

تعیین فاصله‌داری بهینه‌ی طاق‌های بتنی و برآورد نشست در ایستگاه‌های مترو مطالعه‌ی موردی: ایستگاه هفت تیر خط ۶ متروی تهران

حسین ریحانیان زواره^{۱*}؛ محمد فاروق حسینی^۲؛ علی‌رضا طالبی‌نژاد^۳

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ پردیس دانشکده‌های فنی؛ دانشگاه تهران

۲- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ پردیس دانشکده‌های فنی؛ دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی معدن؛ گرایش استخراج؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۷/۱۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

واژگان کلیدی	چکیده
ایستگاه‌های مترو پیش‌نگهداری طاق بتنی فاصله‌داری طاق بتنی نشست‌سنجی تحلیل پایداری خط ۶ متروی تهران	احداث خطوط مترو به عنوان یک نیاز اساسی شهرهای بزرگ و در حال توسعه مطرح است. از بین روش‌های احداث ایستگاه‌های زیرزمینی مترو، روش پیش‌نگهداری طاق بتنی، علاوه بر پایداری فضا، کاهش جابجایی‌های سطحی را به همراه دارد. برای طراحی بهینه‌ی طاق‌های بتنی، پارامتر فاصله‌داری که در حصول پایداری و مهار جابجایی‌های سطحی تأثیرگذار است، عمدتاً با استفاده از مدلسازی عددی تعیین می‌شود. هدف از این مقاله، ارائه‌ی روشی برای تعیین این پارامتر با استفاده از مدلسازی دوبعدی است. در این روش فاصله‌داری بهینه با معیارهای ساکورایی و تنش مجاز آیین‌نامه‌ی بتن ایران تعیین و سپس نشست حاصل از آن با دو روش عددی و تحلیلی- تجربی برآورد می‌شود. معیار کرامر نیز برای محاسبه‌ی مقادیر مجاز نشست بکار برده می‌شود. به عنوان نمونه، سازه‌ی نگهبان ایستگاه هفت تیر خط ۶ متروی تهران، با این روش طراحی و فاصله‌داری بهینه طاق‌های بتنی تونل‌های رکتیفایر، جنوبی و بخش‌های اول و دوم تونل شمالی ایستگاه، به ترتیب برابر ۳، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ متر محاسبه شده است.

۱- پیشگفتار

امروزه به دلیل گسترش شهرها و افزایش جمعیت شهری، نیاز بیش‌تری به وسایل حمل و نقل عمومی احساس می‌شود. در بین وسایل حمل و نقل عمومی، شبکه‌ی قطار شهری جایگاه ویژه‌ای دارد. احداث مترو به روش سطحی هزینه کمتری دارد؛ اما به دلیل افزایش تراکم سطحی، تردد خودروها و کمبود فضا، خطوط مترو بیش‌تر به صورت زیرزمینی ساخته می‌شوند. از طرفی به علت عمق کم، تونل‌ها و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو معمولاً در زمین‌های نرم (خاک‌های سست سطحی) احداث می‌شوند. بنابراین، اجرای بهینه و تامین ایمنی این‌گونه فضاهای زیرزمینی در

هنگام ساخت و پایداری دراز مدت آن‌ها از جمله عواملی است که باید توسط طراحان سازه‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر مشکلات مرتبط با پایداری سازه، پدیده‌ی نشست سطح زمین که در اثر احداث ایستگاه یا حفر تونل روی می‌دهد، یکی دیگر از مسایل مهمی است که توسط مهندسين، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش‌های احداث ایستگاه‌های مترو

ایستگاه‌های مترو بر اساس وضعیتی که نسبت به سطح دارند، به دو دسته‌ی ایستگاه‌های روزمینی و ایستگاه‌های زیرزمینی تقسیم‌بندی می‌شوند. در ایستگاه‌های روزمینی،

* تهران؛ خیابان کارگر شمالی؛ پس از بزرگراه جلال آل احمد؛ دانشگاه تهران؛ پردیس ۲ دانشکده‌های فنی؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ صندوق پستی: ۵۱۵-

شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۲۰۴۰۳-۸۸۰۲۱؛ رایانامه: h.reihanian@gmail.com

- کاهش جابجایی اولیه‌ی خاک در حین حفاری

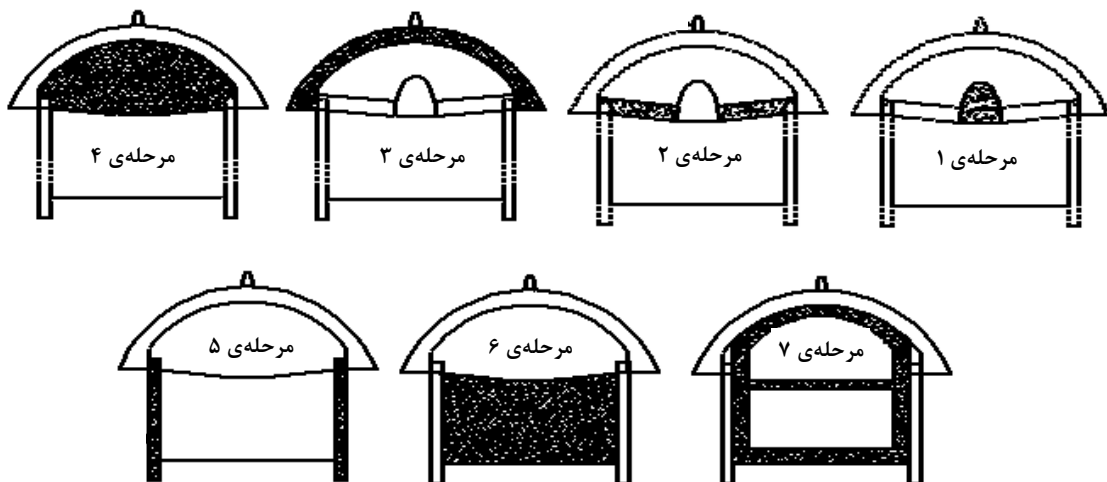
روش پیش‌نگهداری طاق بتنی با توجه به موقعیت شمع‌های نگهدارنده‌ی جوانب آن به دو روش اجرا می‌شود. در روش اول شمع دقیقاً در زیر پاشنه‌ی طاق بتنی قرار می‌گیرد و هم‌زمان با اجرای طاق بتنی احداث می‌شود. این روش عمومی‌ترین حالت اجرای طاق بتنی در احداث ایستگاه‌های مترو است. در روش دوم موقعیت شمع در دهانه‌ی داخلی طاق قرار دارد و پس از مرحله‌ی تعریض گالری دسترسی احداث می‌شود (شکل ۱). استفاده از روش اخیر در مورد ایستگاه‌هایی که روباره‌ی کم و خاک ریزشی دارند، امکان‌پذیر بوده و مزیت آن نسبت به روش اول، سهولت اجرا و مهار فشار جانبی خاک است.

به طور کلی در روش پیش‌نگهداری طاق بتنی، هندسه و فاصله‌داری طاق‌ها و به طبع آن جزییات سازه‌ای شمع و طاق‌ها، بایستی توسط طراح مشخص شود. هندسه‌ی طاق بتنی بر اساس سطح مقطع ایستگاه، جنس و مشخصات خاک و پایداری موقت گالری طاق بتنی پیش از تکمیل آن و در حین اجرا (صلاح‌دیدهای اجرایی) قابل طراحی است. فاصله‌ی بین طاق‌های بتنی نیز به عنوان فاکتوری مهم در مهار جابجایی‌های سطحی و تامین پایداری فضا، اغلب با استفاده از تحلیل‌های زمان‌بر سه بعدی انجام می‌شود.

