

بررسی تأثیر فشار سینه کار حفاری تونل بر روی قنات با استفاده از مدل سازی عددی (مطالعه موردی: خط دو متروی تبریز)

مهدی سلیمانی قره گل^۱، حمید چاکری*^۲، محمد تقی نسب^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

^۲ دانشیار گروه مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند

^۳ کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند

دریافت: ۱۴۰۱/۲/۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۹/۱۹

چکیده

با توجه به نیازهای روزافزون برای ساخت تونل‌های جدید، موضوع تقاطع تونل با سازه‌های زیرزمینی (قنات) بیشتر مورد توجه مهندسان و محققان قرار گرفته است. هنگامی که تونلی با قطر بزرگ در مجاورت سازه‌های زیرزمینی موجود (قنات) حفر شود باعث ایجاد تغییراتی در شکل، جابه‌جایی‌ها، ممان‌ها و نیروهای محوری تولید شده و تنش‌های کششی و فشاری خواهد شد. در این مقاله به منظور بررسی تأثیر فشار سینه کار در حفاری تونل خط دو متروی تبریز بر روی قنات‌های موجود در کیلومتر ۳+۷۵۰ از نرم‌افزار عددی FLAC3D استفاده شده است. در مدل عددی فاصله تونل از قنات در دو حالت ۲/۵ و ۵ متری و نیز دو حالت با زوایای موازی (صفر درجه) و عمود (۹۰ درجه) تونل نسبت به قنات در نظر گرفته شده و به بررسی مقدار مجاز جابه‌جایی‌های قنات و تونل پرداخته شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج ابزاربندی و روابط تحلیلی مقایسه گردیده است. نتایج نشان داد که میزان اختلاف نتایج مدل عددی با نتایج ابزاربندی در حدود ۸ درصد و در مقایسه با روابط تحلیلی حدود ۳ درصد می‌باشد. بر اساس نتایج مدل سازی عددی با افزایش فشار میزان جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده در سیستم نگهداری قنات و زمین تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد و با کاهش فشار جابه‌جایی‌های رخ داده زیادتر می‌شود. همچنین افزایش فشار سبب کاهش ۲۷ تا ۴۲ نیروی محوری به وجود آمده در سیستم نگهداری قنات می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: قنات، فشار سینه کار، نشست سطح زمین، مدل سازی عددی، FLAC3.

۱- مقدمه

از نشست زمین می‌باشد. هنگامی که تونل جدیدی در مجاورت تونل موجود حفر می‌شود، تأثیرات اندرکنش مهمی می‌تواند ایجاد گردد. برای مثال ساخت تونل جدید می‌تواند تغییر شکل‌های غیرمجاز یا ممان خمشی روی سیستم نگهداری سازه موجود اعمال نماید. این اندرکنش به پارامترهایی نظیر فاصله تونل‌ها، اندازه هر دو تونل، صلبیت سیستم نگهداری و روش استفاده شده برای جایگذاری تونل دوم و مشخصات ژئوتکنیکی محل حفاری بستگی دارد.

قنات‌ها یکی از سازه‌های زیرزمینی هستند که حفر تونل جدید می‌تواند تأثیرات اندرکنشی خاصی بر روی این سازه‌ها ایجاد نماید. قنات یک کانال زیرزمینی با شیب ملایم هست، که برای اتصال زون‌های پرآب موجود در ارتفاعات زیاد به زمین‌هایی که کشت در آن انجام می‌گیرد استفاده می‌شود. در نگاه اول قنات چیزی جزء

رشد و توسعه شهرها در سال‌های اخیر، با افزایش جمعیت شهرنشین همراه بوده است. افزایش جمعیت شهرنشین، همواره مشکلات و معضلات فراوانی را به دنبال دارد که یکی از این مشکلات موجود، نیاز به وجود حمل‌ونقلی آسان، ارزان و ایمن می‌باشد. امروزه این مشکل با استفاده از حمل‌ونقل ریلی شهری یا به عبارتی مترو حل شده است. در محیط‌های شهری با توجه به وجود سازه‌های موجود در سطح شهر نظیر ساختمان‌ها و مهم‌تر از آن حضور افراد در آن و سازه‌های زیرسطحی موجود نظیر فضاهای خدماتی مثل تونل‌های فاضلاب، قنات‌ها و تونل‌های مجاور، همواره دغدغه وارد شدن آسیب به این سازه‌ها و تأثیرات متقابل با آن در اثر حفر تونل وجود داشته است. آسیب‌های وارد شده به این سازه‌های سطحی و زیرسطحی در حین حفر تونل‌های مترو، ناشی

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴-۳۵۴۶۶۷۳

$$S_{max} = 4.71 (\gamma_n Z_0 + \sigma_s) \left(\frac{D^2}{3i+a} \right) \quad (1)$$

که در روابط فوق، a فاصله بین دو تونل بر حسب متر، σ_s بار سطحی اعمال شده و γ_n نیز وزن مخصوص خاک می‌باشد (Herzog, ۱۹۸۵).

Suwansawat و Einstein در سال ۲۰۰۷ در یک پروژه اجرایی در بانکوک تأثیر پارامترهای اجرایی ماشین حفاری فشار تعادلی زمین شامل نرخ نفوذ، فشار سینه کار، فشار تزریق و درصد پرشدگی فضای پشت سپر را بر روی نشست سطح زمین حاصل از حفاری تونل دوقلو مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها در بررسی خود نشان دادند که وقتی پارامترهای اجرایی دو دستگاه مانند یکدیگر باشد در این صورت نشست حاصل از دو تونل متقارن خواهد بود ولی لزومی ندارد این تقارن در خط مرکزی پایه بین دو تونل باشد.

در مطالعه‌ای که توسط DO و همکارانش در سال ۲۰۱۵ روی تونل‌های دوقلو با نرم افزار FLAC3D و خاک با رفتار سخت شونده (CY) انجام گرفته، به بررسی فاصله مرکز به مرکز دو تونل از لحاظ نوع نشست، تأثیر تونل‌ها بر روی همدیگر و همچنین فاصله بحرانی بین دو تونل برای فواصل $0.25D$ ، $0.5D$ ، $1D$ و $1.5D$ پرداخته شده است. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که پروفیل نشست حاصل بر اساس پایه بین دو تونل نامتقارن می‌باشد. تونل موجود در اثر حفاری تونل دومی تحت تأثیر قرار می‌گیرد ولی تونل موجود تأثیر کمی بر روی تونل جدید حفاری شده می‌گذارد. فاصله بحرانی بین دو تونل برابر با قطر تونل بوده و نیروی ماکزیمم در حالت $0.5D$ بزرگ‌تر از $0.25D$ می‌باشد.

در سال ۲۰۱۸ Hossein و Aghdam به بررسی تأثیر فشار سینه کار بر نشست زمین در تونل‌زنی با سپر تعادل فشار زمین (EPB) (مطالعه موردی: خط "الف" متروی قم) پرداختند. مقایسه نتایج نشان داد که افزایش ۴ برابری فشار سینه کار منجر به کاهش حداکثر ۴/۴۵ میلی‌متری در حداکثر نشست می‌شود. بنابراین، افزایش فشار می‌تواند نشست را حتی به میزان کم کاهش دهد.

