

## ارزیابی تأثیر عمق بر اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی

صابر اکبری\*، کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

شکرالله زارع، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود  
حسین میرزایی، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی سهند

E-mail: akbari.sbr@gmail.com

دریافت: ۹۴/۰۷/۱۱ - پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۱

### 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 می‌باشد. در این مقاله، مدل عددی سه‌بعدی تفاضل محدود تونل‌های دوقلو و تکی در محیط شهری ارائه شده است. هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر افزایش عمق تونل تکی، در فاصله افقی یکسان، بر اندرکنش بین تونل‌ها با معیار قرار دادن پارامترهایی شامل نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش بتنی تونل‌های دوقلو و ضریب ایمنی آن‌ها، نشست سطح زمین و ساختمان‌های مجاور، پایداری حفاری تونل تکی و پایداری ستون قرار گرفته بین تونل‌های دوقلو و تونل تکی می‌باشد. مطالعه موردی مربوط به تونل‌های دوقلوی خط ۱ و تونل تکی خط ۲ قطار شهری تبریز می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب ایمنی متوسط برای پوشش بتنی تونل سهند از ۶/۵۲ در حالت هم‌عمق به ۶/۳۵ با افزایش عمق تونل تکی کاهش و برای تونل سبلان از ۶/۷۸ در حالت هم‌عمق به ۷/۰۲ با افزایش عمق تونل تکی افزایش می‌یابد. با افزایش عمق تونل تکی، پایداری در حین حفاری تونل تکی افزایش یافته و نشست کلی سطح زمین کاهش می‌یابد. همچنین، پایداری ستون قرار گرفته بین تونل‌های دوقلو و تکی نیز با افزایش عمق تونل تکی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی، تأثیر متقابل تونل‌ها، نشست سطح زمین، پایداری حفاری، پایداری ستون.

### ۱. مقدمه

برای مثال، ساخت تونل جدید می‌تواند تغییرشکل‌های غیر مجاز یا ممان خمشی روی سیستم نگهداری تونل موجود اعمال نماید. این اندرکنش وابسته به پارامترهایی نظیر فاصله تونل‌ها، اندازه هر دو تونل، صلبیت سیستم

هنگامی که تونل جدیدی در مجاورت تونل موجود حفر می‌شود، تأثیرات اندرکنشی مهمی می‌تواند ایجاد گردد.

دهانه افقی تونل‌ها مؤثر است. تغییرات ایجاد شده در عرض ستون به طور تقریبی تابع خطی از  $L_T$  می‌باشد. هیگ و شاه‌رور (۲۰۰۸) نشان دادند که اگر فاصله بین تونل‌ها حداقل ۳ برابر قطر باشد، تأثیرات اندرکنشی مهمی وجود نخواهد داشت. لیو و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر تونل‌سازی روی سیستم نگهداری تونل موجود در حالت‌های مختلف قرارگیری تونل‌ها، از جمله کنار هم و روی هم، در منطقه سیدنی را با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تأثیرات اندرکنشی به صورت قابل توجهی وابسته به موقعیت نسبی تونل جدید نسبت به تونل موجود می‌باشد. در مناطقی مانند سیدنی که دارای تنش‌های افقی زیاد می‌باشد، 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 سیستم نگهداری تونل موجود خواهد داشت.

اهداف اصلی تحقیق حاضر عبارتند از: (۱) ارزیابی نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش بتنی تونل‌های دوقلو در نتیجه حفاری تونل تکی با دو عمق مختلف و تعیین ضریب ایمنی پوشش بتنی در مقابل نیروها و ممان‌های ذکر شده، (۲) بررسی تأثیر حفاری تونل تکی با دو عمق مختلف روی نشست اولیه سطح زمین و ساختمان‌های مجاور ناشی از حفاری تونل‌های دوقلو و ارزیابی پایداری ساختمان‌های موجود در سطح زمین، (۳) بررسی پایداری تونل تکی در حین حفاری در دو عمق مختلف قرارگیری با استفاده از روش کرنش بحرانی ساکورائی و (۴) بررسی پایداری ستون قرار گرفته بین تونل‌های دوقلو و تونل تکی در دو عمق مختلف حفاری تونل تکی.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. معرفی پروژه

پروژه خط یک سازمان قطار شهری تبریز به طول ۱۷/۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل‌گلی آغاز و از طریق

نگهداری و روش استفاده شده برای جایگذاری تونل دوم می‌باشد. در مسائل طراحی واقعی، که تأثیرات اندرکنشی دارای اهمیت زیادی می‌باشند، معمولاً روش‌های عددی دوبعدی و روش‌های تجربی توسعه داده شده از اندازه‌گیری‌های درجا، که از جمله آنها می‌توان به مطالعات انجام شده توسط ترزاقی در سال ۱۹۴۲ و همچنین وارد و توماس در سال ۱۹۶۵ اشاره کردند، استفاده می‌شوند (ترزاقی، ۱۹۴۲؛ وارد و توماس، ۱۹۶۵). اندرکنش بین 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 می‌باشد. همچنین، در برخی از کارها نیز از آنالیزهای اجزای محدود و روش‌های تحلیلی برای مطالعه استفاده شده است. مطالعات کمتری نیز با استفاده از امکانات آزمایشگاهی در مقیاس کوچک انجام شده است (کیم، ۱۹۹۶).

اگرچه مقدار زیادی از تحقیقات انجام شده در این زمینه در طول ۱۰ الی ۳۰ سال گذشته نگارش شده، اما مطالعاتی بسیار کم، و ارزشمند، در سال‌های اخیر چاپ شده است. آدنبروک و پاتس (۲۰۰۱) آنالیزهای دوبعدی اجزای محدود با استفاده از مدل خاک الاستیک غیرخطی و کاملاً پلاستیک روی چندین تونل انجام دادند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که برای تونل‌های حفاری شده در کنار هم، تأثیرات متقابل برای عرض ستون بیشتر از ۷ برابر قطر، قابل چشم‌پوشی خواهد بود. نجی و همکاران (۲۰۰۴) آنالیزهای سه‌بعدی اجزای محدود برای بررسی تأثیر متقابل بین تونل‌های دوقلوی ساخته شده با روش ناتم در رس سخت انجام دادند. آن‌ها توجه ویژه‌ای به فاصله طولی بین سینه‌کارهای دو تونل ( $L_T$ ) و مکانیزم تبادل بار بین دو تونل معطوف داشتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در هر دو تونل،  $L_T$  تأثیر بیشتری بر جابجایی‌های افقی، نسبت به جابجایی‌های قائم، می‌گذارد و به صورت قابل توجهی روی کوچک‌شدگی

شروع شده و بعد از گذشتن از خیابان‌های قره‌آغاج، جمهوری، میدان دانش‌سرا و خیابان عباسی به منطقه باغمیشه می‌رسد. در ادامه، به سمت شرق امتداد یافته و در محدوده نمایشگاه بین‌المللی تبریز خاتمه می‌یابد. طول مسیر پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز به سه فاز تقسیم شده و این سه فاز به صورت مکانیزه توسط دو دستگاه فشار تعادلی زمین حفاری می‌گردد. قطر حفاری تونل ۹/۵ متر، قطر خارجی پوشش‌های بتنی ۹/۲ متر و قطر داخلی تونل‌ها ۸/۵ متر است که دارای ۱۵ سانتی‌متر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی پوشش‌های بتنی است که به وسیله بتن تزریقی پر می‌شود (مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۹). شکل ۱ عکس هوایی مسیر مترو تبریز و مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین، مقطع عرضی تونل‌های دوقلو و تکی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

بلوارهای ائل‌گلی و ۲۹ بهمن، خیابان امام خمینی، خیابان شهید سرگرد محقق و 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 می‌باشد که عملیات حفاری تونل‌ها با استفاده از دو ماشین حفاری تونل از نوع فشار تعادلی زمین انجام می‌پذیرد. قطر حفاری تونل‌ها ۶/۸۸ متر، قطر خارجی پوشش‌های بتنی ۶/۶ متر و قطر داخلی تونل‌ها ۶ متر است که دارای ۱۴ سانتی‌متر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی پوشش‌های بتنی است که به وسیله بتن تزریقی پر می‌شود (مهندسین مشاور گنو، ۱۳۸۷).