تراز سطح ریل خط مترو نسبت به سطح زمین اختلاف ارتفاعی کمی دارد، بنابراین بر روی سطح زمین و با روش متداول ساختمان‌های سطحی احداث می‌شود. اما روش‌های معمول حفر زیرزمینی ایستگاه‌های مترو شامل روش کند و پوش (Cut and Cover) و روش حفر چندمرحله‌ای (Sequential Excavation Method) هستند [۱].

اجرای روش کند و پوش مستلزم اشغال موقت سطح زمین و جابجایی تجهیزات مراکز شهری است. بنابراین روش حفر چندمرحله‌ای فضا و پایدارسازی آن با سامانه‌ی نگهداری موقت، ترجیح داده می‌شود. استفاده از روش حفر چندمرحله‌ای در فضاهای شهری، مستلزم اجرای تمهیدات ویژه به منظور افزایش ضریب ایمنی و مهار جابجایی و نشست خاک است که با به کارگیری روش پیش‌نگهداری طاق بتنی (Concrete Pre-Arc Supporting System) حاصل می‌شود. در سیستم طاق بتنی پیش از حفر فضا، با ساخت یک سازه‌ی موقت بتن مسلح، پایداری موقت تونل تامین می‌شود. مزایای این روش عبارتند از [۲] و [۳]:

- ایجاد پدیده‌ی قوسی در اطراف بازشدگی و استفاده از ظرفیت باربری خاک
- کاهش تغییر شکل اطراف بازشدگی و پیشگیری از دست‌خوردگی محیط اطراف تونل



شکل ۱- مراحل اجرای یک ایستگاه با استفاده از طاق بتنی [۴]

که می‌توان پایداری تونل‌ها را بر اساس کرنش رخ داده در اطراف آن ارزیابی نمود. این کرنش به صورت نسبت واگرایی

۳- تحلیل پایداری بر اساس کرنش بحرانی (Sakurai) در سال ۱۹۸۳ میلادی پیشنهاد کرد

ناشی از حفاری تونل در زمین‌های نرم، توسط پک (Peck) در سال ۱۹۶۹ میلادی در کنفرانس مکانیک خاک و پی‌سازی مکزیکوسیتی ارائه شده است. پک اولین فردی بود که عقیده داشت، شکل منحنی توزیع نشست در سطح زمین و در بالای تونل را می‌توان توسط منحنی توزیع نرمال (منحنی گوس) و با استفاده از اندازه‌گیری‌های صحرائی برآورد نمود (گزاره‌ی (۶)) و [6].

$$S(x) = S_{max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (۶)$$

در عمل می‌توان محدوده‌ی عرض نشست را تا حدود $2.5i$ در نظر گرفت. پک همچنین پیشنهاد کرده است پارامتر i برابر نصف عمق تونل در نظر گرفته شود. بر اساس گزاره‌ی پک بیش‌ترین شیب منحنی نشست که در نقطه‌ی عطف منحنی رخ می‌دهد برابر با $0.606(S_{max}/i)$ است [7].

۵- برآورد بیشینه‌ی نشست

بوبت (Bobet) در سال ۲۰۰۱ میلادی برای بررسی نشست و تغییر شکل زمین در اثر حفر تونل، سه گزاره‌ی تحلیلی ارائه نموده است. این معادلات، برای تونل‌های کم‌عمق در زمین‌های خشک (گزاره‌ی (۷))، تونل‌های کم‌عمق در زمین‌های اشباع بدون اعمال هوای فشرده (گزاره‌ی (۸)) و تونل‌های کم‌عمق در زمین‌های اشباع با اعمال هوای فشرده (گزاره‌ی (۹))، ارائه شده است [۸]. پارامتر گپ می‌تواند از گزاره‌ی (۱۰) محاسبه شود. روش بوبت تنها میزان نشست بیشینه را در مقطع مورد نظر ارائه می‌دهد [۹].

$$\delta_{max} = -\frac{wr_0}{h} + \frac{1+v}{E} \left\{ \gamma r_0^2 \left[\frac{1}{8} \left(k - \frac{\vartheta}{1-\vartheta} \right) \times \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \frac{3-4\nu}{1-\nu} \ln h \right] + \left[\gamma h(1-k)r_0 \left[-2(1-\nu) \frac{r_0}{h} + \frac{1}{8}(9-4\nu) \left(\frac{r_0}{h} \right)^3 - \frac{1}{4} \left(\frac{r_0}{h} \right)^5 \right] \right] \right\} \quad (۷)$$

$$\delta_{max} = -\frac{wr_0}{h} + \frac{1+v}{E} \left\{ -\frac{1}{2} \gamma r_0 \ln h + \gamma_b h(1-k)r_0 \left[-\frac{r_0}{h} + \frac{3}{4} \left(\frac{r_0}{h} \right)^3 - \frac{1}{4} \left(\frac{r_0}{h} \right)^5 \right] \right\} \quad (۸)$$

$$\delta_{max} = -\frac{wr_0}{h} + \frac{1+v}{E} \left\{ -\frac{1}{2} [\gamma r_0 \ln h + \gamma_b h(3-k)r_0^2] + \gamma_b h(1-k)r_0 \left[\frac{3}{4} \left(\frac{r_0}{h} \right)^3 - \frac{1}{4} \left(\frac{r_0}{h} \right)^5 + \gamma_w h r_0 \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 \right] \right\} \quad (۹)$$

$$W = G_p + U_{3D} + \omega \quad (۱۰)$$

زمین به ساختمان‌های سطحی نیز تعیین شود. شیب منحنی نشست مهم‌ترین پارامتر در بررسی تاثیر نشست

تونل یا فضا به قطر آن تعریف می‌شود. بر اساس گزاره‌های کشسان تنش-کرنش موجود، کرنش بحرانی از گزاره‌ی (۱) محاسبه می‌شود [5].

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_c}{E} \quad (۱)$$

ساکورایی براساس مطالعات تجربی انجام گرفته بر روی تونل‌های مختلف، گزاره‌ی (۲) را به عنوان تراز هشدار خطر I ، گزاره‌ی (۳) را به عنوان تراز هشدار خطر II ، و گزاره‌ی (۴) را به عنوان تراز هشدار خطر III ، برای محاسبه‌ی کرنش بحرانی حالت فشاری پیشنهاد کرده است [5].

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log E - 0.85 \quad (۲)$$

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log E - 1.22 \quad (۳)$$

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log E - 1.59 \quad (۴)$$

در شرایط تراز هشدار خطر I تونل مشکل ناپایداری دارد. کرنش بحرانی حاصل از تراز هشدار خطر II به عنوان مبنای طراحی نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است و تراز هشدار خطر III پایداری کوتاه مدت را نشان می‌دهد [5].

با تعیین کرنش مجاز و استفاده از گزاره‌ی (۵) جایجایی مجاز تونل قابل محاسبه است. با مقایسه این مقدار با مقادیر به دست آمده از حل مدل عددی، می‌توان وضعیت پایداری مدل را مشخص نمود [۳].

