

تعیین عمق مناسب برای حفر تونل‌های مترو با توجه به دیدگاه‌های فنی و هزینه‌ای؛ مطالعه موردی خط دوم قطار شهری تبریز

پژوهشی

محمد رضا اکبرزاده ارباجائی^۱؛ سید محمد اسماعیل جلالی^{۲*}؛ علیرضا طالبی نژاد^۳

۱- دانش‌آموخته مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Arpachaei@yahoo.com

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Jalalime@shahroodut.ac.ir

۳- دکتری استخراج معدن، مهندسین مشاور پردیسان سازه طراحان، a_talebinejad@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

شماره صفحات: ۶۹ تا ۹۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2021.11263.1432

واژگان کلیدی	چکیده
هزینه تونل ایستگاه عمق بهینه نشست سطح زمین مترو خط ۲ تبریز FLAC3D	<p>عمق حفر تونل‌های قطار شهری، به طور مستقیم 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 افزایش یابد که نشست سطح زمین به کمتر از ۲۵ میلی‌متر برسد. 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 فاصله 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 ابتدای سال ۱۳۹۹، احداث ایستگاه یک طبقه (در عمق بیشتر از شعاع تونل و کمتر از قطر تونل) هزینه‌ای برابر با ۹۵ میلیارد تومان و هزینه‌ی احداث ایستگاه چهار طبقه (در اعماق بیشتر از دو برابر قطر تونل)، برابر با ۲۵۰ 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، 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.</p>

۱- پیش‌گفتار

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 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 عبور می‌کند، بسیار حایز اهمیت است؛ بنابراین برای جلوگیری از هرگونه خسارت‌های ناشی از ساخت تونل، روی سازه‌های سطحی باید میزان نشست به طور دقیق پیش‌بینی و کنترل شود؛ همچنین برآورد هزینه‌های اقتصادی، عامل مهمی برای موفقیت در یک پروژه تونل‌سازی است. تخمین دقیق از هزینه احداث تونل و اجرای ایستگاه‌ها در مراحل اولیه طراحی تونل از اهمیت بیشتری برخوردار است. به ویژه در مناطقی که تنوع شرایط ژئوتکنیکی که می‌تواند برآوردهای اولیه را تغییر دهد (Akbarzadeh, et al., 2021).

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 بهینه 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 و امکان فراهم آوردن تسهیل در خطوط متقاطع؛ همچنین برخی از معایب افزایش عمق را می‌توان احتمال لزوم حفاری در زیر سطح ایستایی، طولانی شدن راه دسترسی به ایستگاه‌ها، افزایش پله‌ها و طول مسیر آسانسورهای واقع در ایستگاه‌ها دانست (Akbarzadeh, et al., 2021).

در این تحقیق تاثیر عمق‌های مختلف حفر تونل قطار شهری خط دو 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 افزایش یابد که نشست سطح زمین به کمتر از ۲۵ میلی‌متر برسد. هزینه‌های حفر تونل و همچنین احداث ایستگاه‌ها نیز،

دیدگاه اقتصادی 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.

خط دو متروی تبریز به طول حدود ۲۲/۵ کیلومتر، در حال حاضر طولانی‌ترین مسیر از شبکه ریلی شهر تبریز است. این خط، شامل ۲۰ ایستگاه است که از محدوده زمین‌های قراملک تبریز شروع شده و در میدان بسیج خاتمه یافته است. 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. در شکل ۱، نمای مسیر خط دوم قطار شهری بر روی تصویر ماهواره‌ای نشان داده شده است. این خط از شبکه قطار شهری تبریز 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 ۱، درج شده است. لازم به ذکر است که سیستم نگهداری تونل یونیورسال است؛ همچنین قطر خارجی و داخلی تونل به ترتیب برابر با ۹/۴۹ و ۸/۴۸ متر است (Imensazan, 2015).

جدول ۱- مشخصات دستگاه حفاری تونل (Imensazan, 2015)

ردیف	مشخصات دستگاه حفاری	مقادیر
۱	وزن بک‌آپ دستگاه	۳۵۰ تن
۲	وزن سپر (به همراه کاترهد)	۶۲۵ تن
۳	وزن کل دستگاه	۹۷۵ تن
۴	طول کل دستگاه حفاری	۸۶ متر
۵	قطر حفاری	۹/۴۹ متر
۶	گشتاور دستگاه	۲۰۲۳۶ کیلو نیوتن
۷	نیروی پیشران	۸۰۰۰۰ کیلو نیوتن

۲- مطالعات پیشین

با مرور مختصری بر مطالعات انجام گرفته توسط محققان پیشین سعی شده است که به یک شناخت کلی از موضوع این تحقیق دست یافت. مطالعات پیشین در دو بخش انجام شده است. در ابتدا بحث بسیار مهم نشست سطحی زمین

بررسی شده است. در بخش بعدی نیز به مطالعات انجام گرفته در خصوص برآورد هزینه‌های احداث تونل‌های مکانیزه پرداخته شده است.



شکل ۱- مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز بر روی تصویر ماهواره‌ای (Imensazan, 2015)

۲-۱- مطالعات پیشین نشست سطح زمین

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 (Sharifzadeh et al., 2015).

۲-۱-۱- پیش‌بینی نشست زمین به روش تجربی

تأثیر نوع خاک در نشست سطح زمین را ترزاقی (Terzaghi) 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 (Koyama, 2003). پک (Peck) با جمع‌آوری داده‌های حاصل از مطالعات بیش از بیست مورد روی نشست سطحی گزارشی ارائه کرد که در آن به تخمین نشست سطحی با استفاده از منحنی توزیع نرمال آماری با منحنی گاوس پرداخت (Peck, 1969). اوریلی و نیو (O'Reilly)، بر اساس توزیع نرمال برای پیش‌بینی پروفیل‌های نشست سطحی رابطه (۱) را ارائه کردند (O'REILLY & New, 1982). مایر (Mair) و همکارانش به وسیله اندازه‌گیری‌های صحرایی و آزمایش‌های سانتریفیوژ رابطه اوریلی و نیو را تایید کردند (Mair, et al., 1993).

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.

۲-۱-۲- پیش‌بینی نشست زمین به روش تحلیلی

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

ساگاستا و گونزالس (Sagasetta and Gonzalez)، 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 (Migliazza, et al., 2009).

وریوجیت و بوکر (Verruijt and Booker)، رابطه نظری فرم بسته را ارائه کردند که برای تخمین جابجایی قائم در سطح زمین به صورت رابطه (۷)، است.

$$W(y) = 4\epsilon a_0^2 (1 - \theta) \frac{Z_0}{y^2 + Z_0^2} - 2\delta a_0^2 Z_0 \left(\frac{y^2 - Z_0^2}{y^2 + Z_0^2} \right) \quad (7)$$

در این رابطه؛ Z_0 عمق تونل، y فاصله از امتداد مرکزی تونل، a_0 شعاع تونل، $\epsilon = \frac{V_s}{4(1-\theta)}$ 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 (Migliazza, et al., 2009).

روش لاگاناتان و پولوس (Loganathan and Poulos)، 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 (۸)، جابجایی را در جهت عمود بر سطح زمین محاسبه کردند (Migliazza, et al., 2009).

$$W(y) = 4(1 - \theta) a_0^2 \left(\frac{Z_0}{y^2 + Z_0^2} \right) \left(\frac{4g a_0}{4a_0^2} \right) \exp \left[-\frac{1.38 y^2}{(Z_0 + a_0)^2} \right] \quad (8)$$

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

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.

اشمیت (Schmidt) نحوه محاسبه پارامتر پهنای گودی نشست را با استفاده از رابطه (۲) ارائه کرد (Caporaletti, 2005).

$$\frac{i_0}{R} = K \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^n \quad (2)$$

در رابطه فوق Z_0 فاصله عمودی محور تونل تا سطح زمین است. یک 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 رس‌های نرم تا سخت برابر با یک، برای رس‌های سخت و ماسه‌های خشک کمتر از یک و برای ماسه‌های آب‌دار این مقدار بیشتر از یک است (Koyama, 2003).

کوردینگ و هانسمایر (Cording and Hansmire) یک رابطه نرمالایز شده نسبت به قطر تونل را در قالب رابطه (۳) ارائه کردند (New, 1991).

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

اوریلی و نیو برای زمین‌های چسبنده و همچنین غیر چسبنده به ترتیب رابطه (۴) و رابطه (۵) را به صورت تجربی بر اساس داده‌های حاصل از ۱۹ تونل در انگلستان پیشنهاد کردند (O'REILLY & New, 1982).

$$i = 0.43 (Z_0) + 1.1 \quad 3 \leq Z_0 \leq 34 \quad (4)$$

$$i = 0.28 (Z_0) + 0.1 \quad 6 \leq Z_0 \leq 10 \quad (5)$$

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

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

۲-۲- مطالعات پیشین از دیدگاه اقتصادی

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 (Mahmoodzadeh & Zare, 2016).

