

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

تعیین عمق بهینه حفر تونل های مترو با توجه به نوع زمین و ویژگی های سامانه نگهداری؛ (مطالعه موردی خط دوم قطار شهری تبریز)

نگارنده:

محمد رضا اکبرزاده ارپاچائی

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور:

دکتر علیرضا طالبی نژاد

مهرماه ۱۴۰۰

شماره: ۶۰۷/۴۲/۵۴
تاریخ: ۲۹/۹/۴۰

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محمدرضا اکبرزاده اربابچائی با شماره دانشجویی ۹۷۰۲۸۷۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان تعیین عمق بهینه حفر تونل های مترو با توجه به نوع زمین و ویژگی های سامانه نگهداری؛ مطالعه موردی خط دوم قطار شهری تبریز که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۲۰ - ۱۹	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸ - ۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☐ نظری	☐ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر علی رضا طالبی نژاد چاوشی		
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی نوروزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر شکراله زارع	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	مرتضی جوادی اصطهباناتی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر فریدون سهرابی
نام و نام خانوادگی رئیس هیأت داوران: دکتر شکراله زارع
امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم بہ پدر و مادر دلسوز و فداکارم

تقدیم بہ ہمسر مہربانم

تقدیم بہ دختر عزیزم

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از بزرگوارانی که مراد نوشتن این تحقیق یاری نموده‌اند تشکر و قدردانی نمایم. سپاس و تقدیر فراوان از استاد گرامی و بزرگوارم جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که هم در دوران تحصیل و هم در زمان انجام این پایان نامه زحمات بسیار زیادی متحمل شدند و از بهیچ‌گونه محک و همراهی دریغ نورزیدند. از استاد محترم جناب آقای دکتر علی رضا طالبی نژاد که با مشاوره‌های ارزشمند خویش در تقویت هر چه بیشتر غنای علمی این تحقیق مرایاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم. از جناب آقای دکتر امیر خادریان و همچنین آقای مهندس خضر محمد امینی که به ترتیب در نگارش و بحث مدل سازی این پایان نامه، یار و یاور بنده بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. در نهایت از تلاش‌ها و زحمات بی‌دریغ و فداکارانه پدر و مادر دلسوز و مهربانم و همچنین خانواده بسیار عزیزم که در تمام مدت طول تحصیل، با صبر و حوصله مشوق بنده بوده‌اند، خالصانه سپاسگزار بوده و از صمیم قلب کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعمدنامه

اینجانب محمدرضا اکبرزاده ارپاچائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه « تعیین عمق بهینه حفر تونل های مترو با توجه به نوع زمین و ویژگی های سامانه نگهداری؛ مطالعه موردی مترو خط ۲ قطار شهری تبریز » تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصال بر خوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

عمق حفر تونل‌های قطار شهری، به طور مستقیم بر روی هزینه‌های حفر تونل و همچنین احداث ایستگاه‌های قطار تاثیر دارد. کمینه کردن این هزینه‌ها هدف تمام مدیران پروژه تونل‌سازی است. در این تحقیق تاثیر عمق‌های مختلف حفر تونل خط دو قطار شهری تبریز از دو دیدگاه فنی و هزینه‌ای بررسی شده و عمق بهینه برای حفر تونل تعیین شده است. از دیدگاه فنی، نشست سطحی زمین مد نظر قرار گرفته است. در صورتی که مقدار نشست سطح زمین از ۲۵ میلی‌متر بیشتر باشد، باید مقدار روباره تا زمانی که نشست سطح زمین به کمتر از ۲۵ میلی‌متر برسد، افزایش یابد. هزینه‌های حفر تونل و همچنین احداث ایستگاه‌ها نیز، دیدگاه هزینه‌ای را در تعیین عمق بهینه تونل تشکیل می‌دهند. برای این منظور، در این تحقیق، با افزایش عمق حفر تونل و همچنین با توجه به فاصله‌ی ایستگاه‌ها از هم، برای مقایسه هزینه‌های احداث تونل و همچنین ساخت ایستگاه‌ها، به سناریوهای متفاوت پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند؛ اعماقی که در آن روباره تونل کمتر از قطر تونل است، از دیدگاه فنی دارای نشست بیشتر از حد مجاز است، بنابراین حفر تونل در چنین عمق‌هایی توصیه نمی‌شود. از سوی دیگر، هزینه‌های احداث تونل، با افزایش عمق ابتدا روند کاهشی داشته و سپس وقتی که روباره تونل از دو برابر مقدار قطر تونل بیشتر شود، هزینه‌ها مجدداً روند افزایشی می‌یابد. هزینه‌های احداث ایستگاه‌ها با افزایش عمق احداث ایستگاه‌ها، بیشتر شده و با روند تقریباً یکنواخت، افزایش می‌یابد. بر اساس مطالعات انجام شده بر مبنای قیمت سه‌ماهه دوم سال ۱۴۰۰، احداث ایستگاه یک طبقه (در عمق بیشتر از شعاع تونل و کمتر از قطر تونل) هزینه‌ای برابر با ۱۹۵ میلیارد تومان و هزینه‌ی احداث ایستگاه چهار طبقه (در اعماق بیشتر از دو برابر قطر تونل)، برابر با ۵۱۴ میلیارد تومان است. بررسی و تحلیل نتایج سناریوهای مختلف مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه‌ها که در طول ۱۷ کیلومتر مسیر مورد مطالعه با روش حفر مکانیزه این تحقیقات خط دوم قطاری شهری تبریز انجام شده است، نشان می‌دهد که؛ هر چه فاصله ایستگاه‌ها از هم بیشتر شود، تاثیر عمق در مجموع هزینه‌های ساخت تونل و اجرای ایستگاه‌ها، کاهش می‌یابد. با این وجود برای حفر تونل در زیر بافت شهری که فاصله ایستگاه‌ها از هم عمدتاً بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر است، مناسب‌ترین عمق برای احداث تونل و ساخت ایستگاه‌ها از هر دو دیدگاه فنی و هزینه‌ای، عمقی است که تونل دارای روباره بیشتر از مقدار قطر تونل و همچنین کمتر از یک و نیم برابر قطر تونل داشته باشد.

کلمات کلیدی: هزینه، تونل، ایستگاه، عمق بهینه، مدل‌سازی عددی، FLAC3D، نشست سطحی

زمین، مترو خط ۲ تبریز

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

اکبرزاده ارباچائی. محمدرضا، جلالی. سید محمد اسماعیل، طالبی نژاد. علی رضا، ۱۴۰۰، "تعیین عمق مناسب برای حفر تونل های مترو با توجه به دیدگاه فنی و هزینه ای؛ مطالعه موردی خط دوم قطار شهری تبریز"، نشریه علمی - پژوهشی "مهندسی تونل و فضاها ی زیرزمینی". پذیرش

[doi:10.22044/tuse.2021.11263.1432](https://doi.org/10.22044/tuse.2021.11263.1432)

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱. مقدمه
۲	۲-۱. مشخصات عمومی طرح
۳	۳-۱. ضرورت و هدف تحقیق
۴	۴-۱. روش تحقیق
۴	۵-۱. ساختار پایان نامه
۵	فصل ۲: مروری بر مطالعات پیشین
۶	۱-۲. مقدمه
۷	۲-۲. مطالعات پیشین از دیدگاه فنی
۷	۱-۲-۲. نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل در مناطق کم عمق
۱۰	۲-۲-۲. عوامل موثر بر حرکات زمین بر اثر حفر مکانیزه تونل
۱۱	۳-۲-۲. پیشبینی حرکات زمین در اثر ساخت تونل
۱۸	۴-۲-۲. تاثیر حفر تونل بر سازه های سطحی اطراف
۱۸	۵-۲-۲. پایداری جبهه کار
۱۹	۶-۲-۲. ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل
۲۲	۳-۲. مطالعات پیشین از دیدگاه هزینه ای
۲۷	فصل ۳: ویژگی های ساختگاه قطار شهری تبریز
۲۸	۱-۳. مقدمه
۲۸	۲-۳. موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه
۲۹	۳-۳. هیدرولوژی منطقه
۲۹	۴-۳. زمین شناسی عمومی منطقه
۳۲	۵-۳. چینه شناسی منطقه
۳۴	۶-۳. زمین شناسی ساختمانی منطقه
۳۴	۷-۳. شبکه قطار شهری تبریز
۳۵	۱-۷-۳. خط یک قطار شهری تبریز
۳۵	۲-۷-۳. خط دو قطار شهری تبریز
۳۵	۳-۷-۳. خط سه قطار شهری تبریز
۳۷	۴-۷-۳. خط چهار قطار شهری تبریز
۳۷	۵-۷-۳. خط پنج قطار شهری تبریز

۳۷	 ۳-۷-۶. خط برون شهری تبریز- سهپند
۳۷	 ۳-۸. مشخصات دستگاه حفاری و سامانه نگهداری تونل
۳۹	 ۳-۹. ویژگی های ژئوتکنیکی زمین مسیر تونل
۴۷	فصل ۴: مدلسازی و تحلیل عددی نشست سطح زمین در تونل خط دوم قطار شهری تبریز
۴۸	 ۴-۱ مقدمه
۴۸	 ۴-۲ نحوه مدل سازی
۴۹	 ۴-۲-۱. ساخت هندسه مدل
۵۱	 ۴-۲-۲ انتخاب مدل رفتاری و تعیین شرایط مرزی
۵۲	 ۴-۲-۳ حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری
۵۴	 ۴-۳ اعتبار سنجی نتایج مدل سازی عددی
۵۷	 ۴-۴ نشست سطحی زمین در اعماق مختلف
۶۴	 ۴-۵ جمع بندی نشست سطح زمین در اعماق مختلف
۶۷	فصل ۵: برآوردهای هزینه ای احداث تونل خط دو قطار شهری تبریز در اعماق مختلف
۶۸	 ۵-۱. مقدمه
۶۸	 ۵-۲. برآوردهای هزینه ای احداث تونل و ایستگاه
۶۸	 ۵-۲-۱. برآورد هزینه احداث تونل
۷۴	 ۵-۲-۲. برآورد هزینه های ساخت ایستگاه
۷۵	 ۵-۳. جمع بندی برآورد هزینه های احداث تونل و ایستگاه
۸۱	فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۲	 ۶-۱. نتیجه گیری
۸۳	 ۶-۲. پیشنهادات

فهرست جداول

- جدول ۳-۱. مشخصات دستگاه حفاری مکانیزه پرتال ورودی تونل ۳۸
- جدول ۳-۲. مشخصات اصلی سگمنت‌های سامانه نگهداری خط دو متروی تبریز ۳۹
- جدول ۳-۳. حجم و وزن سگمنت‌های هر رینگ از تونل ۳۹
- جدول ۳-۴. پارامترهای ژئوتکنیکی برای بخش‌های مختلف طول مسیر (مقطع تونل) ۴۰
- جدول ۳-۵. انواع گروه‌های مختلف زمین براساس جنس آن‌ها ۴۲
- جدول ۳-۶. طبقه‌بندی‌های مختلف مسیر تونل بر اساس مقادیر روباره به قطر تونل ۴۴
- جدول ۴-۱. موقعیت و خصوصیات پارامترهای ژئومکانیکی حالات مختلف مدل‌ها ۵۰
- جدول ۴-۲. خصوصیات سگمنت‌های مورد استفاده در مدل‌سازی برای سیستم نگهداری ۵۴
- جدول ۴-۳. مقایسه مقادیر نشست مدل‌سازی و ابزاربندی در مقاطع منتخب از تونل ۵۶
- جدول ۴-۴. بیشترین مقادیر نشست سطحی زمین در اعماق مختلف تونل ۶۴
- جدول ۵-۱. مقدار آرماتور مصرفی در هر رینگ از تونل با توجه به مقدار روباره بر قطر آن ۶۹
- جدول ۵-۲. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $0/5 < H/D < 1$ ۷۰
- جدول ۵-۳. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $1 < H/D < 1/5$ ۷۱
- جدول ۵-۴. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $1/5 < H/D < 2$ ۷۲
- جدول ۵-۵. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $2 < H/D < 2/77$ ۷۳
- جدول ۵-۶. هزینه اجرای ایستگاه در اعماق مختلف بر حسب میلیارد ریال ۷۴
- جدول ۵-۷. هزینه‌های مربوط به حفاری تونل و اجرای ایستگاه در اعماق متفاوت ۷۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. پارامترهای موثر در حرکت زمین حین حفر تونل به روش مکانیزه [۵]. ۱۲
- شکل ۲-۲. پروفیل نشست عرضی حاصل از معادله توزیع نرمال [۷]. ۱۳
- شکل ۳-۲. رابطه بین پارامتر عرض گودی نشست و عمق محور تونل برای خاک‌های چسبنده [۸]. ۱۴
- شکل ۴-۲. گسترش حرکات زمین [۱۲]. ۱۵
- شکل ۵-۲. پارامترهای موثر در میزان گپ کل در سینه کار تونل [۱۴]. ۱۷
- شکل ۶-۲. منحنی مقادیر شاخص GSI به همراه هزینه احداث تونل در هر متر [۴۲]. ۲۴
- شکل ۷-۲. منحنی ارتباط مقادیر مختلف قطر تونل در مقابل هزینه‌های احداث تونل [۴۳]. ۲۵
- شکل ۱-۳. مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز بر روی تصویر ماهواره‌ای [۱]. ۳۰
- شکل ۲-۳. موقعیت شهر تبریز [۱]. ۳۱
- شکل ۳-۳. موقعیت آبراهه‌ها و رودخانه‌ها در محدوده شهر تبریز [۱]. ۳۱
- شکل ۴-۳. نقشه زمین‌شناسی از محدوده اجرای طرح [۱]. ۳۳
- شکل ۵-۳. ستون چینه‌شناسی دشت تبریز [۱]. ۳۳
- شکل ۶-۳. شبکه درون‌شهری قطار بر روی نقشه شهر تبریز [۴۹]. ۳۶
- شکل ۷-۳. طرح دو بعدی و سه بعدی حلقه سگمندی پروژه خط دو متروی تبریز. ۳۸
- شکل ۸-۳. طبقه‌بندی زمین بر اساس جنس آن‌ها به چهار گروه مختلف در مسیر طولی مترو. ۴۱
- شکل ۹-۳. فراوانی گروه‌های طبقه‌بندی شده جنس زمین در مسیر طولی مترو. ۴۳
- شکل ۱۰-۳. طبقه‌بندی مقادیر مختلف روباره خط دو قطار شهری تبریز. ۴۳
- شکل ۱۱-۳. طبقه‌بندی مقادیر مختلف روباره‌های مسیر طولی تونل بر اساس فراوانی آن‌ها. ۴۴
- شکل ۱۲-۳. میانگین مقادیر روباره‌های تونل در انواع گروه‌های طبقه‌بندی شده. ۴۵
- شکل ۱-۴. ابعاد هندسی مدل حفاری در نرم‌افزار FLAC3D. ۵۱
- شکل ۲-۴. مرزهای مدل حفاری در نرم‌افزار FLAC3D. ۵۲
- شکل ۳-۴. نمونه مدل حفاری در نرم‌افزار FLAC3D 6.00. ۵۳
- شکل ۴-۴. نیروهای وارد بر زمین حین حفاری از طرف دستگاه حفاری در نرم‌افزار FLAC3D. ۵۳
- شکل ۵-۴. مقایسه مقادیر نشست در افت حجم‌های متفاوت. ۵۵
- شکل ۶-۴. نمودار مقادیر نشست سطح زمین‌های موجود در مقاطع منتخب. ۵۶
- شکل ۷-۴. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه اول در عمق‌های مختلف. ۵۸
- شکل ۸-۴. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه دوم در عمق‌های مختلف. ۵۸
- شکل ۹-۴. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه سوم در عمق‌های مختلف. ۵۹
- شکل ۱۰-۴. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه چهارم در عمق‌های مختلف. ۵۹

- شکل ۴-۱۱. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۷/۷۵ متر، در جنس‌های مختلف زمین.. ۶۱
- شکل ۴-۱۲. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۱۲/۳۱ متر، در جنس‌های مختلف زمین ۶۱
- شکل ۴-۱۳. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۱۵/۸۱ متر، در جنس‌های مختلف زمین ۶۲
- شکل ۴-۱۴. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۲۶/۳۳ متر، در جنس‌های مختلف زمین ۶۲
- شکل ۴-۱۵. نمودار نشست‌های سطحی زمین در تمامی حالات مدل‌سازی شده ۶۴
- شکل ۵-۱. طبقه‌بندی اجزای عمده هزینه احداث ایستگاه‌ها..... ۷۴
- شکل ۵-۲. هزینه ساخت هر یک کیلومتر تونل (میلیارد تومان)..... ۷۶
- شکل ۵-۳. هزینه ساخت هر ایستگاه (میلیارد تومان)..... ۷۶
- شکل ۵-۴. هزینه‌های احداث تونل و اجرای ایستگاه (میلیارد تومان)..... ۷۶
- شکل ۵-۵. مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه در روباره‌های مختلف در سناریوهای مختلف ۷۷

فصل ۱: کلیات

۱-۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت فناوری، سهولت نسبی حفاری و ساخت سازه‌های زیرزمینی، محدودیت‌های فضاهای سطحی برای اجرای طرح‌های عمرانی و نیز به واسطه مسائل سیاسی و امنیتی، توجه بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به احداث سازه‌های زیرزمینی برای کاربری‌های عمرانی، نظامی و معدنی معطوف شده است. راه‌ها و بزرگراه‌های زیرزمینی، انواع تونل‌ها، شبکه متروی شهری، نیروگاه‌ها و سایر مغارهای زیرزمینی برای دفن زباله‌های هسته‌ای و یا به عنوان مخازن نفت، معادن، پناهگاه‌ها و انبارها، تعدادی از سازه‌هایی هستند که در کشورهای مختلف به سرعت در حال ساخت و اجرا هستند.

حفاری تونل‌ها در اعماق مختلف دارای مزایا و معایب متفاوتی است هر عمقی که بیشترین محاسن و کمترین معایب را دارا باشد به عنوان عمق مناسب حفر تونل‌ها تعیین می‌شود. از جمله مزایای افزایش عمق حفر تونل‌ها عبارت است از: کاهش فشار زمین تا عمق مشخص، کاهش نشست سطح زمین، امکان بهره‌برداری به عنوان سازه پدافند غیر عامل، امکان فراهم آوردن تسهیل در خطوط متقاطع، کاهش هزینه‌های حفر و نگهداری تونل تا عمق مشخص. همچنین برخی از معایب افزایش عمق را می‌توان احتمال لزوم حفاری در زیر سطح ایستابی، طولانی شدن راه دسترسی به ایستگاه‌ها، افزایش پله‌ها و طول مسیر آسانسورهای واقع در ایستگاه‌ها دانست.

روش‌های تجربی، عددی و اندازه‌گیری، ابزارهای مختلفی برای طراحی تونل هستند. روش‌های طراحی تجربی مبتنی بر نتایج مطالعات موردی و پایش پروژه‌های انجام یافته با مقیاس واقعی است و همچنین روش‌های مشاهده‌ای (اندازه‌گیری) بر اساس اندازه‌گیری‌های واقعی حرکات زمین به هنگام حفاری و تحلیل اندرکنش زمین سیستم نگهداری، بنا شده‌اند که به کمک آن‌ها می‌توان ناپایداری‌ها را مشخص ساخت. در روش‌های عددی، وضعیت تنش و تغییرشکل در اطراف تونل تحلیل می‌شود. اکثر تحقیق‌های انجام شده در این خصوص با استفاده از روش‌های عددی و کاربرد نرم‌افزارهای متناسب بوده است. در این تحقیق ابتدا عوامل تاثیرگذار بر تعیین عمق تونل تعیین و سپس معیار و شاخص‌هایی برای تعیین عمق بهینه حفر تونل تدوین خواهد شد. در ادامه با استفاده از روش‌های عددی، عوامل اثرگذار در اعماق مختلف با توجه به جنس زمین و ویژگی‌های سامانه نگهداری، مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

در این تحقیق، عمق بهینه حفر تونل‌های مترو با توجه به جنس زمین و ویژگی‌های سامانه نگهداری تعیین و با استفاده از داده‌های پروژه خط ۲ تونل قطار شهری تبریز به صورت مطالعه موردی بررسی می‌شود.

۲-۱. مشخصات عمومی طرح

شهر تبریز یکی از کلان شهرهای ایران به شمار می‌آید. با توجه به جمعیت آن و وضعیت ترافیکی و حمل و نقل شهری، احداث قطار شهری در این شهر امری ضروری به نظر می‌رسد. در راستای توسعه

قطار شهری تبریز، خط ۲ قطار شهری تبریز به طول کلی حدود ۲۲ کیلومتر طراحی شده است. همچنین این خط دارای ۲۰ ایستگاه با فواصل تقریباً یک کیلومتر از یکدیگر است. خط ۲ قطار شهری تبریز از منطقه فراملک در غرب شهر تبریز شروع شده و پس از عبور از خیابان‌های قره آغاج (قدس) و جمهوری به قسمت‌های میانی شهر در ناحیه بازار می‌رسد. این خط در ادامه بعد از عبور از میدان دانش‌سرا و زیر رودخانه مهران رود به بلوار عباسی و میدان شهید فهمیده می‌رسد. از میدان شهید فهمیده به سمت شهرک باغمیشه ادامه یافته و با تغییر مسیر به سمت جنوب شرقی در نهایت در جاده تهران در مقابل نمایشگاه بین‌المللی تبریز خاتمه می‌یابد. قطر حفاری خارجی این تونل ۹/۴۹ متر بوده و قطر خارجی پوشش بتنی ۹/۱۸ متر و ضخامت آن‌ها ۳۵ سانتی‌متر است [۱].

۳-۱. ضرورت و هدف تحقیق

با گسترش روز افزون شهرها و افزایش شهرنشینی و در نتیجه نیاز فزاینده به زمین، استفاده از فضای زیرزمینی و پروژه‌های تونل‌سازی به‌منظور ایجاد راه‌های ارتباطی، خطوط مترو و تاسیسات زیربنایی و زیر ساختارها افزایش چشمگیری در سال‌های اخیر در سرتاسر دنیا داشته است. به‌ویژه در ایران پروژه‌های تونل‌سازی با شتاب بیشتری در حال افزایش است و علاوه بر ۵ کلان‌شهر، در اکثر شهرهای بزرگ نیز پروژه‌های تونل‌سازی زیادی برای اهداف مختلف از قبیل خطوط مترو به‌منظور کاهش تأثیرات محیطی عبور هر روزه افراد در مناطق شهری، تونل‌های انتقال آب، تونل‌های مربوط به راه‌های ارتباطی و ... در حال اجرا یا مطالعه است [۲].

انتخاب عمق به‌منظور حفر تونل‌های مترو، مستقیماً بر روی هزینه‌های حفاری، نگهداری و بهره‌برداری اثر می‌گذارد و کمینه کردن این هزینه‌ها هدف تمام مدیران پروژه احداث تونل است. در این تحقیق تأثیر عمق‌های مختلف از لحاظ فنی و هزینه‌ای بررسی و عمق بهینه برای حفر تونل‌های مترو تعیین می‌شود. با پیشرفت روش‌های حفاری تونل به‌ویژه در چند دهه اخیر انواع ماشین‌های حفاری تمام مکانیزه با کارایی‌های مختلف تولید شده‌اند که هر کدام متناسب با شرایط مختلف ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی منطقه انتخاب می‌شوند. معمولاً در حفاری مکانیزه برای نگهداری تونل از پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته (قطعات سگمنت) استفاده می‌شود. این سگمنت‌ها از نظر اقتصادی بخش قابل توجهی از هزینه‌ها و مسایل فنی ساخت تونل‌ها را شامل می‌شوند. در صورت طراحی اقتصادی و بهینه آن‌ها می‌توان هزینه پروژه‌های تونل‌سازی را به میزان قابل توجهی کاهش داد. به‌ویژه در تونل‌های بزرگ‌مقطع که دارای پوشش حجیم‌تری هستند و همچنین تونل‌های با طول زیاد این مساله قابل توجه خواهد بود. اساسی‌ترین بخش طراحی بهینه پوشش تونل‌ها، تعیین عمق بهینه حفر تونل و عوامل مهم مختلف موثر بر آن است. تعیین عمق بهینه حفر تونل با توجه به ملاحظات فنی، هزینه‌ای، محیط زیست، پدافند غیر عامل و غیره اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و در صورت تعیین نادرست آن، منجر به آسیب‌های فنی و هزینه‌ای می‌شود که از آن می‌توان به نشست سطحی، هجوم آب زیرزمینی به داخل تونل و تغییر در اندازه و ابعاد تونل و تغییر در ویژگی‌های سامانه نگهداری و ... اشاره کرد. از

عوامل موثر بر تعیین عمق بهینه حفر تونل نیز عبارت است از: هندسه و مقطع تونل، روش و مراحل حفاری، جنس زمین، نوع سامانه نگهداری و زمان نصب آن، سطح آب‌های زیرزمینی. با در نظر گرفتن مقدار کم تحقیقات در این زمینه، اهمیت چشمگیر تعیین عمق بهینه حفر تونل‌های مترو با توجه به نوع زمین و ویژگی‌های سامانه نگهداری مشخص می‌شود.

۴-۱. روش تحقیق

در این مطالعه ابتدا به استخراج پارامترهای موثر بر انتخاب عمق حفر تونل پرداخته شده است. سپس تونل با استفاده از روش‌های عددی در اعماق مختلف، مدل‌سازی شده و از دیدگاه نشست سطحی زمین بررسی می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق، نرم‌افزار FLAC3D است. به این ترتیب با توجه به نوع خاک و نوع سیستم نگهداری، ویژگی‌های سامانه نگهداری برای اعماق مختلف مشخص شده است. بر این اساس، به ازای هر عمق از تونل، هزینه‌های حفر، نگهداری و اجرای ایستگاه‌ها تعیین می‌شود. در نهایت با تلفیق ملاحظات فنی هزینه‌ای، عمق بهینه برای حفاری تونل-های قطار شهری تعیین می‌شود.

۵-۱. ساختار پایان‌نامه

این تحقیق مشتمل بر شش فصل است. فصل اول به کلیاتی در رابطه با اهمیت و ضرورت موضوع مورد پژوهش، روش تحقیق و همچنین ساختار پژوهش پرداخته است. در فصل دوم مروری بر تاریخچه و دست‌آوردهای پژوهش‌های گذشته انجام شده است. مطالعات پیشین در دو بخش نشست سطح زمین در اثر حفر تونل از دیدگاه فنی و همچنین برآورد هزینه احداث تونل از دیدگاه هزینه‌ای انجام شده است. فصل سوم مربوط به توضیحات کلی در مورد شهر تبریز و موقعیت آن، زمین‌شناسی مهندسی و خطوط قطار شهری تبریز، مشخصات دستگاه حفاری، سامانه نگهداری خط ۲ قطار شهری تبریز و درنهایت به نحوه‌ی مطالعات ژئوتکنیکی که منجر به طبقه‌بندی مسیر خط دوم قطار شهری تبریز شده، پرداخته است. فصل چهارم در ابتدا، نحوه مدل‌سازی توسط نرم‌افزار FLAC3D تشریح شده و سپس نتایج نشست سطحی زمین از دیدگاه فنی مورد تحلیل و جمع‌بندی قرار گرفته است. در ابتدای فصل پنجم، نحوه محاسبه هزینه‌های حفاری تونل و احداث ایستگاه توصیف شده است. سپس این هزینه‌ها در اعماق مختلف محاسبه شده است و در بخش آخر این فصل، به بررسی، تحلیل و جمع‌بندی نتایج حاصل از برآورد هزینه‌های احداث تونل و ساخت ایستگاه برای تعیین عمق بهینه پرداخته شده است. در فصل آخر که همان فصل ششم این تحقیق به شمار می‌رود، نتیجه‌گیری این تحقیق گنجانده شده و همچنین پیشنهاداتی برای محققین آینده که قصد تحقیق در این زمینه داشته باشند، ارائه شده است.

فصل ۲: مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱. مقدمه

با افزایش جمعیت در شهرها، نیاز به راه‌های ارتباطی رشد روزافزونی داشته است. متأسفانه به خاطر وجود سازه‌های مختلف سطحی، فضای لازم جهت ساخت این راه‌ها کم بوده و در صورت وجود نیز از هزینه بالایی برخوردار است. در صورت رفع مشکل فضای کم و همچنین هزینه بالا، باعث بروز ترافیک شهری حین اجرای پروژه می‌شود. استفاده از فضاهای زیرزمینی و پروژه‌های تونل‌سازی در سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است. دلیل این امر را عواملی هم‌چون هزینه استملاک سطح بالا، صرفه‌جویی در زمان و انرژی با سفرهای درون شهری کوتاه‌تر، افزایش ایمنی و کاهش تأثیرات محیطی عبور هر روز افراد در مناطق شهری می‌تواند توجیه کند. قبل از احداث تونل باید یک ارزیابی کلی از حرکات زمین و تأثیرات نشست حاصل از آن بر سازه‌های اطراف تونل به عمل آید و همچنین بارهای وارد بر سیستم نگهداری تونل در طولانی مدت مورد بررسی قرار گیرد.

روش حفاری مکانیزه مزیت‌های فراوانی نسبت به دیگر روش‌های حفاری و نگهداری سنتی دارد. از جمله عمده این مزیت‌ها که باعث شده روش حفاری مکانیزه به عنوان مهمترین روش حفر تونل در دهه‌های اخیر به ویژه در مناطق شهری مورد توجه طراحان قرار گیرد، می‌توان به کاربرد آن در انواع مختلف زمین با شرایط متفاوت ژئوتکنیکی مثل بالا بودن تراز آب زیرزمینی، حفاری در زمین‌های نرم (عمق سربار کم) و امکان کنترل نشست‌های سطحی اشاره کرد. به گونه‌ای که حتی در چند دهه اخیر انواع ماشین‌های حفاری تمام مکانیزه با کارایی‌ها و کاربردهای مختلف تولید شده که هر کدام متناسب با شرایط مختلف ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حفاری مکانیزه معمولاً برای نگهداری تونل از سیستم‌های نگهداری بتنی پیش‌ساخته یا همان قطعات سگمنت استفاده می‌شود. از نظر اقتصادی، این سگمنت‌ها بخش قابل توجهی از ساخت تونل‌ها را شامل می‌شوند که در صورت طراحی اقتصادی‌تر آن‌ها می‌توان هزینه پروژه‌های تونل‌سازی را به میزان قابل توجهی کاهش داد [۲].

برای ارزیابی دقیق بارهای وارد بر سیستم نگهداری تونل، باید طراحی مناسب و اقتصادی از سگمنت‌ها انجام داد. معمولاً توزیع و مقدار بار وارد بر سیستم نگهداری تونل‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است [۲].

- مشخصات زمین و سیستم نگهداری تونل (نوع و سختی زمین، سختی سیستم نگهداری، هندسه مقطع عرضی تونل)
- شرایط ساخت تونل (روش حفاری و فرآیند نصب سیستم نگهداری، کیفیت دوغاب و زمان تزریق دوغاب پشت سگمنت‌ها، موقعیت صحیح دستگاه و عدم ایجاد انحراف)
- اندرکنش مابین خاک و سازه‌های موجود (سیستم نگهداری تونل، شمع‌ها و سازه‌های سطحی اطراف)

بارهای وارد بر پوشش تونل از حضور سازه‌های سطحی و زیرسطحی متأثر می‌شود و به ویژه پارامترهایی مانند سختی سازه‌ها، وزن، شکل و ابعاد فونداسیون و موقعیت قرارگیری آن‌ها تأثیر زیادی

در اندرکنش آن‌ها با تونل دارد [۲].

در فصل پیش رو، با مرور مختصری بر مطالعات انجام گرفته توسط محققان پیشین سعی شده است که به یک شناخت کلی از موضوع این تحقیق می‌توان دست یافت. مطالعات پیشین در دو بخش انجام شده است. در ابتدا نشست سطحی، حرکات زمین ناشی از حفاری تونل با تاکید بر ساخت تونل در انواع مختلف خاک‌های دانه‌ای و چندلایه دست و ارزیابی بارهای وارد بر تونل بررسی شده است. و در بخش بعدی به مطالعات انجام گرفته در خصوص برآورد هزینه‌های احداث تونل‌های مکانیزه پرداخته شده است و عوامل موثر به همراه نحوه و میزان تاثیر آن‌ها شناسایی شده است.

۲-۲. مطالعات پیشین از دیدگاه فنی

با نگاهی به مطالعات انجام شده توسط محققان پیشین می‌توان به این نتیجه رسید که روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی عددی، مدل‌سازی فیزیکی و روش‌های تجربی (مبتنی بر نتایج مطالعات موردی و پایش پروژه‌های انجام شده با مقیاس واقعی) برای بررسی فرایند حفر تونل مورد استفاده محققان قرار گرفته‌اند. در ادامه فصل به توضیح هر کدام از این روش‌ها پرداخته شده است. برای پیش‌بینی نشست‌های سطحی زمین ناشی از حفاری تونل، روش‌های تحلیلی بیشتر بر پایه فرضیات ساده‌کننده‌ای از قبیل همگنی زمین اطراف تونل پیشنهاد شده است. بیشتر محققان با استفاده از روش‌های عددی به بررسی فرایند تونل‌سازی پرداخته‌اند. روش‌های تجربی که بیشتر بر اساس تحلیل نتایج پروژه‌های واقعی ابزاربندی شده هستند، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار محققان قرار می‌دهند ولی متأسفانه در بیشتر اوقات تفسیر این نتایج با مشکلاتی همراه بوده است و علاوه بر آن به دلایل حضور ابزاربندی‌ها و همچنین ملاحظات ایمنی که از ناپایداری‌های تونل جلوگیری می‌کند، داده‌های صحرایی محدودیت‌هایی را برای تحلیل تجربی محققان دارا هستند. آزمایش‌های تمام مقیاس فیزیکی نیز بسیار گران‌قیمت بوده و اجرای آن‌ها پر از مشکلات منحصر به خود و تکرار آن‌ها نیز تحت شرایط کنترل شده سخت است. بنابراین یکی از مناسب‌ترین و به صرفه‌ترین روش‌های مطالعه پاسخ زمین به تونل‌سازی کاربرد روش‌های عددی و تطابق آن با نتایج مطالعات موردی و مانیتورینگ پروژه‌های انجام یافته با مقیاس واقعی است [۳].

۲-۲-۱. نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل در مناطق کم عمق

حفر تونل در مناطق شهری به مراتب سخت‌تر از حفر آن در فضاهای غیر شهری است. در نزدیکی سطح زمین، حرکات و نشست سطحی زمین از جمله مسائل اجتناب‌ناپذیر در حفر تونل هستند. در کل حفر تونل در خاک منجر به رهاسازی تنش‌های برجا، به هم ریخته شدن سیستم توزیع تنش‌ها، همگرا شدن دهانه تونل و در نتیجه این عوامل باعث تغییر شکل‌هایی در سطح زمین می‌شود [۳]. شروع این اثر همگرایی تونل معمولاً پیش از رسیدن جبهه کار به مقطع مورد نظر و از فاصله‌ای در حدود شعاع تونل آغاز می‌شود که تاثیر این همگرایی در فاصله حدود دو برابر قطر تونل ناچیز می‌شود.

عمق تونل‌های حفاری شده در خاک معمولاً کم است و همچنین تاثیر این حفاری تا سطح زمین گسترش یافته و باعث ایجاد فرو رفتگی‌هایی به نام نشست زمین می‌شود. نشست حاصل از حفر تونل برای سازه‌های سطحی و اطراف آن می‌تواند بسیار خطرناک باشد و مقدار این تاثیر به مولفه‌های متفاوتی از قبیل شرایط خاک، عمق تونل، قطر تونل، مقدار روبار سطحی، آب زیرزمینی و... بستگی دارد. پدیده‌ی نشست زمانی که تونل در زیر مناطق مسکونی حفر می‌شود، بیشتر حائز اهمیت است زیرا نشست سطحی زمین می‌تواند اثرات احتمالی بر ساختمان‌ها و سازه‌های سطحی بگذارد. تعیین مقدار دقیق نشست سطحی به راحتی امکان پذیر نبوده ولی تخمین و اثرات احتمالی آن بر سازه‌های سطح زمین از اهمیت به سزایی برخوردار است [۴].

۲-۱-۲-۲. بروز نشست سطحی زمین

حفاری تونل با ایجاد گسیختگی‌هایی در محیط اطراف تونل، سبب افزایش تنش در یک محدوده و نیز تغییر شکل‌هایی در خاک می‌شود که مقدار آن به جنس، نوع و لایه‌ای بودن خاک، ضخامت سیستم نگهداری و همچنین به میزان دست‌خوردگی و ناهمگنی ایجاد شده در اثر حفاری، بستگی دارد. نشست سطحی زمین، در موقعیت‌های برابری از لحاظ جنس و نوع خاک و ابعاد و عمق تونل، به روش حفاری، نگهداری موقت و دائمی سیستم نگهداری و همچنین کمینه کردن عوامل محرک و ایجاد لرزش بستگی دارد. در کل علت به وجود آمدن نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل، می‌تواند به موارد زیادی بستگی داشته باشد که در ادامه به مواردی از آن‌ها اشاره شده است [۳].

- نشست طبیعی رسوبات سطحی
 - تغییر شکل‌های حاصل از مرزبندی جدید در حوزه تنش‌های درون خاک
 - تمرکز تنش‌های نرمال در دیوارهای طرفین تونل در اثر حفاری که منجر به آرایش مجدد خاک و در نتیجه باعث بروز چرخه جدید تحکیم می‌شود.
 - حرکت زمین به سمت دیوارها و جبهه کار تونل
- علاوه بر این‌ها حفاری تونل خود، باعث زهکشی آب‌های موجود در زمین می‌شود که این امر سبب پایین رفتن سطح آب زیرزمینی شده و نتیجه آن منجر به کاهش فشار، حرکات ذرات بسیار ریز خاک و در نهایت باعث نشست در اثر تحکیم طبیعی خاک می‌شود.