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u_{cr}}{r} \quad (۵)$$

۴- تعیین شکل منحنی نشست

اولین گزارش مستند در مورد پیش‌بینی نشست سطح زمین

۶- تعیین مقدار مجاز نشست

برای تعیین مجاز نشست، باید صدمه‌ی وارده در اثر نشست

شکل ۲ نشان داده شده است. به علت وجود خیابان قائم‌مقام در بخش جنوب غربی و کوچه‌ی زیبا و خیابان شهروود در قسمت شمال غربی ایستگاه، این دو بخش به روش زیرزمینی و با استفاده از طاق بتنی، احداث می‌شوند. مطابق شکل ۳، سازه‌ی نگهبان بخش زیرزمینی به چهار مقطع مجزا تقسیم می‌شود:

- تونل رکتیفایر (حد فاصل محورهای ۱ تا ۱۸)
- تونل جنوبی (حد فاصل محورهای ۱۸ تا ۲۸)
- بخش اول تونل شمالی (حد فاصل محورهای ۵۳ تا ۶۰)
- بخش دوم تونل شمالی (حد فاصل محورهای ۶۰ تا ۸۳)

عرض ایستگاه در تونل جنوبی و هر دو بخش تونل شمالی برابر با ۱۷٫۲۰ متر و عرض تونل رکتیفایر برابر با ۲۰٫۷۰ متر است. به سبب ماهیت اجرایی روش پیش‌نگهداری طاق بتنی، در مقاطع با عرض ۱۷٫۲۰ متر، سطح مقطع طاق‌ها یکسان و با سطح مقطع طاق‌های تونل رکتیفایر متفاوت است. مقطع سازه‌ی موقت و اصلی مربوط به محدوده‌ی زیرزمینی ایستگاه هفت تیر در شکل ۳ نشان داده شده است.

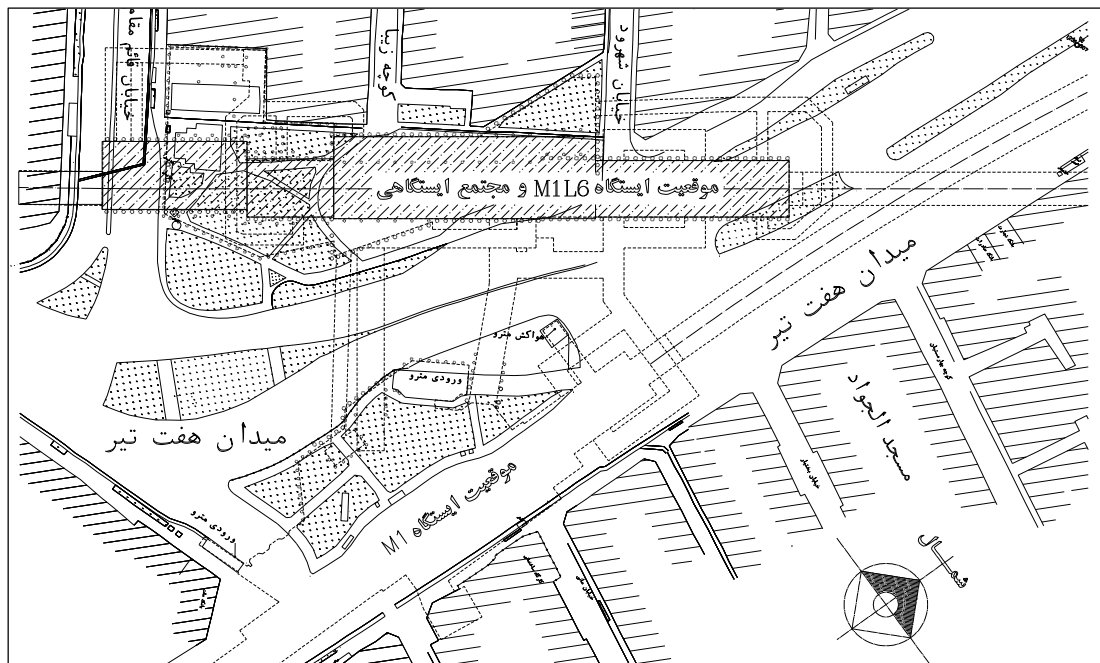
بر روی ساختمان‌ها و پل‌ها است. از جمله معیارهای مشهور در زمینه‌ی بررسی این تاثیرات معیار کرامر است. طبق این معیار پس از محاسبه‌ی شیب منحنی نشست می‌توان خطر آفرینی حفر تونل در منطقه‌ی مورد نظر را تعیین نمود (جدول ۱). با توجه به این معیار، بیشینه‌ی شیب منحنی برای سازه‌هایی چون پل ۱/۸۰۰ و برای سازه‌هایی چون ساختمان‌ها ۱/۹۰۰ است [۳].

جدول ۱- معیار کرامر در مورد تاثیر شیب منحنی نشست بر روی سازه‌های سطحی [۳]

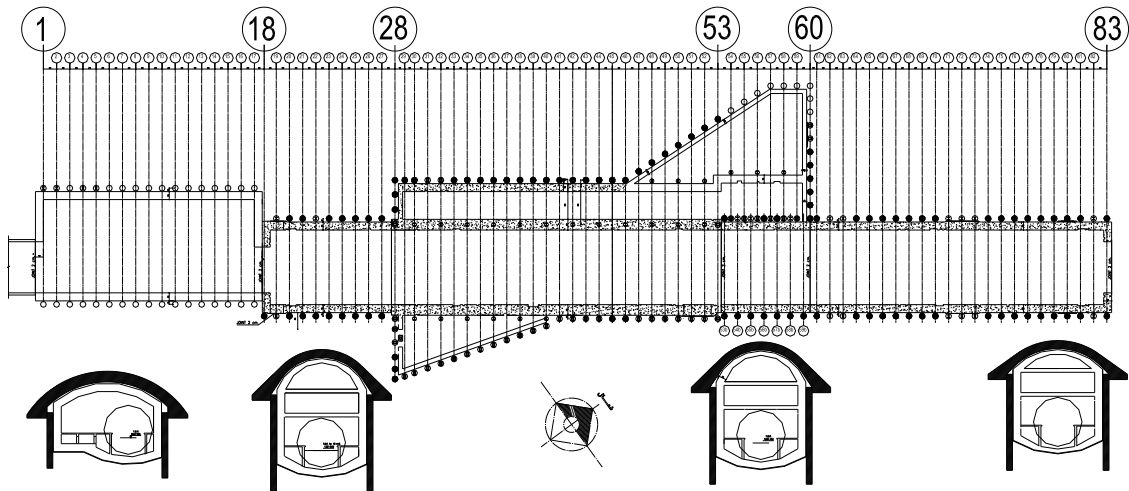
شیب منحنی نشست	خسارت مورد انتظار
بالاتر از $\frac{1}{1000}$	بدون خسارت
بین $\frac{1}{600}$ و $\frac{1}{1000}$	خسارت خیلی کم
بین $\frac{1}{400}$ و $\frac{1}{600}$	خسارت معماری کم
بین $\frac{1}{300}$ و $\frac{1}{400}$	خسارت معماری متوسط

۷- معرفی ایستگاه هفت تیر

ایستگاه هفت تیر خط ۶ متروی تهران (MIL6) در ضلع جنوب غربی میدان هفت تیر واقع شده است. موقعیت این ایستگاه در محل تلاقی خطوط ۱ و ۶ متروی تهران، در



شکل ۲- موقعیت ایستگاه تقاطعی هفت تیر [۴]



شکل ۳- پلان و مقاطع سازه‌ی اصلی و موقت بخش زیرزمینی ایستگاه هفت تیر [۴]

سه‌بعدی نیز استفاده نمود. محاسبه‌ی فاصله‌داری بهینه بر اساس روش زیر قابل انجام است.

