به منزله شکست در نظر می‌گیرند، ملاحظه می‌گردد که پوشش بتنی تونل‌های مذکور با ضریب اطمینان بالایی پایدار هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پوشش بتنی تونل سهند در مقابل نیروها و ممان‌های اعمال شده، در حالتی که فقط خود این تونل حفاری شده باشد با ضرایب ایمنی  $9-5$  پایدار است. به علاوه در اثر نیروها و اعمال شده در نتیجه حفاری تونل سبلان برآیند ضریب ایمنی پوشش بتنی تونل سهند کاهش یافته است. همچنین ضرایب ایمنی نقاط مختلف در نظر گرفته شده در پوشش بتنی تونل سبلان با ضرایب ایمنی  $(8-5)$  پایدار هستند. نتایج بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که نیروهای برشی پایش شده روی پوشش بتنی تونل‌های دوقلو از مقادیر مجاز به دست آمده از محاسبات کمتر بوده و مشکلی برای پایداری پوشش بتنی تونل‌ها ایجاد نمی‌کند.

2. حداکثر میزان نشست سطح زمین در محدوده مورد مطالعه در اثر حفاری تونل سهند  $11/76$  میلی‌متر است که این نشست بعد از حفاری تونل سبلان به  $16/31$  میلی‌متر می‌رسد. حداکثر شیب سطح زمین بعد از حفاری تونل سبلان  $1/950$  است. بررسی منحنی نشست دو بخش را شامل می‌شود:

اول: با توجه به میزان نشست مجاز تعیین شده توسط کارفرما که برابر  $1$  اینچ ( $2/54$  سانتی‌متر) است، ملاحظه می‌گردد که بیشترین نشست رخ داده در سطح زمین بعد از حفاری تونل دوم کمتر از نشست مجاز تعیین شده است.

دوم: با توجه به معیار ارائه شده توسط کرامر که در آن شیب منحنی نشست مبنای ارزیابی تأثیر نشست بر سازه‌های سطح زمین قرار می‌گیرد، در صورتی که در نقطه هم‌عرض با محدوده شیب حداکثر نمودار نشست در سطح زمین ساختمان وجود داشته باشد، شیب ذکر شده موجب ایجاد خسارت خیلی کم در آن خواهد شد. با توجه به عبور تونل‌های دوقلوی خط یک از زیر خیابانی به عرض  $65$  متر در محدوده مورد مطالعه و عدم وجود سازه‌هایی نظیر ساختمان و پل و اینکه تأثیر تونلسازی در محدوده مورد مطالعه به عرض  $45$  متر است، لذا تونل‌های مذکور در

- [13] موسوی، مهدی؛ طالبی نژاد، علی‌رضا و چاکری، حمید (1388). تحلیل پایداری و مدلسازی سه‌بعدی تونل و ایستگاه. هشتمین کنفرانس تونل دانشگاه تربیت مدرس، 411-422.
- [14] Carranza Torres, C., Diederichs, M. (2009). Mechanical analysis of circular Liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets. Tunneling and underground space technology, PP, 506-532
- [15] مستوفی نژاد داود (1386). سازه‌های بتن‌آرمه. اصفهان: انتشارات ارکان دانش.

4. بررسی‌های انجام‌شده جهت ارزیابی پایداری پایه مابین دو تونل نشان می‌دهد که با وجود اینکه تغییر شکل‌هایی به صورت پلاستیک در طول روند حفاری کل عرض پایه قرار گرفته مابین تونل‌های دوقلو را شامل می‌شود، اما این تغییر شکل‌ها از نوع (Shear p) هستند که بر اساس مطالعات انجام‌شده بر اساس راهنمای نرم‌افزار FLAC3D از نوع تغییر شکل‌های مقطعی هستند و مشکلی برای پایداری کلی پایه ایجاد نمی‌کنند. لذا پایه مابین دو تونل در حالت کلی پایدار خواهد بود.

## 10- مراجع

- [1] Fotieva, N.N., and sheinin, V.I. (1996). Distribution of stresses in the lining of a circular tunnel when driving a parallel tunnel. Soil Mech. Found. Engng, 6, 417-422.
- [2] Addenbrooke, T.I., and Potts, D.M. (2001). Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects. Int J Geomech 1(2): 249-271
- [3] Lee, KM., Ng, Cww., Tang, DKW. (2004). Three-dimensional numerical investigations of New Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interaction. Can Geotech J 41:523-539.
- [4] Liu, HY., Small, JC., Carter JP, Williams DJ. (2009). Effect of tunneling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels. comput Geotech 36(5): 880-894
- [5] شرکت مهندسی مشاور گنو (1387). گزارش مطالعات ژئوتکنیک خط یک قطار شهری تبریز.
- [6] شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی (1384). مطالعات مترو تبریز.
- [7] سازمان قطار شهری تبریز (1384). گزارش نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی خط یک قطار شهری تبریز.
- [8] شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت (1389). طراحی سازه شفت ایستگاه 12 متروی تبریز.
- [9] Lamrugini, A., Medina Rodriguez, L., Castellanza R. (2012). Development of validation of 3D numerical model for TBM-EPB Mechanized excavations. Computers and Geotechnics, 97-113.
- [10] Alamut Bridge and building engineering co (2006), Design and calculation of concrete segments.
- [11] Itasca (2007), 3 Dimensional Distinct Element Code, Minneapolis, USA.
- [12] Sakurai, S. 1992. Lessons learned from field measurements in tunneling. Tunneling and Underground Space technology, vol 12, 453-460.

## Evaluation of Interaction between Line 1 Twin Tunnels of Tabriz Metro Using 3D Numerical Modelling

S. Akbari<sup>1\*</sup>, Sh. Zare<sup>2</sup>, H. Mirzaei Nasirabad<sup>3</sup>

1- MSc. of Mining Engineering, Dept. of Mining, Geophysics and Petroleum, Shahroodd University, Iran

2- Assistant Professor, Dept. of Mining, Geophysics and Petroleum, Shahroodd University, Iran

3- Assistant Professor, Dept. of Mining, Geophysics and Petroleum, Shahroodd University, Iran

\* Corresponding Author: [akbari.sbr@gmail.com](mailto:akbari.sbr@gmail.com)

(Received: May 2014, Accepted: June 2015)

### Abstract

Evaluation of interaction between new and existing underground spaces is one of the important problems in tunneling in urban areas. In some cases it is necessary to excavate tunnels close to each other's. This, in turn, will lead to important interaction between these tunnels. In this paper, using 3D numerical modeling of line 1 twin tunnels of Tabriz urban railway, excavation stability of these tunnels, using critical strain of Sakurai, have been studied. Also displacement pattern of lining in both twin tunnels (Sahand & Sabalan) have been investigated. In next step, effect of excavation of these tunnels on the subsidence of surface and adjacent buildings, using Cramer criteria and finite difference method (FLAC 3D), have been studied. For the purpose of study of the interaction effects between these tunnels, forces and moments that act on the segmental lining of each tunnel and their safety factor have been verified. Eventually, stability of pillar that lies between two tunnels, have also been evaluated. The results show that: 1-twin tunnels of Tabriz metro will be stable during excavation. 2-Surface subsidence due to excavation of these tunnels will have no important effect on existing structures. 3-Safety factors varies between 5-10 on the different positions of segmental lining. 4- Pillar that lies between twin tunnels will be stable

### Keywords

3D numerical modelling, interaction between tunnels, surface subsidence, deformation of lining