معاون‌زاده و مارکو (Moavenzadeh & Markow, 1976) در سال ۱۹۷۶، 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.

پاراسکوپولو و بناردوس (Paraskevopoulou & Benardos, 2013) در سال ۲۰۱۳، 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 برقرار است. در مطالعات این محققان، شاخص *GSI* برای نمایش شرایط ژئوتکنیکی منطقه مد نظر قرار گرفته است. با توجه به شکل ۲، مشخص است که با افزایش شاخص *GSI*، هزینه‌های احداث تونل روند کاهشی دارد.

رستمی و همکاران (Rostami, et al., 2013) در سال ۲۰۱۳، 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.

منحنی پیش‌بینی نشست سطحی به دست آمده از رابطه این محققان با این‌که 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 مقطعی به مقطع دیگر متفاوت بوده و بسته به شرایط زمین و نحوه عملیات اجرایی دستگاه و پرسنل آن تغییر می‌کند (Möller, 2006).

۲-۱-۳- پیش‌بینی نشست زمین به روش عددی

در استفاده از روش‌های تجربی باید بر این نکته توجه داشت که این روش‌ها به دلیل ساده‌سازی‌ها 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.

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 تشکیل‌دهنده خود دامنه وسیعی از رفتارها را از خود نشان می‌دهند که امکان اعمال همه آن‌ها در یک مدل رفتاری واحد وجود ندارد.

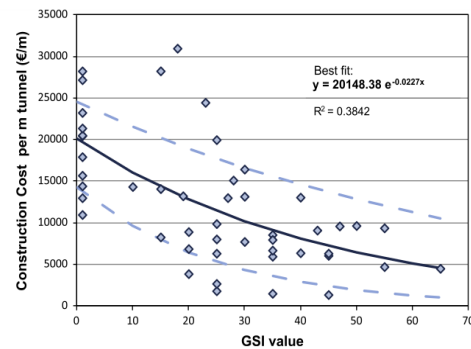
لیو و همکاران (Liu, et al., 2021) در سال ۲۰۲۰، از طریق الگوریتم شبکه عصبی، با توجه به پارامترهای سنگ و دستگاه حفاری، مدلی برای محاسبه هزینه مربوط به احداث تونل ارائه کردند.

احمد (Ahmed, 2021) در سال ۲۰۲۱، 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.

بناردوس و همکاران (Benardos, et al., 2021) در سال ۲۰۲۱، برای پروژه خط ۳ متروی آتن یونان (Egaleo Aghia Marina)، با استفاده از روش تجزیه و تحلیل هزینه و سود (Cost-Benefit-Analysis)، 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 با حالت قبلی پرداختند. نتایج حاکی از آن است که مقادیر هزینه-سود با شاخص ارزش‌گذاری فعلی (Net Present Value) در سال ۲۰۱۸، دو برابر مقادیر قبل از 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 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 (ترجیحاً با انجام بررسی‌های مستقیم از رفتار عمومی و استفاده از خدمات مترو) دنبال شوند.

محمودزاده و همکاران (Mahmoodzadeh, et al.,)

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- منحنی مقادیر شاخص GSI به همراه هزینه احداث تونل در هر متر (Paraskevopoulou & Benardos, 2013).

محمودزاده و زارع (Mahmoodzadeh & Zare,) 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 (Hamro road tunnel) پیشنهاد کردند که ادغامی از رویکرد پیش‌بینی شرایط زمین بر اساس فرآیند مارکوف (Markov process) و تحلیل واریانس زمان و هزینه بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو (Monte-Carlo simulation) 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 ساخت تونل نسبت به حفاری از یک طرف به نصف کاهش می‌یابد.

از ماسه-سیلت ($Si-S$)، رس-سیلت ($Si-C$)، ماسه-رس (S)- C)، مارل-ماسه ($S-M$) به جای گروه‌های اول، دوم، سوم و چهارم استفاده شده 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. همان‌طور که قابل مشاهده است، گروه ماسه-سیلت، بیشترین بخش از مسیر تونل را فراگرفته است؛ همچنین گروه رس-سیلت نیز، کمترین بخش از مسیر تونل را شامل شده است.

در حالت دوم مسیر خط دوم قطار شهری تبریز، روباره‌های مختلف تونل در پنج رده، مطابق شکل ۴، طبقه‌بندی شده‌اند. معیار این طبقه‌بندی مقدار ارتفاع روباره از سطح زمین تا تاج 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 تونل و کمتر از قطر تونل را دارند.

گروه B ، روباره‌هایی که بزرگ‌تر از قطر تونل و کمتر از یک و نیم برابر قطر آن هستند نیز 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 است. در نهایت مقادیر روباره تونل در صورت بزرگ‌تر بودن از مقدار دو برابر قطر تونل، در دسته E ، جای گرفته‌اند. لازم به ذکر است که از کیلومتراژ ۱۷ به بعد مسیر تونل، به دلیل ارتفاع بسیار اندک روباره تونل، به صورت حفاری روباز بوده که در این تحقیق بررسی نشده است.

مطالعات آماری روی داده‌ها نشان می‌دهد که به غیر از دو درصد ابتدای تونل، ۹۸ درصد از روباره‌های مسیر تونل (در بازه مکانی مورد مطالعه این تحقیق)، 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 است که با ارتفاع روباره یک و نیم برابر قطر تونل تا دو برابر آن طراحی شده است. این اطلاعات آماری برای درک بیشتر موضوع در شکل ۵، به صورت دایره‌ای بر اساس فراوانی مقادیر روباره تونل در مسیر تونل خط دوم قطار

(2021) در سال ۲۰۲۱، اثرات عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی را بر اساس زنجیره مارکوف، برای پیش‌بینی زمان و هزینه‌های ساخت تونل جاده‌ای قلاجه ($Ghalaje$ road tunnel) 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.

با توجه به بیشینه ذکر شده، 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.

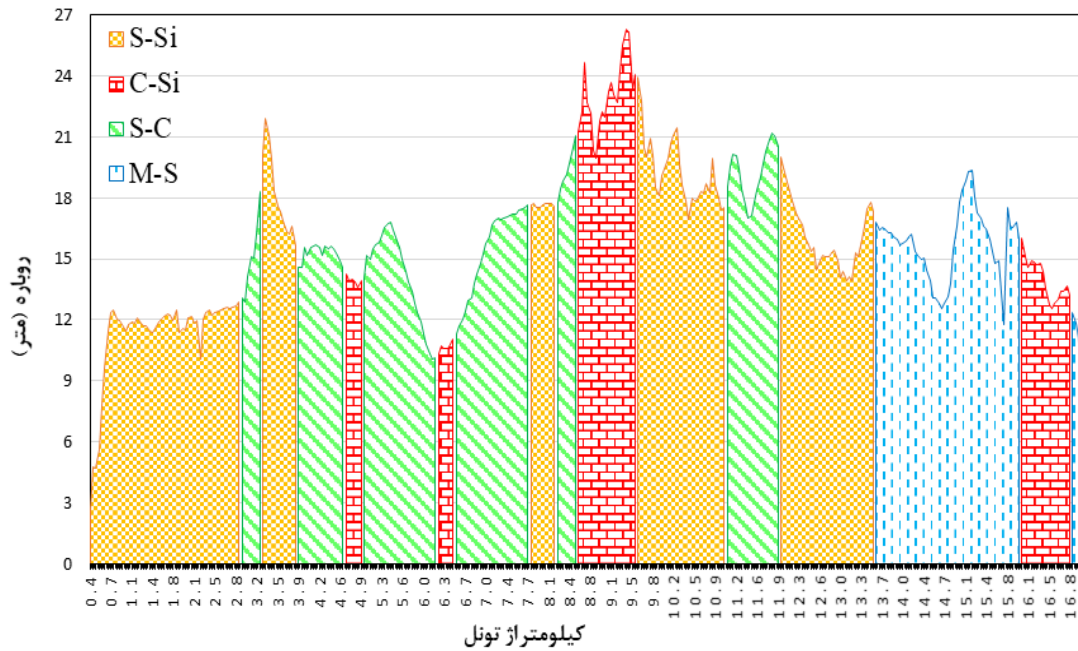
۳- مطالعات ژئوتکنیکی زمین مسیر تونل

کل مسیر خط دو قطار شهری تبریز در دو حالت طبقه‌بندی شده‌اند؛ حالت اول، بر اساس جنس زمین و حالت دوم نیز، بر اساس مقادیر روباره‌های مسیر طبقه‌بندی شده‌اند. در حالت اول پس از مرتب‌سازی و دسته‌بندی پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف زمین برای طول مسیر، بر اساس قضاوت مهندسی این خاک‌ها به چهار دسته کلی، طبقه‌بندی شده‌اند. در این طبقه‌بندی مقاومت، اندازه ذرات، چسبندگی، اصطکاک داخلی، مدول یانگ خاک و بر اساس نتایج خروجی از آزمایش نفوذ استاندارد در نظر گرفته شده است. این طبقه‌بندی ژئوتکنیکی خاک، با توجه به مقادیر روباره تونل از سطح زمین، به صورت چهار گروه متفاوت، در شکل ۳، نشان داده شده هستند. 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. در ادامه به ترتیب به اختصار