ابتدا مدل عددی از بحرانی‌ترین مقطع ایستگاه در هر بخش ساخته و برای فاصله‌داری‌های مختلف طاق بتنی اجرا می‌شود. سپس نتایج حاصل از اجرای مدل‌های عددی با مقادیر مجاز معیار تحلیل پایداری مقایسه می‌شود. براساس نتایج این مقایسه، فاصله‌داری بهینه قابل تعیین خواهد بود. در مورد ایستگاه هفت تیر از تحلیل کرنش بحرانی بر اساس معیار ساکورایی برای بررسی پایداری فضا و نیز آیین‌نامه‌ی بتن ایران به منظور بررسی قابلیت طراحی سازه نگهبان استفاده می‌شود.

فواصلی بین طاق‌های بتنی قابل اجرا است که علاوه بر پایداری، به تاسیسات شهری خسارات جدی وارد نسازد. بنابراین، مقادیر جابجایی سطحی با روش عددی محاسبه و با مقادیر مجاز نشست معیار کرامر مقایسه می‌شود. در صورتی که جابجایی سطحی حاصل از فواصل محاسبه شده، از نظر معیار کرامر در محدوده‌ی مجاز قرار نداشته باشد، فاصله‌داری‌های کم‌تری باید در نظر گرفته شود.

۹- توصیف مدل عددی

ابعاد مدل برای تمامی مقاطع به طول ۱۷۴ متر و ارتفاع ۹۰ متر در نظر گرفته شده است. برای افزایش دقت نتایج، ابعاد شبکه‌ی داخلی به طول ۶۰ متر و ارتفاع ۴۵ متر، ۰/۵ در ۰/۵ متر و سایر مدل با ابعاد حداقل ۱ در ۱ متر در نظر گرفته

مشخصات ژئوتکنیکی خاک محدوده‌ی ایستگاه در جدول ۲ ارایه شده است. عمق ۲ تا ۴ متر اول ایستگاه، خاک دستی است و ایستگاه در بالای تراز آب زیرزمینی قرار دارد. خصوصیات مواد موجود در سامانه‌ی نگهداری موقت ایستگاه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی خاک ساختگاه ایستگاه [۴]

لایه	نسبت پوآسون	مدول کشسانی MPa	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی kPa
خاک	۰٫۳۵	۱۰۰	۳۸	۳۰
خاک دستی	۰٫۳	۱۵ تا ۴۰	۲۷ تا ۳۰	۰-۱۰

جدول ۳- خصوصیات مواد سازه‌ی نگهبان ایستگاه

ماده	نسبت پوآسون	مدول کشسانی MPa	وزن مخصوص kg/m ³
تیر فلزی	۰٫۳	۲۰۰	۷۸۵۰
تیر بتنی	۰٫۳	۳۵	۲۳۰۰

۸- روش طراحی

طراحی پارامترهای طاق بتنی با مدلسازی دو بعدی از نظر سرعت انجام کار نسبت به مدلسازی سه‌بعدی ارجحیت بیشتری دارد. از این روش علاوه بر طراحی نهایی سازه‌ی موقت یک ایستگاه، می‌توان برای کاهش تعداد مدل‌های

با توجه به روش احداث سامانه‌ی نگهداری طاق بتنی ایستگاه هفت تیر، مدل عددی متناظر آن در ۵ مرحله شامل تعادل اولیه‌ی مدل، حفاری و اجرای طاق بتنی (شکل ۵-الف)، حفاری سطح زیر طاق (شکل ۵-ب)، حفاری و احداث شمع‌ها (شکل ۵-ج) و حفاری تمام مقطع (شکل ۵-د) ساخته و اجرا می‌شود. برای محاسبه‌ی پارامترهای معادل مدول کشسانی و وزن مخصوص، مشابه روش $FLAC^{3D}$ از میانگین‌گیری وزن‌دار، نسبت به سطح مقطع بتن و خاک استفاده می‌شود (شکل ۶) و گزاره‌ی (۱۱).

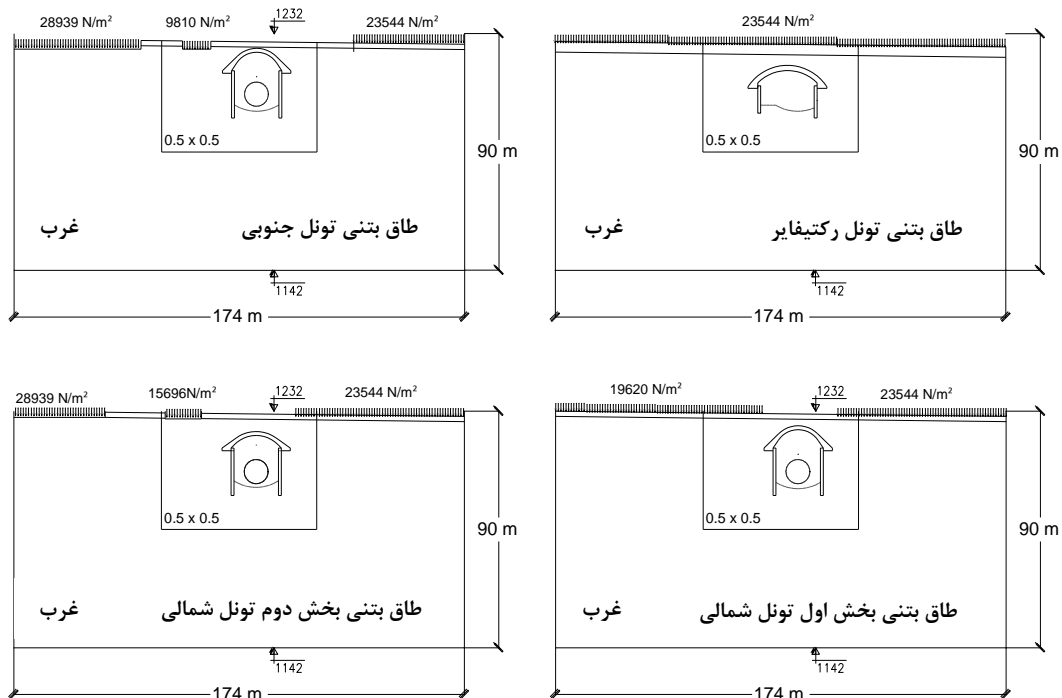
$$E_{eq} = \frac{A}{A+A'} E + \frac{A'}{A+A'} E' \quad (11)$$

در پایداری طاق‌های بتنی، انتخاب فاصله، امری مهم است. با توجه به تجربیات موجود در روش طاق بتنی برای احداث ایستگاه‌های مترو، رعایت حداقل ۰٫۵ متر فاصله‌ی بین دو طاق بتنی (معادل فاصله‌داری ۱٫۵ متر در طاق‌های به عرض ۱ متر این ایستگاه) الزامی است و فاصله‌ی بیش از ۲٫۵ متر، در عمل ناپایداری خاک میان آن‌ها را در هنگام حفاری خاک زیر طاق بتنی به همراه خواهد داشت. عرض طاق‌های بتنی ایستگاه ۱ متر است؛ بنابراین انتخاب اولیه در مدل‌سازی، فاصله‌داری‌های ۱٫۵، ۲٫۵ و ۳٫۵ متر خواهد بود.

