

مقایسه پایداری تونل‌های دوتایی و منفرد خطوط ۱ و ۲ مترو تبریز با مدل‌سازی سه بعدی عددی

صابر اکبری^{۱*}، شکراله زارع^۲، حسین میرزایی^۳

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت ۱۳۹۴/۰۲/۲۸، پذیرش ۱۳۹۴/۰۷/۰۶)

چکیده

با گسترش روز افزون محیط‌های شهری ایجاد و توسعه سیستم‌های حمل و نقل درون شهری مانند مترو امری ضروری است. با توجه به اینکه بخش مهمی از هزینه ساخت مترو مربوط به حفاری و نگهداری تونل‌ها می‌شود، بنابراین یکی از ابتدایی‌ترین تصمیم‌گیری‌ها در بحث ساخت مترو، تصمیم‌گیری راجع به انتخاب تونل‌های منفرد یا دوتایی است. در صورت انتخاب تونل تکی مقطع تونل به منظور تعبیه هردو مسیر رفت و برگشت در داخل یک تونل، باید به حد کافی بزرگ انتخاب شود، در حالی که با استفاده از تونل‌های دوقلو، با توجه به ساخت تونل‌های مجزا برای مسیر رفت و برگشت، اندازه مقطع مورد نیاز برای هر تونل کاهش می‌یابد. هدف از این مقاله استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی عددی تونل‌های دوقلوی خط ۱ و تونل تکی خط ۲ مترو تبریز برای بررسی نقاط ضعف و قوت استفاده از تونل‌های دوقلو و تونل تکی با توجه به معیارهای فنی مختلف شامل پایداری در حین حفاری تونل‌ها، نشست سطح زمین و تاثیر بر سازه‌های سطحی و همچنین ضرایب ایمنی مطابق با نیروها و ممان‌های اعمال شده بر پوشش بتنی تونل‌ها، در محیط شهری است. در این تحقیق از روش عددی تفاضل محدود (نرم‌افزار Flac 3D) برای مدل‌سازی تونل‌های هر دو خط استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که از نظر میزان جابه‌جایی‌های نسبی دیواره تونل در حین حفاری، استفاده از تونل تکی ارجحیت دارد. از دیدگاه کنترل نشست و همچنین از نظر نیروها و ممان‌های ایجاد شده روی پوشش بتنی و ضرایب ایمنی مربوطه، استفاده از تونل‌های دوقلو مناسب‌تر است.

کلمات کلیدی

مدل‌سازی عددی سه‌بعدی، تاثیر متقابل تونل‌ها، نشست سطح زمین، پایداری حفاری، ضریب ایمنی پوشش بتنی.

۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی به دلیل افزایش تراکم سازه‌های سطحی و تردد خودروها و کمبود فضای لازم با توجه به گسترش شهرها، جزو لاینفک پروژه‌های شهری‌اند. از جمله فضاهای زیرزمینی که در شهرها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، تونل‌های مترو هستند. ساخت این گونه تونل‌ها باید بدون هیچ گونه خسارتی به سازه‌های روسطحی و زیرسطحی انجام گیرد. بنابراین، بررسی جنبه‌های مختلف تأثیرات حفاری تونل‌های شهری بر محیط پیرامون، امری حیاتی به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه بخش مهمی از هزینه ساخت مترو مربوط به حفاری و نگهداری تونل‌ها می‌شود، بنابراین یکی از ابتدایی‌ترین تصمیم‌گیری‌ها در بحث ساخت مترو، تصمیم‌گیری راجع به انتخاب تونل‌های تکی یا دوقلو است. در صورت استفاده از تونل تکی، با توجه به لزوم اجرای مسیر رفت و برگشت در داخل یک تونل، لازم است مقطع تونل به اندازه کافی برای دستیابی به این هدف بزرگ انتخاب شود. در حالی که با استفاده از تونل‌های دوقلو، با توجه به ساخت تونل‌های مجزا برای مسیرهای رفت و برگشت، می‌توان مقطع تونل را کوچکتر انتخاب کرد. اتخاذ تصمیم برای استفاده از تونل تکی یا تونل‌های دوقلو برای خطوط مترو بر اساس پارامترهای مختلف فنی و اقتصادی انجام می‌گیرد. از جمله پارامترهای یاد شده، جابه‌جایی‌های ایجاد شده در دیواره تونل در حین حفاری است که مخصوصاً در محیط‌های شهری به علت حساسیت زیاد، باید مدنظر قرار گیرد تا از ریزش‌های ناگهانی که ممکن است تا سطح زمین ادامه یابد و علاوه بر صدمات مالی و جانی باعث ایجاد اختلال در زندگی روزمره مردم می‌شود، جلوگیری شود. پارامتر مهم دیگر در بحث تونل‌سازی شهری، نشست سطح زمین است. حتی تونل‌سازی مدرن سپری نیز قادر نیست از نشست سطح زمین به طور کامل جلوگیری کند. نشست‌شدگی زمین در اطراف فضای خالی باعث تغییر در تنش‌ها و در نتیجه جابه‌جایی زمین شده و نشست در سطح زمین رخ می‌دهد. طبیعتاً نشست ایجاد شده در سطح زمین نباید به حدی باشد که سبب ایجاد آسیب به سازه‌های موجود در منطقه اغتشاش تونل شود. همچنین، پس از حفر تونل و نصب سیستم نگهداری آن فشار وارده از طرف زمین باعث ایجاد نیروها و ممان‌هایی در سیستم نگهداری خواهد شد که این نیروها و ممان‌ها در صورتی که از حدود مقاومت سیستم نگهداری فراتر روند

سبب ایجاد آسیب‌های جبران ناپذیر به سیستم نگهداری شده و پایداری تونل را با مشکلات جدی مواجه خواهند کرد. چاپمن^۱ و همکاران مدل ساده شده‌ای از منحنی نشست بالای تونل دوم را برای پیش‌بینی دقیق‌تر نشست کلی بالای چندین تونل مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با اضافه کردن برخی فاکتورهای تعدیل‌کننده به روابط تجربی رایج می‌توان تغییرشکل‌های قائم و افقی مشابه تغییرشکل‌های بدست آمده از داده‌های ثبت شده در حالت تونل‌های مجاور هم را بدست آورد [۱].

استرپی و کیویدینی^۲ حالت‌های شکست تونل‌های دوقلوی کم عمق در شرایط کرنش نرم شونده را ارایه کردند. آن‌ها نشان دادند که عمق تونل‌ها و عرض پایه نقش اصلی را در تعیین بار مورد نیاز برای شکست و مکانیزم شکست ایفا می‌کند [۲]. لیو^۳ و همکاران تأثیر تونل‌سازی روی سیستم نگهداری تونل موجود در حالت‌های مختلف قرارگیری تونل‌ها از جمله کنار هم و روی هم در منطقه سیدنی را با استفاده از مدلسازی سه بعدی اجزا محدود مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تأثیرات اندرکنش به صورت قابل توجهی وابسته به موقعیت نسبی تونل جدید نسبت به تونل موجود است. در مناطقی مانند سیدنی که تنش‌های افقی بالا دارد، حفاری تونل جدید در بالا یا پایین تونل موجود نسبت به حالتی که تونل جدید در کنار تونل موجود قرار گرفته باشد، تأثیرات نامطلوب‌تری بر روی سیستم نگهداری تونل موجود خواهد داشت [۳].