محمدپورریحان و چاکری در سال ۱۳۹۸ با بررسی تأثیر حالات مختلف عبور دو تونل دوقلو و تونل تکی نسبت به هم نشان دادند که عبور تونل‌های دوقلوی خط ۳ متروی تبریز از زیر تونل‌های خط یک باعث افزایش نشست سطحی به میزان حدوداً ۱۴۰ درصدی می‌شود. همچنین عبور تونل‌های دوقلوی خط ۳ از بالای تونل تکی خط ۲ باعث افزایش ۵۶ درصدی در میزان نشست سطحی می‌گردد.

اسدالهی و مومیوند در سال ۱۳۹۹ تأثیر فشار متعادل‌کننده زمین سپر EPB در جابه‌جایی‌های سینه کار تونل انتقال آب ابوذر تهران را به روش عددی تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت روباره یا نسبت ضخامت روباره به قطر تونل، با اعمال فشار

یک تونل افقی که برای زهکشی کردن آب زیرزمینی استفاده می‌شود به نظر نمی‌رسد، اما حفاری این تونل شامل انواع علوم و فنون می‌باشد. قنات شاهکاری است که در زیرزمین می‌باشد و قابل‌رؤیت نیست، اما اهمیت فنی آن به‌وضوح قابل‌رؤیت است و ارزش آن کمتر از سازه‌های سطحی همچون پل‌ها، قلعه‌ها و برج‌ها و غیره نمی‌باشد. قنات سازه‌ای طولی است که گاهی طول آن به ده‌ها کیلومتر می‌رسد از درون ساختارهای زمین‌شناسی با شرایط متنوع و موانع زیاد عبور می‌کند.



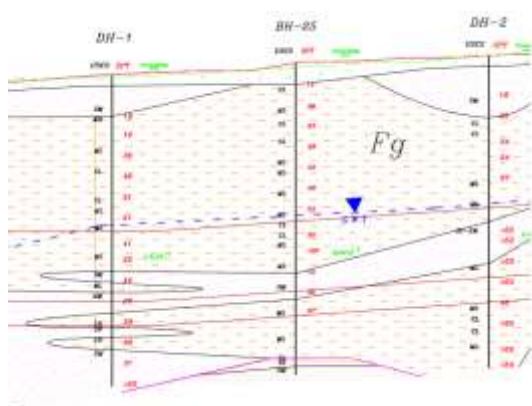
شکل ۱- نمونه‌ای از قنات

مطالعات مختلفی در خصوص بررسی تأثیر تونل‌ها بر روی سازه‌های زیرزمینی انجام گرفته است. بیشتر موارد بررسی شده در راستای اهمیت سازه‌های مجاور بر روی حفاری دو تونل در مجاورت هم بر اساس شرایط زمین، اندازه تونل، عمق تونل، بارهای سطحی و موقعیت نسبی بین دو سازه متمرکز شده است (Jinyang و همکاران، ۲۰۱۵).

در ادامه به بررسی چندین مورد از این مطالعات پرداخته شده است. با توجه به مطالعاتی که تاکنون انجام یافته است، اندرکنش بین سازه‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر جابه‌جایی‌ها و نشست زمین تأثیر می‌گذارد. تأثیر اندرکنش بین تونل‌ها و همچنین میزان فشار سینه کار بر نشست زمین با استفاده از روش‌هایی همچون مدل‌سازی فیزیکی، مدل‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌های محلی مورد بررسی قرار گرفته است (Herzog, ۱۹۸۵؛ Karakus و همکاران، ۲۰۰۷؛ Liu و همکاران، ۲۰۰۸؛ Chakeri و همکاران، ۲۰۱۱؛ Yang و همکاران، ۲۰۱۷؛ رضایی-فرعی و بابایی، ۱۳۹۶؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۸؛ Wang و همکاران، ۲۰۲۰).

Herzog در سال ۱۹۸۵ برای اولین بار رابطه (۱) را برای محاسبه حداکثر نشست سطحی در بالای تونل‌های دوقلو ارائه داد:

حفاری ۹/۴۹ متر می‌باشد. در جدول (۲) مشخصات هندسی دستگاه و سگمنت^۱ ارائه گردیده است.



شکل ۳- مقطع ژئوتکنیکی کیلومتر ۳+۷۵۰ خط ۲ متروی تبریز (س. ق. ش. تبریز)

جدول ۱- مشخصات زمین شناسی و پارامترهای ژئوتکنیکی خط دو مترو تبریز در محدوده مورد بررسی (س. ق. ش. تبریز)

جنس غالب	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴
تناب آبرفت درشت‌دانه (SM) و ریزدانه (CL & ML)				
ضخامت لایه (متر)	۱۹/۴۳	۳/۰۲	۱/۹۴	سنگ بستر
وزن مخصوص				
$\gamma_d - \gamma_s$ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۵/۹-۱۸	۱۸/۷-۲۰/۱	۱۹-۲۰/۸	۲۰-۲۰/۱
چسبندگی (کیلو پاسکال)	۴۰	۱۲	۶۱	۱۲
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۱۴/۵	۲۸	۱۸	۲۸
مدول یانگ (مگاپاسکال)	۱۱۵/۶	۱۲۰	۲۷۵	۱۲۰
ضریب پواسون	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵
عمق آب	۱۴/۲ متر			

جدول ۲- پارامترهای دستگاه حفاری و نگهداری‌های مورد استفاده در خط ۲ متروی تبریز (س. ق. ش. تبریز)

نوع دستگاه حفار	Earth Pressure Balance (EPB) Shield
قطر حفاری	۹/۴۹ متر
قطر تمام‌شده	۸/۴۸ متر
وزن دستگاه	۹۷۵ تن
طول دستگاه	۸۶ متر
قطر خارجی سگمنت	۹/۱۸ متر
ضخامت سگمنت	۰/۳۵ متر
میانگین طول سگمنت	۱/۵ متر
طول سپر	۹ متر

نگهداری سینه‌کار به‌روش‌های تجربی و تحلیلی، میزان جابه‌جایی‌های حاصل از مدل‌سازی سینه‌کار تونل با نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC3D برای نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بیشتر از ۱/۵۶، خیلی بیشتر از نسبت ضخامت روباره به قطر برابر ۱/۳۳ است.

Lin و همکاران در سال ۲۰۲۲ در تحقیقی به محاسبه توزیع فشار زمین بر روی تونل دایره‌ای عمیق با در نظر گرفتن مکانیسم‌های انتقال تنش در مناطق مختلف پرداختند. بررسی نتایج این محققین نشان داد که مدل پیشنهادی آن‌ها نه تنها با نتایج آزمون میانگین فشارهای عمودی زمین بر روی تونل منطبق است، بلکه ویژگی‌های توزیع غیریکنواخت عمودی را نیز توصیف می‌کند. تنش روی تونل دایره‌ای، یعنی حداقل فشار عمودی زمین در خط مرکزی تونل قرار دارد و سپس با دور شدن از خط مرکزی به تدریج افزایش می‌یابد. در این مقاله به بررسی تأثیر فشار سینه‌کار در حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز بر روی قنات‌های موجود پرداخته شده است. شایان ذکر است، برای مدل‌سازی‌های سه بعدی، در این مقاله از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است.