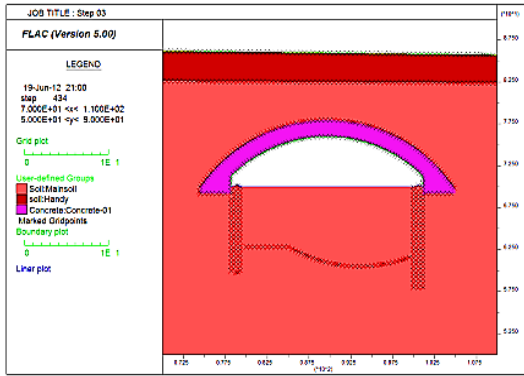
می‌شود. ۲ تا ۴ متر اول مدل‌ها (بسته به موقعیت آن‌ها) خاک دستی و بقیه‌ی آن با استفاده از مشخصات خاک اصلی مدل می‌شود. مدل رفتاری خاک دستی و خاک اصلی ساختمان، مطابق معیار موه‌رکولمب و اجزای سامانه‌ی نگهداری کشسان در نظر گرفته شده است.

شیب سطح زمین در محدوده‌ی ایستگاه از نقشه‌ی توپوگرافی منطقه برداشت شده و موقعیت قرارگیری هر مقطع با ثابت در نظر گرفتن مختصات تونل اصلی در تمامی مدل‌ها تعیین شده است. همچنین در ساخت مدل، علاوه بر اعمال بار گسترده ناشی از وزن ساختمان‌ها، عمق محل اعمال آن در نظر گرفته شده است.

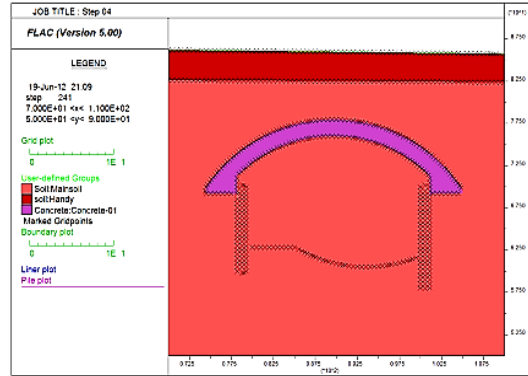
در ساخت مدل، هندسه‌ی طاق بتنی، شمع‌ها و سطح حفاری در برنامه‌ی $FLAC$ ، دقیقاً مشابه مقطع $AutoCAD$ آن (شکل ۴) ترسیم شده است. با وجود زمان‌بر بودن انتقال دقیق شکل هندسی از این طریق، برای افزایش دقت مدل این کار برای تمامی مقاطع انجام گرفته است. برای مدل‌سازی شمع‌ها از المان ساختاری شمع ($PILE$) در $FLAC$ استفاده شده است. با توجه به اینکه تمامی نقاط مربوط به شمع‌ها باید به المان‌های خاک متصل باشند، از بخش برنامه‌نویسی $FLAC$ ($FISH$) استفاده شده است.



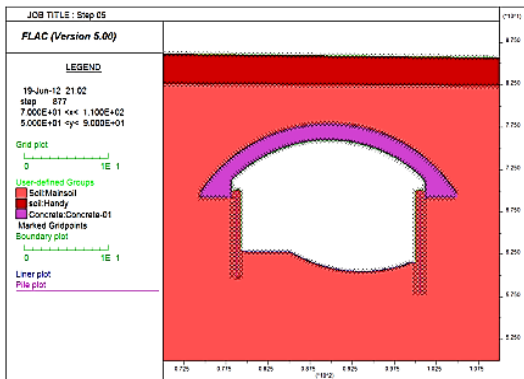
شکل ۴- مقطع مدل عددی طاق‌های بتنی ایستگاه



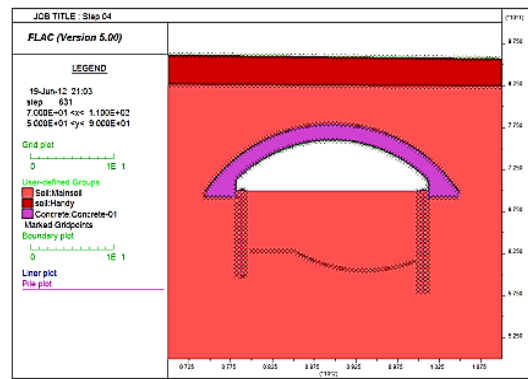
ب- حفاری سطح زیر طاق بتنی



الف- حفاری و اجرای طاق بتنی

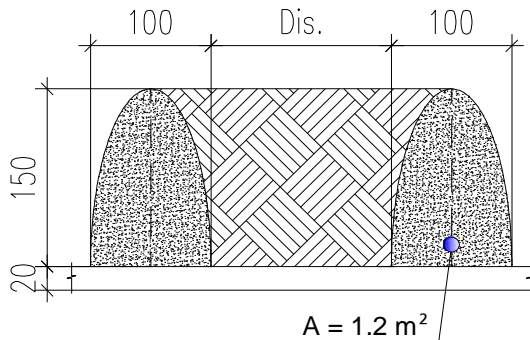


د- حفاری تمام مقطع

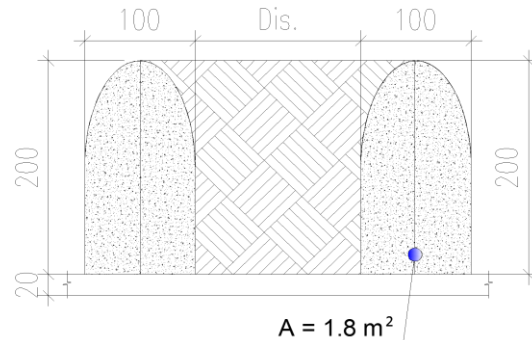


ج- حفاری و احداث شمع‌ها

شکل ۵- مراحل مدلسازی طاق بتنی ایستگاه



ب- تونل جنوبی و دو بخش تونل شمالی



الف- تونل رکتیفایر

شکل ۶- محاسبه‌ی نسبت سطح بتن طاق بتنی

حاصل از مدلسازی عددی برای فاصله‌داری‌های انتخابی با مقادیر مجاز آن بر اساس معیار ساکورایی مقایسه شده است. با توجه به جدول ۴ تمامی فاصله‌داری‌های طاق‌های بتنی از این نظر قابل قبول هستند. در تمامی جدول‌ها و نمودارها از علامت‌های قراردادی *FLAC* (تنش کششی: مثبت و جهت

۱۰- اجرای ایستگاه به روش طاق بتنی در این بخش لازم است نتایج مدل‌های عددی مقاطع مختلف بخش زیرزمینی ایستگاه، که با فاصله‌داری‌های متفاوت سامانه‌ی نگهداری ساخته و اجرا شده‌اند، برای انتخاب بهینه بررسی شوند. در جدول ۴، جابجایی‌های

تعریض گالری دسترسی، فاصله‌داری‌های بیش از ۲/۵ متر برای این بخش مخاطره‌آمیز است. بنابراین فاصله‌داری بهینه برابر با ۲/۵ متر است.