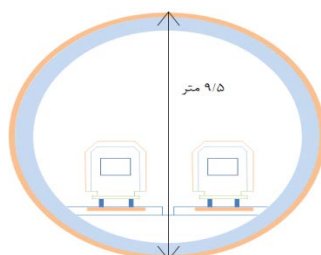
پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر دارای ۲۰ ایستگاه زیرزمینی می‌باشد که به صورت تونل تکی از منطقه قراملک در غرب تبریز



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه تونل‌های دوقلوی خط ۱ و تونل تکی خط ۲ مترو تبریز



شکل ۲. مقطع عرضی تونل‌های دوقلوی خط ۱



شکل ۳. مقطع عرضی تونل تکی خط ۲

آواری، سنگ‌های آذرین و رسوبات تبخیری شامل طبقات گچ و نمک و همچنین لایه‌های شیل و رگه‌های نازکی از زغال می‌باشند (شکل ۴) (شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی، ۱۳۸۴).

۲-۲. وضعیت زمین‌شناسی و بررسی ساختار مسیر از نظر لیتولوژی، اکثر تشکیلات و طبقات زمین-شناسی آذربایجان، شامل طبقات رسوبی، تشکیلات آتشفشانی و تبخیری می‌باشند. مهم‌ترین این طبقات که در اکثر نقاط آذربایجان رخنمون دارند عبارت‌اند از: طبقات آهکی، مارنی، ماسه‌سنگ‌های قرمز، سنگ‌های



شکل ۴. ساختار زمین‌شناسی شهر تبریز (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۴)

در جدول ۱، سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده شهر تبریز معرفی شده‌اند.

جدول ۱. سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده شهر تبریز (مهندسین مشاور گنو، ۱۳۸۷)

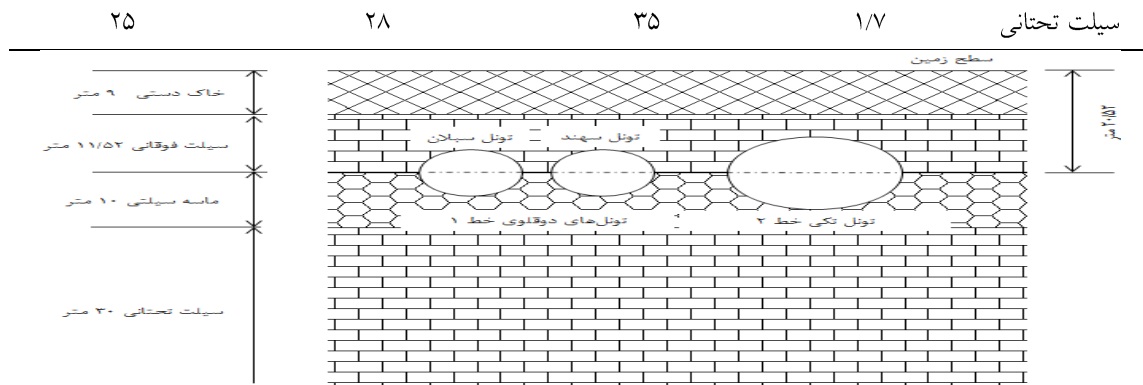
دوران	نوع رسوبات
کواترنری	آبرفت‌های کواترنری: رسوبات تخریبی درشت‌دانه (ماسه شن‌دار و سیلت‌دار)
پلیوسن	رسوبات با فسیل ماهی: طبقات حاوی فسیل ماهی (مارن، خاکستر آتشفشانی و دیاتومیت با ضخامت متوسط ۷ متر)
میوسن	سازند باغمیشه (لایه‌های مارنی-شیلی خاکستری تا سبز تیره دارای ریزلایه‌های لیگنیت دار) سازند قرمز فوقانی: رسوبات قرمز رنگ تخریب قاره‌ای (ماسه‌سنگ، سیلتستون، مارن و کنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی)

برای مدل‌سازی لایه‌های خاک موجود در منطقه استفاده شده است. همچنین، لایه‌های خاک شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است.

نتایج نهایی حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته و بررسی شرایط محلی خاک منطقه برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک منطقه در جدول ۲ ارائه شده است. قابل ذکر است که داده‌های ارائه شده در جدول ۲

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مکانیکی خاک منطقه (شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت، ۱۳۸۹)

نوع خاک	دانسیته ( $gr/cm^3$ )	مدول الاستیسیته (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kPa)
خاک دستی	۱/۵	۴۰	۲۵	۵
سیلت فوقانی	۱/۷	۱۵	۲۵	۲۰
ماسه سیلتی	۱/۹	۵۰	۳۵	۵



شکل ۵. لایه‌های خاک شناسایی شده در منطقه مورد نظر (مهندسین مشاور گنو، ۱۳۸۷)

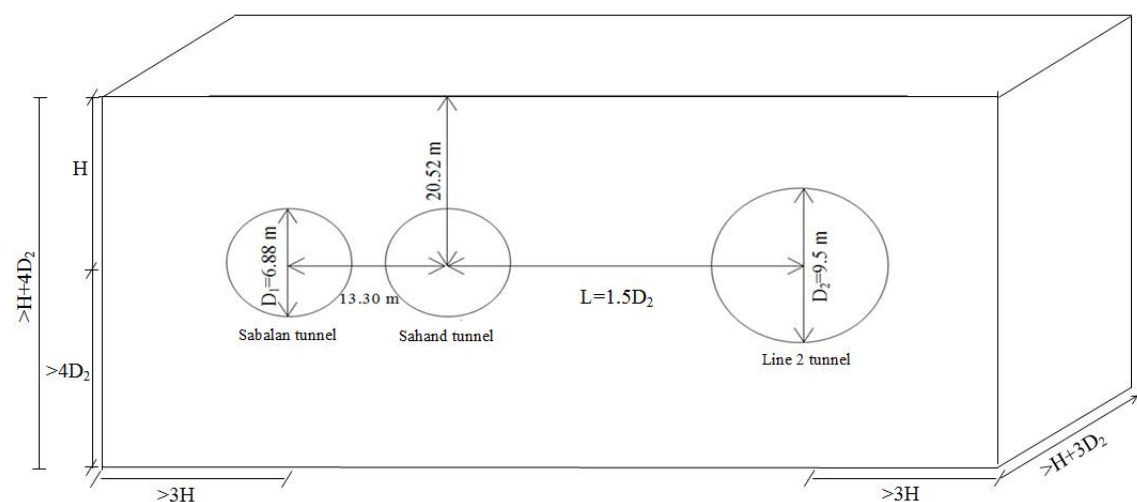
### ۳-۲. تحلیل عددی

با توجه به ماهیت سه‌بعدی مسئله و نیز پیوسته بودن محیطی که در آن حفاری انجام می‌شود، از نرم‌افزار عددی FLAC 3D به منظور مدل‌سازی مسئله استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش تفاضل محدود استوار بوده و به منظور شبیه‌سازی رفتار سه‌بعدی سازه‌های خاکی و سنگی تحت شرایط جریان پلاستیک (به هنگام وقوع تسلیم) استفاده می‌شود.

### ۳-۲-۱. ابعاد مدل و شرایط مرزی

مجموعه‌ای از مطالعات پارامتریک در گذشته با هدف به دست آوردن کمترین ابعاد مجاز برای مدل عددی انجام گرفته‌اند. در نتیجه مطالعات انجام شده، محدودیت‌های زیر برای ابعاد مدل عددی به دست آمده‌اند (لامروگی و همکاران، ۲۰۱۲):

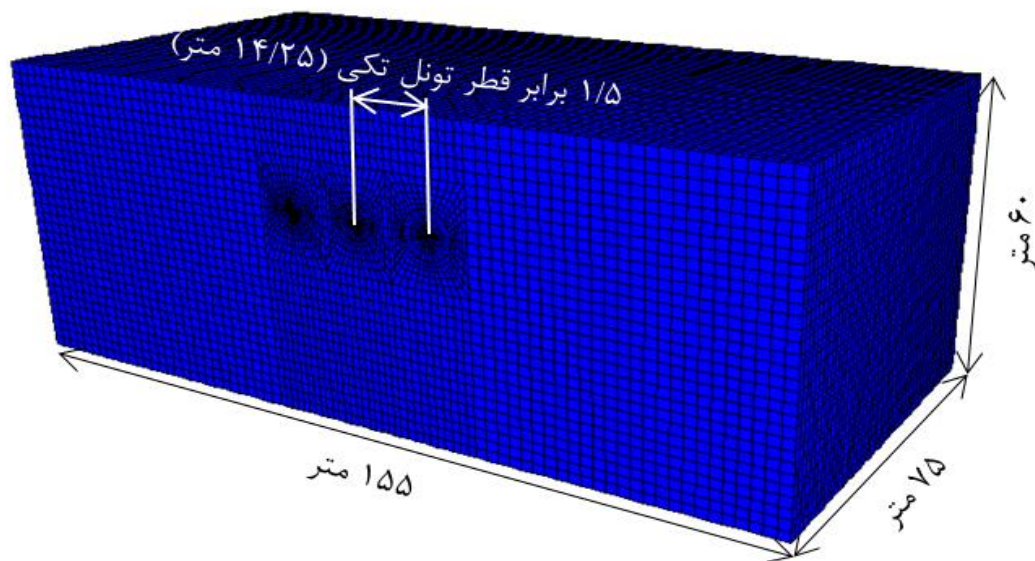
برای ارتفاع مش،  $(H+4D)$  برای طول مش و  $3H$  برای عرض مش که  $H$  عمق محور تونل از سطح زمین و  $D$  قطر آن است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، به منظور جلوگیری از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج به دست آمده و ایجاد خطا، ابعاد مدل عددی در تحقیق حاضر بیشتر از مقادیر ذکر شده بر اساس عمق و قطر تونل تکی انتخاب گردیده‌اند. نمای سه‌بعدی مدل عددی ساخته شده به منظور بررسی اندرکنش تونل تکی و تونل‌های دوقلو در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. مرزهای جانبی در جهت افقی و مرز تحتانی آن در جهت قائم ثابت شده‌اند. همچنین، مقدار بار  $20$  کیلوپاسکال به عنوان بار وارد شده از طرف ساختمان‌ها و ترافیک بر سطح مدل اعمال می‌گردد (استاندارد استرالیا، ۲۰۰۲). در جدول ۳، مشخصات تونل تکی و تونل‌های دوقلوی قطار شهری تبریز آورده شده است.