در این مقاله با استفاده از مدلسازی سه‌بعدی تونل‌های دوقلوی خط ۱ و تونل تکی خط ۲ مترو تبریز، مزایا و معایب استفاده از تونل‌های تکی و دوقلو در محیط شهری، با توجه به پارامترهای فنی یاد شده در بالا مورد بررسی قرار می‌گیرد. اهداف اصلی این تحقیق عبارتند از:

- مقایسه پایداری حفاری تونل تکی و تونل‌های دوقلوی با استفاده از روش کرنش بحرانی ساکورایی
- مقایسه تأثیر حفاری تونل تکی و تونل‌های دوقلوی روی نشست سطح زمین و ساختمان‌های مجاور با استفاده از معیار کرامر
- مقایسه نیروها و ممان‌های اعمال شده روی پوشش بتنی و ضرابب ایمنی مربوطه مابین حالات استفاده از تونل‌های دوقلو و تکی با استفاده از روش تنش مجاز



شکل ۲: محدوده ایستگاه شماره ۱۲ خط ۱ مترو تبریز [۵]



شکل ۳: نقشه هوایی تبریز به همراه مسیر و ایستگاه‌های خط ۲ مترو تبریز (از شفت ورودی تا ایستگاه G2) [۶]

خیابان عباسی به منطقه باغ‌میشه می‌رسد. در ادامه به سمت شرق امتداد یافته و در محدوده نمایشگاه بین‌المللی تبریز خاتمه می‌یابد. طول مسیر پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز به سه فاز تقسیم شده و این سه فاز به شکل مکانیزه به وسیله دو دستگاه حفاری فشار تعادلی زمین حفاری می‌شود. قطر حفاری تونل ۹٫۵ متر و قطر خارجی سگمنت‌ها ۹٫۲ متر و قطر داخلی تونل‌ها ۸٫۵ متر است که ۱۵ سانتی‌متر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌ها وجود دارد که به وسیله بتن تزریقی پر می‌شود. در شکل ۳ مسیر مورد مطالعه نمایش داده شده است [۶].

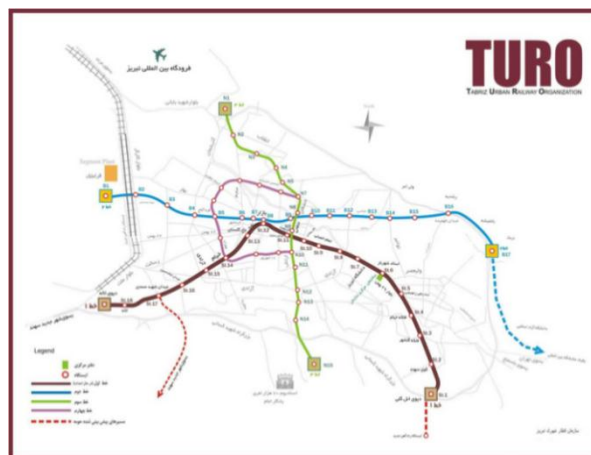
در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی عددی مجزای تونل‌های دوقلوی خط ۱ و تونل تکی خط ۲ مترو تبریز و با در نظر گرفتن معیارهای فنی، مزایا و معایب استفاده از تونل‌های دوقلو با مقطع کوچک و تونل تکی با مقطع بزرگ ارایه می‌شود.

۳- تحلیل عددی

با توجه به ماهیت سه‌بعدی مساله و نیز پیوسته بودن محیطی که در آن حفاری انجام می‌شود، از نرم افزار عددی

۲- معرفی پروژه

پروژه در شهر تبریز با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۶ درجه ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۰۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. خطوط مترو تبریز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: طرح خطوط مترو تبریز [۴]

۱-۲- خط ۱ قطار شهری تبریز

پروژه خط ۱ سازمان قطار شهری تبریز به طول ۱۷٫۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل‌گلی آغاز و از طریق بلوار های ائل‌گلی و ۲۹ بهمن، خیابان امام خمینی، خیابان شهید سرگرد محقق، باغ گلستان، به کوی لاله ختم می‌شود. خط یک قطار شهری تبریز از لحاظ فیزیکی به شکل هم‌سطح، نیمه‌عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. در بخش عمیق به صورت دو تونل تک خطی (دوقلو) سهند و سبلان است که عملیات حفاری تونل‌ها با استفاده از دو دستگاه ماشین حفاری فشار تعادلی زمین^۲ انجام می‌پذیرد. قطر حفاری تونل‌ها ۶٫۸۸ متر و قطر خارجی سگمنت‌ها ۶٫۶ متر و قطر داخلی تونل‌ها ۶ متر است که دارای ۱۴ سانتی‌متر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌ها است که به وسیله بتن تزریقی پر می‌شود. شکل ۲ مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۵].

۲-۲- خط ۲ قطار شهری تبریز

پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز به طول تقریبی ۲۲٫۴ کیلومتر دارای ۲۰ ایستگاه زیرزمینی است که به صورت تونل تکی از منطقه قراملک در غرب تبریز شروع می‌شود و بعد از گذشتن از خیابان‌های قره‌آغاچ، جمهوری، میدان دانشسرا،

جدول ۱: مشخصات تونل‌های دوقلو و تونل تکی [۵۶]

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

۳-۲- انتخاب مدل رفتاری و اعمال تنش‌های برجی

تنش‌های برجی قائم در مدل به صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر با ضریب فشار خاک در حالت سکون $(1 - \sin(\phi))$ در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری لایه‌های خاکی نیز به صورت الاستیک-کاملاً پلاستیک (با معیار شکست مورکلمب) در نظر گرفته شده است. عمق مرکز تونل‌های مربوط به هر دو خط از سطح زمین ۲۰٫۵۲ متر است. مشخصات لایه‌های خاک در محدوده مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. این مشخصات برای مدلسازی تونل‌های مربوط به هر دو خط استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی مکانیکی خاک منطقه [۹]

نوع خاک	دانسیته (gr/cm^3)	مدول الاستیسیته (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (KPa)
خاک دستی	۱٫۵	۴۰	۲۵	۵
سیلت فوقانی	۱٫۷	۱۵	۲۵	۲۰
ماسه سیلتی	۱٫۹	۵۰	۳۵	۵
سیلت تحتانی	۱٫۷	۳۵	۲۸	۲۵