۲-۱-۲-۲. عوامل موثر بر نشست سطحی زمین

حرکات زمین نتیجه اجتناب ناپذیر حفاری و ساخت تونل است. حفاری تونل باعث برهم خوردن تنش‌های برجا در زمین می‌شود، که با نصب سیستم نگهداری در تونل می‌توان آن را محدود کرد. در حقیقت ساخت هم‌زمان یک حفره و ایجاد پوشش بی نهایت صلب که کاملاً بر تونل منطبق باشد عملاً امکان‌پذیر نیست. از این جهت مقدار مشخصی تغییر شکل زمین در عمق محل حفر 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 بطور چشم‌گیری افزایش می‌یابند. مهمترین عوامل موثر در

بروز نشست در اثر حفاری تونل عبارت‌اند از: شرایط زمین، روش حفر تونل، عمق و ابعاد تونل و همچنین میدان تنش برجا که در ادامه به توضیح مختصر هر کدام پرداخته شده است [۳].

الف- شرایط زمین و ژئوتکنیک منطقه

تونل‌های کم عمق معمولاً در زمین‌هایی با خاک نرم و سست حفاری می‌شوند که این امر نیاز به در نظر گرفتن ملاحظات لازم جهت نصب سیستم نگهداری موقت دارد. در این زمین‌ها مدت زمان خود پایداری کم بوده که با اجرای به موقع سیستم‌های نگهداری موقت می‌توان یک طرح ایمن ایجاد کرد. همچنین نکته مهم می‌تواند وجود آب زیرزمینی و کاهش تنش باشد که منجر به ایجاد نشست بیشتر سطح زمین و حتی در برخی مناطق سبب ریزش نیز می‌شود. لازم به ذکر است که نوع زمین نیز در انتقال نشست‌های ایجاد شده به سطح زمین موثر است و به معنای دیگر، شکل نشست زمین در زمین‌های همگن با یک الگوی ثابت به سطح زمین منتقل می‌شود. در حالی که الگوی گسترش نشست به سطح زمین در زمین‌های ناهمگن یکنواخت نیست [۳].

ب- روش حفاری

از مهمترین اختلاف‌های روش حفاری تونل می‌توان به فاصله زمانی بین حفر تونل و نصب سیستم نگهداری اشاره کرد. هر چقدر که مدت زمان بین حفاری و نصب سیستم نگهداری کم باشد، تغییر شکل‌های کمتری در محیط زمین اتفاق می‌افتد. از این جهت روش حفر به وسیله دستگاه حفاری مکانیزه سپری نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد و به عبارتی دیگر حفاری تونل با استفاده از دستگاه‌های حفاری مکانیزه، این زمان به حداقل ممکن کاهش می‌یابد [۳].

پ- عمق تونل

از مهمترین عوامل موثر بر روی نشست سطح زمین در نتیجه حفاری تونل می‌توان به عمقی که تونل در آن حفر می‌شود، اشاره کرد. با افزایش عمق حفر تونل تا یک حدی نشست سطح زمین افزایش پیدا کرده و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند، به طوری که در اعماق بیشتر قبل از رسیدن به سطح زمین پدیده‌ی نشست متوقف شده و حتی در سطح زمین نیز نشست مشاهده نمی‌شود [۳].

ت- ابعاد فضای حفاری تونل

یکی دیگر از مواردی که در میزان نشست سطح زمین تاثیر بسزایی دارد، ابعاد تونل است. هر چقدر ابعاد دهانه تونل بیشتر شود باعث کاهش زمان خودپایداری تونل می‌شود که این امر افزایش نشست زمین را به همراه دارد. با افزایش اندازه تونل، کارایی ابزار نگهداری موقت نیز کاهش می‌یابد [۳].

ث- میدان تنش برجا

از دیگر پارامترهای موثر بر نشست سطح زمین بر اثر حفر تونل می‌توان به میدان تنش برجا اشاره کرد. مقدار مولفه تنش قائم که عمدتاً وابسته روباره تونل و شرایط آب زیرزمینی هستند، بیشترین

تاثیر را در نشست زمین دارند. مولفه تنش جانبی نیز در اطراف تونل با توجه به شرایط خاص تکنیکی محل می‌تواند زیاد شود که این امر خود سبب بیشتر شدن پایداری تونل می‌شود. همچنین لازم به ذکر است اگر در مواردی از تونل‌های کم عمق در اثر افزایش تنش جانبی، ممکن است که سنگ‌های قسمت فوقانی تونل بشکند و در نتیجه نشست در سطح زمین اتفاق بیافتد [۳].

۲-۲-۱-۳. راه کارهای کنترل نشست سطحی زمین

برای کنترل نشست سطح زمین می‌توان شرایط کلی پروژه را در صورت امکان با حفر تونل در اعماق بیشتر و کاهش عرض حفاری بهبود بخشید. همچنین با حفر تونل در لایه‌هایی با شرایط بهتر ژئومکانیکی (از قبیل بهسازی خواص زمین، جلوگیری از نفوذ آب و سست شدن توده خاک و تزریق کافی و حتی المقدور سریع در خاک) می‌توان نشست سطحی زمین را کاهش داد. از عوامل مهم دیگر برای کاهش اثر نشست سطح زمین می‌توان به بهسازی سازه‌ای ساختمان‌ها مثل تقویت پی ساختمان‌ها و تغییر محل تاسیسات آب و گاز اشاره کرد. با افزایش سرعت احداث تونل، انجام مهار بندی محکم، کافی و یکپارچه در سینه کار و دیواره های تونل و در آخر با به حداقل رساندن حفره- های موجود اطراف پوشش تونل و ناحیه حفاری شده می‌توان در حین ساخت تونل شرایط زمین را بهبود بخشیده و نشست سطح زمین را به حداقل ممکن رساند [۵].

۲-۲-۲. عوامل موثر بر حرکات زمین بر اثر حفر مکانیزه تونل

عوامل موثر بر حرکات زمین در اثر تونلسازی مکانیزه را می‌توان به پنج مورد کلی شامل؛ فشار سینه کار، اضافه حفاری تونل، فضای خالی در انتهای شیلد دستگاه، تغییر شکل سیستم نگهداری تونل و رفتار وابسته به زمان مصالح زمین، تقسیم بندی کرد [۵].

۲-۲-۲-۱. فشار سینه کار

مقدار نشست سطح زمین با توجه به نوع سیستم نگهداری جبهه کار حفاری و همچنین نوع دستگاه حفاری متفاوت خواهد بود. امروزه برای حفاری تونل در مناطق شهری معمولاً از دستگاه‌های حفاری مکانیزه با فشار تعادل زمین^۱ استفاده می‌شود که این مشکل را تا حدودی حل کرده و در صورت کنترل مناسب فشار وارد بر جبهه کار، مقدار نشست ناچیز خواهد بود [۵].

۲-۲-۲-۲. اضافه حفاری تونل

از دیگر عوامل مهم و اثرگذار بر حرکات زمین، اضافه حفر در اطراف تونل است. اضافه حفاری تونل بر اثر عوامل مختلفی به وجود می‌آید. از آن میان می‌توان به موارد زیر به عنوان مهمترین آن‌ها اشاره کرد [۵].

- بیشتر بودن قطر کاترهد دستگاه حفاری نسبت به سپر آن که از تماس سپر با خاک

¹ Earth Pressure Balance (EPB)

جلوگیری کرده و باعث می‌شود که اصطکاک بین سپر و خاک کاهش یابد و در نتیجه دستگاه حین حفاری گیر نکند.

- مخروطی بودن سپر دستگاه حفاری به منظور سهولت حرکت آن (سپر در قسمت جلو دارای قطر بیشتر و در انتها از قطر آن کاسته می‌شود).
- هدایت نامناسب سپر دستگاه توسط پرسنل راهبری، به ویژه در حرکت دستگاه حفاری به صورت شیب‌دار و یا حرکت در مسیرهای منحنی شکل تونل

۳-۲-۲-۲. فضای خالی در انتهای شیلد دستگاه

در قسمت انتهای سپر دستگاه حفاری فضایی خالی بین سپر و سیستم نگهداری (سگمنت) وجود دارد که با تزریق آبی دوغاب این مقدار به حداقل می‌رسد. در صورتی که زمان تزریق دوغاب به طول انجامد و یا تا پر شدن آن فضا توسط دوغاب و سخت شدن آن زمان زیادی صرف شود، زمین به حالت شعاعی تمایل به همگرا شدن به سمت تونل پیدا می‌کند. این مقدار فضا به ضخامت سپر دستگاه و همچنین قطر تونل بستگی داشته و در حالت‌های مختلف، متفاوت است [۵].

۴-۲-۲-۲. تغییر شکل سیستم نگهداری تونل

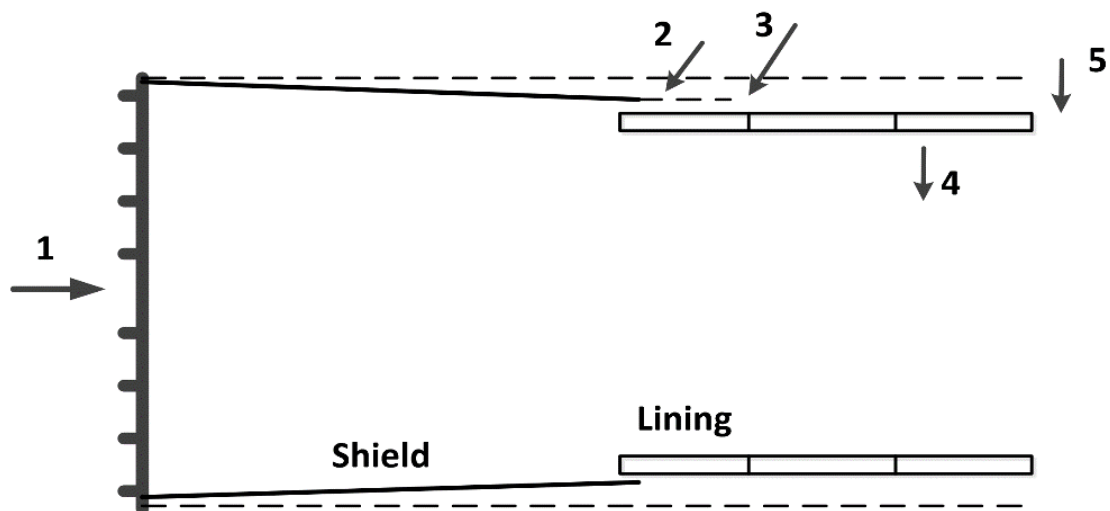
در تونل‌های کم عمق با قطر بزرگ این تغییر شکل در سیستم نگهداری تونل قابل مشاهده است. با ارزیابی مناسب بارهای وارده و همچنین طراحی مناسب و درست پوشش تونل، این مولفه تغییر شکل را که به شدت به سختی پوشش تونل بستگی دارد، می‌توان به مقدار ناچیزی رساند [۵].

۵-۲-۲-۲. تحکیم یا رفتار وابسته به زمان مصالح زمین

رفتار زمان‌مند خاک‌ها یا تحکیم، زمانی مطرح می‌شود که شرایط انجام تحکیم وجود داشته باشد. در شکل ۱-۲، مولفه‌های مختلف حرکات زمین ناشی از تونلسازی مکانیزه نشان داده شده است.

۳-۲-۲. پیش‌بینی حرکات زمین در اثر ساخت تونل

عدم شناخت لازم از حرکات زمین ناشی از حفاری تونل به طور حتم می‌تواند خطرات زیادی را به ویژه در مناطق شهری به همراه داشته باشد. نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین باعث آسیب به سازه‌ها و ساختمان‌های سطحی می‌شود و همچنین در نشست‌های زیرسطحی باعث تخریب و آسیب دیدن سازه‌های مدفون مثل خطوط فاضلاب و گاز و ... خواهد شد. انجام اقدامات متقابل در برابر نشست زمین، درک کاملی از مکانیزم‌های حرکات زمین را می‌طلبد [۶].



- 1 Face loss
- 2 Radial movements towards the shield
- 3 Closure of the tail void
- 4 Lining deflection
- 5 Consolidation

شکل ۱-۲. پارامترهای موثر در حرکت زمین حین حفر تونل به روش مکانیزه [۵].

۲-۳-۱. روش‌های تجربی

روش‌های تجربی به دلیل سادگی کاربرد و پیش بینی حرکات زمین با دقت قابل قبول در مطالعات اولیه دارای کاربرد وسیعی در کارهای عملی بوده و یک شناخت کلی را از رفتار زمین مورد مطالعه فراهم می‌کند. از معایب این روش نیز می‌توان به صفحه‌ای فرض کردن کرنش در محاسبات، کاربرد کم در زمین‌های غیر همگن و لایه‌ای و در نظر گرفته نشدن طبیعت سه بعدی ساخت تونل در برخی تحقیقات و... اشاره کرد. در ادامه به بیان روابط تجربی ارایه شده برای حرکات زمین پرداخته شده است.

الف - پروفیل‌های تجربی نشست عرضی، حالت زمین آزاد^۱

تاثیر نوع خاک در نشست سطح زمین را ترزاقی^۲ با استفاده از یک سری آزمایشات بیان کرد. بر این اساس، جابه‌جایی زمین در خاک‌های دانه‌ای به علت اتساع به تدریج تا سطح زمین کاهش می‌یابد ولی این تغییر حجم در لایه‌های رسی به علت چسبندگی بسیار کم بوده و در نتیجه مقدار نشست در آن کمتر مشهود است [۶]. پک^۳ با جمع‌آوری داده‌های حاصل از مطالعات بیش از بیست مورد بر روی نشست سطحی گزارشی ارایه کرد که در آن به تخمین نشست سطحی با استفاده از منحنی توزیع

^۱ Greenfield

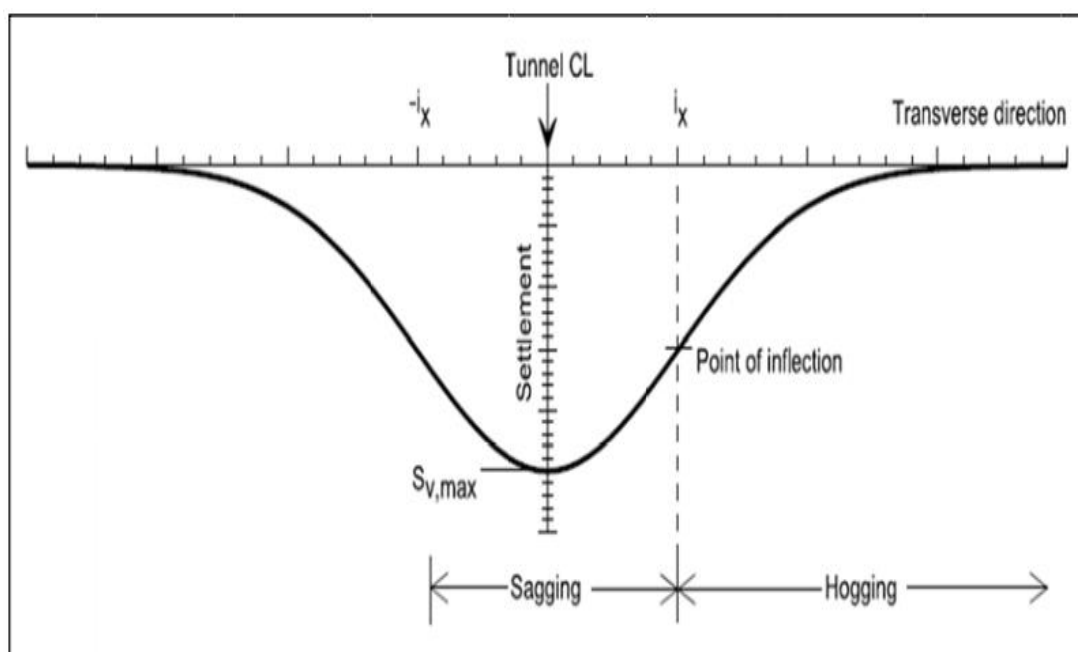
^۲ Terzaghi

^۳ Peck

نرمال آماری با منحنی گاوس پرداخت [۷]. اوریلی و نیو^۱، بر اساس توزیع نرمال برای پیش‌بینی پروفیل‌های نشست سطحی رابطه (۲-۱)، را ارایه کردند [۸]. مایر^۲ و همکارانش به وسیله اندازه‌گیری‌های صحرایی و آزمایش‌های سانتریفیوژ رابطه اوریلی و نیو را تایید کردند [۹].

$$S = S_{max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (2-1)$$

در رابطه فوق S_{max} نشست سطحی ماکزیمم بالای خط مرکزی تونل، S برابر نشست سطحی، x فاصله افقی از خط مرکزی تونل در جهت عرضی و i نیز فاصله خط مرکزی تونل تا نقطه عطف پروفیل نشست سطحی یا پهنای گودی نشست است. در نقطه عطف منحنی گودی نشست دارای بیشترین مقدار شیب است که در فاصله i از مرکز تونل قرار دارد. پروفیل نشست عرضی بدست آمده از معادله توزیع نرمال در شکل ۲-۲، نشان داده شده است.



شکل ۲-۲. پروفیل نشست عرضی حاصل از معادله توزیع نرمال [۷].

ب- تعیین پهنای گودی نشست

اشمیت^۳ نحوه محاسبه پارامتر پهنای گودی نشست را با استفاده از رابطه (۲-۲)، ارایه کرد [۱۰].

$$\frac{i_o}{R} = K \left(\frac{Z_o}{2R}\right)^n \quad (2-2)$$

در رابطه فوق Z_o فاصله عمودی محور تونل تا سطح زمین است. پک با توجه به نتایج حاصل از مشاهدات صحرایی بیان کرد که مقادیر n در محدوده ۰/۸ الی ۱ بوده و همچنین مقادیر K برای

¹ O'Reilly

² Mair

³ Schmidt

رس‌های نرم تا سخت برابر با یک، برای رس‌های سخت و ماسه‌های خشک کمتر از یک و برای ماسه-های آبدار این مقدار بیشتر از یک است [۷].

کوردینگ و هانسمایر^۱ یک رابطه نرمالایز شده نسبت به قطر تونل را در قالب رابطه (۲-۳)، ارایه کردند [۱۱].

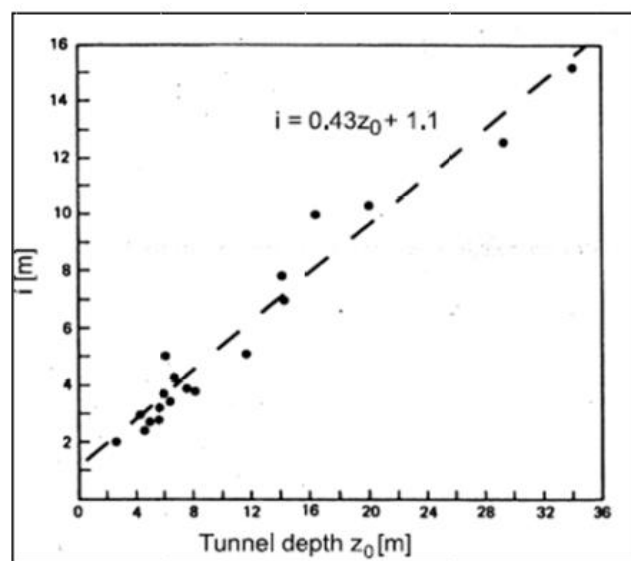
$$\frac{2i}{D} = \left(\frac{Z}{D}\right)^{0.8} \quad (2-3)$$

اوریلی و نیو برای زمین‌های چسبنده و همچنین غیر چسبنده به ترتیب رابطه (۲-۴) و رابطه (۲-۵) را به صورت تجربی بر اساس داده‌های حاصل از ۱۹ تونل در انگلستان پیشنهاد کردند [۸].

$$i = 0.43 (Z_o) + 1.1 \quad 3 \leq Z_o \leq 34 \quad (2-4)$$

$$i = 0.28 (Z_o) + 0.1 \quad 6 \leq Z_o \leq 10 \quad (2-5)$$

شکل ۲-۳، رابطه بین پارامتر عرض گودی نشست و عمق محور تونل برای خاک‌های چسبنده را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳. رابطه بین پارامتر عرض گودی نشست و عمق محور تونل برای خاک‌های چسبنده [۸].

پ- حرکات زمین در خاک‌های چند لایه

نیو و اوریلی در مورد حرکات ایجاد شده برای خاک‌های چند لایه رابطه‌ای را ارایه کردند که برای یک زمین متشکل از دو لایه، رابطه پیشنهادی به صورت (۲-۶) است.

$$i = K_1 Z_1 + K_2 Z_2 \quad (2-6)$$

¹ Cording and Hansmire

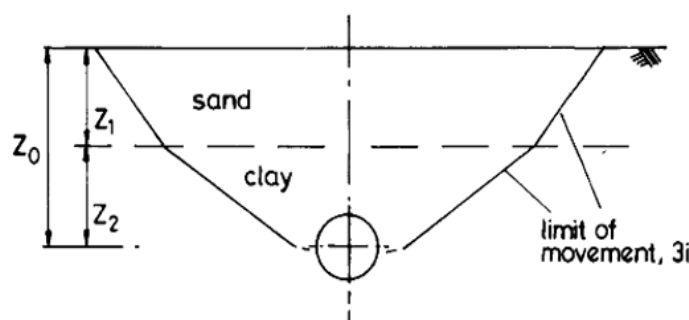
K_1 ضریب پهنای گودی نشست برای خاک لایه شماره یک با ضخامت Z_1 و همچنین K_2 ضریب پهنای گودی نشست برای خاک لایه شماره یک با ضخامت Z_2 است. با ترکیب (۲-۴) و (۲-۵) برای خاک‌های لایه‌ای متشکل از خاک دانه‌ای و چسبنده، روابط زیر برای شرایط مختلف به دست می‌آیند: برای تونل‌های حفر شده در لایه خاک رس که زیر یک لایه دانه‌ای از جنس ماسه قرار گرفته است، (۲-۷)، پیشنهاد شده است.

$$i = 0.43 Z_1 + 0.28 Z_2 + 1.1 \quad (2-7)$$

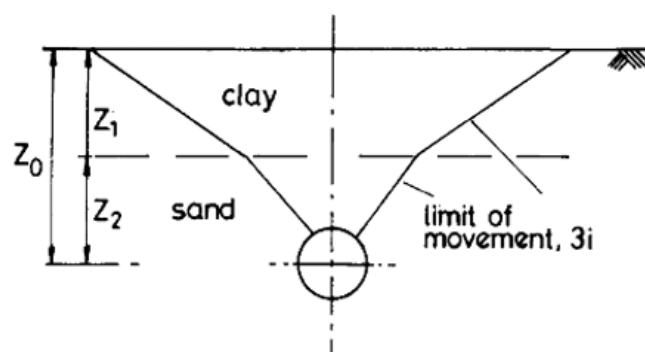
همچنین برای تونل‌های حفر شده در لایه خاک رس که زیر یک لایه دانه‌ای از جنس ماسه قرار گرفته است، رابطه (۲-۸)، پیشنهاد شده است.

$$i = 0.28 Z_1 + 0.43 Z_2 + 0.1 \quad (2-8)$$

سلبی^۱ به وسیله بر هم نهی گودی‌های نشست سطحی برای زمین دو لایه‌ای تحلیل عددی انجام داد. نتایج حاصل از رفتار خاک به صورت نحوه گسترش حرکات زمین ناشی از حفر تونل در شکل ۴-۲، نشان داده شده است [۱۲].



الف) در لایه ماسه بر روی لایه رس



ب) در لایه رس بر روی لایه ماسه

شکل ۴-۲. گسترش حرکات زمین [۱۲].

۲-۳-۲-۲. روش‌های تحلیلی

با توجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته در روش‌های تحلیلی، از قبیل همگن در نظر گرفتن خاک

¹ Selby

اطراف تونل و همچنین عدم کاربرد گسترده در بررسی تاثیر سازه‌های سطحی و لایه‌بندی زمین با توجه به پیچیدگی اندرکنش تونل و ساختمان، زیاد مرسوم نبوده است. برای تعیین جابجایی‌های زمین در اثر حفر تونل روابط مختلفی ارائه شده که در ادامه به چند مورد از آن پرداخته شده است.

الف - روش ساگاستا و گونزالس^۱

ساگاستا و گونزالس، رابطه‌ای برای تعیین جابجایی در جهت عمود بر سطح زمین ارائه کردند که از معایب روش مذکور این است که این روش برای محیط‌های تراکم ناپذیر پیشنهاد شده و مد تغییر شکل واقعی تونل را نشان نداده است [۱۳].

ب - روش وریوجیت و بوکر^۲

وریوجیت و بوکر، رابطه نظری فرم بسته را ارائه کردند که برای تخمین جابجایی قائم در سطح زمین به صورت رابطه (۲-۹)، است.

$$W(y) = 4\varepsilon a_o^2(1 - \vartheta) \frac{Z_o}{y^2 + Z_o^2} - 2\delta a_o^2 Z_o \left(\frac{y^2 - Z_o^2}{y^2 + Z_o^2} \right) \quad (2-9)$$

در این رابطه؛ Z_o عمق تونل، y فاصله از امتداد مرکزی تونل، a_o شعاع تونل، $\varepsilon = \frac{V_s}{4(1-\vartheta)}$ و V_s حجم افت زمین است که به صورت نسبت حجم گودی نشست به حجم حفاری شده در هر واحد پیشروی تعریف می‌شود. در این روش تراکم‌پذیری محیط نیز در نظر گرفته شده است [۱۳].

پ - روش لاگاناتان و پولوس^۳

روش لاگاناتان و پولوس اصلاح شده روش وریوجیت و بوکر است. این محققان برای تخمین نشست زمین از پارامتر گپ استفاده کردند که در آن نشست زمین به صورت منطقی‌تری برآورد می‌شود. آن‌ها با ارائه رابطه (۲-۱۰) جابجایی را در جهت عمود بر سطح زمین محاسبه کردند [۱۳].

$$W(y) = 4(1 - \vartheta)a_o^2 \left(\frac{Z_o}{y^2 + Z_o^2} \right) \left(\frac{4ga_o}{4a_o^2} \right) \exp \left[-\frac{1.38 y^2}{(Z_o + a_o)^2} \right] \quad (2-10)$$

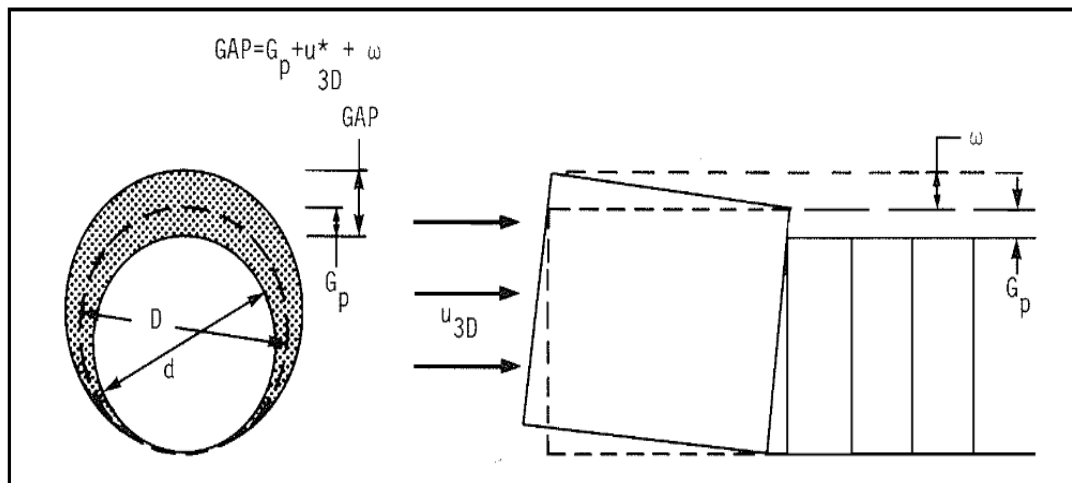
منحنی پیش‌بینی نشست سطحی به دست آمده از رابطه این محققان با این که تطابق خوبی با برخی نتایج گذشته داشت، ولی همچنان پارامتر گپ خود نیز تابعی از سه مولفه دیگر است تا با منحنی نشست واقعی تطابق داشته باشد. این مولفه‌ها عبارت‌اند از: فضای خالی فیزیکی واقعی (G_p)، تغییر شکل مجازی در سینه کار (U_{3D}) و همچنین مهارت کار پرسنل (ω). فضای خالی فیزیکی واقعی (G_p)، ناشی از اضافه حفاری ماشین، ضخامت شیلد و اختلاف قطر سیستم نگهداری تونل با شیلد دستگاه است. همچنین در صورت پایین بودن مهارت اپراتور دستگاه حفاری، ممکن است کاترهد دستگاه کج شده و در نتیجه از راستای مسیر اصلی خارج شود. هر کدام از این مولفه‌ها از

¹ Sagaseta and Gonzalez

² Verruijt and Booker

³ Loganathan and Poulos

مقطعی به مقطع دیگر متفاوت بوده و بسته به شرایط زمین و نحوه عملیات اجرایی دستگاه و پرسنل آن تغییر می‌کند [۱۴]. این مولفه‌های موثر در پارامتر گپ حاصل از حفاری تونل به صورت شماتیک در شکل ۵-۲، نشان داده شده است که d قطر خارجی سیستم نگهداری تونل و D قطر تمام شده حفاری است.



شکل ۵-۲. پارامترهای موثر در میزان گپ کل در سینه کار تونل [۱۴].

۲-۳-۲-۳. روش‌های عددی

در گذشته به دلیل هزینه و صرف زمان زیاد در استفاده از رایانه‌ها، محققین استفاده از روابط تجربی را ترجیح می‌دادند. امروزه با توسعه و پیشرفت رایانه‌ها محققین به دلیل سرعت و دقت بالای رایانه‌ها در تجزیه و تحلیل مسایل از روش‌های عددی استفاده می‌کنند. در استفاده از روش‌های تجربی باید بر این نکته توجه داشت که این روش‌ها به دلیل ساده سازی‌ها و جدا از هم بودن روابط، جواب دقیقی از مساله را نمی‌توانند بیان کنند. این در حالی است که روش‌های عددی توانایی اعمال شرایط و ویژگی‌های بسیاری از پروژه واقعی را در مدل عددی امکان‌پذیر می‌کنند. همچنین هر چه مدل ساخته شده با شرایط واقعی هم‌خوانی بیشتری داشته باشد انتظار می‌رود جوابی دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت داشته باشد.

به طور کلی با روی کار آمدن روش‌های عددی پیشرفت زیادی در علوم مهندسی از جمله تونل‌سازی انجام شد که در اصل ویژگی‌هایی از جمله موارد زیر باعث این پیشرفت بوده‌اند.

- امکان بررسی سه بعدی
- توانایی اعمال شرایط پیچیده خاک
- ساخت هندسه‌های مختلف، مانند تونل با دهانه غیر دایره‌ای
- اعمال مدل‌های رفتاری مختلف

- در نظر گرفتن تاثیر چندین سازه بر هم
- روش‌های ساخت مرحله‌ای
- توانایی تحلیل دینامیکی و هیدرومکانیکی

شرایط اجرای یک پروژه تونل‌سازی شرایطی پیچیده است، به عبارتی عوامل متعددی بر یکدیگر اثر می‌کنند. از طرف دیگر، بیش‌تر راه‌حل‌های تجربی و تحلیلی همراه با ساده‌سازی‌ها و یا محدودیت‌هایی هستند. از این‌رو نمی‌توان در یک رابطه تمامی عوامل موثر بر هم را اثر داد. به عبارتی راه‌حل‌ها جدا از هم هستند.

روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های تجربی و تحلیلی، روش‌هایی جامع‌تر هستند. چرا که در روش‌های عددی می‌توان جنبه‌های مختلف و هم‌چنین عوامل متعدد تاثیرگذار بر اجرای یک پروژه تونل‌سازی را اثر داد. از این‌رو روش‌های عددی به عنوان ابزار اصلی برای مدل‌سازی یک پروژه، شبیه‌سازی رفتار و برهم‌کنش زمین و تونل در مراحل مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل‌سازی‌های عددی، دقت نتایج وابسته به میزان آگاهی از شرایط برجا و چگونگی رفتار محیط درون‌گیر است. از طرفی خاک‌ها با توجه به ساختار مواد تشکیل دهنده خود دامنه وسیعی از رفتارها را از خود نشان می‌دهند که امکان اعمال همه آن‌ها در یک مدل رفتاری واحد وجود ندارد،

۲-۴. تاثیر حفر تونل بر سازه‌های سطحی اطراف

بخش مهمی از مطالعات مربوط به اثرات حفر تونل در مناطق شهری مربوط به ارزیابی آسیب‌های وارده بر سازه‌های سطحی اطراف آن بوده و از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بورلند^۱ و همکارانش در سال ۱۹۷۴ برای ارزیابی آسیب‌های وارده بر سازه‌های سطحی، یک طبقه بندی را بر مبنای کرنش کششی بحرانی (کرنش متناظر با ایجاد ترک قابل دید و واضح باشد) ارائه کردند. هم‌چنین در ادامه تحقیقات خود در سال ۱۹۷۷ نیز به جای کرنش بحرانی، کرنش کششی آستانه متناظر با بهره‌برداری ساختمان را معرفی کردند [۱۵]. بوسکار دین و کوردینگ^۲ برای ارزیابی آسیب‌های وارده بر سازه‌های سطحی بر اساس نتایج مطالعات موردی، چارتی را پیشنهاد دادند که آسیب‌های وارده را به پنج گروه و الگو تقسیم بندی می‌کند [۱۶]. مایر^۳ و همکارانش الگوی آسیبی را برای بناها بر اساس اعوجاج زاویه‌ای برای بخش‌های متفاوت سازه واقع در ناحیه مقعر و محدب پروفیل نشست عرضی ارائه کردند [۱۷].

۲-۵. پایداری جبهه کار

ارزیابی فشار پایداری جبهه کار در طراحی و ساخت تونل به ویژه در تونل‌های کم عمق و مناطق شهری بسیار مهم است. دستگاه‌های مختلف حفاری مکانیزه هر کدام از طریقه‌های متفاوتی برای

¹ Burland

² Boscardin and Cording

³ Mair

پایداری جبهه کار استفاده می کنند. از مرسوم ترین نوع دستگاه های حفاری مکانیزه در مناطق شهری می توان به ماشین های تعادلی فشار زمین اشاره کرد که با ایجاد کردن شرایط تعادل بین حجم مصالح حفاری شده و حجم تخلیه آن مصالح توسط نقاله مارپیچی از درون محفظه دستگاه، فشار جبهه کار تونل به تعادل می رساند. فشار داخل محفظه حفاری دستگاه و همچنین نسبت حجم مصالح تخلیه شده به حجم مصالح حفاری شده از پارامترهای مهم در کنترل پیشروی دستگاه حفاری مکانیزه هستند. اگر نسبت حجم مصالح تخلیه شده به حجم مصالح حفاری شده برابر با مقدار یک باشد، تعادل ایجاد می شود و در صورتی که این مقدار کمتر یا بیشتر از یک باشد به ترتیب باعث افزایش و کاهش فشار جبهه کار تونل می شود. به معنای فنی تر می توان گفت که برای پایداری و حفظ جبهه کار تونل و در نتیجه به حداقل رساندن جابجایی و حرکات زمین، فشار جبهه کار را برابر با فشار زمین در حالت سکون در نظر می گیرند.

یکی از مهمترین پارامترها برای پیشروی دستگاه حفاری در زمین های خاکی که با ماشین های فشار تعادلی زمین حفاری می شوند، مقدار فشار مناسب جبهه کار تونل برای تامین پایداری سینه کار تونل است. در جبهه کار تونل بیشترین فشار خاک وارده به دستگاه حفاری، همان حداکثر فشار قابل تحمل از طرف توده خاک در سینه کار است که همیشه مقدارش از فشار عمودی خاک در آن مقطع کمتر است [۱۰]. بروئر^۱ در سال ۲۰۰۱، برای محاسبه فشار نگهداری جبهه کار در حین حفاری با ماشین های سپر دوغابی و همچنین در خاک های چند لایه ای، مدل گسیختگی گوه ای را بسط داده و تاثیر تزریق دوغاب به خاک و قوسی شدن خاک بالای تونل نیز در معادلات خود لحاظ کردند که این امر باعث بالا رفتن دقت پیش بینی حداقل فشار نگهداری برای شرایط جبهه کار ناهمگن در مدل پایداری گوه شده است [۱۸]. اکلیک^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۰، با کاربرد سانتریفیوژ و با استفاده از مدل سازی فیزیکی، فشار مورد نیاز برای پایداری جبهه کار تونل را برای خاک های ماسه ای با چگالی - های متفاوت و مقدار روباره به قطرهای متفاوت تونل، بررسی و برآورد کردند [۱۹]. چن^۳ و همکارانش با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی، پایداری جبهه کار تونل های کم عمق در خاک های ماسه ای خشک را تحلیل کردند [۲۰].

روابط تحلیلی زیادی را محققان برای محاسبه فشار سینه کار تونل ارائه کرده اند که بیشتر آن ها با استفاده از سطوح گوه ای فرضی در برابر جبهه کار تونل روابط خود را مطرح کردند. در ادامه سه روش متداول برای تخمین فشار جبهه کار با توجه به کاربرد بیشتر و سادگی این روش ها بیان شده اند.

۲-۶. ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل

مقدار و توزیع بار وارد بر سیستم نگهداری تونل ها به مولفه های مختلفی از قبیل مشخصات فیزیکی زمین و سیستم نگهداری (مثل: نوع و سختی زمین، سختی سیستم نگهداری، هندسه مقطع عرضی

¹ Broere

² Aklik

³ Chen

تونل)، شرایط مختلف حفر تونل (روش حفر تونل و فرآیند نصب سیستم نگهداری آن، کیفیت تزریق دوغاب پشت سگمنت‌ها و زمان انجام آن، موقعیت درست دستگاه و انحراف نداشتن آن)، و اندرکنش بین خاک و سازه‌های موجود در محیط تونل بستگی دارد [۲].

با ارزیابی و برآورد مقدار بارهای اعمالی برای سیستم نگهداری برخی از تونل‌های حفاری شده در پروژه‌های قبلی، نتایج نشان می‌دهد که سیستم نگهداری به ویژه در شرایط مناسب ژئوتکنیکی زمین ممکن است بسیار بزرگ‌تر از مقادیر واقعی آن باشد. ماشیمو و ایشیمورا^۱ در ژاپن بر طبق اندازه‌گیری-های میدانی انجام شده برای ارزیابی مقادیر بارهای وارد بر سیستم نگهداری تونل‌های حفر شده درون خاک‌هایی از جنس شن را مورد مطالعه قرار داده و نیز با روابط ترزاقی مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که مقادیر ارزیابی شده توسط روابط ترزاقی در اکثر وارد از مقادیر بارهای اندازه‌گیری شده بیشتر است [۲۱].