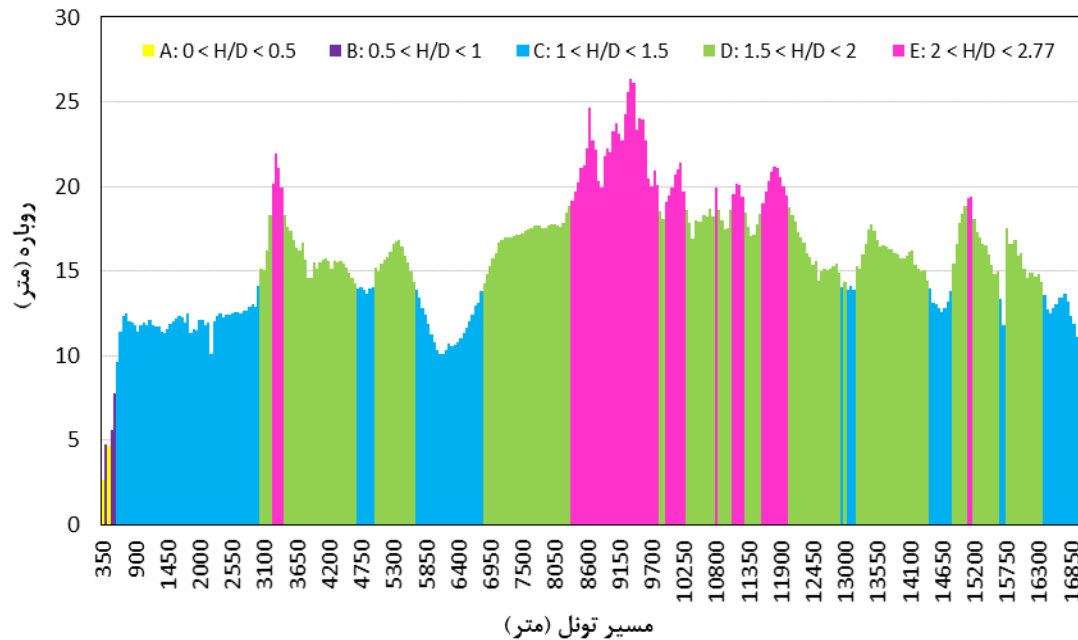
تعیین عمق مناسب برای حفر تونل‌های مترو با توجه به دیدگاه‌های... محمدرضا اکبرزاده اریجائی و ... ص ۶۹-۹۳

برابر با ۲۶/۳۳ متر است؛ بنابراین مدل‌های این پژوهش در چهار مقطع از چهار گروه مهم *B, C, D, E* این مسیر مدل‌سازی شده هستند.

شهری تبریز، 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



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



شکل ۴- طبقه‌بندی مقادیر مختلف روباره خط دو قطار شهری تبریز

- مدل‌سازی سیستم نگهداری
- حل نهایی مدل

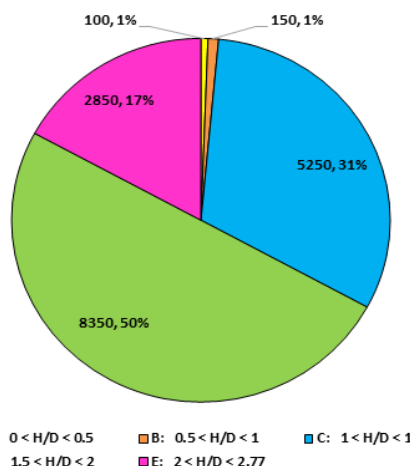
در این تحقیق توسط ۱۶ مدل، نشست سطحی بیشینه زمین محاسبه شده است که در جدول ۲، به توضیحات این مدل‌ها پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در ستون نام مدل، اعداد نمایان‌گر طبقه‌بندی جنس خاک و همچنین حروف لاتین نشان‌گر طبقه‌بندی مقادیر روباره تونل است. ابعاد تمامی مدل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان 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 ۶، بر اساس روابط زیر با حداقل ابعاد انتخاب شده‌اند (Nematollahi & Dias, 2019).

- ارتفاع مدل $H + 4D =$
- طول مدل $H + 3D =$
- عرض مدل $3H =$ (برای نصف مدل)

H عمق و D قطر تونل است. همچنین نحوه اعمال شرایط مرزی در این مدل‌ها به گونه‌ای 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 طوری‌که دیواره‌های مرز مدل، از نوع غلتکی و همچنین کف مدل از نوع مفصلی است که هیچ‌گونه جابجایی در کف رخ نمی‌دهد.

برای بررسی بهتر نتایج مدل‌سازی‌ها، تمامی مدل‌ها در زمین‌های همگن و بدون لایه‌بندی 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.

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی شکل مخروطی سپردستگاه حفاری توسط المان‌های پوسته‌ای از نرم‌افزار فلک سه بعدی استفاده شده است. در این روش، سپر به سه قسمت مساوی با مدول‌های 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، تعیین شده است. لازم به ذکر است که مدول یانگ سپرها به صورت



شکل ۵- طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس فراوانی روباره‌ها

۴- مدل‌سازی و تحلیل نشست سطح زمین

ابتدا به نحوه‌ی مدل‌سازی تونل خط دو قطار شهری تبریز پرداخته 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 بخش هم به مقایسه تمامی مدل‌ها از هم پرداخته شده و از دیدگاه فنی با توجه به حداکثر مقدار نشست مجاز، عمق بهینه در طول مسیر تونل تعیین شده است.

۴-۱- نحوه مدل‌سازی عددی

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی توسط نرم‌افزار $FLAC3D$ ، میزان نشست زمین در اثر حفر تونل خط دوم متروی تبریز پیش بینی شده و تاثیر روباره تونل بر مقدار نشست سطحی بررسی شده است.

به طور کلی مراحل مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC3D$ به ترتیب مراحل زیر انجام شده است:

- ساخت هندسه مدل
- انتخاب محدوده و مش‌بندی مناسبی از زمین
- انتخاب مناسب مدل رفتاری
- اعمال شرایط مرزی
- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری
- تعیین گام‌های حفاری مناسب
- حفاری تونل و تعیین میزان جابه‌جایی‌ها
- آزاد سازی جابه‌جایی‌ها

تعیین عمق مناسب برای حفر تونل‌های مترو با توجه به دیدگاه‌های... محمدرضا اکبرزاده اریجائی و ... ص ۶۹-۹۳

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 گیگا پاسکال تعیین شده
است.

جدول ۲- خصوصیات پارامترهای ژئومکانیکی حالات مختلف مدل‌های انجام شده با نرم‌افزار *FLAC 3D*

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

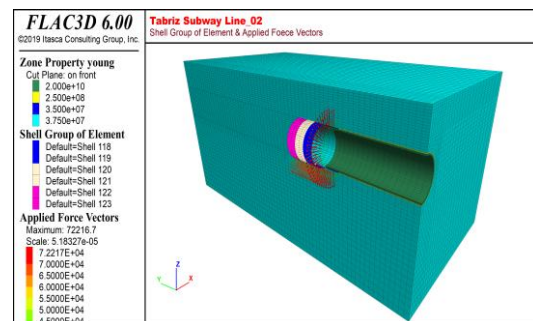
۴-۲- اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی عددی

به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل‌سازی عددی در چهار مقطع از تونل به کیلومترهای ۵۵۰+، ۶۵۰+، ۲۰۰+ و ۳۵۰+ از نتایج ابزاربندی و رفتارنگاری استفاده شده است؛ همچنین ابتدا با استفاده از فرمول تجربی آقای پک که در رابطه (۹)، 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.

$$S(Max) = 0.313 \left(\frac{V_L D^2}{i} \right) \quad (9)$$

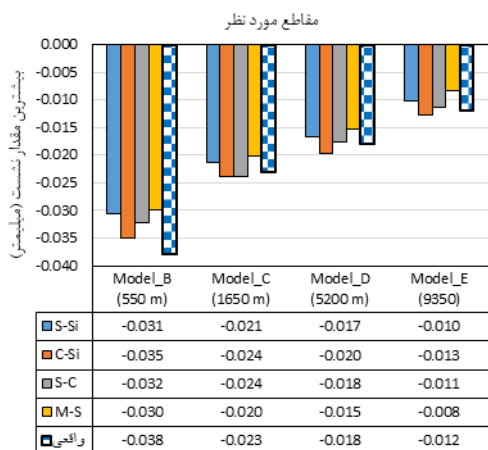
ابتدا در مدل‌سازی مقاطع حفاری، افت حجمی خاک، برابر با ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده و مشاهده می‌شود که مقادیر نشست سطحی حاصل از رابطه تجربی کمتر از مقادیر واقعی داده‌های نشست اندازه‌گیری شده توسط

برای تعیین رفتار زمین از مدل موهر - کولمب استفاده شده است. مقدار تعادل در تمامی مدل‌های این تحقیق رسیدن به مقدار 10^{-7} از تنش است. همچنین برای تمامی مراحل حفاری و مدل‌های 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 مدل‌سازی شده است.