۲- مطالعه موردی

در این بخش به ارائه پارامترهای زمین‌شناسی و هندسی تونل خط ۲ متروی تبریز در کیلومتر ۳+۷۵۰ (محدوده بلوار قدس) پرداخته شده است. خط ۲ در امتداد شرقی- غربی شهر تبریز شروع به حفاری شده است. در شکل (۲) مسیر خط ۲ به همراه محل تقاطع خط ۲ مترو تبریز با قنات‌های موجود در مسیر تونل قابل مشاهده است.

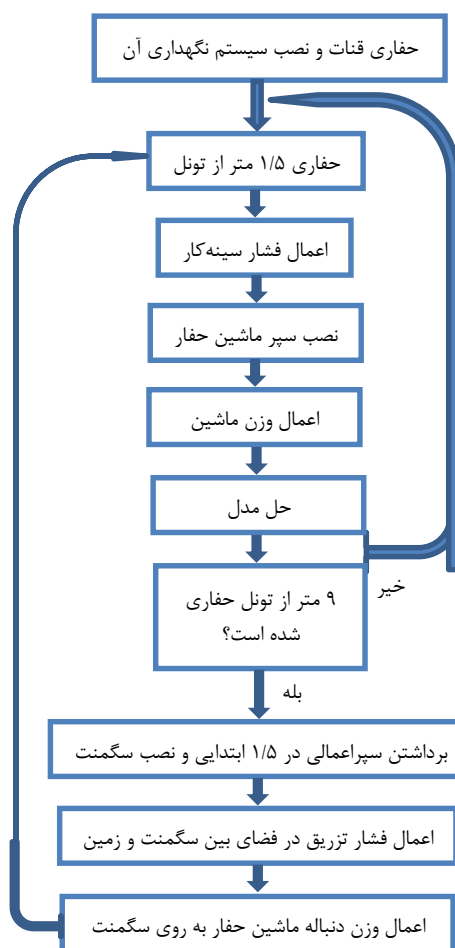


شکل ۲- موقعیت خط ۲ متروی تبریز به همراه قنات‌های موجود در مسیر تونل (س. ق. ش. تبریز)

محدوده مورد بررسی در این مقاله در حوالی گمانه BH-25 می‌باشد. تعداد لایه‌ها و خصوصیات ژئوتکنیکی این لایه‌ها در شکل (۳) و جدول (۱) ارائه شده است. جنس غالب خاک در این محدوده شامل تنابویی از آبرفت درشت‌دانه و ریزدانه می‌باشد. قطر خارجی

۱-۲- مواد و روش‌ها

مدل‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله برای محدوده مورد بررسی از مسیر خط دو تبریز به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D که بر پایه تفاضل محدود می‌باشد انجام گردیده است. مراحل حفاری تونل با استفاده از ماشین EPB به‌طور کامل مدل‌سازی شده است (شکل (۴)).



شکل ۴- فلوچارت روند مدل‌سازی با نرم‌افزار

به‌طور کلی روند حفاری به‌صورت زیر مدل‌سازی شده است. مرحله (۱) حفاری قنات به‌همراه نصب نگهداری آن و حل مدل مرحله (۲) حفاری تونل به‌اندازه عرض قطعات سگمنت نگهداری در هر مدل مرحله (۳) اعمال فشار به سینه‌کار جدید معادل با فشار اعمالی توسط دستگاه حفاری مرحله (۴) نصب المان ساختاری معادل سپر ماشین حفاری در طول جدید حفاری شده مرحله (۵) اعمال وزن ماشین EPB به کف مدل

مرحله ۶) حل مدل بر اساس تعداد گام مؤثر

مرحله ۷) برداشتن فشار اعمالی به سینه‌کار تونل

مرحله ۸) تکرار مراحل دوم تا ششم (بعد از پیشروی تونل به‌اندازه طول سپر یعنی اجرای مراحل ۲ تا ۶ به‌اندازه ۶ مرحله وارد مراحل اجرای سیستم‌های نگهداری دائمی یعنی مراحل ۹ تا ۱۲ می‌شویم).

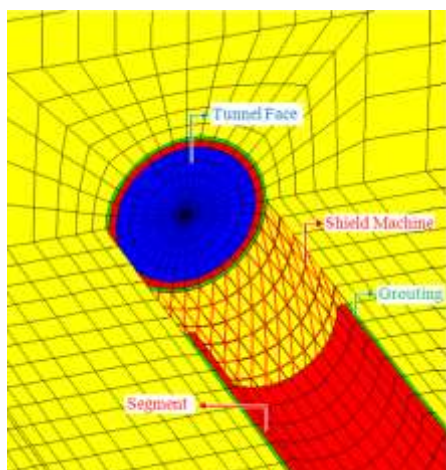
مرحله ۹) برداشتن وزن اعمالی در مرحله پنجم

مرحله ۱۰) نصب قطعات نگهداری به‌منظور اعمال سیستم نگهداری

مرحله ۱۱) اعمال فشار تزریق در ۱/۵ متری سپر و فضای خالی بین سگمنت و زمین

مرحله ۱۲) اعمال وزن دنباله ماشین حفار به روی قطعات نگهداری

در شکل (۵) نمونه‌ای از مدل‌سازی دستگاه حفاری EPB در نرم‌افزار FLAC3D ارائه شده است.



شکل ۵- نمونه‌ای از مدل‌سازی دستگاه حفاری EPB در نرم‌افزار FLAC3D

مدل رفتاری انتخابی بر اساس شرایط زمین، معیار موهر کولمب انتخاب گردیده است. رفتار سیستم نگهداری مورد استفاده برای سپر، سگمنت، گروت و همچنین قنات الاستیک در نظر گرفته شده است و از المان Shell برای سیستم نگهداری قنات (ترکیب آجر و ملات)، سپر و سگمنت استفاده شده و برای گروت از المان حجمی استفاده شده است. در جدول (۳) مشخصات مورد استفاده برای سپر، گروت، سگمنت و سیستم قنات آورده شده است. بار سطحی به مقدار ۲۰ کیلوپاسکال ناشی از بار ترافیک و فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از مقدار فشار سینه‌کار در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

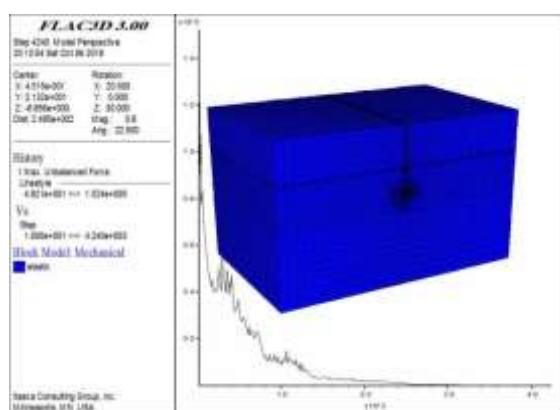
عددی یک پروژه مطابقت نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج حاصل از ایزار بندی و روابط تحلیلی می باشد.