هاشیموتو^۲ و همکارانش در یک مشاهده صحرایی دیگر فشار روباره بر روی سیستم نگهداری تونل در زمین‌های با شرایط ژئوتکنیکی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. جنس زمین‌هایی که در آن تونل‌ها حفاری شده بودند، شامل خاک‌های ماسه‌ای، رس نرم و رس سخت بودند. نتایج بیان‌گر این موضوع است که روابط مرسوم مورد استفاده برای محاسبه بارهای وارد بر سیستم نگهداری تونل‌ها منجر به ارزیابی دقیقی نمی‌شود و لازم است که مطالعات بیشتری انجام شود. نتایج این محققان همچنین نشان داد که با یک تزریق دوغاب درست و صحیح در شرایط ژئوتکنیکی بهتر زمین (رس سخت و ماسه متراکم)، بارهای وارده بر سیستم نگهداری تونل بسیار کمتر از مقدار تئوری آن است [۲۲].

نونس و مگوئید^۳ با استفاده از مدل‌سازی عددی و همچنین مدل‌سازی فیزیکی تحت شتاب ثقل، تاثیر پارامترهای مختلف یک لایه سخت ماسه‌ای بر روی تنش‌های اعمال شده بر سیستم نگهداری تونل بررسی کردند و نتایج حاصل، تاثیر زیاد لایه‌بندی خاک بر توزیع بارهای اعمالی بر سیستم نگهداری را نشان داد [۲۳].

لئونگ و مگوئید^۴ تاثیر وجود فضای خالی موضعی در پشت سیستم نگهداری تونل بر روی بارهای وارد بر آن را با کاربرد مدل فیزیکی تحت شتاب ثقل بررسی کردند [۲۴].

تیچاو راستکان و تاتان^۵ در سال ۲۰۱۰، با استفاده از مدل‌سازی عددی تاثیر وجود اتصالات مابین قطعات سگمنت را بر روی بارهای وارد بر سیستم نگهداری تونل مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که مقدار بیشینه لنگر خمشی مورد نیاز سیستم نگهداری که حاوی اتصالات بین سگمنت‌ها بودند نسبت به سیستم نگهداری یکپارچه (یک رینگ استوانه‌ای کامل بدون اتصالات) کمتر است. کاهش لنگر خمشی به وسیله پارامتر ضریب کاهش لنگر قابل بیان بوده است که مقدار آن تابعی از

¹ Mashimo and Ishimura

² Hashimoto

³ Nunes and Meguid

⁴ Leung, C. and Meguid

⁵ Teachavorasinskun, S. and Tanan

تعداد سگمنت‌ها در هر رینگ و سختی زمین اطراف بوده و معمولاً مابین $0/3$ تا $0/5$ است [۲۵].
النهاس^۱ و همکارانش با روش همگرایی - همجواری (یا همان روش منحنی‌های مشخصه روشی) در تونل‌های کم‌عمق و عمیق، اندر کنش سیستم نگهداری تونل و زمین را مطالعه کردند. در روش مذکور اندرکنش خاک و سیستم نگهداری تونل با در نظر گرفتن رفتار مستقل آن‌ها، بطور مستقل تحلیل می‌شود. کاربرد این روش در محاسبه فشار اعمالی بر سیستم نگهداری تونل بیشتر نمایان می‌شود که اساس آن شامل قطع دادن دو منحنی مشخصه تنش شعاعی (به صورت تابعی از کرنش شعاعی) و منحنی عکس العمل سیستم نگهداری تونل^۲ است [۲۶].

چونگ^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۶، به مقایسه بین دو روش تحلیل و عددی برای طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها در زمین‌های نرم پرداختند. نتایج نشان دادند که مقادیر به دست آمده از روش عددی برای بارهای وارد بر سیستم نگهداری تونل کمتر از مقادیر روش‌های تحلیلی هستند که دلیل این اختلاف در مقادیر نیز مربوط به قابلیت مدل‌سازی‌های عددی در مدل کردن پدیده قوس تونل است [۲۷].

اکثر مطالعات بر روی تاثیرات حفر تونل در زمین‌های همگن بوده است و مطالعات کمتری در خصوص تاثیر لایه‌بندی زمین بر نشست و بارهای وارد بر سیستم نگهداری تونل انجام شده است. از مهمترین مطالعات مربوط به تاثیر لایه‌بندی خاک بر میزان بارهای وارده به سیستم نگهداری تونل و همچنین تاثیر آن بر جابجایی‌های زمین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. گرنت و تیلور^۴ در سال ۱۹۹۶، با انجام یک سری آزمایشات سانتریفیوژ اثر لایه‌ای بودن خاک را حین حفر تونل مدل‌سازی کردند. آن‌ها از یک غشاء لاستیکی برای شبیه‌سازی حفاری تونل استفاده کردند. حفاری تونل در تمامی آزمایشات انجام شده در لایه رسی انجام گرفته و یک لایه ماسه‌ای با ضخامت سه برابر قطر تونل (این ضخامت دوباره در تمامی آزمایش‌ها ثابت بوده است) بر روی لایه رس قرار داده شد. نتایج حاکی از آن است که نمی‌توان از اثرات لایه بندی خاک چشم‌پوشی کرد و همچنین تاثیرات زیادی در جابجایی‌های زمین ایجاد می‌کند [۲۸]. در ادامه کارهای این محققان، هاگیوارا^۵ و همکارانش با استفاده از انجام یک سری آزمایش‌های سانتریفیوژ، تاثیر جنس خاک، سختی و همچنین درجه اشباع لایه سطحی را بر روی نشست سطحی زمین تونل‌های حفاری شده بررسی کردند. انجام آزمایش‌ها نتایج را این‌گونه نشان داد که جنس خاک و سختی لایه سطحی تاثیرات قابل ملاحظه‌ای در توزیع جابجایی‌های لایه پایینی داشته و میزان نشست سطحی را غیر واقعی تخمین می‌زنند [۲۹]. چوو^۶ و همکارانش با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی، جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف تونل‌های دو قلوئی فاقد سیستم نگهداری را در زمین‌های سنگی هموزن بررسی کردند. لایه‌بندی زمین دارای

¹ El-Nahhas

² Support Reaction Curve (SRC)

³ Chong

⁴ Grant and Taylor

⁵ Hagiwara

⁶ Chu

سختی‌های متفاوت بوده و تونل‌های دو قلو نیز در تمامی آزمایش‌ها در داخل لایه‌های دارای سختی کمتر حفاری شده‌اند [۳۰]. پارک و آداجی^۱ با استفاده از مدل دریچه دو بعدی تاثیر مقدار شیب لایه‌بندی خاک را بر روی مقادیر نشست سطحی زمین و همچنین فشار مورد نیاز برای پایداری جبهه کار بررسی کردند. در مدل‌سازی مذکور با استفاده از مکعب‌های آلومینیومی و میله‌ها لایه‌بندی خاک را با شیب‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق را انجام دادند و نتایج به دست آمده نشان دادند که بیشترین تاثیر را بر روی توزیع نامتقارن فشار زمین نسبت به حالت زمین هموزن، زاویه ۶۰ درجه دارد [۳۱]. کلاف و لکا^۲ تاثیر شرایط مختلف جبهه کار و همچنین تاثیر روش حفر تونل بر زمین به ویژه وقتی که جبهه کار تونل لایه‌بندی باشد را بررسی کردند [۳۲].

۳-۲. مطالعات پیشین از دیدگاه هزینه‌ای

با توجه به افزایش جمعیت، ساخت تونل در سراسر جهان در حال افزایش است. بر این اساس، برای جلوگیری از افزایش هزینه‌ها، نیاز به استفاده وسیع‌تر از فضای موجود است. پیش‌بینی هزینه، عامل مهمی برای موفقیت یک پروژه عمرانی است. تخمین دقیق از هزینه احداث تونل در مراحل اولیه طراحی تونل از اهمیت بیشتری برخوردار است. به ویژه در پروژه‌های احداث تونل، جایی که تنوع شرایط ژئوتکنیکی می‌تواند برآوردهای اولیه را تغییر دهد، همچنین برآورد دقیق هزینه حفر تونل از مراحل اولیه پروژه می‌تواند مسایل ناشی از هزینه را به حداقل برساند [۳۳].

احداث تونل در مقایسه با دیگر پروژه‌های صنایع عمرانی، طبقه‌بندی منحصر به فردی را از لحاظ زیر ساخت پروژه دارد. دلیل اصلی تمایز تونل‌ها با بقیه پروژه‌های زیرساختی، خطر ناشی از حفاری در شرایط ناشناخته زمین و پارامترهای متعدد مربوط به هزینه است (به عنوان مثال، نوع تونل، هدف احداث پروژه، محل احداث تونل، روش ساخت تونل، شرایط در محل و غیره) که باعث تغییر در هزینه نهایی احداث پروژه می‌شود [۳۴].

عوامل متعددی از قبیل زمین شناسی، روش‌های ساخت، نوع قرارداد، مقررات و غیره، بر سرعت توسعه احداث پروژه‌های تونل تاثیر می‌گذارد، که از زمان و هزینه بیش از حد در ساخت و همچنین حمل و نقل، موثر است. با توجه به عوامل اصلی داخلی که بر هزینه و زمان پروژه‌های احداث تونل تاثیر می‌گذارد می‌توان به تغییرات در برنامه پروژه، رویکرد اشتباه در سامانه نگهداری پروژه، پیچیدگی‌های مهندسی در ساخت و ساز، برآوردها و احتمالات نامناسب از هزینه‌ها، منازعات بین طرفین قرارداد و عدم تفاهم در اسناد قرارداد اشاره کرد [۳۵].

عوامل خارجی که ممکن است باعث افزایش بیش از حد هزینه‌ها و زمان شوند عبارت‌اند از: شرایط پیش‌بینی نشده (یعنی شرایط زمین‌شناسی، الزامات طراحی پیش‌بینی نشده سامانه نگهداری تونل و غیره)، عدم رقابت یا کمبود آن، تغییرات ناشی از عوامل خارجی (مانند عوامل تغییرات در شرایط

¹ Park and Adachi

² Clough and Leca

اقتصادی و بازار ارزی خارجی که باعث رشد هزینه‌های پروژه می‌شوند، نرخ تورم پروژه، نگرانی‌های محلی و رویدادهای پیش بینی نشده در طول پروژه که ممکن است بر سرعت احداث پروژه تاثیر بگذارند در پروژه‌های ساخت تونل، قیمت دستگاه حفاری، پیچیدگی و اندازه بزرگ بودن پروژه‌ها را نشان می‌دهد. افزایش هزینه و زمان در طول پروژه‌های احداث تونل در سراسر جهان هم در بخش دولتی و هم در بخش خصوصی رایج است [۳۶].

به طور کلی سود پروژه‌های احداث تونل در کل دنیا نسبتاً کم است. به طوری که ترکیبی از سودهای کم حاصل از پروژه احداث تونل و همچنین هزینه‌های اضافی آن، ممکن است باعث ورشکستگی نه تنها شرکت‌های خصوصی (به عنوان مثال، پیمان‌کاران تونل) بلکه اقتصاد ملی (وابسته به مقیاس پروژه) نیز شود [۳۷].

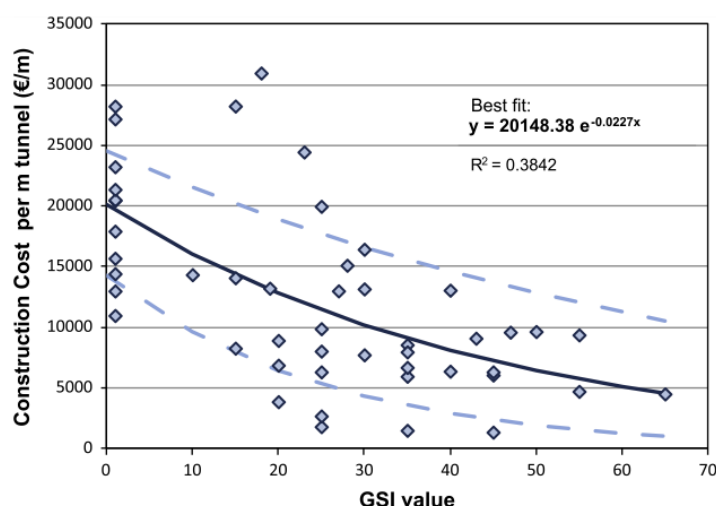
برخی از محققان تلاش کرده‌اند برای برآورد هزینه ساخت تونل راه‌کارهایی ارائه دهند، یا بر روی هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی تمرکز کرده‌اند [۳۸]. برآورد هزینه‌های احداث تونل، مخصوص به همان پروژه است. به طور واضح‌تر، پروژه‌ها علاوه بر شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، تفاوت در مقیاس و پیچیدگی در طراحی و اجرا و همچنین عدم شناخت کامل از محیط زمین‌شناسی، بیشتر از فرهنگ معماری ساختی متاثر می‌شوند که از کشوری به کشور دیگر و حتی از پروژه‌ای به پروژه‌ای دیگر متمایز است. با این حال، نیاز به ارزیابی دقیق هزینه‌های ساخت تونل در مراحل اولیه طراحی وجود دارد [۳۹]. تحقیقات زمین‌شناسی مهمترین نقش را در برآورد هزینه احداث تونل ایفا می‌کند به طوری که بر هزینه کلی تاثیر می‌گذارد. یک مدل زمین‌شناسی خوب، اطلاعات ارزشمندی را برای بهینه‌سازی طراحی تونل ارائه می‌دهد که در نتیجه به برآورد هزینه‌های احداث تونل کمک کرده و همچنین از هزینه‌های اضافی جلوگیری می‌کند [۴۰].

معاون‌زاده و مارکو^۱ برای بهبود عدم قطعیت در برآورد هزینه تونل، از مدل هزینه تونل استفاده کردند این مدل شبیه‌سازی حاصل از ساخت تونل در زمین با جنس سخت است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها عدم قطعیت را در برآورد هزینه احداث تونل منعکس می‌کند. نتایج این محققان نشان داد که برای حفر یک تونل به طول ۱۲۰۰۰ فوت در زمین شیل و آهک، هزینه‌ای بین ۷/۵ تا ۱۰/۵ میلیون دلار در بازه زمانی ۲۱۰ تا ۳۰۵ روز، دارد. این محدوده‌ها نشان‌گر پایین بودن قطعیت در بحث نهایی برآورد زمان و هزینه حفر تونل است [۴۱].

پاراسکوپولو^۲ در سال ۲۰۱۲، بر اساس داده‌های مجموعه‌ای از ۹ تونل مترو واقع در یونان به تجزیه و تحلیل هزینه ساخت تونل پرداخته‌اند. هزینه ساخت تونل‌ها، بر اساس قیمت سال ۲۰۱۱، برای پنج طبقه توده سنگ مشخص، برآورد شده است. نتایج حاکی از آن است که ارتباطی بین هزینه ساخت تونل و شرایط ژئوتکنیکی منطقه مورد حفر تونل وجود دارد. در مطالعات این محققان، شاخص GSI برای نمایش شرایط ژئوتکنیکی منطقه مد نظر قرار گرفته است. با توجه به شکل ۲-۶، مشخص است که با افزایش شاخص GSI، هزینه‌های احداث تونل روند کاهشی دارد [۴۲].

¹ Moavenzadeh and Markow

² Paraskevopoulou



شکل ۲-۶. منحنی مقادیر شاخص GSI به همراه هزینه احداث تونل در هر متر [۴۲].

رستمی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ بر روی ارایه مدلی برای برآورد هزینه ساخت تونل‌ها جهت کاربردهای مختلف در مرحله اولیه یک پروژه تمرکز کردند. این کار براساس مطالعه نزدیک به ۲۷۰ پروژه و همچنین تجزیه و تحلیل آماری هزینه‌های احداث تونل بر اساس اندازه تونل، شرایط زمین و کاربردهای تونل است. چندین مدل برآورد هزینه برای انواع مختلف تونل شامل انتقال آب، تونل‌های مترو در زمین نرم و سنگ معرفی شده‌اند. رستمی و همکاران نشان دادند که با افزایش قطر تونل‌های مترو، هزینه‌ی حفر تونل در زمین‌های نرم و سخت، روند افزایشی ملایمی به همراه دارد. شکل ۲-۷، نیز ارتباط قطر تونل هزینه‌های احداث تونل را نمایش می‌دهد [۴۳].

محمودزاده و زارع^۲ در سال ۲۰۱۶، هزینه و زمان ساخت تونل و همچنین پیش‌بینی شرایط زمین را در مراحل برنامه‌ریزی و طراحی یک پروژه تونل موثر دانسته‌اند. برای این منظور یک روشی ابتکاری برای تخمین احتمالی وضعیت زمین و همچنین زمان و هزینه‌های ساخت تونل جاده‌ای همرو^۳ پیشنهاد کردند که ادغامی از رویکرد پیش‌بینی شرایط زمین بر اساس فرآیند مارکوف^۴ و تحلیل واریانس زمان و هزینه بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو^۵ است. از نتایج این روش برای تخمین زمان و هزینه احداث تونل می‌توان به پیش‌بینی زمان و هزینه‌های ساخت تونل همرو اشاره کرد که اگر سطح اطمینان ۵۰ درصد در نظر گرفته شود، پروژه با هزینه ساختی در حدود ۲۵/۴ میلیون دلار آمریکا و زمان احداث تقریباً شش سال قابل انجام است. لازم به ذکر است که محققان زمان و هزینه‌های ساخت را مربوط به حالتی در نظر گرفته‌اند که تونل تنها از یک طرف حفاری می‌شود. در صورتی که حفر تونل از دو طرف مد نظر قرار گیرد، زمان و هزینه کل ساخت تونل نسبت به حفاری از یک طرف به نصف کاهش می‌یابد [۴۴].

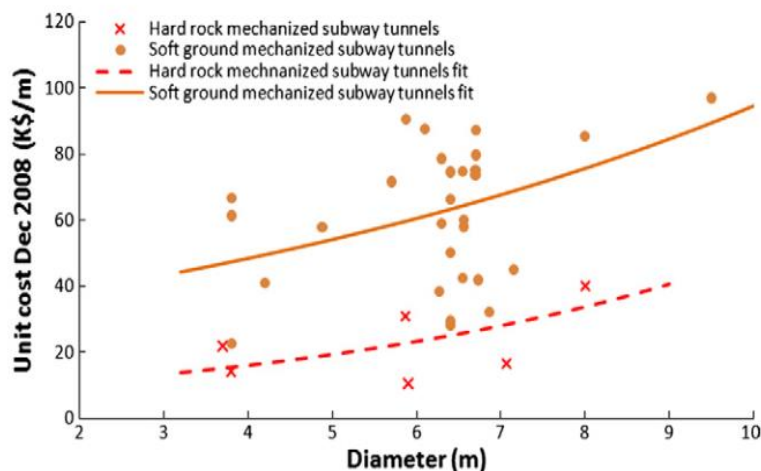
¹ Rostami

² Mahmoodzadeh and Zare

³ Hamro road tunnel

⁴ Markov process

⁵ Monte-Carlo simulation



شکل ۷-۲. منحنی ارتباط مقادیر مختلف قطر تونل در مقابل هزینه‌های احداث تونل [۴۳].

بن لیو^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۰، از طریق الگوریتم شبکه عصبی، با توجه به پارامترهای سنگ و دستگاه حفاری، مدلی برای محاسبه هزینه مربوط به احداث تونل ارائه کردند [۴۵].

احمد^۲ هزینه‌های تونل‌های جاده‌ای و راه آهن را، بر اساس تحلیل رگرسیون چندگانه، در ۲۵ پروژه ساخته شده واقع در کشورهای اروپای غربی محاسبه کردند. مدل‌های توسعه یافته نه تنها طول و قطر تونل، بلکه نوع روش‌های حفر تونل (مکانیزه و سنتی) را نیز شامل می‌شود که تا حد زیادی تحت تاثیر شرایط زمین شناسی است. نتایج نشان دادند که ضرایب همبستگی بالا به ترتیب ۰/۹۷۸ و ۰/۷۹ برای مدل‌های تونل سازی مکانیزه و سنتی وجود دارد [۴۶].

بناردوس و همکاران^۳ در سال ۲۰۲۱، برای پروژه خط ۳ متروی آتن یونان^۴، با استفاده از روش تجزیه و تحلیل هزینه و سود^۵، مقادیر هزینه و سود پروژه را در دو حالت قبل و بعد از ساخت مترو بررسی کردند و سپس به مقایسه مقادیر حاصل از آنالیز هزینه-سود فعلی پروژه را با حالت قبلی پرداختند. نتایج حاکی از آن است که مقادیر هزینه-سود با شاخص ارزش‌گذاری فعلی^۶ در سال ۲۰۱۸، دو برابر مقادیر قبل ساخت پروژه هستند. با مقایسه نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل هزینه-سود در هر دو رویکرد قبل و بعد ساخت مترو، عوامل اصلی تمایز، شباهت‌ها و کاستی‌ها شناسایی شدند. این محققان در تحقیق حاضر نشان دادند که در پروژه‌های مترو، موضوعاتی مانند ارزش زمان سفر و جذابیت این نوع حمل و نقل گاهی دست کم گرفته می‌شود و به آن توجه کافی نمی‌شود و بر اساس فرضیات عمومی به آن‌ها ارزش داده می‌شود. بنابراین، نمایش به روز از مزایای به دست آمده، از

¹ Bin Liu

² Ahmed

³ Benardos et al.

⁴ Egaleo - Aghia Marina

⁵ Cost-Benefit-Analysis (CBA)

⁶ Net Present Value (NPV)

نظر حجم سرنشین مورد انتظار، نفوذ سیستم مترو در شبکه کلی حمل و نقل و عادات جامعه و همچنین صرفه‌جویی در زمان سفر، از عوامل تعیین کننده‌ای هستند که برای دقت در تجزیه و تحلیل هزینه-سود باید در همه موارد دنبال شوند، ترجیحاً با انجام بررسی‌های مستقیم از رفتار عمومی و استفاده از خدمات مترو [۴۷].

محمودزاده و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۱، اثرات عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی را بر اساس زنجیره مارکوف، برای پیش‌بینی زمان و هزینه‌های ساخت تونل جاده‌ای قلاجه^۲ واقع در حد فاصل استان ایلام و استان کرمانشاه مورد بررسی قرار دادند. این محققان داده‌های ورودی زنجیره مارکوف را برای برآورد زمان و هزینه ساخت مورد نیاز برای تونل، مصاحبه با کارشناسان تونل از طریق پرسش‌نامه قرار داده‌اند. سپس با مقایسه نتایج پیش‌بینی‌شده با نتایج واقعی، عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های هزینه و زمان ساخت تونل، به طور قابل توجهی کاهش یافت [۴۸].

عمق حفر تونل‌های قطار شهری، به طور مستقیم بر روی هزینه‌های حفر تونل و همچنین احداث ایستگاه‌های قطار شهری تاثیر دارد. کمینه کردن این هزینه‌ها هدف تمام مدیران پروژه تونل‌سازی است. در این تحقیق تاثیر عمق‌های مختلف حفر تونل خط دو قطار شهری تبریز از دو دیدگاه فنی و هزینه‌ای بررسی شده و عمق بهینه برای حفر تونل تعیین شده است.

¹ Mahmoodzadeh et al.

² Ghalaje road tunnel

فصل ۳ : ویژگی‌های ساخت‌گاه قطار شهری تبریز

۳-۱. مقدمه

شهر تبریز یکی از کلان شهرهای ایران به شمار می‌آید. با توجه به حجم وسیع مسافرت‌های درون-شهری تبریز و ضرورت استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی در جهت کاهش مشکلات ترافیکی این شهر، برای اولین بار در دی ماه ۱۳۶۹، موضوع مطالعه واحداث قطار شهری در مجلس شورای اسلامی مطرح شد ولی با مسکوت ماندن موضوع، بالاخره سازمان قطار شهری تبریز در سال ۱۳۷۹ تأسیس و مطالعات امکان‌سنجی خطوط قطار شهری تبریز در اواخر سال ۱۳۸۰ آغاز گردید. مطالعات متروی تبریز از شش خط (شامل پنج خط اصلی و یک خط حومه) تشکیل شده که شامل ۴ مسیر به طول ۷۰ کیلومتر با ۷۰ ایستگاه و یک خط برون شهری از تبریز به شهرک سهند به طول حدوداً ۲۰ کیلومتر است.

در راستای توسعه قطار شهری تبریز، خط ۲ قطار شهری تبریز به طول کلی حدود ۲۲ کیلومتر طراحی شده است. همچنین این خط دارای بیست ایستگاه با فواصل تقریباً یک کیلومتر از یکدیگر است. خط دوم قطار شهری تبریز از اراضی غرب منطقه قراملک شروع شده و پس از عبور از قراملک و قره‌آغاج به قسمت‌های میانی شهر در ناحیه بازار می‌رسد. این خط در ادامه بعد از عبور از میدان دانش‌سرا و زیر رودخانه مهران رود به خیابان عباسی و میدان شهید فهمیده می‌رسد. از میدان شهید فهمیده به سمت شهرک باغمیشه ادامه یافته و با تغییر مسیر به سمت جنوب شرقی در نهایت در جاده تهران و مقابل نمایشگاه بین‌المللی خاتمه می‌یابد [۱]. در شکل ۳-۱، نمای مسیر خط ۲ قطار شهری بر روی تصویر ماهواره‌ای نشان داده شده است.

در بخش‌های ابتدایی این فصل به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی شهر تبریز، هیدرولوژی منطقه، زمین‌شناسی عمومی منطقه، چینه‌شناسی و در نهایت زمین‌شناسی ساختمانی منطقه مورد مطالعه، پرداخته شده است. سپس در بخش بعد، به توصیف شبکه قطار شهری تبریز و همچنین مشخصات دستگاه حفاری مکانیزه مورد استفاده و نیز سامانه نگهداری تونل پرداخته شده است. در بخش آخر از این فصل، مطالب بسیار مهم مطالعات ژئوتکنیک مسیر خط دوم قطار شهری تبریز درج شده است که لازم به ذکر است، تمامی این مطالعات توسط نویسندگان این تحقیق انجام شده است.

۳-۲. موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه

شهر تبریز با وسعت حدود ۲۲۵ تا ۲۳۰ کیلومتر مربع، تقریباً در راستای جنوب شرقی - شمال غربی به طول ۱۸ کیلومتر و حداکثر پهنای آن در امتداد شمال به جنوب حدود ۱۴ کیلومتر و ارتفاع ۱۳۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد است. محدوده شمالی آن را ارتفاعات عین علی، جنوب آن را توده آذرین سهند و همچنین از سمت غرب جلگه‌های کناری دریاچه ارومیه تشکیل می‌دهند. موقعیت شهر تبریز در شکل ۳-۲، نمایش داده شده است. متوسط بارندگی سالانه دراز مدت منطقه معادل ۲۸۲٫۹ میلی‌متر در سال است. اغلب بارش در فصل بهار و ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد، حداقل بارش مربوط به فصل تابستان و ماه مرداد است. متوسط دمای سالانه منطقه تبریز ۱۲/۲

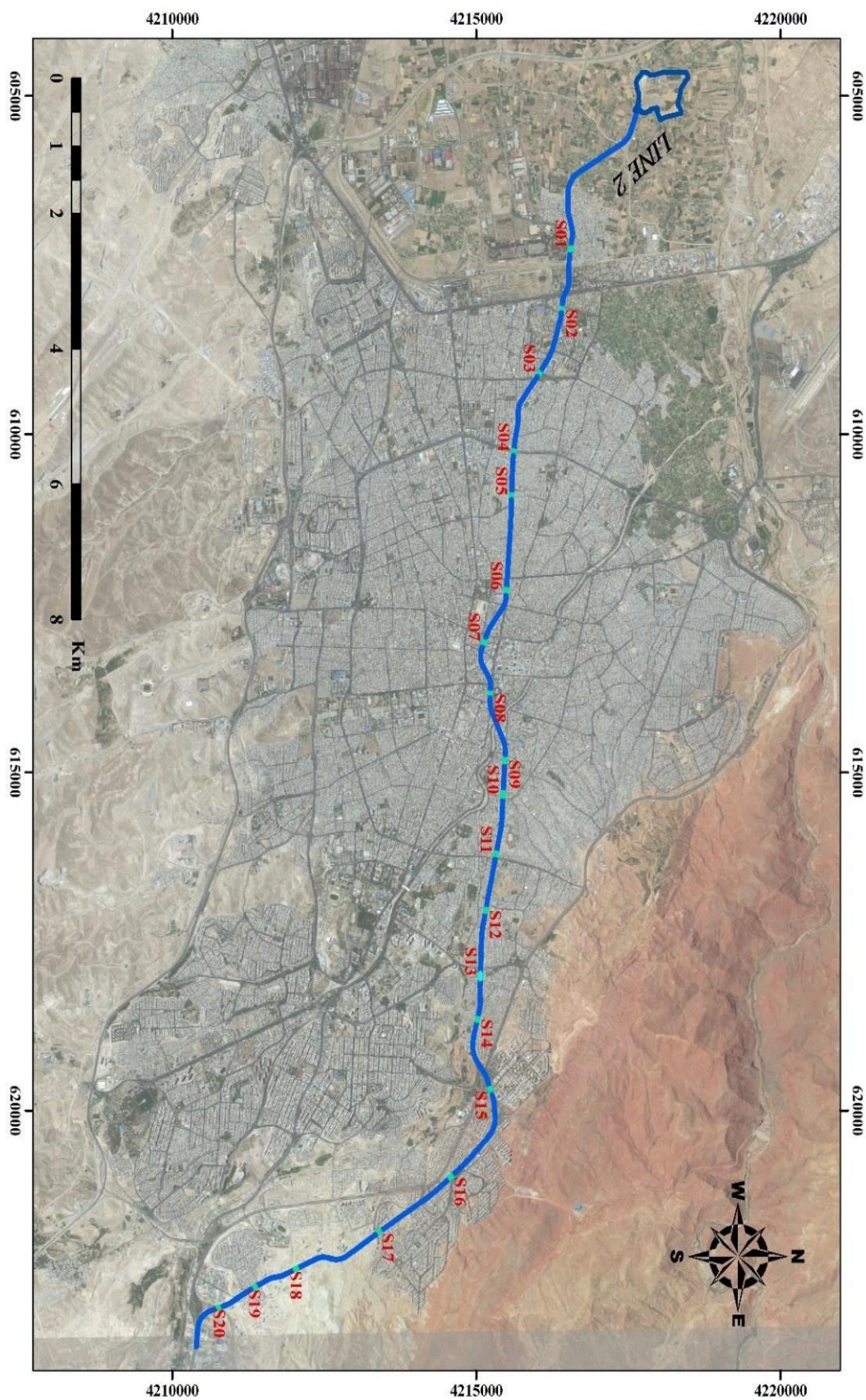
درجه سانتیگراد، متوسط حداکثر دما ۱۶/۲۵ درجه سانتیگراد، متوسط حداقل دما ۷/۲ درجه سانتیگراد و متوسط روزهای یخبندان ۱۰۰ روز است. بررسی نوسانات ماهانه درجه حرارت نشان می‌دهد دماهای هوای منطقه از بهمن ماه رو به افزایش گذاشته و این وضعیت تا مرداد ماه ادامه می‌یابد و پس از آن به تدریج دمای هوا کاهش می‌یابد. در دشت تبریز بیشترین میزان رطوبت در دی ماه به میزان بیش از ۷۲ درصد و کمترین آن نیز در تیر ماه به کمتر از ۳۹ درصد می‌رسد. متوسط سرعت وزش باد در محدوده مطالعاتی بین ۰/۸۵ تا ۲/۵۰ متر در ثانیه متغیر بوده و بیشتر در جهات شرقی تا شمال شرقی در وزش است. همچنین تغییرات تبخیر در محدوده مطالعاتی از حداقل ۴۰ میلیمتر در بهمن ماه تا حداکثر ۳۱۳ میلیمتر در تیر ماه در نوسان است. متوسط روزهای یخبندان در تبریز ۱۰۰ روز است که از ماه آبان شروع شده و تا فروردین ادامه می‌یابد. توده‌های هوایی که شهر تبریز را تحت تاثیر قرار می‌دهند توده هوای مدیترانه‌ای، توده هوای قاره قطبی با مبدا سیبری و توده هوای قاره قطبی با مبدا اقیانوس اطلس شمالی هستند. به موجب مطالعات هواشناسی، اقلیم محدوده مورد مطالعه در دسته‌بندی آمبرژه از نوع سرد خشک نزدیک به سرد نیمه خشک و در دسته بندی دو مارتن از نوع اقلیم نیمه خشک است [۱].

۳-۳. هیدرولوژی منطقه

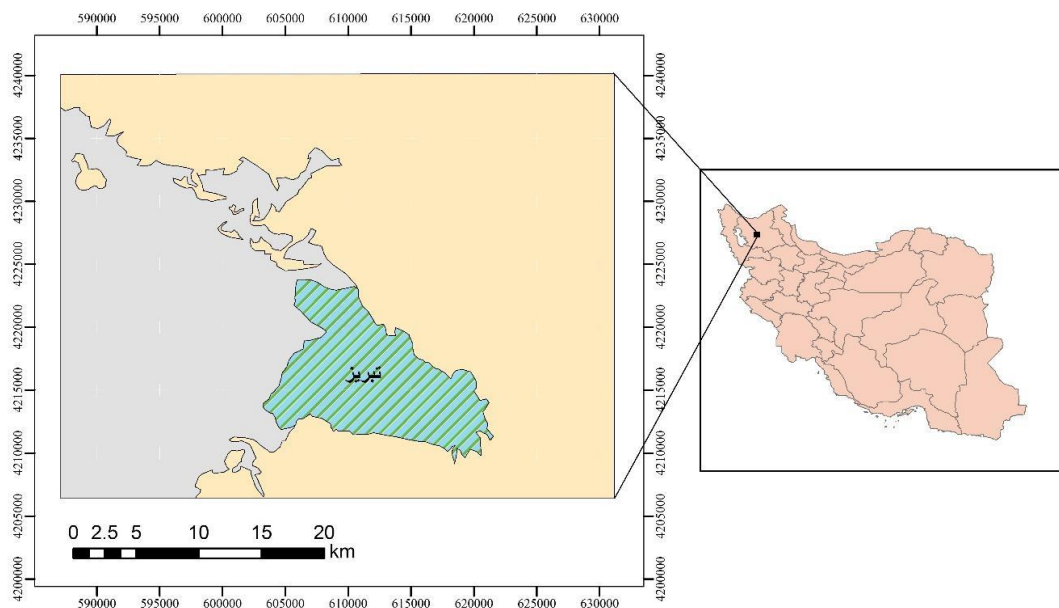
مهمترین رودخانه شهر تبریز، رودخانه آجی چای یا تلخه رود است که از شمال تبریز وارد شهر شده و در غرب تبریز به دریاچه ارومیه می‌ریزد. آب‌های سطحی جاری دیگر شامل مهران رود و گمناب چای می‌باشد که هر دو از زیر شاخه‌های تلخه رود به حساب می‌آید. رودخانه‌های اصلی که از محدوده شهر عبور می‌کند مهران رود و قوری چای هستند و اغلب رسوبات دشتی منطقه زایده رسوب گذاری این رودخانه‌های فصلی است. موقعیت آبراهه‌ها و رودخانه‌های محدوده شهر تبریز در شکل ۳-۳، مشخص شده است [۱].

۳-۴. زمین‌شناسی عمومی منطقه

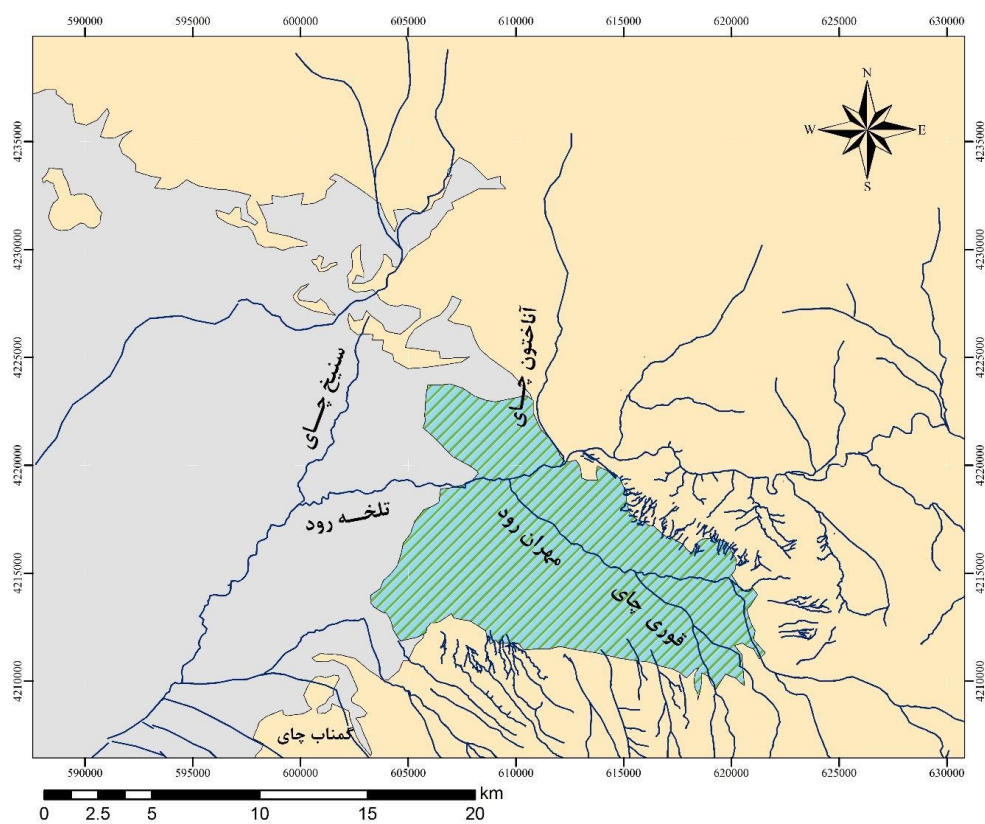
ویژگی‌های زمین‌شناسی تاثیر مستقیم در طراحی و تامین پایداری سازه‌ها دارند. از این جهت مطالعات زمین‌شناسی یکی از پارامترهای اصلی و اساسی در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی است. مطالعات زمین‌شناسی به بررسی‌های چینه‌شناسی، ساختاری و سنگ‌شناسی می‌پردازد. شهر تبریز از شمال با رشته کوه‌های شرقی - غربی عون ابن علی و از جنوب توسط بلندی‌های نه چندان مرتفع که جنس آن‌ها از رسوبات آبرفتی سخت شده و کنگلومرا است محصور شده است. ارتفاعات شرقی - غربی مذکور باعث شده تا تبریز به صورت دشتی کشیده با امتداد شرقی - غربی درآید. شیب کلی دشت و در نتیجه جهت زهکشی عمومی آب‌های سطحی و زیرزمینی به سمت غرب است. از لحاظ تقسیم بندی رسوبی - ساختاری، شهر تبریز در زون البرز - آذربایجان قرار گرفته و از رژیم تکتونیکی حاکم بر آن پیروی می‌کند [۱].