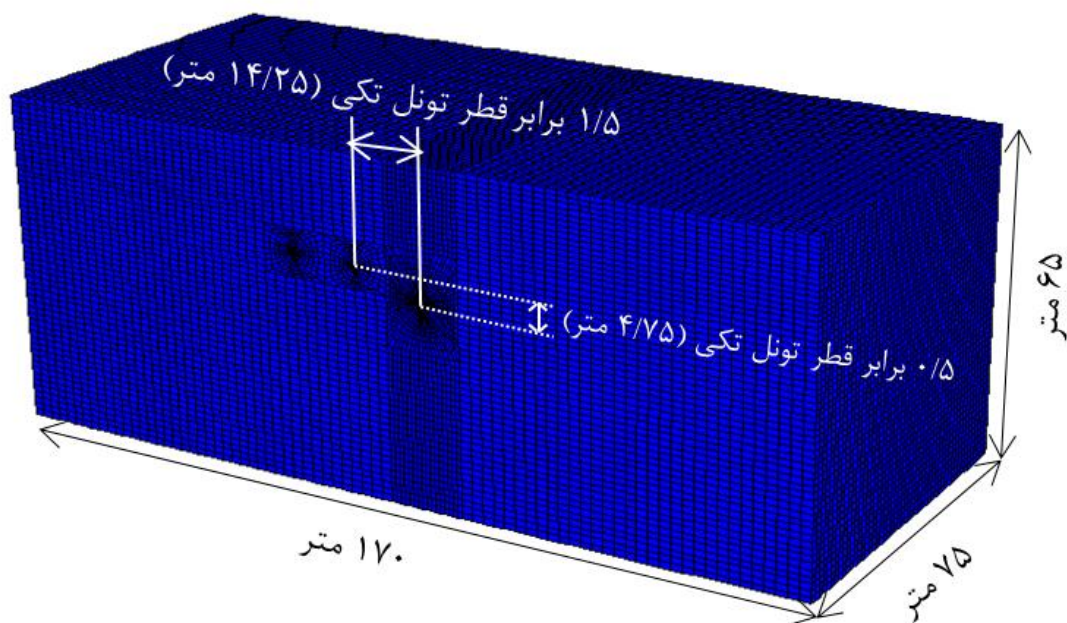


ارزیابی تأثیر عمق بر اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی

شکل ۶. ابعاد مدل تفاضل محدود ساخته شده (بر اساس عمق و قطر تونل‌ها)



شکل ۷. مدل تفاضل محدود ساخته شده برای فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر تونل تکی



شکل ۸. مدل تفاضل محدود ساخته شده برای فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر تونل تکی و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر

جدول ۳. مشخصات تونل‌های دوقلو و تونل تکی [۶،۹]

مشخصات تونل	تونل‌های دوقلو	تونل تکی
قطر حفاری	۶/۸۸ متر	۹/۵ متر
قطر داخلی	۶ متر	۸/۵ متر
ضخامت پوشش بتنی	۰/۳ متر	۰/۳۵ متر
ضخامت دوغاب	۰/۱۴ متر	۰/۱۵ متر

حفاری همزمان با مدل‌سازی سپر در قسمت حفر شده، از ۱/۵ متر ابتدایی المان سپر برداشته شده و المان پوسته‌ای پوشش بتنی و تزریق پشت پوشش بتنی به مدل اعمال می‌گردد و تا انتهای متراتژ حفاری این روند ادامه می‌یابد. سپس، این روند در مورد تونل سبلان انجام می‌گیرد. بعد از اتمام حفاری تونل‌های دوقلو، حفاری تونل تکی با روند اعمال شده برای تونل‌های دوقلو و با فشار سینه کار یکسان شروع شده و تا انتهای مدل ادامه می‌یابد. در این تحقیق، مدل‌سازی سپر با استفاده از المان‌های پوسته‌ای انجام گرفته و خواص اختصاص داده شده برای آن در جدول ۴ درج شده است. همچنین، المان‌های پوسته‌ای مربوط به پوشش بتنی تونل‌های دوقلو و تکی با مشخصات درج شده در جدول ۵ مدل-سازی شده‌اند. حلقه‌های پوشش بتنی در این تحقیق به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و از درزه‌های طولی صرف‌نظر شده است. گرادیان فشار سینه کار با توجه به دانسیته خاک درونگیر تونل اعمال شده است. همچنین، فشار تزریق ۲/۵ 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 ۱۳/۳ متر است. با توجه به بافت قدیمی شهر در محدوده سهرامین و حساسیت نشست سطح زمین، این محدوده جهت مطالعه انتخاب شده است.

۲-۳-۲ انتخاب مدل رفتاری و اعمال تنش‌های برجا  
مدل رفتاری لایه‌های خاکی نیز به صورت الاستیک-کاملاً پلاستیک (با معیار شکست مور-کولمب) 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 (ایتاسکا، ۲۰۰۷). تنش‌های برجای قائم در مدل به صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برای خاک برابر با  $(1 - \sin(\phi))$  در نظر گرفته شده است. سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در عمق ۹ متری می‌باشد. بر اساس طرح پیشنهاد شده، عمق اولیه تونل‌های دوقلو و تکی یکسان و برابر ۲۰/۵۲ متر از مرکز تونل‌ها در نظر گرفته شده است.

### ۲-۳-۳ سیکل حفاری

تونل‌های دوقلوی سهند و سبلان با استفاده از دستگاه فشار تعادلی زمین حفاری می‌گردند. به صورتی که ابتدا تونل سهند به صورت تدریجی با اعمال فشار سینه کار ۱ بار، با گام‌های حفاری ۱/۵ متری (با توجه به عرض پوشش بتنی) و با اعمال شرایط سپر تا متراتژ ۹ متری (طول سپر) حفاری می‌گردد. سپس، با عبور متراتژ حفاری از ۹ متر و حرکت دستگاه حفاری به جلو، در هر گام

جدول ۴. مشخصات سپر (مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۹)

مدول الاستیسیته (GP)	ضخامت (m)	دانسیته ( $\text{kg/m}^3$ )	نسبت پواسون
۲۱۰	۰/۱	۷۸۵۰	۰/۱۷

جدول ۵. مشخصات سگمنت تونل‌های دوقلو و تونل تکی (مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۹؛ شرکت مهندسی پل و

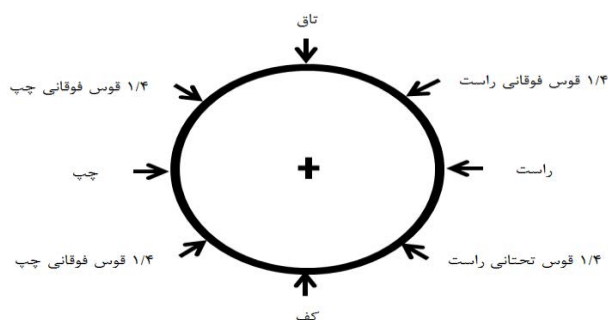
ساختمان الموت، ۲۰۰۶)

مشخصات سگمنت	تونل‌های دوقلو	تونل تکی
ضخامت (m)	۰/۳	۰/۳۵
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۳/۵	۳۰
نسبت پواسون	۰/۲	۰/۲

مناسب از ابتدا و انتهای مدل در نظر گرفته شده، مقادیر مربوطه استخراج و با نرم‌افزار PCAcol پایداری آنها کنترل شده است. 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 گشتاور خمشی (محاسبه شده توسط نرم‌افزار FLAC 3D) در نرم‌افزار PCAcol، مقدار ضریب اطمینان را می‌توان برای مراحل مختلف حفاری محاسبه کرد. قابل ذکر است که در بحث تونل‌سازی در محیط‌های شهری، معمولاً فاکتور ایمنی ۱/۵ را غیرمجاز در نظر می‌گیرند (کارانزا-تورس و دیدریکس، ۲۰۰۹).

