اولین همایش ملی معدن و علوم وابسته
اسفند ۱۳۸۸
دانشگاه آزاد اسلامی
واحد طبس

تحلیل پایداری و پیش‌بینی میزان نشست تونل خط یک مترو تبریز

کامران گشتاسبی
دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس
کاوه آهنگری
دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات
حسین ابنانلو عربی شاد
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
ابوذر دارابی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

چکیده :

یکی از مسائل مهم در تونل‌های مترو شهری، تحلیل پایداری تونل و پیش‌بینی میزان نشست می‌باشد که منجر به تأمین پایداری در حین اجرا و پس از آن در زمان بهره‌برداری از سازه مورد نظر خواهد گردید. در تحقیق حاضر، تحلیل پایداری و بررسی میزان نشست تونل خط یک مترو تبریز توسط نرم‌افزار عددی صورت پذیرفته است. با توجه به دو روش حفاری مورد استفاده در تونل خط یک مترو تبریز (استفاده از دستگاه TBM و همچنین حفر تونل به روش NATM) در این بررسی، قسمتی از تونل که با روش NATM حفاری می‌شود با استفاده از نرم افزار FLAC 2D مورد بررسی قرارگرفته و مقدارنشست سطح زمین و همچنین میزان همگرایی تونل در دیواره تونل نیز با کمک همین نرم‌افزار پیش‌بینی شده و نتیجه بدست‌آمده با مقدار واقعی مقایسه شده است. میزان اختلاف مقدار پیش‌بینی شده با مقدار واقعی کم و قابل قبول می‌باشد. پیش‌بینی مورد نظر کمک شایانی در طراحی مناسب تونل، قبل از مرحله حفاری نمود.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی نشست، تونل مترو، NATM، FLAC 2D

Abstract:

Stability analysis and prediction of settlement are important factors in metro tunnels. These factors retain the stability of tunnels during and after construction. In this research study, stability analysis and settlement predictions of the Tabriz metro tunnel were carried out utilizing numerical method. The tunnel is partly excavated by TBM and partly by NATM. In this study, the part of the tunnel which was excavated with NATM was analyzed using the two dimensional FLAC code. With this respect the predicted settlement and tunnel convergence from the numerical analysis was compared with actual measurements at site. The results showed that the difference between the measure and numerical analysis values were small and hence acceptable. These predictions greatly influenced suitable tunnel design before excavation sequence.

Keywords: prediction of settlement, metro tunnel, NATM, FLAC 2D

مقدمه :

احداث تونل در مناطق شهری به‌سادگی فضاهای غیرمسکونی نیست. احداث تونل‌های سطحی، در نواحی متراکم و پرازدحام شهری، با موانع و مشکلاتی روبه‌رو می‌شود که یکی از آن‌ها مسئله نشست است. این امر، نیازمند کنترل عملیات حفر برای کاهش ریسک و تأثیر احتمالی آن بر ساختارهایی که در سطح زمین و در نزدیکی تونل است، می‌باشد. بر این اساس، بررسی نشست در تونل‌های سطحی می‌تواند باعث کاهش خسارات و پیش‌گیری از خطرهای احتمالی شود. برای کنترل نشست باید به‌ترتیب مراحل پیش‌بینی، پیش‌گیری و محافظت صورت پذیرد. روش‌های جلوگیری و کنترل نشست، بستگی به روش‌های پیش‌بینی نشست بستگی دارد که این امر اهمیت پیش‌بینی نشست را نشان می‌دهد.

توانایی در پیش‌بینی تأثیرات استخراج و نشست ناشی از آن، یکی از مهم‌ترین مراحل، در احداث تونل‌های سطحی، از جمله خطوط متروی شهری می‌باشد. در این تونل‌ها که در عمق کمتر از ۲۰ متری سطح زمین، در محیط‌های آبرفتی با مقاومت و چسبندگی کم حفر می‌شوند، رهایی تنش در اطراف تونل، سریع‌تر صورت می‌پذیرد.