جدول ۴- تحلیل پایداری سازه‌ی موقت با معیار ساکورایی

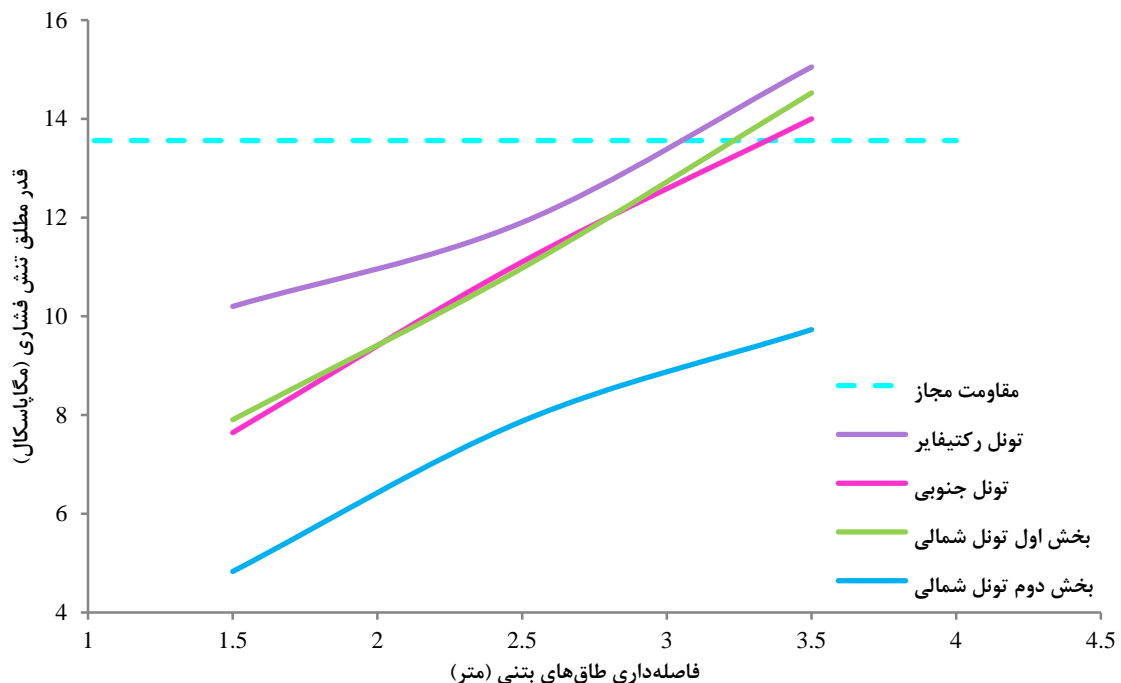
موقعیت تونل	تراز هشدار خطر	بیش‌ترین جابجایی تاج (cm) برای فاصله‌داری		
		۱/۵ m	۲/۵ m	۳/۵ m
رکتیفایر		-۴۹۷	-۵۲۹	-۵۵۶
جنوبی		+۲۶۵	+۴۳۵	+۶۲۳
بخش اول شمالی		-۶۶۲	-۴۴۸	-۵۶
بخش دوم شمالی		-۲۵	-۲۳۷	-۲۴۷

جدول ۵- مقایسه‌ی مقادیر تنش فشاری با مقادیر مجاز

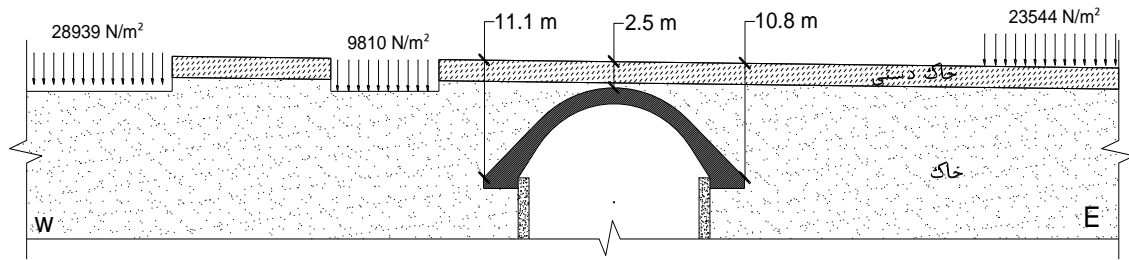
تنش مجاز فشاری (MPa)	بیش‌ترین تنش فشاری (MPa)				فاصله‌داری طاق‌های بتنی
	بخش اول شمالی	بخش دوم شمالی	جنوبی	رکتیفایر	
۱۰	-۷۹۱	-۴۸۳	-۷۶۴	-۱۰۲۰	۱/۵ متر
۱۱	-۱۰۹۸	-۷۸۸	-۱۱۱۰	-۱۱۹۰	۲/۵ متر
۱۲	-۱۴۵۳	-۹۷۳	-۱۴۰۱	-۱۵۰۵	۳/۵ متر

مثبت محور قایم به سمت بالا) پیروی شده است. علاوه بر تایید معیار ساکورایی، طاق بتنی باید از لحاظ سازه‌ای نیز قابل طراحی باشد. بر اساس آیین‌نامه بتن ایران تنش فشاری در بتن نباید از ۶۰ درصد مقاومت فشاری آن بیش‌تر باشد. به این منظور تنش فشاری بیشینه‌ی طاق‌های بتنی در هر سه فاصله‌داری در جدول ۵ با مقدار مربوط به تنش تراکمی مجاز بتن (۱۳/۵۶ مگاپاسکال) مقایسه شده است. با توجه به جدول ۵، فاصله‌داری ۳/۵ متری طاق‌های بتنی تونل‌های رکتیفایر، جنوبی و بخش اول تونل شمالی غیر قابل قبول است. در بخش دوم تونل شمالی با وجود اینکه فاصله‌داری بیش از ۳/۵ متری از نظر آیین‌نامه مجاز است، اما به سبب ناپایداری خاک، بیش‌ترین فاصله‌داری قابل قبول این بخش ۳/۵ متر خواهد بود.

با ترسیم منحنی تنش فشاری طاق بتنی نسبت به فاصله‌داری طاق‌ها (شکل ۷) مشخص می‌شود، فاصله‌داری بهینه برای اطمینان از پایداری فضای زیر طاق بتنی تونل رکتیفایر، تونل جنوبی و بخش اول تونل شمالی، ۳ متر است. با این وجود، مطابق شکل ۸، به علت روبراه‌ی کم و نیز فاصله‌ی کم طاق‌های بتنی تالایه‌ی خاک دستی و در نتیجه ناپایداری و ریزش خاک بین دو طاق بتنی در مرحله‌ی



شکل ۷- مقایسه‌ی مقادیر تنش فشاری با مقاومت مجاز در فاصله‌داری‌های مختلف



شکل ۸- عمق روباره و موقعیت تونل جنوبی نسبت به بارهای سطحی

گزاره‌ی (۱۰) ناچیز است. بنابراین مقدار W برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در گزاره‌ی (۷)، اثر بار وارد بر سطح در نظر گرفته نشده است و برای اعمال آن، بار سطحی با وزن روباره‌ی خاک معادل آن جایگزین شده است. بیشینه‌ی شیب منحنی نشست با استفاده از روابط تجربی پک و مقدار خسارت پیش‌بینی شده‌ی معیار کرامر (جدول ۱) برای بخش تونلی ایستگاه در جدول ۶ ارائه شده است. در جدول ۶ تمامی کمیت‌ها مطابق گزاره‌ی (۷) هستند.