### ۳. نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش بتنی تونل‌های دوقلو در نتیجه حفاری تونل تکی و ضریب ایمنی آنها

با توجه به تحلیل‌های انجام شده روی مدل‌های تفاضل محدود ساخته شده، نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در پوشش تونل‌های سهند و سبلان در حالت عبور تونل تکی با دو عمق مختلف نسبت به تونل‌های دوقلو پایش می‌شود. با استفاده از تاریخچه‌های به‌دست آمده از نیروهای محوری، برشی و ممان خمشی روی نقاط مختلف یک حلقه پوشش بتنی (شکل ۹) که به منظور اجتناب از شرایط مرزی با فاصله



شکل ۹. نقاط مدنظر برای ثبت نیروها و ممان خمشی توزیع شده در پوشش بتنی تونل‌های دوقلوی خط ۱

میلگردهای طولی خم شده درون آن می‌توان از روابط ۲ و ۳ استفاده کرد (مستوفی نژاد، ۱۳۸۶).

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2)$$

$$V_s = 0.34 f_y \quad (3)$$

در رابطه (۲)،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال و  $b_w$  و  $d$  به ترتیب عرض و ضخامت مقطع تحت برش بر حسب میلی‌متر می‌باشند. در رابطه (۳)،  $f_y$  و  $A$  به ترتیب مقاومت تسلیم میلگردهای فولادی بر حسب MPa و مجموع سطح مقطع تحت برش آنها بر حسب  $\text{mm}^2$  است.

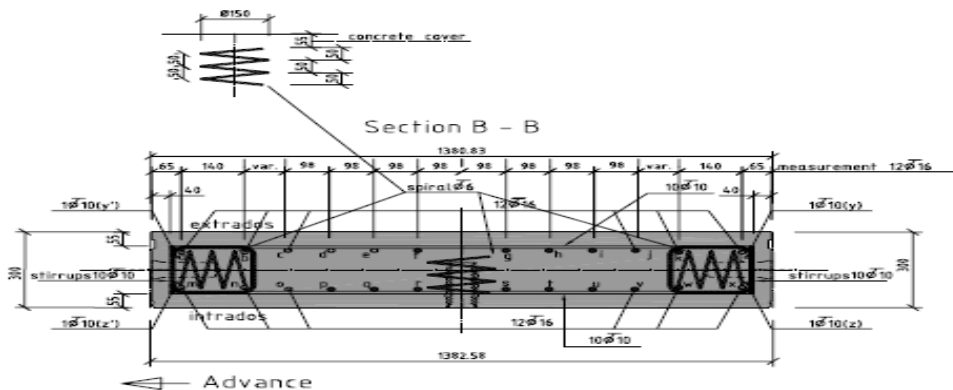
برای کنترل نیروهای برشی وارده در پوشش از رابطه

(۱) استفاده شده است:

$$V_n = V_s + V_c \quad (1)$$

در این رابطه،  $V_n$  مقاومت برشی اسمی یک مقطع بتن مسلح،  $V_c$  مقاومت برشی تأمین‌شده توسط بتن و  $V_s$  مقاومت برشی تأمین‌شده توسط میلگردهای فولاد موجود در مقطع پوشش بتن مسلح نشان داده شده در شکل ۱۰ می‌باشند، که برای محاسبه مقاومت برشی بتن و مجموعه





شکل ۱۰. مقطع بتن مسلح پوشش تونل‌ها (اندازه‌ها به میلی‌متر است) (شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت، ۱۳۸۹)

۱-۳. عبور تونل تکی با فاصله افقی ۱/۵ برابر قطر خود (۱۴/۲۵ متر) و عمق یکسان با تونل‌های دوقلو نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش بتنی تونل‌های سهند و سبلان در حالتی که تونل تکی با

فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر خود (۱۴/۲۵ متر) از مجاورت آنها عبور می‌کند در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول ۶. نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی برشی (KN)
۱	تاق	۶۵۱	۵	۲
۲	۱/۴ قوس فوقانی چپ	۸۷۴	۱۲/۵	۱۰
۳	چپ	۱۰۵۵	۳۱/۲۸	۳۷
۴	۱/۴ قوس تحتانی چپ	۸۹۴	۶	۳۰
۵	کف	۷۴۰	۲۱	۰
۶	۱/۴ قوس تحتانی راست	۹۶۰	۵/۲	۵۰/۸۳
۷	راست	۱۰۸۰	۲۰/۸۸	۸۵
۸	۱/۴ قوس فوقانی راست	۸۴۰	۱۷	۱۵

جدول ۷. نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل سبلان در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی برشی (KN)
۱	تاق	۵۸۰	۱۵	۳
۲	۱/۴ قوس فوقانی چپ	۸۰۰	۹/۵	۲۵
۳	چپ	۱۰۰۰	۳/۵	۳۵/۴۲
۴	۱/۴ قوس تحتانی چپ	۸۲۰	۲/۵۶	۷
۵	کف	۶۸۰	۱	۴/۴
۶	۱/۴ قوس تحتانی راست	۹۰۰	۰/۵	۱۶/۸۶
۷	راست	۱۰۰۰	۳	۵۲/۱۳
۸	۱/۴ قوس فوقانی راست	۷۵۰	۴/۸	۲۲

ارزیابی تأثیر عمق بر اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی

نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده برای مقطع بتن مسلح به عرض  $1/4 m$  و ضخامت  $0/3 m$  که تحت تأثیر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی ذکر شده در جداول ۶ و ۷ قرار می‌گیرند، به صورت ضرایب اطمینان مربوط به هر بخشی از مقطع مذکور به ترتیب برای تونل سهند و سبلان در جداول ۸ و ۹ آورده شده است.

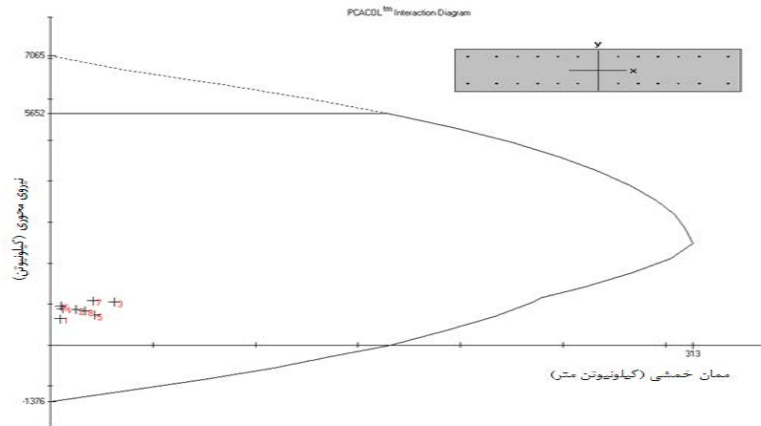
جدول ۸ ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی سهند در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل  $1/5$  برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
۱	تاق	۸/۶۸
۲	$1/4$ قوس فوقانی چپ	۶/۴۶
۳	چپ	۵/۳۲
۴	$1/4$ قوس تحتانی چپ	۶/۳۲
۵	کف	۷/۶۲
۶	$1/4$ قوس تحتانی راست	۵/۸۸
۷	راست	۵/۲۳
۸	$1/4$ قوس فوقانی راست	۶/۸۲

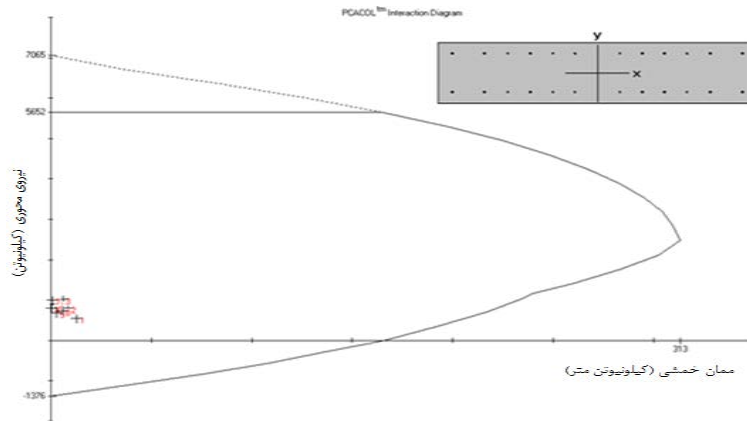
جدول ۹ ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی سبلان در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل  $1/5$  برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
۱	تاق	۷/۱۷
۲	$1/4$ قوس فوقانی چپ	۷/۰۶
۳	چپ	۵/۶۵
۴	$1/4$ قوس تحتانی چپ	۶/۸۹
۵	کف	۸/۳۱
۶	$1/4$ قوس تحتانی راست	۶/۱۴
۷	راست	۵/۶۵
۸	$1/4$ قوس فوقانی راست	۷/۴۳

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب کنترل پایداری بخش - ذکر شده متناسب با شماره ردیف هر قسمت، در نرم‌افزار های مختلف پوشش بتنی تونل سهند و سبلان را برای مقطع PCacol نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. کنترل پایداری استاتیک بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سه‌پند در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.