شکل ۳-۱. مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز بر روی تصویر ماهواره‌ای [۸].



شکل ۳-۲. موقعیت شهر تبریز [۱].



شکل ۳-۳. موقعیت آبراهه‌ها و رودخانه‌ها در محدوده شهر تبریز [۱].

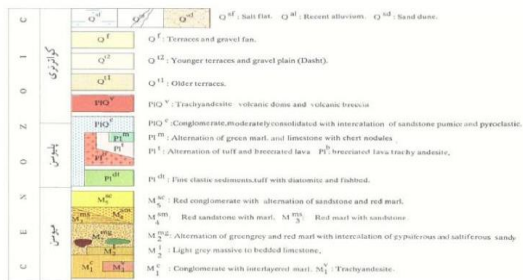
مهم‌ترین ساختار زمین‌شناسی منطقه، گسل شمال تبریز است که با امتدادی شمال غربی - جنوب شرقی، مرز بین کوه و دشت در شمال شهر تبریز را تشکیل می‌دهد. گسل شمال تبریز در امتداد خود رسوبات جوان کواترنری را بریده است. طول این گسل از بستان آباد تا صوفیان حداقل ۹۰ کیلومتر است. در قسمت‌های جنوبی شهر نیز گسل‌های متعدد کوچکی وجود دارند که دارای فعالیت نرمال هستند [۱]. به طور کلی ژئومورفولوژی محدوده حاصل تاثیر نیروهای تکتونیکی، فعالیت گسل‌ها، چین‌ها و فرسایش رسوبات است. اگر چه منطقه آذربایجان از لحاظ چینه‌شناسی دارای تنوع و گستردگی زمانی زیادی می‌باشد و اطراف دشت تبریز نیز از برون‌زدهای گسترده‌ای از کامبرین تا حال برخوردار است ولی سنگ‌ها و رسوبات محدوده خود شهر تبریز دارای گستردگی زمانی چندانی نبوده و واحدهای تشکیل‌دهنده آن مربوط به سنوزوئیک و کواترنری هستند. واحدهای سنوزوئیک در دشت تبریز از میوسن آغاز شده و تا کواترنری ادامه یافته است. قدیمی‌ترین این سازندها، سازند قرمز فوقانی^۱ است که غالباً از ماسه سنگ، مارن، سیلتستون و کنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی تشکیل یافته است [۱]. روی این سنگ‌ها سازند مارنی - شیلی زغال‌دار باغمیشه قرار می‌گیرد که در شمال غرب تبریز برونزد داشته و از ضخامت زیادی برخوردار است. روی سازنده باغمیشه رسوبات ماهی‌دار که شامل سینریت تالاپیلی و دیاتومیت است. به صورت هم‌شیب قرار گرفته است. بر روی این رسوبات نیز آبرفت‌های دوران چهارم قرار گرفته است محل مورد مطالعه در محدوده تپه ماهوری شرقی تبریز واقع شده است. در شکل ۳-۴، تصاویری از محدوده طرح نشان داده شده است و لایه بندی لایه‌های ماری در این محدوده شیب دار است [۱].

۳-۵. چینه‌شناسی منطقه

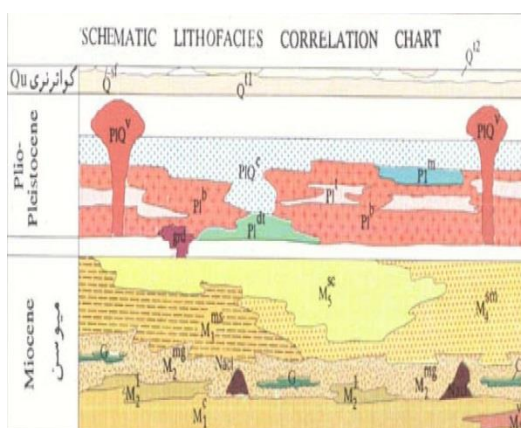
اگر چه منطقه آذربایجان از لحاظ چینه‌شناسی دارای تنوع و گستردگی زمانی زیادی است و اطراف دشت تبریز نیز برونزدهای گسترده‌ای از کامبرین تا حال برخوردار است، ولی سنگ‌ها و رسوبات محدوده خود شهر تبریز دارای گستردگی زمانی چندانی نبوده و واحدهای تشکیل‌دهنده آن مربوط به سنوزوئیک و کواترنری هستند. واحدهای سنوزوئیک در دشت تبریز از میوسن آغاز شده و تا کواترنری ادامه یافته است. از پالئوسن، اوسن و الیگوسن رسوباتی که مبین دوره‌های پیش از میوسن باشد، وجود نداشته که این امر نشانه چینه‌ای نبودن همین دوره‌ها در این محدوده به شمار می‌آیند. شکل ۳-۵، ستون چینه‌شناسی دشت تبریز را نشان می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه در داخل شهر تبریز در بخش جنوبی کوه‌های عون ابن علی که شامل رسوبات قرمز رنگ تخریبی قاره‌ای به سن میوسن میانی، قرار گرفته است. رسوبات قرمز رنگ دارای طبقات گچی و نمکی بوده و این رسوبات را جزو سازند قرمز فوقانی معرفی کرده‌اند. این سازنده غالباً از ماسه-سنگ، مارن، سیلتستون و کنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی تشکیل یافته است. در منطقه تبریز رسوبات قاره‌ای پونین دارای اثراتی از زغال‌سنگ است. زغال‌سنگ مزبور ناخالص بوده و در تپه‌های

¹ Upper Red Formation



شکل ۳-۴. نقشه زمین‌شناسی از محدوده اجرای طرح [۱].



کواترنری	آبرفتهای کواترنری	
پلیوسن	رسوبات با فسیل ماهی (مارن - لاپیلی - دیاتومیت)	
میوسن	سازند باغمیشه (مارن - شیلهای لیگنیت دار)	
	سازند قرمز فوقانی (ماسه سنگ - سیلتستون - مارن)	

شکل ۳-۵. ستون چینه‌شناسی دشت تبریز [۱].

باغمیشه و ساری داغ به صورت لایه‌های نازک و کوتاه غیر قابل استفاده در داخل مارن‌های زردرنگ و فسیل‌دار دیده شده است. سازند مارنی - شیلی زغال‌دار باغمیشه در شمال غرب تبریز برونزد دارد، این سازند از ضخامت زیادی برخوردار بوده و بر روی آن رسوبات ماهی‌دار که شامل سینریت تا لاپیلی و دیاتومیت است، به صورت هم شیب قرار گرفته است. بر روی این رسوبات نیز آبرفت‌های دوران چهارم، شامل کنگلومرای سست تا مستحکم دیده می‌شود. محدوده مورد مطالعه به طور کامل بوسیله رسوبات آبرفتی جوان پوشیده شده است ولی حفاری‌های انجام شده نشان می‌دهد که در زیر رسوبات آبرفتی مذکور، طبقات مارنی زردرنگ و لایه‌های مارنی شیلی خاکستری رنگ متعلق به سازند باغمیشه وجود دارند.

۳-۶. زمین‌شناسی ساختمانی منطقه

شهر تبریز در زون البرز - آذربایجان قرار گرفته است و از رژیم تکتونیکی حاکم بر آن پیروی می‌کند. تشکیل دشت تبریز و رسوب‌گذاری در آن و ایجاد ساخت‌های تکتونیکی که اغلب بصورت شکستگی‌ها و گلش تظاهر پیدا کرده است، پیرو همین سیستم است. دشت تبریز از شمال توسط کوه‌های عون ابن علی و از جنوب توسط ارتفاعات آتشفشانی سهند و رسوبات پیروکلاستیک مربوط به سهند احاطه شده است. عملکرد معکوس گسل شمال تبریز یا شیب به سمت شمال باعث افتادگی قسمت جنوبی آن شده است. در اثر این عملکرد، در موازات بخش شمالی شکستگی‌هایی با جابجایی نرمال در جنوب دشت ایجاد شده است که حاصل آن‌ها افتادگی گرابن ماندی با امتداد شرقی - غربی است. دشت فعلی که شهر تبریز بر روی آن قرار گرفته، نتیجه این افتادگی است. در نتیجه این افتادگی ادامه رسوبات میوسن و رسوبات پیروکلاستیک شرق و جنوب شهر در ترازهای ارتفاعی پایین‌تر مشاهده می‌شوند. همچنین عملکرد فرسایشی ناشی از ورود رودخانه‌های بزرگ باعث رسوب مواد فرسایشی با ضخامت زیاد در دشت شده‌اند. با توجه به سرچشمه رودها از جنوب و شرق دشت تبریز و کشیده بودن دشت به صورت شرقی - غربی با حرکت به سمت غرب انتظار کاهش اندازه ذرات وجود دارد. با توجه به فعالیت سیستم گسلی و زلزله‌های رخ داده در منطقه و مشاهده شکستگی‌ها در رسوبات جوان منطقه از لحاظ تکتونیکی فعال هستند [۱].

۳-۷. شبکه قطار شهری تبریز

با توجه به حجم وسیع مسافرت‌های درون‌شهری تبریز و ضرورت استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی در جهت کاهش مشکلات ترافیکی این شهر، برای اولین بار در دی ماه ۱۳۶۹، موضوع مطالعه واحداث قطار شهری در مجلس شورای اسلامی مطرح شد ولی با مسکوت ماندن موضوع، بالاخره سازمان قطار شهری تبریز در سال ۱۳۷۹ تأسیس و مطالعات امکان‌سنجی خطوط قطار شهری تبریز در اواخر سال ۱۳۸۰ آغاز گردید. در جلسه بیست و نهم شورای عالی ترافیک شهرهای کشور، احداث خط یک قطار شهری تبریز به تصویب رسید و عملیات اجرایی آن در سال ۱۳۸۱ آغاز شد. در جلسه

شصت و پنجم شورای عالی ترافیک، در دی ماه ۱۳۸۵ احداث سایر خطوط درون‌شهری تبریز و خط حومه‌ای تبریز - سهند به تصویب رسید که شامل ۴ مسیر به طول ۷۰ کیلومتر با ۷۰ ایستگاه و یک خط برون‌شهری از تبریز به شهرک سهند به طول حدوداً ۲۰ کیلومتر است. شبکه درون‌شهری قطار بر روی نقشه شهر تبریز، در شکل ۳-۶، آمده است [۴۹].

۳-۷-۱. خط یک قطار شهری تبریز

به طول ۱۷/۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل‌گولی آغاز و از طریق بلوار شهید باکری و ۲۹ بهمن، خیابان امام خمینی، میدان کهن (محقق سابق)، باغ گلستان (قونقا) و خیابان خیام به کوی لاله ختم می‌شود. حدود ۸ کیلومتر از مسیر به صورت تونل عمیق طراحی شده است و همچنین حفاری آن با دو دستگاه حفار TBM در عمق حدود ۱۴ الی ۲۵ متری کف تونل، در سال ۱۳۹۳ به اتمام رسیده است. فاز نخست این خط از ایستگاه ائل‌گولی تا ایستگاه استاد شهریار در شهریور ۱۳۹۴ و نیز فاز دوم آن از ایستگاه استاد شهریار تا ایستگاه میدان ساعت با یک ایستگاه عبوری در میدان قطب در سال ۱۳۹۵ به بهره‌برداری رسید. در پاییز ۱۳۹۸، ریل‌گذاری کل خط یک تا پایانه لاله به اتمام رسید و پس از سال‌ها انتظار، سوت قطار در ایستگاه پایانی خط یک به صدا درآمد. هم‌زمان با قیام تاریخی ۲۹ بهمن مردم تبریز، در بهمن ماه ۱۳۹۸، فاز سوم خط یک نیز با چند ایستگاه عبوری از ایستگاه میدان کهن تا ایستگاه نور در شهرک نور لاله به بهره‌برداری رسید [۴۹].

۳-۷-۲. خط دو قطار شهری تبریز

خط دوم متروی تبریز به طول حدود ۲۲/۵ کیلومتر، در حال حاضر طولانی‌ترین مسیر از شبکه ریلی کلان‌شهر تبریز است. این خط، شامل ۲۰ ایستگاه است که از محدوده زمین‌های قراملک تبریز (کارخانه کود آلی) شروع شده و از طریق خیابان وحدت و میدان قراملک (اولین ایستگاه) و پس از عبور از زیر خیابان آخونی، خیابان قدس، در ایستگاه میدان کهن (محقق سابق) دارای ایستگاه تبدالی با خط یک بوده و از طریق میدان دانش‌سرا، وارد خیابان عباسی شده و ضمن عبور از میدان شهید فهمیده باغ‌میشه به سمت شهرک نصر، مرزداران، دانشگاه آزاد، نمایشگاه بین‌المللی و نهایتاً در میدان بسیج خاتمه می‌یابد. لازم به ذکر است در طرح توسعه این خط، گذر از منطقه خاوران و اتصال به ایستگاه راه آهن تبریز میانه در نظر گرفته شده است [۴۹].

۳-۷-۳. خط سه قطار شهری تبریز

با امتداد شمالی و جنوبی و به طول ۹/۸ کیلومتر و شامل ۱۱ ایستگاه از پایانه بزرگ اتوبوس‌های بین‌شهری تبریز جنب بزرگ‌راه شهید کسائی آغاز و با عبور از خیابان مشروطه، خیابان شریعتی، در منطقه میار میار با خطوط یک، دو و خط پنج دارای ایستگاه تبدالی بوده است که پس از عبور از هسته مرکزی و بازار تاریخی شهر به طرف مراکز پرتراکم جمعیتی در خیابان انقلاب و شهرک ارم امتداد پیدا کرده و با عبور از جنب بیمارستان عالی نسب به شهرک رضوان‌شهر منتهی می‌شود [۴۹].

۳-۷-۴ . خط چهار قطار شهری تبریز

به صورت لوپ به طول ۱۵/۴ کیلومتر، شامل ۲۱ ایستگاه از میدان آذربایجان آغاز و پس از عبور از میدان جهاد (نصف راه)، در مسیر آزادی (کمربندی) از چهارراه آبرسان، بیلان کوه و چهارراه عباسی عبور کرده و به انتهای خیابان شهید رجایی جنب اتوبان پاسداران ختم می‌شود. از ویژگی‌های منحصر به فرد این خط، طراحی آن به صورت لوپ بوده و حلقه اتصالی بین تمامی خطوط ریلی مترو تبریز است. در طرح توسعه خط سه و چهار، اتصال این خطوط به فرودگاه بین‌المللی شهید مدنی تبریز به طول شش کیلومتر در نظر گرفته شده است [۴۹].

۳-۷-۵ . خط پنج قطار شهری تبریز

این خط تراموایی در اصل توسعه خط یک تلقی می‌شود که هدف از طراحی و اجرای آن، احیای پیشینه تاریخی قونقا به راه آهن است. این خط با ۵/۱ کیلومتر شامل یازده ایستگاه، از راه آهن تبریز آغاز شده و با عبور از چهارراه خطیب، نصف راه (جهاد)، تا باغ فجر (گلستان) جایگاه تاریخی قونقا امتداد می‌یابد و دارای ایستگاه تبادلی با ایستگاه شماره ۱۳ قونقا خط یک است. این خط ندر نهایت با عبور از منطقه اهراب، در مجاورت ارک علیشاه (چهارراه شریعتی) پایان می‌یابد [۴۹].

۳-۷-۶ . خط برون شهری تبریز - سهند

این خط در محل ایستگاه شماره ۱۷ (شهید باکری) با خط یک دارای ایستگاه مشترک بوده و با عبور از مقابل کارخانه تراکتور سازی به سمت شهر جدید سهند ادامه خواهد یافت [۴۹].

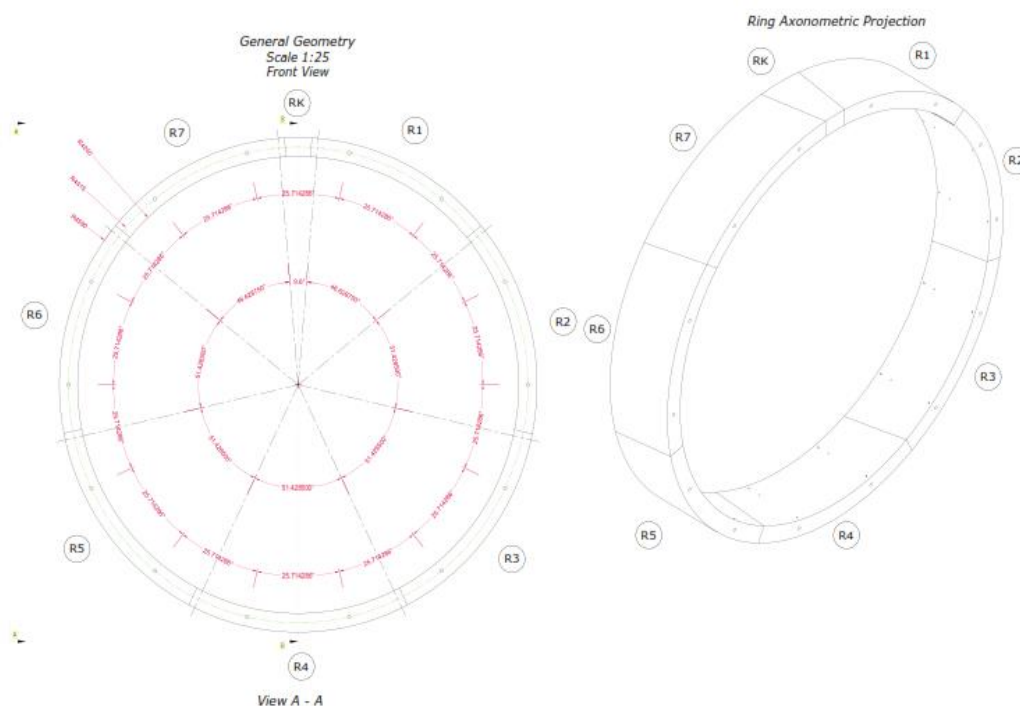
۳-۸ . مشخصات دستگاه حفاری و سامانه نگهداری تونل

پروژه خط دوم قطار شهری تبریز به طول ۲۲/۴ کیلومتر و دارای بیست ایستگاه با فواصل تقریباً یک کیلومتر از یکدیگر، طراحی شده و توسط دو دستگاه حفاری مکانیزه TBM از نوع سیستم تعادلی زمین (EPB)، در حال حفاری است. مشخصات دستگاه حفاری پرتال ورودی تونل (در ابتدای مسیر خط دوم قطار شهری تبریز واقع در منطقه قراملک)، در جدول (۳-۱)، درج شده است. نوع سامانه نگهداری تونل یونیورسال بوده که دارای پوشش بتنی سگمنتی به قطر داخلی ۸/۴۹ متر است.

جدول ۳-۱. مشخصات دستگاه حفاری مکانیزه پرتال ورودی تونل

ردیف	مشخصات	مقادیر	واحد
۱	وزن بک آپ دستگاه	۳۵۰	تن
۲	وزن سپر (به همراه کاترهد دستگاه)	۶۲۵	تن
۳	وزن کل دستگاه	۹۷۵	تن
۴	طول سپر	۹	متر
۵	طول کل دستگاه حفاری	۸۶	متر
۶	قطر حفاری	۹/۴۹	متر
۷	گشتاور دستگاه	۲۰۲۳۶	کیلو نیوتن
۸	نیروی پیشران	۸۰۰۰۰	کیلو نیوتن
۹	تعداد کفشک‌های دستگاه حفاری	۱۴	عدد
۱۰	ابعاد کفشک	۸۸	سانتی‌متر
۱۱	تعداد کل سیلندرهای دستگاه حفاری	۲۸	عدد
۱۲	بیشترین فشار کاری در جبهه کار	۵	بار

طرح هندسی دو بعدی و همچنین سه بعدی سگمنت‌های سامانه نگهداری خط دوم قطار شهری تبریز، مطابق شکل ۳-۷، است. لازم به ذکر است که هفت عدد سگمنت به همراه یک سگمنت کلید به ترتیب با نام‌های R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 (سگمنت‌های اصلی) و Rk (سگمنت کلید) است.



شکل ۳-۷. طرح دو بعدی و سه بعدی حلقه سگمنتی پروژه خط دوم متروی تبریز
 مشخصات اصلی سامانه نگهداری خط دوم قطار شهری تبریز و همچنین حجم و وزن هر یک از سگمنت‌های این سامانه، به ترتیب در جدول ۳-۲ و جدول ۳-۳ درج شده است.

جدول ۳-۲. مشخصات اصلی سگمنت های سامانه نگهداری خط دو متروی تبریز

ردیف	مشخصات	مقادیر	واحد
۱	ضخامت سگمنت	۳۵	سانتی متر
۲	قطر داخلی هر رینگ از سگمنت	۸/۴۸	متر
۳	قطر خارجی هر رینگ از سگمنت	۹/۱۸	متر
۴	حداقل شعاع قوس مسیر تونل	۲۵۰	متر
۵	حجم بزرگ ترین سگمنت	۲/۳۹	متر مکعب
۶	وزن بزرگ ترین سگمنت	۵/۹۷	تن
۷	حجم هر یک از رینگ های تونل	۱۴/۵۶	متر مکعب
۸	وزن هر یک از رینگ های تونل	۳۶/۴	تن
۹	تعداد سگمنت های هر رینگ	۱ + ۷	عدد
۱۰	تعداد اتصالات طولی	۱۴	عدد

جدول ۳-۳. حجم و وزن سگمنت های هر رینگ از تونل

ردیف	مشخصات	حجم (متر مکعب)	وزن (تن)
۱	سگمنت R1	۱/۸۶	۴/۳۵
۲	سگمنت R2	۲/۰۱	۵/۰۳
۳	سگمنت R3	۲/۰۳	۵/۰۷
۴	سگمنت R4	۲/۰۸	۵/۲۰
۵	سگمنت R5	۲/۱۳	۵/۳۳
۶	سگمنت R6	۲/۱۵	۵/۳۷
۷	سگمنت R7	۱/۹۲	۴/۷۹
۸	سگمنت کلید	۰/۳۹	۰/۹۷
۹	سگمنت کف	۲/۳۹	۵/۹۷

۳-۹. ویژگی های ژئوتکنیکی زمین مسیر تونل

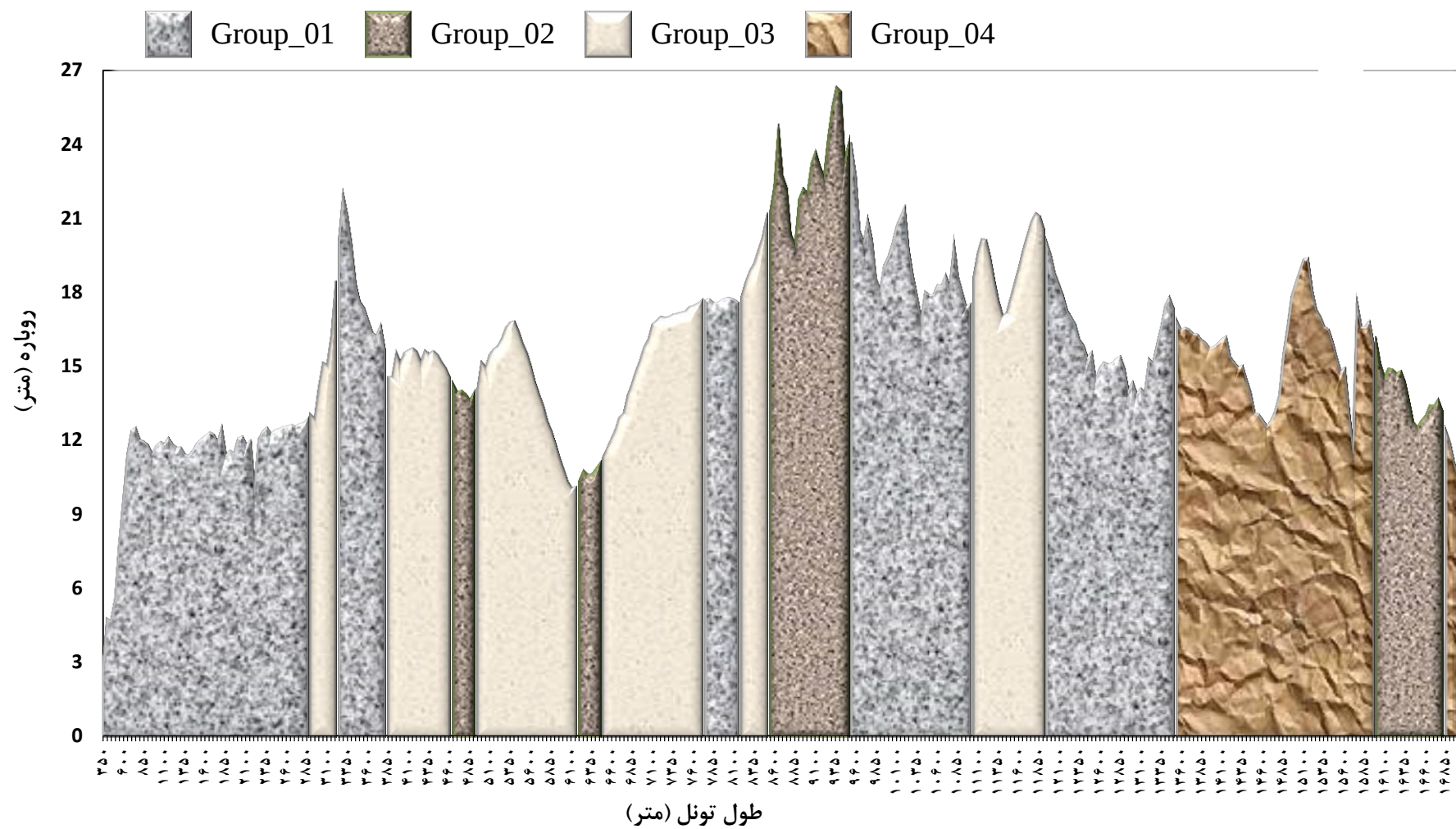
در این بخش از فصل بر اساس نتایج آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی، در نظر گرفتن نتایج مطالعات ژئوتکنیک پروژه های نزدیک به محدوده طرح و بر اساس قضاوت مهندسی، پارامترهای ژئوتکنیکی طراحی لایه های مختلف خاک و سنگ برای طول مسیر (مقطع تونل) تعیین شده است. با توجه به فاصله گمانه ها، نوع لایه های زیرسطحی، سطح آب زیرزمینی، اعداد آزمایش نفوذ استاندارد^۱ و تنوع لایه های زیر سطحی، این محدوده با طول ۲۲۱۰۰ متر به ۲۸ بخش تقسیم شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی تراز تونل برای هر بخش به صورت جداگانه در طول مسیر در جدول ۳-۴، ارائه شده است. پس از طبقه بندی پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های مختلف زمین برای طول مسیر، بر اساس قضاوت مهندسی این خاک ها به چهار دسته کلی، طبقه بندی شده اند. طبقه بندی ژئوتکنیکی خاک در شکل ۳-۸، به صورت چهار گروه متفاوت نشان داده شده است.

^۱ Standard Penetration Test (SPT)

جدول ۴-۳. پارامترهای ژئوتکنیکی برای بخش‌های مختلف طول مسیر (مقطع تونل)

No.	Chainage (m)		Rock Type	Nspt	Density (gr/cm3)		C (kg/cm2)		φ (°)		E (kg/cm2)	ν	K (cm/s)	Description
	from	to			γ (d)	γ (sat)	Undrained	Drained	Undrained	Drained				
1	0	2000	SM	> 50	1.70 - 1.75	1.85 - 2.05	0.15 - 0.25	0.10 - 0.15	27 - 30	30 - 32	400 - 550	0.32 - 0.34	0.000055	E00a , E00b
2	2000	2850	SM	30 - 50	1.65 - 1.70	1.75 - 2.0	0.10 - 0.20	0.05 - 0.10	20 - 22	28 - 30	400 - 500	0.30 - 0.32	0.000055	S01
3	2850	3200	SM , SC & ML	40 - 60	1.63 - 1.75	1.91 - 2.09	0.20 - 0.30	0.10 - 0.20	21 - 23	27 - 29	400 - 500	0.36 - 0.38	0.000025	S01
4	3200	3800	SM	30 - 50	1.65 - 1.75	1.85 - 2.0	0.10 - 0.20	0.05 - 0.10	29 - 31	31 - 33	400 - 550	0.33 - 0.35	0.000550	E01
5	3800	4600	CL , ML & SM	20 - 50	1.70 - 1.75	1.90 - 2.03	0.30 - 0.40	0.25 - 0.35	20 - 22	26 - 28	300 - 450	0.34 - 0.36	0.000050	S02
6	4600	4925	CL , ML	25 - 60	1.60 - 1.70	1.95 - 2.10	0.30 - 0.50	0.20 - 0.30	20 - 22	23 - 25	300 - 400	0.40 - 0.42	0.000001	E02
7	4925	5600	CL , ML & SM	40 - 60	1.65 - 1.75	1.85 - 2.05	0.15 - 0.25	0.10 - 0.20	18 - 20	26 - 28	300 - 450	0.33 - 0.36	0.000001	S03
8	5600	6150	ML & SC, SM	20 - 50	1.65 - 1.75	1.95 - 2.05	0.25 - 0.35	0.12 - 0.27	20 - 22	26 - 28	250 - 350	0.38 - 0.4	0.000010	E03 , S04
9	6150	6450	CL , ML	> 25	1.70 - 1.75	2.05 - 2.10	0.40 - 0.60	0.20 - 0.30	13 - 15	24 - 26	300 - 400	0.36 - 0.38	0.000005	S04
10	6450	7700	SM , ML & CL	30 - 50	1.60 - 1.75	2.0 - 2.10	0.25 - 0.35	0.15 - 0.25	22 - 24	27 - 29	250 - 400	0.35 - 0.37	0.000075	E04 , S05
11	7700	8150	SM	30 - 50	1.70 - 1.75	2.0 - 2.10	0.10 - 0.20	0.05 - 0.10	27 - 29	29 - 31	350 - 450	0.32 - 0.34	0.000100	E05
12	8150	8500	SM , CL & ML	30 - 60	1.65 - 1.75	1.95 - 2.05	0.25 - 0.35	0.15 - 0.25	19 - 21	27 - 29	350 - 500	0.38 - 0.40	0.000010	S06
13	8500	9500	SM , ML	40 - 60	1.60 - 1.75	1.95 - 2.05	0.15 - 0.25	0.07 - 0.16	20 - 22	28 - 30	250 - 400	0.34 - 0.36	0.000051	E06 , S07
14	9500	11000	SM , GM	> 50	1.70 - 1.80	1.90 - 2.05	0.10 - 0.20	0.03 - 0.06	29 - 32	31 - 34	350 - 550	0.33 - 0.35	0.001000	E07,S08,E08
15	11000	11900	SM , GM & CL	> 30	1.70 - 1.80	2.0 - 2.10	0.20 - 0.30	0.10 - 0.20	22 - 24	28 - 30	350 - 550	0.36 - 0.38	0.000050	S09,E09,S10
16	11900	13500	Marlstone , Siltstone	> 50	1.70 - 1.85	2.05 - 2.20	0.55 - 0.75	0.20 - 0.40	18 - 22	25 - 27	400 - 600	0.36 - 0.38	0.000006	E10 , S11
			SM		1.65 - 1.75	1.85 - 2.0	0.15 - 0.20	0.10 - 0.15	28 - 30	30 - 32	450 - 600	0.32 - 0.34	0.000050	E11 , S12
17	13500	14100	Marlstone , Sandstone	> 50	1.80 - 1.95	2.10 - 2.25	0.40 - 0.60	0.20 - 0.35	20 - 22	25 - 27	400 - 500	0.36 - 0.38	0.000006	E12
18	14100	14400	Sandstone , Marlstone & Siltstone	> 50	1.75 - 1.85	1.95 - 2.15	0.40 - 0.70	0.25 - 0.45	20 - 24	26 - 28	400 - 525	0.35 - 0.37	0.000006	S13
19	14400	14800	Marlstone	> 50	1.80 - 1.90	2.15 - 2.25	0.50 - 0.70	0.25 - 0.35	18 - 22	22 - 26	400 - 550	0.40 - 0.42	0.000000	E13
			ML, SM	> 50	1.65 - 1.80	1.95 - 2.10	0.20 - 0.30	0.08 - 0.15	21 - 23	26 - 28	250 - 400	0.36 - 0.38	0.000010	
20	14800	15300	Sandstone , Marlstone & Siltstone	> 50	1.70 - 1.80	2.10 - 2.25	0.30 - 0.45	0.20 - 0.25	22 - 24	26 - 28	450 - 550	0.34 - 0.36	0.000006	S14
21	15300	16000	Marlstone , Siltstone & Sandstone	> 50	1.65 - 1.82	2.0 - 2.25	0.40 - 0.60	0.25 - 0.40	20 - 22	24 - 26	400 - 550	0.36 - 0.38	0.000005	E14
22	16000	16800	CL , SM	20 - 60	1.70 - 1.85	1.90 - 2.10	0.30 - 0.50	0.20 - 0.30	16 - 18	26 - 28	300 - 400	0.38 - 0.40	0.000005	S15
23	16800	17150	Marlstone , Sandstone	20 - 50	1.70 - 1.85	1.90 - 2.20	0.40 - 0.60	0.25 - 0.35	22 - 24	25 - 27	450 - 600	0.35 - 0.37	0.000006	E15
			CL, SM		1.60 - 1.75	1.90 - 2.10	0.3 - 0.5	0.20 - 0.30	16 - 18	25 - 27	300 - 500	0.38 - 0.40	0.000005	
24	17150	18600	ML , SM & CL	30 - 60	1.65 - 1.80	1.90 - 2.10	0.20 - 0.30	0.10 - 0.20	19 - 21	27 - 29	250 - 350	0.38 - 0.40	0.000006	S16 , E16
25	18600	19200	Marlstone	> 45	1.60 - 1.80	1.95 - 2.20	0.70 - 1.0	0.35 - 0.50	12 - 14	20 - 22	350 - 500	0.40 - 0.42	0.000000	S17
26	19200	20600	Siltstone , Marlstone	> 40	1.70 - 1.85	2.05 - 2.25	0.50 - 0.70	0.25 - 0.40	18 - 22	24 - 26	300 - 500	0.36 - 0.38	0.000005	E17 , S18
27	20600	20950	Marlstone	> 30	1.70 - 1.85	2.10 - 2.20	0.30 - 0.40	0.15 - 0.25	16 - 18	21 - 23	250 - 400	0.40 - 0.42	0.000005	E18
28	20950	22100	Marlstone , Siltstone	> 45	1.65 - 1.85	2.05 - 2.25	0.40 - 0.60	0.20 - 0.40	20 - 22	24 - 26	400 - 550	0.36 - 0.38	0.000005	S19,E19,S20

SM = Silty Sand (with gravel), SC = Clayey Sand (with gravel), GM = Silty Gravel (with sand), CL = Inorganic clays of low plasticity, ML = Inorganic silts with slight plasticity



شکل ۳-۸. طبقه‌بندی زمین بر اساس جنس آن‌ها به چهار گروه مختلف در مسیر طولی خط دوم قطار شهری تبریز

در این طبقه‌بندی مقاومت، اندازه ذرات، چسبندگی، اصطکاک داخلی و مدول یانگ خاک بر اساس نتایج خروجی از آزمایش نفوذ استاندارد در نظر گرفته شده است. بیشتر خاک‌های گروه اول از جنس ماسه سیلت‌دار بوده، گروه دوم از خاک‌ها رس‌ها و سیلت‌های همراه با پلاستیسیته کم هستند، ماسه سیلت‌دار به همراه مقداری رس و سیلت گروه سوم را تشکیل داده و در نهایت سنگ مارل سخت به همراه ماسه سنگ، جنس خاک‌های گروه چهارم هستند. همچنین مشخص است که در هر گروه از جنس خاک، تونل دارای چه مقدار روباره‌ای از سطح زمین تا تاج تونل است.

طبقه‌بندی خاک‌های مذکور که زمین مسیر تونل را شامل می‌شود، به ترتیب از گروه اول به چهارم ۷۰۰۰ متر، ۲۴۲۵ متر، ۶۳۲۵ متر و ۶۳۵۰ متر از مسیر کل تونل خط دوم قطار شهری را شامل می‌شوند. لازم به ذکر است که گروه اول که از جنس ماسه سیلت‌دار است بیشترین بخش از مسیر تونل را در بر گرفته است که بیشتر در ابتدای تونل مشاهده شده و همچنین مقدار کمی از این نوع جنس خاک، در اواسط مسیر طولی تونل قرار دارد. خاک‌های رس و سیلت (همراه با پلاستیسیته کم) که به عنوان گروه دوم در این تحقیق طبقه‌بندی شده‌اند، کمترین بخش از مسیر تونل را شامل شده است. این گروه از جنس خاک بیشتر در موقعیت ابتدایی تا اواسط مسیر طولی تونل مشاهده شده است. گروه چهارم که از آن‌ها به زمین سخت در تحقیق یاد شده است، در انتهای این مسیر طولی تونل قرار داشته و از سنگ مارل سخت و ماسه سنگ تشکیل شده است. اطلاعات طبقه‌بندی ژئوتکنیکی خاک به صورت دقیق‌تر در جدول ۳-۵، درج شده و همچنین فراوانی این گروه‌های طبقه‌بندی شده در شکل ۳-۹، نشان داده شده است.