روش‌های عددی، یکی از روش‌های مؤثر در تحلیل پایداری تونل، تعیین ضریب اطمینان همچنین پیش‌بینی میزان نشست می‌باشند. که در این رابطه، استفاده از نرم‌افزار عددی به امری متداول تبدیل شده است.

نرم‌افزار FLAC 2D که بر اساس روش‌های عددی تفاضل محدود، طراحی شده است با در نظر گرفتن خصوصیات هندسی تونل، خصوصیات ژئومکانیکی و شرایط زمین، ابزار مفیدی برای آنالیز مشکلات ژئوتکنیکی می‌باشد.

معرفی خط یک متروی تبریز :

پروژه مترو تبریز شامل چهار مسیر می‌باشد که در این مطالعه به بررسی خط یک مترو تبریز پرداخته می‌شود. کریدور اول- به طول ۱۷/۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل‌گلی شروع شده و از طریق بلوار شهید باکری، خیابان امام، بازار، خیابان خیام به کوی لاله ختم می شود. در شکل ۱ مسیر خط ۱ مترو تبریز مشخص شده است (اتحادیه شرکت های قطار شهری، ۱۳۸۶).

شرایط زمین‌شناسی خط ۱ مترو تبریز شامل رسوبات قرمز رنگ دارای طبقات گچی و نمکی بوده و رایبین[1] (۱۹۳۵) این رسوبات را جزو سازند قرمز فوقانی معرفی کرده‌است (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۴). این سازند غالباً از ماسه سنگ، مارن، سیلتسون و کنگلومرا همراه با طبقات گچی ونمکی تشکیل یافته‌است. محدوده مورد مطالعه به‌وسیله رسوبات آبرفتی جوان پوشیده‌است که در زیر رسوبات آبرفتی مذکور، طبقات مارنی و ماسه سنگی تا کنگلومرایی وجود دارد. شکل ۲ وضعیت زمین‌شناسی خط ۱ مترو تبریز نشان می‌دهد.

مشخصات تونل

تونل خط یک مترو تبریز با استفاده از دستگاه (TBM) و همچنین حفر تونل به روش (NATM) حفاری می‌شود. در این بررسی قسمتی از تونل که با روش (NATM) حفاری می‌شود، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه دارای شرایط زمین‌شناسی یکنواخت شامل شن و ماسه همراه با قلوه سنگ و سیلت به رنگ قهوه‌ای با تراکم بسیار زیاد می‌باشد. حداقل روباره تونل ۸ متر و حداکثر آن ۱۲ متر می‌باشد.

تونل این قسمت دارای ارتفاع ۶/۷ متر و نیز عرض ۶/۷ متر می‌باشد و در دو مرحله حفاری می‌شود. ابتدا قسمت (پله) بالایی که دارای ارتفاع ۵ متر، عرض پایین ترین قسمت آن ۶/۷ متر می‌باشد، حفر می‌شود. سپس

[1]- Raibin

نگهداری موقت آن انجام می‌پذیرد. در مرحله بعدی قسمت (پله) پایینی حفر و نگهداری دائمی تونل انجام می‌پذیرد. لازم به ذکر است که فاصله افقی این دو قسمت (پله) ۵۰ متر می باشد. در شکل ۳ مشخصات تونل و ترتیب حفاری که با روش (NATM) حفاری می‌شود مشخص شده‌است.

روش تونل‌زنی جدید اتریشی NATM[2]

روش NATM مجموعه‌ای عملیات شامل روش حفر، بارگیری و انتقال مواد، نگهداری تونل و دیگر عملیات در این ارتباط می‌باشد. به زعم بیشتر دست‌اندرکاران، فلسفهٔ (NATM) عمدتاً با هدف نگهداری تونل مطرح شده در حالی که کلیهٔ المان‌های مرتبط با آن نیز لحاظ گردیده است. یعنی هدف، ایجاد یک تونل پایدار ضمن لحاظ نمودن پارامترهای مرتبط با احداث تونل و با توجّه به صرفهٔ اقتصادی است.