شکل ۱۲. کنترل پایداری استاتیک بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سبلان در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

تونل‌های سه‌پند و سبلان تحت اثر نیروهای برشی اعمال شده، پایدار خواهند ماند.

۲-۳. عبور تونل تکی با فاصله افقی ۱/۵ برابر قطر خود (۱۴/۲۵ متر) و افزایش عمق به اندازه ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو

نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش بتنی تونل-های سه‌پند و سبلان در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر خود (۱۴/۲۵ متر) و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر خود از مجاورت آن‌ها عبور می‌کند در جداول ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

به منظور کنترل نیروی برشی در مقطعی از بتن به ضخامت ۰/۳ m و عرض ۱/۴ m به‌همراه ۲۴ میلگرد طولی شماره ۱۴ با سطح مقطع کلی  $3696 \text{ mm}^2$  با استفاده از روابط (۱) تا (۳) داریم:

$$V_c = \frac{1}{6} \times \sqrt{27.5} \times 1400 \times 300 = 367 \text{ kN}$$

$$V_s = 0.34 \times 392.4 \times 3696 = 493 \text{ kN}$$

$$V_n = 367 + 493 = 860 \text{ kN}$$

با توجه به این‌که نیروهای برشی اعمال شده به بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل‌های سه‌پند و سبلان در حالتی که تونل تکی با عمق یکسان با تونل‌های مذکور حفاری می‌گردد کمتر از مقاومت برشی مقطع می‌باشد، می‌توان استنباط کرد که بر اساس روش تنش مجاز، پوشش

ارزیابی تأثیر عمق بر اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی

جدول ۱۰. نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی برشی (KN)
۱	تاق	۵۷۵	۲۳	۶
۲	۱/۴ قوس فوقانی چپ	۷۸۰	۱۵	۱۸
۳	چپ	۱۰۴۹	۱۸	۴
۴	۱/۴ قوس تحتانی چپ	۹۱۹	۲۶	۴۲
۵	کف	۷۱۰	۱۷	۳۳/۳۲
۶	۱/۴ قوس تحتانی راست	۸۲۰	۴۹/۲۷	۴۵
۷	راست	۱۰۹۰	۱۱	۱۱۸/۴
۸	۱/۴ قوس فوقانی راست	۸۴۰	۵۰	۴۱/۳۷

جدول ۱۱. نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل سبلان در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی برشی (KN)
۱	تاق	۵۴۰	۱۰	۱
۲	۱/۴ قوس فوقانی چپ	۷۴۰	۴/۵	۱۵
۳	چپ	۱۰۰۰	۸۳۰	۱۴
۴	۱/۴ قوس تحتانی چپ	۸۲۰	۳/۱۰	۳/۱
۵	کف	۶۸۰	۶/۸۲	۵
۶	۱/۴ قوس تحتانی راست	۸۶۰	۶/۵	۲۷/۱۹
۷	راست	۱۰۱۰	۴/۶۰	۶۴/۲۵
۸	۱/۴ قوس فوقانی راست	۷۷۰	۱۹	۱۳

ضرایب اطمینان به‌دست آمده برای بخش‌های مختلف و ۱۳ نشان داده شده است.

پوشش بتنی تونل‌های سهند و سبلان به ترتیب در جداول ۱۲

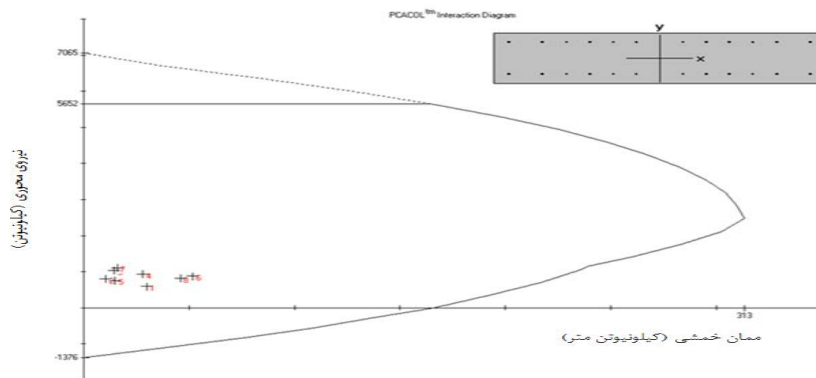
جدول ۱۲. ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی سهند در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
۱	تاق	۹/۱۱
۲	۱/۴ قوس فوقانی چپ	۷/۵۵
۳	چپ	۵/۴۰
۴	۱/۴ قوس تحتانی چپ	۶/۰۸
۵	کف	۸/۰۸
۶	۱/۴ قوس تحتانی راست	۴/۹۶
۷	راست	۵/۱۷
۸	۱/۴ قوس فوقانی راست	۴/۵۱

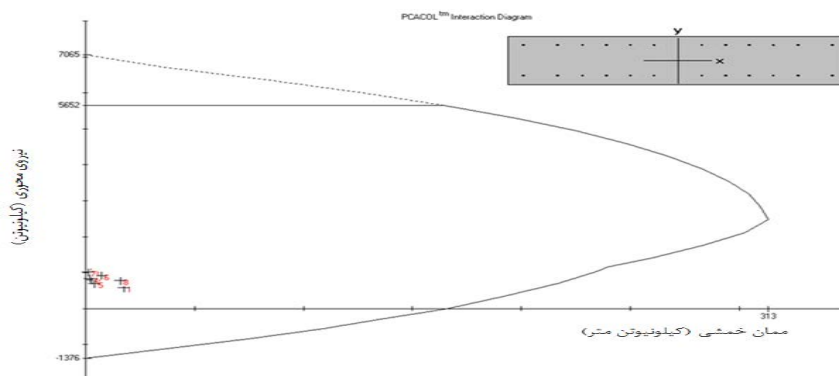
جدول ۱۳. ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی سبلان در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
۱	تاق	۸/۱۷
۲	۱/۴ قوس فوقانی چپ	۷/۸۶
۳	پاتاق چپ	۵/۶۵
۴	۱/۴ قوس تحتانی چپ	۶/۸۹
۵	کف	۸۳۱
۶	۱/۴ قوس تحتانی راست	۶/۵۷
۷	پاتاق راست	۵/۵۷
۸	۱/۴ قوس فوقانی راست	۷/۱۶

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب کنترل پایداری بخش - های مختلف پوشش بتنی تونل سهند و سبلان را برای مقطع ذکر شده متناسب با شماره ردیف هر قسمت، در نرم‌افزار PCACol نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. کنترل پایداری استاتیک بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.