۱۱- برآورد نشست روش تحلیلی-تجربی

در این بخش مقدار بیشینه‌ی نشست از گزاره‌ی تحلیلی بوبت و بیشینه‌ی شیب منحنی نشست از گزاره‌ی تجربی پک محاسبه می‌شود. از آنجایی که ایستگاه هفت تیر کم عمق و خشک است، از گزاره‌ی (۷) برای تعیین نشست بیشینه استفاده می‌شود. به سبب حفر مقطع تونل پس از نصب سامانه‌ی نگهداری (طاق بتنی و شمع) تاثیرات گپ فیزیکی، تغییر شکل، کیفیت مهارت کارکنان در نشست سطحی

جدول ۶- برآورد میزان خسارت در نقاط عطف منحنی نشست

موقعیت	h (m)	r_0 (m)	$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$	w	δ_{max} (cm)	i (m)=0.5h	بیشینه‌ی شیب منحنی نشست (%)	برآورد خسارت (معیار کرامر)
تونل رکتیفایر	۱۹٫۳	۱۷	۰٫۳	۰	-۳٫۴۰	۹٫۶۵	۰٫۲۱۳	معماری کم
تونل جنوبی	۱۶٫۲	۱۹٫۸	۰٫۳۲	۰	+ ۱٫۲۰	۸٫۱	۰٫۰۸۹	ندارد
بخش اول تونل شمالی	۱۷٫۶	۱۹٫۸	۰٫۱۹	۰	-۰٫۰۶	۸٫۸	۰٫۰۰۴	ندارد
بخش دوم تونل شمالی	۱۸٫۴	۱۸٫۵	۰٫۲۰	۰	-۲٫۰۳	۹٫۲	۰٫۱۳۴	خیلی کم

نقاط عطف (۹٫۲۰ متری طرفین تونل شمالی) می‌تواند مشکلاتی برای سازه‌های سطحی به همراه داشته باشد؛ اما در محدوده‌ی دارای سازه‌های سطحی، در محدوده‌ی مجاز قرار می‌گیرد. بنابراین در بخش دوم تونل شمالی نیز نشست سطح زمین مشکل‌ساز نخواهد بود.

$$\left| \frac{ds}{dx} \right| = \left| \frac{x \cdot s_{max}}{i^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \right| \quad (12)$$

$$= \left| \frac{20 \times 2.03}{9.2^2} \cdot \exp\left(-\frac{20^2}{2 \times 9.2^2}\right) \right| = 0.045\%$$

۱۲- برآورد و ارزیابی نشست مدل عددی

در این بخش، با استفاده از مدل‌های عددی مربوط به فاصله‌داری انتخابی طاق‌های بتنی، بیشینه‌ی شیب سطح زمین در مجاورت عارضه‌های سطحی تعیین می‌شود (جدول

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی شیب سطح زمین در تونل جنوبی و بخش اول تونل شمالی در محدوده‌ی مجاز قرار دارد. تونل رکتیفایر از زیر خیابان قائم‌مقام می‌گذرد و سازه‌ی سطحی در محل احداث آن وجود ندارد. بنابراین نشست سطحی در این محل نیز مشکل‌ساز نخواهد بود. در بخش دوم تونل شمالی نیز در فاصله‌ی ۲۰ متری از طرفین مرکز تونل، ساختمان یا تاسیساتی وجود ندارد. بنابراین بیشینه‌ی شیب منحنی نشست پک در خارج این بازه کمتر از مقدار جدول ۶ خواهد بود. مقدار این شیب با مشتق‌گیری از گزاره‌ی (۶) به ازای طول ۲۰ متر محاسبه می‌شود (گزاره‌ی (۱۲)).

مقایسه‌ی مقدار شیب گزاره‌ی (۱۲) با مقادیر مجاز معیار کرامر نشان می‌دهد، اگرچه شیب منحنی نشست در

تعیین فاصله‌داری بهینه‌ی طاق‌های بتنی و برآورد نشست در ایستگاه‌های مترو، مطالعه‌ی موردی: ایستگاه ۷ تیر متروی تهران: ص ۱۲۱-۱۳۲

خروجی نرم‌افزار *FLAC* با *Excel* بازخوانی و به کمک داده‌های حاصل، بیشینه‌ی شیب تخمین زده شده است. سپس این مقادیر با معیار کرامر سنجیده می‌شوند. با توجه به جدول ۷، جدول ۸، جدول ۹ و جدول ۱۰، مشاهده می‌شود، علی‌رغم احداث بخش تونلی ایستگاه، نشست زمین در مجاورت ساختمان‌های مسکونی و تجاری در محدوده‌ی مجاز قرار دارد.

۷، جدول ۸، جدول ۹ و جدول ۱۰). در این جدول‌ها محدوده‌ی قرارگیری عارضه‌های سطحی با استفاده از جانمایی موقعیت مقاطع در نقشه‌های موجود به دقت تعیین و با ذکر محدوده‌ی فاصله‌ی آن‌ها از مرکز تونل مشخص شده است. با انطباق موقعیت هر عارضه‌ی سطحی با منحنی نشست حاصل از مدل عددی، بیشینه‌ی شیب منحنی نشست در محدوده‌ی آن به دست آمده است. به این منظور،

جدول ۷- ارزیابی نشست سطحی ناشی از تونل رکتیفایر با فاصله‌داری ۳ متر طاق بتنی

عنوان		بخش شرقی		بخش میانی		بخش غربی	
محدوده (فاصله از مرکز تونل به متر)		۸۱	۲۴	۹	-۲۱	-۳۶	-۹۳
عارضه‌ی سطح زمین		خیابان قائم‌مقام					
بیش‌ترین شیب منحنی نشست (درصد)		۰٫۰۰۹	۰٫۲۰۴	۰٫۱۹۳	۰٫۱۸۲	۰٫۰۱۷	
برآورد خسارت معماری (معیار کرامر)		ندارد	کم	کم	خیلی کم	ندارد	

جدول ۸- ارزیابی نشست سطحی ناشی از تونل جنوبی با فاصله‌داری ۲٫۵ متر طاق بتنی

عنوان		بخش شرقی		بخش میانی		بخش غربی	
محدوده (فاصله از مرکز تونل به متر)		۸۷	۳۸	-۱۶	-۲۸	-۴۴	-۹۳
عارضه‌ی سطح زمین		خیابان مفتح	فضای سبز	ساختمان	فضای باز	ساختمان	
بیش‌ترین شیب منحنی نشست (درصد)		۰٫۰۱۹	۰٫۰۸۴	۰٫۰۸۲	۰٫۰۵۲	۰٫۰۲۳	
برآورد خسارت معماری (معیار کرامر)		ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	

جدول ۹- ارزیابی نشست سطحی ناشی از بخش اول تونل شمالی با فاصله‌داری ۳ متر طاق بتنی

عنوان		بخش شرقی		بخش میانی		بخش غربی	
محدوده (فاصله از مرکز تونل به متر)		۸۱	۱۶		-۱۳	-۹۳	
عارضه‌ی سطح زمین		خیابان مفتح	فضای سبز	کوچه شهرو			
بیش‌ترین شیب منحنی نشست (درصد)		۰٫۰۶۳	۰٫۰۸۹	۰٫۰۲۱			
برآورد خسارت معماری (معیار کرامر)		ندارد	ندارد	ندارد			

جدول ۱۰- ارزیابی نشست سطحی ناشی از بخش دوم تونل شمالی با فاصله‌داری ۳٫۵ متر طاق بتنی

عنوان		بخش شرقی		بخش میانی		بخش غربی	
محدوده (فاصله از مرکز تونل به متر)		۸۱	۱۶	-۲۱	-۳۵	-۵۸	-۹۳
عارضه‌ی سطح زمین		خیابان مفتح	فضای سبز	ساختمان	فضای باز	ساختمان	
بیش‌ترین شیب منحنی نشست (درصد)		۰٫۰۸۱	۰٫۱۶۴	۰٫۰۵۳	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۰	
برآورد خسارت معماری (معیار کرامر)		ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد	

معیارهای پایداری و تنش مجاز، روشی برای تعیین فاصله‌داری بهینه‌ی طاق‌های بتنی در روش پیش‌نگهداری

۱۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از کنترل نتایج مدلسازی عددی با

- طاق بتنی ارایه شد. در نهایت نحوه‌ی مهار تاثیر احداث فضا بر سازه‌های سطحی با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی-تجربی معرفی شد. اجرای سازه‌ی موقت بخش تونلی ایستگاه هفت تیر، مطابق جزییات زیر پیشنهاد می‌شود:
- تونل رکتیفایر: فاصله‌داری ۳ متری طاق‌های بتنی، بهینه‌ترین انتخاب خواهد بود.
- تونل جنوبی: فاصله‌داری ۲/۵ متری طاق‌های بتنی، بهینه‌ترین انتخاب خواهد بود.
- بخش اول تونل شمالی: فاصله‌داری ۳ متری طاق‌های بتنی، بهینه‌ترین انتخاب خواهد بود.
- بخش دوم تونل شمالی: فاصله‌داری ۳/۵ متری طاق‌های بتنی، بهینه‌ترین انتخاب خواهد بود.