روش NATM در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ توسط مهندسان برجسته در اروپا پایه‌ریزی شد. که برخی از فعال‌ترین آن‌ها نظیر رابسویچ[3] و مولر[4] از کشور اتریش بودند (Whittaker & Frith, 1990).

پیشرفت این روش به سال‌های قبل از ۱۹۰۰ میلادی برمی‌گردد که برای نخستین بار استفاده از شاتکریت برای نگهداری تونل‌ها مطرح شد. در سال ۱۹۶۲رابسویچ برای اولین بار اصطلاح (NATM) را در کنفرانسی مطرح کرد و از سال ۱۹۶۴ این روش به صورت جهانی پذیرفته‌شد.

در این روش مهمترین عامل پایداری و نگهداری تونل، مقاومت خود سنگ است. در این راستا حفظ مقاومت سنگ میزبان تونل از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود. همچنین از عوامل مهم دیگر در این روش می‌توان به پایش دائمی رفتار سنگ و تصحیح مداوم سیستم نگهداری که با ابزاربندی در موقعیت‌های حساس تونل‌های و بستن نگهداری در قسمت کف تونل برای کنترل بیشتر عملیات می‌توان اشاره‌کرد.

مهم‌ترین مطلب در روش (NATM) در تودهٔ نرم هدف بستن هرچه سریعتر نگهداری و تکمیل نگهداری کف برای جلوگیری از حرکت مواد به درون تونل است. این موضوع بویژه در محیط‌های شهری برای کاهش نشست ضروری است (Whittaker & Frith, 1990).

نشست در اثر حفر تونل

در اثر حفر تونل در نقاط کم عمق در زمی‌ن های سنگی یا غیر سنگی، مخصوصاً در رسوبات آبرفتی سست، جابه‌جایی‌هایی در محیط ایجاد شده و تغییر شکل هایی پدید می‌اید. این جابجایی ها را می‌توان به دو مولفه قائم و افقی تجزیه کرد. مولفه قائم سبب پایین آمدن سطح زمین، یعنی نشست تدریجی و مولفه افقی سبب حالت کششی یا فشاری در سطح زمین می‌شود، این مولفه ها می‌توانند تنش های جدیدی را بر سازه های واقع بر سطح زمین واردکنند (Brady & Brown, 1992)

پارامتر های تونل سازی موثر بر نشست سطحی در سه دسته اصلی تقسیم می شوند:

۱- خصوصیات هندسی تونل : مساحت مقطع عرضی، ارتفاع مقطع سینه کار استخراجی، نوع نگهداری، عمقی که تونل در آن قرار دارد، تک یا دو قلو بودن تونل، پهنای ستون برای تونل های دو قلو.

۲- خصوصیات زمین : مدول تغییر شکل پذیری، نسبت پواسون، نفوذپذیری، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، وزن مخصوص، و غیره ...

---

[2]: New austrian tunnel method
[3] -Rabcewicz
[4] -Mueller

۳- فرآیند نگهداری و استخراج : روش استخراج، نوع استخراج (تمام مقطع یا مرحله‌ای)، فاصله سینه کار تا نگهداری، زمان نگهداری، روش نگهداری، نرخ پیشروی و غیره . . . (Ovidio & Tarcisio, 2008).

روش های شبیه سازی رفتار تونل ها در زمین های خاکی:

تونل های حمل ونقل معمولاً نزدیک سطح زمین حفر می‌شوند و محیط پیرامون آن ها متشکل از سنگ های ضعیف و یا خاک می‌باشد. تحلیل رفتار تونل ها تحت بارهای وارده از اواسط قرن نوزدهم به صورت علمی آغاز گردید. ترازقی در سال۱۹۴۶ روش مدونی برای محاسبه بار وارده بر تونل ارائه کرد که در اکثر پروژه های تونل سازی مورد استفاده قرارگرفت. دو روش برای شبیه سازی، تحلیل رفتار تونل‌ها وجود دارد، یکی مدل سازی آزمایشگاهی و دیگری استفاده از روش های عددی می‌باشد. مدل سازی آزمایشگاهی به دلیل مواجه بودن با لایه بندی متنوع بسیار مشکل می‌باشد. لذا روش های عددی به سبب آن که قادر هستند برای شرایط مختلف، مدل‌ها متفاوتی ارائه دهند، از قابلیت خوبی برای مدل سازی شرایط زمین و تونل برخوردار هستند (Sterpi & Cividini, 2004).