۳-۱- مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی و روش تحلیلی به منظور بررسی صحت و دقت المان بندی

به منظور بررسی و انتخاب المان بندی مناسب برای مدل عددی با نرم افزار FLAC3D در شرایط ژئومکانیکی، نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج حاصل از روش کرش که در شرایط کرنش صفحه ای در اطراف حفیه دایره ای می باشد مقایسه شده است. روش حل کرش در رابطه (۲) و پارامترهای راه حل کرش در شکل (۷) نشان داده شده است.

$$u_r = -\frac{Pa^2}{4Gr} \left[(1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right] \quad (2)$$

در رابطه فوق، K نسبت تنش های افقی به قائم است، همچنین G بیانگر مدول برشی و ν نیز نشانگر ضریب پواسون می باشد. به منظور بررسی صحت مدل سازی، نتایج عددی بر روی مواد ایزوتروپ و پیوسته با رفتار الاستیک خطی انجام شده است.



شکل ۶- مدل ایزوتروپ با رفتار الاستیک خطی

جدول ۴- مشخصات مواد استفاده شده در مدل عددی برای مقایسه با روابط کرش

وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۷/۴۲
قطر تونل (متر)	۹/۴۹
عمق تونل (از مرکز) (متر)	۲۱/۱۹۵
مدول یانگ (مگا پاسکال)	۱۳/۷۱
ضریب پواسون	۰/۳۸
ضریب فشار زمین K	۰/۷

جدول ۳- مشخصات مکانیکی سپر، سگمنت، سیستم نگهداری قنات و گروت

مدول یانگ (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۲۰۰	۰/۲	۷۸/۵۰
۳۰	۰/۲۵	۲۶
۳/۷۲۲	۰/۲۵	۱۷/۸۰
۰/۰۰۹۱۸	۰/۴۳	۱۵

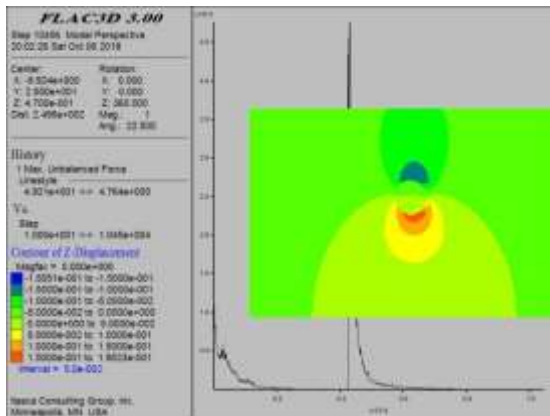
ابعاد مدل عددی ساخته شده برای محدوده مورد بررسی در حالت هایی که تونل و قنات موازی با یکدیگر است در راستای X برابر ۸۱ متر و در راستای Y برابر ۵۱ متر و در راستای Z دارای مقدار ۵۰/۹۴ متر می باشد، در ابعاد مشخص شده مرزهای مصنوعی تحت تأثیر پلاستیک شدگی هایی که در مدل اتفاق می افتد قرار نمی گیرند. در حالت موقعیت عمود تونل بر قنات از مدلی با طول در راستای X برابر ۷۲ متر و در راستای Y برابر ۵۱ متر و در راستای Z برابر با ۵۰/۹۴ استفاده شده است. مقدار روباره تونل در هر دو مورد برابر ۱۶/۴۵ متر و قطر ۹/۴۹ متر می باشد. تعداد زون های مربوط به حالت موازی برابر با ۷۳۳۶۴ زون و برای حالت عمود این مقدار برابر با ۹۱۰۴۰ می باشد.

در انتخاب ابعاد المان ها نیز به منظور جلوگیری از ایجاد خطا در مدل سعی شده تا نسبت ضلع بزرگ به کوچک هر المان از مقدار حداکثر ۳ به ۱ تجاوز ننماید. از طرف دیگر با توجه به بالا بودن تغییرات تنش ها و جابه جایی ها در اطراف تونل با به کار گیری دستور ratio ابعاد المان در اطراف تونل (المان هایی با ابعاد ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر در راستای X و ۰/۵ تا ۰/۷۵ متر در راستای Z با نسبت ۲ به ۱) کاهش و در قسمت های کناری مدل (المان هایی با ابعاد ۱/۵ تا ۲ متر در راستای X و ۰/۷۵ تا ۱ متر در راستای Z با نسبت ۲ به ۱) افزایش داده شده است. برای بررسی تأثیر فشار سینه کار از فواصل ۲/۵ و ۵ متری قنات از تونل که مقدار روباره تونل در همه این نمونه ها دارای مقدار ۱۶/۴۵ متر می باشد استفاده شده است.

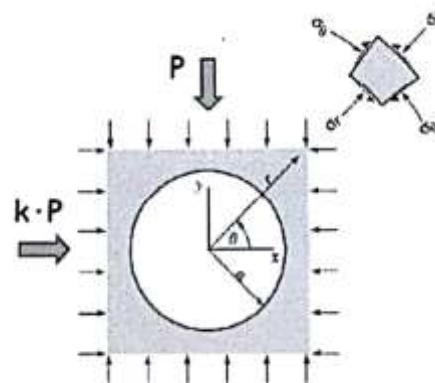
۳- نتیجه و بحث

مدل سازی با استفاده از نرم افزار عددی روشی مناسب برای پیش بینی رخدادهایی هست که در مدل واقعی رخ می دهد ولی اگر در تهیه مدل عددی اشتباه و یا خطایی وجود داشته باشد در این صورت نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی و واقعی تفاوت زیادی خواهد داشت و در صورتی که طراحی عملیات با استناد بر این مدل سازی ها انجام گیرد خطرات جانی و مالی زیادی را در بر خواهد داشت. نخستین گام برای مدل سازی

است. مقدار فشار اعمال شده در واقعیت در کیلومتر از مورد بررسی ۱۳۰ کیلوپاسکال می‌باشد، که این مقدار نیز معادل فشاری است که به طریق روش COB محاسبه گردیده است.

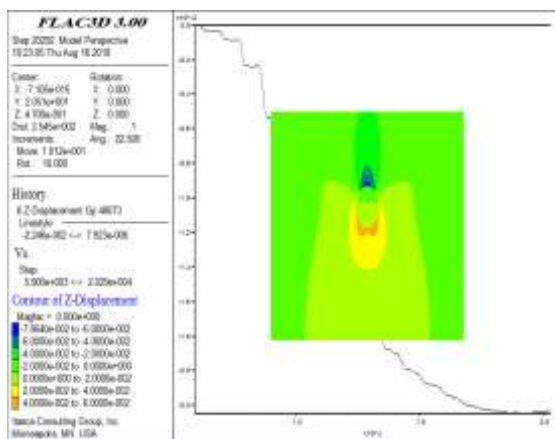


شکل ۷- راه حل کرش



به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی راه حل تحلیلی کرش، میزان جابه‌جایی‌های رخ داده در سقف تونل برای روش عددی و روش کرش مدنظر قرار گرفته شده است. در جدول (۵) مقدار جابه‌جایی‌های رخ داده و شکل (۸) کانتور جابه‌جایی‌ها برای مدل ایزوتروپ با رفتار الاستیک خطی آورده شده است.