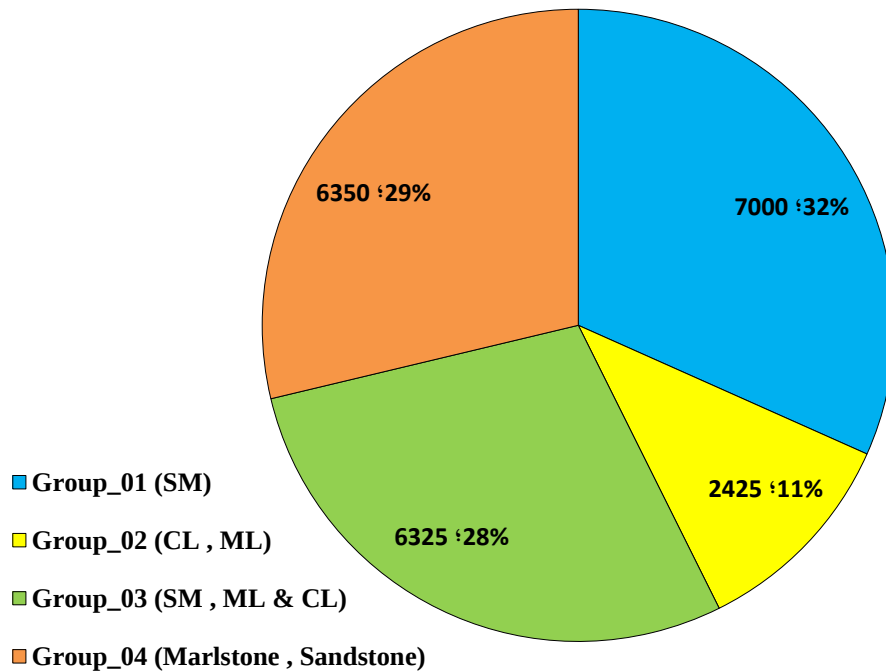
جدول ۳-۵. انواع گروه‌های مختلف زمین براساس جنس آن‌ها

گروه‌های طبقه‌بندی	مقادیر طول مسیر تونل بر اساس جنس زمین	جنس زمین	نماد جنس زمین
۱	۷۰۰۰ متر	ماسه سیلت‌دار	SM
۲	۲۴۲۵ متر	رس و سیلت با پلاستیسیته کم	CL , ML
۳	۶۳۲۵ متر	ماسه سیلت‌دار و سیلت به همراه رس با پلاستیسیته کم	SM , ML & CL
۴	۶۳۵۰ متر	مارل سخت و ماسه سنگ	Marlstone , Sandstone

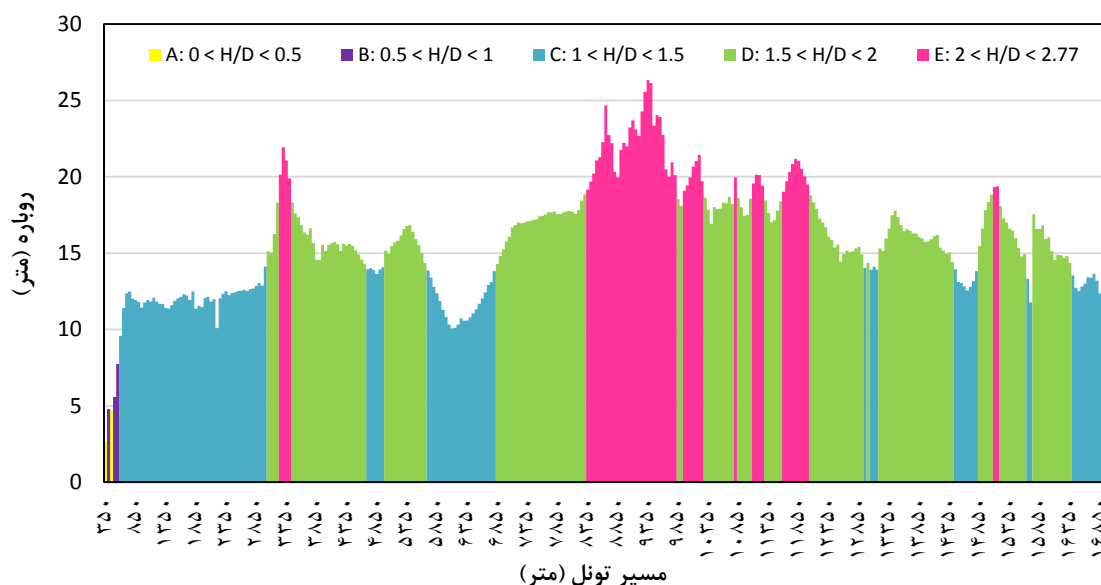
پس از طبقه‌بندی کلی خاک در چهار گروه، مقادیر روباره طراحی شده تونل به ازای هر ۵۰ متر مشخص شده است. لازم به ذکر است که مقادیر روباره از تاج تونل در نظر گرفته شده است. این مقادیر در شکل ۳-۱۰، نمایش داده شده است.

روبارهای مختلف تونل در پنج رده‌بندی مطابق شکل ۳-۱۰، تقسیم شده‌اند. معیار این تقسیم‌بندی مقدار ارتفاع روباره تونل تقسیم بر قطر تونل است. قسمت‌هایی از تونل که ارتفاع روباره تونل کمتر از شعاع تونل را دارند، گروه A نام‌گذاری شده و همین‌طور به ترتیب مسیرهایی از تونل که دارای روباره بزرگ‌تر از شعاع و کمتر از قطر تونل را دارند گروه B، ارتفاع روباره‌های قسمت‌هایی از تونل که بزرگ‌تر از مقدار قطر تونل و کمتر از یک و نیم برابر قطر آن هستند در گروه C، طبقه‌بندی

شده‌اند. گروه D، قسمت‌هایی از مسیر تونل را شامل می‌شود که ارتفاع روباره تونل از یک و نیم برابر قطر تونل بزرگ‌تر بوده ولی از دوبرابر قطر آن کمتر باشد و در نهایت مقادیر ارتفاع‌های روباره تونل در صورت بزرگ‌تر بودن از مقدار دوبرابر قطر تونل، در دسته E، جای می‌گیرند. این دسته‌بندی روباره‌ها در جدول ۳-۶، به صورت جزئی‌تر درج شده است. لازم به ذکر است قرار داشتن پرتال ورودی تونل در ۳۰۰ متر ابتدای مسیر تونل و همچنین از ۱۷ کیلومتر به بعد مسیر تونل نیز به دلیل ارتفاع بسیار اندک روباره تونل، به صورت حفاری روباز بوده که در این تحقیق بررسی نشده‌اند.



شکل ۳-۹. فراوانی گروه‌های طبقه‌بندی شده جنس زمین در مسیر طولی خط دوم قطار شهری تبریز

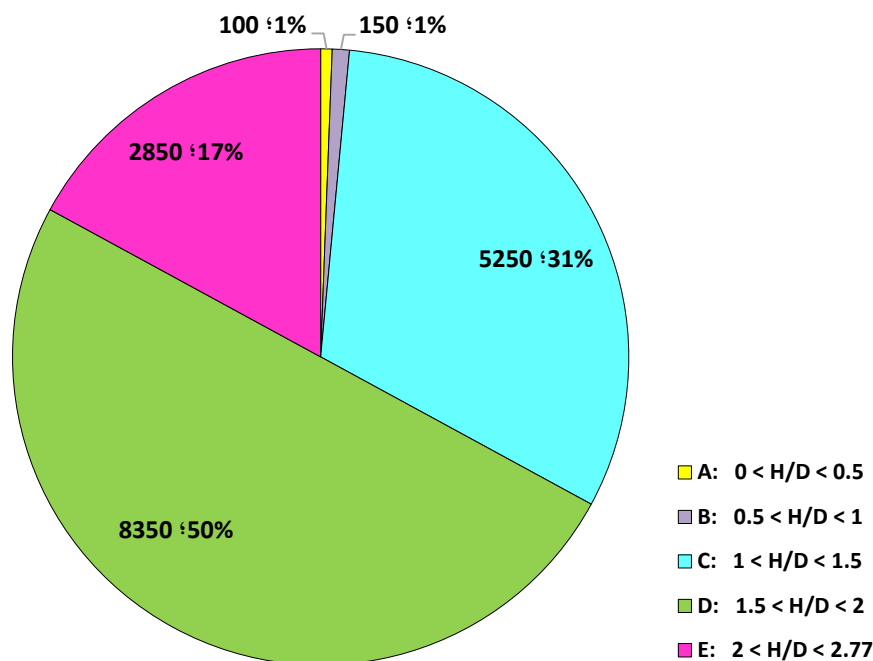


شکل ۳-۱۰. طبقه‌بندی مقادیر مختلف روباره خط دو قطار شهری تبریز

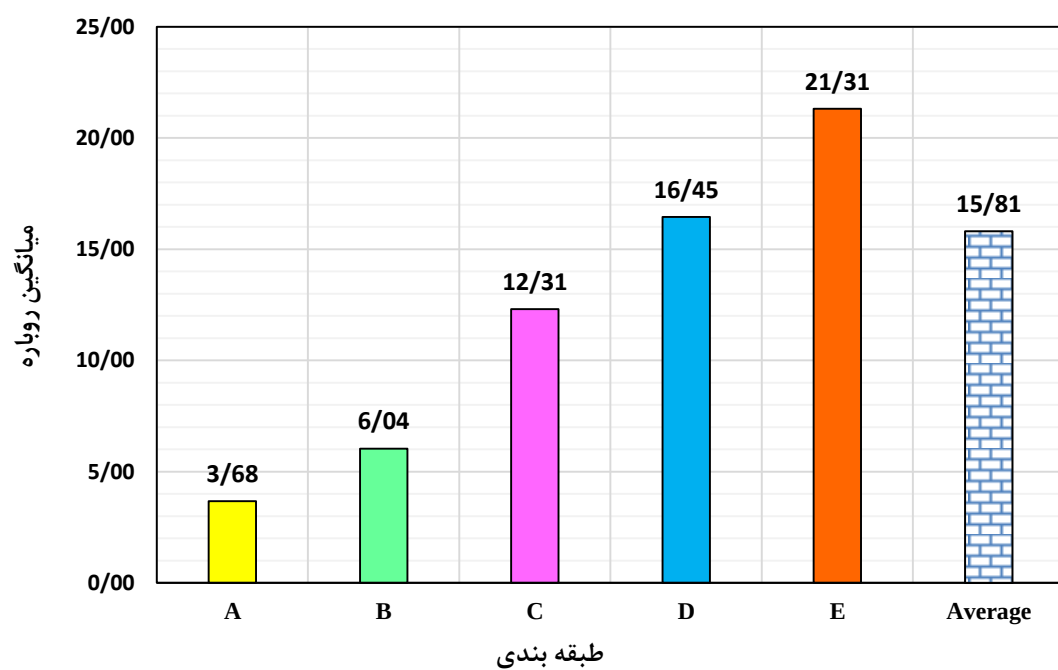
جدول ۳-۶. طبقه‌بندی‌های مختلف مسیر تونل بر اساس مقادیر روباره به قطر تونل

گروه‌های طبقه‌بندی	مقادیر روباره بر قطر تونل (H/D)	مقادیر طول مسیر تونل بر حسب متر	درصد فراوانی مقادیر روباره بر قطر	میانگین مقادیر روباره بر حسب متر
A	۰ - ۰/۵	۱۰۰	۱	۳/۶۸
B	۰/۵ - ۱	۱۵۰	۱	۶/۰۴
C	۱ - ۱/۵	۵۲۵۰	۳۱	۱۲/۳۱
D	۱/۵ - ۲	۸۳۵۰	۵۰	۱۶/۴۵
E	۲ - ۳	۲۸۵۰	۱۷	۲۱/۳۱

مطالعات آماری بر روی داده‌ها نشان می‌دهد که به غیر از دو درصد ابتدای مسیر تونل، ۹۸ درصد از ارتفاع روباره مسیر تونل بین قطر تونل و حدوداً سه برابر آن بوده است و در این بین، قسمت D، حدوداً نصف مسیر تونل را تشکیل داده که بیشترین مقدار مسیر تونل بوده که با ارتفاع روباره یک و نیم برابر قطر تونل تا دو برابر آن حفاری شده است. این اطلاعات آماری برای درک بیشتر موضوع در شکل ۳-۱۲ و شکل ۳-۱۲، به ترتیب در دو حالت نمودار دایره‌ای و میله‌ای نمایش داده شده است. مطالعات آماری انجام شده نشان می‌دهد که ۹۸ درصد از مسیر تونل دارای مقدار روباره بیشتر از مقدار قطر تونل و کمتر از ماکزیمم روباره که برابر با ۲۶/۳ متر ($H/D=2.77$) است. بنابراین مدل‌های این پژوهش در چهار مقطع از چهار گروه مهم B, C, D, E این مسیر مدل‌سازی شده هستند.



شکل ۳-۱۱. طبقه‌بندی مقادیر مختلف روباره‌های مسیر طولی تونل بر اساس فراوانی آن‌ها



شکل ۳-۱۲. میانگین مقادیر روباره‌های تونل در انواع گروه‌های طبقه‌بندی شده

فصل ۴: مدل سازی و تحلیل عددی نشست سطح زمین در تونل خط دوم قطار شهری تبریز

۴-۱ مقدمه

حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی موجب حذف توده‌ای از خاک محل شده و سبب تغییر در وضعیت تنش اطراف آن‌ها می‌شود. از جمله پدیده‌های مهم ناشی از این دست‌خوردگی، ایجاد نشست در روی سطح زمین است که این امر در تونل‌های کم عمق شهری، به خصوص زمانی که از زیر مناطق مسکونی عبور می‌کنند از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از این‌رو موضوع نشست همواره از سوی محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب میزان آن را قبل از شروع عملیات احداث تونل پیش بینی کنند.

ابتدا به نحوه‌ی مدل‌سازی تونل خط دو قطار شهری تبریز پرداخته شده است. سپس اعتبار سنجی مدل بررسی شده است. پس از تبیین این موضوع، نشست سطح زمین در طول خط دو قطار شهری تبریز در اثر حفر مکانیزه، بررسی و مورد تحلیل قرار گرفته است. در انتهای این فصل هم به مقایسه تمامی مدل‌ها از هم پرداخته شده و از دیدگاه فنی عمق بهینه در طول مسیر تونل تعیین شده است.

۴-۲ نحوه مدل‌سازی

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی توسط نرم افزار FLAC3D، میزان نشست زمین در اثر حفر تونل خط دو قطار شهری تبریز پیش بینی و تاثیر عمق تونل بر میزان نشست بررسی شده است.

نرم‌افزار FLAC3D یک برنامه تفاضل محدود برای محاسبات مهندسی بوده که از جمله محصولات شرکت آمریکایی^۱ Itasca است. نرم افزار FLAC از محبوب‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی عمران و مهندسی معدن بوده است. نرم‌افزار FLAC در دو نسخه دو بعدی^۲ و سه بعدی^۳ ارائه شده است. با این‌که شیوه مدل‌سازی در دو نسخه دوبعدی و سه‌بعدی تفاوت‌هایی جزئی دارد، ولی در حقیقت پایه حل معادلات در هر دو نسخه یکسان بوده و از الگوی یکسانی برای طراحی مدل در طی مراحل مدل‌سازی برخوردار هستند. این برنامه می‌تواند رفتار ساختارهای خاک، سنگ و یا دیگر مواد را به هنگام نزدیک شدن به محدوده شکستشان، که رفتارهای گوناگون از خود نشان می‌دهند، مدل‌سازی کند.

به طور کلی این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و تحلیل در محیط پیوسته طراحی شده است ولی این امکان نیز وجود دارد که تعداد محدودی از سطوح ناپیوستگی یا سطوح لغزش را نیز مدل‌سازی کرد. در این نرم‌افزار امکان مدل‌سازی سازه‌های تونلی، شمع‌ها، میل مهارها و به‌طور کلی سازه‌هایی که با محیط درونگیر خود در تماس هستند وجود دارد و علاوه بر این، امکان بررسی اثر آن‌ها بر یکدیگر و بررسی پایداری سازه‌های مدل‌سازی شده در سطح زمین و زیرزمین وجود دارد. ویژگی‌هایی از این

^۱ Itasca Consulting Group, Inc.

^۲ FLAC 2D

^۳ FLAC 3D

نرم افزار در زیر آورده شده است:

- فرمان های ورودی برنامه و داده ها دارای آرایش خاصی نبوده و می توانند مستقیم یا از طریق یک فایل داده به برنامه وارد شوند. داده ها به راحتی قابل اصلاح بوده و چندین فایل داده را می توان به طور متوالی متصل کرده و یک سری تحلیل عددی انجام داد.
- وجود مدل های رفتاری مختلف در زمینه رفتار الاستیک و پلاستیک
- دارا بودن محیط کاربر پسند و رابط گرافیکی قوی
- استفاده بهینه از سخت افزار پردازنده به منظور کاهش زمان پردازش
- امکان تعریف روابط و حتی مدل های رفتاری جدید در قالب کد نویسی به زبان FISH
- قابلیت تحلیل استاتیک، دینامیکی و حرارتی سازه های
- امکان تحلیل با اعمال خزش و سیال نیز در مدل وجود دارد
- امکان مدل سازی المان های سازه ای و سیستم های نگهداری از جمله پیچ سنگ، قاب فولادی، شاتکریت، شمع و ...

مدل سازی با استفاده از نرم افزار Flac 3D به حالت کلی به ترتیب زیر انجام می گیرد؛

- ساخت هندسه مدل
- انتخاب محدوده مناسبی از زمین و مش بندی مناسب
- انتخاب مدل رفتاری مناسب
- اعمال شرایط مرزی
- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری
- تعیین استپ حفاری مناسب
- حفاری تونل و تعیین میزان جابه جایی ها
- آزاد سازی جابه جایی ها
- مدل سازی سیستم نگهداری
- حل نهایی مدل

در ادامه فصل به توصیف مراحل نحوه ی مدل سازی با نرم افزار FLAC 3D پرداخته شده است.

۴-۲-۱. ساخت هندسه مدل

طبق گفته های پیشین در بخش ابتدایی این فصل، جنس زمین تونل خط دوم قطار شهری تبریز، به چهار گروه طبقه بندی شده است. همچنین فراوانی مقادیر روباره به قطر تونل نیز به پنج گروه متفاوت تقسیم شده اند. گروه ابتدایی آن یعنی گروه A، به طول صد متر بوده و در ابتدای پرتال ورودی تونل قرار داشته که به دلیل تحکیم از پیش یافته آن مورد بررسی قرار نگرفته است. همین طور با توجه به این که ارتفاع تونل در مترهای ۱۷۰۰ تا ۲۲۱۰۰ متر کمتر از شعاع تونل بوده لذا به صورت روباز حفاری انجام می گیرد و در این تحقیق مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در این

تحقیق توسط ۱۶ مدل، نشست سطحی بیشینه زمین محاسبه شده است که در جدول ۴-۱، به توضیحات این مدل‌ها پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در ستون نام مدل، اعداد نمایان‌گر طبقه‌بندی جنس خاک و حروف لاتین نشان‌گر طبقه‌بندی مقادیر روباره تونل است. همچنین پارامترهای ژئوتکنیکی مدل‌های مختلف زمین، در هنگام طبقه‌بندی جنس زمین مسیر تونل، از سوی نویسندگان این تحقیق مشخص و درج شده است. توضیح این نکته حایز اهمیت است که نحوه‌ی مقاطع انتخاب شده برای تمامی مدل‌ها به این صورت است که؛ کمترین، میانگین و بیشترین مقادیر روباره موجود در طراحی مسیر حفر تونل به روش مکانیزه، به ترتیب به عنوان مقاطع اول، سوم و چهارم این تحقیق انتخاب شده است. مقطع دوم نیز میانگین روباره‌های بیشتر از قطر تونل و کمتر از یک و نیم برابر آن در نظر گرفته شده است.

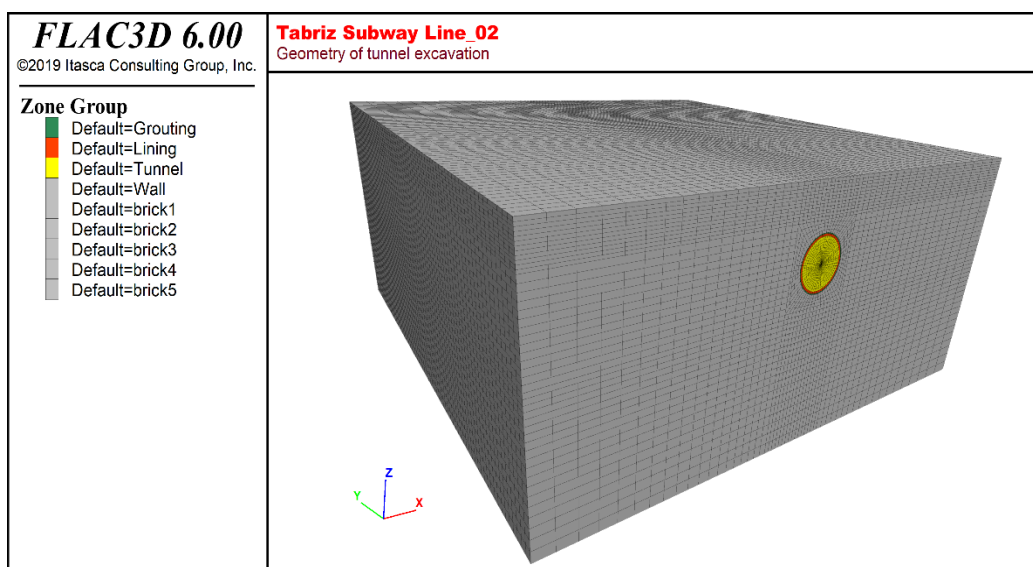
ابعاد تمامی مدل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان تا حد امکان هندسه نیمه بی نهایت را شبیه‌سازی کرد و از تاثیر مرزها جلوگیری کرد. به این منظور مدل‌های موجود در این تحقیق مطابق شکل ۴-۱، بر اساس قوانین زیر حداقل ابعاد انتخاب شده‌اند [۵۰]:

- ارتفاع مدل $H + 4D$
 - طول مدل $H + 3D$
 - عرض مدل $3H$ (برای نصف مدل)
- H عمق تونل و D قطر تونل است.

جدول ۴-۱. موقعیت و خصوصیات پارامترهای ژئومکانیکی حالات مختلف مدل‌های انجام شده

شماره	نام مدل	روباره از تاج تونل (متر)	مترائز مقطع انتخابی (متر)	مدول یانگ (kg/cm ²)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چگالی (g/cm ³)	چسبندگی خاک (kg/cm ²)
۱	1_B	۷/۷۵	۵۵۰	۴۵۰	۰/۳۴	۲۸	۱/۹۲	۰/۱۵
۲	1_C	۱۲/۳۱	۱۶۵۰					
۳	1_D	۱۵/۸۱	۵۲۰۰					
۴	1_E	۲۶/۳۳	۹۳۵۰					
۵	2_B	۷/۷۵	۵۵۰	۳۴۰	۰/۳۸	۱۹	۱/۷۰	۰/۴۵
۶	2_C	۱۲/۳۱	۱۶۵۰					
۷	2_D	۱۵/۸۱	۵۲۰۰					
۸	2_E	۲۶/۳۳	۹۳۵۰					
۹	3_B	۷/۷۵	۵۵۰	۳۷۵	۰/۳۸	۲۱	۱/۷۰	۰/۳۰
۱۰	3_C	۱۲/۳۱	۱۶۵۰					
۱۱	3_D	۱۵/۸۱	۵۲۰۰					
۱۲	3_E	۲۶/۳۳	۹۳۵۰					
۱۳	4_B	۷/۷۵	۵۵۰	۴۷۵	۰/۳۷	۲۱	۱/۷۵	۰/۵۵
۱۴	4_C	۱۲/۳۱	۱۶۵۰					
۱۵	4_D	۱۵/۸۱	۵۲۰۰					
۱۶	4_E	۲۶/۳۳	۹۳۵۰					

برای بررسی بهتر نتایج مدل‌سازی‌ها، تمامی مدل‌ها در زمین‌های همگن (بدون لایه‌بندی) و در حالت زهکشی‌شده ساخته شده‌اند. لازم به توضیح است که در این مدل‌سازی از شبکه‌بندی متوسط استفاده شده و این شبکه‌بندی در نواحی نزدیک تونل ریزتر شده است. نقاط کنترلی در روی سطح زمین در راستای محور تونل به فاصله هر ۱ متر قرار گرفته‌اند و در راستای عمودی آن تا فاصله ۱۰ متری از محور تونل به فاصله ۱ متر، در فاصله ۱۰ تا ۲۰ متر به فاصله ۲ متر و از ۲۰ متر به بعد به فاصله ۳ متر از یکدیگر قرار دارند، که در مجموع ۵۴۰۱ نقطه کنترلی در سطح زمین در نظر گرفته شده است.



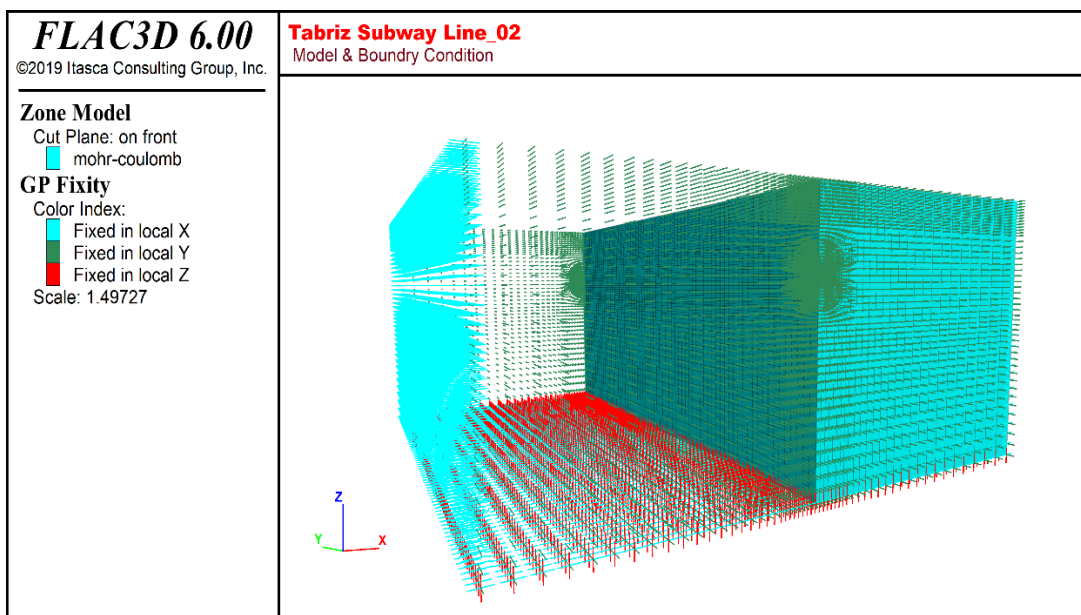
شکل ۴-۱. ابعاد هندسی مدل حفاری در نرم‌افزار FLAC3D

۴-۲-۲ انتخاب مدل رفتاری و تعیین شرایط مرزی

در این تحقیق برای تعیین رفتار زمین از مدل موهر - کولمب استفاده شده است. در مکانیک خاک و سنگ برای حالت پلاستیک، این مدل رفتاری مرسوم است. برای هر گروه از جنس زمین نسبت تنش افقی به قائم، از رابطه (۴-۱)، محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مدول بالک و مدول برشی برای هر لایه با توجه به پارامترهای مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آن لایه محاسبه شده است.

$$K = 1 - \sin(\Phi) \quad (4-1)$$

که در آن Φ ، زاویه اصطکاک داخلی خاک است. نحوه اعمال شرایط مرزی در این مدل به این گونه است که در همه اطراف مدل به جز سطح بالایی که سطح زمین است و نقاط کنترلی روی آن قرار دارند، محدود شده و محدودیت جابه‌جایی دارند. به طوری که دیواره‌های مرز مدل، از نوع غلظتی و همچنین کف مدل از نوع مفصلی است که هیچ‌گونه جابجایی در کف رخ نمی‌دهد. شکل ۴-۲، نوع مدل و شرایط مرزی را نشان می‌دهد.

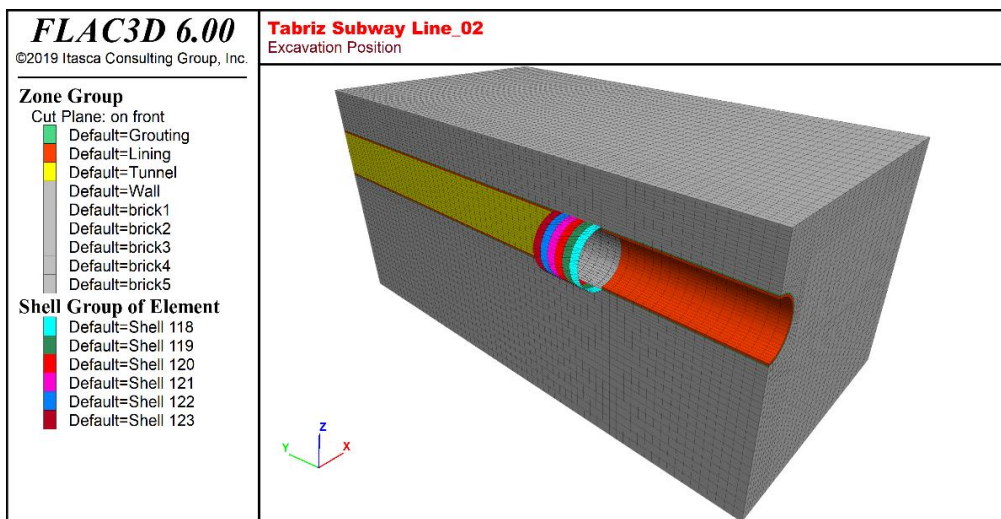


شکل ۴-۲. مرزهای مدل حفاری در نرم افزار FLAC3D

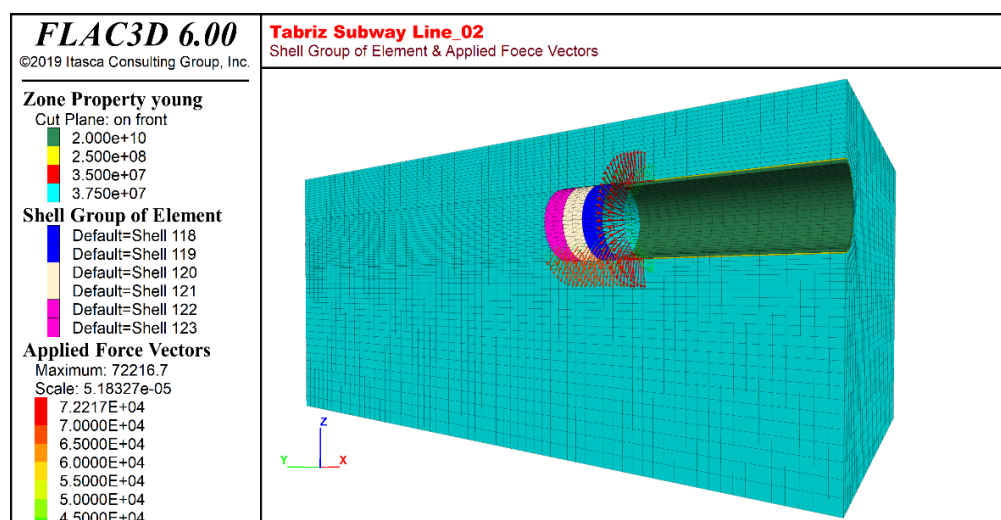
۴-۲-۳ حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری

مقدار تعادل در تمامی مدل های این تحقیق رسیدن به مقدار 10^{-7} از تنش است. همچنین برای تمامی مراحل حفاری و مدل های مختلف، محاسبات تعیین مقدار دوره تکرار حل عددی بهینه، برابر با ۴۰ درصد بیشترین مقدار جابجایی در نظر گرفته شده است. پس از تعیین مقدار دوره تکرار حل عددی مناسب حفاری، حفاری تونل مدل سازی شده است. مطابق شکل ۴-۳، طول فضای حفاری شده توسط دستگاه حفاری مکانیزه، ۶۶ متر از ابتدای مدل را شامل می شود.

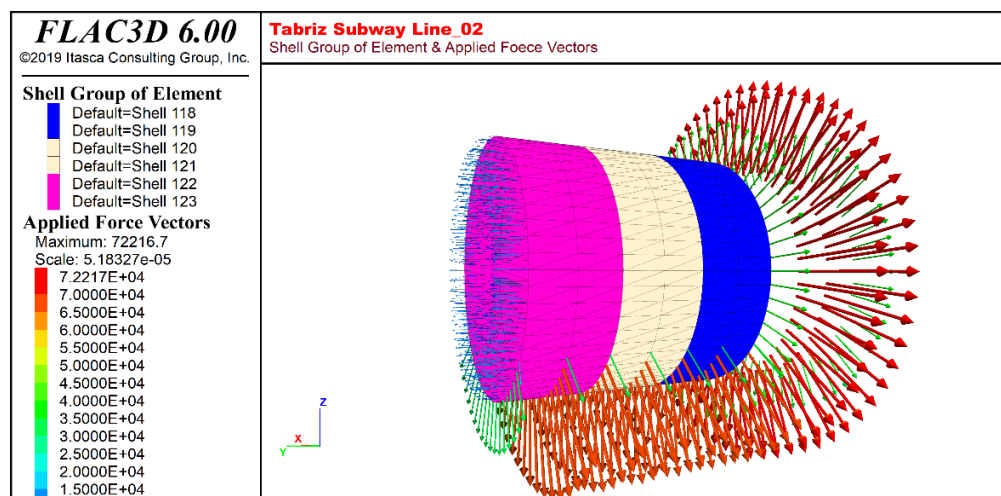
در این تحقیق، برای شبیه سازی شکل مخروطی سپردستگاه حفاری توسط المان های پوسته ای در نرم افزار فلک سه بعدی مدل سازی شده است. در این روش، سپر به سه قسمت مساوی با مدول های الاستیک متفاوت تقسیم شده است. مدول یانگ بخش جلویی برابر با ۱۰۰ گیگاپاسکال تعیین شده، اما مدول الاستیک بخش میانی و انتهایی شیلد حفاری بر مبنای تحلیل حساسیت انجام شده، مشخص شده است. لازم به ذکر است که مدول یانگ سپرها به صورت خطی از طرف بخش جلویی به عقب سپر به صورت خطی کاهش یافته است. در این مدل، مدول یانگ بخش میانی و عقبی سپر به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱ گیگاپاسکال تعیین شده است. همچنین مدل کردن فشار تزریق گروت یک روزه، فشار تزریق گروت ۲۸ روزه و وزن دستگاه حفاری وارده بر کف تونل باعث بهتر نتیجه دادن خروجی نرم-افزار فلک در بحث نشست سطح زمین شده است. در شکل ۴-۴، این موارد در دو قسمت الف و ب به صورت دقیق تر نشان داده شده است. در قسمت الف از شکل مذکور نیروهای وارد بر زمین از طرف دستگاه حفاری را نشان داده شده است. در قسمت ب، این نیروها از نمایی بهتر و نزدیک تر، نمایش داده شده است.



شکل ۳-۴. نمونه مدل حفاری در نرم‌افزار FLAC3D 6.00



الف) نیروهای وارد بر زمین، از طرف دستگاه حفاری در نرم‌افزار FLAC3D 6.00



ب) نمایش نیروهای وارده بر زمین از نمای نزدیک‌تر، در نرم‌افزار FLAC3D 6.00

شکل ۴-۴. نیروهای وارد بر زمین در حین حفاری از طرف دستگاه حفاری در نرم‌افزار FLAC3D 6.00

در این مدل از سیستم نگهداری پوسته‌ای^۱ استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۴-۲، آمده است. برای مقایسه بیشینه نشست سطحی زمین در مدل‌های متفاوت، پلان‌های پروفیل جابجایی سطحی زمین از یک مقطع عرضی در میانه تونل استخراج و با یکدیگر به مقایسه پرداخته می‌شوند که در فصل بعد به آن اشاره شده است.

جدول ۴-۲. خصوصیات سگمنت‌های مورد استفاده در مدل‌سازی برای سیستم نگهداری

ضخامت سگمنت (cm)	مدول الاستیسیته (Gpa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص
۳۵	۳۰	۰/۲	۲۵

۳-۴ اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی عددی

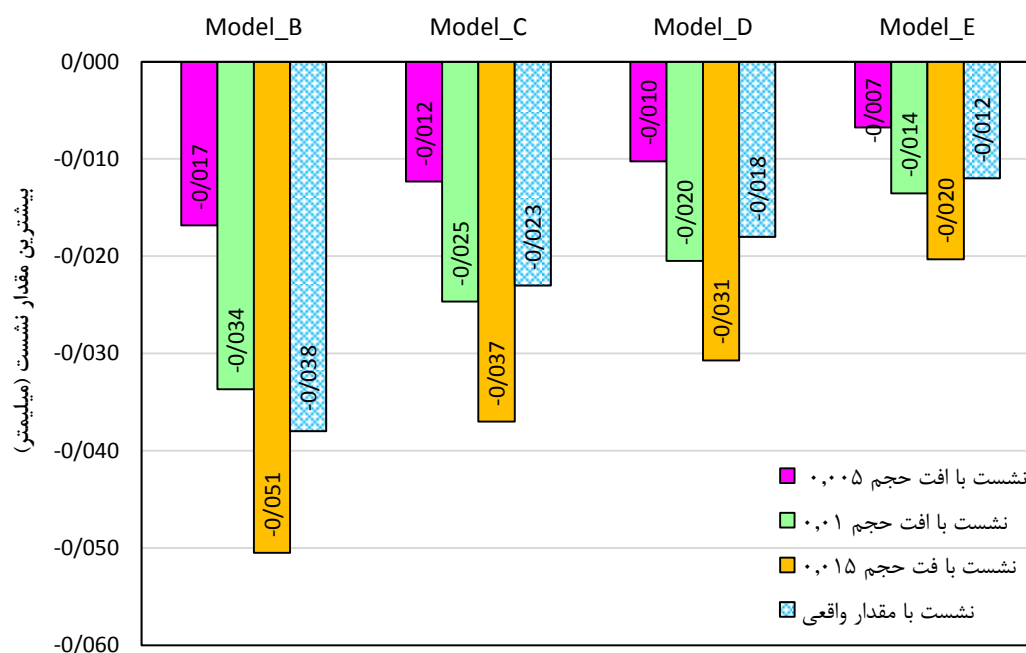
به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل‌سازی عددی در چهار مقطع از تونل به کیلومترهای ۵۵۰+، ۶۵۰+، ۷۰۰+ و ۸۰۰+ از نتایج ابزاربندی و رفتارنگاری استفاده شده است. همچنین ابتدا با استفاده از فرمول تجربی آقای پک^۲ که در رابطه (۴-۲۱)، مشخص است، مقادیر افت حجمی خاک با استفاده از مقادیر واقعی نشست زمین مشخص شده‌اند و سپس با افت حجمی خاک تعیین شده، تمامی مقاطع در زمین‌های متفاوت مدل‌سازی شده‌اند. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی عددی مقاطع منتخب، نقطه‌ای در سطح زمین به فاصله ۶۰ متری از جبهه کار برای پایش نشست در مقاطع مختلف انتخاب شده است.

$$S(Max) = 0.313 \left(\frac{V_L D^2}{i} \right) \quad (۲-۴)$$

ابتدا در مدل‌سازی مقاطع حفاری، افت حجمی خاک، برابر با ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده و مشاهده می‌شود که مقادیر نشست سطحی حاصل از رابطه تجربی کمتر از مقادیر واقعی داده‌های نشست اندازه‌گیری شده واقعی هستند. سپس مقادیر افت حجمی خاک مقداری بیشتر شده و به ۰/۰۱ می‌رسد، آن‌گاه مقادیر نشست حاصل، بسیار نزدیک به مقادیر واقعی نشست می‌شوند. در نهایت برای اطمینان بیشتر از مقدار افت حجمی خاک، با مقدار ۰/۰۱۵ نیز نتایج حاصل بررسی شده و مشخص می‌شود که مقادیر نشست حاصله خیلی بیشتر از مقادیر نشست واقعی هستند. بنابراین، افت حجمی در تمامی مقاطع مدل‌سازی ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۵، مقادیر نشست سطح زمین در افت‌های حجمی متفاوت خاک را با استفاده از رابطه (۴-۲۱) و همچنین مقادیر واقعی را نشان می‌دهد و لازم به ذکر است که نمودارها با رنگ‌های صورتی، سبز و قهوه‌ای به ترتیب مقادیر نشست حاصل از رابطه تجربی با افت‌های حجمی خاک ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۱۵ برای مقاطع مختلف انتخاب شده را نشان می‌دهند. نمودار آبی هاشورخورده نیز نتایج نشست واقعی است.