به طور کلی روش های عددی مورد استفاده در آنالیز مسائل تونل سازی بر حسب محیط مورد استفاده به دو دسته کلی، روش‌های پیوسته ونا پیوسته تقسیم می‌شوند. بر مبنای محیط مورد استفاده چهار روش عمده عددی برای حل مسائل عددی می‌باشد که از جمله این روش ها تفاضل محدود می باشد (Barla, 2000).

نرم افزار FLAC 2D بر اساس روش تفاضل محدود کار می‌کند که توانایی مدل کردن رفتار خاک، سنگ یا دیگر مصالحی که ممکن است وقتی به حد تسلیم برسند جریان پلاستیک پیدا کنند را دارا است (Barla, 2000).

مدل سازی تونل خط ۱ متروی تبریز با استفاده از نرم افزار FLAC 2D:

قبل از انجام مدل‌سازی مهم ترین مسئله انتخاب مقطع مناسب می‌باشد. در انتخاب مقطع رعایت فاکتورهای ضروری می‌باشد از جمله این فاکتور می‌توان به خصوصیات ژئومکانیکی لایه خاکی، بررسی سطح ایستایی و روباره تونل اشاره‌کرد.

بر اساس بررسی های صحرایی و نتایج حفاری‌ها، زمین محدوده پروژه از لایه‌های شن و ماسه همراه با قلوه سنگ و سیلت به رنگ قهوه‌ای با تراکم بسیار زیاد می‌باشد. ضخامت خاک دستی در گمانه ها از ۰ تا ۲ متر متغیر بوده است.

مطابق شکل ۴ عمق شناسی سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از کف تونل در مقطع مورد مطالعه می‌باشد. لذا در تحلیل های انجام شده از وجود آب زیرزمینی و تاثیر آن بر سازه صرف نظر شده است. لازم بذکر است که خصوصیات ژئومکانیکی مقطع مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

برای مدل سازی تونل در مرحله اول قسمت فوقانی مدل می‌شود به این ترتیب که پس از ایجاد شبکه مدل، قسمت فوقانی تونل حفر و نگهداری موقت آن صورت می‌پذیرد. شکل ۵ نشان‌دهنده شکل هندسی محدوده مدل ایجادشده برای قسمت فوقانی تونل در نرم افزارFLAC 2D می باشد.

پس از مدل کردن قسمت فوقانی، قسمت تحتانی مدل می شود. در این مرحله قسمت تحتانی تونل حفر، پس از تکمیل مقطع نگهداری دائمی تونل نصب می شود. شکل ۶ نشان دهنده مدل سازی قسمت تحتانی تونل درنرم افزارFLAC 2D را نشان می‌دهد.

پس از اتمام مدل سازی تونل میزان جابجایی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین میزان جابجایی در سقف تونل به مقدار mm ۱۰ اتفاق افتاد. اشکال ۷ و ۸ میزان جابجایی را در هر دو مرحله نشان می‌دهند. نتایج به دست

آمده از میزان جابه‌جایی‌ها در سطح زمین و دیواره‌ها تونل در نرم افزار با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده مقایسه‌شده، که در جدول ۲ این مقایسه ارائه شده است.