شکل ۸- کنتور جابه‌جایی بعد از حفر تونل در مدل عددی



شکل ۹- کنتور جابه‌جایی زمین بعد از حفاری تونل برای مدل صحت‌سنجی

با توجه به شکل موجود مشاهده می‌گردد که مقدار نشست ایجاد شده در سطح زمین برابر با ۲۱/۶ میلی‌متر می‌باشد و مقدار واقعی نشست ایجاد شده در این کیلومتر از ۲۰ میلی‌متر به دست آمده است. بنابراین مقدار اختلاف حاصله ۸٪ می‌باشد. در شکل (۱۰) نیز نشست عرضی برای کیلومتر از ۳+۷۵۰ و فشار ۱۳۰ کیلوپاسکال آورده شده است. با توجه به نمودارها، پروفیل‌ها و نشست‌های حاصله از نرم‌افزار FLAC3D و مقایسه آن با مقدار تئوری نشست اندازه‌گیری شده در محل مورد بررسی، می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار عددی توانایی مناسبی در تعیین این پارامترها دارا می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه نتیجه مدل عددی و روش تحلیلی

شعاع تونل (متر)	مدول برشی (مگا پاسکال)	فشار (پاسکال)	روش کرش (سانتی‌متر)	U_r (در سقف)	مادل سازی (سانتی‌متر)
۴/۷۴۵	۴/۹۸	$۲/۸۶ \times 10^5$	۱۴/۶۱	۱۵/۰۵	

با استفاده از روش تحلیلی کرش میزان جابه‌جایی ۱۴/۶۱ سانتی‌متر برای سقف تونل محاسبه گردید و مقدار ۱۵/۰۵ سانتی‌متر با استفاده از مدل سازی عددی برای تاج تونل به دست آمده است. از مقایسه اعداد حاصله از روش تحلیلی کرش و روش عددی می‌توان نتیجه گرفت که روش عددی در پیش‌بینی مقدار جابه‌جایی‌های رخ داده در اطراف تونل مناسب عمل کرده و دارای مقدار خطای ۲/۹٪+ درصد در مقایسه با روش تحلیلی است. بنابراین با توجه به نتایج حاصل می‌توان با اطمینان نسبی در انجام این مقاله از نرم‌افزار FLAC3D برای بررسی جابه‌جایی‌ها و پارامترهای مورد بررسی استفاده نمود.

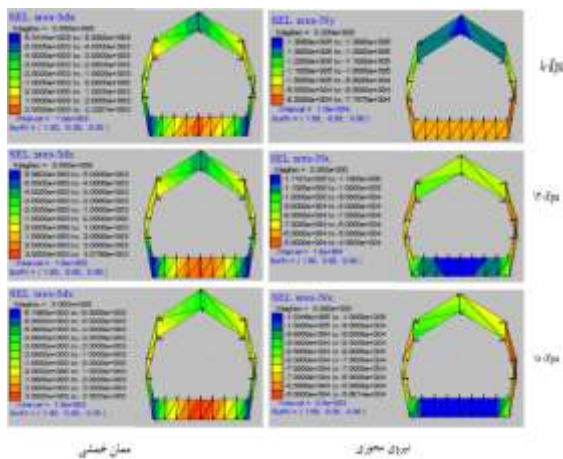
۳-۲- مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی

به منظور بررسی دقت عملکرد این نرم‌افزار، به مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار و مقدار نشست واقعی ایجاد شده در کیلومتر از ۳+۷۵۰ پرداخته شده است. در شکل (۹) تصویری از نیروی نامتعادل و جابه‌جایی‌های قائم لایه‌های خاک نشان داده شده

ممان خمشی و نیروی محوری سیستم نگهداری قنات موازی با فاصله ۲/۵ متری از تونل نشان داده شده است.

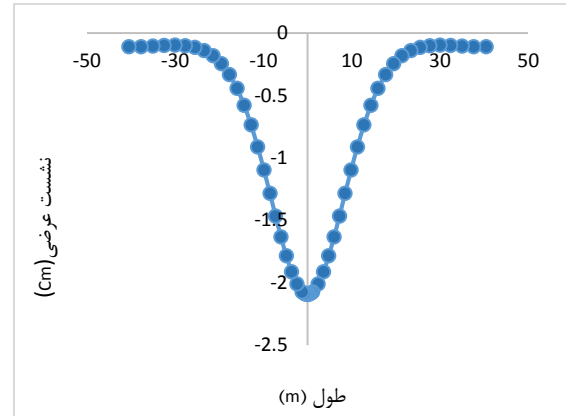


شکل ۱۱- تأثیر فشار سینه‌کار بر روی نیروی محوری سیستم نگهداری قنات در چهار حالت مورد بررسی



شکل ۱۲- بررسی تغییر فشار بر روی ممان خمشی و نیروی محوری در قنات موازی تونل با فاصله ۲/۵ متری

همان‌طور که از جدول (۶) و شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود بیشترین ممان خمشی در همه موارد در فشار بیشینه سینه‌کار تولید می‌شود و به‌ترتیب با کاهش فشار سینه‌کار ممان خمشی تولیدی نیز کاهش می‌یابد، ولی در مورد نیروی محوری ملاحظه می‌شود که نیروی محوری ماکزیمم در فشار سینه‌کار کمینه تولید می‌گردد و با افزایش فشار نیروی محوری تولیدشده نیز کاهش می‌یابد. یکی دیگر از مباحثی که فشار سینه‌کار در آن نقش مهمی دارد بحث جابه‌جایی‌هایی است که می‌تواند در سیستم نگهداری قنات بر اثر تغییر فشار رخ دهد، بنابراین در شکل (۱۳) تأثیر تغییرات فشار بر روی جابه‌جایی سیستم نگهداری قنات موازی آورده شده است.



شکل ۱۰- نشست عرضی بعد از حفر تونل در مدل عددی

۳-۳- بررسی تأثیر فشار نگهداری سینه‌کار تونل

یکی از مباحث بسیار مهم در تونل‌سازی با استفاده از دستگاه EPB بحث فشار سینه‌کاری است که با استفاده از مواد حفاری‌شده در جلوی سینه‌کار ایجاد می‌شود. فشار سینه‌کار پارامتر بسیار مهم در کنترل جابه‌جایی‌ها در اطراف تونل و همچنین در جابه‌جایی سطح زمین می‌باشد. در این بررسی مقدار سه فشار که به‌ترتیب مقادیر ۱۸۰، ۱۳۰، ۸۰ کیلوپاسکال را دارند در نظر گرفته شده است. در جدول (۶) نتایج حاصل از تغییرات فشار در فواصل ۲/۵ و ۵ متری و حالت‌های موازی و عمود آورده شده است.

