

### تعیین فاصله بهینه تونل‌های متقاطع غیرهمسطح با استفاده از روش عددی مطالعه موردی: تقاطع متروی خط ۶ و ۷ تهران

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

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، گروه معدن، محلات، ایران

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، گروه معدن، محلات، ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۵/۰۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2017.4585.1274

واژگان کلیدی	چکیده
تونل‌های متقاطع مترو تهران بهینه‌سازی فاصله MIDAS GTS NX روش عددی	مهم‌ترین عامل تصمیم‌گیری در تونل‌های متقاطع غیرهمسطح، تعیین فاصله بهینه بین تونل‌ها می‌باشد. از نظر تئوری، هر چه فاصله تونل‌ها بیشتر باشد، مناسب‌تر است ولی از نظر بهره‌برداری، هر چه تونل‌ها به یکدیگر و به سطح زمین نزدیک‌تر باشند، تا زمانی که به سایر سازه‌های زیرسطحی آسیبی نرسانند، مناسب‌تر است. این تحقیق با هدف تعیین فاصله بهینه تونل‌های متقاطع انجام شده است و در آن از تحلیل‌های عددی سه‌بعدی توسط نرم‌افزار المان محدود GTS NX کمک گرفته شده است. در این تحقیق به کمک اطلاعات حاصل از محل تقاطع تونل‌های خطوط ۶ و ۷ متروی تهران دو سناریو اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی اول تونل عمیق به سمت تونل کم عمق و در سناریو دوم تونل کم عمق به سمت تونل عمیق جابجا شد. در هر سناریو مدل‌های عددی که در هر یک از آن‌ها تونل‌ها نسبت به حالت قبل ۴۰ سانتیمتر تغییر وضعیت داده بودند، مورد بررسی قرار گرفت و نزدیک کردن تونل‌ها تا آنجا ادامه پیدا کرد که نشست سطح زمین یا کرنش‌های بوجود آمده در مدل از حد مجاز تجاوز ننموده و پوشش بتنی با مشخصات موجود پاسخگوی تنش‌های وارده باشد. نتایج نشان می‌دهد سناریوی دوم گزینه مناسب‌تری بوده و در آن می‌توان فاصله تونل‌ها را تا ۸۰ سانتیمتر، بدون تغییر در سازه بتنی تونل‌ها، کاهش داد.

**۱- مقدمه**  
مقطع تونل‌ها، نحوه حفاری تونل‌ها، فاصله تونل‌ها تا سطح زمین، توالی حفر تونل‌ها و ... اشاره کرد. به منظور در نظر گرفتن کلیه عوامل تاثیرگذار، فرضیاتی انجام شده و از نرم‌افزار عددی المان محدود بهره گرفته شده است. با توجه به ماهیت سه‌بعدی مسئله، مدل‌سازی سه‌بعدی جهت بررسی انجام شده است. بررسی تقاطع تونل‌های متروی خط ۶ و ۷ تهران برای این تحقیق انتخاب شده است.  
به طور کلی تونل‌های متقاطع غیرهمسطح بر اساس زاویه تقاطع به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:  
الف- تونل‌های متقاطع غیرهمسطح با زاویه تقاطع صفر

احداث تونل در نزدیکی سازه‌های دیگر باعث تغییر میدان تنش در محدوده تونل‌ها خواهد شد. این تغییرات میدان تنش به موارد متفاوتی بستگی دارد. در احداث تونل‌های شهری به خصوص شبکه مترو، تونل‌ها باید از نزدیکی یکدیگر عبور کنند. بنابراین بررسی اندرکنش و تاثیرات تونل‌ها بر یکدیگر باید به دقت بررسی شود. عوامل بسیاری بر اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح تاثیرگذار می‌باشند. از جمله این عوامل می‌توان به جنس خاک دربر گیرنده تونل، ضخامت و مشخصات مقاومتی پوشش نهایی، فاصله بین تونل‌ها، سطح

\* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه سوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۳۰۰؛ دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۲۸۰؛ رایانامه: [jalalisme@shahroodut.ac.ir](mailto:jalalisme@shahroodut.ac.ir)

چن، چن و دای (Chen, Chen, & Dai, 2011) بررسی اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح را با استفاده از نرم-افزار عددی المان محدود ABAQUS بررسی کردند. لی‌یو، لی و لی‌یو (Liu, Li, & Liu, 2011) میزان بالآمدگی تونل موجود را در اثر حفر تونل جدید را به واسطه نرم‌افزار عددی تفاضل محدود بررسی کردند. لی و یوان (Li & Yuan, 2012) اندرکنش دو تونل دو قلوئی متقاطع غیرهمسطح را در شرایط زمین‌شناسی پیچیده، به کمک نرم-افزار عددی المان محدود بررسی کردند. اسکندری و گشتاسبی (Eskandari & Goshtasbi, 1392) تقاطع خطوط ۲، ۳ و ۴ متروی مشهد را بررسی کردند. رضی و شهریار (Razi & Shahriar, 1392) تقاطع خطوط متروی ۶ و ۷ تهران (در محل سابق) را با استفاده از نرم‌افزار عددی تفاضل محدود FLAC3D بررسی کردند. انجی، بونیاراک و ماسین (Ng, Boonyarak, & Mašin, 2013) بررسی اندرکنش تونل‌های متقاطع عمودی را به روش فیزیکی (گریز از مرکز سه بعدی) و عددی انجام دادند. ساحل و سپاسد (Sahel & Sepasad, 1393) تقاطع خطوط ۶ و ۷ متروی تهران را با نرم‌افزار FLAC3D مطالعه کردند. لی و همکاران (Li, Du, Ma, Yin, & Shen, 2014) اثر حفر سپری تونل جدید بر تونلی با قطر بزرگتر و به صورتی که از زیر آن عبور کند را مورد بررسی قرار دادند. دو، دیاس و ارست (Do, Dias, & Oreste, 2014) دو حالت متقاطع تونل‌ها را با زاویه صفر درجه کنار هم و روی هم مطالعه کردند. ژاو و همکاران (Gao, Liu, Zhang, & Aziz, 2014) مدل فیزیکی سه بعدی‌ای از وضعیت توده‌سنگ لابه‌ای خود ساختند. شری‌زاده و دهقان (Sherizadeh & Dehghan, 1395) در تحقیق خود به بررسی و تعیین مناسبترین توالی حفر در محدوده تقاطع تونل‌های متروی خط ۶ و ۷ پرداختند. همچنین این محققان صحت داده‌های ورودی نرم‌افزار را با داده‌های ابزار دقیق مقایسه کردند (Sherizadeh & Dehghan, 1395).

به منظور در نظر گرفتن توالی حفر تحقیقی انجام شده که نتیجه آن در اینجا به مدل اعمال شده است. مطابق تحقیق انجام شده توسط شری‌زاده و دهقان (Sherizadeh & Dehghan, 1395)، بهترین توالی حفر در این تقاطع، حفر تونل کم عمق به فاصله حداقل ۱۰D زودتر

درجه (کنار هم). این تونل‌ها به نام تونل‌های متقاطع دوقلو شناخته می‌شوند.

ب- تونل‌های متقاطع با زاویه تقاطع صفر درجه (روی هم). این حالت نامناسبترین حالت قرارگیری تونل‌های متقاطع می‌باشد.

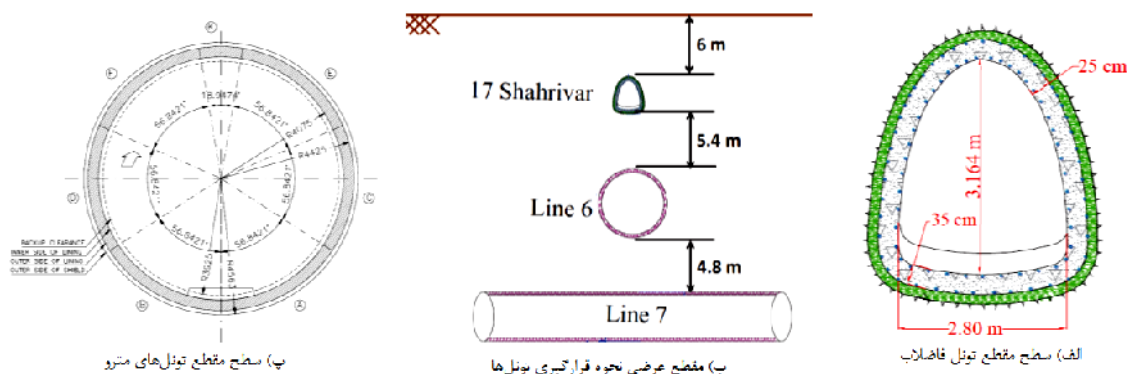
پ- تونل‌های متقاطع با هر زاویه‌ای غیر از صفر درجه. به دلیل عوامل زیاد تاثیرگذار بر اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح، طراحی این تونل‌ها مشکل و اجرای آنها پرخطر می‌باشد. قرارگیری این تونل‌ها در محیط‌های شهری حساسیت امر را نیز دوچندان می‌کند و لازم است تا قبل از حفاری این تونل‌ها، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شود. اولین مطالعات انجام شده در زمینه تونل‌های متقاطع از سال ۱۹۹۶ آغاز شدند که در ادامه مهمترین تحقیقات انجام شده از سال ۱۹۹۶ تا کنون، در ارتباط با تونل‌های متقاطع غیرهمسطح با زاویه غیر صفر آورده شده است.