همان طوری که ملاحظه می‌شود مقدار نتایج به دست آمده از نرم افزار FLAC 2D اختلاف ناچیزی با مقدار واقعی دارند این امر نشان دهنده‌ی درست بودن مدل سازی می باشد که کمک شایانی در طراحی مناسب تونل، قبل از مرحله حفاری و کنترل نشست می‌نماید. از نتایج به دست آمده می توان به این نکته اشاره کرد که حداکثر میزان نشست در مرحله اول یعنی استخراج قسمت فوقانی و قبل از انجام نگهداری موقت می‌باشد، به دلیل استفاده از پایه قبل از حفاری مرحله بعدی نشست در مرحله بعدی بسیار ناچیز است. برای کاهش نشست می توان گام حفاری را در این مقاطع کمتر از مقاطع دیگر تعیین‌کرد و با توجه به رهایی سریع تنش در این مقاطع نگهداری موقت را سریع تر انجام داد. از نکاتی که می‌توان با استفاده از مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر به‌دست آمده از نرم افزار تحلیل‌کرد اختلاف ناچیز میزان همگرایی در دو دیواره می‌باشد که علت این امر در شروع حفاری از یک سمت تونل در عمل می‌باشد. مقدار ضریب ایمنی به دست آمده توسط نرم افزار ۲/۳۰ می‌باشد که نشان دهنده پایداری تونل پس از تکمیل حفاری و ایجاد نگهداری دائم می‌باشد.

نتیجه گیری :

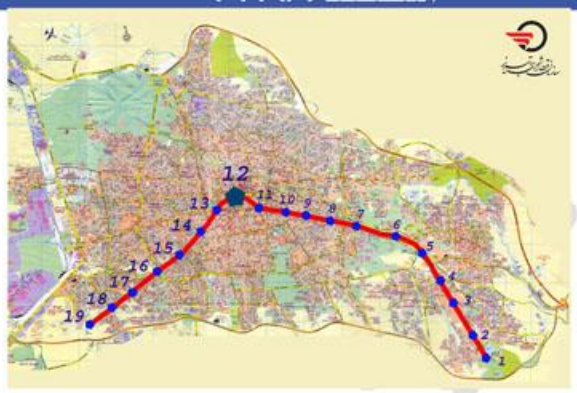
همان‌طوری که اشاره شد نتایج به‌دست‌امده از نرم افزار و مقدار واقعی اختلاف ناچیزی دارند که این امر در طراحی مناسب تونل، انتخاب گام حفاری در مقاطع مختلف زمین شناسی با خصوصیات ژئومکانیکی مختلف و زمان مناسب نصب سیستم نگهداری کمک شایانی می‌کند. ایجاد پایه قبل از حفاری مرحله بعدی در کنترل میزان نشست بسیار موثر است. همچنین نتایج تحلیل‌ها نشان داد که از روش های عددی بخصوص روش تفاضل محدود و نرم افزار Flac می‌توان به عنوان ابزاری مناسب در جهت پیش بینی نشست در تونل متروی تبریز استفاده کرد.

منابع فارسی :

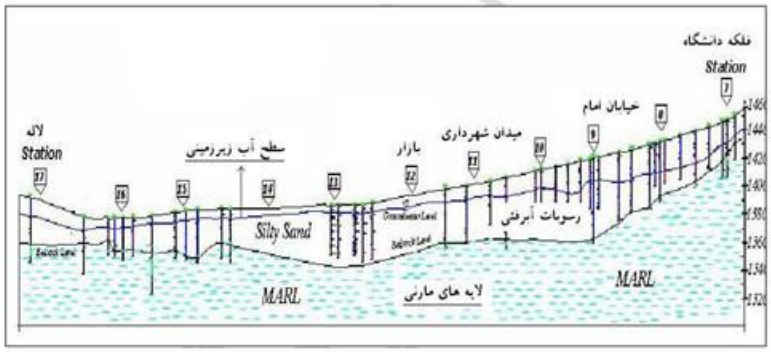
اتحادیه شرکت های قطار شهری، (۱۳۸۶)، خبرنامه اتحادیه شرکت های قطار شهری، شماره ۸.
سازمان قطار شهری تبریز، (۱۳۸۴) گزارش نتایج بررسی‌های زمین شناسی و ژئوتکنیکی خط شماره یک قطار شهری تبریز، ۱۲۰ ص.