۱۴- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
σ_c	$kg.F/cm^2$	مقاومت فشاری تک‌محوره	W	-	پارامتر گپ فیزیکی
E_{eq}	$kg.F/cm^2$	مدول کشسانی معادل	ϑ	-	ضریب پواسون
E	$kg.F/cm^2$	مدول کشسانی بتن	A	m^2	سطح مقطع بتن
E'	$kg.F/cm^2$	مدول کشسانی خاک میان دو طاق	A'	m^2	سطح مقطع خاک میان دو طاق
ε_{cr}	%	کرنش بحرانی فشاری	γ	kg/m^3	وزن مخصوص خاک
u_{cr}	m	جابجایی بحرانی	γ_b	kg/m^3	وزن مخصوص غوطه‌ور خاک
i	m	عرض گودی نشست	γ_w	kg/m^3	وزن مخصوص آب
x	m	فاصله از خط مرکزی تونل	h	m	عمق تونل
$S(x)$	m	نشست در فاصله‌ی x	r_0	m	شعاع تونل
S_{max}	m	نشست خط مرکزی تونل	k	m	نسبت تنش افقی به قائم
G_p	m	گپ فیزیکی: معرف فاصله‌ی هندسی بین پوسته‌ی خارجی سپر و آسترکاری			
U_{3D}	m	تغییر شکل کشسان- مومسان سه‌بعدی در جبهه‌کار تونل			
ω	-	فاکتور کیفیت مهارت کارکنان			

۱۵- منبع‌ها

- [۱] باقری‌نیا، خ. (۱۳۸۸). روش‌های اجرایی در پروژه‌ی قطار شهری اهواز. *فصلنامه‌ی کمیون، شماره‌ی ۴۳*.
- [2] Sadaghiani, M. H., & Taheri, S. R. (2008). Numerical Investigations for Stability Analysis of a Large Underground Station of Tehran Metro. *World Tunnel Congress: Underground Facilities for Better Environment and Safety* (pp. 492-499). India: Central Board of Irrigation & Power.
- [۳] موسوی، م.، طالبی‌نژاد، ع.، و چاکری، ح. (۱۳۸۸). تحلیل پایداری و مدلسازی سه‌بعدی تونل و ایستگاه- مطالعه‌ی موردی: خط ۴ مترو تهران. هشتمین کنفرانس تونل. تهران: دانشگاه تربیت مدرس. http://www.civilica.com/Paper-ITC08-ITC08_069.html.
- [۴] مهندسین مشاور مونیته. (۱۳۸۷). *نقشه‌های سازه ابلاغی مشاور جهت ایستگاه هفت تیر، خط شش متروی تهران*.
- [5] Lilly, P., & Li, J. (2000). Estimating Excavation Reliability from Displacement Modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(8), 1261-1265. [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00053-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00053-8).
- [6] Peck, R. (1969). Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground. *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation* (pp. 225-242). Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica.

تعیین فاصله‌داری بهینه‌ی طاق‌های بتنی و برآورد نشست در ایستگاه‌های مترو، مطالعه‌ی موردی: ایستگاه ۷ تیر متروی تهران: ص ۱۲۱-۱۳۲

[7] Ghiasi, V., Omar, H., Yusoff, Z. B. Md., Huat, B. K., Muniandy, R., Ghosni, N., Nushini, A., Afshar, M. A., Ghiasi, S., Hosaini, S. G., & Ghiasi, M. (2010). Design Criteria of Subway Tunnels. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(12), 5894-5907. <http://www.ajbasweb.com/ajbas/2010/5894-5907.pdf>.

[۸] عباسی، ر.، و حسینی، م. (۱۳۹۰). تحلیل نشست ناشی از حفاری تونل خط یک متروی تبریز به کمک روش‌های تحلیلی. پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. تهران: دانشگاه تربیت معلم. http://www.civilica.com/Paper-SGSI15-SGSI15_210.html

[۹] شمسی، غ. (۱۳۷۴). تحلیل پایداری شیروانی GM2 با استفاده از روش‌های عددی. تهران: دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Determination of Optimal Concrete Arc Spacing and Assessment of the Related Subsidence in Metro Stations- A Case Study: Haft-e-Tir Station of Line 6 of Tehran Metro

H. Reihanian Zavareh¹; M. Farouq Hosseini²; A. R. Talebi Nejad³

1- M.Sc. in Rock Mechanics; School of Mining Engineering; College of Engineering; University of Tehran

2- Associate Professor; School of Mining Engineering; College of Engineering; University of Tehran

3- PhD Candidate in Mining Engineering; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

Received: 09 Oct 2012; Accepted: 25 Aug 2013

Keywords

Metro stations
Concrete arc pre-supporting (CAPS)
Concrete arc spacing
Subsidence assessment
Stability analysis
Line 6 of Tehran Metro

Extended Abstract

Development of subway systems is considered as an essential need in urban areas. Each line of a subway contains tunnels, stations and mid tunnel ventilation shafts. Concrete Arc Pre-Supporting (CAPS) system and Sequential Excavation, are known as standard methods for the construction of underground stations. When the process is underway, it is necessary to protect surface and underground structures from Subsidence

hazards. In this paper, stability analysis and settlement evaluation of Haft-e-Tir Station of Tehran metro line No. 6 have been considered. Geotechnical investigations have shown that the main subsurface layer has been formed of a very dense soil.

Introduction

CAPS is an executive construction method. In addition to tunnel stability, reduction of surface displacement can be made by CAPS. Numerical simulation has been deemed as a special procedure for evaluation and analysis of settlements. The optimal spacing for concrete arch is an important parameter for the success of the method that is usually determined by 3D modeling. However, 2D modeling methods can be faster to reach an optimal result.

Methodology and Approaches

The optimal spacing for concrete arch of Haft-e-Tir Station has been determined using Sakurai's critical strain approach and allowable by-law stresses. The surface subsidence has been estimated by two methods namely analytical-empirical and numerical modeling methods. The numerical finite difference method (used in FLAC^{2D} software) has been applied in this research. Analytical Bobet relations have also been used for calculating maximum subsidence. Maximum slope of subsidence curve has been calculated by Peck empirical relations. Kramer criterion has also been used to control the maximum slope of the subsidence curve in both methods.

Results and Conclusions

It is demonstrated that the optimal spacing of concrete arch for Rectifier tunnel, South tunnel, and sections I and II of North tunnel in the Haft-e-Tir Station are 3, 2.5, 3, and 3.5 meters, respectively.