اولین مطالعه در زمینه تونل‌های متقاطع غیرهمسطح توسط کیم (Kim, 1996) انجام شد. این محقق جهت بررسی اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح، مدل فیزیکی‌ای ساخت و نتایج خود را با مدل‌های عددی مقایسه کرد. پاند، سو و واکر (Pound, Hsu, & Walker, 2003) با داشتن داده‌های حاصل از مانیتورینگ، مدلی عددی ساخته و نتایج خود را با نتایج مانیتورینگ مقایسه کردند. آسانو و همکاران (Asano, Ishihara, Kiyota, Kurosawa, & Ebisu, 2003) با ساخت مدلی عددی اندرکنش بین دو تونل متقاطع را بررسی کردند. لی‌یو، اسمال و کارتر (Liu, Small, & Carter, 2008) مدل‌های عددی‌ای با استفاده از نرم-افزارهای عددی ABAQUS و TUNNEL 3D انجام دادند. اینگژوان و همکاران (Yingxuan, Weining, Xiaojing, Weifeng, & Hougui, 2008) برای نخستین بار آنالیز دینامیکی تونل‌های متقاطع را بررسی کردند. اما اولین محققین ایرانی که به بررسی تونل‌های متقاطع غیرهمسطح پرداختند توحیدی و صدقیانی (Tohidi & Sadaghiani, 1389) بودند. این محققین سعی کردند کلیه عوامل موثر بر اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح را بررسی کنند. بدین ترتیب آنها تاثیر جنس خاک، نوع حفاری، شکل مقطع، توالی ساخت، طول دهانه پوشش داده نشده، سختی محوری و خمشی، فاصله بین دو تونل و زاویه تقاطع را بررسی کردند.

از تونل عمیق است. در هیچ یک از مطالعات انجام شده (به غیر از توحیدی و صدقیانی (Tohidi & Sadaghiani, 1389)) بهینه‌سازی فاصله تونل‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. در کلیه مطالعات فاصله تونل‌ها ثابت فرض شده و در بیشتر موارد بررسی‌ها بر تاثیر احداث تونل جدید روی پوشش نهایی تونل قدیمی انجام شده است. مطابق تحقیق انجام شده توسط شری‌زاده و دهقان (Sherizadeh & Dehghan, 1395) مناسب‌ترین توالی حفر تونل‌ها در این تقاطع، حفر تونل کم عمق به فاصله حداقل ۱۰D زودتر از تونل عمیق می‌باشد. در این تحقیق برای در نظر گرفتن توالی حفر از نتایج این تحقیق استفاده شده است.

شبکه مترو است که ۳۱ کیلومتر طول خواهد داشت. خط هفت متروی تهران از خطوط شرقی-غربی شبکه مترو است که ۲۷ کیلومتر طول خواهد داشت. این خط عمیق‌ترین خط متروی تهران است. در محل تقاطع خط ۶ و ۷ متروی تهران، تونل دیگری موسوم به تونل فاضلاب ۱۷ شهریور در بالای تونل خط ۶ قرار دارد. فاصله تونل‌ها از یکدیگر و از سطح زمین در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد و سطح مقطع تونل فاضلاب در شکل ۱ نشان داده شده است. هر دو تونل مترو توسط دستگاه حفر تمام مقطع TBM-EPB حفاری می‌شوند. قطر تونل‌های خط ۶ و ۷ به ترتیب برابر ۹،۱۹ و ۹،۱۶ بوده که در مدل هر دو برابر ۹،۱۶ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد و سطح مقطع مترو در نظر گرفته شده در مدلسازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲- تقاطع متروی خط ۶ و ۷ تهران  
خط شش متروی تهران از خطوط شمالی-جنوبی



شکل ۱- عمق و نحوه قرارگیری تونل‌ها نسبت به هم (Sahel & Sepasad, 1393)

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی خاک در محل تقاطع (Sahel & Sepasad, 1393)

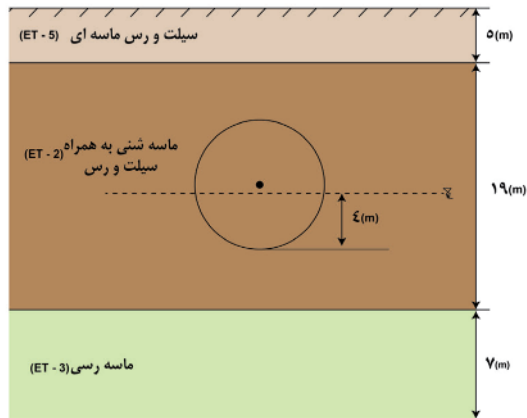
ET-5	ET-3	موهر-کولمب	مدل رفتاری
۳۵	۵۰	۷۵	$E (MPa)$
۰،۳۵	۰،۳۲	۰،۳	$\nu$
۱،۷۰	۱،۹۰	۱،۸۴	$\gamma (kN/m^3)$
۳۰	۲۹	۱۵	$C (kN/m^2)$
۲۸	۳۳	۳۳	$\phi$
۰،۵۳	۰،۴۵۵	۰،۴۵۵	$K_0$

## ۱-۲- زمین‌شناسی محدوده تقاطع

به طور کلی دانه‌بندی خاک تهران (در مسیر مترو خط ۷) از شرق به غرب کوچک‌تر می‌شود. به عبارتی ساده‌تر خاک‌های غرب تهران (در مسیر مترو خط ۷) دارای مشخصات مکانیکی پایین و خصوصیات پلاستیک بالا می‌باشند. خاک‌های این مسیر به شش دسته کلی (ET-1 تا ET-6) تقسیم شده‌اند. خاک محل تقاطع به طور عمده از جنس ET-2 تشکیل شده است. خصوصیات مکانیکی این خاک در جدول ۱ آورده شده است.

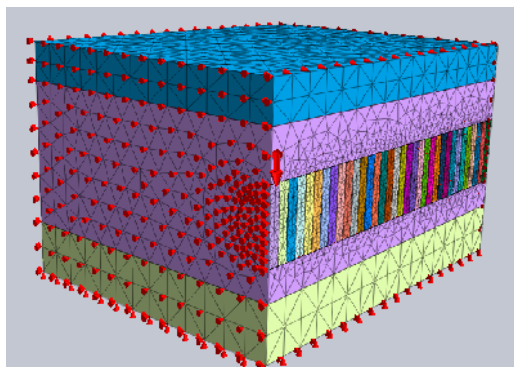
تعیین فاصله بهینه تونل‌های متقاطع غیرهمسطح با استفاده از روش عددی - مطالعه موردی: تقاطع متروی ... ص ۱۵-۱

این مقطع تونل با فشار جبهه کار ۶۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۱۰ کیلوپاسکال حفر شده است (Heydari Sheibani, Zare, Mirzaei NasirAbad, & Forooghi, 1391)



شکل ۳- شرایط زمین‌شناسی و موقعیت تونل در کیلومتر ۱۰+۵۰۰ (Heydari Sheibani, Zare, Mirzaei NasirAbad, & Forooghi, 1391)

لایه‌بندی مدل مطابق مقطع نشان داده شده در شکل ۴ انجام گرفته است. خصوصیات خاک، پوشش بتنی و سپر فولادی و همچنین نوع المان‌های استفاده شده برای خاک، پوشش بتنی و سپر فولادی مطابق جدول ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است. مدل ساخته شده شامل ۳۰۰۱۶ المان و ۶۰۵۳ گره می‌باشد. با توجه به متقارن بودن تونل فقط نصف تونل مدل شده است. شرایط مرزی به نحوی است که جهت عمود بر هر سطح مرزها بسته شده است.