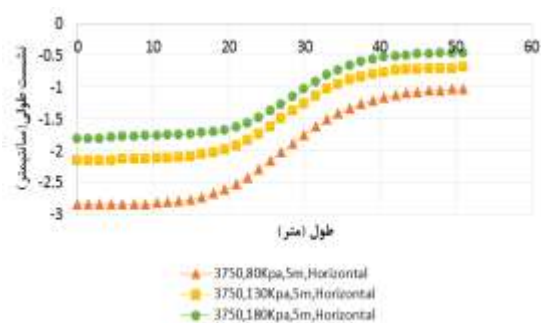
جدول ۶- مقادیر ممان خمشی و نیروی محوری تولید شده بر اساس تغییر فشار سینه‌کار

کیلومتر از ۳+۷۵۰		M	N
فاصله سینه- کار تونل از قنات	فاصله تونل از قنات	فشار سینه‌کار (کیلوپاسکال)	(کیلو نیوتن)
۲/۵	۸۰	۵/۵۴	۱۳۱
	۱۳۰	۵/۹۸	۱۱۲
	۱۸۰	۶/۲۰	۱۰۳
	۸۰	۴/۵۳	۴۲۶
	۱۳۰	۵/۱۳	۳۵۵
	۱۸۰	۵/۴۶	۲۹۹
۵	۸۰	۴/۷۲	۱۱۲
	۱۳۰	۴/۳۲	۸۷
	۱۸۰	۴/۴۱	۸۳/۵
	۸۰	۳/۶۹	۲۶۰
	۱۳۰	۳/۸۵	۲۲۲
	۱۸۰	۴/۰۰	۱۹۴

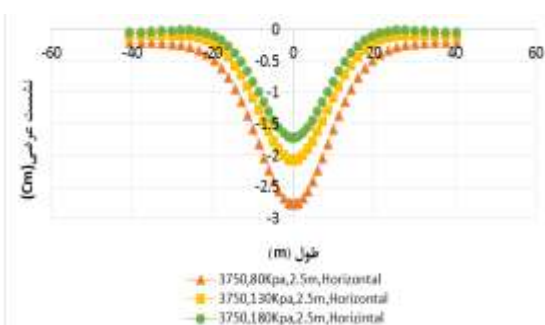
در شکل (۱۱) تأثیر فشار سینه‌کار بر روی میزان نیروی محوری سیستم نگهداری قنات و در شکل (۱۲) نیز تأثیر آن بر میزان

همان طوری که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر شکل متقارن و یا نامتقارن در مورد سیستم نگهداری قناتی که به حالت عمود بر تونل قرار دارد به میزان فشار وارد شده به سینه کار تونل بستگی دارد و با افزایش فشار مقدار این نامتقارنی کاهش می‌یابد و به طوری که در فشار ۸۰ کیلوپاسکال سیستم قنات یک تغییر شکل کاملاً نامتقارنی را تجربه کرده است و در مورد فشار ۱۳۰ کیلوپاسکال این نامتقارنی کاهش یافته است به طوری که در فشار ۱۸۰ کیلوپاسکال کاملاً سیستم قنات یک تغییر شکل متقارنی را تجربه کرده است، همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فشار سینه کار نشست‌های رخ داده در سیستم نگهداری قنات کاهش می‌یابد.

برای بررسی تأثیر فشار در نشست‌های طولی و عرضی اتفاق افتاده در سطح زمین فقط یک فاصله و یک حالت از موقعیت قرارگیری قنات نسبت به تونل مدنظر قرار گرفته شده است. در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) پروفیل نشست عرضی و طولی برای فاصله موازی ۲/۵ متری و فشارهای ۸۰، ۱۳۰، ۱۸۰ نشان داده شده است.

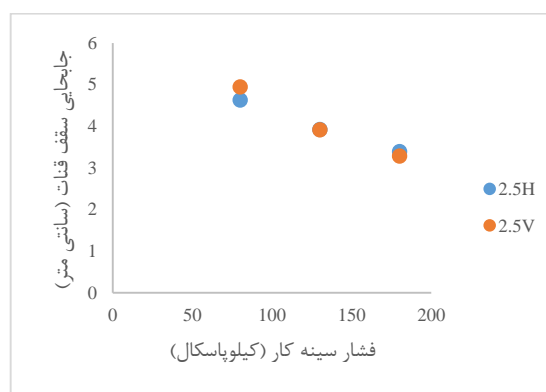
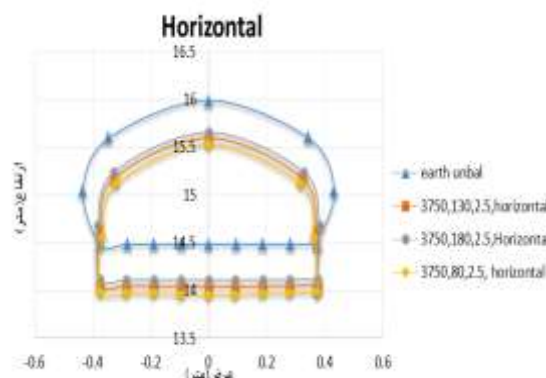


شکل ۱۵- بررسی تغییر فشار سینه کار بر روی نشست طولی سطح زمین



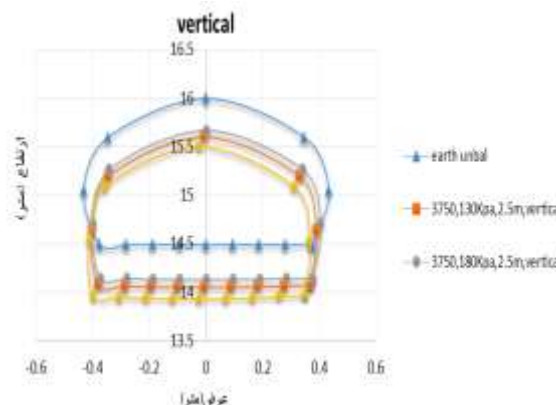
شکل ۱۶- بررسی تغییر فشار سینه کار بر روی نشست زمین سطح زمین

با توجه به این شکل‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رابطه نشست و فشار رابطه معکوس داشته و در یک ارتفاع ثابت قنات نسبت به تونل مقدار نشست در حالتی در سطح زمین کمتر است



شکل ۱۳- بررسی تأثیر فشار سینه کار بر روی تغییر شکل قنات در فاصله ۲/۵ متری

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که تغییر شکل‌های مربوط به سه فشار ۸۰، ۱۳۰، ۱۸۰ کیلوپاسکال در مورد قناتی که موازی با تونل قرار دارد متقارن می‌باشد و میزان نشست‌های انجام گرفته با فشار مربوطه رابطه معکوس دارد و میزان جابه‌جایی در فشار کمتر بیشتر از بقیه موارد می‌باشد. در شکل (۱۴) تغییر شکل مربوط به داده‌ها با ۱۰ برابر بزرگ‌نمایی برای حالت عمودی آورده شده است.



شکل ۱۴- بررسی تأثیر فشار سینه کار بر روی تغییر شکل سیستم نگهداری قنات در فاصله ۵ متری

نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز،
۱۳۹۹، ۵۰ (۴)، ۹۳-۸۳.

DOI:10.22034/JCEE.2020.21903.1540

رضایی فرعی اح، بابائی س، "بررسی اثرات پارامترهای
مختلف در تعیین میزان بهینه فشار جبهه کار تونل-
های مکانیزه در خاک‌های رسی- سیلتی"، نشریه
مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز،
۱۳۹۶، ۴۷ (۳)، ۴۵-۳۳.

مجموعه گزارشات ژئوتکنیک خطوط ۱، ۲ و ۳ سازمان
قطار شهری تبریز و حومه.