شکل ۶- ابعاد هندسی مدل حفاری در نرم‌افزار *FLAC3D*

پرداخته شده است. بر طبق شکل ۸، مشخص است نتایج واقعی نشست بسیار نزدیک به مقادیر حاصل از مدل‌سازی است.



شکل ۸- نمودار مقادیر نشست مدل‌سازی به همراه ابزاربندی در زمین‌های موجود در مقاطع منتخب

برای تبیین بیشتر این موضوع جدول ۳، ارائه شده است. شایان ذکر است که میانگین مقادیر نشست در چهار زمین هر مقطع انتخاب شده، در نظر گرفته شده و به مقایسه با مقادیر ابزاربندی پرداخته شده است. با توجه به جدول ۳، می‌توان فهمید که میانگین مقادیر نشست زمین حاصل از مدل‌سازی خیلی نزدیک به مقادیر واقعی بوده است. به طوری که کمترین درصد اختلاف در مقادیر نشست مربوط به مقاطع C و D بوده و بیشترین اختلاف موجود با ۱۶ درصد، مربوط به مقطع B است.

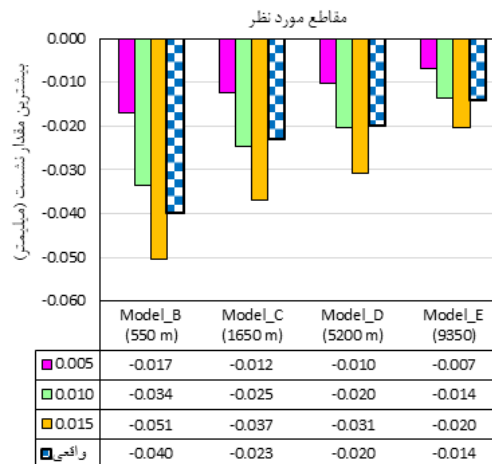
جدول ۳- مقادیر میانگین نشست مدل‌سازی و ابزاربندی در مقاطع منتخب از تونل

ردیف	مقاطع مختلف روباره				بیشترین مقادیر نشست زمین (mm)
	E	D	C	B	
۱	۱۰/۶	۱۷/۳	۲۲/۳	۳۲	میانگین نشست مدل‌سازی
۲	۱۲	۱۸	۲۳	۳۸	مقادیر واقعی نشست
۳	۱/۴	۰/۷	۰/۷	۶	مقادیر اختلاف نشست
۴	۱۱	۳	۳	۱۶	درصد اختلاف نشست

۴-۳- برآورد نشست سطح زمین در اعماق مختلف

در این بخش، تاثیر عمق‌های مختلف حفر مکانیزه تونل خط دوم قطار شهری تبریز از دیدگاه نشست سطح زمین بررسی

ابزاربندی هستند. سپس مقادیر افت حجمی خاک مقداری بیشتر شده و به ۰/۰۱ می‌رسد، سپس 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 بیشتر از مقادیر نشست واقعی هستند؛ بنابراین، افت حجمی در تمامی مقاطع مدل‌سازی ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. شکل ۷، مقادیر نشست سطح زمین در افت‌های حجمی متفاوت خاک را با استفاده از رابطه (۹) و همچنین مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. 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.

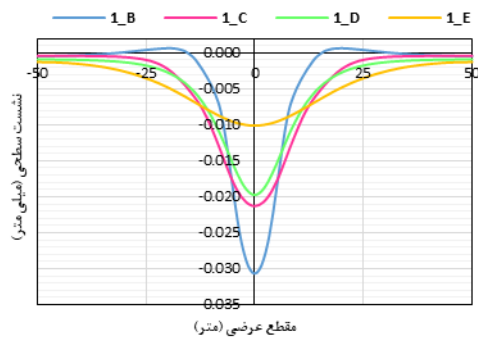


شکل ۷- مقایسه مقادیر نشست در افت حجم‌های متفاوت

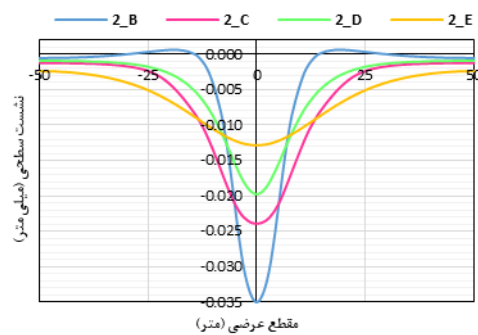
در ادامه به منظور اعتبار سنجی مدل‌های انجام شده در این تحقیق به مقایسه مقادیر نشست سطح زمین حاصل از مدل‌سازی در مقاطع مختلف با مقادیر ابزاربندی، در شکل ۸، پرداخته شده است.

برای پرداختن 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

میلی‌متر در عمق ۲۶/۳۳ متر از سطح زمین است. بر طبق شکل ۱۱، واضح است که، با توجه به اعماق مختلف تونل در زمین ماسه-رس، 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.



شکل ۹- پروفیل‌های نشست در اعماق مختلف زمین ماسه-سیلت



شکل ۱۰- پروفیل‌های نشست در اعماق مختلف زمین رس-سیلت

با افزایش عمق تونل، مقادیر بیشینه نشست برای زمین مارل-ماسه نیز مطابق با شکل ۱۲، 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.

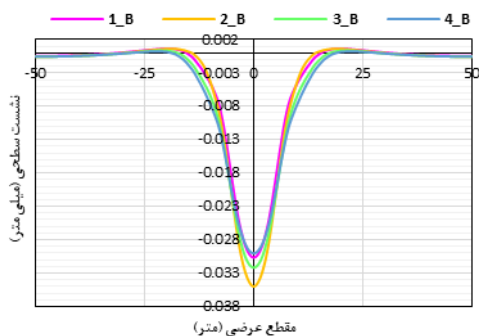
شده و عمق بهینه برای احداث تونل تعیین شده است. در صورتی که مقدار نشست سطح زمین از ۲۵ میلی‌متر بیشتر باشد، باید مقدار روباره تا زمانی که مقدار نشست به کمتر از ۲۵ میلی‌متر برسد، افزایش یابد.

در این تحقیق با اجرا و تحلیل ۱۶ مدل، نشست سطحی بیشینه زمین گروه‌های اول، دوم، سوم و چهارم در اعماق متفاوت محاسبه شده است که نتایج آن‌ها به ترتیب در شکل ۹، شکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. مدل‌ها در چهار گروه زمین‌های با جنس متفاوت، با نام‌های ماسه-سیلت، رس-سیلت، ماسه-رس و مارل-ماسه طبقه‌بندی شده‌اند؛ همچنین لازم به ذکر است که در اشکال نشست سطح زمین که در ادامه قرار دارد، هر زمین متشکل است از چهار عمق مختلف با روباره‌های ۷/۷۵ متر با رنگ نارنجی، ۱۲/۳۱ متر با رنگ سبز، ۱۵/۸۱ متر صورتی و ۲۶/۳۳ متر با رنگ آبی که به ترتیب در این تحقیق از آن‌ها با نام‌های انگلیسی *B*، *C*، *D* و *E* یاد شده است.