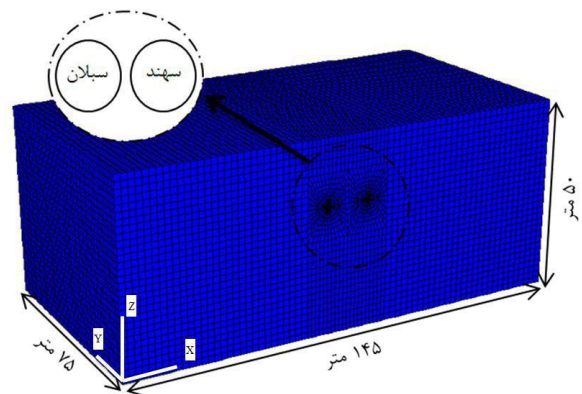
۳-۳- سیکل حفاری

تونل خط ۲ با استفاده از دو دستگاه حفاری فشار تعادلی زمین، حفاری می‌شود. ابتدا تونل به صورت تدریجی با اعمال فشار جبهه‌کار ۱ بار، با گام‌های حفاری ۱٫۵ متری (با توجه به عرض سگمنت) و با اعمال شرایط سپر تا متر ۹ متری (طول سپر) حفاری می‌شود، سپس با عبور متر ۹ متری از ۹ متر و حرکت دستگاه حفاری به جلو، در هر گام حفاری همزمان با مدلسازی سپر در قسمت حفر شده، از ۱٫۵ متر ابتدایی المان سپر برداشته شده و المان پوسته‌ای پوشش بتنی و تزریق پشت سگمنت به مدل اعمال می‌شود و تا

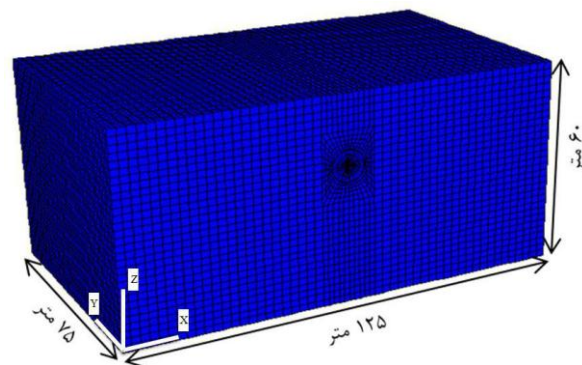
FLAC 3D به منظور مدلسازی مساله استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش تفاضل محدود^۵ استوار است و به منظور شبیه‌سازی رفتار سه بعدی سازه‌های خاکی، سنگی یا سایر موارد، تحت شرایط جریان پلاستیک (به هنگام وقوع تسلیم) استفاده می‌شود.

۳-۱- ابعاد و شرایط مرزی

نمای سه بعدی مدل عددی ساخته شده برای تونل‌های دوقلوی خط ۱ و تونل خط ۲ ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. ابعاد مدل، بر اساس محدودیت‌های ابعادی ارایه شده بر اساس قطر و عمق تونل‌ها، به منظور جلوگیری از تاثیر مرزهای مدل بر نتایج بدست آمده و ایجاد خطا، انتخاب شده‌اند [۷]. مرزهای جانبی در جهت افقی و مرزهای تحتانی آن در جهت قائم ثابت شده‌اند. همچنین مقدار بار ۲۰ کیلوپاسکال، به عنوان بار وارد شده از طرف ساختمان‌ها و ترافیک بر سطح مدل اعمال می‌شود [۸]. مشخصات اختصاص یافته برای تونل‌های تکی و دوقلو در جدول ۱ درج شده است.



شکل ۴: نمای سه بعدی مدل عددی تونل‌های دوقلو



شکل ۵: نمای سه بعدی مدل عددی تونل تکی

بحرانی برای توده سنگ‌های مختلف بیان کرده‌اند، روابط ۱، ۲ و ۳ را نیز بین مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی ارایه کرده‌اند. رابطه ۱ و ۳ نشان دهنده حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی است. رابطه ۲ نیز مقدار لگاریتمی متوسط روابط ۱ و ۳ است.

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 0.85 \quad \text{I تراز هشدار خطر}$$

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.22 \quad \text{II تراز هشدار خطر}$$

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.59 \quad \text{III تراز هشدار خطر}$$

که در این روابط:

ε_c کرنش بحرانی

E مدول الاستیسیته توده سنگ بر حسب Kgf/cm^2

$$1 \text{ Kg/cm}^2 = 10.33 \text{ Kgf/cm}^2$$

ساکورایی و همکاران تراز هشدار II را به عنوان مبنا برای طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد کردند. با محاسبه کرنش بحرانی از رابطه ۲، جابه‌جایی مجاز با استفاده از رابطه ۴ بدست می‌آید.

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (4)$$

که در آن:

u_c مقدار جابه‌جایی مجاز در سقف

a شعاع تونل

شرط پایداری فضای حفاری این است که حداکثر جابه‌جایی ایجاد شده در محیط تونل از جابه‌جایی مجاز بدست آمده از رابطه ۴ کمتر باشد. با استفاده از جدول ۲ در عمق قرارگیری تونل‌ها مدول الاستیسیته در حدود ۳۵ مگاپاسکال است. بنابراین:

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

و همچنین با توجه به رابطه ۴ و جایگذاری شعاع تونل و $(a=4.75 \text{ m})$ برای تونل تکی و $(a=3.44 \text{ m})$ برای تونل‌های دوقلو، حداکثر جابه‌جایی مجاز برای تونل تکی و تونل‌های دوقلو به ترتیب ۶۱ و ۴۴ میلی‌متر بدست آمده است. حداکثر مقدار جابه‌جایی در دیواره تونل در حالت تونل تکی و تونل‌های دوقلو به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده و در جدول ۵ درج شده است.

انتهای مترژ حفاری این روند ادامه می‌یابد. خواص اختصاص داده شده برای سپر در این مقاله در جدول ۳ ارایه شده است. در جدول ۴ خواص در نظر گرفته شده برای پوشش بتنی تونل‌های دوقلو خط ۱ و تونل تکی خط ۲ ارایه شده است. تونل‌های دوقلوی سهند و سبلان نیز با استفاده از دو دستگاه فشار تعادلی زمین حفاری می‌شوند. با توجه به اینکه در محدوده مورد مطالعه تونل سبلان با فاصله جبهه‌کار حدود ۱۰۰ متر جلوتر از تونل سبلان حفاری شده است، بنابراین ابتدا تونل سهند با فرآیندی مشابه تونل خط ۲ تا آخر حفاری می‌شود و سپس این روند در مورد تونل سبلان انجام می‌گیرد.