^۱ Shell

^۲ Peck



شکل ۴-۵. مقایسه مقادیر نشست در افت حجم‌های متفاوت

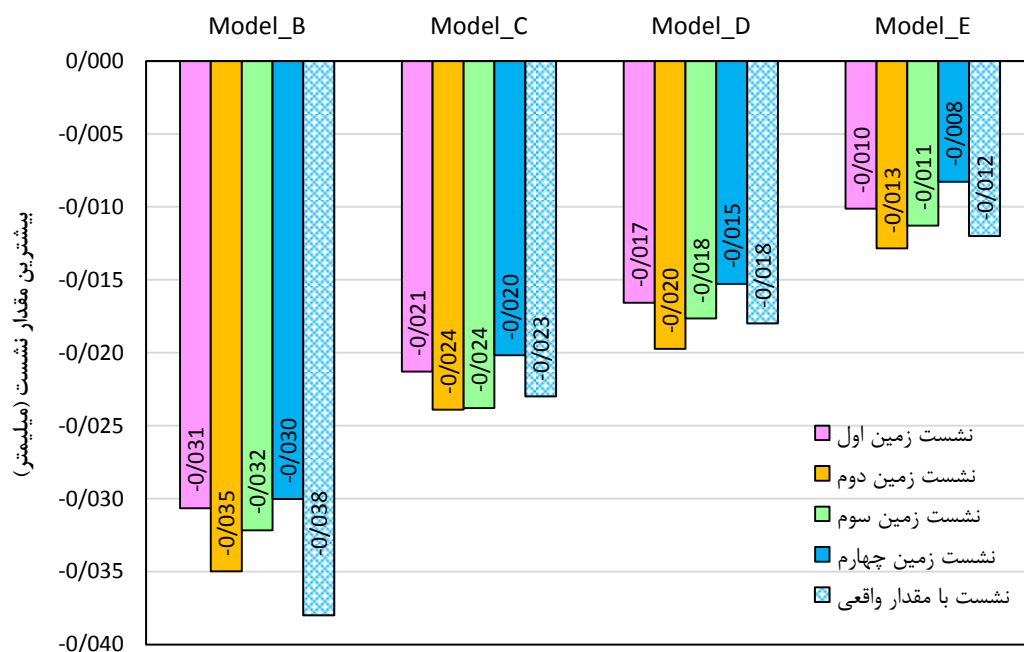
در ادامه به منظور اعتبار سنجی مدل‌های انجام شده در این تحقیق به مقایسه مقادیر نشست سطح زمین حاصل از مدل‌سازی در مقاطع مختلف با مقادیر ایزاربن‌دی، در جدول ۴-۳، پرداخته شده است. شرایط فشار جبهه کار و تزریق گروت نیز برای هر مقطع درج شده است. در این جدول به مقایسه نتایج نشست حاصل از مدل‌سازی و نتایج واقعی نشست، میانگین نتایج نشست در زمین‌های مختلف هر مقطع از حفاری تونل در نظر گرفته شده و به مقایسه با نتایج واقعی نشست در آن مقطع پرداخته شده است.

با توجه به جدول ۴-۳، مشخص است که بیشترین اختلاف مقادیر نشست زمین حاصل از مدل‌سازی با مقادیر واقعی مربوط به زمین چهارم با روباره ۲۶/۳ متر است که برابر با ۳۳/۳ درصد است. همچنین کمترین اختلاف مقادیر نشست زمین حاصل از مدل‌سازی با مقادیر واقعی مربوط به زمین سوم با روباره ۱۵/۸۱ متر است که برابر با صفر است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، برای مقایسه نتایج نشست و انتخاب عمق بهینه و مناسب از دیدگاه نشست سطح زمین، همه مدل‌های ساخته شده بدون در نظر گرفتن لایه‌بندی بوده و به صورت همگن مدل‌سازی شده است. این موضوع می‌تواند اختلاف حاصل از مقادیر نشست زمین در دو حالت مدل‌سازی و واقعی را توجیه کند. همچنین بر طبق شکل ۴-۶، مشخص است نتایج واقعی نشست بسیار نزدیک به مقادیر حاصل از مدل‌سازی است.

با بررسی و تحلیل بیشتر این اعداد مشخص می‌شود که میانگین اختلاف نشست‌های حاصل از مدل‌سازی و مقادیر واقعی چهار گروه زمین، با روباره‌های ۷/۷۵، ۱۲/۳۱، ۱۵/۸۱ و ۲۶/۳۳ متر به ترتیب برابر با ۱۵/۸، ۷/۶، ۸/۳ و ۱۶/۷ درصد است. این تحلیل نشان می‌دهد در زمین با اعماق بیشتر اختلاف مقادیر نشست بیشتر بوده و می‌تواند به احتمال زیاد ناشی از تاثیر لایه‌بندی زمین باشد.

جدول ۳-۴. مقایسه مقادیر نشست در حالات مدل سازی و واقعی در مقاطع منتخب از تونل

شماره	نام مدل	فشار جبهه کار (bar)	فشار تزریق (bar)	نشست حاصل از مدل سازی	نشست ابزاربندی	اختلاف نشست (mm)	اختلاف نشست (%)
۱	1_B	۰/۷۷	۱/۲۷	۳۱	۳۸	-۷	۱۸/۴
۲	1_C	۱/۲۳	۱/۷۳	۲۱	۲۳	-۲	۸/۷
۳	1_D	۱/۵۸	۲/۰۸	۱۷	۱۸	-۱	۵/۵
۴	1_E	۲/۶۳	۳/۱۳	۱۰	۱۲	-۲	۱۶/۶
۵	2_B	۰/۸۷	۱/۳۷	۳۵	۳۸	-۳	۷/۹
۶	2_C	۱/۳۸	۱/۸۸	۲۴	۲۳	۱	۴/۳
۷	2_D	۱/۷۷	۲/۲۷	۲۰	۱۸	۲	۱۱/۱
۸	2_E	۲/۹۴	۳/۴۴	۱۳	۱۲	۱	۸/۳
۹	3_B	۰/۸۳	۱/۳۳	۳۲	۳۸	-۶	۱۵/۸
۱۰	3_C	۱/۳۱	۱/۸۱	۲۴	۲۳	۱	۴/۳
۱۱	3_D	۱/۶۹	۲/۱۹	۱۸	۱۸	۰	۰
۱۲	3_E	۲/۸۱	۳/۳۱	۱۱	۱۲	-۱	۸/۳
۱۳	4_B	۰/۸۵	۱/۳۵	۳۰	۳۸	-۸	۲۱/۱
۱۴	4_C	۱/۳۵	۱/۸۵	۲۰	۲۳	-۳	۱۳/۱
۱۵	4_D	۱/۷۴	۲/۲۴	۱۵	۱۸	-۳	۱۶/۶
۱۶	4_E	۲/۸۹	۳/۳۹	۸	۱۲	-۴	۳۳/۳



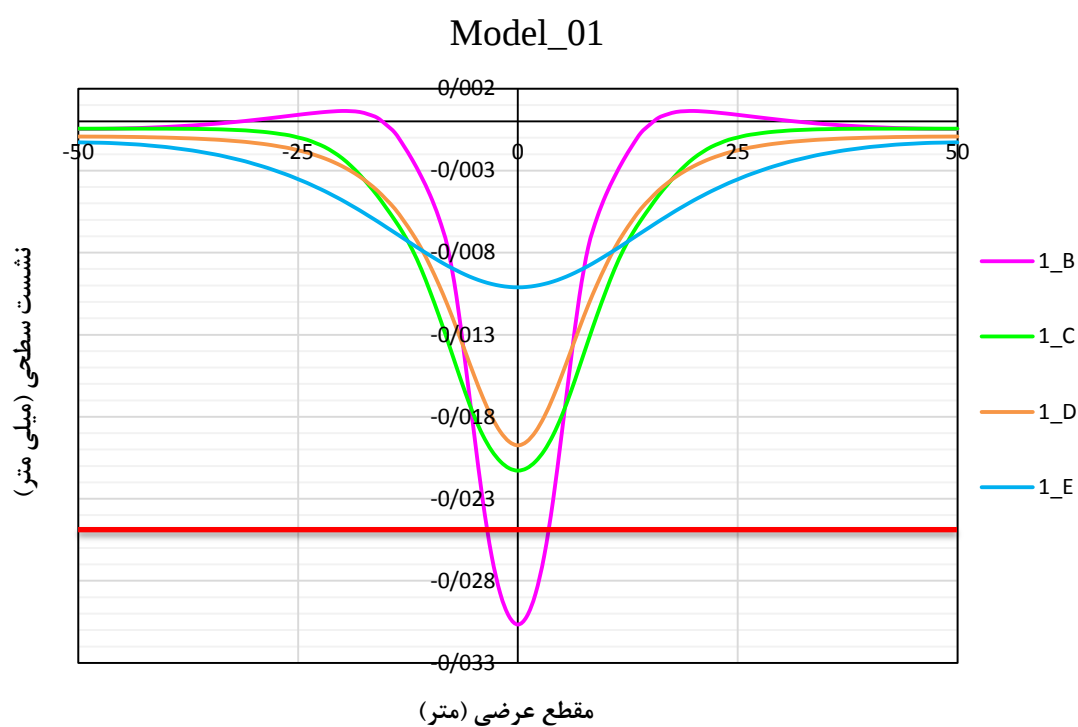
شکل ۴-۶. نمودار مقادیر نشست مدل سازی به همراه مقادیر واقعی آن ها در انواع زمین

۴-۴ نشست سطحی زمین در اعماق مختلف

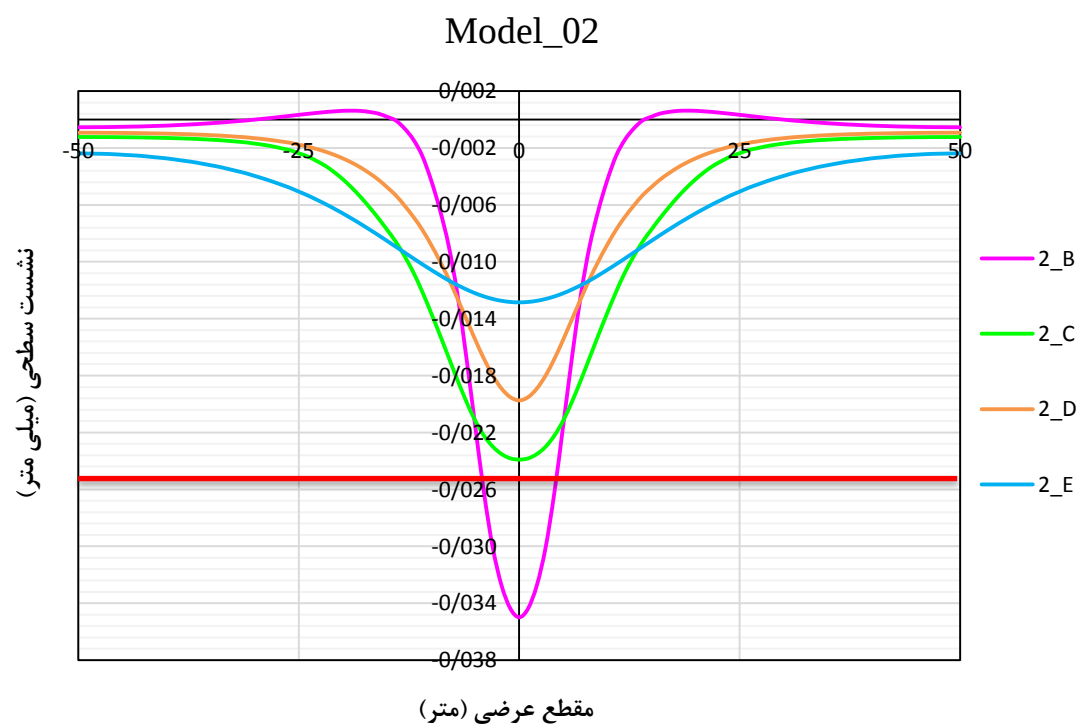
در هنگام حفاری، در ابتدا زمین میزبان، تحت فشار ناشی از تنش‌های طبیعی بوده و هرگونه تغییر در آن باعث مختل شدن وضعیت تنش می‌شود که همین امر می‌تواند باعث ایجاد خسارات زیادی شود. یکی از پدیده‌های مهم ناشی از حفر تونل و فضاهای زیرزمینی وقوع نشست در سطح زمین است که این امر به ویژه در مناطق شهری و علی‌الخصوص وقتی که تونل از زیر بافت شهری شهر عبور می‌کند بسیار حایز اهمیت است. بنابراین برای جلوگیری از هرگونه خسارت‌های ناشی از ساخت تونل، بر روی سازه‌های سطحی باید میزان نشست به طور دقیق پیش‌بینی و کنترل شود. عوامل زیادی بر میزان نشست احتمالی تاثیر می‌گذارند.

در این تحقیق تاثیر عمق‌های مختلف حفر تونل قطار شهری خط دوم تبریز از دو دیدگاه فنی و هزینه‌ای بررسی شده و عمق بهینه برای حفر تونل تعیین شده است. از دیدگاه فنی، نشست سطحی زمین مد نظر قرار گرفته است. در صورتی که مقدار نشست سطح زمین از ۲۵ میلی‌متر بیشتر باشد، باید مقدار روباره تا زمانی که مقدار نشست به کمتر از ۲۵ میلی‌متر برسد، افزایش یابد. برای نشان دادن نتایج تاثیر عمق تونل در میزان نشست سطحی زمین، تمامی این مدل‌ها در نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی شده است. در این تحقیق توسط ۱۶ مدل، نشست سطحی بیشینه زمین محاسبه شده است که در ادامه به توضیحات این مدل‌ها پرداخته شده است. مدل‌ها در چهار گروه زمین‌های متفاوت طبقه‌بندی شده که در این تحقیق با نام‌های گروه اول، دوم، سوم و چهارم ذکر شده‌اند، انجام شده است.

بنابراین نمودارهای نشست سطحی زمین تمامی مدل‌های متفاوت جنس زمین در اعماق متفاوت، در شکل ۴-۷، شکل ۴-۸، شکل ۴-۹ و شکل ۴-۱۰، مورد بررسی شد. و مدل‌هایی که نشست در آن‌ها بیشتر از مقدار حد مجاز نشست سطحی زمین (۲۵ میلی‌متر) است، رد شده است. در اشکال نشست سطحی زمین، هر زمین متشکل از چهار عمق مختلف با روباره‌های (فاصله‌ی سطح زمین تا تاج تونل) ۷/۷۵ متر (رنگ صورتی)، ۱۲/۳۱ متر (رنگ سبز)، ۱۵/۸۱ متر (رنگ نارنجی) و ۲۶/۳۳ متر (رنگ آبی) که به ترتیب در این تحقیق از آن‌ها با نام‌های لاتین B, C, D و E یاد شده است.

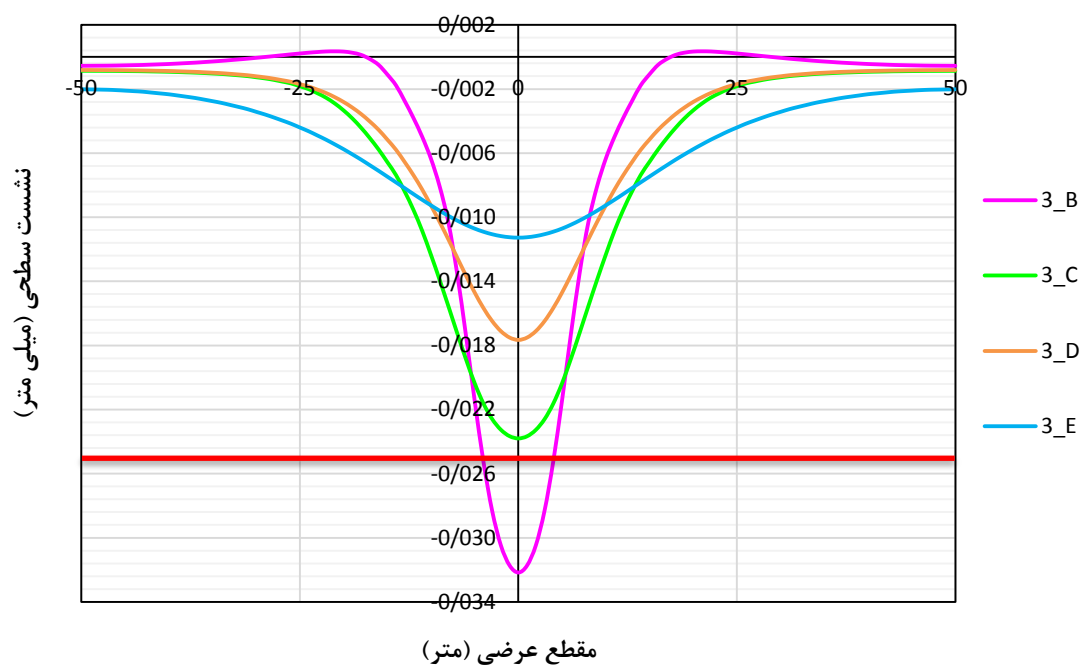


شکل ۴-۷. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه اول در عمق‌های مختلف



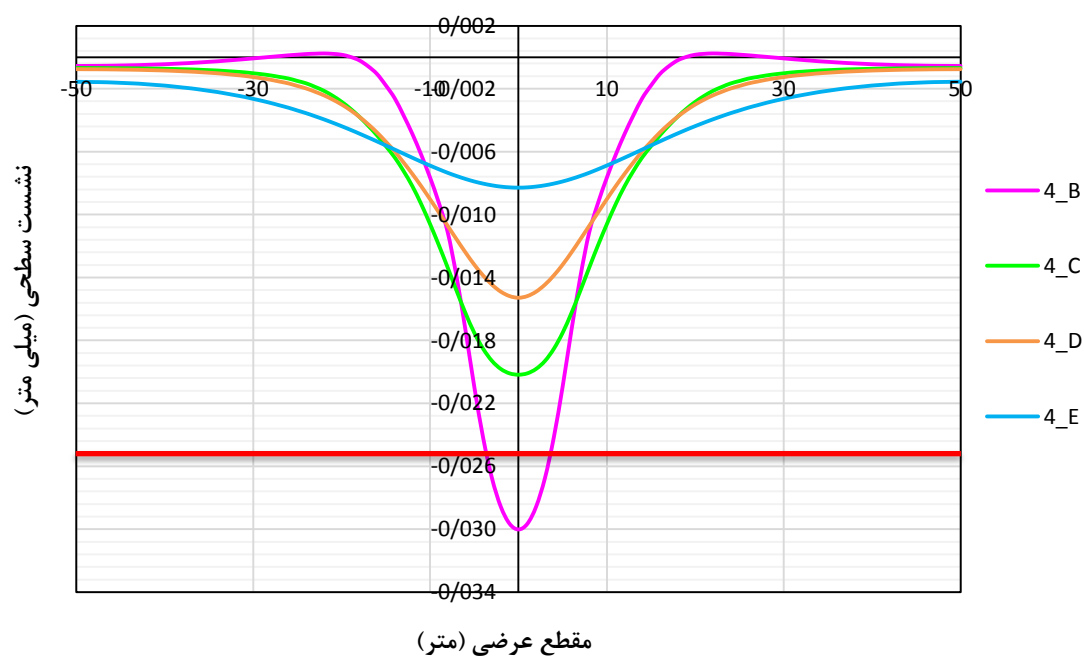
شکل ۴-۸. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه دوم در عمق‌های مختلف

Model_03



شکل ۴-۹. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه سوم در عمق‌های مختلف

Model_04



شکل ۴-۱۰. نمودار مقایسه نشست سطحی زمین گروه چهارم در عمق‌های مختلف

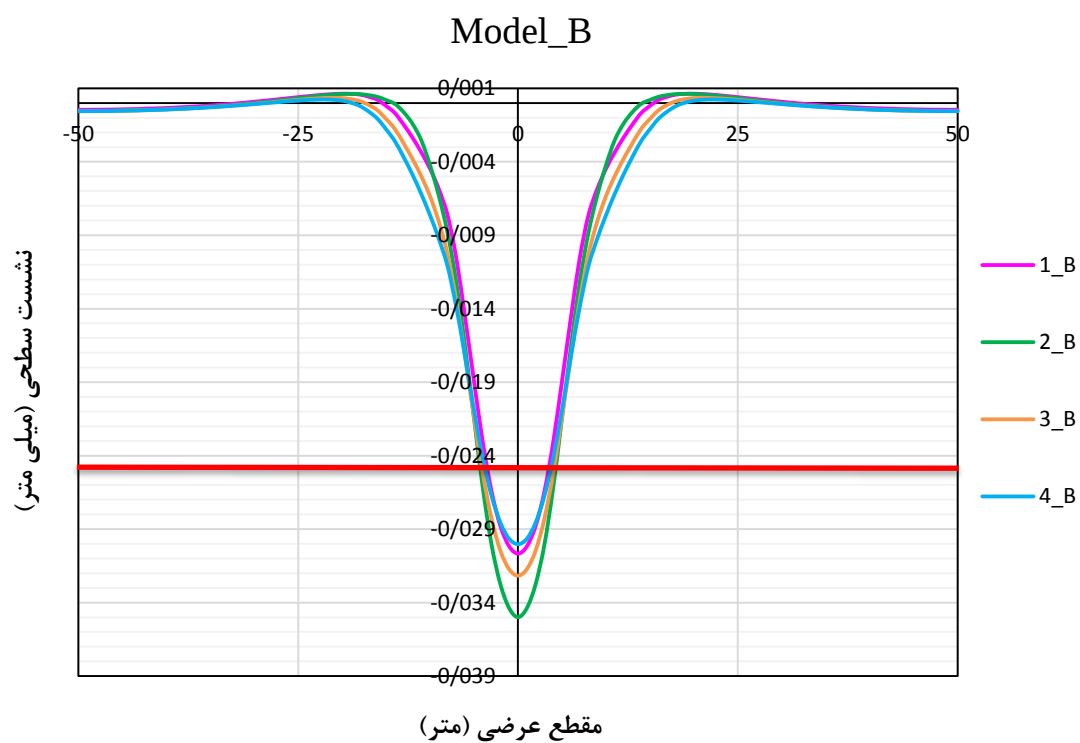
با توجه به شکل ۴-۷، مشخص می‌شود که مقادیر بیشترین نشست سطحی در زمین نوع اول برای روباره‌های مختلف، حدوداً بین ۱۰ تا ۳۱ میلی‌متر است. این موضوع نشان می‌دهد که تاثیر عمق تونل بر روی مقادیر بیشینه نشست سطحی زمین بیشتر است. مقدار نشست در عمق ۷/۷۵ متر برابر با ۳۱ میلی‌متر است که از حد مجاز آن بیشتر بوده و از دیدگاه فنی رد می‌شود. مقادیر نشست زمین با افزایش عمق کمتر از حد مجاز نشست بوده و همچنین روند کاهشی به خود گرفته است به طوری که در بیشترین عمق تونل (یعنی ۲۶/۳۳ متر)، مقدار نشست به ۱۰ میلی‌متر می‌رسد.

همان‌طور که از شکل ۴-۸، مشخص می‌شود، با توجه به روباره‌های مختلف، اختلاف مقادیر نشست سطحی زمین در گروه دوم، حدوداً بین ۱۳ تا ۳۵ میلی‌متر است. بیشترین مقدار نشست زمین، در عمق ۷/۷۵ متر اتفاق افتاده که مقدار آن برابر با ۳۵ میلی‌متر است. این مقدار نشست با توجه به این-که بیشتر از ۲۵ میلی‌متر (حد مجاز نشست) است، بنابراین از دیدگاه فنی رد می‌شود. در زمین گروه دوم نیز، مقادیر نشست زمین با افزایش عمق روند کمتر شده است. همچنین کمترین مقدار نشست، برابر با ۱۳ میلی‌متر در عمق ۲۶/۳۳ متر از سطح زمین است.

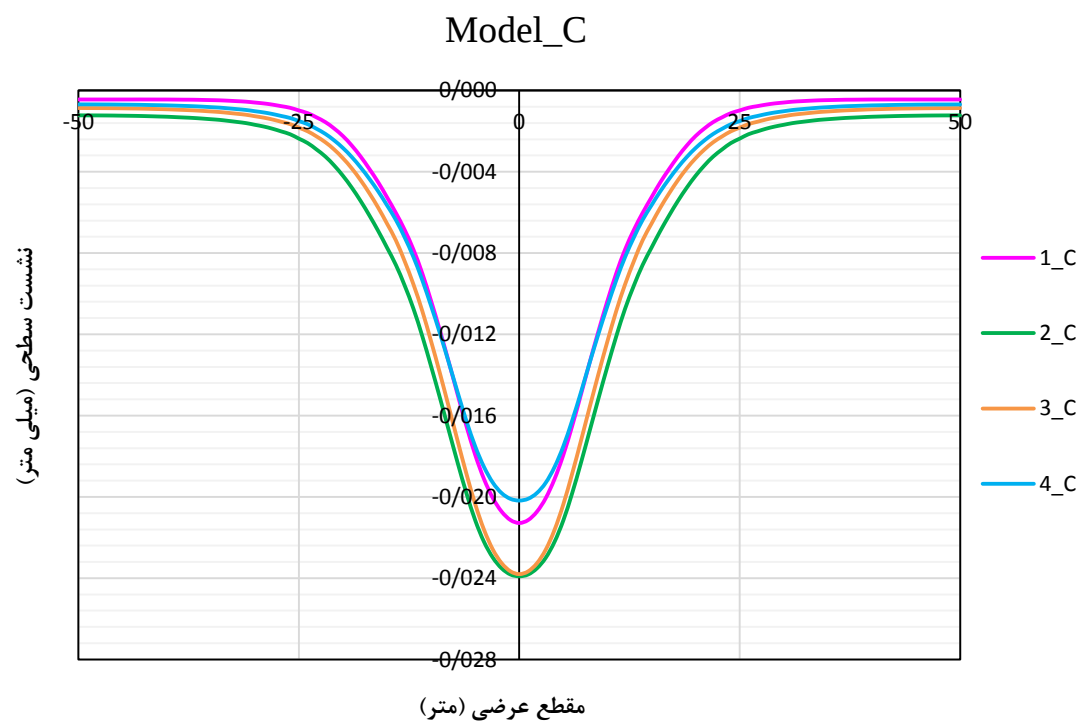
بر طبق شکل ۴-۹، واضح است که، با توجه به اعماق مختلف تونل در زمین گروه سوم، بیشترین مقادیر نشست زمین، در بازه‌ای بین ۱۱ تا ۳۲ میلی‌متر قرار دارد. تونل‌های با عمق ۷/۷۵ متر در این جنس از زمین هم دارای نشست بیشتر از حد مجاز بوده است که از دیدگاه فنی رد می‌شود. مقادیر نشست زمین با افزایش عمق کمتر شده است.

با افزایش عمق تونل، مقادیر بیشینه نشست برای زمین گروه چهارم نیز مطابق با شکل ۴-۱۰، روند کاهشی با خود به همراه داشته است. به طوری که اختلاف مقادیر نشست زمین در اعماق مختلف، در حدود ۸ تا ۳۰ میلی‌متر است. بیشترین مقدار نشست مربوط به کمترین عمق تونل (۷/۷۵ متر) است. برای تبیین بیشتر تاثیر جنس زمین در مقادیر نشست، نمودارهای بیشترین مقادیر نشست سطحی زمین در اعماق یکسان و در زمین‌های متفاوت در شکل ۴-۱۱، شکل ۴-۱۲، شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴، نشان داده شده است. به این ترتیب تاثیر جنس زمین در اعماق یکسان بر روی مقدار نشست سطح زمین مشخص می‌شود.

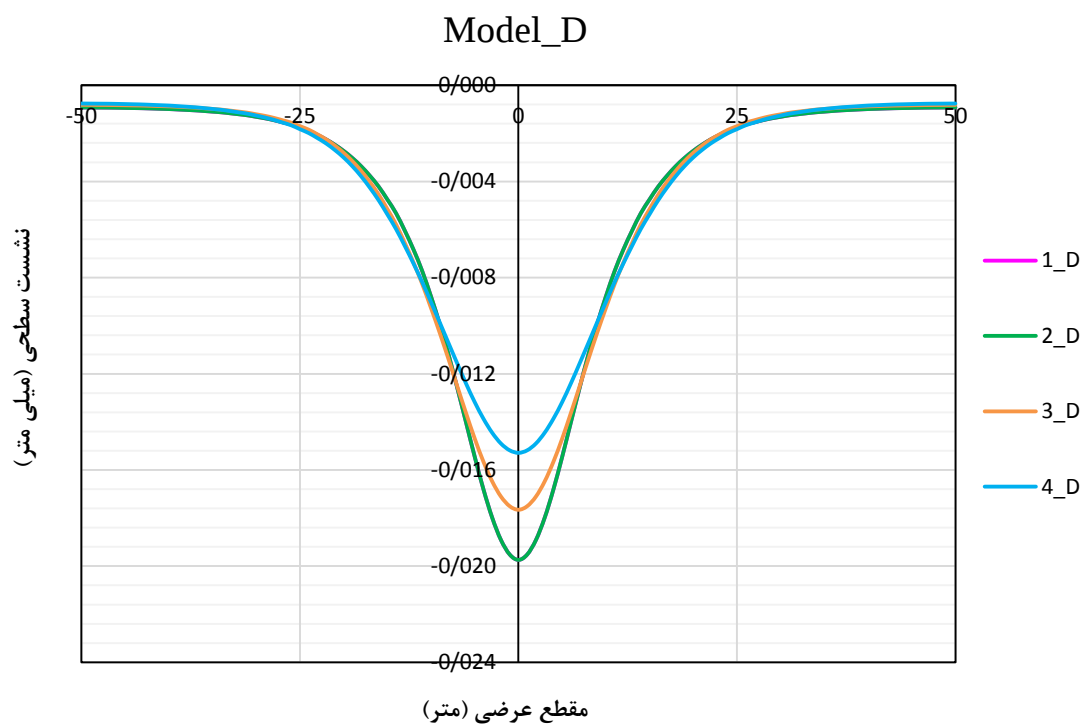
با توجه به شکل ۴-۱۱، مشخص می‌شود که مقدار بیشترین مقادیر نشست زمین در این مقدار روباره، در حدود ۳۱ تا ۳۵ میلی‌متر بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که تمامی مدل‌های این گروه بیشتر از حد مجاز دارای نشست سطحی زمین بوده است. نتیجه این مدل‌سازی تونل‌هایی با اعماق یکسان این است که طراحی تونل با روباره‌هایی کمتر از قطر تونل توصیه نمی‌شود. این امر در پروژه خط دوم قطار شهری تبریز نیز صادق بوده است. به طوری که حفاری تونل در ۱۵۰ متر ابتدای مسیر خط دوم قطار شهری تبریز با روباره کمتر از قطر تونل و بزرگ‌تر از شعاع تونل حفاری داشته است، سه بار دچار نشست شدید سطحی زمین را به دنبال شد که چون در زمین‌های زراعی بوده است، عواقب خاصی به دنبال نداشته است.



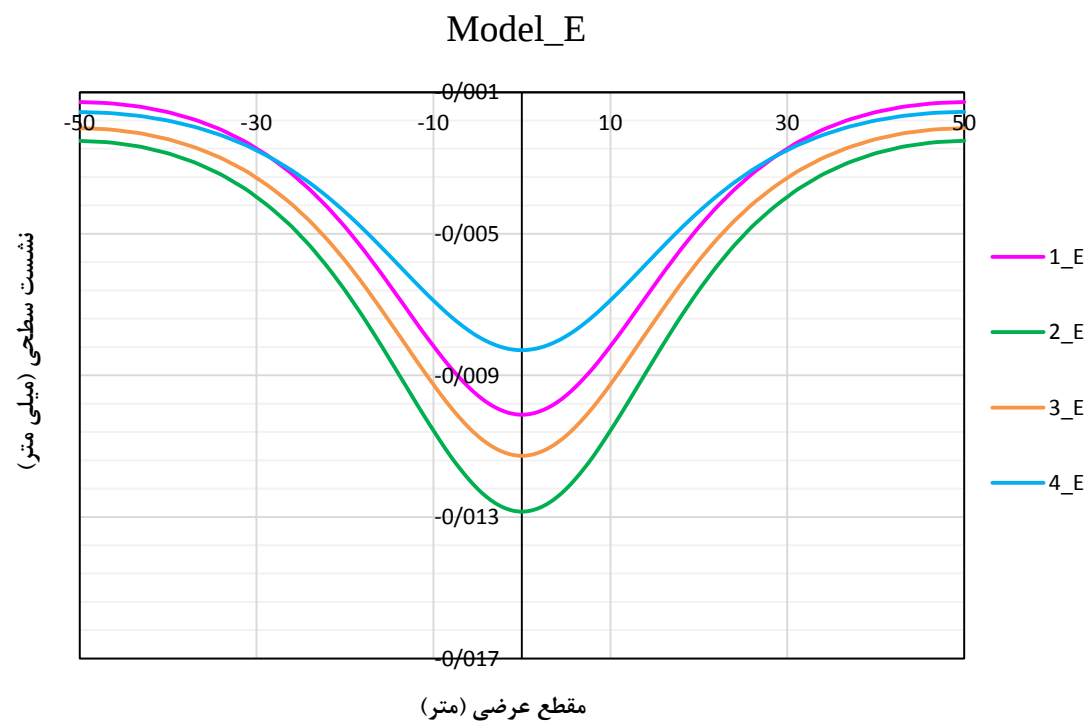
شکل ۴-۱۱. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۷/۷۵ متر، در جنس‌های مختلف زمین



شکل ۴-۱۲. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۱۲/۳۱ متر، در جنس‌های مختلف زمین



شکل ۴-۱۳. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۱۵/۸۱ متر، در جنس‌های مختلف زمین



شکل ۴-۱۴. نمودار مقایسه نشست سطحی با روباره ثابت ۲۶/۳۳ متر، در جنس‌های مختلف زمین

حدوداً یک سوم بازه‌ای از مسیر خط دوم قطار شهری تبریز که در آن طراحی تونل صورت گرفته است، دارای روباره‌های بین قطر تونل تا یک و نیم برابر قطر تونل است. مقطعی که در این تحقیق در این بازه‌ی عمق تونل مورد انتخاب بوده است دارای میانگین روباره مسیر تونل، یعنی $12/31$ متر از سطح زمین است. با بررسی مقادیر نشست سطحی زمین این گروه از روباره‌ها در زمین‌های متفاوت در شکل ۴-۱۲، مشخص می‌شود که بیشترین مقدار نشست سطحی در بازه‌ی $20/2$ تا $23/9$ میلی‌متر قرار دارد که نشان می‌دهد، نوع زمین تأثیر کمی در مقدار نشست سطحی دارد و چیزی در حدود ۱۶ درصد است. با این‌که این گروه از مدل‌ها که از حد مجاز نشست سطح زمین خارج نشده‌اند با این همه باز میانگین نشست این گروه در حدود $22/3$ میل‌متر بوده که نزدیک به مقدار نشست حد مجاز بوده و باید احتیاط لازم را در حفاری تونل داشت.

گروه بعدی از روباره‌های تونل در بین یک و نیم برابر قطر تونل تا دو برابر قطر تونل قرار دارند. این اعماق از تونل، بیشترین بازه از مسیر تونل خط دوم قطار شهری تبریز را دارد. به طوری‌که چیزی در حدود نصف مسیر تونل در این اعماق طراحی و حفاری می‌شود. لازم به ذکر است که میانگین روباره کل مسیر تونل در این بازه قرار داشته و برابر با $15/81$ متر از سطح زمین است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۳، معلوم است این گروه از تونل‌ها که دارای روباره‌های مشابهی بوده و در این بازه قرار دارند، دارای بیشترین مقدار نشست سطحی در بازه $15/3$ تا $19/7$ میلی‌متر هستند که با توجه به جنس زمین این مقادیر متفاوت است. تأثیر جنس زمین در اختلاف نشست سطحی این گروه از روباره‌ها نیز مشخص بوده و چیزی در حدود ۲۵ درصد است که رقمی قابل توجه است. با این همه، این مقادیر نشست سطحی قابل قبول بوده و ممکن است که دلیل فراوانی این بازه از روباره‌ها در مسیر تونل، طراحی محافظه‌کارانه آن باشد.