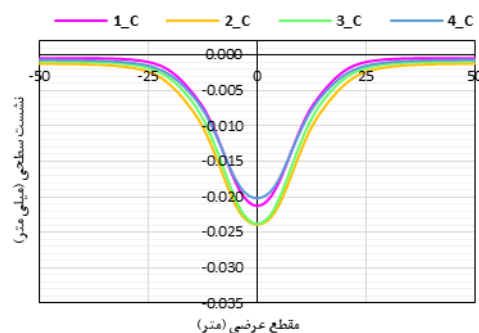
با توجه به شکل ۹، مشخص می‌شود که مقادیر بیشترین نشست سطحی در زمین ماسه-سیلت برای روباره‌های مختلف، حدوداً بین ۱۰ تا ۳۱ میلی‌متر است. این موضوع نشان می‌دهد که تاثیر عمق تونل بر روی مقادیر بیشینه نشست سطحی زمین بیشتر است. مقدار نشست در عمق ۷/۷۵ متر برابر با ۳۱ میلی‌متر است که از حد مجاز آن بیشتر بوده و 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 در شکل ۱۰، دیده می‌شود، با توجه به روباره‌های مختلف، اختلاف مقادیر نشست سطحی زمین رس-سیلت، 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 این‌که بیشتر از ۲۵ میلی‌متر (حد مجاز نشست) است؛ بنابراین از دیدگاه فنی رد می‌شود. در زمین رس-سیلت نیز، مقادیر نشست زمین با افزایش عمق روند کمتر شده است؛ همچنین کمترین مقدار نشست، برابر با ۱۳

مقطعی که در این تحقیق در این بازه عمق تونل مورد انتخاب بوده است، دارای میانگین روباره مسیر تونل، یعنی ۱۲/۳۱ متر از سطح زمین است. با بررسی مقادیر نشست سطحی زمین این گروه از روباره‌ها در زمین‌های متفاوت در شکل ۱۴، مشخص می‌شود که بیشترین مقدار نشست سطحی در بازه‌ی ۲۰/۲ تا ۲۳/۹ 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 ۲۲/۳ میلی‌متر بوده که نزدیک به مقدار نشست حد مجاز بوده و باید احتیاط لازم را در حفاری تونل داشت.

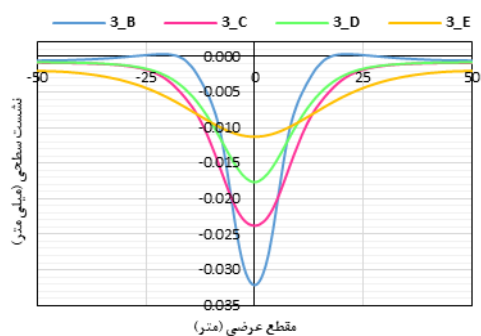


شکل ۱۳- پروفیل‌های نشست سطحی انواع زمین در عمق ۷/۷۵ متر

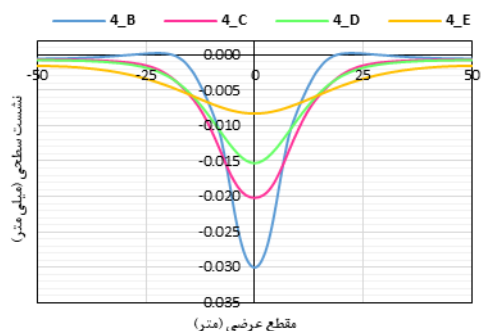


شکل ۱۴- پروفیل‌های نشست سطحی انواع زمین در عمق ۱۲/۳۱

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 طوری که چیزی در حدود نصف مسیر تونل در این



شکل ۱۱- پروفیل‌های نشست در اعماق مختلف زمین ماسه-رس



شکل ۱۲- پروفیل‌های نشست در اعماق مختلف زمین مارل-ماسه

برای تبیین بیشتر تأثیر جنس زمین در مقادیر نشست، نمودارهای بیشترین مقادیر نشست سطحی زمین در اعماق یکسان و در زمین‌های متفاوت شکل ۱۳، شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶، نشان داده شده است. به این ترتیب تأثیر جنس زمین در اعماق یکسان بر روی مقدار نشست سطح زمین مشخص می‌شود.

با توجه به شکل ۱۳، 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.

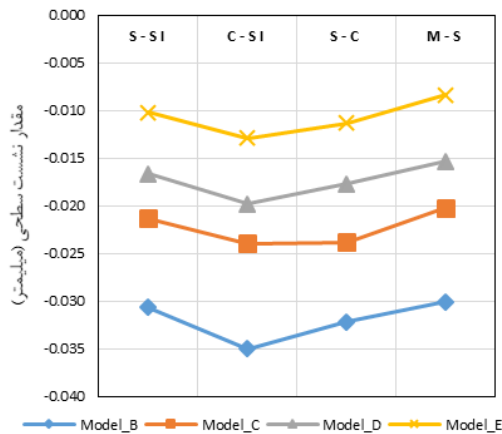
حدوداً یک سوم بازه‌ای از مسیر خط دو قطار شهری تبریز که در آن طراحی تونل صورت گرفته است، دارای روباره‌های بین قطر تونل تا یک و نیم برابر قطر تونل است.

خط دوم قطار شهری تبریز را شامل می‌شود. با توجه به شکل ۱۶، 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 ۸/۳ تا ۱۲/۹ میلی‌متر بوده است. همان‌طور که از اعداد نشست سطحی معلوم است، جنس زمین در مقادیر نشست سطحی این گروه از روباره‌ها بیشتر تاثیر داشته است و مقدار این نشست در حدود ۴۳ درصد است. مقادیر بیشترین نشست سطحی زمین در اعماق مختلف تونل در جدول ۴ ذکر شده است.

جدول ۴- مقادیر نشست زمین در اعماق مختلف تونل

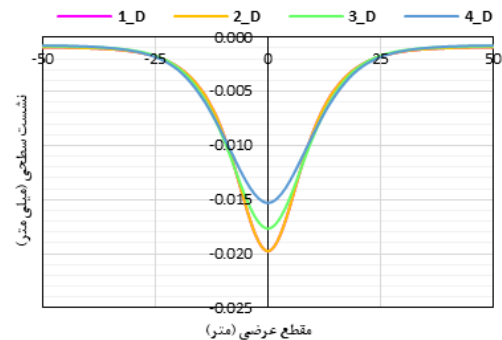
ردیف	مقاطع مختلف روباره				بیشترین نشست زمین (mm)
	E	D	C	B	
۱	۱۰/۱	۱۶/۶	۲۱/۳	۳۰/۷	نشست خاک ماسه-سیلت
۲	۱۲/۹	۱۹/۷	۲۳/۹	۳۵/۰	نشست خاک رس-سیلت
۳	۱۱/۳	۱۷/۷	۲۳/۸	۳۲/۲	نشست خاک ماسه-رس
۴	۸/۳	۱۵/۳	۲۰/۲	۳۰/۰	نشست خاک مارل-ماسه
۵	۱۰/۶	۱۷/۳	۲۲/۳	۳۲/۰	میانگین نشست زمین

مقادیر نشست سطح زمین همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با افزایش عمق تونل، روند کاهشی با خود به همراه داشته است. مقادیر بیشینه نشست‌های سطحی زمین در همه حالات مختلف مدل‌سازی این تحقیق، به صورت نمودار در شکل ۱۷، مشاهده می‌شود.

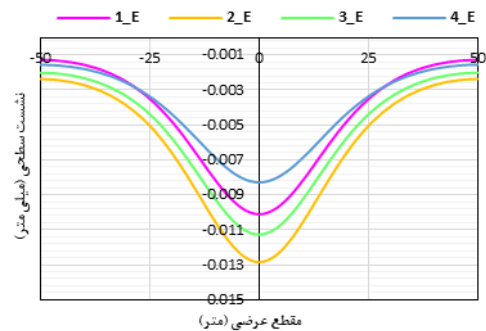


شکل ۱۷- نمودار کل نشست‌های سطح زمین در مدل‌سازی

اعماق طراحی و حفاری می‌شود. لازم به ذکر است که میانگین روباره کل مسیر تونل در این بازه قرار داشته و برابر با ۱۵/۸۱ متر از سطح زمین است. همان‌طور که در شکل ۱۵، معلوم است این گروه از تونل‌ها که دارای روباره‌های مشابهی بوده و در این بازه قرار دارند، دارای بیشترین مقدار نشست سطحی در بازه ۱۵/۳ تا ۱۹/۷ میلی‌متر هستند که با توجه به جنس زمین این مقادیر متفاوت است. تاثیر 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.