جدول ۳: مشخصات سپر استفاده شده برای حفاری تونل‌ها [۶]

نسبت پواسون	دانسیتته (kg/m^3)	ضخامت (m)	مدول الاستیسیته (GPa)
۰٫۱۷	۷۸۵۰	۰٫۱	۲۱۰

جدول ۴: مشخصات سگمنت تونل‌های دوقلو و تونل تکی [۱۰، ۶]

تونل تکی	تونل‌های دوقلو	مشخصات سگمنت
۰٫۳۵	۰٫۳	ضخامت (m)
۳۰	۲۳٫۵	مدول الاستیسیته (GPa)
۰٫۲	۰٫۲	نسبت پواسون
۲۵۰۰	۲۴۴۶	دانسیتته (kg/m^3)

۴- کنترل پایداری با روش کرنش مجاز

یکی از روش‌های مورد استفاده برای کنترل پایداری تونل‌ها ارزیابی کرنش‌های ایجاد شده در محیط درونگیر تونل است. این کرنش‌ها در جریان حفاری در محیط درونگیر تونل ایجاد می‌شوند و اگر مقدار آن‌ها از مقدار بحرانی تعیین شده بیشتر باشد، تونل در حال حفاری دچار ناپایداری خواهد شد. ساکورایی^۶ در سال ۱۹۹۲ روشی را برای ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایشات فشاری تک محوره بر روی سنگ‌های مختلف تعریف می‌شود [۱۱]. این روش اغلب به عنوان روشی استاندارد برای محاسبه همگرایی (جابه‌جایی نسبی دیواره‌های تونل) استفاده می‌شود که در طی بررسی تونل‌های مختلف بدست آمده است. ساکورایی و همکارانش علاوه بر روابطی که بین مقاومت فشاری تک محوره و کرنش

۵- بررسی نشست سطح زمین و تاثیر آن بر ساختمان‌های مجاور

جابه‌جایی محیط اطراف نتیجه اجتناب‌ناپذیر حفاری و ساخت تونل است. حفاری تونل باعث برهم خوردن تنش‌های برجا در زمین می‌شود، که فقط با نصب سیستم نگهداری در تونل می‌توان آنرا محدود کرد. در حقیقت ساخت همزمان یک حفره و ایجاد سیستم نگهداری صلب که کاملاً بر تونل منطبق باشد، امکان‌پذیر نیست. از اینرو مقدار مشخصی تغییر شکل در عمق تونل اتفاق خواهد افتاد، این موضوع زنجیره‌ای از جابه‌جایی‌ها را به راه خواهد انداخت که تا سطح زمین گسترش می‌یابد و با کاهش عمق تونل این نشست‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابند. نشست سطح زمین می‌تواند تاثیر زیادی بر روی ساختمان‌ها و پل‌های اطراف داشته باشد. شیب منحنی نشست مهمترین پارامتر در بررسی تاثیر نشست بر روی ساختمان‌ها و پل‌ها است. از جمله معیارهای مشهور در بررسی این تاثیرات، معیار کرامر است. طبق این معیار بعد از محاسبه شیب منحنی نشست، می‌توان خطر آفرینی حفر تونل در منطقه مورد نظر را بر اساس جدول ۶ تعیین کرد. با توجه به این معیار ماکزیمم شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی چون پل $\frac{1}{800}$ و برای سازه‌هایی چون

$$\text{ساختمان‌ها } \frac{1}{900} \text{ است [۱۲].}$$

جدول ۶: تاثیر شیب منحنی نشست بر روی سازه‌های سطحی (معیار کرامر)

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

در شکل ۸ و ۹ تغییرشکل‌های قائم ایجاد شده در نتیجه حفاری تونل تکی و تونل‌های دوقلو نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل تکی و دوقلو در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. نتایج مربوط به بیشترین مقدار نشست ایجاد شده و بیشترین شیب منحنی در اثر حفاری تونل‌های دوقلو و تونل تکی در جدول ۷ و ۸ نشان داده شده است. بر اساس محدودیت‌های تعیین شده توسط کارفرما، نشست مجاز برابر ۱ اینچ (۲،۵۴ سانتی‌متر) است.

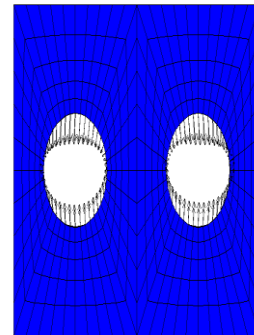
FLAC3D 3.00

Step 41992: Model Perspective
21:13:28 Fri Jan 03 2014

Center: X: 3.514e+000 Y: 3.750e+001 Z: -5.038e+001
Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
Dist: 4.937e+002 Mag: 9.31
Increments: Move: 3.978e-002 Ang: 22.500
Rot: 10.000

Surface
MagFe = 0.000e+000
Displacement
Maximum = 3.228e-002
LineStyle

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA



شکل ۶: تغییرشکل‌های ایجاد شده در جداره تونل‌های دوقلو

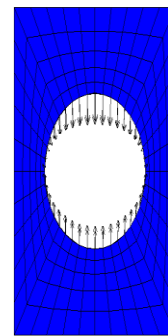
FLAC3D 3.00

Step 22025: Model Perspective
22:01:58 Sat Jan 04 2014

Center: X: 3.509e+001 Y: 3.750e+001 Z: -5.472e+001
Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 360.000
Dist: 4.937e+002 Mag: 9.31
Increments: Move: 3.978e-002 Ang: 22.500
Rot: 10.000

Surface
MagFe = 0.000e+000
Displacement
Maximum = 3.874e-002
LineStyle

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

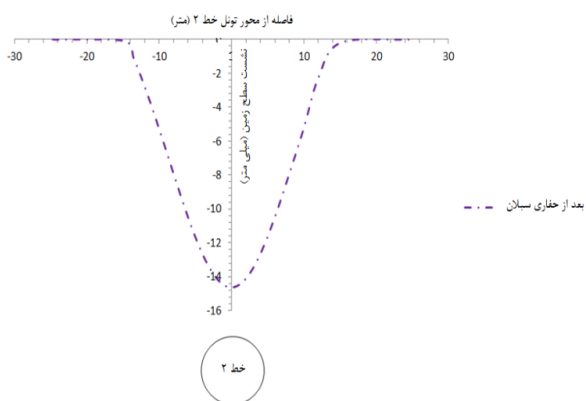


شکل ۷: تغییرشکل‌های ایجاد شده در جداره تونل تکی

جدول ۵: حداکثر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در محیط تونل‌های دوقلو و تکی

هندسه تونل	حداکثر جابه‌جایی ایجاد شده در محیط تونل (mm)
تونل‌های دوقلو	۳۲،۲۸
تونل تکی	۳۸،۷۴

بیشترین مقدار جابه‌جایی در حالت تونل‌های دوقلو و تونل تکی به ترتیب برابر ۳۲ و ۳۸ میلی‌متر است که این مقادیر از حداکثر جابه‌جایی مجاز بدست آمده برای تونل‌های دوقلو و تونل تکی کمتر است، بنابراین تونل‌های یاد شده در مرحله حفاری مشکل ناپایداری نخواهند داشت. با وجود اینکه جابه‌جایی‌های بوقوع پیوسته در دیواره تونل تکی در حدود ۶ میلی‌متر از جابه‌جایی دیواره تونل‌های دوقلو بیشتر است، جابه‌جایی بحرانی محاسبه شده برای تونل تکی نیز در حدود ۱۷ میلی‌متر از جابه‌جایی بحرانی محاسبه شده برای تونل‌های دوقلو بیشتر است. با مقایسه جابه‌جایی‌های بحرانی محاسبه شده به وسیله رابطه ساکورایی و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در دیواره تونل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که حاشیه پایداری تونل تکی در حین حفاری بیشتر از تونل‌های دوقلو است.