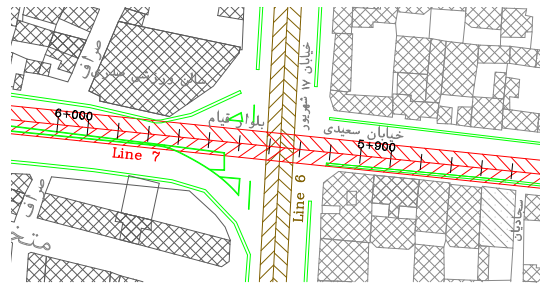


شکل ۴- هندسه ساخته شده، نیروی گرانش و شرایط مرزی (Sherizadeh & Dehghan, 1395)

## ۲-۲- موقعیت سازه‌های سطحی

در محل تقاطع خیابان‌های ۱۷ شهرپور با خیابان سعیدی و بلوار قیام، در چهار گوشه این تقاطع ساختمان‌هایی به شرح زیر وجود دارد (شکل ۲):

- الف- ساختمان یک طبقه: واقع در ضلع شمال غربی تقاطع
- ب- ساختمان سه طبقه: واقع در ضلع جنوب غربی تقاطع
- پ- ساختمان‌های دو طبقه: واقع در ضلع جنوب شرقی تقاطع
- ت- ساختمان یک طبقه: واقع در ضلع شمال شرقی تقاطع



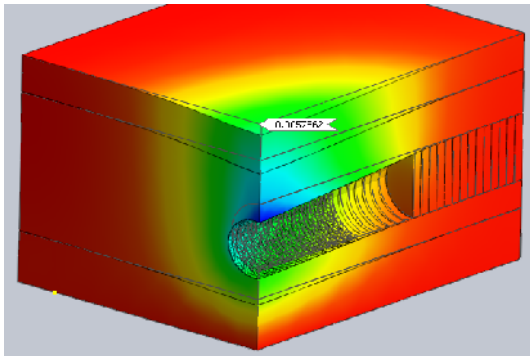
شکل ۲- پلان تقاطع خط ۶ و ۷ مترو به همراه جهت پیشروی تونل‌ها (Sahel & Sepasad, 1393)

## ۳- بررسی صحت داده‌های ورودی

مهم‌ترین مساله پیش از انجام مدل‌سازی سه‌بعدی و انجام آنالیز عددی، بررسی صحت پارامترهای ورودی به نرم‌افزار می‌باشد. جهت بررسی صحت پارامترهای ورودی به نرم‌افزار مقطع کیلومتر ۱۰+۵۰۰ (که البته با تقاطع مورد بررسی کمی فاصله دارد) انتخاب شده است. از آنجایی که در این مقطع داده‌های اپراتوری دستگاه با داده‌های طراحی شده همخوانی داشته و دارای قرائت ابزار دقیق نیز می‌باشد، مناسبترین مقطع برای سنجش صحت پارامترهای ورودی مدل‌سازی می‌باشد.

جنس و لایه‌بندی خاک در مقطع ۱۰+۵۰۰ در شکل ۳ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی عددی این مقطع، نقطه‌ای در سطح زمین به فاصله ۳۰ متری از جبهه کار برای پایش نشست سطح زمین انتخاب شده است. جابجایی قرائت شده توسط ابزار دقیق در این محل برابر ۵/۵ میلی‌متر است. در

۳۴ گام از پیشروی دستگاه حفار با شرایط ذکر شده مدل شده است. در شکل ۶ میزان نشست سطح زمین ناشی از تونل‌سازی در فاصله ۳۰ متری از سینه‌کار نشان داده شده است.



شکل ۶- جابجایی قائم در فاصله ۳۰ متری از سینه کار (میزان تغییر شکل بزرگنمایی شده است) (Sherizadeh & Dehghan, 1395)

مطابق شکل ۶ بیشینه نشست سطح زمین پس از ۳۰ متر پیشروی (۲۰ گام ۱٫۵ متری) برابر ۵٫۸ میلی‌متر می‌باشد. این نتایج با اندازه‌گیری‌های انجام شده از ابزار دقیق نصب شده بر روی سطح زمین مقایسه شده است. میزان نشست سطح زمین توسط ابزار دقیق برابر ۵٫۵ میلی‌متر قرائت شده است. بنابراین درصد خطای ناشی از مدلسازی و ابزار دقیق برابر ۵٫۴٪ خواهد بود.

#### ۴- مدلسازی عددی

ساخت مدل عددی در تمامی نرم‌افزارها تقریباً روند یکسانی دارد. ابتدا ژئومتری ترسیم می‌شود. سپس خصوصیات مواد تعریف، و هندسه مدل مش‌بندی می‌شود. سپس شرایط مرزی تعیین خواهد شد. در ادامه نرم‌افزار استفاده شده معرفی و فرضیات بکار رفته شرح داده شده است. سپس نحوه انجام مدلسازی توضیح داده شده است.

#### ۴-۱- معرفی نرم‌افزار GTS NX

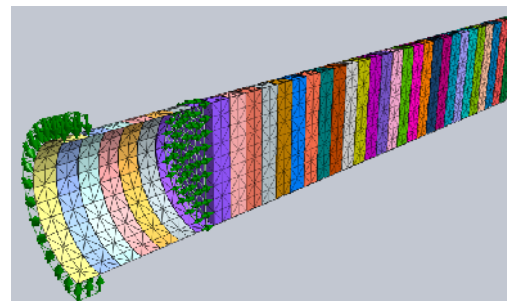
نرم‌افزار *GTS NX* یک نرم‌افزار المان محدود ژئوتکنیکی است که توانایی حل مسائل در دو و سه بعد را داراست. نرم‌افزار دارای محیطی کاربرپسند بوده و برای ساخت و مش‌بندی پیچیده‌ترین هندسه‌ها مناسب است. این نرم‌افزار به دلیل در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری متنوع، توانایی حل مدل به

جدول ۲- خصوصیات بتن و سپر فولادی (Sahel & Sepasad, 1393)

سپر فولادی	پوشش نهایی	مدل رفتاری
الاستیک	الاستیک	$E(MPa)$
۲۰۰,۰۰۰	۲۰,۰۰۰	$\nu$
۰٫۳	۰٫۲	$\gamma(kN/m^2)$
۷۸٫۴	۲۵	

مرحله اول آنالیز مربوطه به توزیع تنش‌ها می‌باشد. پس از اولین مرحله پروسه حفاری با توجه به بارهای اعمالی به شکل ۵ خواهد بود:

- (۱) ابتدا فشار به سینه کار تونل اعمال می‌شود.
- (۲) سپس ۱٫۵ متر از سینه‌کار (برابر عرض پوشش بتنی) حفاری می‌شود.
- (۳) همزمان سپر فولادی به عنوان نگهداری دیوارها مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- (۴) سه مرحله اول تا ۱۰٫۵ متر (۷ گام پیشروی ۱٫۵ متری، برابر طول سپر فولادی) ادامه پیدا می‌کند.
- (۵) سپس به جای سپر فولادی پوشش بتنی به عنوان نگهداری دیوارهای تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- (۶) فشاری به سطح خارجی پوشش بتنی اعمال می‌شود. این فشار نشان‌دهنده فشار تزریق دوغاب می‌باشد.
- (۷) مراحل یک تا شش تا پایان حفاری تونل ادامه پیدا می‌کند.
- (۸) کلیه مراحل فوق تا اتمام مدل ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۵- فشار اعمالی به سینه کار و پوشش تونل (Sherizadeh & Dehghan, 1395)

واقعی محل تقاطع) در نظر گرفته شده است.  
 ث- فشار حاصل از ترافیک ماشین‌آلات ۲۰ کیلوپاسکال و فشار حاصل از هر طبقه ساختمان نیز همان مقدار، بصورت گسترده و یکنواخت در نظر گرفته شده است.  
 خ- وزن دستگاه حفار (TBM-EPB) در مدل در نظر گرفته نشده است.

د- رفتار توده‌خاک الاستیک-پلاستیک غیرخطی (مطابق مدل رفتاری موهر-کولمب) در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۳- انتخاب ابعاد مدل

هوک و براون معتقدند اگر اندازه ابعاد مدل چهار برابر اندازه فضای زیرزمینی باشد، اثر شرایط مرزی بر روی توزیع تنش‌ها و کرنش‌های اطراف فضای زیرزمینی قابل نظر کردن است (Pang, Yong, & Dasari, 2005). دقت در انتخاب ابعاد مناسب علاوه بر کاهش زمان محاسبات، باعث افزایش دقت نتایج نیز خواهد شد. بدین ترتیب ابعاد مدل در دو جهت  $X$  و  $Y$  برابر ۱۸۳ متر (معادل ۱۲۲ گام پیشروی دستگاه) و عمق مدل در جهت  $Z$ ، ۹۰ متر در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۴- مش‌بندی

تاثیر ابعاد مش بر اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح قبلاً توسط محققین بررسی شده است. از آن جمله می‌توان به مطالعات لی‌یو، اسمال و کارتر (Liu, Small, & Carter, 2008) اشاره کرد. در این تحقیق، از انواع المان‌های سه‌بعدی که می‌توان برای مش‌بندی استفاده کرد، از مش‌های tetra (بصورت خطی و چهار گره‌ای) استفاده شده است. مدل ساخته شده از ۹۷۸۹۵ المان و ۱۴۷۴۶ گره تشکیل شده است (شکل ۷). به منظور مش‌بندی بهینه سعی شده در محدوده تونل‌ها از مش‌های با چگالی بیشتر (تعداد المان و گره بیشتر) استفاده شود. با فاصله گرفتن از تونل‌ها ابعاد مش‌ها بزرگ‌تر انتخاب شده است. این کار باعث می‌شود در نواحی‌ای که دقت تحلیل مهم است، به تعداد کافی المان و گره وجود داشته باشد و در نواحی‌ای که دقت تحلیل مورد نظر نمی‌باشد از تعداد المان‌ها کاسته شده که این امر باعث پایین آمدن هزینه محاسبات شده است.