شکل ۱۵- پروفیل‌های نشست سطحی انواع زمین در عمق ۱۵/۸۱



شکل ۱۶- پروفیل‌های نشست سطحی انواع زمین در عمق ۲۶/۳۳

بیشترین مقدار روباره مسیر خط دوم قطار شهری تبریز برابر با ۲۶/۳۳ متر است. روباره‌هایی که بیشتر از دو برابر قطر تونل هستند، تقریباً یک پنجم طول مسیر تونل

نیز، مجموع هزینه‌های احداث تونل و اجرای ایستگاه‌ها با دور شدن ایستگاه‌ها از هم در سناریوهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و جمع‌بندی شده است.

۵-۱- برآوردهای اقتصادی احداث تونل

در بحث برآورد هزینه ساخت تونل، قیمت اقلام مصرفی و همچنین دست‌مزد پیمان‌کاران برای احداث تونل، از فهرست بهای اعلامی سازمان برنامه و بودجه کشور برای واحدهای راه، راه‌آهن و باند فرودگاه در سه ماهه اول سال ۱۳۹۹ استخراج شده است. لازم به ذکر است که مقدار مصرفی میل‌گرد از پروژه اخذ شده و با توجه به فهرست بهای مذکور، هزینه آن برآورد شده است. جزییات مقادیر مصرفی میل‌گرد در هر رینگ از تونل با توجه به مقادیر روباره آن در جدول ۵، ذکر شده است.

جدول ۵- مقادیر مصرفی میل‌گرد در هر رینگ از تونل

ردیف	مقدار روباره بر قطر	مقدار میل‌گرد هر رینگ (kg)	
		تا قطر ۱۰ (mm)	از قطر ۱۰ تا ۱۸ (mm)
۱	۰/۵ تا ۱	۱۱۲۳	۱۲۵۳
۲	۱ تا ۱/۵	۹۵۸	۱۰۶۹
۳	۱/۵ تا ۲	۸۲۶	۱۰۶۹
۴	۲ تا ۲/۷۷	۹۹۱	۹۲۱

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 است.

اطلاعات مربوط به هزینه‌های احداث تونل در هر چهار عمق با روباره‌های مختلف محاسبه شده و به عنوان نمونه از جزییات محاسبات هزینه احداث تونل، در عمقی بزرگ‌تر از قطر تونل و کمتر از یک و نیم برابر تونل، در جدول ۶، ذکر شده است. لازم به ذکر است که فقط موارد مربوط به مقدار میل‌گرد آج‌دار مصرفی در سیستم نگهداری تونل با تغییر روباره تونل، تغییر یافته و با استفاده از جدول ۵، هزینه آن‌ها محاسبه شده است که در مبلغ کل به دست آمده برای احداث تونل تاثیر گذاشته است.

در شکل ۱۷، خطوط آبی، قهوه‌ای، طوسی و نارنجی، 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 دیگری که از شکل ۱۷، مشخص می‌شود، این است که، مقادیر نشست سطحی زمین در هر عمقی از تونل، به ترتیب در زمین‌های رس-سیلت، ماسه-رس، ماسه-سیلت و مارل-ماسه روند کاهشی با خود به همراه داشته است. با بررسی بیشتر پارامترهای ژئوتکنیکی زمین مسیر تونل و مقایسه آن‌ها با مقادیر نشست، مشخص شد که؛ بیشینه مقدار نشست سطحی زمین وابسته به مقدار مدول یانگ خاک آن زمین بوده است. به طوری که مدول یانگ زمین‌های رس-سیلت، ماسه-رس، ماسه-سیلت و مارل-ماسه به ترتیب برابر با مقادیر ۳۴۰، ۳۷۵، ۴۵۰ و ۴۷۵ کیلوگرم بر سانتی-متر مربع است.

با توجه به تمامی مطالب ذکر شده در این بخش 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.

۵- برآوردهای هزینه‌های احداث تونل و ایستگاه

در این بخش سعی شده است که به معرفی کلی هزینه‌های مرتبط با ساخت تونل و اجرای ایستگاه در اعماق مختلف، برای خط دوم پروژه قطار شهری تبریز پرداخته شود؛ بنابراین ابتدا به برآورد هزینه‌های احداث تونل و سپس برآورد هزینه‌های اجرای ایستگاه‌ها در اعماق مختلف پرداخته شده است؛ همچنین در قسمت انتهایی این بخش

تعیین عمق مناسب برای حفر تونل‌های مترو با توجه به دیدگاه‌های... محمدرضا اکبرزاده ارباچائی و ... ص ۶۹-۹۳

جدول ۶- فهرست بهای حفاری تونل با دستگاه‌های تمام مقطع حفاری، در عمق بیشتر از قطر تونل و کمتر از یک و نیم برابر قطر تونل (Akbarzadeh et al., 2021).

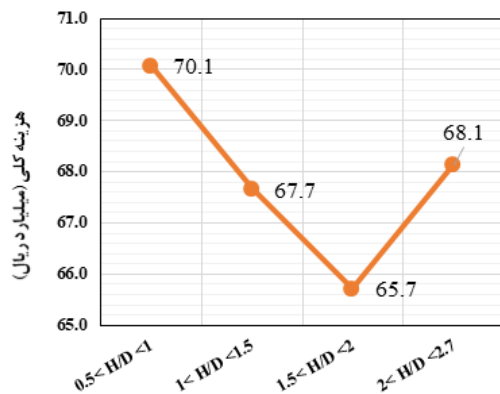
ردیف	شرح	واحد	مقدار	قیمت واحد (ریال)	بهای کل (ریال)
۱	حفاری تونل‌های با سطح مقطع حفاری ۴۰ مترمربع، در زمین غیرسنگی، با استفاده از هر نوع دستگاه <i>TBM</i> .	مترمکعب	۱,۵۸۳,۶۱۷	۴,۳۰۳,۰۰۰	۶,۸۱۴,۳۰۳,۰۹۰,۴۰۰
۲	کسر بهای حفاری به ازای هر متر مربع بیش تر از ۴۰ متر مربع و حداکثر تا ۱۴۰ متر مربع.	درصد	-۲۰,۹۱,۷۹۸,۷۸۱,۰۷۸	-۰/۴۵	-۹۴۱,۳۰۹,۴۵۱,۴۸۵
۳	اضافه بها به ردیف‌های حفاری تونل با استفاده از دستگاه حفار <i>TBM</i> در عمق بیشتر از ۲۵۰ متر، برای ۲۵۰ متر دوم یک بار، برای ۲۵۰ متر سوم دو بارو به همین ترتیب برای طول‌های بیشتر.	درصد	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲,۳۰	۱	۷۶۴,۳۲۷,۵۲۲,۲۰۲
۴	انجام تمامی عملیات لازم برای نصب ابزار دقیق همگرایی سنخ سه نقطه ای در تونل در حین عملیات حفاری.	سری (عدد)	۲۳	۱,۱۶۳,۰۰۰	۲۶,۷۴۹,۰۰۰
۵	انجام تمامی عملیات لازم برای قرائت ابزار دقیق همگرایی سنخ 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 سنخ 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 <i>AIII</i> 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 <i>AIII</i> به قطر ۱۲ تا ۱۸ میلیمتر برای بتن مسلح با سیم پیچی لازم.	کیلوگرم	۱۵,۹۵۹,۸۹۲	۶۹,۲۰۰	۱,۱۰۴,۴۲۴,۵۵۹,۶۱۶

دو فصل‌نامه‌ی علمی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره‌ی ۱۲؛ شماره‌ی ۱؛ تابستان ۱۴۰۲

ادامه جدول ۶- فهرست بهای حفاری تونل با دستگاه‌های تمام مقطع حفاری، در عمق بیشتر از قطر تونل و کمتر از یک و نیم برابر قطر تونل (Akbarzadeh et al., 2021)

ردیف	شرح	واحد	مقدار	قیمت واحد (ریال)	بهای کل (ریال)
۱۲	تهیه و نصب قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت) برای نصب در تونل‌های حفاری شده با دستگاه <i>TBM</i> .	مترمکعب	۲۱۷.۲۸۰	۸,۹۶۱,۰۰۰	۱,۹۴۷,۰۴۶,۰۸۰,۰۰۰
۱۳	حمل مصالح در راه‌های 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 تونل‌ها برای دوره ساختمان.	مترمکعب	۱,۰۲۷,۰۴۴	۶۷,۵۰۰	۸۵,۷۵۴,۹۷۰,۰۰۰
۱۵	تهیه و نصب وسایل لازم و تامین روشنایی تونل‌ها 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 طول‌های بیشتر.	درصد	۱۴,۲۸۴,۴۳۴,۰۲۳	۷	۹۹,۹۹۱,۰۳۸,۱۶۱
۱۷	تهیه لوازم و انجام عملیات آبکشی داخل تونل‌ها.	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	مجموع هزینه احداث کل تونل:				۱۱۲۱۱ میلیارد ریال
۲۱	حق الزحمه هر متر از طول تونل:				۵۰۰,۵ میلیون ریال
۲۲	حق الزحمه هر متر از طول تونل با احتساب ضریب تجهیز کارگاه و بالاسری:				۶۷۶,۷ میلیون ریال

آسانسور، تاسیسات، تهویه، فضای مورد نیاز برای پرسنل و تجهیزات موجود در ایستگاه و غیره اشاره کرد. هزینه‌های احداث ایستگاه‌ها به طور عمده بر پنج قسمت؛ سازه اصلی، سازه نگهبان، تاسیسات الکتریکی، تاسیسات مکانیکال و نازک‌کاری (معماری) شامل می‌شود. مقادیر این اجزای هزینه ساخت ایستگاه‌ها بر حسب درصد در شکل ۱۹، نشان داده شده است (Akbarzadeh et al., 2021).