شکل ۱۴. کنترل پایداری استاتیک بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سبلان در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

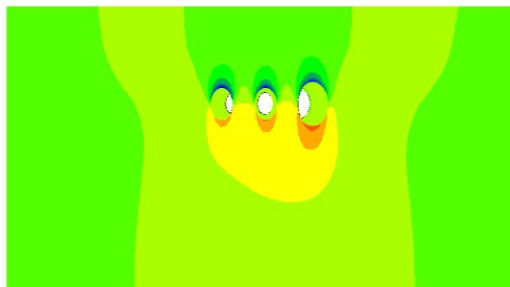
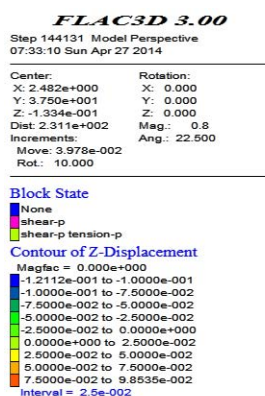


#### ۴. نشست سطح زمین و تأثیر آن بر سازه‌های

##### اطراف

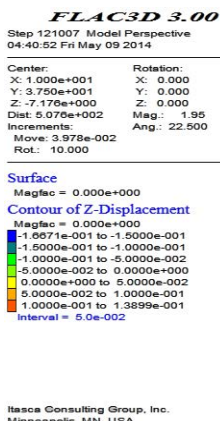
حرکات زمین نتیجه اجتناب‌ناپذیر حفاری و ساخت تونل می‌باشد. حفاری تونل باعث برهم خوردن تنش‌های برجا در زمین می‌شود، که فقط با نصب سیستم نگهداری در تونل می‌توان آن را محدود کرد. در حقیقت، ساخت همزمان یک حفره و ایجاد سیستم نگهداری صلب که کاملاً بر تونل منطبق باشد، امکان‌پذیر نیست. از این رو، مقدار مشخصی تغییرشکل 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 شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرشکل‌های قائم ایجاد شده در نتیجه حفاری تونل تکی با دو عمق مختلف از مجاورت تونل‌های دوقلو نشان داده شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از محاسبات انجام شده برای به‌دست آوردن مقاومت برشی بتن مسلح در بخش ۱-۳، می‌توان مشاهده کرد که نیروی برشی اعمال شده بر پوشش بتنی تونل‌های دوقلو در حالتی که تونل تکی با افزایش عمق نسبت به تونل‌های مذکور حفاری می‌گردد کمتر از مقاومت برشی مقطع می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل پوشش بتنی تونل‌های دوقلو نشان می‌دهد که تونل‌های مذکور در هر دو حالت حفاری تونل تکی در مقابل نیروهای محوری، برشی و ممان‌های خمشی پایدار می‌باشند. مقایسه ضرایب ایمنی به‌دست آمده برای تونل‌های دوقلو در حالت حفاری تونل تکی با عمق یکسان و همچنین افزایش عمق نشان می‌دهد که با افزایش عمق تونل تکی متوسط ضرایب ایمنی متوسط برای تونل سهند از ۶/۵۲ به ۶/۳۵ کاهش و برای تونل سبلان از ۶/۷۸ به ۷/۰۲ افزایش یافته است.



Itasca Consulting Group, Inc.  
Minneapolis, MN USA

شکل ۱۵. تغییرشکل‌های قائم ایجاد شده در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.



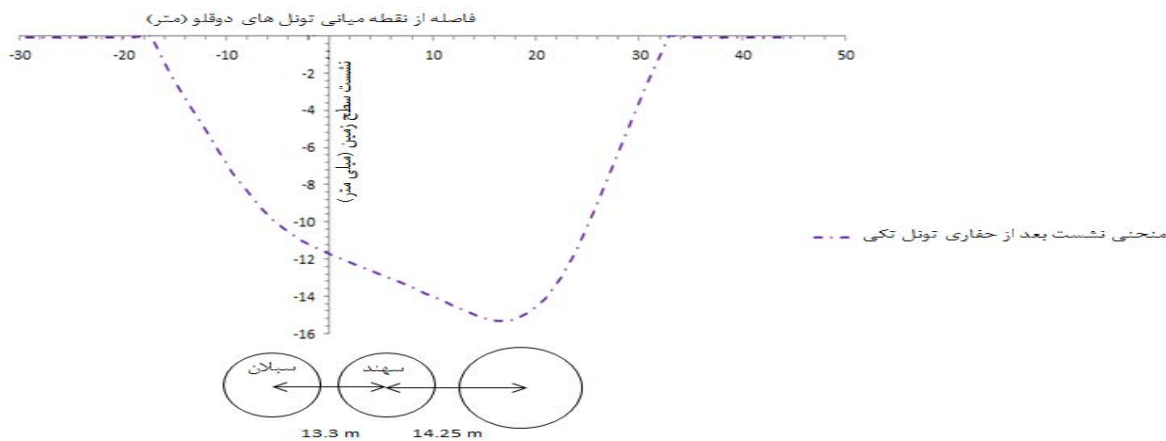
شکل ۱۶. تغییر شکل‌های قائم ایجاد شده در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

جدول ۱۴. تأثیر شیب منحنی نشست بر سازه‌های سطحی (معیار کرامر)

خسارتی ندارد	کمتر از ۱/۱۰۰۰
خسارت خیلی کم	بین ۱/۶۰۰ و ۱/۱۰۰۰
خسارت معماری کم	بین ۱/۴۰۰ و ۱/۶۰۰
خسارت معماری متوسط	بین ۱/۳۰۰ و ۱/۴۰۰

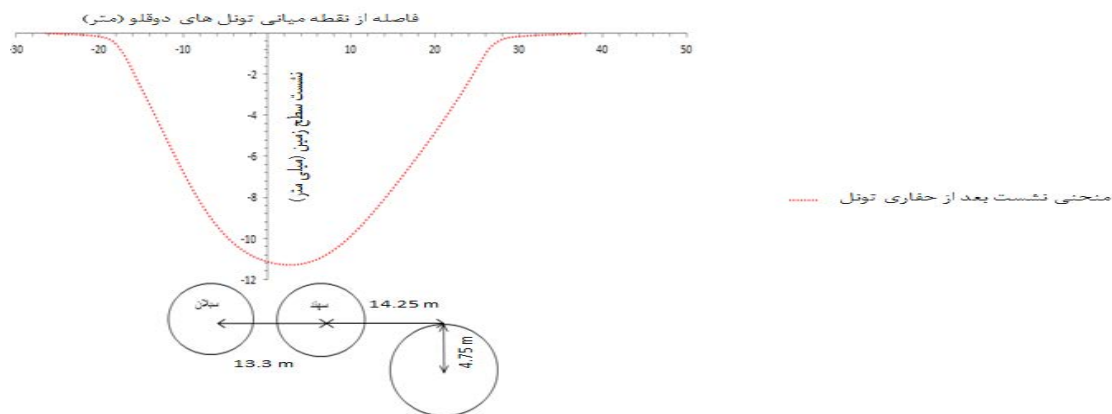
همچنین، منحنی‌های نشست به دست آمده در نتیجه حفاری تونل تکی با اعماق مختلف در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آورده شده است.

نشست سطح زمین می‌تواند تأثیر زیادی بر ساختمان‌ها و پل‌های اطراف داشته باشد. شیب منحنی نشست مهم‌ترین پارامتر در بررسی تأثیر نشست بر ساختمان‌ها و پل‌ها می‌باشد. از جمله معیارهای مشهور در بررسی این تأثیرات، معیار کرامر می‌باشد. طبق این معیار، بعد از محاسبه شیب منحنی نشست، می‌توان خطر آفرینی حفر تونل در منطقه مورد نظر را تعیین نمود (جدول ۱۴). با توجه به این معیار، حداکثر شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی چون پل ۱/۸۰۰ و برای سازه‌هایی چون ساختمان‌ها ۱/۹۰۰ می‌باشد (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۱۷. منحنی نشست سطح زمین در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

ارزیابی تأثیر عمق بر اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی



شکل ۱۸. منحنی نشست سطح زمین در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

### ۵. کنترل پایداری با روش کرنش مجاز

ساکورائی (۱۹۹۷) روشی را برای ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایش‌های فشاری تک محوره روی سنگ‌های مختلف تعریف می‌شود. این روش اغلب به عنوان روشی متداول برای محاسبه همگرایی (جابجایی نسبی دیواره‌های تونل) استفاده می‌شود که طی بررسی تونل‌های مختلف به دست آمده است. ساکورائی علاوه بر روابطی که بین مقاومت فشاری تک محوره و کرنش بحرانی برای توده‌سنگ‌های مختلف بیان کرده، روابط ۴، ۵ و ۶ را نیز بین مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی ارائه کرده است. همان طور که مشاهده می‌شود، معادلات (۴) و (۶) نشان‌دهنده حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی است. معادله (۵) نیز مقدار لگاریتمی متوسط معادلات (۴) و (۶) می‌باشد.

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

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

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

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (7)$$

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 (۷) کمتر باشد. با استفاده از جدول

با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ می‌توان مشاهده کرد که شیب منحنی نشست با افزایش عمق تونل تکی، نسبت به تونل‌های دوقلو، کاهش یافته و تأثیر آن بر سازه‌های سطحی کاهش می‌یابد. به طوری که در فاصل افقی معادل ۱/۵ برابر قطر تونل تکی (۹/۵ متر) و عمق یکسان با تونل‌های دوقلو، شیب منحنی نشست برابر با ۱/۷۵۰ می‌باشد و با افزایش عمق تونل تکی به اندازه ۰/۵ برابر قطر (۹/۵ متر) در فاصله افقی مشابه شیب منحنی نشست به ۱/۸۰۵ می‌رسد. با مراجعه به جدول ارائه شده توسط کرامر، در هر دو حالت، نشست سطح زمین با خسارت خیلی کم ارزیابی می‌شود. اما توجه به این نکته ضروریست که با افزایش عمق تونل تکی، هر دو فاکتور عمق و شیب منحنی نشست در جهت تأثیر کمتر بر سازه‌های سطح زمین تغییر کرده‌اند.