شکل ۱۱: منحنی نشست سطح در اثر حفاری تونل تکی

جدول ۷: بیشترین میزان نشست ایجاد شده و شیب منحنی در اثر

حفاری تونل‌های دوقلو

شیب حداکثر	نشست حداکثر بعد از حفاری سیلان (میلی‌متر)	نشست حداکثر بعد از حفاری سهپند (میلی‌متر)
$\frac{1}{950}$	۱۶,۳۱	۱۱,۷۶

جدول ۸: بیشترین مقدار نشست و شیب منحنی در اثر حفاری تونل تکی

شیب حداکثر	نشست حداکثر بعد از حفاری تونل (میلی‌متر)
$\frac{1}{700}$	۱۴,۶۳

با توجه به بیشترین مقدار شیب منحنی نشست و مقایسه آن با مقادیر جدول ۶، نشست ایجاد شده در حالت تونل تکی سبب ایجاد خسارت خیلی کم و در حالت تونل‌های دوقلو بدون خسارت خواهد بود. نکته مهم در بحث نشست ایجاد شده این است که با وجود ایجاد نشست بیشتر در حالت تونل‌های دوقلو نسبت به تونل تکی، شیب منحنی در این حالت کمتر از حالت استفاده از تونل تکی است. دلیل این امر عرض بیشتر منحنی نشست در حالت تونل‌های دوقلو نسبت به تونل تکی است.

۶- بررسی نیروها و ممان‌های اعمال شده روی سیستم نگهداری و تعیین ضریب ایمنی آن‌ها

در این بخش با مدل‌سازی مجزای تونل‌های دوقلو خط ۱ و تونل تکی خط ۲ پایداری این تونل‌ها بررسی می‌شود. به منظور مقایسه پایداری تونل‌های مذکور مراحل مختلف حفاری تونل‌های دوقلو و تونل تکی با استفاده از نرم‌افزار 3D FLAC مدل‌سازی شده و بردار جابه‌جایی و میدان تنش

FLAC3D 3.00

Step 92214 Model Perspective
22:17:34 Wed Jan 29 2014
Center: X: -3.364e+000 Y: 4.654e+001 Z: -1.240e+000
Rotation: X: 360.000 Y: 0.000 Z: 360.000
Dist: 2.311e+002 Mag: 0.8
Increments: Move: 3.978e-002 Ang: 22.500 Rot.: 10.000

Surface
Magfac = 0.000e+000
Contour of Z-Displacement
Magfac = 0.000e+000
-1.2533e-001 to -1.2000e-001
-1.2000e-001 to -1.0000e-001
-1.0000e-001 to -8.0000e-002
-8.0000e-002 to -4.0000e-002
-4.0000e-002 to -2.0000e-002
-2.0000e-002 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 2.0000e-002
2.0000e-002 to 4.0000e-002
4.0000e-002 to 6.0000e-002
6.0000e-002 to 7.1855e-002
Interval = 2.0e-002

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA



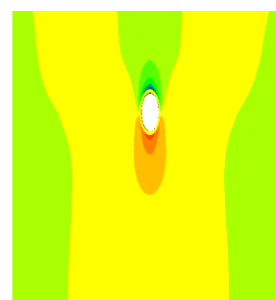
شکل ۸: تغییر شکل‌های قائم ایجاد شده در محیط اطراف

FLAC3D 3.00

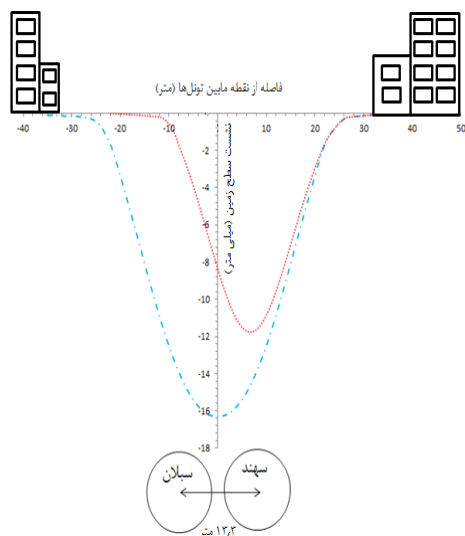
Step 49145 Model Perspective
22:18:47 Thu Jan 30 2014
Center: X: 2.777e+001 Y: 3.756e+001 Z: -1.778e-002
Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
Dist: 4.937e+002 Mag: 1.95
Increments: Move: 3.978e-002 Ang: 22.500 Rot.: 10.000

Surface
Magfac = 0.000e+000
Contour of Z-Displacement
Magfac = 0.000e+000
-1.3357e-001 to -1.2500e-001
-1.2500e-001 to -1.0000e-001
-1.0000e-001 to -7.5000e-002
-7.5000e-002 to -5.0000e-002
-5.0000e-002 to -2.5000e-002
-2.5000e-002 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 2.5000e-002
2.5000e-002 to 5.0000e-002
5.0000e-002 to 7.5000e-002
7.5000e-002 to 9.8089e-002
Interval = 2.0e-002

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA



شکل ۹: تغییر شکل‌های قائم ایجاد شده در محیط اطراف



شکل ۱۰: منحنی نشست سطح در اثر حفاری تونل‌های دوقلو

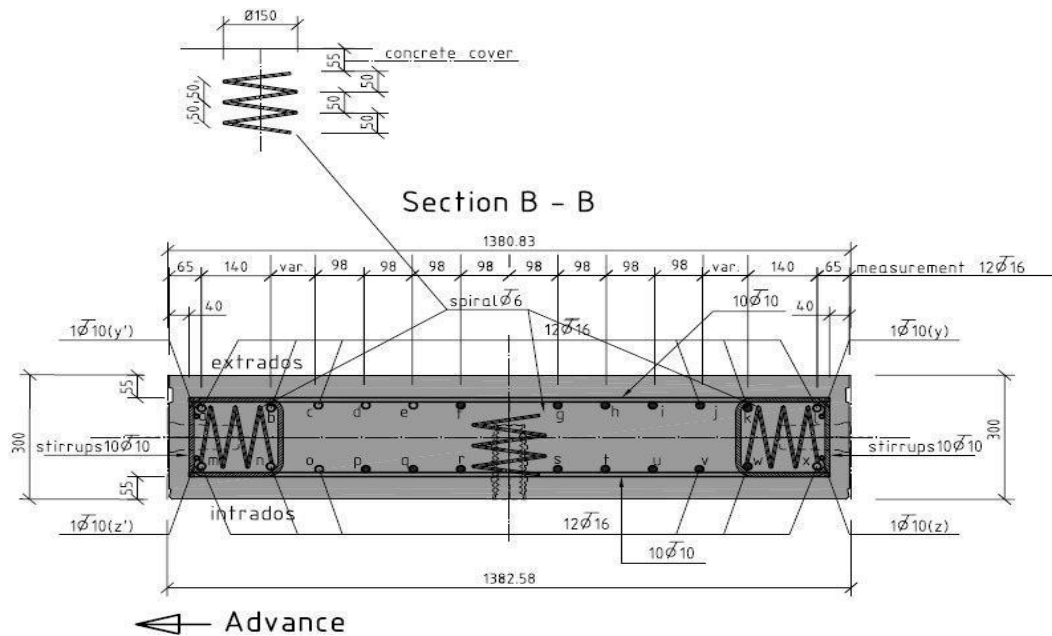
مربوط، استخراج و با نرم افزار PCACol پایداری آن‌ها کنترل شده است. تصویری از مقطع عرضی مربوط به پوشش بتن مسلح در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نقاطی از سیستم نگهداری دو تونل که در آن از ممان خمشی، نیروهای برشی و محوری تاریخچه گرفته شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی بخش‌های مختلف پوشش تونل سهند و سبلان در جدول ۹ درج شده است.