شکل ۱۸- هزینه‌های احداث تونل در اعماق متفاوت



شکل ۱۹- طبقه‌بندی هزینه‌های احداث ایستگاه‌ها

(Akbarzadeh, et al., 2021)

اطلاعات مربوط به هزینه کلی احداث ایستگاه‌ها در جدول ۸، درج شده است و برای درک بهتر این روند هزینه‌ها به صورت نمودار خطی در شکل ۲۰، مشاهده می‌شود.

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 تجهیز کارگاه 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 (Akbarzadeh et al., 2021). اطلاعات مربوط به هزینه‌های احداث تونل در چهار عمق با روباره‌های مختلف، محاسبه شده و به صورت خلاصه در جدول ۷، درج شده است.

جدول ۷- هزینه‌های احداث تونل در اعماق متفاوت

ردیف	مقدار روباره بر قطر	هزینه ساخت هر یک کیلومتر تونل (میلیارد ریال)
۱	۰/۵ تا ۱	۷۰۱
۲	۱ تا ۱/۵	۶۷۷
۳	۱/۵ تا ۲	۶۵۷
۴	۲ تا ۲/۷۷	۶۸۱

جدول ۷، نشان می‌دهد که برای ساخت هر کیلومتر از تونل با روباره بر قطر ۰/۵ تا ۱، مبلغی در حدود ۷۰۱ میلیارد ریال لازم است. در حالی که، با افزایش عمق، برای احداث هر یک کیلومتر از تونل با روباره بر قطر ۱ تا ۱/۵، مبلغی در حدود ۶۷۷ میلیارد ریال مورد نیاز است که نسبت به حالت قبل هزینه کمتری دارد. همچنین روند هزینه احداث تونل با روباره بر قطر ۱/۵ تا ۲، نیز کاهش یافته و تقریباً برابر با ۶۵۷ میلیارد ریال است؛ اما با افزایش عمق بیشتر از دو برابر قطر تونل، روند کاهش هزینه‌ها برعکس شده و افزایش می‌یابد و در احداث هر کیلومتر تونل با روباره‌های بیشتر از دو برابر قطر تونل و کمتر از ۲/۷۷ برابر قطر تونل، مبلغی در حدود ۶۸۱ میلیارد ریال مورد نیاز است. برای درک بهتر این روند هزینه‌ها به صورت نمودار خطی در شکل ۱۸، مشاهده می‌شود.

۵-۲- برآوردهای اقتصادی احداث ایستگاه

از مهمترین هزینه‌های ساخت ایستگاه در اعماق مختلف، می‌توان به هزینه‌های عمده از قبیل؛ هزینه‌های ساختمانی، تملک و تجهیزاتی، گالری‌های دسترسی، پله برقی،

جدول ۸- هزینه احداث ایستگاه در اعماق متفاوت
(Akbarzadeh et al., 2021).

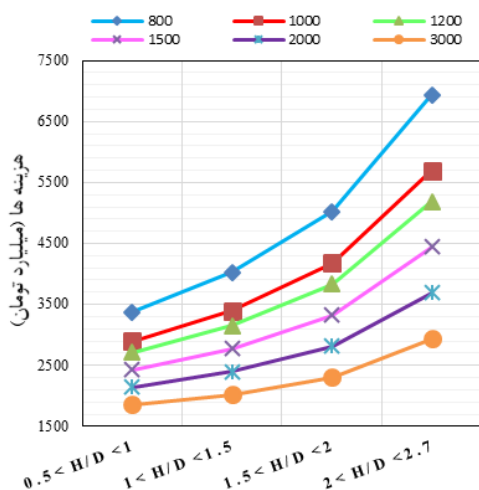
ردیف	تعداد طبقات	مقدار روباره بر قطر	هزینه ساخت هر ایستگاه (میلیارد ریال)
۱	یک	۰/۵ تا ۱	۹۵
۲	دو	۱ تا ۱/۵	۱۲۵
۳	سه	۱/۵ تا ۲	۱۷۰
۴	چهار	۲ تا ۲/۷۷	۲۵۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود، 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 اتاق‌های هواساز و غیره می‌شود که در نتیجه، سبب افزایش هزینه مورد نیاز جهت احداث ایستگاه می‌شود.

قرار گرفته است (۱۷ کیلومتر ابتدای تونل که به روش حفاری مکانیزه است)، فاصله ایستگاه‌ها به ترتیب در حالت-های 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 ۲۱، مشخص است.

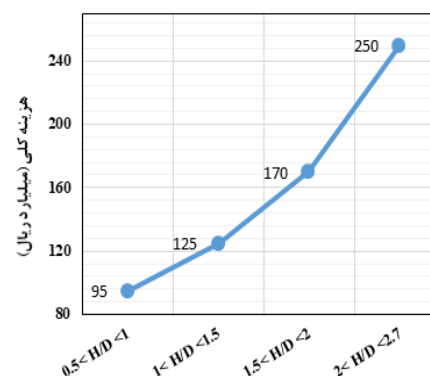
با توجه به این شکل مشخص است که هر چقدر عمق تونل بیشتر می‌شود، مجموع هزینه‌های حفر تونل و اجرای ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. همین‌طور اگر فاصله ایستگاه‌ها از هم بیشتر شود، روند افزایشی این هزینه‌ها ملایم‌تر شده است.

با بررسی دقیق‌تر شکل، در ادامه مبحث به تحلیل سناریوهای متفاوت پرداخته شده است.



شکل ۲۱- مجموع هزینه‌های ساخت تونل و ایستگاه با روباره‌های مختلف در سناریوهای متفاوت

- سناریو اول: فاصله ایستگاه‌ها از هم ۸۰۰ متر
این سناریو در شکل ۲۱، 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 ۳۳۷۶، ۴۰۲۵، ۵۰۲۷ و ۶۹۴۱ میلیارد تومان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این سناریو،



شکل ۲۰- هزینه‌های احداث ایستگاه در اعماق متفاوت

۵-۳- جمع‌بندی مجموع هزینه‌های احداث تونل و ساخت ایستگاه‌ها

برای مقایسه بهتر هزینه‌های مربوط به حفاری تونل و احداث ایستگاه‌های مترو، باید فاصله ایستگاه‌ها از هم نیز در نظر گرفته شود. فاصله ایستگاه‌های خطوط قطار شهری 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

مشخص شده و نشان می‌دهد که با افزایش عمق تونل مجموع هزینه‌های احداث تونل و ایستگاه‌ها، با شیب ملایم-تری نسبت به سناریوهای قبلی، روند افزایشی داشته است.

• سناریو پنجم: فاصله ایستگاه‌ها از هم ۲۰۰۰ متر

این سناریو با رنگ بنفش در شکل ۲۱، 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 ۲۱۴۱، ۲۴۰۰، ۲۸۱۷ و ۳۶۹۱ میلیارد تومان است.

• سناریو ششم: فاصله ایستگاه‌ها از هم ۳۰۰۰ متر

در سناریوی آخر نیز که با رنگ نارنجی در شکل ۲۱، 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 ۱۸۵۶، ۲۰۲۵، ۲۳۰۷ و ۲۹۴۱ 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 اقتصادی، 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 فاصله ایستگاه‌ها از هم، مجموع هزینه‌ها کاهش می‌یابد. فواصل ایستگاه‌ها از هم در زیر بافت شهری در مقایسه با بین شهری (با 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 اقتصادی 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.

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.

• سناریو دوم: فاصله ایستگاه‌ها از هم ۱۰۰۰ متر

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 ۲۹۰۱، ۳۴۰۰، ۴۱۷۷ و ۵۶۹۱ 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 ۲۱، با خط قرمز مشخص شده است.