روش‌های مختلفی را داراست از جمله مدل‌های رفتاری موجود در این نرم‌افزار می‌توان به الاستیک خطی (Linear elastic)، ایزوتروپیک الاستیک خطی (Isotropic linear elastic)، ایزوتروپیک عرضی (Transverse isotropic)، جاردین (Jardine)، دی-مین (D-min)، هایپربولیک (Hyperbolic)، ون‌میسس (Von mises)، ترسکا (Tresca)، موهر-کولمب (Mohr coulomb)، موهر-کولمب اصلاح شده (Modified mohr coulomb)، کم‌کلی اصلاح شده (Modified Cam Clay)، کرنش نرم‌شونده (Strain softening)، سنگ درزه‌دار (Jointed rock)، هوک و براون (Hoek and brown) و دراگر-پراگر (Drucker-prager) اشاره کرد. انواع تحلیل‌هایی که این نرم‌افزار قابلیت انجام آن را دارد، عبارتند از (GTS NX, 2014):

الف- خطی/غیرخطی به همراه آنالیز احداث مرحله‌ای

ب- نفوذ آب (آنالیز جریان گذرا)

پ- آنالیز همزمان یا آنالیز تحکیم

ت- آنالیز پایداری شیب (روش کاهش مقاومت

(SRM))

ث- آنالیز دینامیکی (آنالیز تاریخچه زمان خطی/

غیرخطی)

ج- آنالیزهای همزمان (تاریخچه زمان غیرخطی به

همراه SRM)

با توجه به توانایی‌های بسیار، این نرم‌افزار برای انجام تحلیل انتخاب شده است.

#### ۴-۲- فرضیات به کار رفته

مهمترین فرضیاتی که برای بررسی این تحقیق در نظر گرفته شده عبارت است از:

الف- جنس توده‌خاک دربرگیرنده مدل یکسان و مطابق با شرایط زمین‌شناسی واقعی محل تقاطع در نظر گرفته شده است.

ب- مطابق با شرایط واقعی محل تقاطع، حفر تونل‌ها در محیط خشک انجام می‌شود.

پ- هندسه تونل‌ها، عمق قرارگیری، ضخامت پوشش نهایی تونل‌ها براساس شرایط واقعی تونل‌های خطوط ۶ و ۷ متروی تهران در نظر گرفته شده است.

ت- زاویه تقاطع تونل‌ها، ۹۰ درجه (مطابق با شرایط



اختصاص یافته است. پس از اینکه مدل در هر مرحله به تعادل رسید، محاسبات مرحله بعد شروع می‌شود. دو شرط برای به تعادل رسیدن مدل در نظر گرفته شده است، نیروهای نامتعادل به مقدار  $0.001$  برسد یا کار انجام شده به  $0.000001$  برسد (GTSNX, 2015).

مدلسازی توالی حفاری و نصب پوشش بتنی تونل‌ها پیچیده است. همانطور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، شری‌زاده و دهقان (Sherizadeh & Dehghan, 1395) نشان دادند که برای تونل‌های متقاطع غیرهمسطح در محیط شهری بهترین حالت توالی حفر، حفر تونل کم عمق به فاصله حداقل  $10D$  زودتر از تونل عمیق می‌باشد. با توجه به این‌که در این مدلسازی توالی حفر تونل‌ها نیز باید رعایت شود، از این الگو، برای لحاظ نمودن توالی حفر استفاده شد که در ادامه فرایند مدلسازی مرحله‌ای شرح داده شده است:

الف- توزیع تنش در مدل انجام می‌گیرد.

ب- بارهای سطحی به مدل اعمال شده، تونل فاضلاب (با توجه به اینکه در حال بهره‌برداری می‌باشد) به صورت حفر شده در نظر گرفته می‌شود.

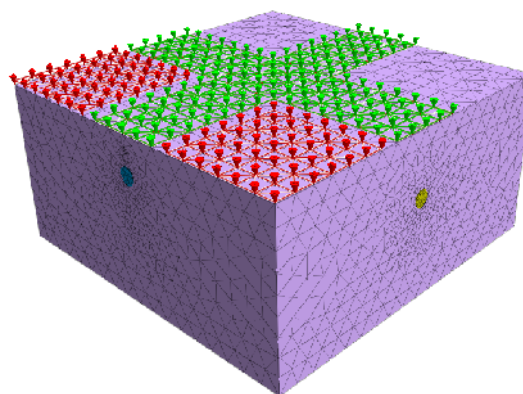
پ- فشار  $133$  کیلوپاسکال، به عنوان فشار بنتونیت به سینه کار اعمال شده است.

ت-  $1.5$  متر از جبهه کار معادل عرض پوشش بتنی حفر می‌شود. همزمان المان پوسته با خصوصیات فولاد به عنوان سپر فولادی، جهت نگهداری جداره تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ث- دو مرحله قبل به اندازه طول سپر فولادی،  $10.5$  متر (معادل  $7$  گام پیشروی)، تکرار می‌شود.

ج- سپس آخرین المان پوسته با مشخصات سپر فولادی به پوسته با مشخصات پوشش بتنی تغییر داده می‌شود. فشاری معادل  $233$  کیلوپاسکال به سطح خارجی پوسته اعمال می‌شود. این فشار نشان‌دهنده فشار تزریق دوغاب است.

چ- مراحل پ تا ج تا طول  $10D$  برای تونل کم عمق (متروی خط ۶) انجام می‌شود. سپس همین مراحل برای تونل عمیق (متروی خط ۷) شروع شده و این مراحل تا حفر کامل هر دو تونل ( $122$  مرحله برای هر تونل) همزمان ادامه خواهد داشت.



شکل ۷- مدل سه‌بعدی ساخته شده به همراه بارگذاری سطحی (قرمز رنگ ساختمان‌ها و رنگ سبز مربوط به خیابان است) (Sherizadeh & Dehghan, 1394)

#### ۴-۵- خصوصیات مواد

سگمنت‌های بتن مسلح پوشش نهایی، بصورت یک رینگ کامل با ضخامت  $35$  سانتیمتر و عرض  $1.5$  متر در نظر گرفته شده است. سپر فولادی نیز به ضخامت  $10$  سانتیمتر و طول  $10.5$  متر در مدل در نظر گرفته شده است. خصوصیات انتخاب شده برای این مواد در جدول ۲ آمده است.

#### ۴-۶- شرایط مرزی و بارهای خارجی

با توجه به این‌که تنش‌ها و جابجایی‌ها متأثر از مرزهای مدل نمی‌باشند، مرزها در جهت عمود بر هر صفحه گیردار شده‌اند. البته کف مدل در سه جهت گیردار شده است. بنابراین به صورت سطحی صلب عمل خواهد کرد. در سطح زمین بار ترافیک ناشی از عبور وسایل نقلیه، بصورت گسترده و معادل  $20 \text{ kN/m}^2$  به مدل اعمال شده است. با توجه به وجود ساختمان‌ها در اطراف تقاطع که در بند ۲-۲ شرح داده شد، به ازای هر طبقه ساختمان  $20 \text{ kN/m}^2$  به مدل اعمال شده است (شکل ۷).