محمدپور ریحان ح، چاکری ح، "بررسی اندرکنش بین
تونل‌های خطوط ۳ و ۲، ۱، تبریز"، مجله مدل‌سازی
در مهندسی، ۱۳۹۸، ۱۷ (۵۸)، ۵۳-۴۱.

DOI:10.22075/JME.2019.15621.1553

Aghdam M, Hosseini M, "Investigating the Effect of Face
Pressure on Ground Settlement in Tunneling with
Earth Pressure Balance (EPB) Shield", Journal of
Engineering Geology, 2018, 12, 107. DOI:
10.18869/acadpub.jeg.12.5.107

Chakeri H, Hasanpour R, Hindistan MA, Ünver B,
"Analysis of interaction between tunnels in soft
ground by 3D numerical modeling", Bulletin of
Engineering Geology and the Environment, 2011,
70 (3), 439-448. DOI:10.1007/s10064-010-0333-8

Do NA, Dias D, Oreste P, "3D Numerical Investigation
on The Interaction Between Mechanized Twin
Tunnels in Soft Ground", Environ Earth Sci, 2015,
73, 2101-2113. DOI:10.1007/s12665-014-3561-6

Herzog M, "surface subsidence above shallow tunnels
(in German)", Bautechnik, 1985, 62, 375-377.
DOI:10.22075/JME.2019.15621.1553

Jinyang Fu, Junsheng Yang, Li Yan, Syed Muntazir Abbas,
"An analytical solution for deforming twin-parallel
tunnels in an elastic half plane", International
Journal for Numerical and Analytical Methods in
Geomechanics, 2015, 39, 524-538.
DOI:10.1002/nag.2322

Karakus M, Ozsan A, Basarir H, "Finite element analysis
for the twin metro tunnel constructed in Ankara
Clay-Turkey", Bulletin of Engineering Geology and
the Environment journal, 2007, 66, 71-79.
DOI:10.1007/s10064-006-0056-z

Liu HY, Small JC, Carter JP, Williams DJ, "Effects of
tunneling on existing support systems of
perpendicularly crossing tunnels", Computer
Geotechnics, 2009, 36 (5), 880-894.
DOI:10.1016/j.compgeo.2009.01.013

Lin XT, Chen RP, Wu HN, Meng FY, Su D, Han K,
"Calculation of earth pressure distribution on the
deep circular tunnel considering stress-transfer
mechanisms in different zones", Tunnelling and
Underground Space Technology, 2022, 119,
104211. DOI:10.1016/j.tust.2021.104211

Suwansawat S, Einstein HH, "Describing Settlement
Troughs over Twin Tunnels Using a Superposition
Technique", Journal of Geotechnical and
Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (4),

که فشار اعمالی در سینه‌کار بیشینه است و در حالت مورد بررسی
در فشار ۱۸۰ کیلوپاسکال این اتفاق حادث می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

از جمله مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی‌های انجام یافته می-
توان به موارد زیر اشاره نمود:

- به‌منظور صحت‌سنجی، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج
ابزاربندی مقایسه گردید. همان‌طوری‌که در متن نیز اشاره شد
ماکزیمم جابه‌جایی سطح زمین در مدل‌سازی عددی ۲۱/۶ میلی-
متر و در اندازه‌گیری‌های واقعی از ابزاربندی ۲۰ میلی‌متر به‌دست
آمده است. این مقادیر به‌همدیگر نزدیک بوده و میزان اختلاف آن
حدود ۸٪ می‌باشد.

- با بررسی تغییر فشار سینه‌کار تونل و فشار تزریق گروت با
استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی مشخص گردید که در هر دو فاصله
۲/۵ و ۵ متری قنات از تونل با افزایش فشار سینه‌کار از ۸۰ به
۱۸۰ کیلوپاسکال میزان جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده در سیستم
نگهداری قنات و نشست سطح زمین تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد.

- همچنین بررسی‌های انجام‌شده بر روی تغییرات فشار نشان
داد که در مورد قنات‌های قائم بر تونل با افزایش فشار تغییرات
نامتقارن در سیستم نگهداری قنات کمتر شده و حتی در بعضی
فواصل این تغییرشکل‌ها متقارن می‌شود. از سوی دیگر افزایش دو
برابری فشار می‌تواند جابه‌جایی‌های سقف قنات را تا ۵۰ درصد
کاهش دهد.

- از سوی دیگر با افزایش فشار سینه‌کار، نیروی محوری به‌وجود
آمده در سیستم نگهداری قنات از ۲۷ تا ۴۲ درصد کاهش پیدا
می‌کند. روند کاهش نیروی محوری در فاصله ۲/۵ متری قنات از
تونل برای حالت‌های افقی و قائم (۲۷ درصد برای حالت افقی و
۴۲ درصد برای حالت قائم) تغییرات بیشتری نسبت به کاهش
نیروی محوری در فاصله ۵ متری (۳۴ درصد برای هر دو حالت
افقی و قائم) دارد. این امر بیانگر آن می‌باشد حالت قرارگیری قنات
نسبت به تونل (افقی یا قائم) تأثیری بر تغییرات نیروی محوری با
افزایش فشار سینه‌کار ندارد.

۵- مراجع

امیری م، رجبی س، دارابی م، "تأثیر اثر هندسه مقطع بر روی
میزان نشست زمین در اثر حفر تونل تک و دوقلو (مطالعه
موردی: تونل متروی اصفهان)"، نشریه مهندسی عمران و
محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۸، ۴۹ (۲)، ۴۶-۳۵.
DOI:10.22034/JCEE.2019.9296

اسدالهی م، مومیوند ح، "تحلیل کلیدی تأثیر فشار متعادل‌کننده
زمین سپر EPB در جابه‌جایی‌های سینه‌کار تونل به‌روش
عددی (مطالعه موردی: تونل انتقال آب ابوذر تهران)"،

445-468. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(445)

Wang HN, Gao X, Wu L, Jiang MJ, "Analytical study on interaction between existing and new tunnels parallel excavated in semi-infinite viscoelastic ground", *Computers and Geotechnics*, 2020, 120 (103385). DOI:10.1016/j.compgeo.2019.103385

Yang J, Liu C, Chen Q, Xie X, "Performance of overlapped shield tunneling through an integrated physical model tests: numerical simulations and real-time field monitoring", *Underground Space*, 2017, 2 (1), 45-59. DOI:10.1016/j.undsp.2017.04.002

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Tunnel Face Support Pressure Effects on the Aqueduct Using Numerical Modeling (Case Study Tabriz Metro Line 2)

Mehdi Soleymani^a, Hamid Chakeri^{b,*}, Mohammad Taghi Nasab^b

^a Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

^b Department of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 26 April 2022; **Review:** 04 December 2022; **Accepted:** 09 January 2023

Keywords:

Aqueduct, Face Support Pressure, Surface Settlement, Numerical Modeling, FLAC3D.

1. Introduction

In urban environments, due to the existence of structures in the city such as buildings and, more importantly, the presence of people in them, as well as existing underground structures such as service spaces including sewage tunnels, aqueducts, and adjacent tunnels, there have been always concerned about damages to these structures and their interactions existed as a result of tunneling. Significant interaction effects can occur when a new tunnel is dug in the vicinity of an existing tunnel. For example, the construction of a new tunnel could impose unauthorized deformations or bending moments on the existing structural support system. This interaction depends on parameters such as the distance of the tunnels, the size of both tunnels, the rigidity of the support system and the method used to locate the second tunnel, and the geotechnical characteristics of the excavation site.