(۴) تراز هشدار خط I

(۵) تراز هشدار خطر II

(۶) تراز هشدار خطر III

که در این روابط  $\varepsilon_c$  کرنش بحرانی،  $E$  مدول الاستیسیته توده سنگ برحسب  $\text{Kgf/cm}^2$  می‌باشد. ساکورائی تراز هشدار II را به عنوان مبنا برای طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد نموده است. با محاسبه کرنش بحرانی از رابطه (۵)، جابجایی مجاز با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید:

حداکثر مقدار جابجایی در دیواره تونل تکی در دو عمق حفاری مختلف در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده و در جدول ۱۵ درج شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار جابجایی در سقف و کف تونل‌ها برای دو حالت حفاری هم عمق و افزایش عمق به ترتیب برابر با ۳۵ و ۳۴ میلی‌متر به دست آمده که از مقادیر بحرانی ۶۱ و ۶۰ میلی‌متر به دست آمده در بالا کمتر است.

۲ در عمق یکسان با تونل‌های دوقلو، مدول الاستیسیته در حدود ۳۵ مگاپاسکال می‌باشد. لذا:

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

و همچنین با توجه به رابطه (۷) و جایگذاری شعاع تونل (a=4.75m) خواهیم داشت:

$$u_c = 0.013 \times 4.75 = 0.061m$$

در حالت دوم و با افزایش عمق تونل تکی به اندازه ۱/۵ برابر قطر، تونل تکی در عمقی با مدول الاستیسیته ۵۰ مگاپاسکال قرار می‌گیرد که در این حالت:

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.22 \rightarrow \varepsilon_c = 0.012$$

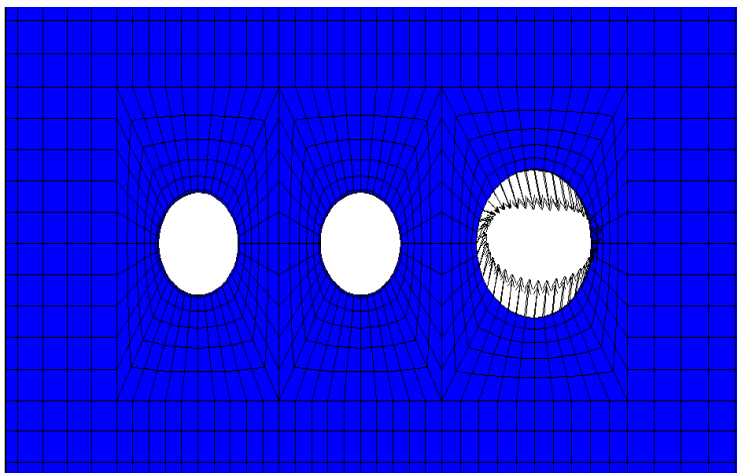
$$u_c = 0.012 \times 4.75 = 0.060m$$

**FLAC3D 3.00**  
Step 114414 Model Perspective  
23:37:16 Wed Jan 15 2014

Center:	Rotation:
X: 4.721e+000	X: 0.000
Y: 3.163e+001	Y: 0.000
Z: -3.442e-001	Z: 360.000
Dist: 2.311e+002	Mag.: 3.05
Increments:	Ang.: 22.500
Move: 3.978e-002	
Rot.: 10.000	

Surface  
Magfac = 0.000e+000

Displacement  
Maximum = 3.597e-002  
Linestyle



Itasca Consulting Group, Inc.  
Minneapolis, MN USA

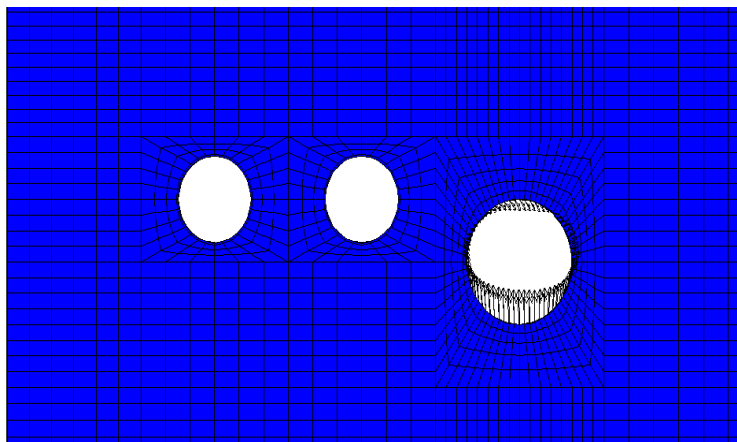
شکل ۱۹. بیشترین جابجایی ایجاد شده در دیواره تونل تکی در حالتی که با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

**FLAC3D 3.00**  
Step 90234 Model Perspective  
22:26:29 Sat May 10 2014

Center:	Rotation:
X: 4.891e+000	X: 0.000
Y: 3.750e+001	Y: 0.000
Z: -2.538e+000	Z: 0.000
Dist: 5.076e+002	Mag.: 5.96
Increments:	Ang.: 22.500
Move: 3.978e-002	
Rot.: 10.000	

Surface  
Magfac = 0.000e+000

Displacement  
Maximum = 3.407e-002  
Linestyle



Itasca Consulting Group, Inc.  
Minneapolis, MN USA

شکل ۲۰. بیشترین جابجایی ایجاد شده در دیواره تونل تکی در حالتی که با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۱/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.

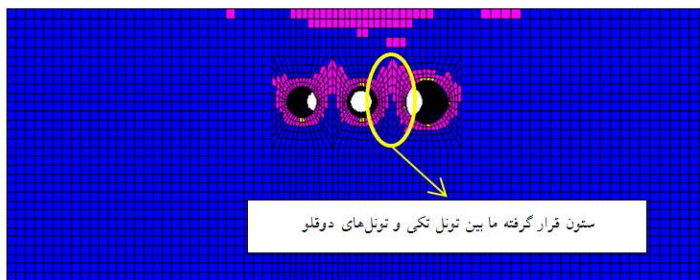
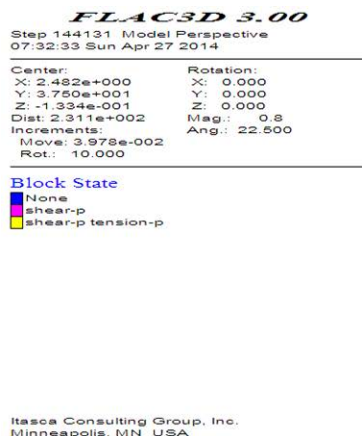
جدول ۱۵. حداکثر جابجایی‌های ایجاد شده در دیواره تونل‌های دوقلو

موقعیت حفاری تونل تکی	حداکثر جابجایی ایجاد شده در دیواره تونل‌های دوقلو (mm)
هم عمق با تونل‌های دوقلو	۳۵
افزایش عمق به اندازه ۰/۵ برابر قطر	۳۴

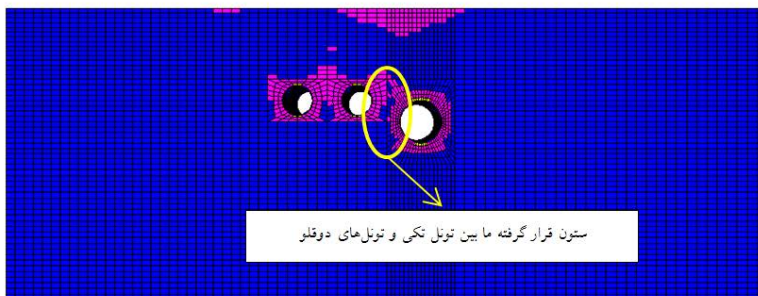
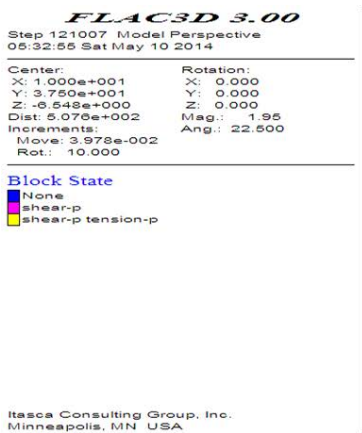
### ۶. پایداری ستون قرار گرفته بین تونل تکی و تونل سه‌پند

در این بخش، پایداری ستون قرار گرفته بین تونل تکی در حال حفاری و تونل‌های دوقلو در دو حالت ذکر شده بررسی می‌شود. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ پایداری ستون قرار گرفته بین تونل تکی و تونل سه‌پند، هنگامی که تونل تکی با دو عمق مختلف از مجاورت تونل‌های دوقلو عبور می‌کند، نشان داده است.