#### ۴-۷- ساخت مدل، فرایند حفاری و در نظر گرفتن

##### توالی حفر

تونل‌های مترو و تونل فاضلاب مطابق ابعاد گفته شده و با خصوصیات فیزیکی-مکانیکی یاد شده، ساخته شد. فاصله تونل‌ها با توجه به شکل ۱ و ۲ جانمایی شده است. روش حل مسئله از نوع آنالیز غیرخطی استاتیک به همراه احداث مرحله‌ای می‌باشد. اولین مرحله محاسبات به توزیع تنش

## ۵- بهینه‌سازی فاصله تونل‌ها

می‌توان گفت مهم‌ترین عامل در اندرکنش تونل‌های متقاطع غیرهمسطح، فاصله بین تونل‌ها است. بدیهی است در همه پروژه‌ها تمایل به نزدیک کردن تونل‌ها به سطح زمین و یکدیگر است. ولی در همه پروژه‌ها محدودیت‌هایی وجود دارد که باید مد نظر قرار گیرد. در محل تقاطع تونلی بین خطوط مترو احداث می‌شود که در صورت ضرورت بتوان از لوکوموتیوهای سایر خطوط کمک گرفت. حداکثر شیب این تونل اضطراری محدود به توان لوکوموتیوها می‌باشد. واضح است هرچه فاصله بین این دو تونل کمتر باشد شیب این تونل کمتر خواهد بود. همچنین حداکثر شیب مجاز تونل‌های مترو ۳۰ در هزار می‌باشد. وجود ابنیه‌های زیرسطحی و برخی محدودیت‌های سطحی نیز در همه پروژه‌ها وجود دارد.

با توجه به اینکه در تقاطع مورد بررسی، تونل فاضلاب، در بالای دو تونل مترو، عامل محدود کننده می‌باشد، نمی‌توان تونل‌ها را بیش از این به سطح زمین نزدیک کرد. بنابراین در این تحقیق به منظور کاهش فاصله بین تونل‌ها از دو سناریو کمک گرفته شده است. در سناریو اول تونل عمیق به سمت تونل کم عمق نزدیک شده است. در سناریو دوم تونل کم عمق به سمت تونل عمیق جابجا شده است.

جهت کاهش فاصله تونل‌ها هر گام کاهشی برابر ۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. بنابراین در هر سناریو تونل‌ها به اندازه ۴۰ سانتیمتر به هم نزدیک شده و پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که مطابق معیارهای مورد بررسی بتوان تونل‌ها را به هم نزدیک کرد، باز هم تونل‌ها به اندازه ۴۰ سانتیمتر نزدیک می‌شوند. بدین ترتیب کمترین فاصله‌ای که تونل‌ها می‌توانند داشته باشند، بدست خواهد آمد.

معیارهای مختلفی که برای تعیین حداقل فاصله بین تونل‌ها مد نظر گرفته شده است، عبارتند از:

الف- نشست سطح زمین از حد مجاز بیشتر نشود.

ب- کرنش‌های بوجود آمده در مدل از حد کرنش‌های مجاز کمتر باشد.

پ- پوشش بتنی با مقطع و مشخصات موجود پاسخگوی تنش‌های وارده باشد.

در سناریوهای مختلف تلاش شد تا با بررسی نشست حداکثر سطح زمین، جابجایی کل رخ داده در مدل، جابجایی

سقف و کف تونل‌ها، میزان نیروی محوری، ممان خمشی و نیروی برشی القا شده به پوشش نهایی تونل‌ها و مقایسه آنها با معیارهای ذکر شده، کمترین فاصله‌ای که تونل‌ها می‌توانند از یکدیگر داشته باشند، تعیین شود.

توضیح این که :

حداکثر نشست مجاز سطح زمین برابر ۲٫۵۴ سانتیمتر، مطابق اعلام کارفرما، در نظر گرفته شده است (Sahel & Sepasad, 1393).

برای محاسبه کرنش مجاز از معیار ساکورایی استفاده شده است. بر اساس نظر ایشان کرنش بحرانی همیشه کمتر از کرنش در شکست است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Sakurai, 1997):

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (1)$$

بر اساس مقادیر کرنش مجاز ایشان سه رده اعلام خط به شرح زیر را معرفی نمود. رده اعلام خطر I و III به ترتیب برای پایداری درازمدت و کوتاه‌مدت تونل مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساکورایی پیشنهاد نموده است که برای طراحی تونل‌ها از رده اعلام خطر II استفاده شود (Sakurai, 1997).

$$(I): \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (2)$$

$$(II): \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (3)$$

$$(III): \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (4)$$

در این روابط  $\sigma_c$  و  $E$  بر حسب  $Kg/cm^2$  به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ توده‌خاک و  $\varepsilon_c$  کرنش بحرانی می‌باشد.

با معلوم بودن مقدار کرنش مجاز، مقدار حداکثر جابجایی مجاز در تونل‌ها با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می‌شود (Hosseinitoudeshki, 2013):

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (5)$$

که در آن  $u_c$ ، جابجایی مجاز بر اساس رده‌های اعلام خطر، و  $a$  شعاع تونل می‌باشد.

پوشش بتنی تونل نیز شامل بتن مسلح به ضخامت ۳۵ سانتیمتر و عیار  $(Kg/cm^3)$  ۲۵۰ سیمان با آرماتورهای  $\Phi 12 @ 100$  در بالا و پایین می‌باشد.



از ۱٫۶ متر باشد.

تا زمانی که فاصله تونل‌ها از میزان مشخصی کمتر نشده، میزان نشست سطح زمین و جابجایی کلی مدل تقریباً ثابت و بدون تغییر می‌باشد. همچنین هیچ رابطه مشخصی بین میزان جابجایی کلی رخ داده در مدل و میزان نشست سطح زمین مشاهده نمی‌شود.

#### ۵-۱-۲- جابجایی سقف و کف تونل‌ها

برای هر گزینه بیشینه جابجایی سقف و کف تونل‌ها، در شکل ۸ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۸، سقف و کف تونل فاضلاب به طور میانگین حدود ۰٫۸ سانتیمتر به سمت پایین جابجا خواهد شد. ولی تغییر شکل تونل‌های مترو به شکل دیگری است. به ترتیب سقف تونل کم عمق و عمیق به طور میانگین میزان ۱٫۲۶۴۳ و ۱٫۷۸۵۹ سانتیمتر به سمت پایین جابجا می‌شوند. به ترتیب کف تونل کم عمق و عمیق به طور میانگین به میزان ۲٫۰۴۸ و ۲٫۶۶۶۱ سانتیمتر به سمت بالا جابجا می‌شوند.

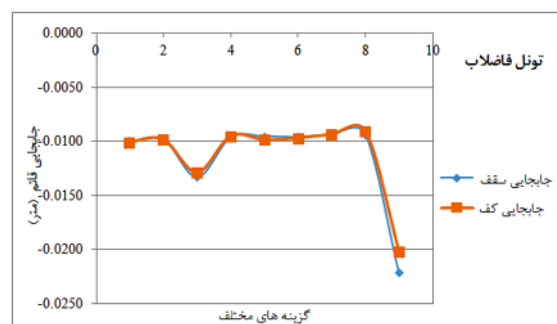
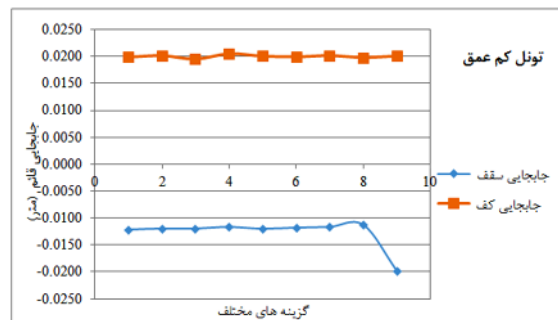
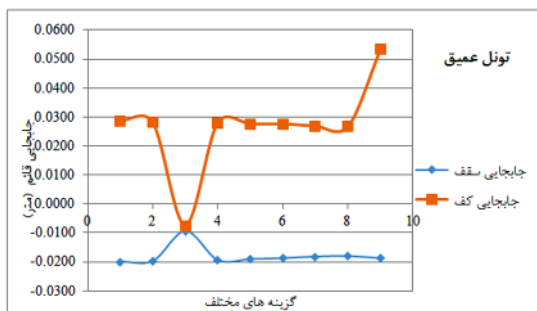
با توجه به موارد ذکر شده و در نظر گرفتن خصوصیات توده‌خاک در محدوده مورد بررسی و شعاع تونل‌های مورد نظر، کرنش بحرانی برابر ۰٫۱۱۵ و حداکثر جابجایی مجاز در مدل برابر ۵٫۳ سانتیمتر تعیین شد. در ادامه فرآیند مدلسازی در هر سناریو و نتایج حاصل به تفکیک ارائه شده است.

#### ۵-۱-۱- بررسی سناریو شماره یک

۵-۱-۱-۱- بیشینه نشست سطح زمین و جابجایی کل رخ داده در مدل

در هر گزینه بیشینه نشست سطح زمین (که در محل تقاطع رخ داده) و بیشینه جابجایی کل رخ داده در مدل، در جدول ۳ نشان داده شده است.