Aqueducts are underground structures and excavating new tunnels can have special interaction effects on these structures. An aqueduct is a subterranean canal with a gentle slope, which connects water-rich zones at high altitudes to the fields where cultivation takes place.

According to studies, the interaction between underground structures is one of the critical factors that affect ground displacement and subsidence. The effect of the interaction between the tunnels as well as the amount of face pressure on the ground subsidence has been investigated using methods such as physical modelling, numerical modelling, and local measurements.

In this paper, the effect of face pressure has been investigated in excavating the 2nd tunnel Line of Tabriz Metro on existing aqueducts. It is worth noting that for 3D modelling, FLAC3D software is used in this paper.

2. Methodology

2.1. Modelling

The applied modelling in this paper for the investigated area of 2th Line of Tabriz Subway has been done three-dimensionally by using FLAC3D software, which is based on finite differences. The tunnel excavation steps are completely modelled using an EPB machine. These steps include digging the aqueduct and setting up its support system, tunnel excavation, applying pressure to the tunnel face, installing the support and injection system behind the segments, and the ground around the tunnel. The Mohr-Coulomb criterion has been selected as the behavioral model based on the ground conditions. The behavior of elastic has been considered as an applied support system for the shield, segment, grout, and aqueduct, and the Shell element is used for the

* Corresponding Author

E-mail addresses: m-soleimani@tvu.ac.ir (Mehdi Soleymani), chakeri@sut.ac.ir (Hamid Chakeri), mo_taghinasab@sut.ac.ir (Mohammad Taghi Nasab)

aqueduct support system (combination of brick and mortar), shield and segment and finally, the volumetric element is applied for grout.

3. Results and discussion

To investigate and compare the results of numerical modelling with the analytical solution of the crash, the amount of displacement that occurred in the tunnel roof for the numerical method and the crash method has been considered.

By using the crash analysis method, the displacement rate of 14.61 cm for the tunnel roof was calculated, and the value of 15.05 cm was obtained using numerical modelling for the tunnel crown. By comparing obtained numbers from the analytical method of the crash and the numerical method, it can be concluded that the numerical method is suitable in predicting the amount of displacement that occurred around the tunnel and compared to the analytical method, has an error rate of + 2.9%. Therefore, according to the results, FLAC3D software with relative confidence can be used in this article to investigate the displacements and parameters under investigation.

The amount of applied pressure is 130kPa, which is equivalent to the pressure calculated by the COB method. According to the results, it is observed that the amount of subsidence created on the ground is equal to 21.6mm and the actual amount of created subsidence in this kilometer is 20mm. Therefore, the obtained difference is 8%.

Symmetric or asymmetric deformation in the case of an aqueduct support system perpendicular to the tunnel depends on the amount of pressure that is applied to the face of the tunnel, and the amount of this asymmetric decreases by increasing pressure, so that aqueduct has experienced a completely asymmetric deformation at a pressure of 80kPa and this asymmetry has decreased at a pressure of 130kPa so that the aqueduct system, at a pressure of 180kPa, has experienced a completely symmetrical deformation, it also might be evident that the occurred subsidence, decreases in the aqueduct support system by face pressure increasing.

Subsidence and pressure are inversely related, and at a constant height of the aqueduct compared to the tunnel, the amount of subsidence is less in a situation where the pressure is maximum in the face and, in this investigation, this occurs at a pressure of 180kPa.

4. Conclusions

The most important results of the studies are as the following:

- The result obtained by the numerical model is close to the obtained result of actual measurements, and the difference is about 8%.
- By studying the change in tunnel face pressure and grout injection pressure using three-dimensional modelling, it was found that with increasing pressure from 80 to 180 kPa, the quantity of displacements in the aqueduct and ground support system and ground settlement will be decreased by 60%.
- Also, the performed studies on pressure changes suggested that, in the case of aqueducts perpendicular to the tunnel, asymmetric changes in the aqueduct support system decrease with increasing pressure and even become symmetrical at some intervals and doubling the pressure can reduce the displacements of the aqueduct roof by 50%.
- On the other hand, with the increase in face pressure, the axial force generated in the aqueduct maintenance system decreases from 27 to 42 %. The trend of reducing the axial force at a distance of 2.5 meters from the aqueduct to the tunnel for horizontal and vertical states (27% for the horizontal state and 42% for the vertical state) has more changes than the reduction of the axial force at a distance of 5 meters (34% for both horizontal modes and vertical states). This indicates that the position of the aqueduct in relation to the tunnel (horizontal or vertical) has no effect on changes in the axial force with the increase in the pressure of the aqueduct.

5. References

- Aghdam M, Hosseini M, "Investigating the Effect of Face Pressure on Ground Settlement in Tunneling with Earth Pressure Balance (EPB) Shield", *Journal of Engineering Geology*, 2018, 12, 107. DOI:10.18869/acadpub.jeg.12.5.107
- Chakeri H, Hasanpour R, Hindistan MA, Ünver B, "Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70 (3), 439-448. DOI: 10.1007/s10064-010-0333-8

- Do NA, Dias D, Oreste P, "3D Numerical Investigation on The Interaction Between Mechanized Twin Tunnels in Soft Ground", *Environ Earth Sci*, 2015, 73, 2101-2113. DOI: 10.1007/s12665-014-3561-6
- Herzog M, "surface subsidence above shallow tunnels (in German)", *Bautechnik*, 1985, 62, 375-377. DOI:10.22075/JME.2019.15621.1553
- Jinyang Fu, Junsheng Yang, Li Yan, Syed Muntazir Abbas, "An analytical solution for deforming twin-parallel tunnels in an elastic half plane", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 39, 524-538. DOI:10.1002/nag.2322
- Karakus M, Ozsan A, Basarir H, "Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay-Turkey", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment journal*, 2007, 66, 71-79. DOI: 10.1007/s10064-006-0056-z
- Liu HY, Small JC, Carter JP, Williams DJ, "Effects of tunneling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels", *Computer Geotechnics*, 2009, 36 (5), 880-894. DOI:10.1016/j.compgeo.2009.01.013
- Lin XT, Chen RP, Wu HN, Meng FY, Su D, Han K, "Calculation of earth pressure distribution on the deep circular tunnel considering stress-transfer mechanisms in different zones", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 119, 104211. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104211
- Suwansawat S, Einstein HH, "Describing Settlement Troughs over Twin Tunnels Using a Superposition Technique", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133 (4), 445-468. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(445)
- Wang HN, Gao X, Wu L, Jiang MJ, "Analytical study on interaction between existing and new tunnels parallel excavated in semi-infinite viscoelastic ground", *Computers and Geotechnics*, 2020, 120 (103385). DOI:10.1016/j.compgeo.2019.103385
- Yang J, Liu C, Chen Q, Xie X, "Performance of overlapped shield tunneling through an integrated physical model tests: numerical simulations and real-time field monitoring", *Underground Space*, 2017, 2 (1), 45-59. DOI:10.1016/j.undsp.2017.04.002