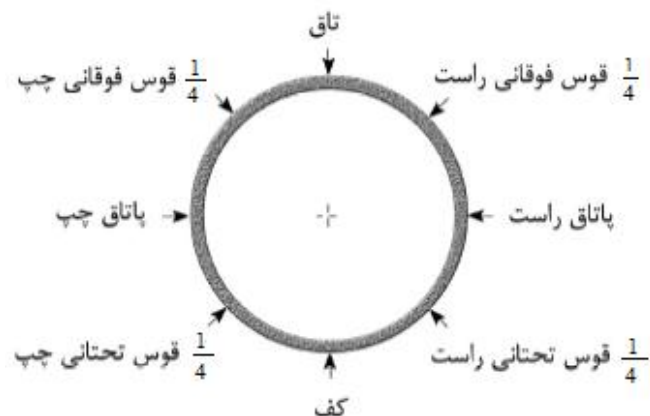
تعیین می‌شود، سپس با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D نیروهای برشی و محوری و ممان خمشی وارد بر نقاط مختلف پوشش بتنی یکپارچه نصب شده تونل‌های دوقلوی و تکی تعیین می‌شود.

۱-۶- تونل‌های دوقلوی

با استفاده از تاریخچه‌های بدست آمده از نیروهای محوری، برشی و ممان خمشی روی نقاط مختلف یک حلقه پوشش بتنی که به منظور اجتناب از شرایط مرزی با فاصله مناسب از ابتدا و انتهای مدل در نظر گرفته شده، مقادیر



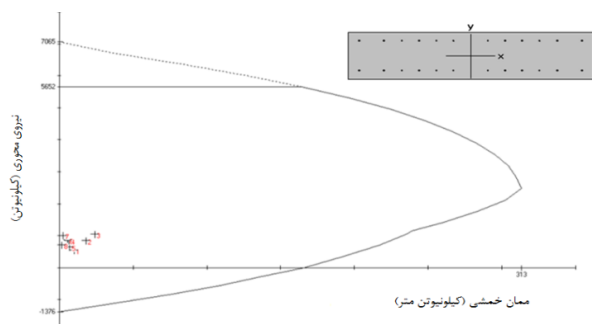
شکل ۱۲: مقطع بتن مسلح پوشش تونل‌ها (اندازه‌ها به میلی‌متر است) [۱۰]



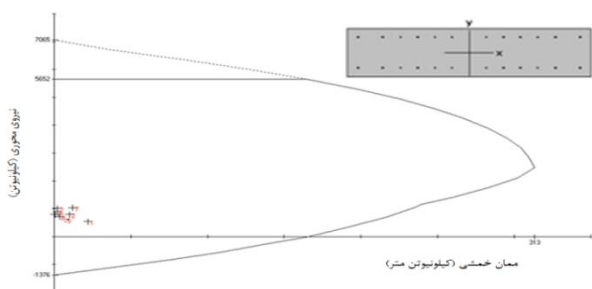
شکل ۱۳: نقاط مدنظر برای ثبت نیروها و ممان خمشی توزیع شده در پوشش بتنی تونل‌های دوقلوی خط ۱

جدول ۹: نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش بتنی تونل‌های دوقلوی سهند و سبلان

تونل	موقعیت نقطه کنترلی	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی برشی (KN)
سهند	تاج	۵۸۰	۱۸	۱۶
	$\frac{1}{4}$ فوقانی راست	۷۲۰	۰	۳۳
	راست	۱۰۱۰	۱۱,۵	۵۰,۶
	$\frac{1}{4}$ تحتانی راست	۸۷۰	۴,۵۶	۹
	کف	۶۵۰	۲	۵,۱۳
	$\frac{1}{4}$ تحتانی چپ	۸۴۰	۵,۰۵	۱۰
	چپ	۱۰۲۰	۱۳	۳۶
	$\frac{1}{4}$ فوقانی چپ	۸۴۰	۱۸,۵	۲۰
سبلان	تاج	۵۶۰	۲۹,۳۲	۸,۵۵
	$\frac{1}{4}$ فوقانی راست	۷۴۰	۲,۵	۳۹,۶
	راست	۱۰۰۰	۱۹,۶۱	۴۸
	$\frac{1}{4}$ تحتانی راست	۹۰۰	۱,۲۵	۳
	کف	۶۴۰	۱۳,۶۴	۱,۵
	$\frac{1}{4}$ تحتانی چپ	۸۲۰	۲	۵
	چپ	۱۰۲۰	۹,۴۷	۳۵,۴
	$\frac{1}{4}$ فوقانی چپ	۸۰۰	۱۱,۷۷	۳۸,۷



شکل ۱۴: کنترل پایداری استاتیکی بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سهند



شکل ۱۵: کنترل پایداری استاتیکی بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل سبلان

به منظور کنترل نیروها و لنگر خمشی ایجاد شده در مقطع پوشش بتنی تونل‌ها، از روش تنش مجاز استفاده شده است. با مدل‌سازی مقطع مورد نظر و اعمال نیروی محوری و لنگر خمشی (محاسبه شده به وسیله نرم‌افزار FLAC 3D) در نرم‌افزار PCAcol، مقدار ضریب اطمینان را می‌توان برای مراحل مختلف حفاری محاسبه کرد. در بحث تونل‌سازی در محیط‌های شهری، معمولاً فاکتور ایمنی $1/5$ را غیر مجاز در نظر می‌گیرند [۱۳]. نتایج حاصل از این بررسی‌ها برای مقطع بتن مسلح به عرض ۱ و ضخامت $0/3$ متر که تحت تأثیر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی یاد شده در جدول ۹ قرار می‌گیرند، به صورت ضرایب اطمینان مربوط به هر بخشی از مقطع، در جدول ۱۰ آورده شده است.