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود بیشترین میزان نشست سطح زمین و جابجایی کلی مدل در این سناریو در گزینه آخر از میزان مجاز بیشتر شده است. بنابراین طبق معیارهای اتخاذ شده فاصله تونل‌ها در این سناریو نباید کمتر



شکل ۸- میزان جابجایی سقف و کف تونل‌ها در گزینه‌های مختلف

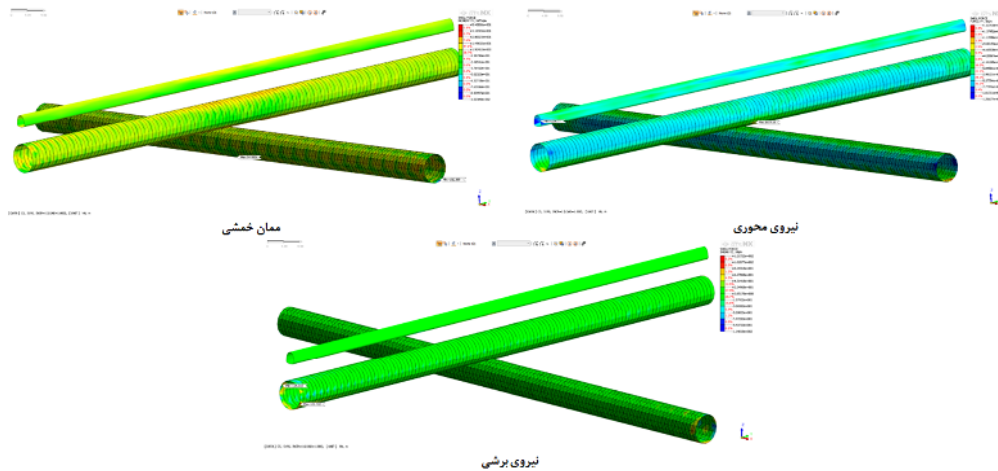
نیروی برشی القا شده در پوشش نهایی تونل‌ها با جابجا شدن تونل‌ها میزان تنش‌ها و نیروهای القا شده به

۵-۱-۳- بیشترین نیروی محوری، ممان خمشی و

تعیین فاصله بهینه تونل‌های متقاطع غیرهمسطح با استفاده از روش عددی - مطالعه موردی: تقاطع متروی ... ص ۱-۱۵

ذکر اینکه این نیروها در کدام تونل القا شده است، صرف نظر شده است.

پوشش نهایی نیز تغییر خواهد کرد. در شکل ۹ بیشترین نیروهای القا شده به پوشش نهایی تونل‌ها آورده شده است. در جدول ۳ نیز بیشترین نیروهای القا شده، آورده شده و از



شکل ۹- بیشترین نیروهای القا شده به پوشش نهایی تونل‌ها

جدول ۳- نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در سناریو اول

شماره گزینه	فاصله تونل‌ها	نیروی محوری (kN)	ممان خمشی (kNm)	نیروی برشی (kN)	نشست سطح زمین (cm)	جابجایی کلی مدل (cm)
۱	۴٫۴	۱۸۰۷٫۰۲	۱۱۲٫۹۶۸	۱۲۲٫۵۰۶	-۱٫۳۱	۰٫۰۲۸۶۵۹۳
۲	۴٫۰	۱۷۵۰٫۲۹	۱۱۱٫۳۵۹	۱۲۱٫۵۵۲	-۱٫۲۸	۰٫۰۲۸۲۴۴۵
۳	۳٫۶	۱۵۸۸٫۷۸	۱۰۶٫۷۱۹	۱۲۱٫۶۲۵	-۱٫۴۶	۰٫۰۲۸۲۳۶۶
۴	۳٫۲	۱۵۵۸٫۶۵	۱۰۵٫۲۹۷	۱۲۱٫۷۰۸	-۱٫۲۵	۰٫۰۲۸۰۷۷۲
۵	۲٫۸	۱۷۲۲٫۲	۱۰۸٫۴۲۱	۱۲۱٫۸۲۶	-۱٫۲۶	۰٫۰۲۷۶۴۵۲
۶	۲٫۴	۱۷۱۹٫۲۸	۱۰۷٫۴۹	۱۲۱٫۹۳۴	-۱٫۲۵	۰٫۰۲۷۶۳۷۳
۷	۲٫۰	۱۶۹۰٫۴۳	۱۰۷٫۱۷	۱۲۱٫۷۸۷	-۱٫۴۶	۰٫۰۲۶۹۰۱۱
۸	۱٫۶	۱۵۸۸٫۷۸	۱۰۶٫۷۱۹	۱۲۱٫۶۲۵	-۲٫۴۲	۰٫۰۲۸۲۳۶۶
۹	۱٫۲	۱۶۲۹٫۵۱	۱۱۴٫۳۸۴	۱۲۱٫۷۰۴	-۲٫۵۳۲	۰٫۰۵۳۹۲۵۲

مشاهده شده است.

#### ۵-۲- بررسی سناریو شماره دو

موارد بررسی شده در سناریو یک به همان ترتیب برای سناریو شماره دو نیز بررسی شده که در ادامه آمده است.

#### ۵-۲-۱- بیشینه نشست سطح زمین و جابجایی کل رخ داده در مدل

در هر گزینه بیشینه نشست سطح زمین (که در محل تقاطع

مطابق جدول ۳، بیشترین نیروی محوری (۱۸۰۷٫۰۲)

کیلونیوتن) در گزینه شماره یک (یعنی وقتی فاصله تونل‌ها از هم برابر ۴٫۴ متر است) مشاهده شده است. بیشترین ممان خمشی (۱۱۴٫۳۸۴ کیلونیوتن) در گزینه شماره ۹ (یعنی وقتی فاصله تونل‌ها از هم برابر ۱٫۲ متر است) مشاهده شد. بیشترین نیروی برشی (۱۲۲٫۵۰۶ کیلونیوتن) نیز در گزینه شماره ۱ (یعنی وقتی فاصله تونل‌ها برابر ۴٫۴ متر است)

بین میزان جابجایی کلی رخ داده در مدل و میزان نشست سطح زمین مشاهده نمی‌شود. بیشینه میزان جابجایی رخ داده در مدل بسیار نزدیک به میزان مجاز می‌باشد.

**۵-۲-۲- جابجایی سقف و کف تونل‌ها**

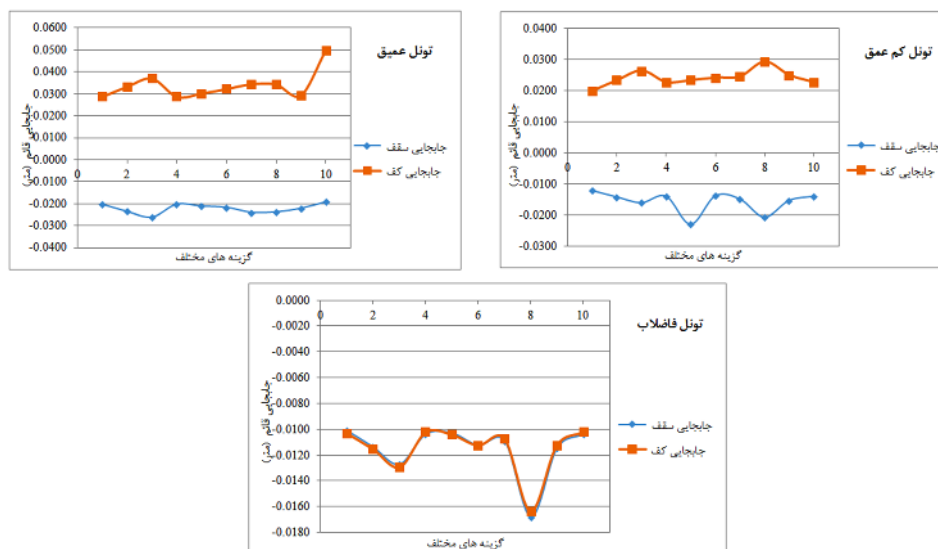
برای هر گزینه بیشینه جابجایی سقف و کف تونل‌ها، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

رخ داده) و بیشینه جابجایی کل رخ داده در مدل، در جدول ۴ نشان داده شده است.