لذا تونل تکی در مرحله حفاری مشکل ناپایداری نخواهد داشت. همچنین، با توجه به شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که تغییر شکل سطح مقطع تونل تکی در حالتی که این تونل با افزایش عمق ۰/۵ برابر قطر حفاری شود کمتر از حالتی است که تونل تکی با عمق یکسان با تونل‌های دوقلو حفاری شود.



شکل ۲۱. نواحی پلاستیک ایجاد شده در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.



شکل ۲۲. نواحی پلاستیک ایجاد شده در حالتی که تونل تکی با فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و افزایش عمق معادل ۰/۵ برابر قطر نسبت به تونل‌های دوقلو حفاری شده است.



افزایش عمق حفاری تونل تکی به اندازه ۰/۵ برابر قطر خود در فاصله افقی یکسان، شیب منحنی نشست به ۱/۸۰۵ می‌رسد. لذا، با مراجعه به جدول ارائه شده توسط کرامر، حفاری تونل تکی در هر دو حالت با خسارت خیلی کم ارزیابی می‌شود. همچنین، منحنی‌های نشست حاکی از تضعیف تأثیر حفاری تونل تکی روی اغتشاش ایجاد شده در زمین ناشی از حفاری تونل‌های دوقلو، با افزایش عمق تونل تکی نسبت به تونل‌های دوقلو، می‌باشد.

جابجایی‌های ایجاد شده در دیواره تونل تکی در مرحله حفاری، در هر دو عمق بررسی شده کمتر از مقدار بحرانی است. در هر دو عمق بررسی شده، بردارهای جابجایی مربوط به دیواره تونل تکی در قسمتی از دیواره که نزدیک‌ترین فاصله را با دیواره تونل سهند دارا می‌باشند بیشترین تمایل را به سمت مخالف نشان می‌دهند. می‌توان مشاهده کرد که بردارهای جابجایی مربوط به دیواره تونل تکی در حالتی که این تونل در عمق یکسان با تونل‌های دوقلو قرار دارد، انحراف بیشتری را نشان می‌دهند که این مسئله نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تونل‌های دوقلو در این حالت است.

با توجه با دو حالت مختلف قرارگیری تونل تکی و نواحی پلاستیک شده مربوط به هر حالت، می‌توان ملاحظه نمود که نواحی پلاستیک ایجاد شده در ستون قرار گرفته بین تونل تکی و تونل سهند، هنگامی که تونل تکی با فاصله معادل ۱/۵ برابر قطر و عمق یکسان با تونل‌های دوقلو حفاری می‌گردد، کل پهنای ستون را شامل می‌شود. در حالی که با افزایش عمق تونل تکی در فاصله افقی یکسان، مناطق پلاستیک شده کمتری را در ستون ذکر شده شاهد هستیم. از طرف دیگر، نواحی پلاستیک شده در ستون مدنظر در حالت shear p قرار دارند. با مطالعات انجام شده و مراجعه به راهنمای نرم‌افزار FLAC 3D می‌توان فهمید که حالت پلاستیک-شدگی اخیر به حالتی اطلاق می‌گردد که در آن ستون دارای تغییرشکل‌هایی به صورت پلاستیک در خلال حفاری می‌باشد؛ اما مشکل پایداری کلی نخواهد داشت.

چنانچه مشاهده می‌شود، نواحی پلاستیک ایجاد شده در فاصله افقی معادل ۱/۵ برابر قطر و در عمق یکسان با تونل‌های دوقلو، کل پهنای ستون قرار گرفته بین تونل تکی و تونل سهند را شامل می‌شود. در حالی که با افزایش عمق تونل تکی در فاصله افقی یکسان، نواحی با تغییرشکل پلاستیک کمتری را در ستون ذکر شده شاهد هستیم. با توجه به شکل، نواحی پلاستیک شده در ستون مدنظر در حالت shear p قرار دارند. با مطالعات انجام شده و مراجعه به راهنمای نرم‌افزار FLAC 3D می‌توان دریافت که حالت پلاستیک‌شدگی اخیر به حالتی اطلاق می‌گردد که در آن ستون دارای تغییرشکل‌هایی به صورت پلاستیک در خلال حفاری می‌باشد، اما مشکل پایداری کلی نخواهد داشت (ایتاسکا، ۲۰۰۷).

#### ۷. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید.

بررسی‌های انجام شده حاکی از پایداری پوشش بتنی تونل‌های دوقلو در مقابل نیروها و ممان‌های اعمالی در نتیجه حفاری تونل تکی در هر دو عمق می‌باشند. با توجه به اینکه در مبحث تونل‌سازی در محیط‌های شهری، ضریب ایمنی ۱/۵ را غیر مجاز در نظر می‌گیرند، ملاحظه می‌گردد که پوشش بتنی تونل‌های دوقلو با حاشیه ایمنی بالایی پایدار می‌باشد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که ضریب ایمنی متوسط برای پوشش بتنی تونل سهند از ۶/۵۲ در حالت هم‌عمق به ۶/۳۵ با افزایش عمق تونل تکی کاهش و برای تونل سبلان از ۶/۷۸ در حالت هم‌عمق به ۷/۰۲ با افزایش عمق تونل تکی افزایش یافته است.

تحلیل‌های انجام شده روی منحنی نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونل تکی با دو عمق مختلف در فاصل افقی یکسان از مجاورت تونل‌های دوقلو نشان‌دهنده تغییر شیب منحنی نشست و تأثیر آن بر سازه‌های سطحی می‌باشد. به طوری که برای عمق یکسان با تونل‌های دوقلو، شیب منحنی نشست برابر با ۱/۷۵۰ می‌باشد. با

## ۸ مراجع

- سازمان قطار شهری تبریز. ۱۳۸۴. "گزارش نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی خط یک قطار شهری تبریز". شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی. ۱۳۸۴. "مطالعات مترو تبریز".
- شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت. ۱۳۸۹. "طراحی سازه شفت ایستگاه ۱۲ متروی تبریز". مستوفی نژاد، د. ۱۳۸۶. "سازه‌های بتن‌آرمه". نشر ارکان دانش، اصفهان.
- مهندسین مشاور ایمن سازان. ۱۳۸۹. "خدمات مهندسی پروژه تونل خط ۲ قطار شهری تبریز از ابتدای تونل تا ایستگاه G2". تبریز.
- مهندسین مشاور گنو. ۱۳۸۷. "گزارش مطالعات ژئوتکنیک خط یک قطار شهری تبریز". موسوی، م.، طالبی نژاد، ع. و چاکری، ح. ۱۳۸۸. "تحلیل پایداری و مدل‌سازی سه‌بعدی تونل و ایستگاه (مطالعه موردی خط ۴ مترو تهران)". هشتمین کنفرانس تونل دانشگاه تربیت مدرس، صفحات ۴۱۱-۴۲۲.
- Addenbrooke, T. and Potts, D. 2001. "Twin tunnel interaction: Surface and subsurface effects". The Int. J. Geomech., 249-271.
- Alamut Bridge and Building Engineering Co. 2006. "Design and calculation of concrete segments". Tabriz.
- Australian Standard. 2002. "Earth-retaining structures".
- Carranza-Torres, C. and Diederichs, M. 2009. "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 24(5): 506-532.
- Hage Chehade, F. and Shahrour, I. 2008. "Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 23(2): 210-214.
- Itasca. 2007. "3DEC (3-Dimensional Distinct Element Code)". Version 4.1, Minneapolis, USA.
- Kim, S. H. 1996. "Model testing and analysis of interactions between tunnels in clay". PhD Thesis, Departement of Engineering Science, University of Oxford.
- Lamrugh, A., Medina Rodriguez, L. and Castellanza, R. 2012. "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations". Comp. Geotech., 40: 97-113.
- Ng, C. W. W., Lee, K. M. and Tang, D. K. W. 2004. "Three-dimensional numerical investigations of New Austrian tunneling method (NATM) twin-tunnel interactions". Can. Geotech. J., 41: 523-539.
- Liu, H. Y., Small, J. C., Carter, J. P. and Williams, D. J. 2009. "Effect of tunneling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels". Comp. Geotech., 36(5): 880-894.
- Sakurai, S. 1997. "Lessons learned from field measurements in tunneling". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 12(4): 453-460.
- Terzaghi, H. 1942. "Liner-plate tunnels on the Chicago subway". Proc. ASCE, 68(6): 862-899.
- Ward, W. H. and Thomas, H. S. H. 1965. "The development of earth loading and deformation in tunnel linings in London clay". Building Research Station, Ministry of Technology, Garston, Watford, England.