شکل ۱۴ و ۱۵ به ترتیب کنترل پایداری بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل‌های سهند و سبلان را بعد از حفاری تونل سبلان برای مقطع یاد شده متناسب با شماره ردیف هر قسمت، در نرم‌افزار PCAcol نشان می‌دهد.

f_c' مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال
 b_w و d به ترتیب عرض و ضخامت مقطع تحت برش بر
 حسب میلی‌متر

f_y مقاومت تسلیم میل‌گردهای فولادی بر حسب MPa
 A مجموع سطح مقطع تحت برش آن‌ها بر حسب mm^2
 به منظور کنترل نیروی برشی در مقطعی از بتن به
 ضخامت $0/3$ متر و عرض 1 متر به‌همراه 24 میل‌گرد طولی
 شماره 14 با سطح مقطع کلی $3696 mm^2$ خواهیم داشت:

$$V_c = 367KN$$

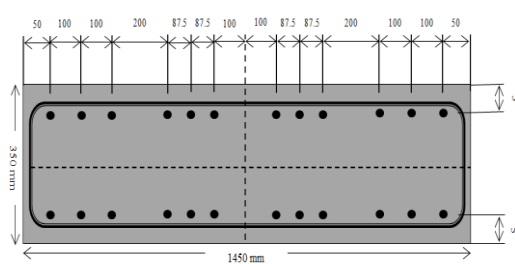
$$V_c = 493KN$$

$$V_n = 860KN$$

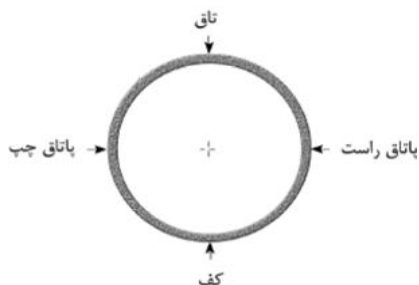
با توجه به این‌که نیروهای برشی اعمال شده به بخش‌های
 مختلف پوشش بتنی تونل‌های سهند و سبلان کمتر از مقاومت
 برشی مقطع است، می‌توان استنباط کرد که بر اساس روش
 تنش‌های مجاز، پوشش تونل‌های سهند و سبلان تحت اثر
 نیروهای برشی اعمال شده، پایدار خواهند ماند.

۲-۶- تونل تکی

تصویری از مقطع عرضی مربوط به پوشش بتن مسلح
 مورد استفاده در تونل تکی خط ۲، در شکل ۱۶ نشان داده
 شده است. نقاطی از پوشش بتنی که در آن از لنگر خمشی،
 نیروهای برشی و محوری تاریخچه گرفته شده در شکل ۱۷
 نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۶: مقطع بتن مسلح پوشش تونل [۶]



شکل ۱۷: نقاط مدنظر برای ثبت نیروها و ممان خمشی توزیع شده در
 پوشش بتنی تونل تکی خط ۲

جدول ۱۰: ضرایب ایمنی بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل‌های دوقلو

ضریب ایمنی	موقعیت نقطه کنترلی	تونل
۹,۵۸	تاج	سهند
۷,۸۵	$\frac{1}{4}$ فوقانی راست	
۵,۵۹	راست	
۶,۴۹	$\frac{1}{4}$ تحتانی راست	
۸,۶۹	کف	
۶,۷۲	$\frac{1}{4}$ تحتانی چپ	
۵,۵۱	چپ	سبلان
۶,۷۲	$\frac{1}{4}$ فوقانی چپ	
۸,۲۸	تاج	
۷,۶۳	$\frac{1}{4}$ فوقانی راست	
۵,۶۵	راست	
۶,۲۸	$\frac{1}{4}$ تحتانی راست	
۸,۸۳	کف	
۶,۸۹	$\frac{1}{4}$ تحتانی چپ	
۵,۵۴	چپ	
۷,۰۶	$\frac{1}{4}$ فوقانی چپ	

برای کنترل نیروهای برشی وارده در پوشش از رابطه ۵
 استفاده شده است.

$$V_n = V_s + V_c \quad (5)$$

که در آن:

V_n مقاومت برشی اسمی یک مقطع بتن مسلح
 V_c مقاومت برشی تامین شده به وسیله بتن
 V_s مقاومت برشی تامین شده به وسیله میل‌گردهای فولادی
 پوشش بتن مسلح

برای محاسبه مقاومت برشی بتن و مجموعه میل‌گردهای
 طولی خم شده درون آن می‌توان از رابطه‌های ۶ و ۷ استفاده
 کرد [۱۴].

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

$$V_s = 0.34 f_y A \quad (7)$$

که در آن:

همراه ۲۴ میل‌گرد طولی شماره ۱۲ با سطح مقطع کلی ۲۷۱۴ میلی‌متر مربع خواهیم داشت:

$$V_n = 534KN$$

$$V_s = 369KN$$

$$V_n = 903KN$$

با توجه به محاسبات مقاومت برشی بتن مسلح می‌توان مشاهده کرد نیروی برشی اعمال شده بر پوشش بتنی تونل خط ۲ در تمام حالات یاد شده مشکلی برای پایداری پوشش بتنی این تونل ایجاد نمی‌کند.

نتایج حاصل از تحلیل تونل‌های تکی و دوقلو نشان می‌دهند که تونل‌های یاد شده در مقابل نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی پایدار هستند، همانطور که انتظار می‌رود در حالت استفاده از تونل تکی با توجه به قطر بزرگتر، متوسط نیروها و لنگرهای وارده نسبت به حالت استفاده از تونل‌های دوقلو با قطر کوچکتر بیشتر و به تبع آن متوسط ضرایب ایمنی در این حالت کمتر خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تونل‌های دوقلوی خط ۱ و تونل تکی خط ۲ قطارشهری تبریز با استفاده از روش عددی تفاضل محدود مدل‌سازی و با بررسی معیارهای فنی دخیل در بحث تونل‌سازی در محیط شهری مقایسه شدند. نتایج حاصل از ارزیابی دو حالت تکی و دوقلو عبارتند از:

در هر دو حالت تونل‌های تکی و دوقلو تغییرشکل‌های ایجاد شده در جداره تونل در حین عملیات حفاری با معیار ساکورایی ارزیابی شده و مشاهده شد که در هر دو حالت این تغییرشکل‌ها در محدوده مجاز قرار می‌گیرند. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که تونل تکی حاشیه امنیت بالاتری از این نظر دارد، بنابراین از دیدگاه پایداری تونل در حین حفاری، استفاده از تونل تکی با قطر بزرگ توصیه می‌شود.

حداکثر میزان نشست سطح زمین بعد از حفاری تونل خط ۲، ۱۴/۶۳ میلی‌متر است که بیشترین میزان منحنی در این حالت در حدود $\frac{1}{700}$ است. در حالت حفاری تونل‌های دوقلو، بعد از حفاری تونل سهند بیشترین میزان نشست برابر ۱۱/۷۶ میلی‌متر است که بعد از حفاری تونل سبلان این مقدار به ۱۶/۳۱ میلی‌متر می‌رسد. بیشترین مقدار شیب در این حالت $\frac{1}{950}$ است. شیب کم منحنی نشست

نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی بخش‌های مختلف پوشش تونل، در جدول ۱۱ درج شده است.