با مراجعه به جدول ۴، میزان نشست سطح زمین با پایین رفتن تونل کم‌عمق کمتر می‌شود. البته جابجایی کلی رخ داده در مدل تا فاصله‌ای تقریباً ثابت و بدون تغییر است ولی از این فاصله مشخص به بعد به طور ناگهانی میزان جابجایی کلی مدل بیشتر می‌شود. ولی هیچ رابطه مشخصی

جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در سناریو دوم

شماره گزینه	فاصله تونل‌ها	نیروی محوری (kN)	مان خمشی (kNm)	نیروی برشی (kN)	نشست سطح زمین (cm)	جابجایی کلی مدل (cm)
۱	۴٫۴	۱۷۴۶٫۰۱	۱۰۹٫۹۲	۱۲۱٫۲۰۷	-۱٫۲۹	۲٫۸۷۸۷
۲	۴٫۰	۱۷۶۰٫۰۰	۱۰۹٫۲۵	۱۲۱٫۵۰۶	-۱٫۲۲	۲٫۸۲۱۶
۳	۳٫۶	۱۸۰۵٫۵۲	۱۱۰٫۶۵	۱۲۱٫۵۸۶	-۱٫۱۵	۲٫۸۶۲۲
۴	۳٫۲	۱۸۱۰٫۲۴	۱۰۸٫۵۸	۱۲۲٫۹۱۲	-۱٫۲۸	۲٫۸۴۱۳
۵	۲٫۸	۱۷۹۵٫۱۲	۱۱۰٫۳۴	۱۲۱٫۲۵۴	-۱٫۲۴	۳٫۷۱۰۵
۶	۲٫۴	۱۸۲۵٫۳۴	۱۱۲٫۸۱	۱۲۱٫۱۲۴	-۱٫۰۸	۳٫۵۶۶۰
۷	۲٫۰	۱۸۵۳٫۷۵	۱۱۱٫۴۷	۱۳۳٫۷۳۶	-۰٫۹۵	۳٫۷۱۳۵
۸	۱٫۶	۱۸۶۵٫۳۲	۱۱۳٫۲۹	۱۵۲٫۸۵۶	-۰٫۹۴۲	۳٫۸۱۷۱
۹	۱٫۲	۱۸۸۷٫۸۷	۱۱۴٫۹۵	۲۳۴٫۷۵۲	-۰٫۹۰۳	۴٫۳۰۲۵
۱۰	۰٫۸	۱۸۹۵٫۳۵	۱۱۷٫۵۷۶	۲۹۹٫۲۵۶	-۰٫۸۹۵	۴٫۹۸۳۷



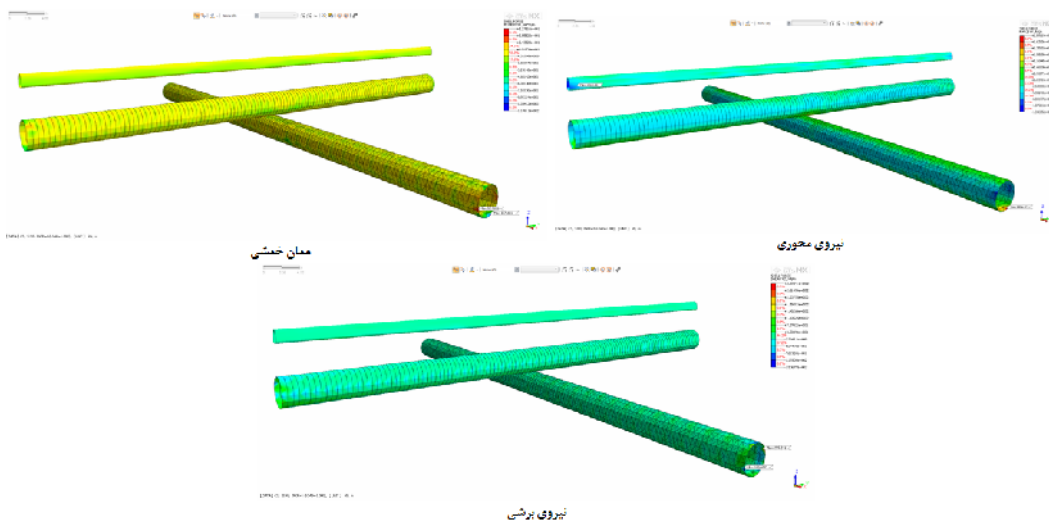
شکل ۱۰- میزان جابجایی سقف و کف تونل‌ها در گزینه‌های مختلف

مطابق شکل ۱۰، سقف و کف تونل فاضلاب به طور میانگین ۱٫۱۵۳۸ سانتیمتر به سمت پایین جابجا خواهد شد.

**نیروی برشی القا شده در پوشش نهایی تونل‌ها**  
 در شکل ۱۱ و جدول ۴ بیشترین نیروهای القا شده آورده شده و از ذکر اینکه این نیروها در کدام تونل القا شده است، صرف‌نظر شده است. البته در شکل ۱۱ مکان تلاش‌های وارده بر پوشش نهایی تونل‌ها قابل مشاهده است.  
 مطابق جدول ۴، بیشترین نیروی محوری، ممان خمشی و نیروی برشی در گزینه آخر (شماره ۱۰) به پوشش نهایی تونل‌ها القا شده است.

ولی تغییرشکل تونل‌های مترو به شکل بیضی گون می‌باشد. به ترتیب، سقف تونل کم‌عمق و عمیق به طور میانگین میزان ۱،۵۸۲۹ و ۲،۲۳۰۸ سانتیمتر به سمت پایین جابجا می‌شوند. به ترتیب، کف تونل کم عمق و عمیق به طور میانگین به میزان ۲،۴۱۸۶ و ۳،۳۸۶۴ سانتیمتر به سمت بالا جابجا می‌شوند.

### ۵-۲-۳- بیشترین نیروی محوری، ممان خمشی و



شکل ۱۱- بیشترین نیروهای القا شده به پوشش نهایی تونل‌ها

سناریوی مختلف بررسی شد. در سناریوی اول تونل عمیق به تدریج به تونل کم عمق نزدیک‌تر شد و در سناریوی دوم تونل کم عمق به تدریج و به سمت تونل عمیق جابجا شد و در هر سناریو تلاش شد تا به ازای کاهش ۴۰ سانتیمتری در فاصله بین تونل‌ها، تاثیر این مساله بر روی نشست سطح زمین، کرنش‌های ایجاد شده در مدل و تنش‌های القاء شده در پوشش نهایی تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفت.  
 در سناریو شماره یک در فاصله ۱،۲ متری نشست سطح زمین و میزان جابجایی کلی رخ داده در مدل از میزان مجاز بیشتر خواهد شد. در سناریو شماره دو در فاصله ۰،۸ متری، نشست سطح زمین و میزان جابجایی کلی رخ داده در مدل از میزان مجاز کمتر بود. بنابراین از نظر میزان جابجایی‌ها سناریو شماره دو گزینه مناسب‌تری می‌باشد.  
 میزان جابجایی سقف و کف تونل‌های مترو در سناریو

### ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

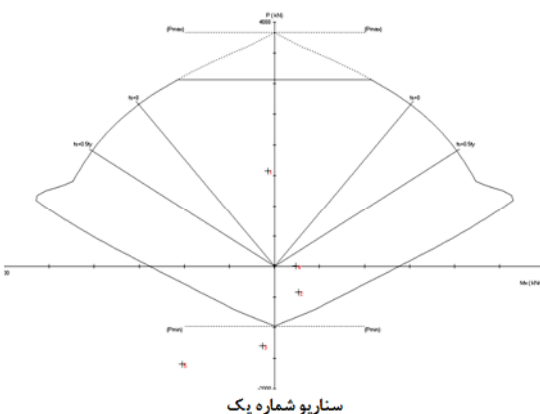
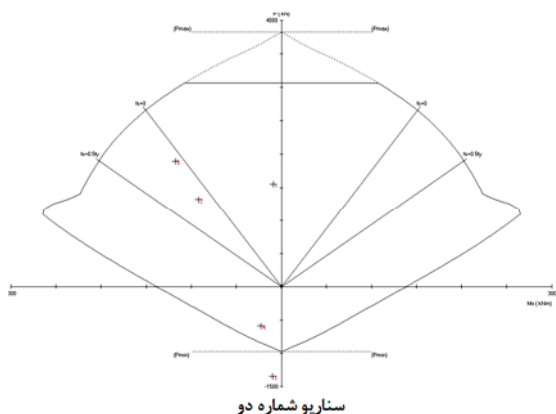
از آنجا که هرچه فاصله بین تونل‌های متقاطع خطوط مترو در محل تقاطع از همدیگر و از سطح زمین بیشتر باشد، زمان ماند مسافر در ایستگاه افزایش پیدا می‌کند و این مساله هزینه‌های زیادی را برای بهره‌بردار خطوط مترو خواهد داشت، این تحقیق، با هدف بررسی امکان کاهش فاصله تونل‌های متقاطع در محل تقاطع و نزدیک‌تر کردن آن‌ها به سطح زمین به نحوی که معیارها و ضوابط مکانیک‌سنگی و پایداری تونل‌ها نیز تغییر اساسی ننماید، انجام شده است و در آن با استفاده از اطلاعات محل تقاطع تونل‌های خطوط ۶ و ۷ متروی تهران و به کمک مدل‌سازی عددی سه‌بعدی این مساله مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل این مساله از نرم‌افزار *GTS NX* استفاده شده است و به کمک مدل‌های عددی سه‌بعدی، دو

معنی که نیروی محوری زیادی را متحمل شده و ممان خمشی کمتری را تحمل می‌کند. در بیشتر موارد نیروهای محوری وارد شده باعث بوجود آمدن ممان خمشی مثبت در مقطع می‌شود. با توجه به اینکه نقطه ضعف بتن، کشش می‌باشد، اکثر مدهای شکست رخ داده بصورت کشش خواهند بود. در این تحقیق نیز همین موضوع رخ می‌دهد. ظرفیت مقطع پوشش نهایی با مشخصات موجود در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نقاط نشان داده شده در شکل نیروهای القا شده در پوشش می‌باشد.