بیشترین مقدار روباره مسیر خط دوم قطار شهری تبریز برابر با $26/33$ متر است. روباره‌هایی که بیشتر از دو برابر قطر تونل هستند، تقریباً یک پنجم طول مسیر تونل خط دوم قطار شهری تبریز را شامل می‌شود. با توجه به شکل ۴-۱۴، مشخص می‌شود که کمترین مقادیر نشست سطحی زمین در این گروه از روباره‌ها قرار داشته است. بیشترین مقادیر نشست سطحی زمین در این روباره از $8/3$ تا $12/9$ میلی‌متر بوده است. همان‌طور که از اعداد نشست سطحی معلوم است، جنس زمین در مقادیر نشست سطحی این گروه از روباره‌ها بیشتر تأثیر داشته است و مقدار این نشست در حدود ۴۳ درصد است.

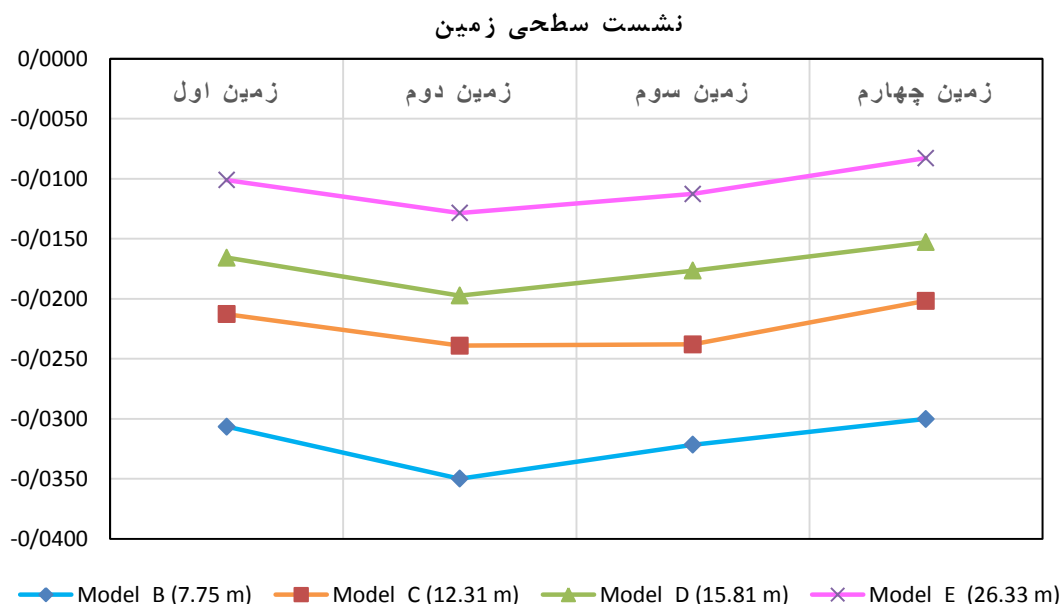
مقادیر بیشترین نشست سطحی زمین در اعماق مختلف تونل در جدول ۴-۴، ذکر شده است. شایان ذکر است که داده‌های نشست سطحی زمین برجا که از پروژه اخذ شده است، با داده‌های خروجی نشست سطحی زمین حاصل از این تحقیق مطابقت داشته است. با توجه به مدل‌های موجود در این تحقیق، مشخص است که بیشترین نشست سطحی زمین در کمترین عمق یعنی $7/75$ متر بوده است. مقدار این نشست بیش‌تر از حد مجاز بوده است.

جدول ۴-۴. بیشترین مقادیر نشست سطحی زمین در اعماق مختلف تونل

ردیف	روباره تونل (فاصله سطح زمین تا تاج تونل)	B (۷/۷۵ متر)	C (۱۲/۳۱ متر)	D (۱۵/۸۱ متر)	E (۲۶/۳۳ متر)
۱	بیشترین میزان نشست سطحی زمین در مدل اول (بر حسب میلی‌متر)	۳۰/۷	۲۱/۳	۱۶/۶	۱۰/۱
۲	بیشترین میزان نشست سطحی زمین در مدل دوم (بر حسب میلی‌متر)	۳۵/۰	۲۳/۹	۱۹/۷	۱۲/۹
۳	بیشترین میزان نشست سطحی زمین در مدل سوم (بر حسب میلی‌متر)	۳۲/۲	۲۳/۸	۱۷/۷	۱۱/۳
۴	بیشترین میزان نشست سطحی زمین در مدل چهارم (بر حسب میلی‌متر)	۳۰/۰	۲۰/۲	۱۵/۳	۸/۳
۵	میانگین بیشترین میزان نشست سطحی زمین در چهار مدل (بر حسب میلی‌متر)	۳۲/۰	۲۲/۳	۱۷/۳	۱۰/۶
۶	بیشترین میزان نشست سطحی زمین در حالت واقعی در پروژه (بر حسب میلی‌متر)	۳۵	۲۵	۱۸	۷

۴-۵. جمع‌بندی نشست سطح زمین در اعماق مختلف

مقادیر نشست سطح زمین همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با افزایش عمق تونل، روند کاهشی با خود به همراه داشته است. مقادیر بیشینه‌ی نشست‌های سطحی زمین در همه‌ی حالات مختلف مدل‌سازی این تحقیق، به صورت نمودار در شکل ۴-۱۵، مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۵. نمودار نشست‌های سطحی زمین در تمامی حالات مدل‌سازی شده

در شکل ۴-۱۵، خطوط آبی، قهوه‌ای، سبز و صورتی، به ترتیب نمایان‌گر تونل با اعماق ۷/۷۵ متر، ۱۲/۳۱ متر، ۱۵/۸۱ متر و ۲۶/۳۳ متر هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین نشست سطحی زمین مربوط به عمق ۷/۷۵ متر است و بیشترین عمق تونل (۲۶/۳۳ متر)، کمترین مقدار نشست زمین را دارد. میانگین مقادیر بیشینه نشست زمین در اعماق مختلف، در حدود ۱۱ تا ۳۲ میلی‌متر است. این موضوع نشان می‌دهد که مقدار نشست زمین در عمق ۷/۷۵ متر، در حدود سه برابر مقدار نشست در عمق ۲۶/۳۳ متر است.

موضوع قابل فهم دیگری که از شکل ۴-۱۵، مشخص می‌شود، این است که مقادیر نشست سطحی زمین در هر عمقی از تونل، به ترتیب در زمین‌های نوع دوم، سوم، اول و چهارم روند کاهشی به همراه داشته است. با بررسی بیشتر پارامترهای ژئوتکنیکی زمین مسیر تونل و مقایسه آن‌ها با مقادیر نشست آن‌ها، مشخص شد که بیشینه مقدار نشست سطحی زمین وابسته به مقدار مدول یانگ خاک آن زمین بوده است. به طوری که مدول یانگ زمین‌های دوم، سوم، اول و چهارم به ترتیب برابر با مقادیر ۳۴۰، ۳۷۵، ۴۵۰ و ۴۷۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است و بر این اساس نشست سطح زمین در هر یک از موارد، برابر با ۳۵، ۳۲، ۳۱ و ۳۰ میلی‌متر برای عمق ۷/۷۵ متر (نمونه‌ای از اعماق) است. با توجه به تمامی مطالب ذکر شده در این فصل می‌توان نتیجه گرفت که، از دیدگاه فنی اعماقی که در بازه کمتر از قطر تونل و بزرگتر از شعاع تونل هستند، دارای نشست سطح زمین بیشتر از حد مجاز بوده و حفر تونل به روش مکانیزه در این عمق‌ها، توصیه نمی‌شود.

فصل ۵: برآوردهای هزینه‌ای احداث تونل خط دو قطار شهری تبریز در اعماق مختلف

۱-۵. مقدمه

با پیشرفت روز افزون تکنولوژی، توانایی بشر در اجرای پروژه های تونل سازی افزایش پیدا کرده است. در مقایسه با پارامترهای فنی نظیر انتخاب روش مناسب برای حفاری تونل، پارامترهای مدیریتی نظیر برآورد درست هزینه و زمان انجام پروژه نیز از جمله معیارهای اصلی موفقیت در این گونه پروژه ها است. چالش رقابتی سرعت حفاری مکانیزه با هزینه سرمایه گذاری اولیه بالا و انعطاف پایین با اجرای حفاری با سرعت کمتر و هزینه های پایین تر اما با انعطاف پذیری بالا و همچنین ریسک های اجرایی کمتر همواره از سوالات اساسی در انتخاب روش اجرای حفاری در پروژه های تونل سازی بوده است. در این فصل سعی شده است که به معرفی کلی هزینه های مرتبط با ساخت تونل در اعماق مختلف، برای خط دوم پروژه قطار شهری تبریز پرداخته شود. بنابراین ابتدا به نحوه برآورد هزینه های احداث تونل و اجرای ایستگاه ها پرداخته شده است و سپس این هزینه ها در اعماق مختلف تعیین شده است. همچنین در قسمت انتهایی این فصل نیز، مجموع هزینه های احداث تونل و اجرای ایستگاه ها با دور شدن ایستگاه ها از هم در سناریوهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و جمع بندی شده است.

۲-۵. برآوردهای هزینه های احداث تونل و ایستگاه

احداث تونل در مقایسه با دیگر پروژه های صنایع عمرانی، طبقه بندی منحصر به فردی را از لحاظ زیر ساخت پروژه دارد. دلیل اصلی تمایز احداث تونل ها با بقیه پروژه های زیرساختی، خطر ناشی از حفاری در شرایط ناشناخته زمین و پارامترهای متعدد مربوط به هزینه است (به عنوان مثال، نوع تونل، هدف احداث پروژه، محل احداث تونل، روش ساخت تونل، شرایط در محل و غیره) که باعث تغییر در هزینه نهایی احداث پروژه می شود. بر این اساس، برای جلوگیری از افزایش هزینه ها، نیاز به استفاده وسیع تر از فضای موجود است. برآورد هزینه ها، عامل مهمی برای موفقیت در یک پروژه تونل سازی است. تخمین دقیق از هزینه احداث تونل و اجرای ایستگاه ها در مراحل اولیه طراحی تونل از اهمیت بیشتری برخوردار است. به ویژه در مناطقی که تنوع شرایط ژئوتکنیکی که می تواند برآوردهای اولیه را تغییر می دهد.

۱-۲-۵. برآورد هزینه احداث تونل

در برآورد هزینه ساخت تونل، قیمت اقلام مصرفی و همچنین دست مزد پیمانکاران برای احداث تونل، از فهرست بهای اعلامی سازمان برنامه و بودجه کشور برای واحدهای راه، راه آهن و باند فرودگاه در سال ۱۳۹۹ استخراج شده و با احتساب ضریب تعدیل شهریور سال ۱۴۰۰، برآورد شده اند. لازم به ذکر است که مقدار این ضریب تعدیل ۲/۰۵ برابر قیمت فهرست بهای ۱۳۹۹ است. مقدار مصرفی آرماتور از پروژه اخذ شده و با توجه به فهرست بهای مذکور، هزینه آن برآورد شده است. جزییات مقادیر مصرفی آرماتور در هر رینگ از تونل با توجه به مقادیر روباره آن در جدول ۱-۵، ذکر شده است.

جدول ۵-۱. مقدار آرماتور مصرفی در هر رینگ از تونل با توجه به مقدار روباره بر قطر آن

مقدار روباره بر قطر تونل	مقدار آرماتور مصرفی در هر رینگ (بر حسب کیلوگرم)		
	آرماتور تا قطر ۱۰ میلی‌متر	آرماتور از قطر ۱۲ تا ۱۸ میلی‌متر	مجموع آرماتور مصرفی
۰,۵ - ۱	۱۱۲۳	۱۲۵۳	۲۳۷۶
۱ - ۱,۵	۹۵۸	۱۰۶۹	۲۰۲۷
۱,۵ - ۲	۸۲۶	۹۲۱	۱۷۴۷
۲ - ۲,۷۷	۹۹۱	۱۱۰۶	۲۰۹۷

برای بررسی هزینه احداث هر متر از تونل، ابتدا از فهرست بهای سال ۱۳۹۹ موارد لازم جهت برآورد هزینه‌ها در عمق ثابت استخراج شده است، سپس هزینه‌ها برای احداث تونل با روباره‌های مختلف این تحقیق محاسبه شده و در آخر با احتساب ضریب تعدیل شهریور سال ۱۴۰۰ تمامی این هزینه‌ی برآورد شده اصلاح می‌شوند. اطلاعات مربوط به هزینه‌های احداث تونل‌هایی با مقادیر روباره بر قطر؛ ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷، به ترتیب در جدول ۵-۲، جدول ۵-۳، جدول ۵-۴ و جدول ۵-۵، ذکر شده است. لازم به ذکر است که فقط موارد مربوط به مقدار میل‌گرد آج‌دار مصرفی در سیستم نگهدای تونل با تغییر روباره تونل، تغییر یافته و با استفاده از جدول ۵-۲، هزینه آن‌ها محاسبه شده است که در مبلغ کل به دست آمده برای احداث تونل تاثیر گذاشته است. بقیه موارد موجود در جداول برای اعماق متفاوت ثابت در نظر گرفته شده است. پس از به دست آوردن مبلغ کل برای حفاری تونل با تقسیم کردن آن بر طول مسیر تونل، هزینه ساخت هر یک متر از تونل محاسبه می‌شود که این مبلغ نیز باید با ضرایبی همچون؛ ضریب تجهیزکارگاه و ضریب بالاسری تصحیح شود. این ضرایب در این تحقیق برای ضریب تجهیز کارگاه و ضریب بالاسری، به ترتیب مقادیر ۱/۰۴ و ۱/۳۰ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که حق الزحمه هر متر از طول تونل در نهایت با احتساب ضریب تعدیل قیمت بر اساس فهرست بهای شهریور سال ۱۴۰۰ در نظر گرفته شده است. جدول ۵-۳، نشان می‌دهد که برای ساخت هر متر از تونل با روباره بر قطر ۰,۵ تا ۱، مبلغی در حدود ۱/۴۴ میلیارد ریال لازم است. در حالی‌که بر طبق جدول ۵-۴، با افزایش عمق، برای احداث هر یک متر از تونل با روباره بر قطر ۱ تا ۱,۵ مبلغی در حدود ۱/۳۹ میلیارد ریال مورد نیاز است که نسبت به حالت قبل هزینه کمتری دارد. همچنین جدول ۵-۵، نشان می‌دهد که روند هزینه احداث تونل با روباره بر قطر ۱,۵ تا ۲، نیز کاهشی بوده و تقریباً برابر با ۱/۳۵ میلیارد ریال است. اما با افزایش عمق بیشتر از دو برابر قطر تونل، این روند کاهش هزینه‌ها برعکس شده و افزایش می‌شود. با توجه به جدول ۵-۵، ساخت هر متر از تونل با روباره کمتر از قطر تونل و بیشتر از شعاع تونل، مبلغی در حدود ۱/۴ میلیارد ریال در بر دارد.

جدول ۵-۲. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $0.5 < H/D < 1$

فهرست بهای حفاری تونل با دستگاه های TBM					
ردیف	شرح	واحد	مقدار	قیمت واحد(ریال)	بهای کل(ریال)
۱	حفاری تونل های با سطح مقطع حفاری ۴۰ مترمربع، در زمین غیرسنگی، با استفاده از هر نوع دستگاه TBM.	متر مکعب	۱,۵۸۳,۶۱۷	۴,۳۰۳,۰۰۰	۶,۸۱۴,۳۰۳,۰۹۰,۴۰۰
۲	کسر بهای حفاری به ازای هر متر مربع بیش تر از ۴۰ متر مربع و حداکثر تا ۱۴۰ متر مربع.	درصد	۲,۰۹۱,۷۹۸,۷۸۱,۰۷۸	-۰/۴۵	-۹۴۱,۳۰۹,۴۵۱,۴۸۵
۳	اضافه بها به ردیف های حفاری تونل با استفاده از دستگاه حفار TBM در عمق بیشتر از ۲۵۰ متر، برای ۲۵۰ متر دوم یک بار، برای ۲۵۰ متر سوم دو بار و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲,۳۰	۱	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲
۴	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب ابزار دقیق همگرایی سنج سه نقطه ای در تونل در حین عملیات حفاری.	سری (۳ عدد)	۲۳	۱,۱۶۳,۰۰۰	۲۶,۷۴۹,۰۰۰
۵	انجام تمامی عملیات لازم برای قرائت ابزار دقیق همگرایی سنج برای هر نقطه در تونل در حین عملیات حفاری.	قرائت	۲۳۰	۳۹۸,۰۰۰	۹۱,۵۴۰,۰۰۰
۶	اضافه بها به ازای نصب هر نقطه همگرایی سنج مازاد بر سه نقطه اول.	عدد	۲۰	۷۷۷,۵۰۰	۱۵,۵۵۰,۰۰۰
۷	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب و قرائت هر نوع ابزار دقیق واگراسنج در تونل حین عملیات حفاری، برای طول تا ۵ متر	متر طول	۱۱۵	۴,۱۰۷,۰۰۰	۴۷۲,۳۰۵,۰۰۰
۸	اضافه بها به ازای هر متر افزایش طول مازاد بر ۵ متر اول در نصب ابزار دقیق	متر طول	۴۶۰	۹۱۴,۰۰۰	۴۲۰,۴۴۰,۰۰۰
۹	تامین و نصب و قرائت ابزار دقیق	-	۱	۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میلگرد آجدار از نوع AIII به قطر تا ۱۰ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۶,۷۷۳,۰۷۲	۸۵,۱۰۰	۱,۴۲۷,۳۸۸,۴۴۵,۳۵۵
۱۱	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میل گرد آجدار از نوع AIII به قطر ۱۲ تا ۱۸ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۸,۷۱۱,۵۹۸	۶۹,۲۰۰	۱,۲۹۴,۸۴۲,۵۸۷,۱۳۶
۱۲	تهیه و نصب قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت) برای نصب در تونل های حفاری شده با دستگاه TBM.	مترمکعب	۲۱۷,۲۸۰	۸,۹۶۱,۰۰۰	۱,۹۴۷,۰۴۶,۰۸۰,۰۰۰
۱۳	حمل مصالح در راه های آسفالتی، بیش از یک کیلو متر تا ۱۰ کیلومتر.	مترمکعب - کیلومتر	۱۳۷,۷۶۰	۳,۷۵۰	۵۱۶,۶۰۰,۰۰۰
۱۴	تهیه وسایل و اجرای عملیات تهویه تونل ها برای دوره ساختمان.	مترمکعب	۱,۲۷۰,۴۴۴	۶۷,۵۰۰	۸۵,۷۵۴,۹۷۰,۰۰۰
۱۵	تهیه و نصب وسایل لازم و تامین روشنایی تونل ها برای دوره ساختمان.	متر طول	۲۲,۴۰۰	۱,۸۵۷,۰۰۰	۴۱,۵۹۶,۸۰۰,۰۰۰
۱۶	اضافه بها برای تهویه و روشنایی در تونل هرگاه که فاصله از نزدیکترین دهانه دسترسی بیش از ۲۵۰ متر باشد، به ازای هر ۲۵۰ متر. برای ۲۵۰ متر دوم یکبار، ۲۵۰ متر سوم دوبار، و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۱۴,۲۸۴,۴۳۴,۰۲۳	۷	۹۹,۹۹۱,۰۳۸,۱۶۱
۱۷	تهیه لوازم و انجام عملیات آبکشی داخل تونل ها.	مترمکعب	۲,۲۴۰,۰۰۰	۳,۶۴۰	۸,۱۵۳,۶۰۰,۰۰۰
۱۸	تهیه و نصب لوله جهت هدایت آب پمپاژ شده به بیرون تونل.	متر طول	۲۲,۴۰۰	۱۹۶,۰۰۰	۴,۳۹۰,۴۰۰,۰۰۰
۱۹	حمل آهن آلات، سیمان پاکتی نسبت به مازاد بر ۳۰ کیلومتر تا فاصله ۷۵ کیلومتر.	تن - کیلومتر	۴,۱۸۶,۵۸۲	۳,۱۳۰	۱۳,۱۰۴,۰۱۶,۶۶۰
۲۰	جمع				
۲۱	حق الزحمه هر متر از طول تونل				
۲۲	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه و بالاسری بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۹				
۲۳	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه، ضریب بالاسری و ضریب تعدیل قیمت بر اساس فهرست بهای شهریور سال ۱۴۰۰				

جدول ۵-۳. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $1/5 < H/D < 1$

فهرست بهای حفاری تونل با دستگاه های TBM					
ردیف	شرح	واحد	مقدار	قیمت واحد(ریال)	بهای کل(ریال)
۱	حفاری تونل های با سطح مقطع حفاری ۴۰ مترمربع، در زمین غیرسنگی، با استفاده از هر نوع دستگاه TBM.	متر مکعب	۱،۵۸۳،۶۱۷	۴،۳۰۳،۰۰۰	۶،۸۱۴،۳۰۳،۰۹۰،۴۰۰
۲	کسر بهای حفاری به ازای هر متر مربع بیش تر از ۴۰ متر مربع و حداکثر تا ۱۴۰ متر مربع.	درصد	۲،۰۹۱،۷۹۸،۷۸۱،۰۷۸	-۰/۴۵	-۹۴۱،۳۰۹،۴۵۱،۴۸۵
۳	اضافه بها به ردیف های حفاری تونل با استفاده از دستگاه حفار TBM در عمق بیشتر از ۲۵۰ متر، برای ۲۵۰ متر دوم یک بار، برای ۲۵۰ متر سوم دو بار و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۷۶۴،۳۲۷،۵۲۲،۲۰۲،۳۰	۱	۷۶۴،۳۲۷،۵۲۲،۲۰۲
۴	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب ابزار دقیق همگرایی سنج سه نقطه ای در تونل در حین عملیات حفاری.	سری (۳ عدد)	۲۳	۱،۱۶۳،۰۰۰	۲۶،۷۴۹،۰۰۰
۵	انجام تمامی عملیات لازم برای قرائت ابزار دقیق همگرایی سنج برای هر نقطه در تونل در حین عملیات حفاری.	قرائت	۲۳۰	۳۹۸،۰۰۰	۹۱،۵۴۰،۰۰۰
۶	اضافه بها به ازای نصب هر نقطه همگرایی سنج مازاد بر سه نقطه اول.	عدد	۲۰	۷۷۷،۵۰۰	۱۵،۵۵۰،۰۰۰
۷	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب و قرائت هر نوع ابزار دقیق واگراسنج در تونل حین عملیات حفاری، برای طول تا ۵ متر	متر طول	۱۱۵	۴،۱۰۷،۰۰۰	۴۷۲،۳۰۵،۰۰۰
۸	اضافه بها به ازای هر متر افزایش طول مازاد بر ۵ متر اول در نصب ابزار دقیق	متر طول	۴۶۰	۹۱۴،۰۰۰	۴۲۰،۴۴۰،۰۰۰
۹	تامین و نصب و قرائت ابزار دقیق	-	۱	۵۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰	۵۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰
۱۰	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میلگرد آجدار از نوع AIII به قطر تا ۱۰ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۴،۳۰۶،۴۴۴	۸۵،۱۰۰	۱،۲۱۷،۴۷۸،۳۷۹،۸۶۱
۱۱	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میل گرد آجدار از نوع AIII به قطر ۱۲ تا ۱۸ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۵،۹۵۹،۸۹۲	۶۹،۲۰۰	۱،۱۰۴،۴۲۴،۵۵۹،۶۱۶
۱۲	تهیه و نصب قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت) برای نصب در تونل های حفاری شده با دستگاه TBM.	مترمکعب	۲۱۷،۲۸۰	۸،۹۶۱،۰۰۰	۱،۹۴۷،۰۴۶،۰۸۰،۰۰۰
۱۳	حمل مصالح در راه های آسفالتی، بیش از یک کیلو متر تا ۱۰ کیلومتر.	مترمکعب - کیلومتر	۱۳۷،۷۶۰	۳،۷۵۰	۵۱۶،۶۰۰،۰۰۰
۱۴	تهیه وسایل و اجرای عملیات تهویه تونل ها برای دوره ساختمان.	مترمکعب	۱،۲۷۰،۴۴۴	۶۷،۵۰۰	۸۵،۷۵۴،۹۷۰،۰۰۰
۱۵	تهیه و نصب وسایل لازم و تامین روشنایی تونل ها برای دوره ساختمان.	متر طول	۲۲،۴۰۰	۱،۸۵۷،۰۰۰	۴۱،۵۹۶،۸۰۰،۰۰۰
۱۶	اضافه بها برای تهویه و روشنایی در تونل هرگاه که فاصله از نزدیکترین دهانه دسترسی بیش از ۲۵۰ متر باشد، به ازای هر ۲۵۰ متر. برای ۲۵۰ متر دوم یکبار، ۲۵۰ متر سوم دوبار، و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۱۴،۲۸۴،۴۳۴،۰۲۳	۷	۹۹،۹۹۱،۰۳۸،۱۶۱
۱۷	تهیه لوازم و انجام عملیات آبکشی داخل تونل ها.	مترمکعب	۲،۲۴۰،۰۰۰	۳،۶۴۰	۸،۱۵۳،۶۰۰،۰۰۰
۱۸	تهیه و نصب لوله جهت هدایت آب پمپاژ شده به بیرون تونل.	متر طول	۲۲،۴۰۰	۱۹۶،۰۰۰	۴،۳۹۰،۴۰۰،۰۰۰
۱۹	حمل آهن آلات، سیمان پاکتی نسبت به مازاد بر ۳۰ کیلومتر تا فاصله ۷۵ کیلومتر.	تن - کیلومتر	۴،۱۸۶،۵۸۲	۳،۱۳۰	۱۳،۱۰۴،۰۱۶،۶۶۰
۲۰	جمع				
۲۱	حق الزحمه هر متر از طول تونل				
۲۲	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه و بالاسری بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۹				
۲۳	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه، ضریب بالاسری و ضریب تعدیل قیمت بر اساس فهرست بهای شهریور سال ۱۴۰۰				

جدول ۴-۵. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $1/5 < H/D < 2$

فهرست بهای حفاری تونل با دستگاه های TBM					
ردیف	شرح	واحد	مقدار	قیمت واحد(ریال)	بهای کل(ریال)
۱	حفاری تونل های با سطح مقطع حفاری ۴۰ مترمربع، در زمین غیرسنگی، با استفاده از هر نوع دستگاه TBM.	متر مکعب	۱,۵۸۳,۶۱۷	۴,۳۰۳,۰۰۰	۶,۸۱۴,۳۰۳,۰۹۰,۴۰۰
۲	کسر بهای حفاری به ازای هر متر مربع بیش تر از ۴۰ متر مربع و حداکثر تا ۱۴۰ متر مربع.	درصد	۲,۰۹۱,۷۹۸,۷۸۱,۰۷۸	-۰/۴۵	-۹۴۱,۳۰۹,۴۵۱,۴۸۵
۳	اضافه بها به ردیف های حفاری تونل با استفاده از دستگاه حفر TBM در عمق بیشتر از ۲۵۰ متر، برای ۲۵۰ متر دوم یک بار، برای ۲۵۰ متر سوم دو بار و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲,۳۰	۱	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲
۴	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب ابزار دقیق همگرایی سنج سه نقطه ای در تونل در حین عملیات حفاری.	سری (۳ عدد)	۲۳	۱,۱۶۳,۰۰۰	۲۶,۷۴۹,۰۰۰
۵	انجام تمامی عملیات لازم برای قرائت ابزار دقیق همگرایی سنج برای هر نقطه در تونل در حین عملیات حفاری.	قرائت	۲۳۰	۳۹۸,۰۰۰	۹۱,۵۴۰,۰۰۰
۶	اضافه بها به ازای نصب هر نقطه همگرایی سنج مازاد بر سه نقطه اول.	عدد	۲۰	۷۷۷,۵۰۰	۱۵,۵۵۰,۰۰۰
۷	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب و قرائت هر نوع ابزار دقیق واگراسنج در تونل حین عملیات حفاری، برای طول تا ۵ متر	متر طول	۱۱۵	۴,۱۰۷,۰۰۰	۴۷۲,۳۰۵,۰۰۰
۸	اضافه بها به ازای هر متر افزایش طول مازاد بر ۵ متر اول در نصب ابزار دقیق	متر طول	۴۶۰	۹۱۴,۰۰۰	۴۲۰,۴۴۰,۰۰۰
۹	تامین و نصب و قرائت ابزار دقیق	-	۱	۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میلگرد آجدار از نوع AIII به قطر تا ۱۰ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۲,۳۳۳,۱۴۱	۸۵,۱۰۰	۱,۰۴۹,۵۵۰,۳۲۷,۴۶۷
۱۱	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میل گرد آجدار از نوع AIII به قطر ۱۲ تا ۱۸ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۳,۷۵۸,۵۲۸	۶۹,۲۰۰	۹۵۲,۰۹۰,۱۳۷,۶۰۰
۱۲	تهیه و نصب قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت) برای نصب در تونل های حفاری شده با دستگاه TBM.	مترمکعب	۲۱۷,۲۸۰	۸,۹۶۱,۰۰۰	۱,۹۴۷,۰۴۶,۰۸۰,۰۰۰
۱۳	حمل مصالح در راه های آسفالتی، بیش از یک کیلو متر تا ۱۰ کیلومتر.	مترمکعب - کیلومتر	۱۳۷,۷۶۰	۳,۷۵۰	۵۱۶,۶۰۰,۰۰۰
۱۴	تهیه وسایل و اجرای عملیات تهویه تونل ها برای دوره ساختمان.	مترمکعب	۱,۲۷۰,۴۴۴	۶۷,۵۰۰	۸۵,۷۵۴,۹۷۰,۰۰۰
۱۵	تهیه و نصب وسایل لازم و تامین روشنایی تونل ها برای دوره ساختمان.	متر طول	۲۲,۴۰۰	۱,۸۵۷,۰۰۰	۴۱,۵۹۶,۸۰۰,۰۰۰
۱۶	اضافه بها برای تهویه و روشنایی در تونل هرگاه که فاصله از نزدیکترین دهانه دسترسی بیش از ۲۵۰ متر باشد، به ازای هر ۲۵۰ متر. برای ۲۵۰ متر دوم یکبار، ۲۵۰ متر سوم دوبار، و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۱۴,۲۸۴,۴۳۴,۰۲۳	۷	۹۹,۹۹۱,۰۳۸,۱۶۱
۱۷	تهیه لوازم و انجام عملیات آبکشی داخل تونل ها.	مترمکعب	۲,۲۴۰,۰۰۰	۳,۶۴۰	۸,۱۵۳,۶۰۰,۰۰۰
۱۸	تهیه و نصب لوله جهت هدایت آب پمپاژ شده به بیرون تونل.	متر طول	۲۲,۴۰۰	۱۹۶,۰۰۰	۴,۳۹۰,۴۰۰,۰۰۰
۱۹	حمل آهن آلات، سیمان پاکتی نسبت به مازاد بر ۳۰ کیلومتر تا فاصله ۷۵ کیلومتر.	تن - کیلومتر	۴,۱۸۶,۵۸۲	۳,۱۳۰	۱۳,۱۰۴,۰۱۶,۶۶۰
۲۰	جمع				
۲۱	حق الزحمه هر متر از طول تونل				
۲۲	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه و بالاسری بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۹				
۲۳	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه، ضریب بالاسری و ضریب تعدیل قیمت بر اساس فهرست بهای شهریور سال ۱۴۰۰				

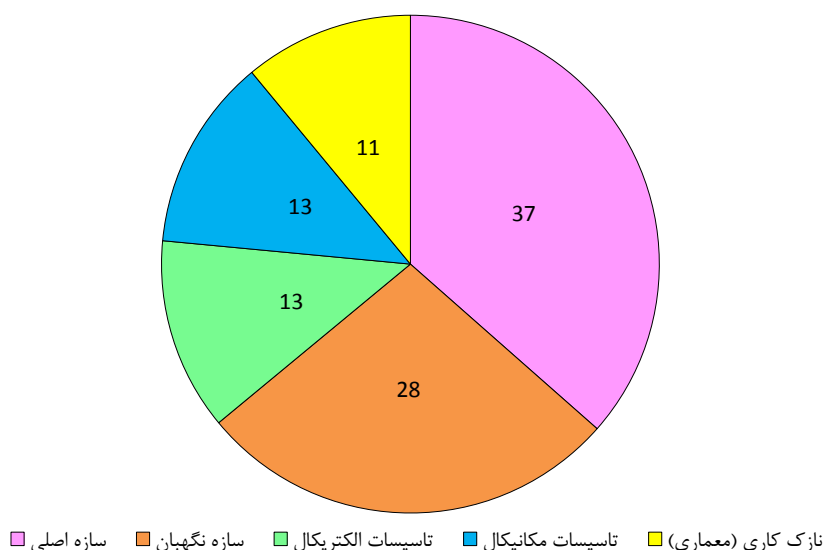
جدول ۵-۵. فهرست بهای حفر مکانیزه تونل با مشخصات: $2 < H/D < 2/77$

فهرست بهای حفاری تونل با دستگاه های TBM					
ردیف	شرح	واحد	مقدار	قیمت واحد(ریال)	بهای کل(ریال)
۱	حفاری تونل‌های با سطح مقطع حفاری ۴۰ مترمربع، در زمین غیرسنگی، با استفاده از هر نوع دستگاه TBM.	متر مکعب	۱,۵۸۳,۶۱۷	۴,۳۰۳,۰۰۰	۶,۸۱۴,۳۰۳,۰۹۰,۴۰۰
۲	کسر بهای حفاری به ازای هر متر مربع بیش تر از ۴۰ متر مربع و حداکثر تا ۱۴۰ متر مربع.	درصد	۲,۰۹۱,۷۹۸,۷۸۱,۰۷۸	-۰/۴۵	-۹۴۱,۳۰۹,۴۵۱,۴۸۵
۳	اضافه بها به ردیف های حفاری تونل با استفاده از دستگاه حفر TBM در عمق بیشتر از ۲۵۰ متر، برای ۲۵۰ متر دوم یک بار، برای ۲۵۰ متر سوم دو بار و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲,۳۰	۱	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲
۴	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب ابزار دقیق همگرایی سنج سه نقطه ای در تونل در حین عملیات حفاری.	سری (۳عدد)	۲۳	۱,۱۶۳,۰۰۰	۲۶,۷۴۹,۰۰۰
۵	انجام تمامی عملیات لازم برای قرائت ابزار دقیق همگرایی سنج برای هر نقطه در تونل در حین عملیات حفاری.	قرائت	۲۳۰	۳۹۸,۰۰۰	۹۱,۵۴۰,۰۰۰
۶	اضافه بها به ازای نصب هر نقطه همگرایی سنج مازاد بر سه نقطه اول.	عدد	۲۰	۷۷۷,۵۰۰	۱۵,۵۵۰,۰۰۰
۷	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب و قرائت هر نوع ابزار دقیق واگراسنج در تونل حین عملیات حفاری، برای طول تا ۵ متر	مترطول	۱۱۵	۴,۱۰۷,۰۰۰	۴۷۲,۳۰۵,۰۰۰
۸	اضافه بها به ازای هر متر افزایش طول مازاد بر ۵ متر اول در نصب ابزار دقیق	مترطول	۴۶۰	۹۱۴,۰۰۰	۴۲۰,۴۴۰,۰۰۰
۹	تامین و نصب و قرائت ابزار دقیق	-	۱	۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میلگرد آجدار از نوع AIII به قطر تا ۱۰ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۴,۷۹۹,۷۷۰	۸۵,۱۰۰	۱,۱۴۲,۵۰۸,۱۶۵,۱۲۰
۱۱	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میل گرد آجدار از نوع AIII به قطر ۱۲ تا ۱۸ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۶,۵۱۰,۲۳۴	۶۹,۲۰۰	۱,۹۴۷,۰۴۶,۰۸۰,۰۰۰
۱۲	تهیه و نصب قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت) برای نصب در تونل های حفاری شده با دستگاه TBM.	مترمکعب	۲۱۷,۲۸۰	۸,۹۶۱,۰۰۰	۱,۹۴۷,۰۴۶,۰۸۰,۰۰۰
۱۳	حمل مصالح در راه های آسفالتی، بیش از یک کیلو متر تا ۱۰ کیلومتر.	مترمکعب - کیلومتر	۱۳۷,۷۶۰	۳,۷۵۰	۵۱۶,۶۰۰,۰۰۰
۱۴	تهیه وسایل و اجرای عملیات تهویه تونل ها برای دوره ساختمان.	مترمکعب	۱,۲۷۰,۴۴۴	۶۷,۵۰۰	۸۵,۷۵۴,۹۷۰,۰۰۰
۱۵	تهیه و نصب وسایل لازم و تامین روشنایی تونل ها برای دوره ساختمان.	مترطول	۲۲,۴۰۰	۱,۸۵۷,۰۰۰	۴۱,۵۹۶,۸۰۰,۰۰۰
۱۶	اضافه بها برای تهویه و روشنایی در تونل هرگاه که فاصله از نزدیکترین دهانه دسترسی بیش از ۲۵۰ متر باشد، به ازای هر ۲۵۰ متر. برای ۲۵۰ متر دوم یکبار، ۲۵۰ متر سوم دوبار، و به همین ترتیب برای طول های بیشتر.	درصد	۱۴,۲۸۴,۴۳۴,۰۲۳	۷	۹۹,۹۹۱,۰۳۸,۱۶۱
۱۷	تهیه لوازم و انجام عملیات آبکشی داخل تونل ها.	مترمکعب	۲,۲۴۰,۰۰۰	۳,۶۴۰	۸,۱۵۳,۶۰۰,۰۰۰
۱۸	تهیه و نصب لوله جهت هدایت آب پمپاژ شده به بیرون تونل.	مترطول	۲۲,۴۰۰	۱۹۶,۰۰۰	۴,۳۹۰,۴۰۰,۰۰۰
۱۹	حمل آهن الات، سیمان پاکتی نسبت به مازاد بر ۳۰ کیلومتر تا فاصله ۷۵ کیلومتر.	تن - کیلومتر	۴,۱۸۶,۵۸۲	۳,۱۳۰	۱۳,۱۰۴,۰۰۱,۶۶۰
۲۰	جمع				
۲۱	حق الزحمه هر متر از طول تونل				
۲۲	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه و بالاسری بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۹				
۲۳	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه، ضریب بالاسری و ضریب تعدیل قیمت بر اساس فهرست بهای شهریور سال ۱۴۰۰				

۵-۲-۲. برآورد هزینه‌های ساخت ایستگاه

از مهمترین هزینه‌های ساخت ایستگاه در اعماق مختلف، می‌توان به هزینه‌های عمده از قبیل؛ هزینه‌های ساختمانی، تملک و تجهیزاتی، گالری‌های دسترسی، پله برقی، آسانسور، تاسیسات، تهویه، فضای مورد نیاز برای پرسنل و تجهیزات موجود در ایستگاه و غیره اشاره کرد. در این تحقیق این هزینه‌ها به ازای هر عمق مشخص شده است. لازم به ذکر است به دلیل گسترده بودن موضوعات مرتبط با این هزینه‌ها و همچنین عدم دسترسی کامل به این اطلاعات در این تحقیق فقط اعداد نهایی از پروژه‌ی خط دوم قطار شهری تبریز اخذ شده است. در ادامه این موضوع بیشتر توضیح داده شده است.