• سناریو سوم: فاصله ایستگاه‌ها از هم ۱۲۰۰ متر

در این سناریو که با رنگ سبز در شکل ۲۱، 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 ۲۷۱۱، ۳۱۵۰، ۳۸۳۷ و ۵۱۹۱ 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.

• سناریو چهارم: فاصله ایستگاه‌ها از هم ۱۵۰۰ متر

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 ۲۴۲۶، ۲۷۷۵، ۳۳۲۷ و ۴۴۴۱ میلیارد تومان است. این سناریو در شکل ۲۱، با رنگ صورتی

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر عمق‌های مختلف حفر تونل خط دوم قطار شهری تبریز از دو دیدگاه فنی و اقتصادی مورد بررسی شده و عمق بهینه برای حفر 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 روباره تونل تا زمانی که مقادیر نشست زمین به کمتر از ۲۵ میلی‌متر برسد، افزایش یابد. هزینه‌های حفر تونل و همچنین احداث ایستگاه‌ها نیز، دیدگاه اقتصادی را در تعیین عمق بهینه تونل تشکیل می‌دهند.

عمقی از دیدگاه هزینه‌ای بهینه محسوب می‌شود که 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 ژئوتکنیک زمین و همچنین اندازه ذرات خاک، به چهار گروه مختلف طبقه‌بندی شدند؛ همچنین مقادیر روباره‌های مسیر طولی تونل شناسایی شده و در گروه‌هایی دسته‌بندی شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار *FLAC3D*، در چهار گروه مختلف زمین، تونل‌هایی در اعماق متفاوت جانمایی شده و مدل‌سازی شدند. نتایج مدل‌سازی نشان داد؛ با وجود این‌که جنس زمین در مقادیر

نشست سطح زمین تاثیر دارد، اما روباره دارای تاثیر بیشتری بوده است. نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است، اعماقی که دارای روباره کمتر از قطر تونل هستند، دارای نشست بیشتر از حد مجاز بوده‌اند، بنابراین حفر تونل در چنین عمق‌هایی توصیه نمی‌شود.

مطالعات اقتصادی این تحقیق نشان داد 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.

۷- مراجع

- 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 .
- Akbarzadeh, M. R., Jalali, S. E., & Talebinezad, A. R. (2021). *Optimization of construction depth for subway considering the type of ground and support system characteristics (case study; Tabriz metro line 2)* Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, M.Sc. Thesis.
- 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 .
- Caporaletti, P. (2005). *Tunnelling in layered ground and its effects on pre-existing masonry structures* Ph. D. thesis. University of Rome "La Sapienza". Italy.
- Imensazan, C. (2015). *Geological and Engineering Geological Report for the second line of the Tabriz subwa* .

- Koyama, Y. (2003). Present status and technology of shield tunneling method in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2-3), 145-159 .
- 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* .
- 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 .
- 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 .
- Mair, R., Taylor, R., & Bracegirdle, A. (1993). Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Geotechnique*, 43(2), 315-320 .
- Migliazza, M., Chiorboli, M., & Giani, G. (2009). Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2), 113-124 .
- Moavenzadeh, F & Markow, M. J. (1976). Simulation model for tunnel construction costs. *Journal of the Construction Division*, 102(1), 51-66 .
- Möller, S. C. (2006). *Tunnel induced settlements and structural forces in linings*. Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik Stuttgart, Germany .
- 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 .
- New, B. M. (1991). Tunneling induced ground movements: predicting their magnitude and effects. 4th Int. Conf. Ground Movements and Structures ,
- O'REILLY, M. P., & New, B. (1982). *Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction* (090048862X) .
- Paraskevopoulou, C., & Benardos, A. (2013). Assessing the construction cost of Greek transportation tunnel projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 497-505 .
- Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proc. 7th ICSMFE, 1969*, 225-290 .

Rostami, J., Sepehrmanesh, M., Gharahbagh, E. A., & Mojtabei, N. (2013). Planning level tunnel cost estimation based on statistical analysis of historical data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 22-33 .

Sharifzadeh, M., Khademi, J., & Torkamani, A. (2015). *Mechanized Shield Tunneling_* .

Optimization of depth for subway tunnel excavation considering technical and economic perspectives - A case study: second line of Tabriz subway

M. R. Akbarzadeh¹; S. E. Jalali^{*2}; A. R. Talebinejad³

1. MSc in Rock Mechanics; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Arpachaei@yahoo.com
2. Associate Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Jalalime@shahroodut.ac.ir
- 3, PhD in Mining Engineering, Manager of Pardisan Sazeh Tarahan Company, a_talebinejad@yahoo.com

Received: 23 Oct 2021; Accepted: 13 Dec 2021
DOI: 10.22044/tuse.2021.11263.1432

Keywords

Cost
Tunnel
station
Optimal depth for subway
Ground surface settlement
Second line of the Tabriz
subway
FLAC3D

Extended Abstract

Summary

This research investigates the effect of different tunnel depths from both technical and economic perspectives. Then, the optimal depth for the construction of subway tunnels has been determined by considering both views. The ground surface settlement with different overburdens is the technical perspective. In this study, the allowable surface settlement limit is considered 25 mm. If the ground surface settlement is more than the allowable limit, it cannot be technically suitable for tunnel excavation. Estimation of tunnel excavation costs and construction costs of metro stations along the second line of the

Tabriz subway from the economic perspective to optimize depth for subway tunnels. This research has been undertaken to identify and optimize depth for subway tunnel excavation considering technical and economic perspectives in the second line of the Tabriz subway as a case study. The second line of the Tabriz subway consists of a double-track tunnel having a length of 21 km and 20 underground stations. The ground of the second line of the Tabriz subway is classified in two modes: The first case is based on the type of ground, and the second case is based on the heights of overburdens in the tunnel route. In the first case, different layers of land along the tunnel route are classified into four general categories. In the second case, the tunnel overburdens are classified into five general categories along the tunnel route based on their heights. In this research, FLAC3D V6.00.69 software has been used. The amount of ground surface settlement has been investigated in 16 different models. Grounds with more settlement than the allowable depth limit cannot suit for tunnel excavation. Then, the tunnel excavation costs and construction costs of the metro stations along the second line of the Tabriz subway have been calculated. Next, the optimal depth is determined from the economic perspective. Depths, where the height of the tunnel overburden is less than the tunnel diameter, are technically more than the allowable settlement limit. It is not recommended that the tunnel is excavated in this ground. On the other hand, this study has shown that as the depth of the tunnel increases, the tunnel excavation costs initially decrease, and then, when the height of the tunnel overburden become smore than twice the tunnel diameter, the tunnel excavation costs increase. Moreover, as the tunnel overburden height increases, the construction costs of metro stations also increase. Investigations show that the construction costs of a one-story station are equal to 95 billion tomans while the construction costs of a four-story station are equal to 250 billion tomans. Therefore, the optimal depth for the construction of tunnels and stations is when the tunnel has the overburden height higher than the diameter of the tunnel but less than one and a half times the tunnel diameter.

Introduction

This research has been undertaken to identify and optimize the depth for subway tunnel excavation considering technical and economic perspectives in the second line of the Tabriz subway as a case study. The second line of the Tabriz subway consists of a double-track tunnel having a length of 21 km and 20 underground stations. The ground of the second line of the Tabriz subway is classified in two modes: The first case is based on the type of ground, and the second case is based on the amounts of overburdens in the tunnel route. In the first case, different layers of land along the tunnel route are classified into four general categories. In the second case, the tunnel overburdens are classified into five general categories along the tunnel route based on their heights. The criterion for this classification is that the tunnel overburden is in one classification if its height is less than the tunnel diameter. In exchange for increasing overburden height by the tunnel radius or diameter, they are placed in different classifications.

Methodology and Approaches

In this research, FLAC3D V6.00.69 software has been used. The amount of ground surface settlement has been investigated in 16 different models. Grounds that have more settlement than the allowable depth limit, cannot be suitable for tunnel excavation. Then, the tunnel excavation costs as well as construction costs of metro stations along the second line of the Tabriz subway have been calculated. Next, the optimal depth has been determined from the economic perspective.

Results and Conclusions

Depths, where the tunnel overburden height is less than the diameter of the tunnel, are technically more than the allowable settlement limit, and it is not recommended that the tunnel is excavated in the ground. On the other hand, investigations in this study have shown that as the depth of tunnel increases, the tunnel excavation costs initially decrease, and then, when the height of the tunnel overburden is more than twice the diameter of the tunnel, the tunnel excavation costs increase again. In addition, as the height of the tunnel overburden increases, the construction costs of metro stations increase. This study indicates that the optimal depth for the construction of tunnels and stations is when the tunnel has the overburden height higher than the diameter of the tunnel but less than one and a half times the diameter of the tunnel.