شماره دو نسبت به سناریو شماره یک بیشتر می‌باشد. بنابراین اندرکنش تونل‌های مترو در سناریو شماره دو نسبت به یک بیشتر خواهد بود.

از نظر میزان نیروهای القا شده در پوشش نهایی سناریو شماره دو (در فاصله کمتر) در مقایسه با شماره یک در وضعیت نامناسبتری قرار می‌گیرد. در سناریو شماره دو، هر سه مورد بررسی شده در گزینه آخر بیشترین میزان را نسبت به دیگر گزینه‌ها داشته که نشان‌دهنده اندرکنش بیشتر تونل‌ها می‌باشد.

پوشش نهایی تونل‌ها رفتاری مانند ستون دارد. بدین



شکل ۱۲- ظرفیت مقطع پوشش نهایی و نیروهای القا شده به آن

تعیین شد علاوه بر این به دلیل فاصله گرفتن تونل کم عمق از سطح زمین، میزان نشست سطح زمین نیز کاهش پیدا کرد. گزینه مناسب در این تقاطع، نزدیک‌تر کردن تونل کم عمق به تونل عمیق تا فاصله ۰٫۸ متر خواهد بود.

#### ۷- تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل نتایج پایان‌نامه برای دریافت مدرک کارشناسی‌ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات است. همچنین از موسسه ساحل و شرکت سپاس، خصوصاً جناب مهندس ابوطالبی جهت همکاری و در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز سپاس‌گزاری می‌شود.

نقطه شماره سه در هر دو نمودار از ظرفیت مقاطع بیرون افتاده است. این نقطه مربوط به تونل فاضلاب می‌باشد. با توجه به اینکه این تونل موضوع مورد بحث این تحقیق نیست، این نقطه مورد توجه و بررسی قرار نگرفته است. در سناریو شماره یک نقطه شماره پنج نیز بیرون از ظرفیت مقطع قرار گرفته است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده و بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی نتایج زیر حاصل شده است:

در سناریوی اول، در صورتی که فاصله تونل‌ها از ۱٫۶ متر کمتر شود، میزان نشست سطح زمین از مقدار مجاز بیشتر شده و مقطع پوشش نهایی نیز پاسخگوی تنش‌های وارده نخواهد بود.

در سناریوی دوم، فاصله مجاز تونل‌ها به میزان ۰٫۸ متر

## ۸- مراجع

- Asano, T., Ishihara, M., Kiyota, Y., Kurosawa, H., & Ebisu, S. (2003). An observational excavation control method for adjacent mountain tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 291-301.
- Chen, G.-x., Chen, L., & Dai, Y. (2011). The seismic response of intersecting metro tunnels and single tunnel. *Proceedings of the 8th International conference on Structural Dynamics* (pp. 459-465). Leuven, Belgium: EURO DYN 2011.
- Do, N.-A., Dias, D., & Oreste, P. (2014, sept 15). Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 21.
- Eskandari, F., & Goshtasbi, K. (1392). *Stability analysis of the intersection lines 2,3 & 4 in Mashhad Urban Railway*. Tehran: Tarbiat modares university, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering.
- Gao, J., Liu, H., Zhang, M., & Aziz, M. (2014). Failure Process and Support Method of Roadways Excavated in Inclined Rockmass Strata. *Civil Engineering and Architecture*, 304-312.
- GTS NX. (2014). *User manual (Analysis method)*. seoul : MIDAS IT.
- GTSNX. (2015). *User manual- chapter 6 (Analysis)*. midas IT.
- Heydari Sheibani, R., Zare, S., Mirzaei NasirAbad, H., & Forooghi, M. (1391). Numerical Study of Face Pressure Effect on Surface Settlement in Soft Ground Mechanized Tunneling- A Case Study: Tehran Metro Line 7. *Tunneling and Underground Space Engineering (TUSE)*, 1(1), 57-67. doi:tuse.2013.121
- Hosseinitoudeshki, V. (2013). Numerical analysis of K0 to tunnels in rock masses exhibitin strain-softening behaviour (Case study in Sardasht dam tunnel, NW Iran). *International Research Journal of Applied and Basic Sciences (IRJABS)*, 4(6), 1572-1581. Retrieved from www.irjabs.com
- Jalali, S. M., & Eftekari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines. *Modern Management of Mine Prouducting, Geology & Environmental Protection* (pp. 27-34). Albena: International Scientific GeoConference.
- Jalali, S. M., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. *Safety Science*, 49(5), 664-669. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.12.015>
- Jalali, S. M., Emami, M., Najafi, M., Gharib-Bolok, F., Mohammadi, H., & Ramezanzadeh, A. (2015). Underground Coal Gasification as a Strategy to Improve Energy Economy of Iran. *Iranian Energy Economics*, 4(13), 63-88. Retrieved from [http://jiece.atu.ac.ir/article\\_852\\_202.html](http://jiece.atu.ac.ir/article_852_202.html)
- Kim, S. (1996). *Model testing and analysis of interaction between tunnels in clay*. Oxford: University of Oxford.
- Li, P., Du, S.-J., Ma, X.-F., Yin, Z.-Y., & Shen, S.-L. (2014). Centrifuge investigation into the effect of new shield tunnelling on an existing underlying large-diameter tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59-66.



- Li, X. G., & Yuan, D. J. (2012). Responses of a double-decked metro tunnel to shield driving of twin closely under-crossing tunnels. *Tunnels and Underground Space Technology* (28), 18-30.
- Liu, H., Li, P., & Liu, J. (2011). Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 276-283.
- Liu, H., Small, J., & Carter, J. (2008). Full 3D modelling for effects of tunneling on existing support systems in the Sydney region. *Tunnel and underground space technology*.
- Ng, C. W., Boonyarak, T., & Mašin, D. (2013, July 6). Three-dimensional centrifuge and numerical modeling of the interaction between perpendicularly crossing tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, 30.
- Pang, C., Yong, K., & Dasari, G. (2005). some considerations in finite element analysis of. *Proceeding of Underground Space*, (pp. 1149-1154). London.
- Pound, C., Hsu, Y., & Walker, G. R. (2003). Predicted and Observed Ground Movements around a Tunnel. *International Conference on Underground Construction*, (pp. 549-562). London.
- Razi, A. m., & Shahriar, K. (1392). *Analysis of interaction of two tunnels (case study: tunnels line 6 and 7 of Tehran subway)*. Tehran: Islamic Azad University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Mining Engineering Department.
- Sahel, C. C., & Sepasad, E. C. (1393). *Analysis of interaction of tunnels line 6 and 7 of Tehran subway in new corridor*. Tehran: Sepasad Engineering Company.
- Sakurai, S. (1997). Lessons Learned from Field Measurements in Tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12, 453-460.
- Sherizadeh, H., & Dehghan, S. (1394). *An improvement of distance between urban tunnel in intersecting areas and an investigation on excavation sequence*. Mahallat: Islamic Azad University of Mahallat, Faculty of Engineering, Mining Engineering Department.
- Sherizadeh, H., & Dehghan, S. (1395). 3D Modeling of Intersection between line 6 and 7 Tunnels of Tehran Subway to determine the Best Excavation Sequence for Non-Level Crossing Tunnels. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*(6), 77-89.
- Sherizadeh, H., & Dehghan, S. (1395). A comparison between numerical modelling and monitoring data's on Tehran subway line 7. *10'th Student Mining Engineering Conference* . Kashan: University of Kashan .
- Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V.
- Tohidi, A., & Sadaghiani, H. (1389). *An investigation on affecting factors on interaction of constructing non-level crossing tunnels*. Tehran: Sharif University of Technology, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department.
- Yingxuan, J., Weining, L., Xiaojing, S., Weifeng, L., & Hougui, Z. (2008). Dynamic responses of spatial overlapping tunnels induced by passing trains. *Underground Facilities for Better Environment and Safety* (pp. 252-260). Idia: World Tunnel Congress .