هزینه‌های احداث ایستگاه‌ها به طور عمده بر پنج قسمت؛ سازه اصلی، سازه نگهدار، تاسیسات الکتریکال، تاسیسات مکانیکال و نازک کاری (معماری) شامل می‌شود. مقادیر این اجزای هزینه ساخت ایستگاه‌ها بر حسب درصد در شکل ۵-۱، نشان داده شده است.



شکل ۵-۱. طبقه بندی اجزای عمده هزینه احداث ایستگاه‌ها

اطلاعات مربوط به هزینه کلی احداث ایستگاه‌ها در جدول ۵-۶، درج شده است. همان‌طور که از اطلاعات جدول معلوم است، طبیعی است که تعداد طبقات ایستگاه با افزایش عمق تونل بیشتر شده و این امر به دنبال خود باعث افزایش در پله‌ها، آسانسورها، گالری‌های دسترسی، تهویه و فضاهای اتاق-های هواساز و غیره می‌شود که در نتیجه، سبب افزایش هزینه مورد نیاز جهت احداث ایستگاه می‌شود.

جدول ۵-۶. هزینه اجرای ایستگاه در اعماق مختلف بر حسب میلیارد ریال

ردیف	تعداد طبقات	مقدار روباره بر قطر تونل	فاصله زمین تا کف ریل (متر)	هزینه اجرای ایستگاه (میلیارد ریال)
۱	یک	۰,۵ - ۱	۱۱,۵۱ - ۱۶,۲۵	۱۹۵
۲	دو	۱ - ۱,۵	۱۶,۲۵ - ۲۱	۲۵۷
۳	سه	۱,۵ - ۲	۲۱ - ۲۵,۷۴	۳۵۰
۴	چهار	۲ - ۲,۷۷	۲۵,۷۴ - ۳۳,۰۵	۵۱۴

۳-۵. جمع‌بندی برآورد هزینه‌های احداث تونل و ایستگاه

انتخاب عمق از دیدگاه هزینه‌های احداث تونل و همچنین اجرای ایستگاه‌ها امری بسیار مهم بوده و به جرات می‌توان گفت که تمامی مدیران پروژه در شرایط یکسان نشست سطحی زمین، عمقی را بهینه می‌دانند که کمترین هزینه را در طول پروژه داشته باشد.

با توجه به مطالب پیشین که در مورد هزینه‌های ساخت تونل و اجرای ایستگاه ذکر شد، خلاصه اطلاعات مربوط به هزینه‌ها در جدول ۵-۷، درج شده است. همین‌طور برای درک بهتر هزینه‌های ساخت تونل به ازای هر کیلومتر، اجرای ایستگاه‌ها و مقایسه هزینه‌های هر دو در اعماق متفاوت به ترتیب در شکل ۵-۲، شکل ۵-۳ و شکل ۵-۴ نشان داده شده است.

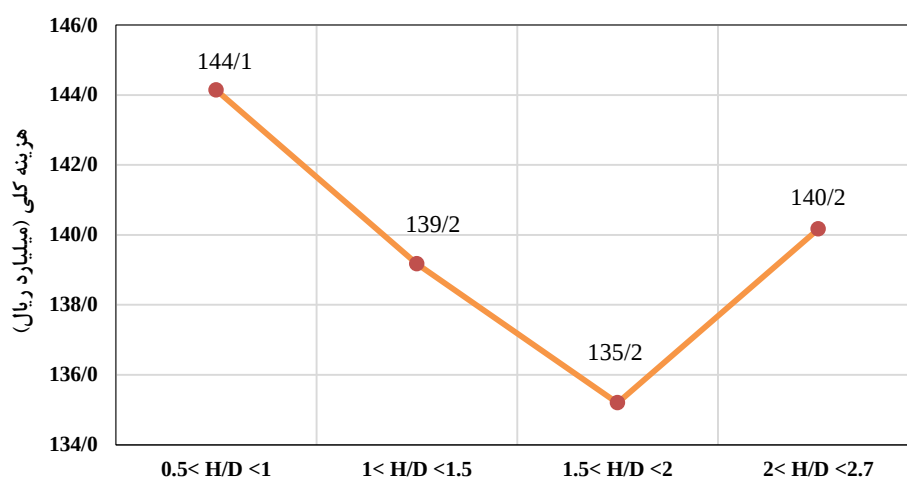
جدول ۵-۷. هزینه‌های مربوط حفاری تونل و اجرای ایستگاه در اعماق متفاوت

هزینه‌های احداث تونل و اجرای ایستگاه	$0.5 < H/D < 1$	$1 < H/D < 1.5$	$1.5 < H/D < 2$	$2 < H/D < 2.7$
هزینه ساخت هر ایستگاه (میلیارد تومان)	۱۹۵	۲۵۷	۳۵۰	۵۱۴
هزینه ساخت هر یک کیلومتر تونل (میلیارد تومان)	۱۴۴/۱	۱۳۹/۲	۱۳۵/۲	۱۴۰/۲

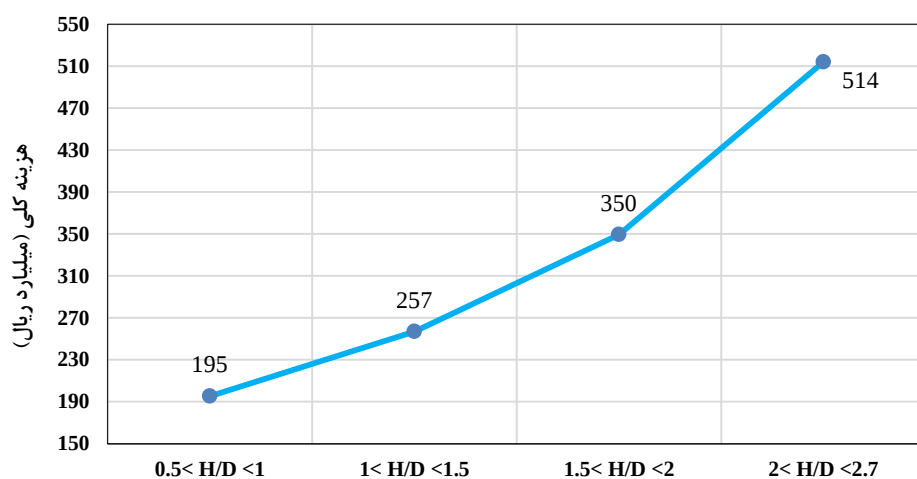
طبق شکل ۵-۲، مشخص است که بیشترین هزینه حفاری تونل با هزینه‌ای در حدود ۱۴۴/۱ میلیارد تومان به ازای هر کیلومتر، مربوط به تونلی است که دارای روباره کمتر از قطر تونل است. با افزایش روباره تا دو برابر قطر تونل این هزینه‌ها کمتر شده و پس از آن این هزینه‌ها شروع به افزایش می‌کند. به طوری‌که هزینه ساخت تونل با بیشترین روباره یعنی میانگین ۲۶/۳۳ متر، به ۱۴۰/۲ میلیارد تومان می‌رسد.

طبیعی است که انتظار می‌رود، کمترین هزینه احداث ایستگاه‌ها مربوط به تونلی باشد که کمترین روباره را به همراه داشته باشد. مطابق شکل ۵-۳، نیز این امر پیداست و واضح است که با افزایش عمق تونل هزینه اجرای ایستگاه‌ها افزایش پیدا می‌کند. هزینه‌های مربوط به احداث ایستگاه خیلی بیشتر است. این موضوع زمانی بیشتر حایز اهمیت است که مقدار روباره تونل بیشتر بوده و در نتیجه تعداد طبقات ایستگاه‌ها افزایش یابد. در کمترین عمق، این هزینه در حدود ۱۹۵ میلیارد تومان بوده و با افزایش طبقات ایستگاه‌ها این عدد در نهایت در ایستگاه‌هایی با تعداد چهار طبقه در زیر زمین به ۵۱۴ میلیارد تومان می‌رسد که در حدود ۲۶۰ درصد نسبت به حالت اول افزایش داشته است.

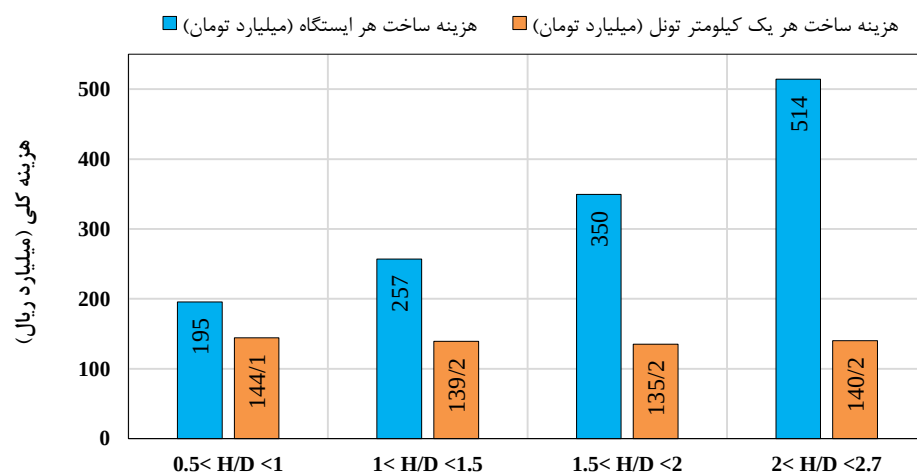
در شکل ۵-۴، هزینه‌های مربوط به حفر هر کیلومتر تونل و همچنین اجرای ایستگاه‌ها در کنا هم مقایسه شده‌اند. در این نمودار میله‌ای هم پیداست که اختلاف هزینه حفاری هر کیلومتر تونل در اعماق متفاوت در بیشترین حالت خود به چیزی در حدود نه میلیارد تومان می‌رسد. که شاید در مقابل هزینه‌های اجرای ایستگاه قابل توجه نباشد.



شکل ۵-۲. هزینه ساخت هر یک کیلومتر تونل (میلیارد تومان)



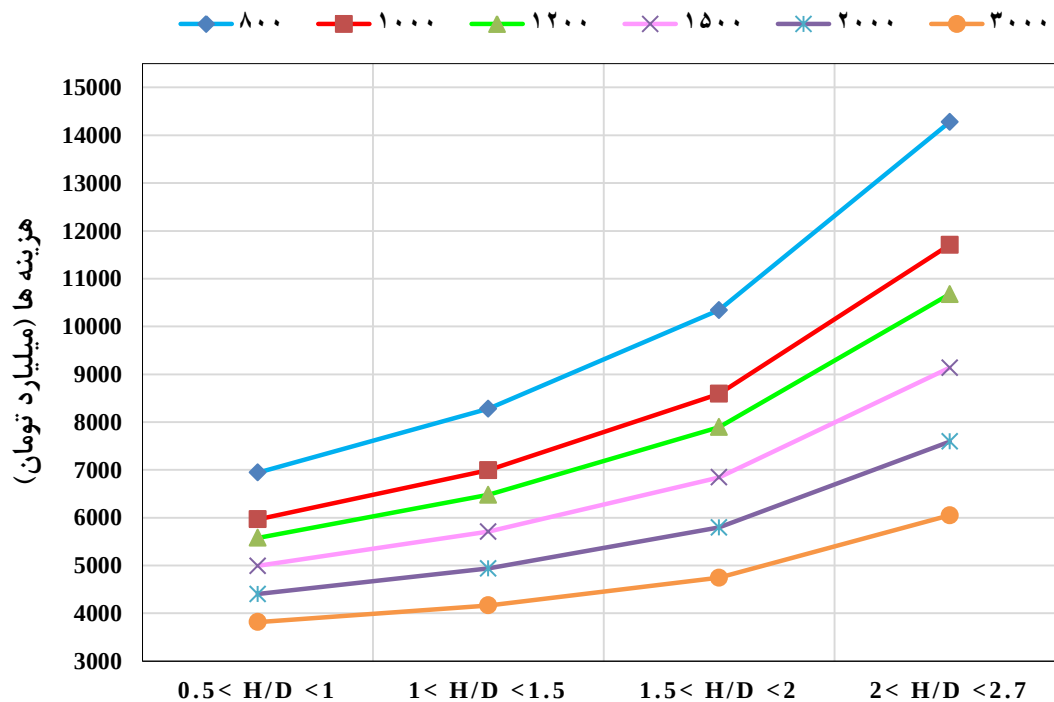
شکل ۵-۳. هزینه ساخت هر ایستگاه (میلیارد تومان)



شکل ۵-۴. هزینه های احداث تونل و اجرای ایستگاه (میلیارد تومان)

برای مقایسه بهتر هزینه‌های مربوط به حفاری تونل و احداث ایستگاه‌های مترو، باید فاصله ایستگاه-ها از هم نیز در نظر گرفته شود. فاصله ایستگاه‌های خطوط قطار شهری در داخل شهر معمولاً در حدود ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر است. این موضوع زمانی بیشتر قابل توجه است که به دلایل دیگری از جمله شهرک‌سازی‌های حاشیه شهرها فاصله ایستگاه‌ها از همدیگر بیشتر شود.

در این تحقیق، شش سناریوی متفاوت برای مقایسه هزینه‌های حفاری تونل و ساخت ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده است. در طول مسیری که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۷ کیلومتر ابتدای تونل که به روش حفاری مکانیزه است)، فاصله ایستگاه‌ها به ترتیب در حالت‌های ۸۰۰ متر، ۱۰۰۰ متر، ۱۲۰۰ متر، ۱۵۰۰ متر، ۲۰۰۰ متر و در نهایت ۳۰۰۰ متر از هم بررسی شده‌اند. در هر سناریو، هزینه‌های حفر تونل و همچنین اجرای ایستگاه‌ها در اعماق متفاوت باهم دیگر مقایسه شده‌اند. نتیجه این موضوع در شکل ۵-۵، مشخص است.



شکل ۵-۵. مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه در روباره‌های مختلف در سناریوهای مختلف

با توجه به شکل ۵-۵، مشخص است که هر چقدر عمق تونل بیشتر می‌شود، مجموع هزینه‌های حفر تونل و اجرای ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. همین‌طور اگر فاصله ایستگاه‌ها از هم بیشتر شود روند افزایشی این هزینه‌ها ملایم‌تر شده است. با بررسی دقیق‌تر شکل، در ادامه مبحث به تحلیل سناریوهای متفاوت پرداخته شده است.

• سناریوی اول؛ وقتی که فاصله ایستگاه‌ها از هم ۸۰۰ متر است:

این سناریو در شکل ۵-۵، با خط آبی رنگ مشخص شده است. مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه‌ها (در طول ۱۷ کیلومتر مسیر مورد مطالعه)، در اعماق تونل با مقادیر روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷ به ترتیب برابر با ۶۹۴۵، ۸۲۷۹، ۱۰۳۴۰ و ۱۴۲۷۷ میلیارد تومان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این سناریو، مجموع هزینه‌های احداث تونل و همچنین اجرای ایستگاه‌ها، با افزایش عمق تونل، روند افزایشی داشته است. واضح است که هزینه‌های احداث تونل و اجرای ایستگاه در کمترین عمق نسبت به بیشترین عمق تونل تقریباً نصف شده است و بسیار مقرون به صرفه است.

• سناریوی دوم؛ وقتی که فاصله ایستگاه‌ها از هم ۱۰۰۰ متر است:

مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه‌ها، در اعماق تونل با مقادیر روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷ به ترتیب برابر با ۵۹۶۸، ۶۹۹۴، ۸۵۹۲ و ۱۱۷۰۶ میلیارد تومان است. در این سناریو مشخص است که، با افزایش عمق تونل مجموع هزینه‌های احداث تونل و ایستگاه‌ها، همانند سناریوی قبلی، روند افزایشی با خود به همراه داشته است با این تفاوت که شیب روند افزایشی نسبت به سناریوی قبلی کمتر بوده است. به این معنی است که مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه، با بیشتر شدن فاصله ایستگاه‌ها از هم، کمتر شده است. این سناریو در شکل ۵-۵، با خط قرمز مشخص شده است.

• سناریوی سوم؛ وقتی که فاصله ایستگاه‌ها از هم ۱۲۰۰ متر است:

در این سناریو که با رنگ سبز در شکل ۵-۵، معلوم است، با افزایش عمق تونل مجموع هزینه‌ها، همانند دو سناریوی قبلی، روند افزایشی به خود گرفته اما شیب این روند ملایم‌تر از دو حالت قبلی بوده است. با بررسی دقیق‌تر مشخص می‌شود که مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه‌ها، در اعماق تونل با مقادیر روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷ به ترتیب برابر با ۵۵۷۷، ۶۴۸۰، ۷۸۹۳ و ۱۰۶۷۸ میلیارد تومان است. مشاهده می‌شود که با بیشتر شدن فاصله ایستگاه‌ها از هم، مجموع هزینه‌ها در هر چهار عمق تونل نسبت به سناریوهای قبلی کاهش یافته است.

• سناریوی چهارم؛ وقتی که فاصله ایستگاه‌ها از هم ۱۵۰۰ متر است:

مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه‌ها، در اعماق تونل با مقادیر روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷ به ترتیب برابر با ۴۹۹۱، ۵۷۰۸، ۶۸۴۴ و ۹۱۳۵ میلیارد تومان است. این سناریو در شکل ۵-۵، با رنگ صورتی مشخص شده و نشان می‌دهد که با افزایش عمق تونل مجموع هزینه-

های احداث تونل و ایستگاه‌ها، با شیب ملایم‌تری نسبت به سناریوهای قبلی، روند افزایشی داشته است.

• سناریوی پنجم؛ وقتی که فاصله ایستگاه‌ها از هم ۲۰۰۰ متر است:

این سناریو با رنگ بنفش در شکل ۵-۵، مشخص شده است، همچنین نشان می‌دهد که مجموع هزینه‌های احداث تونل و ایستگاه، با افزایش عمق تونل، همانند سناریوهای قبلی، روند افزایشی به خود گرفته است. با بررسی دقیق‌تر مشخص می‌شود که مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه‌ها، در اعماق تونل با مقادیر روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷ به ترتیب برابر با ۴۴۰۴، ۴۹۳۷، ۵۷۹۵ و ۷۵۹۲ میلیارد تومان است.

• سناریوی ششم؛ وقتی که فاصله ایستگاه‌ها از هم ۳۰۰۰ متر است:

در سناریوی آخر نیز که با رنگ نارنجی در شکل ۵-۵، مشخص شده است، مشاهده می‌شود که مجموع هزینه‌های ساخت تونل و اجرای ایستگاه‌ها، در اعماق تونل با مقادیر روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷ به ترتیب برابر با ۳۸۱۸، ۴۱۶۶، ۴۷۴۶ و ۶۰۵۰ میلیارد تومان است. همچنین با افزایش عمق تونل، مجموع هزینه‌ها، با روند افزایشی بسیار کمتری نسبت به دیگر سناریوها همراه بوده است.

با تحلیل سناریوهای مختلف برای تعیین عمق بهینه تونل‌های قطار شهری از دیدگاه هزینه‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که، برای فواصل مختلف ایستگاه‌ها از هم، مجموع هزینه‌های احداث تونل و همچنین اجرای ایستگاه‌ها تفاوت داشته است و همان‌گونه که انتظار می‌رفت با بیشتر شدن فاصله‌ی ایستگاه‌ها از هم، مجموع هزینه‌ها کاهش می‌یابد. فواصل ایستگاه‌ها از هم در زیر بافت شهری در مقایسه با بین شهری (یا همین‌طور بین شهرک‌های توسعه یافته در حاشیه شهر) متفاوت بوده است و با در نظر گرفتن این موضوع، می‌توان با استفاده از نتایج به دست آمده از این تحقیق، از دیدگاه هزینه-ای بهینه‌ترین عمق را برای احداث تونل‌های مترو تعیین کرد. لازم به ذکر است که در تمامی سناریوها، کمترین عمق تونل، دارای کمترین مقادیر هزینه‌های احداث تونل و اجرای ایستگاه‌ها است.

فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱. نتیجه گیری

در هنگام حفاری تونل، در ابتدا زمین میزبان تحت فشار ناشی از تنش‌های طبیعی بوده و هرگونه تغییر در آن باعث مختل شدن وضعیت تنش می‌شود که می‌تواند باعث ایجاد خسارات زیادی شود. یکی از پدیده‌های مهم ناشی از حفر تونل و فضاهای زیرزمینی وقوع نشست در سطح زمین است که این امر به ویژه در مناطق شهری و علی‌الخصوص وقتی که تونل از زیر بافت شهری عبور می‌کند بسیار حایز اهمیت است. بنابراین برای جلوگیری از هرگونه خسارت‌های ناشی از ساخت تونل، بر روی سازه‌های سطحی باید میزان نشست به طور دقیق پیش‌بینی و کنترل شود. همچنین برآورد هزینه‌ها، عامل مهمی برای موفقیت در یک پروژه تونل‌سازی است. برآورد اولیه از هزینه احداث تونل و اجرای ایستگاه‌ها در مراحل اولیه طراحی تونل از اهمیت بیشتری برخوردار است. این موضوع به ویژه در مناطق دارای تنوع شرایط ژئوتکنیکی می‌تواند در برآوردهای اولیه اثرگذار باشد.

در این تحقیق تاثیر عمق‌های مختلف احداث تونل خط دوم قطار شهری تبریز از دو دیدگاه فنی و هزینه‌ای بررسی شده و عمق بهینه برای احداث تونل تعیین شده است. از دیدگاه فنی، نشست سطح زمین به عنوان مهمترین عامل، مد نظر قرار گرفته است. در صورتی که مقدار نشست سطح زمین از ۲۵ میلی‌متر بیشتر شود، باید دوباره تونل تا زمانی که مقادیر نشست زمین به کمتر از ۲۵ میلی‌متر برسد، افزایش یابد. هزینه‌های حفر تونل و همچنین احداث ایستگاه‌ها نیز، دیدگاه هزینه‌ای را در تعیین عمق بهینه تونل تشکیل می‌دهند. عمقی از دیدگاه هزینه‌ای بهینه محسوب می‌شود که در مجموع دارای کمترین هزینه احداث تونل و اجرای ایستگاه در طول مسیر تونل باشد.

ابتدا جنس زمین مسیر تونل خط دو قطار شهری تبریز، با توجه به پارامترهای ژئوتکنیکی زمین و همچنین اندازه ذرات خاک، به چهار گروه مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین مقادیر روباره‌های مسیر طولی تونل شناسایی شده و در گروه‌هایی دسته‌بندی شده‌اند. سپس با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D، در چهار گروه مختلف زمین، تونل‌هایی در اعماق متفاوت جانمایی شده و مدل‌سازی شده‌اند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد؛ با وجود این که جنس زمین در مقادیر نشست سطح زمین تاثیر دارد، اما روباره دارای تاثیر بیشتری است. نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است، اعماقی که دارای روباره کمتر از قطر تونل هستند، دارای نشست بیشتر از حد مجاز هستند، بنابراین حفر تونل در چنین عمق‌هایی توصیه نمی‌شود.

مطالعات هزینه‌ای این تحقیق نشان می‌دهد که هزینه‌های احداث تونل، با افزایش عمق ابتدا روند کاهشی داشته و سپس وقتی که روباره تونل از دو برابر قطر تونل بیشتر می‌شود، مجدداً روند افزایشی به خود می‌گیرند. هزینه‌های احداث ایستگاه‌ها نیز با افزایش عمق آن، بیشتر شده و با روند تقریباً یکنواخت، افزایش می‌یابد.

بررسی و تحلیل نتایج هر دو دیدگاه فنی و هزینه‌ای، در طول ۱۷ کیومتر مسیر مورد مطالعه (با روش حفاری مکانیزه) نشان می‌دهند که هر چه فاصله ایستگاه‌ها از هم بیشتر شود، تاثیر عمق در مجموع هزینه‌های احداث تونل و اجرای ایستگاه‌ها، کاهش می‌یابد. با این وجود برای حفر تونل زیر

بافت شهری که فاصله ایستگاه‌ها از هم عمدتاً در حدود ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر است، عمقی برای احداث تونل و ایستگاه‌ها بهینه است که تونل دارای روباره بیشتر از مقدار قطر تونل و همچنین کمتر از یک و نیم برابر قطر تونل داشته باشد. برای تبیین بیشتر این موضوع شایان ذکر است که اگر فاصله ایستگاه‌ها از هم به طور متوسط یک کیلومتر در نظر گرفته شود، آن‌گاه سرانه هزینه احداث هر یک کیلومتر مترو، در اعماق تونل با مقادیر روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۲/۷ به ترتیب برابر با ۵۹۶۸، ۶۹۹۴، ۸۵۹۲ و ۱۱۷۰۶ میلیارد تومان است. مشخص است که، با افزایش عمق تونل سرانه هزینه احداث هر یک کیلومتر مترو، روند افزایشی به همراه داشته است.

۲-۶. پیشنهادات

در پایان پیشنهادهایی نیز برای تکمیل شدن مطالعات انجام شده در این تحقیق، ارائه شده که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

- در ادامه این تحقیق می‌توان، برای احداث تونل، ملاحظات را در نظر گرفت. در این راستا لازم است، پدافند غیر عامل هزینه‌های حفر تونل و اجرای ایستگاه در این‌گونه تونل‌ها محاسبه شود. در این تحقیق ملاحظات مربوط به پدافند غیر عامل برای خط دو قطار شهری تبریز در نظر گرفته نشده است.
- در این تحقیق به برآورد عمق بهینه در تونل‌هایی که به روش مکانیزه حفر می‌شوند پرداخته شده است. بدیهی است که این تحقیق برای تونل‌هایی که به روش سنتی در زیر بافت شهری حفر می‌شوند نیز، قابل انجام است.
- با تغییر دادن نرم‌افزار، می‌توان از دیگر نرم‌افزارهای ژئوتکنیک خاک، نشست سطح زمین را پیش‌بینی کرد. لازم به ذکر است که در نحوه مدل‌سازی تونل نیز می‌توان با تغییر دادن ابعاد تونل و همین‌طور لحاظ کردن بار سازه‌های سطحی، بار ترافیک شهری، بار دینامیکی و غیره، نتایج حاصل را بررسی کرد و با توجه به این موارد ذکر شده می‌توان نرم‌افزار مناسب را انتخاب و از آن استفاده نمود.
- برای حفاری مکانیزه تونل در عمق‌های کمتر از قطر تونل که نشست سطح زمین بیشتر از حد مجاز است، تاثیر تحکیم زمین می‌توان را بررسی کرد. همچنین هزینه‌های احداث تونل و ایستگاه‌ها مجدداً برآورد شده و به مقایسه با شرایطی که تونل در اعماق بیشتر حفر می‌شوند (تا دچار نشست نشوند)، پرداخته شوند.

مراجع

- [۱] شرکت مهندسين مشاور ايمن سازان، "گزارش زمين شناسی مهندسی و ژيوتکنیک مسير"، ۱۳۹۵.
- [۲] شريف زاده، مصطفى،، خادمی حمیدی، جعفر،، ترکمنی قطب، احمد، ۱۳۸۶. تونل سازی مکانیزه سپری. جهاد دانشگاهی. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [3] Kim, C. Y., Bae, G. J., Hong, S. W., Park, C. H., Moon, H. K., & Shin, H. S. (2001). Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunnelling. *Computers and Geotechnics*, 28(6), 517-547.
- [4] M. Karakus, R.J. Fowell, 2003. "Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM". *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 18, pp. 513-523.
- [5] Muller, C.S. 2006. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. PhD thesis. University of Stuttgart.
- [6] Koyama, Y. (2003). Present status and technology of shield tunneling method in Japan. *Tunnelling and underground space technology*, 18(2-3), 145-159.
- [7] Peck, R.B. 1969. Deep excavations and tunnelling in soft ground – State of Art.Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, pp. 225-290.
- [8] O'Reilly, M.P. and New, B.M. 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction . *Tunnelling '82*. London, IMM, pp. 173-181.
- [9] Mair, R.J., Taylor, R.N. and Bracegirdle, A.1993. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Géotechnique*., 43(2) : 315-320.
- [10] Caporaletti, P. 2005. Tunnelling in Layered Ground and its Effects on Pre-existing Masonry Structures. PhD Thesis. University of Rome "La Sapienza". Italy.
- [11] New, B.M. and O'Reilly, M.P. 1991. Tunnelling induced ground movements; predicting their magnitude and effects. *Proceedings of the 4th International Conference on Ground Movements and Structures*. Cardiff, invited paper, Pentech Press, pp. 671-697.
- [12] Selby, A.R. 1988. Surface movements caused by tunneling in two-layer soil. *Engineering geology of underground movements*, Geol .Soc. (London) Engineering Geology Special Publication., 5: 71-77.
- [13] Martin, M.e. 2009. Comparison of analytical method, 3D FEM with experimental Subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground. *Computers and Geotechnics*., 36: 113-124.
- [14] Mair, R.J. and Taylor, R.N. 1997. Theme lecture: bored tunnelling in urban environment. *Proc. of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Hamburg, Vol. 4, pp. 2353-2385.

- [15] Potts, D.M. and Addenbrooke, T.I. 1997. A structure's influence on tunnelling-induced ground movements. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotechnical Engineering.*, 125:109-125.
- [16] Boscardin, M.D. and Cording, E.J. 1989. Building response to excavation induced settlement. *ASCE. Journal of Geotechnical Engineering.*, 115(1):1-21.
- [17] Mair, R.J., Taylor, R.N., and Burland, J.B. 1996. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling. *Proceeding of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, London (eds Mair and Taylor). Balkema, pp. 713-718.
- [18] Broere, W. 2001. Tunnel Face Stability and New CPT Applications. PhD Thesis. Technical University of Delft.
- [19] Aklik, P., Idinger, G. and Wu, W. 2010. Face stability of a shallow tunnel in a geotechnical centrifuge .*Physical Modelling in Geotechnics – Springman, Laue & Seward (eds) © 2010 Taylor & Francis Group, London*, pp.531-536.
- [20] Chen, C.N., Huang, W.Y. and Tseng, C.T. 2011. Stress redistribution and ground arch development during tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 26: 228–235.
- [21] Mashimo, H. and Ishimura, T. 2003. Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel. *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 18: 233-241.
- [22] Hashimoto, T., Ye, G.L. and Nagaya, J. 2009. Study on earth pressure acting upon shield tunnel lining in clayey and sandy grounds based on field monitoring. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground – Ng, Huang & Liu (eds) Taylor & Francis Group, London*, pp: 307-312.
- [23] Nunes, M.A. and Meguid, M.A. 2009. A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 24 : 716–722.
- [24] Leung, C. and Meguid, M.A. 2011. An experimental study of the effect of local contact loss on the earth pressure distribution on existing tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 26: 139–145.
- [25] Teachavorasinskun, S. and Tanan, C.U. 2010. Influence of segmental joints on tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 25: 490–494.
- [26] El-Nahhas, F., EL-Kadi, F. and Ahmed, A. 1992. Interaction of Tunnel Linings and Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 7 (1): 33–43.
- [27] Chong, P.T., Tang, S.K., Lim, T.L., Sugawara, S. and Furusono, T. 2004. Bored tunnel lining design in soft soils – a comparison between analytical and numerical analyses. *Tunnelling and Underground Space Technology.*, 19: 456-462.
- [28] Grant, R.J. and Taylor, R.N. 1996. Centrifuge modelling of ground movements due to tunnelling in layered ground. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. London (eds. R.J. Mair and R.N. Taylor), Balkema, pp. 507-512.
- [29] Hagiwara, T., Grant, R.J., Calvello, M. and Taylor, R.N. 1999. The effect of overlying strata on the distribution of ground movements induced by tunnelling in clay. *Soils and Foundations.*, 39 (3) : 63–73.

- [30] Chu, B.L., Hsu, S.C., Chang, Y.L. and Lin, Y.S. 2007. Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22: 351–362.
- [31] Park, S.H. and Adachi, T. 2002. Laboratory model tests and FE analyses on tunneling in the unconsolidated ground with inclined layers. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17: 181–193.
- [32] Clough, G.W. and Leca, E. 1993. EPB Shield tunnelling in mixed face conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (10): 1641–1656.
- [33] Book, P. *Spon's Civil Engineering and Highway Works Price Book*.
- [34] Paraskevopoulou, C., & Andreas, B. (2012, March). Construction cost estimation for Greek road tunnels in relation to the geotechnical conditions. In *International Symposium Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works*. Leeds.
- [35] Flyvbjerg, B. (2014). What you should know about megaprojects and why: An overview. *Project management journal*, 45(2), 6-19.
- [36] Membah, J., & Asa, E. (2015). Estimating cost for transportation tunnel projects: a systematic literature review. *International Journal of Construction Management*, 15(3), 196-218.
- [37] Sinfield, J. V., & Einstein, H. H. (1998). Tunnel construction costs for tube transportation systems. *Journal of construction engineering and management*, 124(1), 48-57.
- [38] Zhao, J., Choa, V., & Broms, B. B. (1996). Construction and utilization of rock caverns in Singapore Part B: Development costs and utilization. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(1), 73-79.
- [39] Isaksson, T., & Stille, H. (2005). Model for estimation of time and cost for tunnel projects based on risk evaluation. *Rock mechanics and rock engineering*, 38(5), 373-398.
- [40] Flyvbjerg, B., Bruzelius, N., & van Wee, B. (2013). Comparison of capital costs per route-kilometre in urban rail. *arXiv preprint arXiv:1303.6569*
- [41] Moavenzadeh, F., & Markow, M. J. (1976). Simulation model for tunnel construction costs. *Journal of the Construction Division*, 102(1), 51-66.
- [42] Paraskevopoulou, C., & Benardos, A. (2013). Assessing the construction cost of Greek transportation tunnel projects. *Tunnelling and underground space technology*, 38, 497-505.
- [43] Rostami, J., Sepehrmanesh, M., Gharahbagh, E. A., & Mojtabai, N. (2013). Planning level tunnel cost estimation based on statistical analysis of historical data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 22-33.
- [44] Mahmoodzadeh, A., & Zare, S. (2016). Probabilistic prediction of expected ground condition and construction time and costs in road tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 734-745.

- [45] Liu, B., Wang, Y., Zhao, G., Yang, B., Wang, R., Huang, D., & Xiang, B. (2021). Intelligent Decision Method for Main Control Parameters of Tunnel Boring Machine based on Multi-Objective Optimization of Excavation Efficiency and Cost. arXiv preprint arXiv:2104.14975.
- [46] Ahmed, C. (2021). Early cost estimation models based on multiple regression analysis for road and railway tunnel projects. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11), 1-10.
- [47] Benardos, A., Sourouvali, N., & Mavrikos, A. (2021). Measuring and benchmarking the benefits of Athens metro extension using an ex-post cost benefit analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103859.
- [48] Mahmoodzadeh, A., Mohammadi, M., Abdulhamid, S. N., Nejati, H. R., Noori, K. M. G., Ibrahim, H. H., & Ali, H. F. H. (2021). Predicting construction time and cost of tunnels using Markov chain model considering opinions of experts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 116, 104109.
- [49] <http://tabrizmetro.ir/>
- [50] Nematollahi, M., & Dias, D. (2019). Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction—Case of the Shiraz subway line. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86, 75-88.

Abstract

The depth of the subway directly affects the costs of tunnel excavation and the construction of metro stations. Minimizing these costs is a goal for all tunnel project managers. In this research, the effect of different depths has been investigated from both technical and cost perspectives. Then, the optimal depth for constructing subway tunnels has been determined according to both technical and cost points of view. From a technical standpoint, ground surface settlement is considered. Accordingly, if surface settlement is more than 25 mm, the overburden value should be increased until the settlement reaches less than 25 mm. Tunnel excavation costs and construction costs of metro stations also form a cost perspective in determining the optimal depth for the subway tunnel. For this purpose, by increasing the depth of subway tunnels and the distance of stations from each other, a comparison of the cost for constructing tunnels and stations has been considered. From a technical point of view, the results illustrate that the settlement exceeds the limitation in depths where the tunnel overburdens is less than the diameter. Therefore, tunnel excavation at such depths is not suggested. On the other hand, based on the results of increasing the depth of the tunnel, the tunnel excavation costs initially decreased. After that, when the tunnel overburdens are more than twice the tunnel's diameter, it increases again. Also, with the increase of tunnel overburden, the construction costs of metro stations have increased. According to this study, the construction costs of a one-story station is equal to 195 billion IRR. Meanwhile, the construction costs of a four-story station are equal to 514 billion IRR. Regarding the total construction costs of tunnels and stations, the investigation on the outcomes of studying 17 km of the second line of Tabriz subway, which is done by mechanized tunneling method, clarified that a longer distance between the stations reduces the effect of depth on the total construction costs. Therefore, tunneling under the urban area where the distance between stations is usually from 800 m to 1200 m, the optimal depth for constructing tunnels and stations will be achieved when the overburden is more than the tunnel's diameter but less than one and a half times of it.

Key words:

Cost, Tunnel, Stations, Optimization of depth, Numerical modeling, FLAC3D, Ground surface settlement, metro Tabriz line 02.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Rock Mechanics Engineering

**Optimization of construction depth for subway considering the
type of ground and support system characteristics
(Case Study; Tabriz Metro Line 2)**

By: Mohammadreza Akbarzadeh Arpachaei

Supervisor:

Dr. Seyed Mohammad Esmaeele Jalali

Advisor:

Dr. Alireza Talebinezad

October 2021