References:

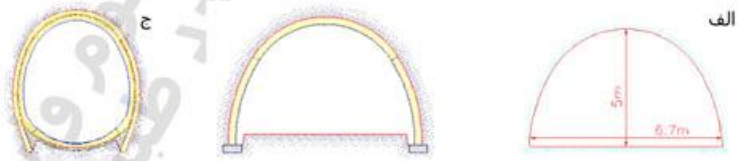
Barla, G, 2000, Continuum and Discontinuum Modelling in tunnel engineering , Italian Ministry for University and Technological Research (M.U.R.S.T) as part of the Research Program "tunneling in difficult condition".
Brady, B.H.D, Brown, E.T, 1992. Rock mechanics for underground mining, Second edition, Chapman and Hall, USA.
Ovidio, S, Tarcisio, C, 2008, Artificial networks analysis of Sao Paulo subway tunnel settlements data, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 23, pp: 482.
Sterpi, D, Cividini, A, 2004, A physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnel in strain softening media , Rock Mechanics and Rock Engineering , vol 37, pp:351 362.
Whittaker, B. N, Frith, R. C, 1990, Tunnelling, Design, Stability and Construction, The institute of Mining and Metallurgy, London.



شکل۱- مسیر خط ۱ مترو تبریز



شکل۲- وضعیت زمین‌شناسی مسیر تونل متروی تبریز

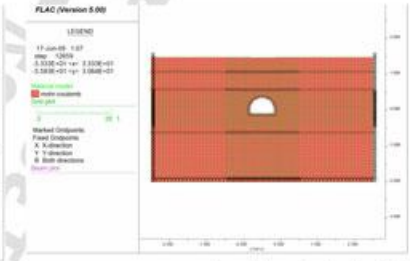


شکل۳- الف-نگهداری موقت قسمت (پله) فوقانی ب-حفر قسمت (پله) فوقانی ج- حفر قسمت (پله) تحتانی وایجاد نگهداری دائم در تونل

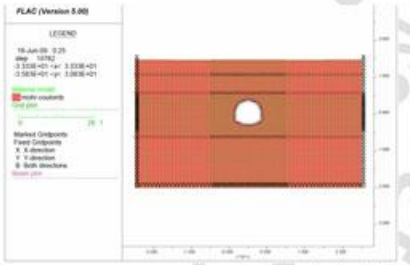
شکل۴- مقطع زمین شناسی

جدول۱- خصوصیات ژئومکانیکی مقطع مورد مطالعه

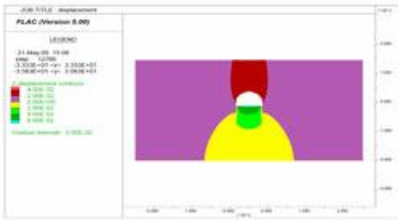
پارامتر	مقدار
چسبندگی (kg/cm^2)	۰/۰۲
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۸/۵
مدول الاستیسیته (kg/cm^2)	۲۵۰
چگالی (kg/m^3)	۱/۸
ضریب پواسون	۰/۳



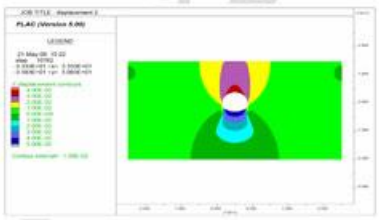
شکل ۵- مدل سازی قسمت فوقانی تونل



شکل ۶- مدل سازی قسمت تحتانی تونل



شکل ۷- میزان جابجایی قسمت فوقانی تونل



شکل ۸- میزان جابجایی قسمت تحتانی تونل

جدول ۲- مقایسه نتایج به دست آمده از نرم افزار FLAC 2D با مقدار واقعی

	میزان همگرایی دردیواره سمت راست(mm)	میزان همگرایی دردیواره سمت چپ(mm)	میزان همگرایی در سقف (mm)	میزان نشست (mm)
مقدار واقعی	۳/۹۲	۴/۷	۸/۵	۳۷/۷
مقدار به دست آمده از نرم‌افزار	۴/۵	۴/۵	۱۰	۳۹

اولین همایش ملی معدن و علوم وابسته
دانشگاه آزاد اسلامی واحد طبس
1388 اسفند