جدول ۱۱: نیروها و لنگرهای اعمال شده به قسمت‌های مختلف پوشش

بتنی تونل خط ۲

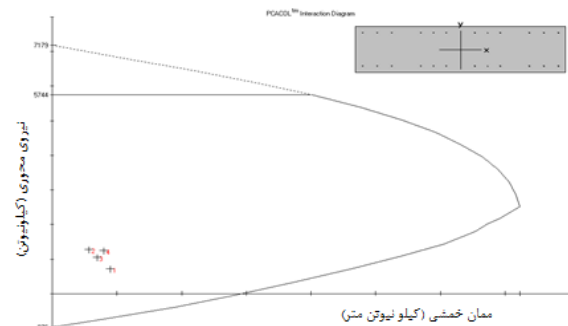
ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	نیروی محوری KN	لنگر خمشی KN.m	نیروی برشی KN
۱	تاق	۷۲۰	۴۵	۸/۵
۲	پاتاق چپ	۱۲۷۵	۲۸/۵۷	۳۰/۱۱
۳	کف	۱۰۵۰	۳۴/۷۰	۷
۴	پاتاق راست	۱۲۵۰	۴۰	۳۵

نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده برای مقطع بتن مسلح به عرض ۱/۴۵ و ضخامت ۰/۳۵ متر که تحت تاثیر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی یاد شده در جدول ۱۱ قرار می‌گیرند، به صورت ضرایب اطمینان مربوط به هر بخشی از مقطع مذکور در جدول ۱۲ آورده شده است.

شکل ۱۸ کنترل پایداری بخش‌های مختلف پوشش بتنی تونل خط ۲ را برای مقطع یاد شده، متناسب با شماره ردیف هر قسمت، در نرم‌افزار PCAcol نشان می‌دهد.

جدول ۱۲: ضرایب اطمینان بخش‌های مختلف پوشش بتنی

ردیف	بخش‌های مختلف پوشش	ضرایب اطمینان
۱	تاق	۶/۵۲
۲	پاتاق چپ	۴/۵۰
۳	کف	۵/۴۷
۴	پاتاق راست	۴/۵۹



شکل ۱۸: کنترل پایداری استاتیکی بخش‌های مختلف پوشش بتنی

با توجه با روابط ۵ تا ۷ و به منظور کنترل نیروی برشی در مقطعی از بتن به ضخامت ۰/۳۵ متر و عرض ۱/۴۵ متر به

- (2009). "Effect of tunneling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels". Computers and Geotechnics, 36(5): 880-894.
- [۴] اتحادیه شرکت‌های قطار شهری؛ ۱۳۸۶؛ خبرنامه اتحادیه شرکت‌های قطار شهری، شماره ۸.
- [۵] شرکت مهندسی مشاور گنو؛ ۱۳۸۷؛ گزارش مطالعات ژئوتکنیک خط یک قطار شهری تبریز.
- [۶] شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان؛ ۱۳۸۹؛ خدمات مهندسی پروژه تونل خط ۲ قطار شهری تبریز از ابتدای تونل تا ایستگاه G₂.
- [7] Lamrugini, A., Medina Rodriquez, L., and Castellanza, R. (2012). "Development of validation of 3D numerical model for TBM-EPB Mechanized excavations". Computers and Geotechnics, 40: 97-113.
- [8] Australian standard. (2002). Earth retaining structures.
- [۹] شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت؛ ۱۳۸۹؛ طراحی سازه شفت ایستگاه ۱۲ متروی تبریز.
- [10] Alamut Bridge and building engineering co. (2006). "Design and calculation of concrete segments".
- [11] Sakurai, S. (1992). "Lessons learned from field measurements in tunneling". Tunneling and Underground Space Technology, 12: 453-460.
- [۱۲] موسوی، م؛ طالبی نژاد، ح؛ چاکری، ح؛ ۱۳۸۸؛ "تحلیل پایداری و مدل سازی سه بعدی تونل و ایستگاه (مطالعه موردی: خط ۴ مترو تهران)"، هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۴۱۱-۴۲۲.
- [13] Carranza-Torres, C., and Diederichs, M. (2009). "Mechanical analysis of circular Liners with particular refrence to composite supports". Tunneling and Underground Space Technology, 24(5): 506-532.
- [۱۴] مستوفی نژاد، د؛ ۱۳۸۶؛ "سازه های بتن آرمه" انتشارات ارکان دانش، ص ۷۲۰.
- تونل‌های دوقلو نسبت به تونل تکی ناشی از عرض بیشتر محدوده نشست زمین در حالت تونل‌های دوقلو است. ملاحظه می‌شود که میزان حداکثر نشست در هر دو حالت در ناحیه مجاز قرار دارد. با وجود اینکه در حالت استفاده از تونل‌های دوقلو میزان نشست حداکثر بیشتر از حالت تونل تکی است اما شیب حداکثر منحنی نشست که پارامتری مهم در بررسی تاثیر میزان نشست بر سازه‌های سطحی است، در حالت استفاده از تونل‌های دوقلو به علت عرض بیشتر منحنی نشست، کمتر است.
- با ارزیابی نیروها و ممان‌های اعمال شده روی سیستم نگهداری در حالت تونل‌های دوقلو و تونل تکی ملاحظه می‌شود که نیروهای اعمال شده بر سیستم نگهداری تونل تکی به علت قطر بزرگتر در عمق یکسان بیشتر از تونل‌های دوقلو است. همچنین ملاحظه می‌شود که فاکتور ایمنی نقاط متناظر در حالت تونل تکی در حدود نصف فاکتورهای بدست آمده برای تونل‌های دوقلو است. نقطه قابل توجه در بحث فوق این است که با وجود نیروهای کمتر وارد شده بر سیستم نگهداری در حالت تونل‌های دوقلو نسبت به حالت تکی، سیستم نگهداری به کار رفته برای این تونل‌ها از نظر قطر و فواصل به کار رفته برای آرماتورها دارای استحکام بیشتری نسبت به تونل تکی است، بنابراین فاکتور ایمنی بالای بدست آمده برای تونل‌های دوقلو، نسبت به تونل تکی را می‌توان ناشی از دو عامل دانست:
- اول: ناشی از نیروهای کمتر وارد شده به سیستم نگهداری در نتیجه قطر کمتر
- دوم: ناشی از استحکام بیشتر سیستم نگهداری نصب شده در تونل‌های دوقلو
- تحلیل‌ها نشان می‌دهند که از دیدگاه نیروها و لنگرهای وارد شده بر پوشش بتنی، استفاده از تونل‌های دوقلو با قطر کوچکتر در اولویت قرار دارد.

۸- مراجع

- [1] Chapman, D. N., Rogers, C. D. F., and Hunt, D. V. L. (2004). "Predicting the settlements above twin tunnels constructed in soft ground". Tunneling and Underground Space Technology, 19: 4-5.
- [2] Sterpi, D., and Cividini, A. (2004). "A physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnels in strain softening media". Rock Mechanics and Rock Engineering, 37 (4), 277-298.
- [3] Liu, HY., Small, JC., Carter JP., and Williams DJ.

^۱ chapman

^۲ Sterpi & cividini

^۳ liu

^۴ EPB-TBM

^۵ Finite Difference Method

^۶ Sakurai